



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS PENSKALAAN LATERAL DAN VERTIKAL DARI  
RANCANGAN SILICON GERMANIUM HETEROJUNCTION  
BIPOLAR TRANSISTOR (HBT'S SIGE)**

**DISERTASI**

**AHMAD TOSSIN ALAMSYAH  
NPM.0606037613**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK, MEI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PENSKALAAN LATERAL DAN VERTIKAL DARI  
RANCANGAN *SILICON GERMANIUM HETEROJUNCTION*  
*BIPOLAR TRANSISTOR (HBT SIGE)***

**DISERTASI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor**

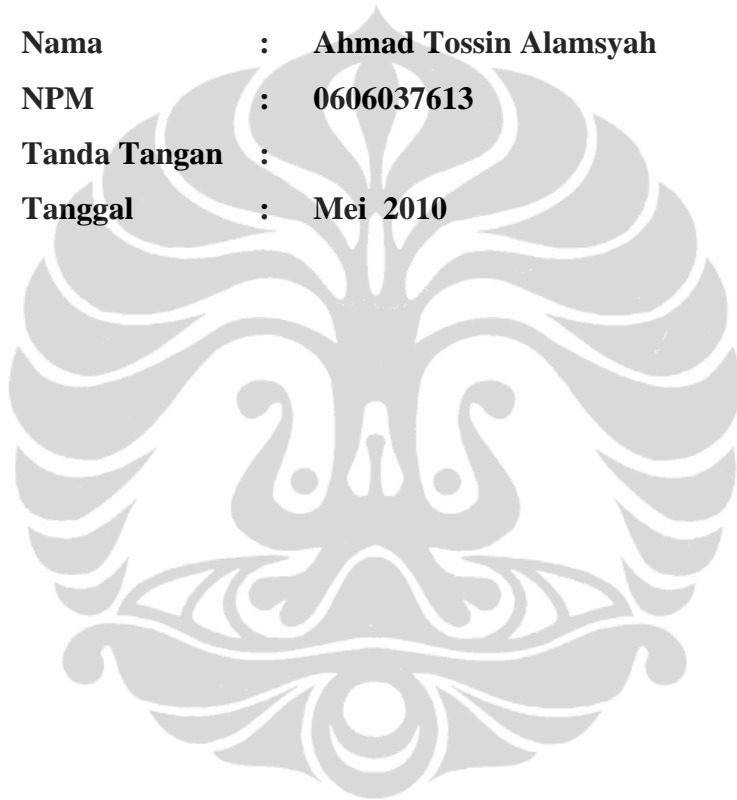
**AHMAD TOSSIN ALAMSYAH**  
NPM.0606037613

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK, MEI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Ahmad Tossin Alamsyah**  
**NPM : 0606037613**  
**Tanda Tangan :**  
**Tanggal : Mei 2010**



## HALAMAN PENGESAHAN

:  
Disertasi ini diajukan oleh :  
Nama : Ahmad Tossin Alamsyah  
NPM : 0606037613  
Jurusan : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Penskalaan Lateral dan Vertikal dari rancangan  
*Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor*  
(HBT SiGe)

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia .**

### DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSc .....  
Ko. Promotor : Prof. Dr. Ir. Nyi Raden Poespawati, MT .....  
Tim Penguji : Prof. Dr. Ir. Harry Sudibyo, DEA (Ketua) .....  
Prof. Dr. Ir. Eko Tjipto Rahardjo, MSc (Anggota) .....  
: Prof. Dr. Masbach R. Siregar, APU (Anggota) .....  
: Dr. Ir. Muhamad Asvial, MEng (Anggota) .....  
: Dr. Ir. Agus Santoso Tamsir, MT (Anggota) .....

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : Mei 2010.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan disertasi dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan Pendidikan S3 di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, MSc selaku Promotor yang telah menentukan dan menyetujui judul ini sebagai bagian dari Riset pada Sensor Devices Research Group (SDRG), bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan petunjuk dan saran dalam penyelesaian riset ini.
- (2) Prof. Dr.Ir.NR.Poespawati, MT selaku ko-promotor yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan petunjuk dan saran dalam penyelesaian riset ini.
- (3) Prof.Dr.Ir. Eko Tjipto Rahardjo,MSc, Prof.Dr.Ir.Harry Sudiby,DEA, Prof.Dr. Masbach R.Siregar, APU, Dr.Ir. Muhamad Asvial, MEng. dan Dr.Ir. Agus Santoso Tamsir, MT selaku penguji dalam disertasi ini.
- (4) Prof Dr. Ir. Johnny Wahyuadi Soedarsono, DEA dan staf, selaku Pimpinan Politeknik Negeri Jakarta yang telah membantu secara materil maupun imateril serta mendorong untuk segera menyelesaikan disertasi ini.
- (5) Ibunda Hj. Siti Salamah, istri Hj.Nining Latianingsih dan anak-anak serta kerabat tercinta yang telah memberikan dukungan melalui, doa dan semangat, sehingga disertasi ini dapat diselesaikan dan
- (6) sahabat yang telah banyak membantu dalam penyelesaian disertasi in..

Akhir kata, Semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tulisan disertasi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, Mei 2010

Ahmad Tossin Alamsyah

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ahmad Tossin Alamsyah  
NPM : 0606037613  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Disertasi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Analisis Penskalaan Lateral dan Vertikal dari rancangan *Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor (HBT SiGe)*.**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih mediakan memformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : Mei 2010  
Yang menyatakan,

Ahmad Tossin Alamsyah

## ABSTRAK

Nama : Ahmad Tossin Alamsyah  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisis Penskalaan Lateral dan Vertikal dari rancangan  
*Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor*  
(HBT SiGe)

Disain geometri dengan kombinasi lateral dan vertikal berhasil dirancang, disimulasikan pada devais *Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor* (HBT SiGe). Terbukti menghasilkan beberapa kelebihan terutama pada *noise figure* yang rendah seperti diuraikan pada disertasi ini. Riset ini bertujuan untuk mendapatkan devais dengan *noise figure* ( $F_n$ ) yang rendah pada operasi frekuensi tinggi. Metode riset yang dilakukan berupa pemodelan menggunakan software komersil Bipole3 dari BIPSIM inc, dengan acuan berdasarkan HBT SiGe IBM generasi pertama.

Model acuan dengan lithography 0,50  $\mu\text{m}$ , memiliki unjuk kerja keluaran ;  $f_T = 45$  Ghz,  $\beta = 110$ ,  $f_{\text{maks}} = 65$  Ghz,  $R_{\text{bb}} = 18,9$  ohm,  $\beta V_{\text{CEO}} 3,3$  Volt, dan  $F_n = 1,07$  dB pada  $f_{\text{imp}} = f_T$ . Meningkatkan unjuk kerjanya menjadi  $f_T = 79,4$  Ghz,  $\beta = 284$ ,  $f_{\text{maks}} = 127$  Ghz serta  $R_{\text{bb}} = 9,0$  ohm dengan  $V_{\text{CEO}} 2,7$  Volt dan  $F_n = 0,36$  dB pada  $f_{\text{imp}} = f_T$  ketika parameter lateral dan vertikal diubah.

Perubahan parameter lateral dilakukan dengan menambah terminal basis dari satu menjadi dua, memperkecil ukuran model menjadi 80% dari ukuran semula, menurunkan *lithography* menjadi 0,09  $\mu\text{m}$ . Sedangkan untuk parameter vertikal dilakukan dengan cara merubah *profile* germanium pada basis dari segitiga menjadi trapesium, menaikkan *mole fraction* ( $x$ ) dari 7,5% menjadi 10%, serta memperkecil lebar basis menjadi 50% dari ukuran semula. Hasil analisis validasi HBT SiGe acuan dan model memberikan deviasi rata-rata 6%.

Parameter lateral berpengaruh pada nilai arus kolektor ( $I_C$ ), resistansi parasitis ( $R_{\text{bb}}$ ) dan frekuensi maksimum ( $f_{\text{maks}}$ ) sedangkan parameter vertikal berpengaruh pada frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) dan *current gain* ( $\beta$ ). Pemilihan nilai parameter lateral dan vertikal yang tepat, dapat menghasilkan model dengan *noise figure* ( $F_n$ ) yang rendah pada frekuensi kerja yang tinggi serta arus kolektor ( $I_C$ ) yang kecil.

**Kata kunci:** Lateral, Vertikal, HBT SiGe.

## ABSTRACT

Name : Ahmad Tossin Alamsyah  
Program of Study : Electrical Engineering  
Title : Lateral and Vertical Scaling analysis of the Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor's design (HBT's SiGe)

The Geometric design with a lateral and vertical combination has been successfully designed, simulated on Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor (SiGe HBT) and has shown several advantages, particularly low noise figure as described in this dissertation. The research aims to obtain the SiGe HBT devices with a lowest noise figure ( $F_n$ ) at high frequency operation. The method is based on modeling of used commercial software Bipole3 from BIPSIM inc, based on the first-generation IBM SiGe HBT model as a reference.

The reference model with the lithography of  $0.50\mu\text{m}$ , has the output performance of ;  $f_T = 45$  Ghz,  $\beta = 110$ ,  $f_{maks} = 65$  Ghz,  $R_{bb} = 8.9$  ohms,  $V_{CE} = 3.3$  Volt, with  $F_n = 1.07$  dB at  $f_{inp} = f_T$ , the performance increases to  $f_T = 79.4$  Ghz,  $\beta = 284$ ,  $f_{maks} = 27$  Ghz and  $R_{bb} = 9.0$  ohms,  $\beta V_{CE} = 2.7$  Volt and  $F_n = 0.36$  dB at  $f_{inp} = f_T$  when the lateral and vertical parameters were modified.

Modification of the lateral parameters is done by using two base terminals instead of one, reducing the size of the model to be 80% from original size, reducing the lithography to  $0.09\mu\text{m}$ . While the vertical parameter is changed by converting the profile of germanium from the triangle to trapezoid basis, increasing the mole fraction ( $x$ ) from 7.5% to 10%, and reducing the base width to be 50% from original size. The validation of the SiGe HBT with a reference model has an average deviation of 6%.

The lateral parameters have influenced the value of the collector current ( $I_C$ ), parasitic resistance ( $R_{bb}$ ) and the maximum frequency ( $f_{maks}$ ) while the vertical parameters influence the frequency threshold ( $f_T$ ) and current gain ( $\beta$ ). The appropriate selection of lateral and vertical parameter values can produce models with a low noise figure ( $F_n$ ) at high frequency operation as well as small collector current ( $I_C$ ).

**Keywords:** *SiGe HBT's, Lateral, Vertical, Noise Figure ( $F_n$ )*



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	ixv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
DAFTAR SINGKATAN .....	xvi
DAFTAR ISTILAH .....	xvii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Metode Penelitian .....	7
1.5 Sistematika Penelitian .....	8
<b>BAB 2 HETEROSTRUKTUR SILIKON GERMANIUM.</b>	
2.1 Sifat fisika bahan SiGe .....	9
2.2 <i>Strain, dislocation dan critical thicknes heterostruktur Silikon Germanium (SiGe)</i> .....	13
2.3 <i>Heterojunction</i> Bipolar Transistor (HBT )SiGe .....	18
2.4 Energi <i>bandgap</i> pada HBT SiGe(Silikon Germanium) .....	21
2.5 Parameter pada <i>Heterojunction</i> Bipolar Transistor Silikon-Germanium (HBT SiGe) .....	28
2.5.1 Komponen pembawa muatan intrinsik pada HBT SiGe .....	32
2.5.2 Mobilitas elektron pada HBT SiGe .....	34
2.5.3 Densitas arus kolektor dan basis ( $J_c, J_b$ ) .....	36
2.5.4 Waktu tunda dan frekuensi <i>cutoff</i> ( $f_T$ ) dan maksimum ( $f_{maks}$ ) .....	40
2.5.5 Tegangan <i>breakdown</i> .....	44
2.5.6 Resistansi parasitis .....	45
2.5.7 <i>Noise figure</i> ( $F_n$ ) atau $F_{min}$ .....	47
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.</b>	
3.1 Program simulasi .....	50
3.2 Analisa arah vertikal .....	53
3.3 Analisa arah lateral .....	54
3.4 Tahapan penelitian .....	55

<b>BAB 4 RANCANGAN MODEL DAN SIMULASI.</b>	65
4.1 Perancangan untuk model HBT Acuan .....	76
4.2 Validasi model HBT Acuan .....	77
4.3 Pengembangan model HBT SiGe .....	
4.3.1. Relasi arus kolektor ( $I_C$ ) dan arus kolektor basis ( $I_b$ ) terhadap tegangan basis-emiter ( $V_{BE}$ ); $I_C=f(V_{BE})$ dan $I_b=f(V_{BE})$ .....	81 82
4.3.2 Relasi <i>current gain</i> ( $\beta_{ac,dc}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ) .....	
4.3.3 Relasi frekuensi <i>threshol</i> d dan osilasi terhadap arus kolektor, $f_T = f(I_C)$ dan $f_{maks} = f(I_C)$ .....	83
4.3.4 Relasi Resistansi parasitis basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor, $R_{bb}= f(I_C)$	84
4.3.5 Relasi <i>noise figure</i> ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor, $F_n= f(I_C)$ .....	85
4.4. Pemodelan HBT dengan <i>lithography</i> 0,12 $\mu m$ dan 0,09 $\mu m$ .....	86
4.4.1. Pengaruh <i>stripe</i> emiter ( $A_e$ ) terhadap <i>current gain</i> ( $\beta$ ) .....	92
4.4.2, Frekuensi <i>threshol</i> d ( $f_T$ ) dan osilasi ( $f_{maks}$ ) .....	93
4.4.3. Pengaruh <i>stripe</i> emiter ( $A_e$ ) terhadap terhadap <i>Noise</i> <i>Figure Minimum</i> ( $F_n$ ) .....	94
<b>BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN.</b>	
5.1 Pengaturan dimensi geometri lateral dan vertikal .....	101
5.2 Karakteristik keluaran file simulasi vertikal .....	104
5.3 Analisa HBT SiGe Model berdasarkan pengaturan dimensi geometri lateral dan vertikal .....	114
<b>BAB 6 KESIMPULAN</b> .....	126
<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	127
<b>LAMPIRAN</b> .....	132

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Rasio $f_T$ terhadap $f_{maks}$ . [3].....	2
Gambar 1.2	Perkembangan unjuk kerja HBT SiGe, $f_T$ terhadap $I_C$ . [4] .....	2
Gambar 1.3	Unjuk kerja, frekuensi <i>threshold</i> ( $f_T$ ) terhadap tahun perkembangan. [5].....	3
Gambar 1.4	Prediksi nilai ekonomi HBT SiGe. [9] .....	5
Gambar 2.1	Struktur “ <i>diamond lattice</i> ” semikonduktor golongan IV, Silikon dan Germanium. [14].....	10
Gambar 2.2	Grafik <i>lattice constant</i> SiGe ( $a_{SiGe}$ ) terhadap <i>mole fraction</i> (x).. ..	11
Gambar 2.3	Grafik $E_{gSiGe}$ terhadap <i>mole fraction</i> (x).....	12
Gambar 2.4	Grafik $I_{lattice\ constant}$ ( $a_{SiGe}$ ) terhadap energi bandgap ( $E_{gSiGe}$ ) untuk $x < 30\%$ . .....	13
Gambar 2.5	Susunan material HBT SiGe. [23] .....	14
Gambar 2.6	Penumbuhan SiGe pada Silikon. [17] .....	15
Gambar 2.7	Grafik energi <i>bandgap</i> ( $E_g$ ) terhadap <i>fraction</i> Ge [21].....	16
Gambar 2.8	Diagram Grafik ketebalan kritis Si(1-x) Ge(x) terhadap <i>fraction</i> . Ge [19].....	17
Gambar 2.9	Diagram Ketebalan kritis <i>Matthews dan Blakeslee</i> pada Si <sub>(1-x)</sub> Ge <sub>(x)</sub> . [25] .....	18
Gambar 2.10	Sambungan heteromaterial semikonduktor (a) <i>Stradding</i> , (b) <i>Staggered</i> dan (c) <i>Broken Gap Heterojunction</i> . [1] .....	19
Gambar 2.11	Diagram energi <i>bandgap stradding heterojunction</i> . [24].....	20
Gambar 2.12	Bandgap <i>straddling heterojunction</i> . [24].....	20
Gambar 2.13	Diagram <i>abrupt junction</i> pada Silikon dan SiGe. [26] .....	22
Gambar 2.14	Diagram <i>graded emitter -basis heterojunction</i> bipolar transistor (HBT) Silikon-Germanium. [26].....	23
Gambar 2.15	Diagram <i>abrupt emitter -basis heterojunction</i> bipolar transistor (HBT) Silikon-Germanium. [26].....	24
Gambar 2.16	Grafik energi <i>bandgap</i> terhadap komposisi Ge pada SiGe. [29]....	25
Gambar 2.17	Grafik energi <i>bandgap</i> terhadap doping konsentrasi. [31].....	26
Gambar 2.18	Grafik Energi bandgap terhadap <i>mole fraction</i> , saat $N_b = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . [33].....	27
Gambar 2.19a	Geometris HBT SiGe [34].....	28
Gambar 2.19b	Struktur HBT SiGe. [36].....	28
Gambar 2.19c	Potongan vertikal HBT SiGe. [15].....	28
Gambar. 2.19d	Arah lateral HBT SiGe. [35].....	28
Gambar. 2.20	Pendekatan geometris sumbu X,Y,Z HBT SiGe.....	29
Gambar 2.21	Pendekatan Geometris HBT SiGe. sumbu $Z = f(x)$ . [38].....	30
Gambar 2.22.	Pendekatan analisis HBT SiGe .....	31
Gambar 2.23a,	Skema operasi transistor .....	32
Gambar 2.23b,	Skema operasi transistor <i>homojunction</i> bipolar .....	32
Gambar 2.23c,	Skema operasi Transistor <i>heterojunction</i> bipolar. ....	32
Gambar 2.24	Grafik perbandingan konsentrasi pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ ) BJT dan HBT.....	33
Gambar 2.25.	Grafik perbandingan konsentrasi pembawa muatan ( $n_i$ ) BJT dan HBT pada sisi emitor.....	34

Gambar 2.26	Grafik mobilitas terhadap konsentrasi <i>donor</i> (a) mobilitas elektron dan (b) mobilitas <i>hole</i> . [43].....	35
Gambar 2.27	Rasio $J_{cHBT}$ dan $J_{cBJT}$ .....	37
Gambar 2.28	Rasio $J_c$ dan $J_b$ HBT dengan <i>mole fraction</i> (x) bervariasi. ....	39
Gambar 2.29	Skematik analisa waktu tunda HBT.....	40
Gambar 2.30.	Distribusi waktu tunda HBT.....	42
Gambar 2.31.	Grafik perbandingan $f_T$ SiGe HBT dan Si BJT.[44].....	43
Gambar 2.32	Grafik $f_T$ dan $f_{max}$ sebagai fungsi arus kolektor.[28] .....	44
Gambar 2.33.	Model potongan melintang HBT SiGe.[17].....	46
Gambar 2.34	Dimensi lateral dan <i>cross section</i> geometris HBT.[17].....	47
Gambar 3.1a	Model dua dimensi HBT SiGe.[55].....	51
Gambar 3.1b	Perbandingan profil drift velocity pada HBT SiGe hasil pemodelan MC, HD dan DD.[55].....	51
Gambar 3.2	Grafik impuriti profil doping pada daerah <i>netral</i> dan <i>Space Charge Region</i> .[53].....	54
Gambar 3.3	<i>Cross section</i> arah vertikal devis model HBT 121. [53].....	55
Gambar 3.4a	Diagram alir validasi model dan <i>software</i> simulator.....	57
Gambar 3.4b	Diagram alir penyusunan model HBT dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m, 0,12 $\mu$ m dan 0,09 $\mu$ m.....	57
Gambar 3.4c	Diagram alir penyusunan model HBT, dengan pengaturan lateral....	58
Gambar 3.4d	Diagram alir penyusunan model HBT SiGe dengan <i>stripe</i> emiter ( $A_e$ ) atau <i>lithografi</i> 0,09 $\mu$ m; 0,12 $\mu$ m; 0,18 $\mu$ m, <i>mole fraction</i> 0,05 dan 0,1. ....	59
Gambar 3.4e	Diagram alir penyusunan model HBT SiGe dengan $A_e$ 0,09 $\mu$ m; 0,12 $\mu$ m; 0,18 $\mu$ m, <i>mole fraction</i> 0,03, 0,05, 0,08 dan 0,1.....	60
Gambar 3.4f	Diagram alir penyusunan model HBT SiGe dengan $A_e$ 0,09 $\mu$ m; 0,12 $\mu$ m; 0,18 $\mu$ m, pengaturan Geometri dan <i>mole fraction</i> 0,03, 0,05, 0,08 dan 0,1.....	62
Gambar 4.1a.	Grafik <i>dopant concentration vs depth</i> HBT SiGe. Eksperimen IBM. [49].....	63
Gambar 4.1b	Grafik <i>gummel plot</i> HBT SiGe. [49].....	63
Gambar 4.2	Diagram rasio resistansi parasitis $R_{bb}$ , $R_C$ dan $R_E$ , HBT SiGe.[17]....	66
Gambar 4.3a	Diagram dimensi lateral model HBT 121. [37].....	68
Gambar 4.3b	Diagram profile <i>impurity</i> model HBT 121.[37].....	69
Gambar 4.4a	Diagram vertikal HBT 121. ....	70
Gambar 4.4b	Skematik vertikal HBT 121. ....	70
Gambar 4.4c	<i>Layout</i> 3D model HBT 121. ....	70
Gambar 4.5a	Grafik kalibrasi profil <i>doping</i> HBT SiGe. ....	72
Gambar 4.5b.	Kalibrasi profil Ge HBT SiGe. ....	73
Gambar 4.5c.	Kalibrasi profil <i>doping</i> HBT SiGe.....	73
Gambar 4.6	Grafik kalibrasi <i>gummel plot</i> HBT SiGe.....	75
Gambar 4.7a	Parameter Model HBT SiGe dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m.....	77
Gambar 4.7b	Rancangan Model HBT SiGe dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m Lay out vertikal. ..	77
Gambar 4.8a.	Grafik fungsi $I_C$ terhadap $V_{be}$ , HBT SiGe dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m. ....	80
Gambar 4.8b	Grafik fungsi $\beta$ terhadap $I_C$ , HBT SiGe dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m.....	81
Gambar 4.8c	Grafik fungsi $f_T, f_{maks}$ terhadap $I_C$ , HBT SiGe dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m. ....	82
Gambar 4.8d	Grafik Fungsi $R_{bb}$ (ac,dc) terhadap $I_C$ , HBT SiGe, $A_e$ 0,18 $\mu$ m. ....	83

Gambar 4.8e	Grafik fungsi $F_n$ terhadap $I_C$ model HBT SiGe dengan $A_e$ 0,18 $\mu$ m....	84
Gambar 4.9.	Diagram pemetaan riset HBT SiGe. ....	85
Gambar 4.10	Fungsi arus basis ( $I_B$ ) dan kolektor ( $I_C$ ) terhadap $V_{be}$ ; $I_B \sim I_C = f(V_{be})$ , simulator 009asli,012asli dan 018asli.....	87
Gambar 4.11	Fungsi <i>current gain</i> ( $\beta$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ); $\beta = f(I_C)$ simulator 009asli,012asli dan 018asli. ....	88
Gambar 4.12	Fungsi $f_T$ dan $f_{maks}$ terhadap arus kolektor ( $I_C$ ); $f_T \sim f_{maks} = f(I_C)$ , simulator 009asli,012asli dan 018asli. ....	89
Gambar 4.13.	<i>Noise figure</i> ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ); $F_n = f(I_C)$ simulator 009asli,012asli dan 018asli. ....	90
Gambar 4.14	Resistansi basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ); $R_{bb} = f(I_C)$ simulator 009asli,012asli dan 018asli.....	91
Gambar 4.15	Perbandingan <i>current gain</i> ( $\beta$ ) dengan <i>stripe emitter</i> ( $A_e$ ) rancangan dan hasil Simulasi.....	92
Gambar 4.16	Perbandingan frekuensi <i>threshold</i> ( $f_T$ ) dengan <i>stripe emitter</i> ( $A_e$ ) rancangan dan hasil simulasi. ....	93
Gambar 4.17	Perbandingan <i>noise figure minimum</i> ( $F_n$ ) dengan <i>stripe emitter</i> ( $A_e$ ), rancangan dan hasil simulasi. ....	94
Gambar 5.1a	Geometri lateral model HBT SiGe.....	100
Gambar 5.1b.	Profil <i>doping</i> model HBT SiGe.....	101
Gambar 5.2	Penskalaan geometris dimensi Lateral. ....	102
Gambar 5.3	Dimensi lateral dan vertikal HBT Model SiGe l.[50].....	103
Gambar 5.4a.	Grafik fungsi $I_C$ terhadap $V_{BE}$ , $I_C = F(V_{be})$ . ....	108
Gambar 5.4b.	Grafik fungsi <i>current gain</i> ( $\beta$ ) terhadap $I_C$ , $\beta_{ac} = F(I_C)$ . ....	109
Gambar 5.4c	Grafik fungsi frekuensi <i>threshold</i> $f_T$ terhadap $I_C$ , $f_T = F(I_C)$ . ....	110
Gambar 5.4d	Grafik fungsi frekuensi maksimum $f_{max}$ terhadap $I_C$ , $f_T = F(f_{max})$ . ....	111
Gambar 5.4e.	Grafik fungsi Resistansi Basis terhadap $I_C$ , $R_{bb} = F(I_C)$ . ....	112
Gambar 5.4f.	Grafik fungsi <i>noise figure</i> terhadap $I_C$ , $F_{min} = F(I_C)$ . ....	113
Gambar 5.5a.	Grafik fungsi $I_c$ terhadap $V_{be}$ , $I_C = F(V_{be})$ . ....	116
Gambar 5.5b.	Grafik fungsi $f_T$ terhadap $I_C$ , $f_T = F(I_C)$ . ....	117
Gambar 5.5c.	Grafik fungsi <i>Ge fraction</i> terhadap <i>depth</i> . ....	118
Gambar 5.5d.	Grafik fungsi $\beta_{ac}$ terhadap $I_C$ ; $\beta_{ac} = f(I_C)$ . ....	118
Gambar 5.5e.	Grafik fungsi BGN terhadap <i>depth</i> . ....	119
Gambar 5.5f.	Grafik fungsi <i>current gain</i> ( $\beta$ ) terhadap $f_T$ . ....	120
Gambar 5.5g.	Grafik fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) terhadap $R_{bb}$ ; $R_{bb} = f(I_C)$ . ....	121
Gambar 5.6.	Grafik fungsi <i>noise figure</i> ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ), $F_n = F(I_C)$ . ....	122
Gambar 5.7.	Grafik fungsi <i>noise figure</i> pada File HBT Simulasi . 009asli_ge03, 009asli_ge10 dan 009br6_wb050. ....	123

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Perbandingan <i>lithography</i> dan unjuk kerja teknologi HBT SiGe.[7] .....	4
Tabel 2.1	Properti Germanium dan Silikon. [18] .....	9
Tabel 3.1	Program simulasi rancangan divais HBT.[4] .....	51
Tabel 4.1	Model eksperimen dengan terminal basis, kolektor berbeda , <i>Mark J Rodwall</i> . [40] .....	67
Tabel 4.2	Data simulator <i>donor dan acceptor Concentration</i> .....	71
Tabel 4.3	Spesifikasi model simulasi <i>file: kal_ibm4.bip</i> . .....	75
Tabel 4.4	Perbandingan $I_C$ eksperimen dan simulasi. ....	77
Tabel 4.5	Karakteristik model HBT SiGe. ....	80
Tabel 4.6	Unjuk Kerja model HBT SiGe dengan $w_e$ : 0,18 m ;0,12 $\mu$ m dan 0,09 $\mu$ m. ....	87
Tabel 4.7	Unjuk kerja HBT: $w_e$ 0,18 $\mu$ m , 0,12 $\mu$ m , 0,09 $\mu$ m. ....	96
Tabel 5.1	<i>File-file</i> simulasi model HBT SiGe.....	99
Tabel 5.2	<i>File</i> simulasi dengan perubahan <i>lithography, fraction mole (Ge)</i> , panjang lengan emitter ( $L_e$ ), ketebalan basis arah vertikal ( $w_b$ ). ....	105
Tabel 5.3.	Parameter <i>output file</i> simulator. ....	106
Tabel 5.4	Urutan <i>file</i> simulator dengan <i>noise figure (Fn)</i> terendah berdasarkan pada nilai $f_T$ maksimal. ....	114
Tabel 5.5	File simulasi peningkatkan $f_T$ , $f_{maks}$ dan penurunan <i>noise figure (Fn)</i> . ....	115
Tabel 5.6	Unjuk Kerja HBT Simulator. ....	125

## DAFTAR SINGKATAN

AMS	Australia Microsystem
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
DOS	<i>Density of State</i>
DD	<i>Drift Diffusi</i>
FB-MC	<i>Full-Band Monte Carlo</i>
Ge	Germanium
HBT	<i>Heterojunction Bipolar Transistor</i>
HD	Hydrodinamik
IBM	<i>International Business Machines</i>
LPCVD	<i>Low Pressure Chemical Vapor Deposition</i>
MBE	<i>Molecular Beam Epitaxy,</i>
MC	Monte Carlo
NPN	Negatif Positif Negatif
RF	Radio Frekuensi,
SCR	Space Charge Region
SRH	<i>Shockley-Reed-Hall</i>
Si	Silikon
SiGe	Silikon – Germanium
UHV/CVD	<i>Ultra High Vacuum / Chemical Vapor Deposition,</i>
1D, 2D, 3D	(one) Dimensi, (two) Dimensi, (three) Dimensi

## DAFTAR ISTILAH

$a$	<i>lattice constant</i>
$\alpha$	misfit dislokasi
$A_e$	<i>stripe emitter</i>
$BV_{CEO}$	tegangan <i>break down open emitter</i>
$BV_{CBO}$	tegangan <i>breakdown open base</i>
$\beta$	penguatan arus ( <i>current gain</i> ) <i>common emitter</i>
$C_{JC}$	kapasitansi <i>junction collector</i>
$C_{BEO}$	kapasitansi <i>base -Emitter Open</i>
$C_{BCO}$	kapasitansi <i>base -collector Open</i>
$C_{bc}$	kapasitansi basis-kolektor
$D_n$	koefisien difusi elektron
$D_{nB}, D_{nb}$	konstanta difusi elektron pada basis,
$D_{nE}$	koefisien difusi elektron pada Emitter
$E_g$	Energi <i>bandgap</i>
$E$	medan listrik,
$f$	<i>latice mismatch</i> (misfit)
$f_T$	frekuensi <i>threshol</i> atau <i>cutoff</i>
$f_{maks}$	frekuensi osilasi maksimum
$F_n, F_{min}$	<i>noise figure minimum</i>
$G_B$	<i>Gummel Plot</i>
$HFE, h_{fe}$	penguatan arus ( <i>current gain</i> ) <i>common emitter</i>
$I_C$	arus Kolektor
$I_B$	arus basis
$J_C$	densitas kolektor
$J_B$	densitas basis
$L_e, L_E$	panjang emiter arah lateral
$N$	konsentrasi doping,
$N_{eff}$	konsentrasi <i>doping</i> efektif
$N_E$	konsentrasi <i>doping</i> pada emiter.
$N_B$	konsentrasi <i>doping</i> pada basis
$N_C$	konsentrasi <i>doping</i> pada kolektor.
$n_i$	konsentrasi pembawa muatan intrinsik.
$P_{po},$	<i>hole concentration</i> pada material positif (p)
$P_{no}$	<i>hole concentration</i> pada material negatif (n).
$R_{bb}$ atau $r_{bb}$	resistansi parasitis pada basis
$R_E,$	resistansi parasitik pada emiter
$R_C,$	resistansi parasitik pada kolektor
$T$	temperatur
$t_{crit}, h_c$	<i>ketebalan kritis</i>
$V_{be}$	tegangan basis emiter
$V_T$	tegangan <i>threshol</i>
$V_{bi}$	tegangan potensial <i>barrier</i>
$W_B, W_b$	lebar / ketebalan basis arah vertikal
$W_E, W_e$	lebar/ ketebalan emiter arah vertikal
$x$	<i>mole fraction</i>



$x_{eb}$	ketebalan <i>emitter-base SCR</i> pada posisi vertikal
$\Delta E_v$	energi pada pita valensi
$\Delta E_{g,ge}$	energi <i>bandgap</i> karena <i>mole fraction(x)</i>
$\Delta E_{g,hd}$	energi <i>bandgap</i> karena <i>heavy doping</i>
$\theta$	sudut antara <i>dislocation line</i> dengan <i>Burgers vector</i>
$\lambda$	sudut diantara <i>Burgers vector</i> dan <i>interface line</i>
$\mu_n$	mobilitas elektron
$\mu_p$	mobilitas <i>hole</i> .
$\tau$	<i>transit time</i>
$\epsilon_s$	permitivitas semikonduktor,
$q$	muatan elektron
$\rho_s$	<i>base sheet</i> resistansi,
$\rho_c$	<i>contact sheet</i> resistansi.
$v(E)$	kecepatan medan elektrik

### KONSTANTA PHYSICAL

Quantitas *Value*

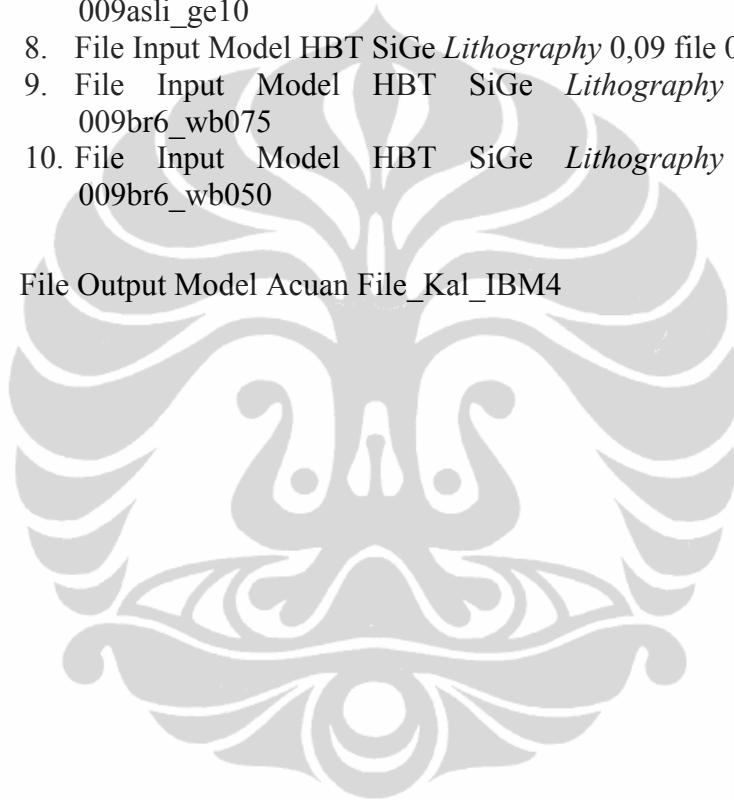
Boltzmann's constant ( $k$ )	$1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Electronic charge ( $q$ )	$1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Permittivity of free space ( $\epsilon_0$ )	$8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}$
Planck's constant ( $h$ )	$6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$
Free electron mass ( $m_0$ )	$9,108 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Electron-volt (eV)	$1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

### PROPERTIES SILIKON DAN SILIKON-GERMANIUM

Value	Silikon	Silikon-Germanium
Lattice constant (nm)	0,543	$a_{SiGe} = 5,431 + 0,1992x - 0,002733x^2$
Bandgap (eV)	1,170	$EG(x) = 1,17 - 0,896x - 0,396x^2$
Konstanta dielectric	11,9	$\epsilon(x) = 11,9(1 + 0,35x)$
Density $N_C$ of states in the conduction band at 300K ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2,8 \times 10^{19}$	$2,8 \times 10^{19}$
Density $N_V$ of states in the valence band at 300K ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1,04 \times 10^{19}$	

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A**
1. File Input Model Acuan File\_Kal\_IBM4
  2. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,18 file 018asli
  3. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,12file 012asli
  4. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009asli
  5. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009baru6
  6. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009asli\_ge03
  7. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009asli\_ge10
  8. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009asli\_ge8
  9. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009br6\_wb075
  10. File Input Model HBT SiGe *Lithography* 0,09 file 009br6\_wb050
- Lampiran B** File Output Model Acuan File\_Kal\_IBM4



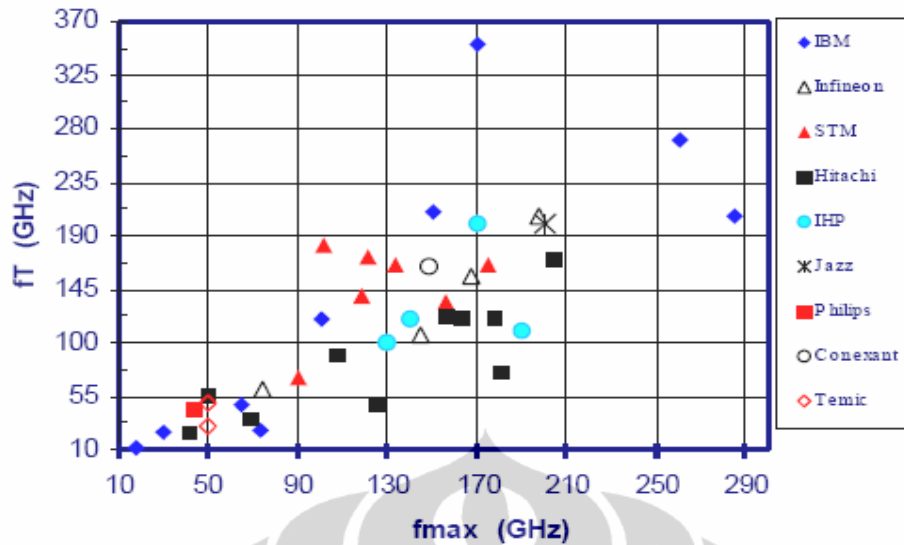
## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1. 1. Latar Belakang

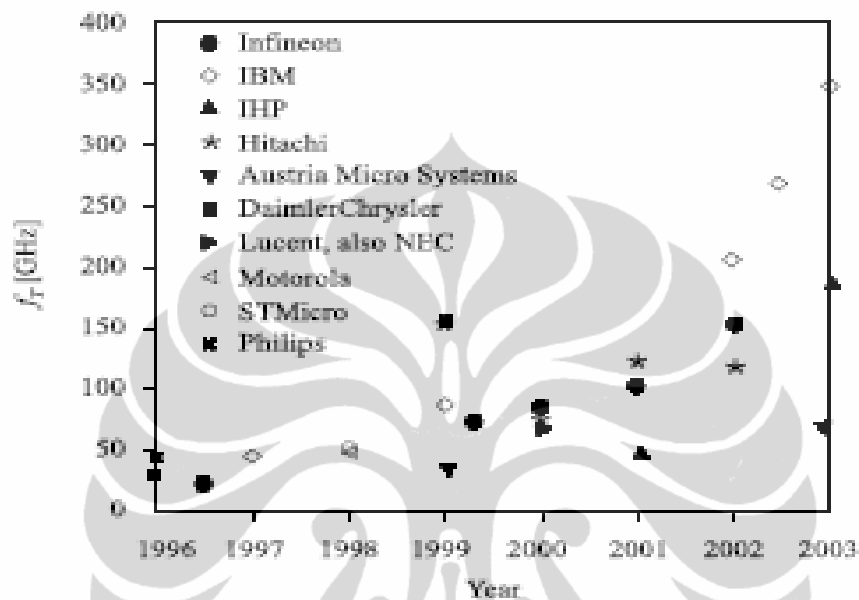
Heterojunction Bipolar Transistor atau HBT adalah transistor bipolar dengan basis disusun dari bahan semikonduktor berbeda, sehingga *junction* emiter dan basis dibentuk oleh dua (2) material semikonduktor berbeda [1], pemakaian *heteromaterial* transistor bipolar bertujuan untuk memperbaiki unjuk kerja transistor, antara lain *current gain* ( $\beta$ ), frekuensi *threshold* ( $f_T$ ), frekuensi osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ), serta *noise figure* ( $F_n$ ). Heterojunction Bipolar Transistor Silikon-Germanium atau HBT SiGe mempunyai struktur basis yang terbuat dari campuran Silikon dan Germanium, sedangkan emiter dan kolektornya terbuat dari Silikon. Konsep HBT ini dipatenkan oleh William Shockley pada tahun 1948 kemudian teori HBT dikembangkan oleh Kroemer serta dipublikasikan pada tahun 1957.[2]

HBT mempunyai struktur yang sama dengan BJT, terdiri dari emiter, basis dan kolektor, pada HBT Si/SiGe/Si menggunakan bahan Silikon Germanium (SiGe) sebagai bahan basis dan Silikon (Si) sebagai bahan emiter dan kolektor, susunan seperti itu akan mempengaruhi besarnya energi *bandgap* pada divais tersebut, khususnya pada sisi basis. Besar energi *bandgap* pada basis dapat diatur tergantung dari konsentrasi Germanium. Nilai energi *bandgap* pada SiGe berkisar ;  $0,6 \text{ eV} < E_{g, SiGe} < 1,12 \text{ eV}$ , nilai energi *bandgap* ini sangat mempengaruhi kinerja HBT khususnya pada *current gain* ( $\beta$ ), sedangkan bentuk profil Germanium (Ge) pada Silikon (Si) berpengaruh pada kinerja frekuensi *threshold* ( $f_T$ ).

Beberapa hasil riset HBT SiGe untuk pencapaian unjuk kerja frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) dan maksimum ( $f_{maks}$ ) yang telah dilakukan ditunjukkan pada Gambar 1.1. Rekor pencapaian frekuensi HBT tertinggi Silikon-Germanium (SiGe) yang dikembangkan oleh IBM mencapai frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) maksimum 350 Ghz dan frekuensi osilasi maksimum  $f_{max}$  285 Ghz.[3]



Beberapa institusi telah mengembangkan HBT SiGe antara lain IBM, Infineon, Australia Microsystem (AMS) dan Hitachi sampai tahun 2003 dengan *frequency threshold* ( $f_T$ ) yang dapat dicapai sampai 350 Ghz dan frekuensi osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ) 285 Ghz dengan *delay ring oscillator* 4,2 ps yang dikembangkan oleh IBM seperti yang ditunjukkan Gambar 1.3. berikut, [5]



Gambar 1.3 Unjuk kerja, frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) terhadap tahun perkembangan.[5]

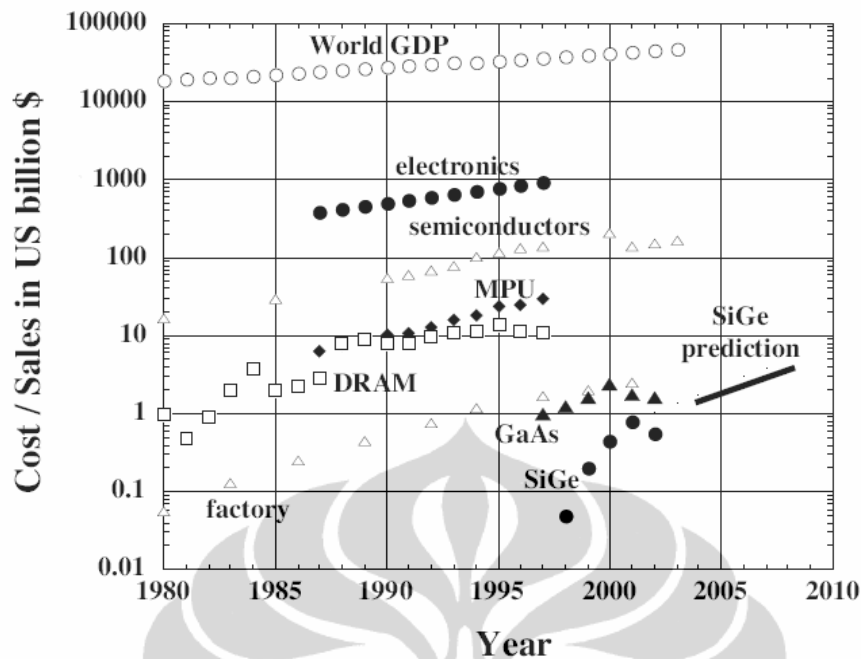
Teknologi epitaksi modern untuk SiGe seperti MBE (*Molecular Beam Epitaxy*), UHV/CVD (*Ultra High Vacuum / Chemical Vapor Deposition*) dan LPCVD (*Low Pressure Chemical Vapor Deposition*) memungkinkan pengaturan profil *doping* dan komposisi Ge yang bervariasi pada sisi basis HBT, [6] oleh sebab itu dapat dibuat rancangan *doping* dan profil Germanium yang memberikan kinerja yang dikehendaki, misalnya rancangan yang dapat memberikan  $\beta$  dan  $f_T$  yang tinggi. Dalam beberapa tahun ini perkembangan teknologi HBT SiGe sungguh dinamis, beberapa vendor telah mengembangkan divais HBT SiGe pada  $f_T$  dan  $f_{maks}$ , di atas 100 Ghz atau lebih. Hal ini didukung dengan kemajuan teknologi *lithography* di bawah  $0,16\mu\text{m}$ . [7] Toni Ivanop pada tahun 2007 menunjukkan model HBT SiGe dengan  $f_T$  dan  $f_{maks}$  yang berbeda yang dikembangkan oleh beberapa vendor dengan *lithography* berbeda seperti ditunjukkan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Perbandingan *lithography* dan unjuk kerja Teknologi HBT SiGe.[7]

Company	Technology	$f_T / f_{max}$ (Ghz)	Reference
Agere	0,25 $\mu$ m BICMOS	79/116	99 IEDM
Agere	0,16 $\mu$ m BICMOS	103/110	02 RFIC
Agere	0,14 $\mu$ m BICMOS	150/150	To be Pub
IBM	0,50 $\mu$ m BICMOS	50/65	99 BCTM
IBM	0,18 $\mu$ m BICMOS(Cu)	84/?	99 IEDM
IBM	0,35 $\mu$ m BICMOS(Cu0	120/100	01 BCTM
Infineon	0,35 $\mu$ m BICMOS	75/75	ED 1999
Temic	>0,80 $\mu$ m BICMOS	50/50	Micro J99
ST Micro	0,35 $\mu$ m BICMOS	45/60	99 BCTM
Conexant	0,35 $\mu$ m BICMOS	45/?	99 BCTM
Conexant	0,18 $\mu$ m BICMOS	130/150	01 BCTM
Hitachi	0,40 $\mu$ m BICMOS	92/108	98 ISSC
Philips	0,25 $\mu$ m BICMOS	37/90	01 BCTM
Motorola	0,18 $\mu$ m BICMOS	50/90	01 BCTM

HBT SiGe dengan kinerja frekuensi yang tinggi diperoleh dengan mengatur lebar emiter, basis, kolektor, dan profil Ge pada basis, serta disesuaikan dengan teknologi *lithography* yang lebih kecil. Pada tahun 1990-an dilakukan kajian penskalaan pada arah lateral (*lateral scaling*). Hal ini dimaksudkan untuk memperkecil komponen resistansi parasitik seperti yang dilakukan oleh Greg Freeman. [8]

Material silikon telah mendominasi industri semikonduktor hampir 30 tahun meskipun pertama kali yang diproduksi adalah transistor Germanium atau material semikonduktor lainnya, hampir 97% teknologi mikroelektronik berbasiskan material silikon. Hal ini didasarkan pada teknologi mikroelektronika berbasis silikon semakin murah serta kemampuan yang semakin tinggi. Semenjak tahun 1998 pertama kali HBT SiGe dipasarkan di “*RF market*” *cost* atau *sales* divais berbasis HBT SiGe, terjadi kenaikan hampir 30% setiap tahunnya, sampai tahun 2010 HBT SiGe mempunyai nilai ekonomis. Hal ini sejalan dengan perkembangan teknologi elektronika dan mikroelektronika lainnya seperti ditunjukkan oleh Gambar 1.4 pada halaman berikut; [9]



Gambar 1.4 Prediksi nilai ekonomi HBT SiGe. [9]

## 1.2 Perumusan Masalah

Riset HBT SiGe yang berkaitan dengan unjuk kerja yang terbaik telah banyak dilaksanakan. Beberapa riset dilakukan untuk menaikkan frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) dan frekuensi osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ) serta *current gain* ( $\beta$ ). Perbaikan unjuk kerja dilakukan dengan pendekatan perubahan nilai parameter bagian vertikal atau lateral, beberapa riset yang telah dilakukan dalam peningkatan unjuk kerja HBT SiGe berdasarkan pengontrolan parameter vertikal antara lain, pengaturan *mole fraction* ( $x$ ) Ge pada Si, pengaturan profile Ge pada Si pada basis dan pengaturan *poly crystalline* pada bagian kolektor. [10][11] [12] Riset yang telah dilakukan berdasarkan pada pendekatan geometri arah lateral yaitu pengaturan geometri *scaling* berdasarkan panjang lengan emiter dan pengaturan *stripe emitter* area ( $A_e$ ).[13][14] Meskipun demikian riset-riset yang telah dilakukan sifatnya parsial, kajian riset yang pengaturan lateral dan vertikal secara bersamaan masih jarang dilakukan. Pengaturan parameter vertikal yang tepat akan mengontrol divais HBT SiGe dengan kinerja  $f_T$ , dan  $\beta$  yang tinggi, sedangkan pengaturan parameter lateral akan menghasilkan divais yang bekerja pada arus basis ( $I_B$ ) dan arus kolektor ( $I_C$ ) yang rendah, serta menghasilkan parameter resistansi parasitis ( $R_{bb}$ ,  $R_C$ ) yang rendah dan sehingga pada akhirnya

akan berdampak pada nilai *noise figure minimum* ( $F_n$ ) dari divais tersebut. Perlu diketahui pula bahwa perbaikan divais HBT SiGe yang berkaitan dengan nilai *noise figure minimum* ( $F_n$ ) masih kurang seiring dengan publikasi yang berkaitan dengan analisa *noise figure* ( $F_n$ ) dari divais HBT masih jarang.

Pada riset disertasi ini dilakukan analisis penskalaan lateral dan vertikal pada HBT SiGe dengan pengaturan dimensi lateral yang di representasikan pada ratio Lebar ( $W$ ) dan Panjang ( $L$ ) divais yang dibatasi oleh ukuran *burried layer* kemudian dilanjutkan dengan mengatur dimensi vertikal dengan cara mengubah lebar basis ( $W_b$ ) pada arah vertikal serta mengatur *mole fraction* Ge ( $x$ ) yang disertai pengaturan *stripe emitter* ( $A_e$ ) atau *lithography* yang berkembang saat ini yaitu  $0,18\mu\text{m}$ ,  $0,12\mu\text{m}$  dan  $0,09\mu\text{m}$ . Beberapa parameter unjuk kerja yang akan diamati internal dan terminal *output* karakteristik dari HBT SiGe antara lain;

- a) terminal karakteristik *output* seperti  $f_{T+\text{osc maks}} = f(I_c)$ ,  $I_c = f(V_{be})$ ,  $\beta_{ac} = f(I_c)$ ,
- b) internal karakteristik  $R_{bb} = f(I_c)$  dan c) karakteristik *noise figure* ,  $F_n = f(I_c)$  dan  $F_n = f(f_T)$ ,

### 1.3 Tujuan Penelitian

Meskipun beberapa peneliti telah melakukan riset tentang pengaruh penskalaan pada arah vertikal dan lateral tetapi pada umumnya setiap riset bersifat partial. Pada disertasi ini dilakukan riset mengenai pengaturan arah lateral dan vertikal pada rancangan HBT SiGe secara simultan, dengan parameter berdasarkan model HBT SiGe yang telah dikembangkan oleh IBM, yang memiliki kinerja  $A_e = 0,50\mu\text{m}$ ,  $\beta = 110$ ,  $f_T = 50 \text{ Ghz}$  dan  $f_{maks.} = 65 \text{ Ghz}$ , dengan struktur fisik divais memiliki masing-masing satu (1) terminal basis, emitter dan kolektor. Untuk selanjutnya akan dikembangkan menjadi model HBT SiGe dengan struktur divais yang memiliki satu(1) terminal emitter, kolektor dan dua(2) terminal basis yang mengacu pada hasil pemodelan HBT dari Jae sung rieh, M.W. Hsieh dan Mark Rodwall.[15][16][17]



Pada arah lateral diatur *stripe emitter* ( $A_e$ ) sepanjang lengan emiter kemudian pada arah vertikal diatur ketebalan basis ( $W_b$ ) atau  $x_b$  pada bagian lain pula diatur *mole fraction* ( $x$ ) dari 0,03; 0,05; 0,08 sampai 0,1, untuk kemudian secara keseluruhan diatur geometri dari model HBT tersebut secara keseluruhan. Pengaturan Geometri model HBT dilakukan dengan cara pengaturan *scaling* dimensi lateral yang direpresentasikan pada ratio Lebar ( $W$ ) dan Panjang ( $L$ ) dari HBT model yang dibatasi pada daerah *burried layer*. Pengaturan Geometri dilakukan dengan penskalaan rasio  $L/W$ , dari rasio 1, 0,8, 0,6 dan 0,4 pemilihan variabel ini didasarkan pada ketebalan kritis (*critical thickness*) dari epilayer SiGe, khusus mengenai bahasan ketebalan kritis dibahas pada bab 2.

Kemudian dilakukan secara bersamaan pengaturan Vertikal, Lateral dari Geometri model HBT tersebut bertujuan untuk mendapatkan divais HBT SiGe dengan *noise figure minimum* ( $F_n$ ) yang rendah, karena pada implementasinya HBT SiGe ini digunakan pada sistem atau rangkaian yang bekerja pada frekuensi tinggi yang rentan terhadap gangguan *noise*.

Kontribusi riset ini akan menghasilkan model HBT SiGe yang memiliki  $F_n$  yang rendah yang dikembangkan dari model HBT IBM generasi pertama yang dengan *lithography*  $0,50 \mu\text{m}$  serta bekerja pada frekuensi  $f_T$  50 Ghz dan  $f_{\text{maks}}$  65 Ghz dan kemudian dikembangkan menjadi model HBT SiGe yang pada teknologi *lithography* yang berkembang saat ini yaitu  $0,18 \mu\text{m}$ ,  $0,12 \mu\text{m}$  dan  $0,09 \mu\text{m}$ .

#### 1.4 Metode Penelitian.

**Tahap pertama** dilakukan penelusuran jurnal-jurnal terbaru atau disertasi yang membahas divais HBT SiGe. Informasi yang dibutuhkan adalah SIM profil dari doping konsentrasi HBT SiGe sebagai representasi *input* model HBT serta *Gummel Plot* berupa diagram fungsi  $I_c$  atau  $I_b$  terhadap  $V_{be}$ , sebagai representasi dari keluaran model HBT tersebut. **Tahap kedua** adalah pemilihan perangkat simulasi yang menggunakan pendekatan Hidrodinamik (HD) dan Drift Diffusi (DD). Pemilihan ini berdasarkan pada referensi bahwa untuk analisis dan perhitungan pada divais yang kecil dalam skala nano pendekatan HD dan DD lebih akurat dibanding dengan pendekatan numerik lainnya seperti Monte Carlo (MC). [53] **Tahap ketiga** melakukan validasi perangkat simulator, berupa

validasi parameter *input* berdasarkan *SIM profile* validasi parameter keluaran berdasarkan *Gummel Plot*. Pada **tahap keempat** dibangun model baru berdasarkan referensi parameter model pada langkah pertama untuk kemudian diatur *lithography*-nya menjadi **0,18  $\mu\text{m}$**  , **0,12 $\mu\text{m}$**  dan **0,09  $\mu\text{m}$**  dengan terminal basis menjadi dua. Dari keluaran hasil simulator itu dibandingkan dengan parameter *output* rancangan. **Tahap kelima** adalah memperlakukan model hasil tahap keempat sesuai dengan kegiatan yang dijelaskan pada bagian perumusan masalah. Dari hasil tahap pertama sampai tahapan keempat menyatakan bahwa *software* pemodelan Bipole3G, dengan acuan model HBT SiGe referensi 99 BCTM memiliki keluaran quasi 3 dimensi dengan analisis berdasarkan HD dan DD yang diturunkan berdasarkan formulasi *poisson equation*.

### 1.5 Sistematika Pembahasan

Pada Bab 1 berisi pendahuluan umum, yang terdiri dari pernyataan, dan aktivitas dan hasil dari riset ini. Pada Bab 2 dibicarakan teori dasar HBT SiGe yang mencakup sifat fisika bahan SiGe *state of de art HBT* dan formulasi persamaan yang mencakup perilaku material heterostruktur, serta perilaku karakteristik *output* HBT SiGe antara lain densitas kolektor ( $J_c$ ) dan basis ( $J_b$ ) *current gain* ( $\beta$ ), resistansi parasitis ( $R_{bb}$ ,  $R_c$ ) frekuensi *threshhold* ( $f_T$ ) dan frekuensi osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ) serta *noise figure* ( $F_n$ ). Pada Bab 3 dibahas metode riset, yaitu penjelasan program simulasi Bipole3G, dengan pendekatan numerik, program *input* dan *output* serta penjelasan tahapan pengumpulan file-file simulator hasil pengembangan model yang telah ada. Pada Bab 4 disajikan penjelasan perancangan atau desain model dengan berdasarkan pada parameter model yang telah dipilih kemudian dilakukan validasi simulator yang dibandingkan dengan model rancangan yang dibuat. Pada Bab 5, berisi analisis dan pembahasan beberapa model yang disusun sesuai dengan aktivitas pada permasalahan dan tujuan riset. Bab 6 berisi kesimpulan tentang riset yang telah dilakukan, sedangkan pada lampiran ditampilkan sepuluh (10) *file* simulator dari 45 file simulator yang dibangun, tampilan berupa program parameter *input* dan *output*.

## BAB 2

### HETEROSTUKTUR SILIKON GERMANIUM

#### 2.1 Sifat Fisika Bahan SiGe

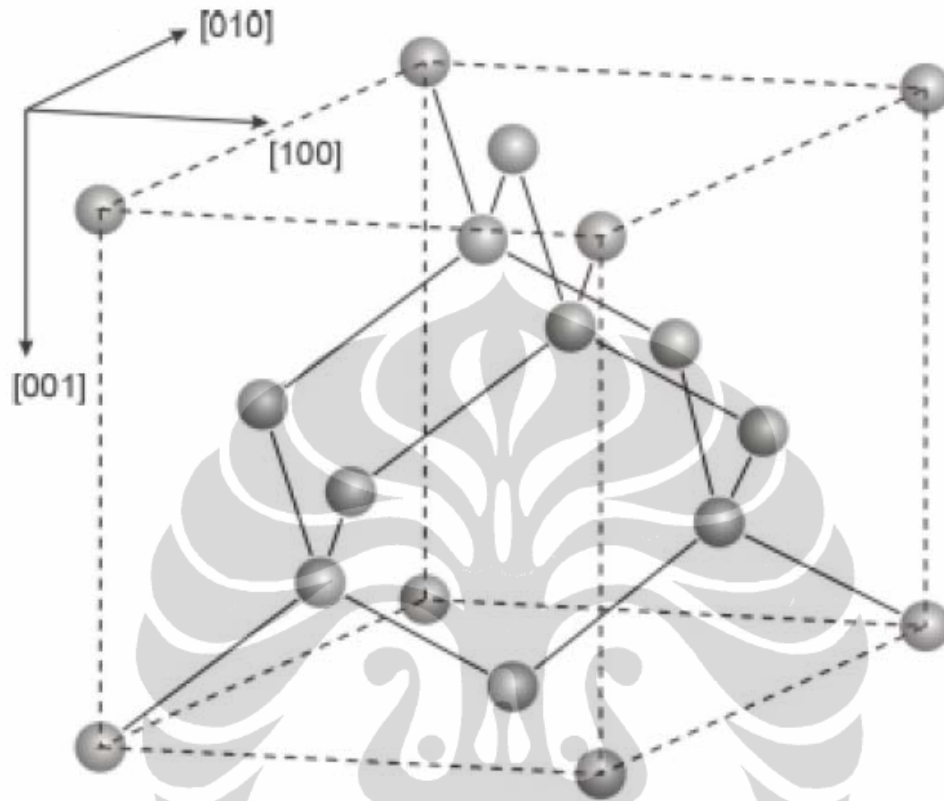
Pada sistem berkala atom semikonduktor Germanium dan Silikon termasuk pada unsur golongan IV dimana keduanya memiliki struktur *bond diamond* yang sama, tetapi dengan *lattice constant* ( $a$ ) dan *bandgap energi* ( $E_g$ ) berbeda. *Lattice constant* Silikon (a-Si) 5,431 Å<sup>0</sup> dan Germanium (a-Ge) 5,657 Å<sup>0</sup> [14][18], a-Ge lebih besar 4,2% dari a-Si, *kemudian dari sisi energi bandgap*, Silikon (Si) mempunyai energi *bandgap* 1,12 eV sedangkan Germanium (Ge) 0,66 eV pada temperatur 300<sup>0</sup>K. Untuk lebih jelasnya properti semikonduktor Silikon dan Germanium ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Properti Germanium dan Silikon. [18][19]

<i>Properti</i>	Simbol	Ge	Si	<i>Unit</i>
<i>Band gap</i>	$E_G$	0,66	1,12	eV
<i>Lattice Constant</i>	$a$	5,657	5,431	Å
<i>Intrinsic Mobility</i>	$\mu_i$	2,40E13	1,45E10	cm <sup>-3</sup>
<i>Electron Mobility</i>	$\mu_n$	3900	1500	cm <sup>2</sup> /V.Sec
<i>Hole Mobility</i>	$\mu_p$	1900	450	cm <sup>2</sup> /V.Sec
<i>Thermal conductivity</i>	$\nu_{tb}$	0.6	1.5	W/cm.C
<i>Melting Point</i>	$t$	937	1415	deg C
<i>Coeff of Expansion</i>	$\alpha_T$	5,8E-6	2,6E-6	/ deg C

Tahun 1951, Shockley dan Kromer mengemukakan konsep perbaikan unjuk kerja transistor *homojunction* bipolar yang ada saat itu, dengan cara mengubah komposisi material yang menghasilkan *bandgap* lebih lebar pada emitter dibandingkan pada basis, dengan resistansi basis ( $R_{bb}$ ) yang rendah sehingga tidak menurunkan kecepatan divais dengan solusi yang ditawarkan adalah membuat transistor bipolar dengan *bandgap* yang lebih sempit pada basis. Untuk mendapatkan pola ini digunakan bahan semikonduktor campuran yaitu Silikon – Germanium (SiGe) yang ditempatkan pada basis yang dibuat tipis dengan tetap memberikan konsentrasi *doping* yang tinggi sehingga,  $R_{bb}$  dipertahankan rendah. Penggabungan Silikon dan Germanium sangat dimungkinkan karena mempunyai *diamond lattice structure* yang sama sedang yang membedakannya adalah nilai *lattice constant*-nya seperti ditampilkan pada Tabel 2.1 di atas.

Gambar 2.1 menunjukkan *diamond lattice structure* Silikon dan Germanium.



Gambar 2.1 Struktur “*diamond lattice structure*” semikonduktor golongan IV, Silikon dan Germanium. [14]

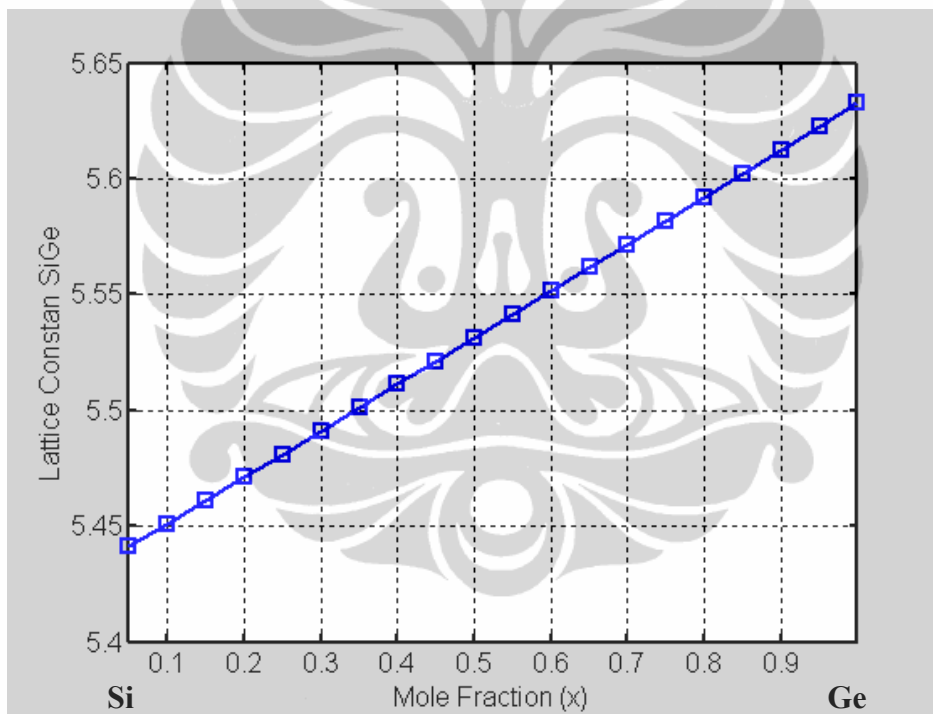
Semikonduktor Germanium dan Silikon adalah *isoelectronics* artinya mempunyai tipe konduktivitas yang sama. Posisi germanium dapat berupa donor ataupun akseptor ketika keduanya membentuk ikatan heterostruktur, dengan *lattice mismatch* sekitar 4,2% dengan ikatan keduanya mempunyai karakter *crystalline surface* 001. Propertis *crystalline surface* 001 mempunyai kelebihan antara lain keuntungan *thermal gate oxides* yang baik dengan kerapatan muatan dan *interface traps* sekitar  $\sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$ , kemudian jika dibandingkan dengan komposisi 111 komposisi 001 mempunyai kemudahan dalam pengontrolan tegangan *threshold* ( $V_T$ ) dan superior dalam *noise figure* ( $F_n$ ). [18]

Pada saat terjadi penggabungan Silikon dan Germanium akan terbentuk heteromaterial Silikon-Germanium (Si-Ge) dengan *lattice constant* pada Silikon-Germanium ( $a_{SiGe}$ ), sesuai dengan pola  $a_{SiGe}(x) = a_{Si} + (a_{Ge} - a_{Si})x$ , dengan

pendekatan *Vegard law* persamaan tersebut dinyatakan dengan Persamaan 2.1 berikut. [18]

$$a_{SiGe}(x) = 5,431 + 0,1992x + 0,002733x^2 \quad (2.1)$$

$x$  adalah konsentrasi Germanium pada Silikon dinyatakan dengan istilah *mole fraction* ( $x$ ). *mole fraction* ( $x$ ) memiliki nilai 0 sampai 1, jika  $x = 0$ , *lattice constan* SiGe ( $a_{SiGe}$ ) sama dengan *lattice constan silikon* ( $a_{Si}$ ) yaitu  $5,421 \text{ \AA}^\circ$ , kemudian jika  $x=1$ , maka *lattice constan* SiGe  $a_{SiGe}$  sama dengan *lattice constan Germanium* ( $a_{Ge}$ )  $5,657 \text{ \AA}^\circ$ . Gambar 2.2 menunjukkan fungsi *lattice constan* Silikon – Germanium ( $a_{SiGe}$ ) terhadap *mole fraction* ( $x$ ), sesuai Persamaan 2.1 di atas.



Gambar 2.2.  
Grafik *lattice constant* SiGe ( $a_{SiGe}$ ) terhadap *mole fraction* ( $x$ ).

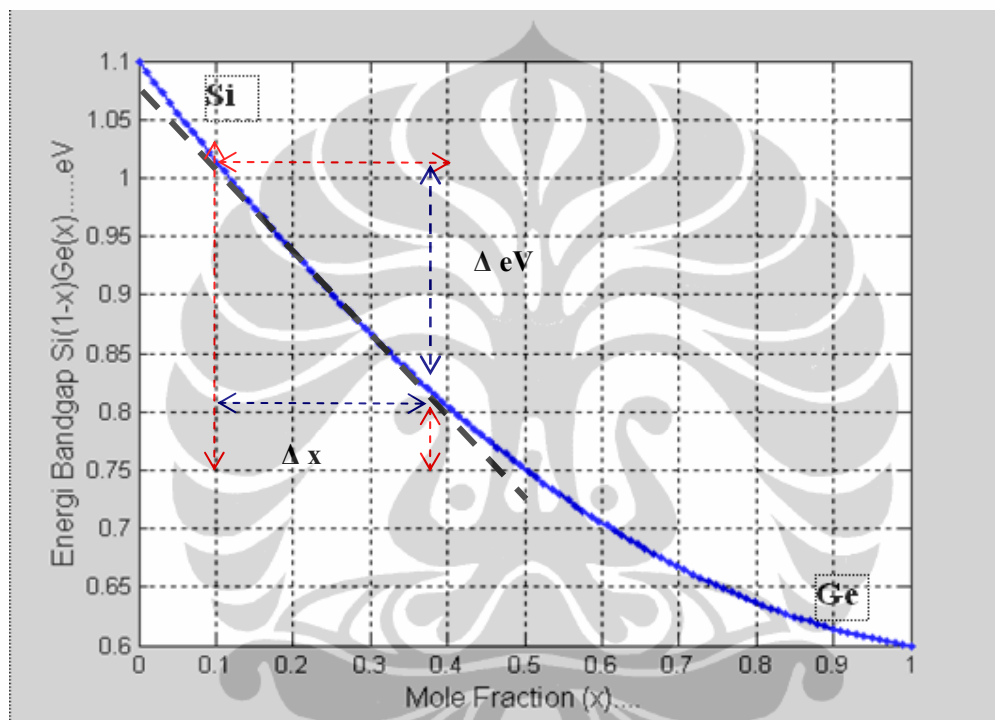
Hubungan antara *mole fraction* ( $x$ ) dengan energi *bandgap* ( $E_g$ ) dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.2. [15][20], persamaan ini efektif untuk *mole fraction* ( $x$ )  $< 0.3$ ,

$$E_g(Si_{1-x}Ge_x) = E_g(Si) - 0,896x - 0,396x^2 \dots eV \quad (2.2a)$$

Jika energi bandgap Silikon ( $E_{gSi}$ )= 1,1 eV, maka 2.2(a) menjadi Persamaan 2.2(b) yaitu,

$$E_{g, SiGe} = 1,1 - 0,896x - 0,396x^2 \dots\dots eV \quad (2.2b)$$

Jika *mole fraction* ( $x$ ) sama dengan 0, maka energi bandgap pada SiGe ( $E_{g, SiGe}$ ) sama dengan energi bandgap Si ( $E_{g, Si}$ ) yaitu sebesar 1,1 eV, kemudian untuk  $x=1$ , maka  $E_{g, SiGe} = E_{g, Ge}$  yaitu 0,66 eV. Gambar 2.3 menunjukkan hubungan antara Energi bandgap ( $E_g$ ) pada  $Si_{(1-x)}Ge_x$  ( $E_{g, SiGe}$ ) terhadap *mole fraction* ( $x$ ),



Gambar 2.3  
Grafik  $E_{g, SiGe}$  terhadap *mole fraction* ( $x$ ).

Berdasarkan pada Gambar 2.3 dapat ditentukan pada daerah linier untuk *mole fraction* ( $x$ ) yaitu di bawah 0,4 dengan titik singgung (Q point) pada 0,9 eV sehingga dapat ditentukan *slope* kemiringan ;

$$K_0 = \frac{\Delta E_{g, SiGe}}{\Delta x} = \frac{0,18}{0,24} = 0,74 eV ,$$

dengan demikian nilai  $K_0 = 74$  meV dengan  $x$  dinyatakan dalam persen (%), hal ini hampir mendekati persamaan serupa yang dinyatakan oleh B.Pejnovicn. [21]

Dari kedua Persamaan 2.1 dan 2.2 dapat ditentukan hubungan antara energi bandgap ( $E_{g, SiGe}$ ) dan *lattice constant* ( $a_{SiGe}$ ) ditentukan berdasarkan fungsi *deconvolution* yaitu;

$$a_{SiGe}(x) = 5,431 + 0,1992x + 0,002733x^2$$

$$E_{g,SiGe}(x) = 1,1 - 0,896x - 0,396x^2$$

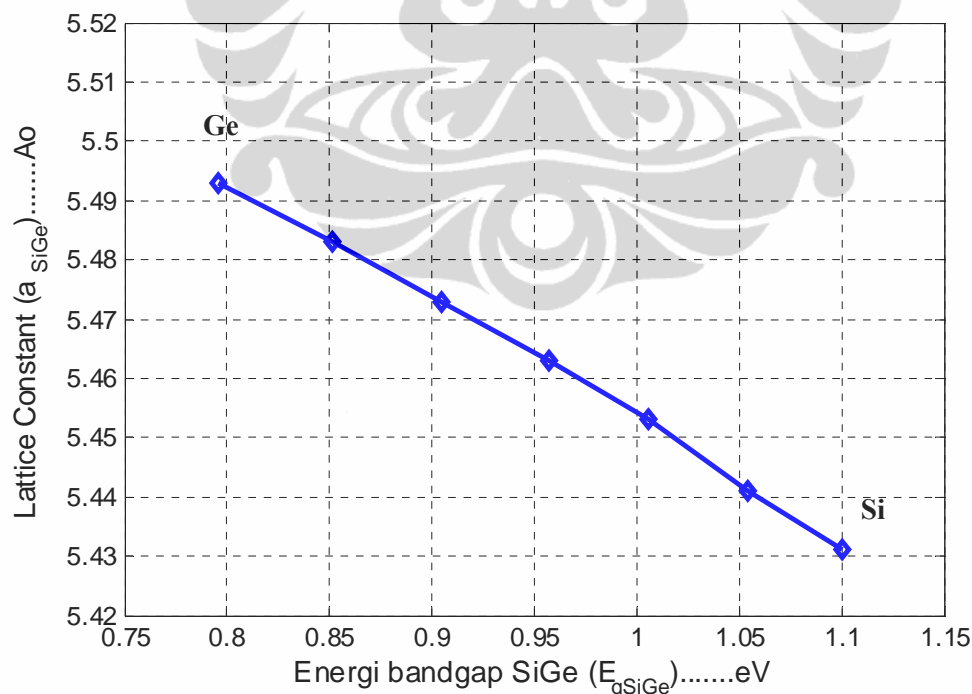
$$K_0 = \text{deconv.}(a_{SiGe}, E_{gSiGe})$$

Dengan software matlab dapat dituliskan sbb;

$a=[0.002733 \ 0.1992 \ 5.431]$ ;  $b=[-0.396 \ -0.896 \ 1.1]$ ;  $c = \text{deconv}(a,b)$ , ketika di eksekusi maka nilai  $c=-0,0069$ . Hal ini berarti *slope* kemiringan rasio  $E_{gSiGe}$  dan  $a_{SiGe}$ , memiliki *gradient* arah atau  $K_x$   $-0,0069 \text{ \AA}^\circ/\text{eV}$ , dengan demikian maka persamaan *lattice constant* SiGe terhadap energi *bandgap* SiGe ditunjukkan seperti pada Persamaan 2.3.

$$a_{SiGe} = -0,0069 \times E_{g,SiGe} \quad (2.3)$$

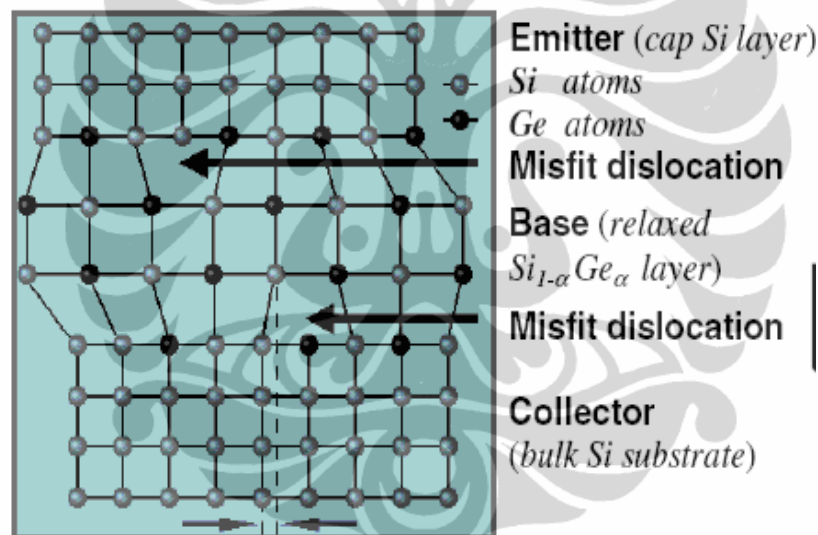
$K_x = -0,0069$  dengan satuan  $\text{eV}/\text{\AA}^\circ$ , berlaku untuk nilai  $x = 30\%$ , Sehingga nilai *lattice constant* ( $a_{SiGe}$ );  $5,431 \text{ \AA}^\circ < a_{SiGe} < 5,493 \text{ \AA}^\circ$ , dengan nilai energi *bandgap* ( $E_{gSiGe}$ );  $0,769 \text{ eV} < E_{gSiGe} < 1,1 \text{ eV}$ . Gambar 2.4 menunjukkan grafik antara  $a_{SiGe}$  dengan  $E_{gSiGe}$



Gambar 2.4  
Grafik *lattice constant* ( $a_{SiGe}$ ) terhadap energi *bandgap* ( $E_{gSiGe}$ )  
untuk  $x < 30\%$ .

## 2.2 Strain, dislocation dan critical thickness Heterostruktur Silikon – Germanium (SiGe).

Seperti dinyatakan pada bagian sebelumnya bahwa penggabungan Silikon dan Germanium berdasarkan pada *crystalline surface* dengan *direction* 001, salah satu keuntungan dari *direction* ini hasil penggabungan akan mempunyai *noise figure minimum* yang paling rendah serta tegangan *threshold* ( $V_T$ ) yang dapat dikontrol. Pada Gambar 2.5 ditunjukkan struktur *Heterojunction* Bipolar Transistor Silikon-Germanium (HBT-SiGe) dan struktur material yang dimulai dari Emiter-Basis-Kolektor adalah Si-SiGe-Si. *Misfit dislocation* terjadi pada sambungan basis-emiter dan emiter-kolektor. Dengan *electron microscopy* kondisi *equilibrium* SiGe/Si interfaces memiliki *misfit dislocation* dengan sudut  $60^\circ$ . [22]

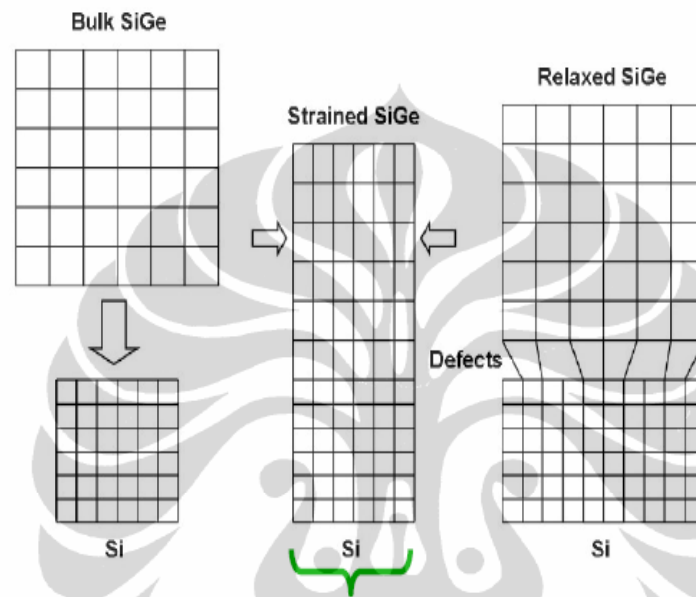


Gambar 2.5 . Susunan material HBT SiGe. [23]

Pada penumbuhan substrat Si dari SiGe akan terjadi dua asumsi yaitu jika lapisan SiGe yang mempunyai konstanta *lattice* lebih besar ditumbuhkan di atas substrat Si yang mempunyai konstanta *lattice* yang lebih kecil, lapisan SiGe akan mengalami tekanan (*strain*) yang disebut lapisan SiGe dalam kondisi *strained* namun, jika lapisan SiGe yang ditumbuhkan melebihi ketebalan kritis (*critical thickness*) akan diperoleh lapisan SiGe *unstrained* atau *relaxed*, kedua asumsi ini mempunyai properties yang berbeda. Dari hasil beberapa eksperimen diketahui bahwa ketebalan kritis lapisan SiGe dipengaruhi oleh temperatur

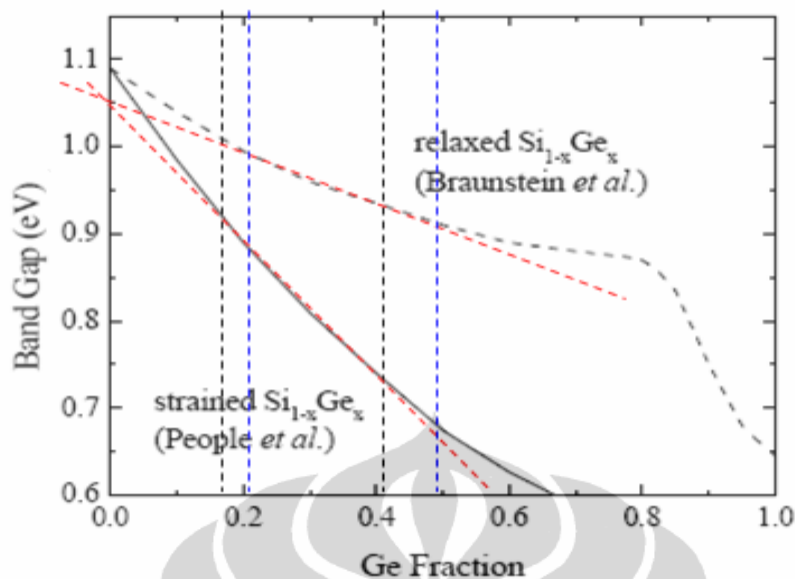


penumbuhan, kecepatan penumbuhan, dan adanya lapisan penutup (*cap layer*) Si di atas lapisan SiGe.[24] Gambar 2.6 memperlihatkan penumbuhan SiGe pada Si yang menghasilkan dua asumsi *strained* dan *unstrained* atau *relaxed*. Pada penumbuhan *relaxed* dihasilkan *defect* yang berpengaruh pada kenaikan temperatur pada *properties* material tersebut.



Gambar 2.6. Penumbuhan SiGe pada Silikon.[24]

Lapisan SiGe *strained* dan *unstrained* (*relaxed*) mempunyai *slope* energi *bandgap* ( $E_g$ ) yang berbeda terhadap *mole fraction* ( $x$ ) atau disebut *Ge fraction*. Lapisan *strained*  $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$  mempunyai *slope* 0,68 eV per-satuan fraksi Ge. dan lapisan *unstrained* mempunyai *slope* sekitar 0,1 eV dengan daerah *Ge fraction* dari 0,18 sampai 0,5. Lapisan *unstrained* memiliki daerah kerja *Ge fraction* lebih besar yaitu dari 0 sampai dengan 1, sedangkan untuk lapisan *strained* memiliki daerah *Ge fraction* sampai 0,68. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



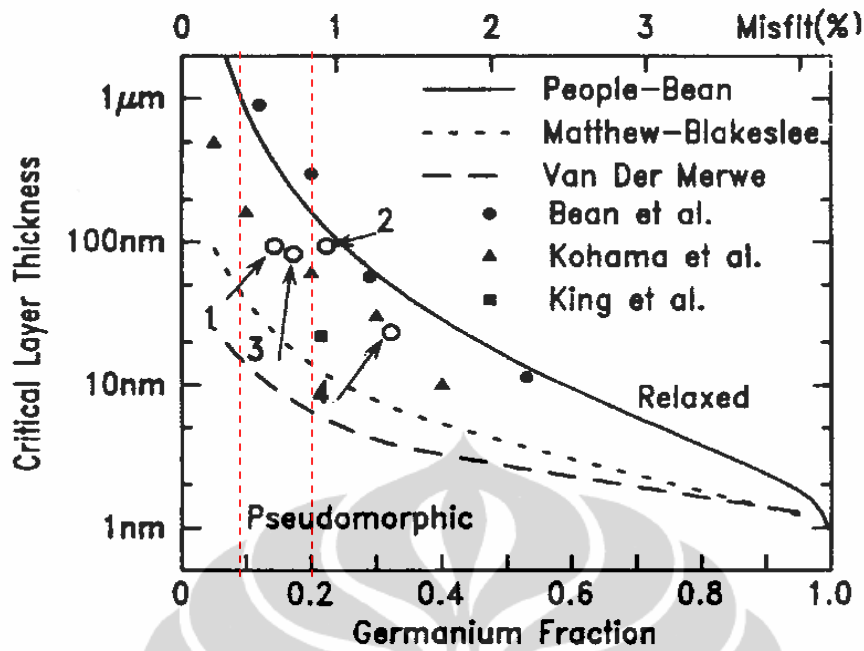
Gambar 2.7. Grafik energi *bandgap* ( $E_g$ ) terhadap *fraction* Ge. [21]

Besar energi *bandgap* ( $E_g$ ) di samping dipengaruhi oleh fraksi Ge yang membentuk daerah *strained* dan *unstrained* juga dipengaruhi dan dibatasi oleh *misfit dislocation* yang dinyatakan dengan persen (%) dengan notasi  $\alpha$ . Christoph Schelling (2000) pada disertasinya menyusun formulasi empiris dari *critical thickness* ( $t_{crit}$ ), pada heteromaterial Si/SiGe, hal iniditunjukkan oleh Persamaan 2.4 berikut. [18]

$$t_{crit} = 3,9[A^\circ] \cdot \frac{1,326}{x} \cdot \ln\left(\frac{\alpha}{3,9[A^\circ]}\right) \quad (2.4)$$

$x$  adalah fraksi Ge pada Silikon,  $\alpha$  adalah *misfit* dislokasi yang dinyatakan dalam persen (%).

Dari beberapa hasil riset yang telah dilakukan analisis ketebalan kritis dari campuran Silikon dan Germanium ditunjukkan oleh Gambar 2.8 . Model disajikan berdasarkan hasil riset People-Bean, Mathe -Blakesle, Van der Merwe, Bean, Kohama dan King et all, serta beberapa titik 1,2,3 dan 4 adalah riset hasil dari Yin Haizhou (2004). [19]



Gambar 2.8. Diagram grafik ketebalan kritis  $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_{(x)}$  terhadap *fraction* Ge. [19]

Dari diagram tersebut hasil terlihat bahwa People dan Bean membagi dua bagian daerah ketebalan yaitu daerah *relaxed* dan *strained* atau *pseudomorphic* sedangkan Mathew dan Van den Merwe menghasilkan daerah *relaxed* yang lebih luas dan daerah *strained* yang sempit dibandingkan hasil riset People dan Bean.[21] Persamaan 2.5 menunjukkan *critical thickness* ( $h_c$ ) dari formulasi Van den Merwe. [19]

$$h_c \cong \frac{19}{16\pi^2} \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \left( \frac{b}{f} \right) \quad (2.5)$$

$\nu$  adalah *ratio poisson*,  $b$  adalah *Burger's vector*, nilai  $b$  untuk penumbuhan substrat silikon adalah 0,04nm dan  $f$  adalah *latice mismatch* (misfit) pada layer

Silikon dan Germanium,  $f$  dapat dinyatakan ;  $f = \frac{a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}}$

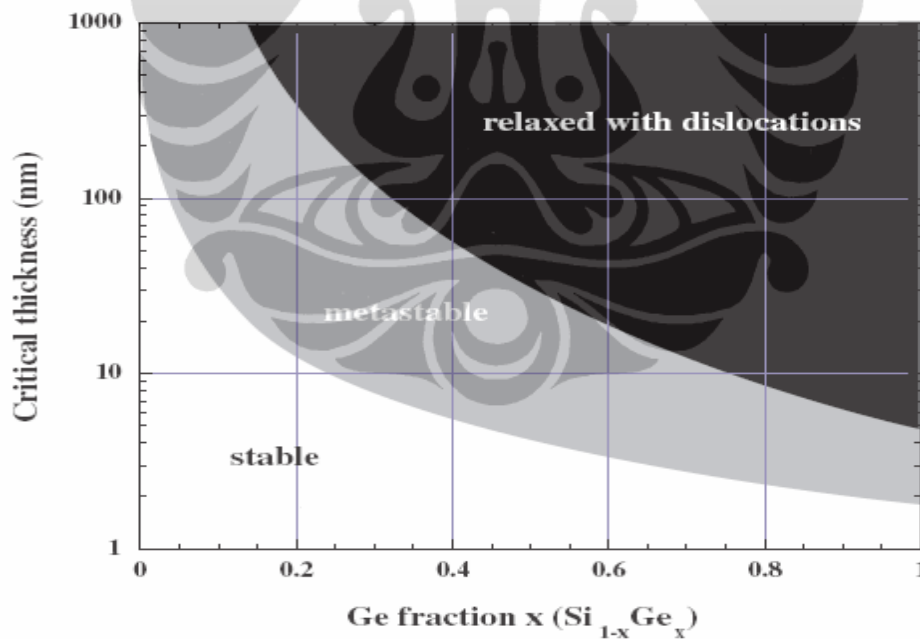
Beberapa hasil riset yang lainnya seperti Kohama, King et all dan Yin Haizhou menempatkan ketebalan kritis yang optimal berada pada daerah irisan hasil riset Mathew- Blakeslee, formulasi *critical thikness* ( $h_c$ ) dari Mathew- Blakeslee dinyatakan oleh Persamaan 2.6, yaitu;[9][19][25]

$$h_c \cong \frac{b}{2\pi f} \frac{(1-\nu \cos^2 \theta)}{(1+\nu) \cos \lambda} \left[ \ln \left( \frac{h_c}{b} \right) + 1 \right] \quad (2.6)$$

$h_c$  adalah ketebalan kritis minimum,  $\theta$  adalah sudut antara *dislocation line* dan *Burgers vector* serta  $\lambda$  adalah sudut diantara *Burgers vector* dan *interface line* jika, *misfit* di antara Si and Ge dan  $f = 0,0418$ ,  $b=0.4$  nm umumnya setara dengan  $\frac{a_A}{\sqrt{2}}$ ,  $a_A$  adalah *lattice constan* pada daerah relaksasi,  $\theta = \lambda = 60^\circ$ , maka menghasilkan Persamaan 2.7.[9] ;

$$h_c \approx \frac{0,55}{x} \ln(10 h_c) \longrightarrow h_c \approx 1,7793 x^{-1,2371} \text{ nm} \quad (2.7)$$

Model ketebalan kritis yang umum digunakan adalah saat ekuilibrium seperti model yang dikemukakan oleh Matthews dan Blakeslee, yang membagi kedalam tiga bagian yaitu *relaxed with dislocations*, *metastabel* dan *stable*, pada saat terjadi dimana terjadi gaya keseimbangan antara misfit strain dengan tension dislocation.[9][25]

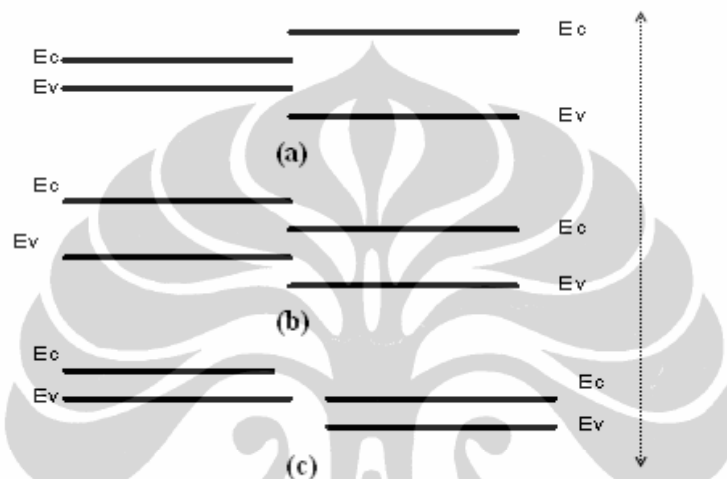


Gambar 2.9. Diagram ketebalan kritis *Matthews dan Blakeslee* pada  $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_{(x)}$ . [25]

### 2.3 Heterojunction Bipolar Transistor (HBT) SiGe.

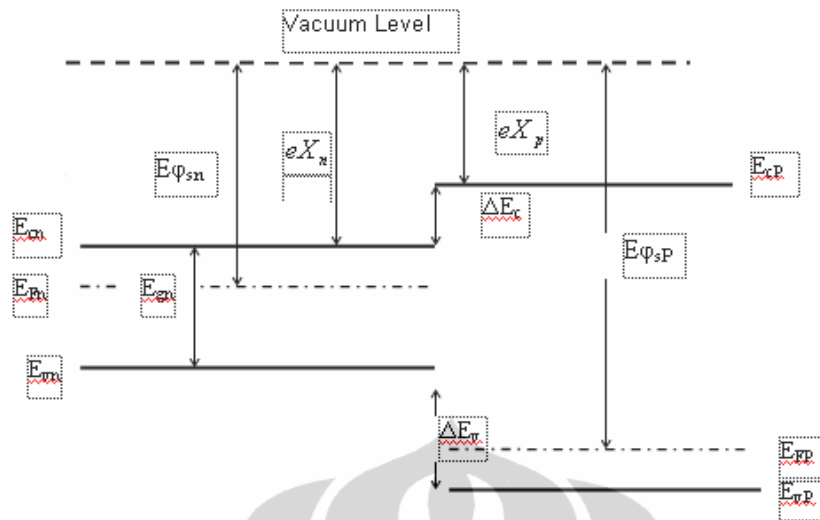
Sisi basis HBT SiGe dibentuk dari dua semikonduktor yang tidak sama *lattice constant* nya. Jika kedua semikonduktor mempunyai tipe konduktivitas

yang sama, sambungannya disebut *isotype heterojunction* dan jika berbeda disebut *anisotype heterojunction*. Beberapa contoh *heterojunction* semikonduktor adalah  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ ,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  atau Silikon Carbide ( $\text{Si}_{1-x}\text{Cd}_x$ ), *junction heterostruktur* semikonduktor terdiri ; *Straddling*, *Staggered* dan *Broken Gap Heterojunction*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. [1]



Gambar 2.10. Sambungan heteromaterial semikonduktor (a) *Straddling*, (b) *Staggered* dan (c) *Broken Gap Heterojunction*. [1]

Sambungan Silikon dan Germanium yang membentuk material heterostruktur SiGe, mendekati *staggered heterojunction*, tegangan potensial barier ( $V_{bi}$ ) pada pertemuan *heterojunction* semikonduktor dapat dijelaskan sesuai dengan Gambar 2.11.[24]



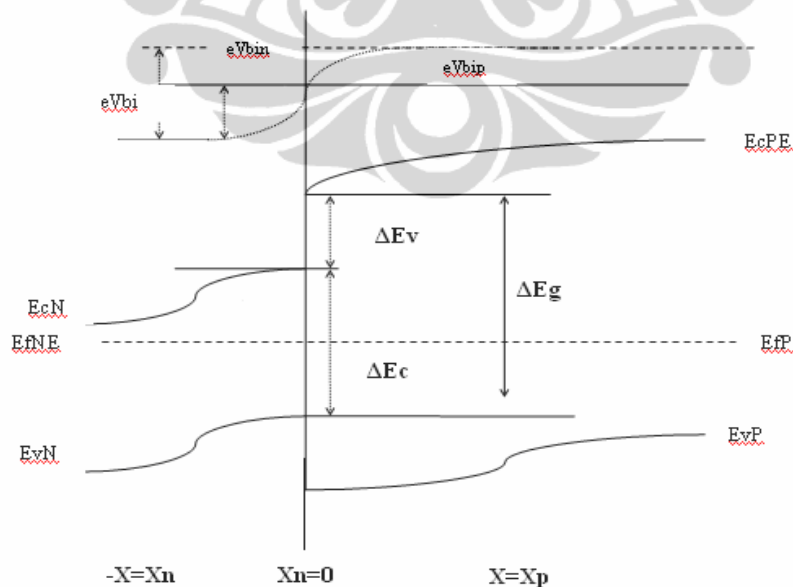
Gambar 2.11. Diagram energi *bandgap Straddling heterojunction*. [24]

$$\Delta E_c = e(\chi_n - \chi_p) \tag{2.8a}$$

$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{gp} - E_{gn} = \Delta E_g$$

$\Delta E_g$  = Energi *Bandgap*

Untuk membangun persamaan *built in potensial barrier* ( $V_{bi}$ ) atau tegangan potensial *barrier* pada *straddling heterojunction* dapat dimulai menggunakan diagram gambar 2.12.



Gambar 2.12. *Bandgap straddling heterojunction*. [24]

Tegangan pada *surface junction* yaitu tegangan *potential barrier* ( $V_{bi}$ ) dapat diturunkan sebagai berikut;

$$\begin{aligned} V_{bi} &= \Phi_S P - \Phi_S N \\ eV_{bi} &= [e\chi_{p1} + E_{gp} - (E_{FP} - E_{VP})] - [e\chi_n - E_{gn} - (E_{Fn} - E_{Vn})] \\ eV_{bi} &= e([e\chi_{n1} - \chi_{n2}) + (E_{gp} - E_{gn}) + (E_{Fn} - E_{Pn}) - (E_{FP} - E_{VP})] \end{aligned} \quad (2.8b)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan sehingga dapat diturunkan menjadi Persamaan 2.9 seperti ;

$$\begin{aligned} eV_{bi} &= -\Delta Ec + \Delta Eg + kT \ln \left[ \frac{N_{vn}}{P_{no}} \right] - kT \ln \left[ \frac{N_{vp}}{P_{po}} \right] \\ eV_{bi} &= \Delta Ev + kT \ln \left[ \frac{P_{po} N_{vn}}{P_{no} N_{cn}} \right] \\ \Delta Ev &= eV_{bi} - kT \ln \left[ \frac{P_{po} N_{vn}}{P_{no} N_{cn}} \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

$\Delta E_v$  selisih energi pada pita valensi dan konduksi dan  $P_{po}$ ,  $P_{no}$  adalah *hole concentration* pada material positif (p) dan negatif (n). Hal ini juga berlaku untuk bagian pita konduksi yang menghasilkan energi pada pita konduksi  $\Delta E_c$ , dengan pola yang sama. Tegangan *built in potensial barrier* ( $V_{bi}$ ) dilihat dari pita konduksi dapat dituliskan menjadi ;

$$V_{bi} = -\Delta Ec + kT \ln \left[ \frac{P_{po} N_{vn}}{P_{no} N_{cn}} \right] \quad 2.10a$$

$$\Delta Ec = kT \ln \left[ \frac{P_{po} N_{vn}}{P_{no} N_{cn}} \right] - eV_{bi} \quad 2.10b$$

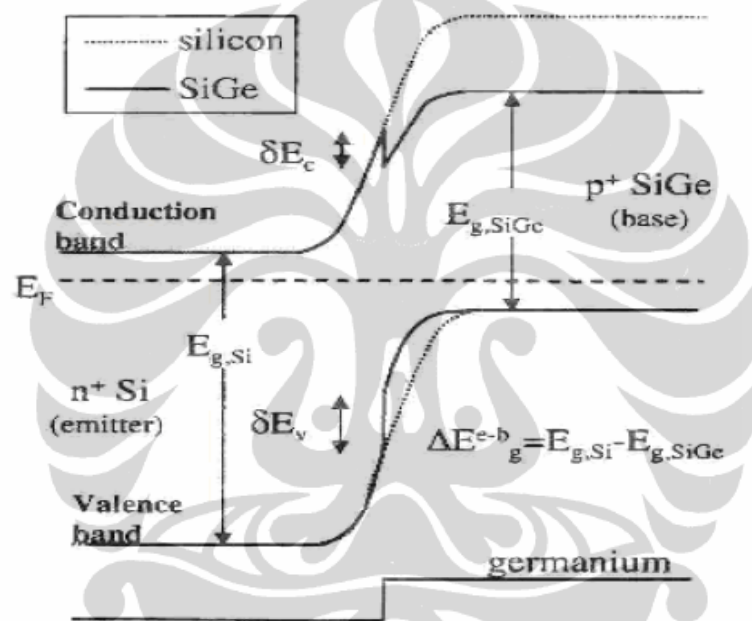
Dengan substitusi Persamaan (2.10b) ke Persamaan (2.8a), maka  $\Delta Eg$ , *bandgap* energi, dapat dituliskan sesuai Persamaan 2.11 berikut ;

$$\begin{aligned} \Delta Eg &= \Delta Ec + \Delta Ev \\ \Delta Eg &= kT \ln \left[ \frac{P_{po} N_{vn}}{P_{no} N_{cn}} \right] + kT \ln \left[ \frac{P_{po} N_{vn}}{P_{no} N_{cn}} \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

#### 2.4 Energi *bandgap* pada HBT SiGe (Silikon Germanium)

Ada dua pola sambungan pada basis-emiter HBT SiGe yang terjadi, yaitu *abrupt* dan *graded junction* kedua pola ini terjadi karena bentuk sebaran *mole fraction* (x) pada  $Si_{1-x}Ge_x$  berbeda. Sebaran *mole fraction* untuk *abrupt junction*

sifatnya *uniform* di setiap luasan sambungan, sedangkan untuk *graded junction* sebaran *mole fraction* berbeda di setiap luasan sambungan. Sebaran  $x$  pada material  $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ , pada terminal basis dapat mempengaruhi energi *bandgap* ( $\Delta E_g$ ). Secara umum  $\Delta E_g$  dipengaruhi oleh parameter konsentrasi *doping* pada emiter ( $N_E$ ) dan *mole fraction* ( $x$ ) pada  $\text{SiGe}$ . Gambar 2.13 menunjukkan hubungan *abrupt emitter basis junction* dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa sebaran silikon pada basis sifatnya *uniform* sehingga tegangan energi *bandgap* emiter basis ( $\Delta E_{g,\text{SiGe}}^{e-b}$ ) nilainya sama di sepanjang terminal basis.[26]



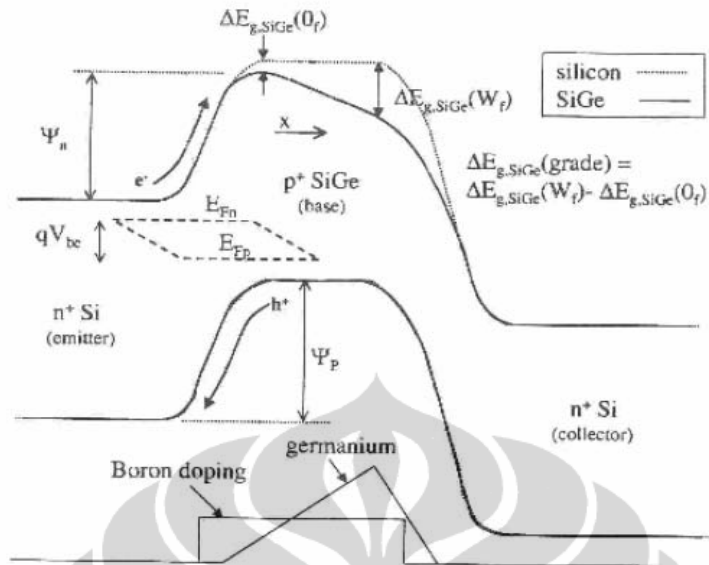
Gambar 2.13. Diagram *abrupt junction* pada Silikon dan SiGe.[26]

Pada Gambar 2.14 ditunjukkan *graded* emiter-basis HBT SiGe, nilai energi *bandgap* ( $\Delta E_g$ ) sepanjang basis berubah bergantung pada perubahan  $\frac{\Delta E_{g,\text{SiGe}}}{\Delta W_b}$  konduksi pada sambungan *heterojunction* yang memberikan gambaran adanya perbedaan struktur dari *fraction mole* ( $x$ ) pada  $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$ , dengan demikian persamaan  $\Delta E_g$  sepanjang lebar basis ( $W_b$ ), sesuai dengan Persamaan 2.12 berikut;

$$\Delta E_{g,\text{SiGe}(\text{grade})} = \Delta E_{g,\text{SiGe}(W_f)} - \Delta E_{g,\text{SiGe}(W_{0f})} \quad 2.12$$

yang mana  $\Delta W_b = W_f - W_{0f}$



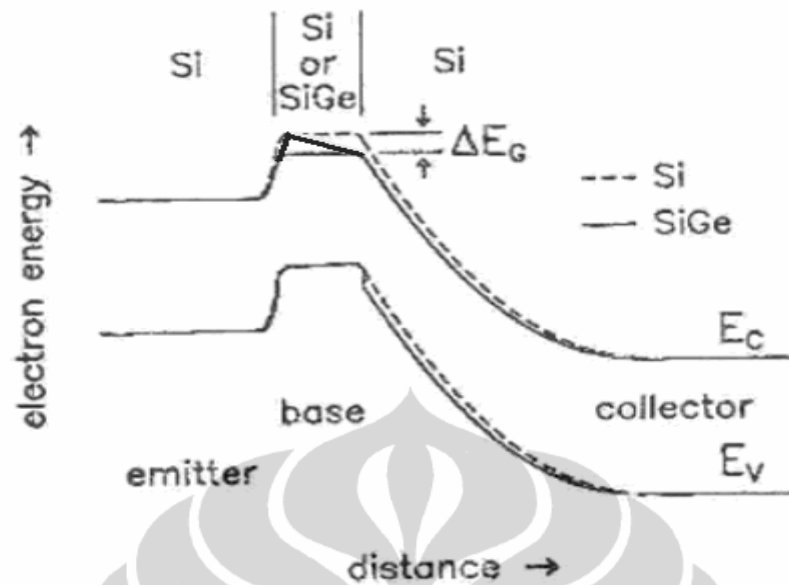


Gambar 2.14. Diagram *graded emitter-base heterojunction* bipolar transistor (HBT) Silikon-Germanium.[26]

Seperti telah diuraikan sebelumnya penambahan Ge pada Si pada heterostruktur SiGe akan menyebabkan terjadinya penyempitan celah pita energi (*bandgap narrowing*), besarnya penyempitan celah pita energi *bandgap* ini dipengaruhi oleh *mole fraction* ( $x$ ) pada  $Si_{(1-x)}Ge_x$ . [27] Penyempitan celah pita energi pada bahan SiGe hampir seluruhnya terjadi pada pita valensi, diskontinuitas pada pita konduksi sangat kecil dibandingkan dengan penyempitan celah pita (*bandgap narrowing*) energi secara keseluruhan, sehingga dapat diabaikan. Energi *bandgap narrowing* ( $\Delta E_{g,Ge}$ ) merupakan parameter fisika *heterojunction* yang sangat menentukan unjuk kerja HBT, terutama unjuk kerja *current gain* ac ( $\beta_{ac}$ ) maupun *current gain* dc ( $\beta_{dc}$ ). Gambar 2.15 menunjukkan energi *bandgap narrowing* ( $\Delta E_{g,Ge}$ ) yang disebabkan oleh pengaruh *mole fraction* ( $x$ ), dengan model matematika dari oleh B. Pejcinovic sesuai dengan Persamaan 2.13. [28]

$$\Delta E_{g,Ge} = 0,74x \quad (2.13)$$

dengan  $\Delta E_{g,Ge}$  energi *bandgap* akibat penambahan Ge, dan  $x$  (*mole fraction*) atau fraksi Ge, persamaan ini berlaku untuk  $x < 30\%$ .

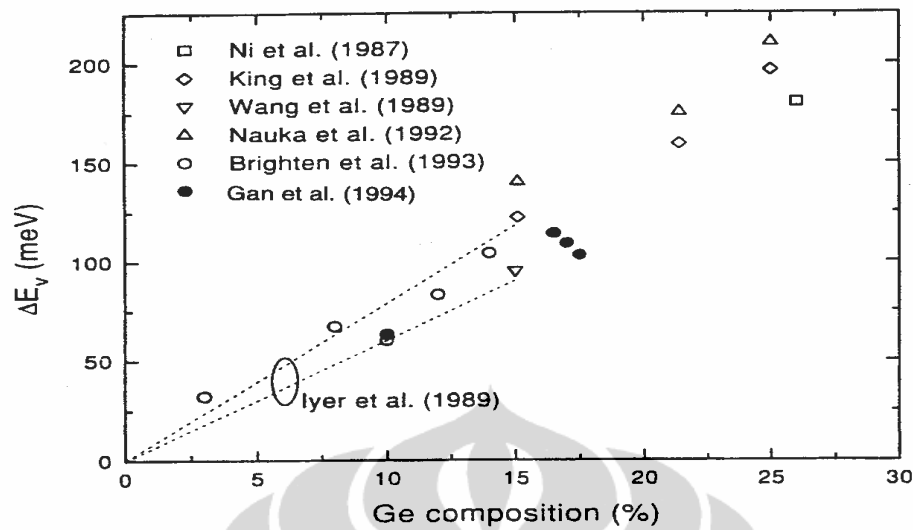


Gambar 2.15. Diagram *abrupt emitter-base heterojunction* bipolar transistor (HBT) Silikon-Germanium.[26]

Model lain persamaan energi *bandgap* narrowing ( $\Delta E_{g,Ge}$ ) dinyatakan oleh Persamaan 2.14 .[29]

$$\begin{aligned} \Delta E_{g,Ge} &= \alpha \cdot x \\ \alpha &= 8.7 \times 10^{-3} \text{ eV} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Grafik pada Gambar 2.16 memperlihatkan hasil eksperimen yang menunjukkan besarnya diskontinuitas pada pita valensi yang menghasilkan energi *bandgap* narrowing ( $\Delta E_{g,Ge}$ ) sebagai fungsi komposisi Ge yang dinyatakan dalam persen (%). [30]



Gambar 2.16 Grafik energi *bandgap* terhadap komposisi Ge pada SiGe. [29]

Selain terjadi penambahan Ge pada Si yang menyebabkan timbulnya  $\Delta E_{g,Ge}$  energi *bandgap* dapat terjadi karena konsentrasi *doping* yang tinggi (*heavy doping*) pada sisi emiter, energi *bandgap* ini disebut  $\Delta E_{g,hd}$  dengan model persamaan ditunjukkan oleh Hueting sesuai dengan Persamaan 2.15. [28] [30]

$$\Delta E_{g,hd} = C_1 \left[ \ln \left( \frac{N}{C_2} \right) + \sqrt{\ln^2 \left( \frac{N}{C_2} \right) + 0,5} \right] \text{ eV} \quad (2.15)$$

dengan  $N$  konsentrasi *doping*, dengan nilai  $C_1 = 0,00692 \text{ eV}$  dan  $C_2 = 1,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Nilai  $\Delta E_{g,hd}$  dapat disederhanakan menjadi Persamaan 2.16 dengan  $N$  adalah konsentrasi *doping* pada emiter notasi  $N_E$ . [29]

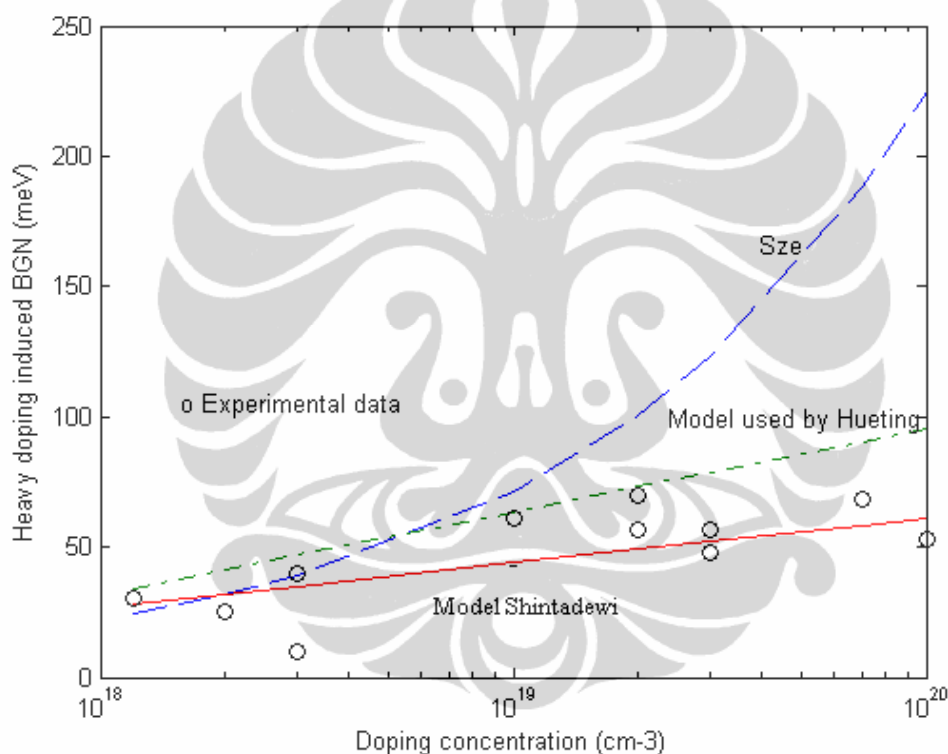
$$\Delta E_{g,hd} = 22,5 \left( \frac{N_E}{10^{18}} \right)^{1/2} \text{ eV} \quad (2.16)$$

Berdasarkan pendekatan analisis *Gauss-method* dengan data-data berasal dari beberapa persamaan di atas, maka formulasi matematik  $\Delta E_{g,hd}$  dapat dibentuk sesuai dengan Persamaan 2.17.[31][32]

$$\Delta E_{g,hd} = 7,4066 \ln \left( \frac{N}{0,2648 \cdot 10^{17}} \right) + 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \quad (2.17)$$

$N$  konsentrasi *doping*.

Dari ketiga model  $\Delta E_{g,hd}$  jika diplot dalam satu grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.17 yang memperlihatkan bahwa energi *bandgap* akibat *doping* tinggi ( $\Delta E_{g,hd}$ ), terhadap konsentrasi *doping* menghasilkan grafik yang tidak linier untuk pemodelan Sze (1981), dan linier untuk pemodelan Hueting (1997) dan Shintadewi (2006) dengan konsentrasi *doping* diatur dari  $10^{18}$  sampai  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . [31] Daerah linier untuk model Sze dapat ditentukan mulai dari titik perpotongan dengan grafik model Shintadewi saat  $N=2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , saat  $\Delta E_{g,hd}$  20 meV sampai dengan perpotongan dengan grafik Hueting pada  $N=1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  dan  $\Delta E_{g,hd}$  yang besarnya sekitar 55 meV.



Gambar 2.17 Grafik energi *bandgap* terhadap *doping* konsentrasi. [31]

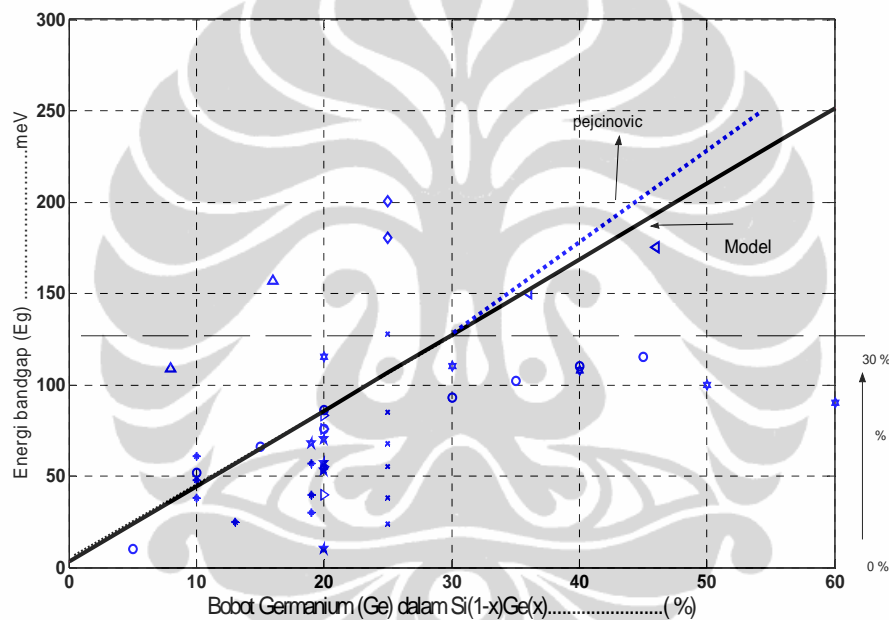
Dari penjelasan tersebut nilai energi *bandgap* ( $\Delta E_g$ ) pada HBT SiGe merupakan akumulasi dari energi *bandgap* yang disebabkan oleh *mole fraction* ( $x$ ) pada  $\text{Si}_{(1-x)}\text{Ge}_x$  pada basis dan akibat *doping* tinggi. Dengan demikian besar energi *bandgap* yang terakumulasi pada HBT SiGe sesuai dengan Persamaan 2.18 berikut; [30]

$$\Delta E_{g, \text{SiGe}} = \Delta E_{g, \text{Ge}} + \Delta E_{g, \text{hd}} \quad \text{eV} \quad (2.18)$$

Dengan pendekatan regresi non linier data sekunder dari hasil riset yang dilakukan oleh SM Sze, B Pjenovic, V Sankaran, L King, Andreas Gruhle, B Le Tron, JM Lopez, Hueting dan Levent B Sipahi formulasi pemodelan energi *bandgap* pada SiGe ( $\Delta E_{g, SiGe}$ ) yang disebabkan *mole fraction* ( $x$ ) dan *doping* konsentrasi sesuai dengan Persamaan model 2.19.[33] Diagram grafik ditunjukkan pada Gambar 2.18.

$$\Delta E_{g, SiGe} = 2.89 + 4.14 x - 2.10^{-19} \log(N) \quad \text{m.eV} \quad (2.19)$$

$x = \text{MoleFraction}$   
 $N = \text{Konsetrasi\_Doping}$

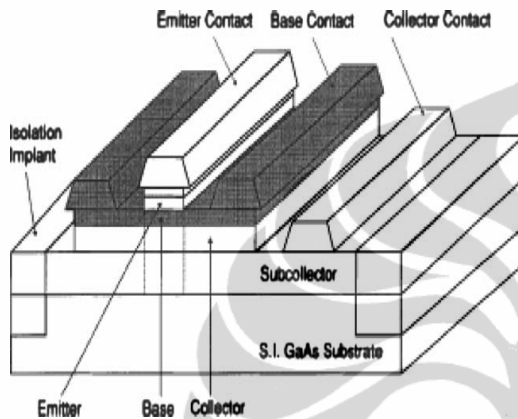


Gambar 2.18 Grafik energi *bandgap* terhadap *mole fraction*, saat  $N_b = 10^{19} \text{ cm}^3$ . [33]

## 2.5 Parameter pada *Heterojunction* Bipolar Transistor Silikon Germanium ( HBT SiGe )

Bentuk geometris, *lateral*, vertikal dan skema pertumbuhan layer pada HBT SiGe ditunjukkan pada Gambar 2.19(a),(b),(c) dan (d), ukuran dan besarnya nilai parameter dapat menentukan unjuk kerja yang optimal, yaitu frekuensi *threshold* (*cutoff*) ( $f_T$ ), osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ), *current gain* ( $\beta$ ) dan *noise figure* ( $F_n$ ), dan resistansi parasitis  $R_{bb}$  dan  $R_C$  seperti telah diterangkan pada Bab.1.

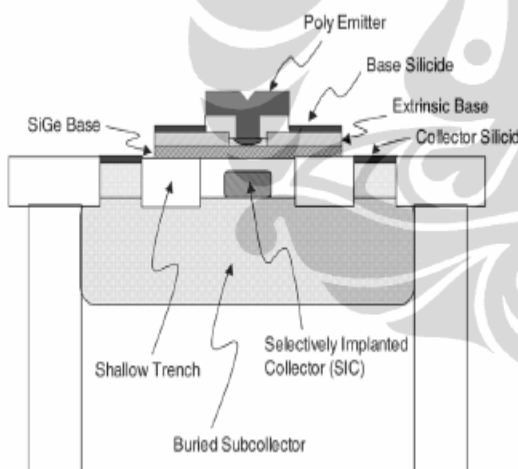
Gambar 2.19(a) menunjukkan geometris dengan dua terminal basis dan masing-masing satu terminal emiter dan kolektor, Gambar 2.19(b) menunjukkan skematik arah vertikal merupakan *cross section* dari geometri, yang menunjukkan ketebalan dari devais , Gambar 2.19(c) menunjukkan *cross section* arah vertikal dan Gambar 2.19(d) menunjukkan arah *lateral* dari HBT, yang menunjukkan lebar, panjang, luas dan *lithography* dari terminal basis,emiter dan kolektor.



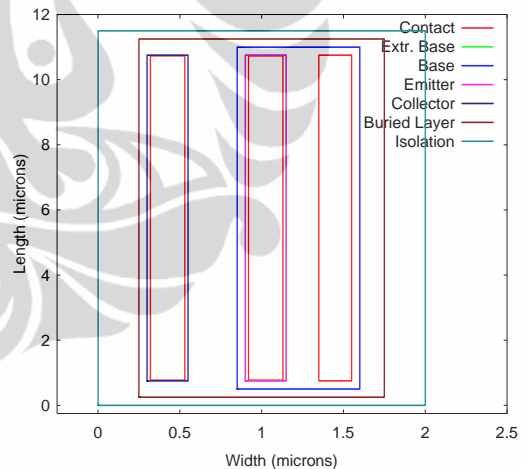
Gambar 2.19a. Geometris HBT SiGe [34]

Emitter cap	Si	$n^+$	$1 \times 10^{20}$	150 nm
Emitter	Si	$n$	$1 \times 10^{18}$	50 nm
Spacer	$Si_{0.7}Ge_{0.3}$	$i$		5 nm
Base	$Si_{0.7}Ge_{0.3}$	$p^+$	$1 \times 10^{20}$	20 nm
Spacer	$Si_{0.7}Ge_{0.3}$	$i$		5 nm
Collector	Si	$n^-$	$1 \times 10^{16}$	500 nm
Subcollector	Si	$n^+$	$1 \times 10^{19}$	1 $\mu m$
Substrate	Si	$p^-$	$1 \times 10^{12}$	540 $\mu m$

Gambar 2.19b. Struktur HBT SiGe [36]



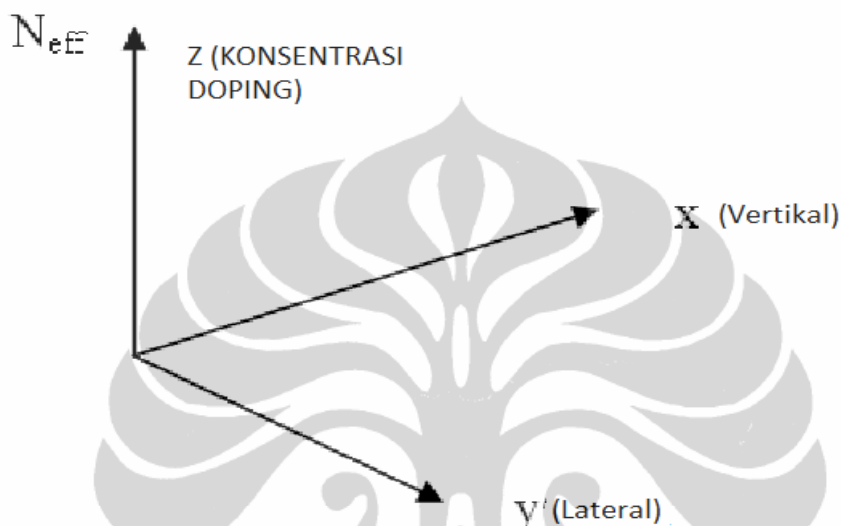
Gambar 2.19c. Potongan vertikal HBT SiGe. [15]



Gambar 2.19d Arah *lateral* HBT SiGe. [35]

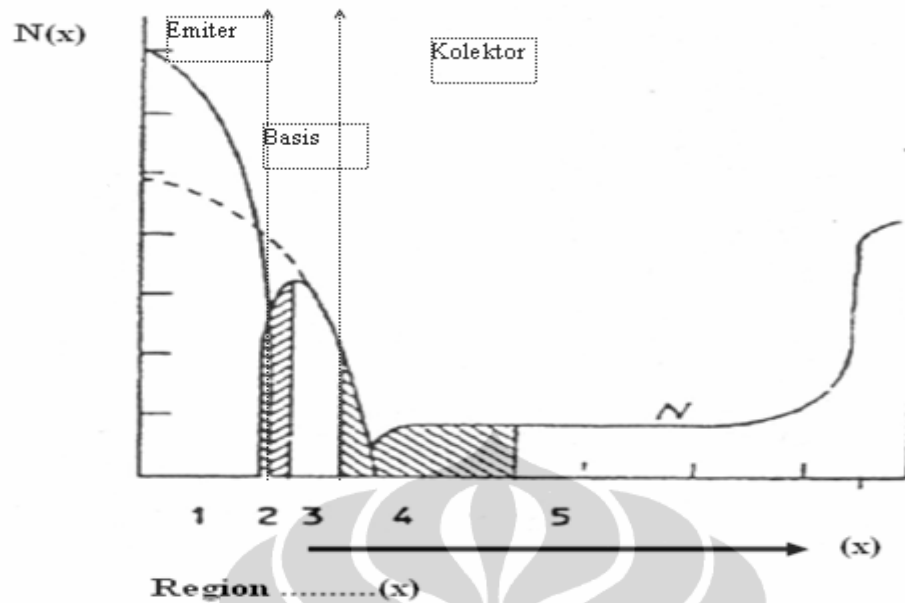
Dalam menganalisis parameter tersebut dapat digunakan pendekatan geometris dari HBT SiGe dengan mempresentasikan ke dalam tiga(3) dimensi yaitu arah vertikal, sumbu Z yang menunjukkan nilai konsentrasi *doping* elektron, pada sumbu Y merepresentasikan arah *lateral* yang menunjukkan panjang dari finger kolektor , base dan emiter, kemudian pada arah X (vertikal)

menunjukkan ketebalan dari emiter, basis dan kolektor yang dinyatakan dalam nanometer. Diagram pendekatan geometris secara cartesian tersebut dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.20. Dari pola geometris HBT SiGe dapat dinyatakan bahwa *electron transport* yang terjadi merupakan penjumlahan *total charge* elektron yang terdistribusi pada bagian X,Y dan Z yang sesuai dengan *the second uniqueness theorem* dari *Poisson equation*. [37]



Gambar 2.20. Pendekatan geometris sumbu X,Y,Z HBT SiGe.

Pendekatan arah sumbu X yaitu profil doping terbagi dalam area netral dan *space charge region* (scr) dibagi ke dalam 5 (lima) area *depth* sepanjang sumbu x yaitu 1) *neutral emiter*, 2) *emiter-base space charge layer*, 3) *neutral base*, 4) *base collector space charge* dan 5) *neutral collector*. Di area ini elektron bergerak dengan perilaku khusus sehingga setiap area memiliki *transit time* tertentu yang sangat berpengaruh pada respon frekuensi  $f_T$  dan  $f_{maks}$ . Pendekatan arah sumbu Z yaitu *impurity profile*, menunjukkan konsentrasi doping pada Emiter, Basis dan Kolektor. Sedangkan pada sumbu Y menunjukkan pendekatan arah lateral seperti panjang lengan terminal emiter, basis dan kolektor. Diagram pendekatan geometris HBT SiGe ditunjukkan oleh Gambar 2.21. [38]



Gambar 2.21. Pendekatan geometris HBT SiGe. sumbu  $Z = f(x)$ . [38]

Pada persamaan *Poisson*, jika vertikal adalah sumbu ( $x$ ) dan sumbu  $y$  adalah muatan ( $n$ ), maka akan sesuai dengan Persamaan 2.20a, b dan c. [38]

$$\frac{dn}{dx} = \left[ \frac{N_{eff}(x) + n(x)}{N_{eff}(x) + 2n(x)} \right] * \left[ \left\{ \frac{J_n(x)}{qD_n(x)} \right\} - \left\{ \frac{n(x)}{N_{eff}(x) + n(x)} \right\} - \left\{ \frac{dN_{eff}(x)}{dx} \right\} \right] \quad (2.20a)$$

Oleh karena itu, dapat diturunkan pula perilaku hole ( $p$ ) seperti pada persamaan 3 berikut;

$$\frac{dp}{dx} = \left[ \frac{N_{eff}(x) + p(x)}{N_{eff}(x) + 2p(x)} \right] \left[ \left\{ -\frac{J_p(x)}{qD_p(x)} \right\} + \left\{ \frac{p(x)}{N_{eff}(x) + p(x)} \right\} - \left\{ \frac{dN_{eff}(x)}{dx} \right\} \right] \quad (2.20b)$$

$$\frac{dE}{dx} = (q)[N(x) - n(x)] \quad (2.20c)$$

untuk  $J_n = qv_d(x)E(x)$

$D_n$  koefisien Diffusi elektron ,

$D/\mu = kT/q$  , dengan  $\mu$  adalah mobilitas elektron yang ditentukan besarnya doping.

$N_{eff}$  adalah Doping elektron yang menyebabkan band gap narrowing.

Dengan demikian dapat diturunkan menjadi Persamaan 2.21a,b,c dan d.;

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{N(x) - n(x)} \quad (2.21a)$$

$$\frac{dn}{dx} = \left[ \frac{N_{eff} + n}{N_{eff} + 2n} \right] \left[ \left\{ \frac{J_n(x)}{qD_n} \right\} - \left\{ \frac{n}{N_{eff} + n} \right\} \frac{dN_{eff}}{dx} \right] \quad (2.21b)$$



$$\frac{dp}{dx} = \left\{ \frac{(N_{eff} + p)}{(N_{eff} + 2p)} \right\} \left[ \left\{ -\frac{J_p}{qD_p} \right\} + \left\{ \frac{J_n}{qD_n} \right\} \left\{ \frac{p}{N_d + p} \right\} - \left\{ \frac{p}{(N_{eff} + n)} \right\} \frac{dN_{eff}}{dx} \right] \quad (2.21c)$$

$$J_n = qv_d(x)E(x) \quad (2.21d)$$

, dengan :

$D_n$  adalah koefisien difusi elektron ,

$D/\mu = kT/q$  , dengan  $\mu$  adalah mobilitas elektron yang ditentukan besarnya *doping*.

$N_{eff}$  adalah *Doping* elektron yang disebabkan oleh *band gap narrowing*.

Pada pendekatan sisi *lateral*, sumbu  $y$  (Gambar 2.12) ditentukan berdasarkan Persamaan 2.22a dan 2.22b.[38]

$$I_p(y) = -qBX_i\mu_p(0,y).V_t[2n(0,y) + N_A(0,y)] \left[ \left\{ 1/n(0,y) \right\} \left\{ dn(0,y)/dy \right\} \right] \quad ([2.22a])$$

$$X_i = \left[ \{N(x_{eb}) + n(x_{eb})\} \mu_p(x_{eb}) \right]^{-1} \int [N(x) + n(x)] \mu_p dx \quad (2.22b)$$

$I_p(y)$  adalah arus basis

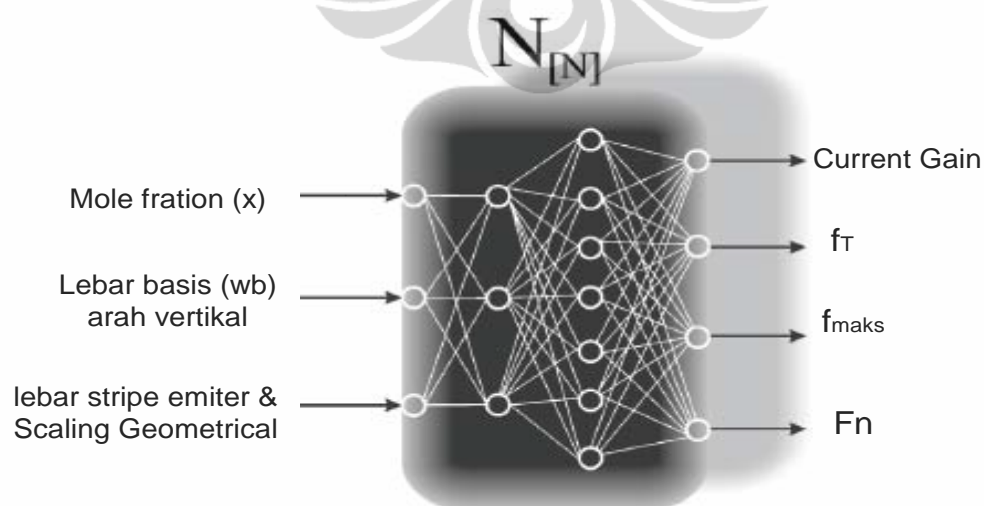
$B$  panjang *emitter stripe*

$\mu_p(0,y)$  *hole* mobilitas

$V_t = kT/q$

$x_{eb}$  emiter *base SCR* pada posisi vertikal.

Gambar 2.22 menunjukkan model *network* dari HBT SiGe yang digunakan pada proses analisis pada riset ini sesuai yang telah dijelaskan pada Bab 1. Variabel *input* dari model tersebut adalah *mole fraction* ( $x$ ), lebar basis arah vertikal ( $w_b$ ), lebar *stripe* emiter ( $w_e$ ) dan *scaling geometric* arah *lateral*.

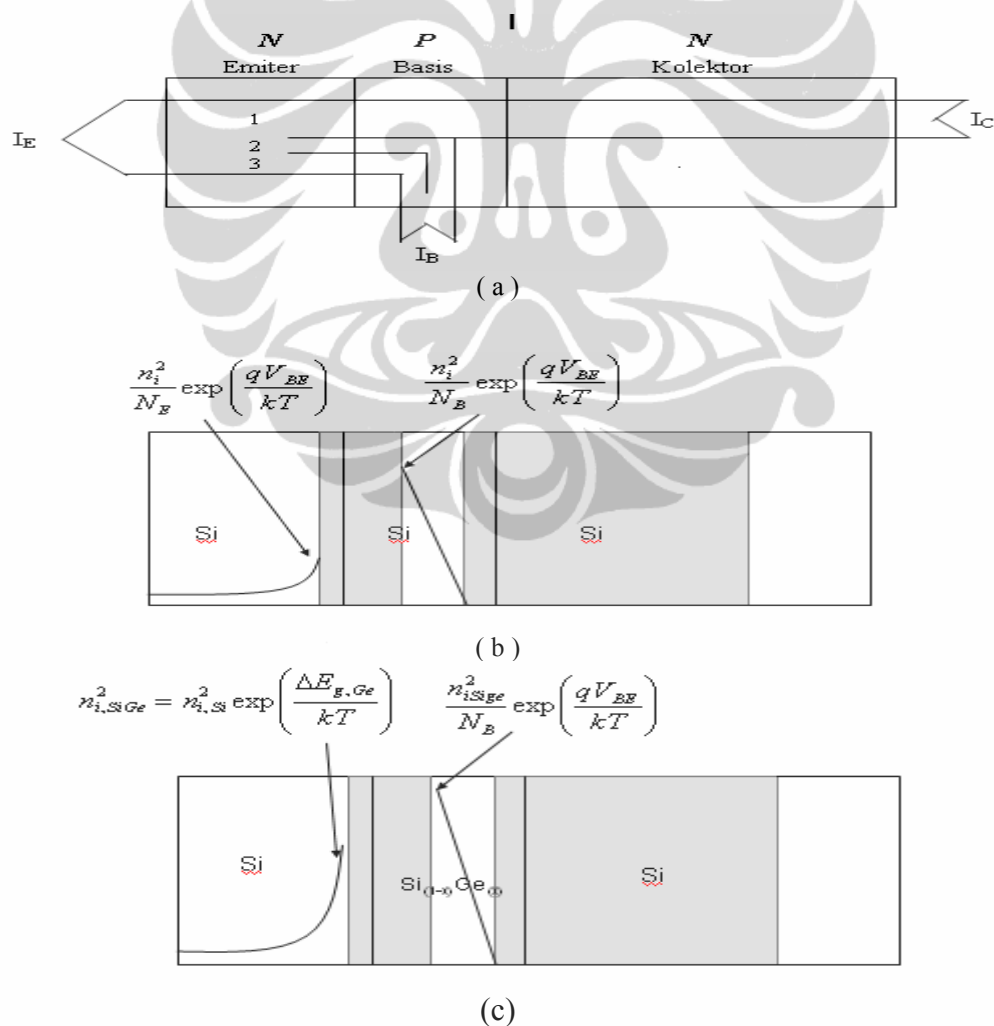


Gambar 2.22. Pemetaan analisis HBT SiGe.

### 2.5.1 Komponen Pembawa Muatan Intrinsik pada HBT SiGe

Secara umum skema operasi transistor bipolar HBT sama dengan transistor Bipola, yang diperlihatkan pada Gambar 2.23a, yang menunjukkan distribusi arus pada transistor bipolar dengan (1) arus kolektor, (2) komponen rekombinasi arus basis, dan (3) komponen difusi arus basis. Dengan demikian arus pada emiter adalah penjumlahan ketiga arus tersebut.

Gambar 2.23b menunjukkan distribusi pembawa muatan minoritas (n) pada transistor bipolar *homojunction*, sedangkan Gambar 2.23c menunjukkan distribusi pembawa muatan minoritas (n) pada transistor *Heterojunction* Bipolar Transistor (HBT). Daerah yang diarsir pada terminal emiter dan basis menunjukkan daerah E-B SCR (*emitter-base space charge region*) dan B-C SCR (*base-collector space charge region*).



Gambar 2.23a, b dan c Skema operasi transistor (a), *Homojunction* (b) dan *Heterojunction* (c) Bipolar

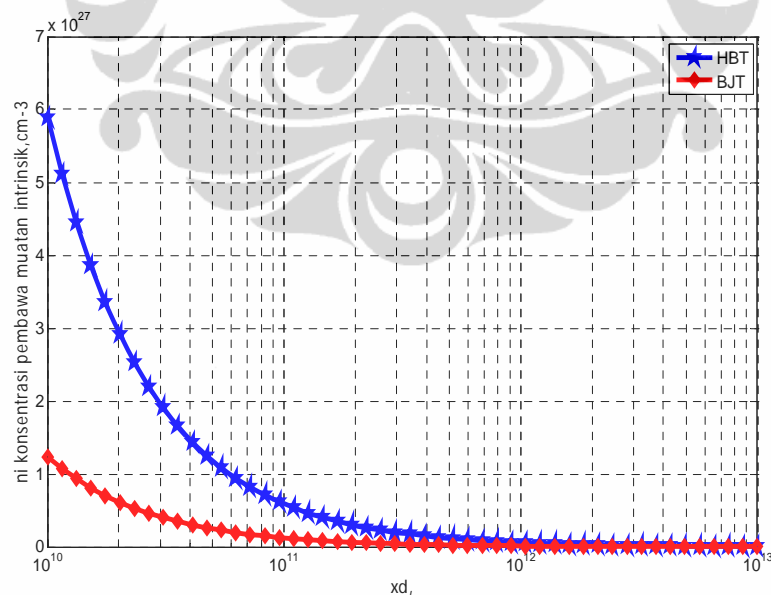
Konsentrasi elektron  $n$  yang diinjeksikan pada basis netral yang terletak pada *space charge region (scr)* sisi emiter – basis memenuhi Persamaan 2.23. [26][39][40]

$$n = \frac{n_i^2}{N_B} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad (2.23)$$

Pada Transistor *Heterojunction* (HBT) SiGe, karena adanya penambahan Ge pada basis, celah pita energi yang lebih sempit akan meningkatkan arus kolektor dan konsentrasi pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ ). Dengan demikian konsentrasi pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ ) pada HBT SiGe akan memenuhi Persamaan 2.24 . [41][42]

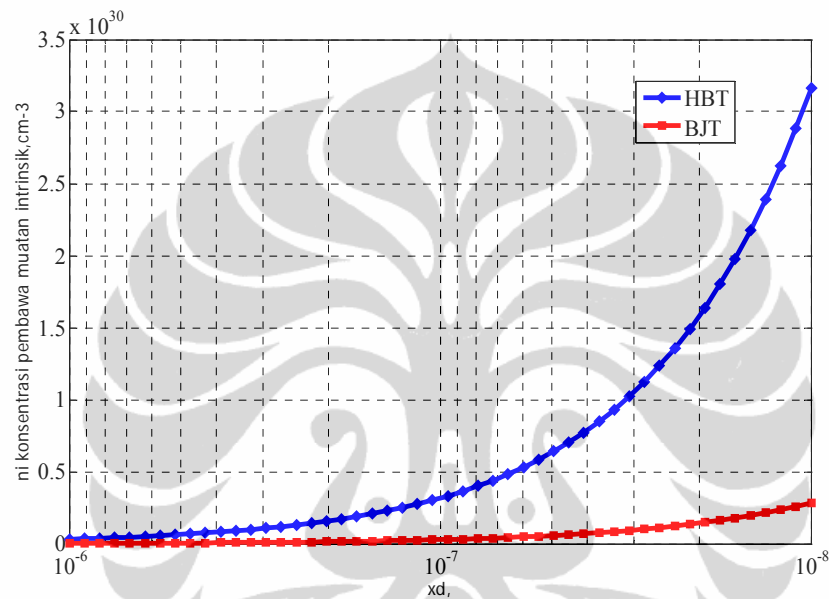
$$n_{i, SiGe}^2 = n_{i, Si}^2 \exp\left(\frac{\Delta E_{g, Ge}}{kT}\right) \quad (2.24)$$

Pada Gambar 2.24 ditunjukkan komparasi pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ ) pada HBT dan BJT, pembawa muatan intrinsik ( $n_{i, HBT}$ ) lebih tinggi dibanding BJT hal tersebut karena adanya pengaruh  $\Delta E_g$  yang disebabkan oleh *mole fraction* ( $x$ ) dan konsentrasi *Doping* yang tinggi pada Basis.



Gambar 2.24 Grafik perbandingan konsentrasi pembawa muatan intrinsik ( $n_i$ ) BJT dan HBT.

Pada HBT nilai konsentrasi muatan berbanding langsung dengan nilai energi *bandgap* ( $\Delta E_g$ ) pada basis SiGe, peningkatan  $n_i$  akan menaikkan injeksi elektron, yang menyebabkan peningkatan densitas arus kolektor ( $I_C$ ) pada  $V_{BE}$  yang sama. Rasio konsentrasi pembawa muatan pada emiter berbanding langsung dengan nilai energi *bandgap* ( $\Delta E_g$ ) *doping* yang tinggi pada emiter. Gambar 2.25 adalah rasio konsentrasi pembawa muatan pada basis yang berbeda antara HBT dan BJT

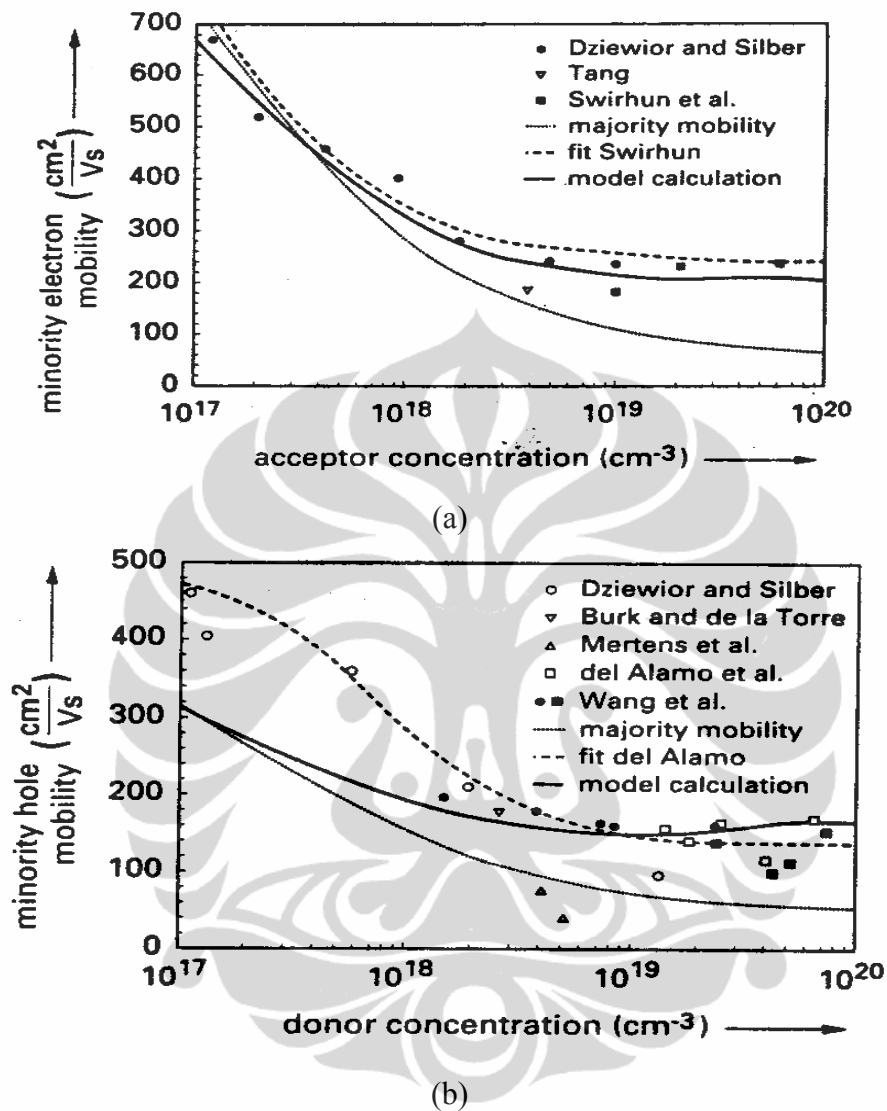


Gambar 2.25. Grafik perbandingan konsentrasi pembawa muatan ( $n_i$ ) BJT dan HBT pada sisi emitor.

### 2.5.2 Mobilitas Elektron pada HBT SiGe

Pada transistor bipolar npn, mobilitas elektron mempengaruhi nilai efisiensi emiter dan frekuensi *cutoff*, sedangkan mobilitas *hole* menentukan nilai resistansi basis. Pada Gambar 2.26 diperlihatkan mobilitas elektron dan *hole* sebagai fungsi konsentrasi *doping* pada Si. Semakin tinggi konsentrasi *doping* silikon, semakin tinggi harga mobilitas minoritas dibanding mobilitas mayoritas. Pada konsentrasi *doping*  $10^{19}$  cm<sup>-3</sup>, harga mobilitas minoritas elektron dan *hole* sekitar dua kali lebih tinggi dibandingkan dengan mobilitas mayoritas. Secara umum hasilnya adalah sebagai berikut : pada konsentrasi *doping* kurang dari  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup>, mobilitas lapisan SiGe *strained* lebih rendah dari Si dan semakin besar

fraksi Ge semakin rendah mobilitasnya, pada konsentrasi *doping* lebih dari  $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ , mobilitas lapisan SiGe *strained* lebih tinggi dari Si.



Gambar 2.26 Grafik mobilitas terhadap konsentrasi *donor* (a) mobilitas elektron dan (b) mobilitas *hole*. [43]

### 2.5.3 Densitas arus Kolektor dan Basis (J<sub>c</sub>, J<sub>b</sub>)

#### a) Densitas Arus Kolektor (J<sub>c</sub>)

Dengan formulasi Juan M Lopez [27] *collector current density* memenuhi Persamaan 2.25a dan 2.25b ;

$$J_{C,} = q(\exp(qV_{be} / kT) - 1) \left[ \int_{0_f}^{w_{b_f}} \frac{N_b(x) dx}{D_{nb}(x) n_{ib}^2(x)} \right]^{-1} \quad (2.25a)$$

$$J_C = \frac{q \left( e^{qV_{be}/kT} - 1 \right)}{\int_0^{w_b} \frac{Nb(x)}{D_{nb}(x) n_{ib}^2(x)} dx} \quad (2.25b)$$

dengan  $D_{nB}$  atau  $D_{nb}$  konstanta difusi elektron pada basis, untuk basis pendek (*short base*) diberi *doping* secara merata dengan demikian persamaan menjadi Persamaan 2.26.

$$J_C = -\frac{qD_{nB} n_{ib}^2}{N_B W_b} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (2.26)$$

dengan  $W_b$  lebar basis .

Besarnya densitas arus kolektor pada HBT SiGe dipengaruhi oleh profil Ge pada HBT tersebut. Untuk HBT SiGe dengan profil Ge segiempat (box) , densitas arus kolektor ditunjukkan Persamaan 2.27a.[27][44].

$$J_{C,HBT} = \frac{qD_{nB} \alpha n_{i0}^2 e^{(\Delta E_{g,HD} + \Delta E_{g,Ge}) / kT}}{N_B W_b} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (2.27a)$$

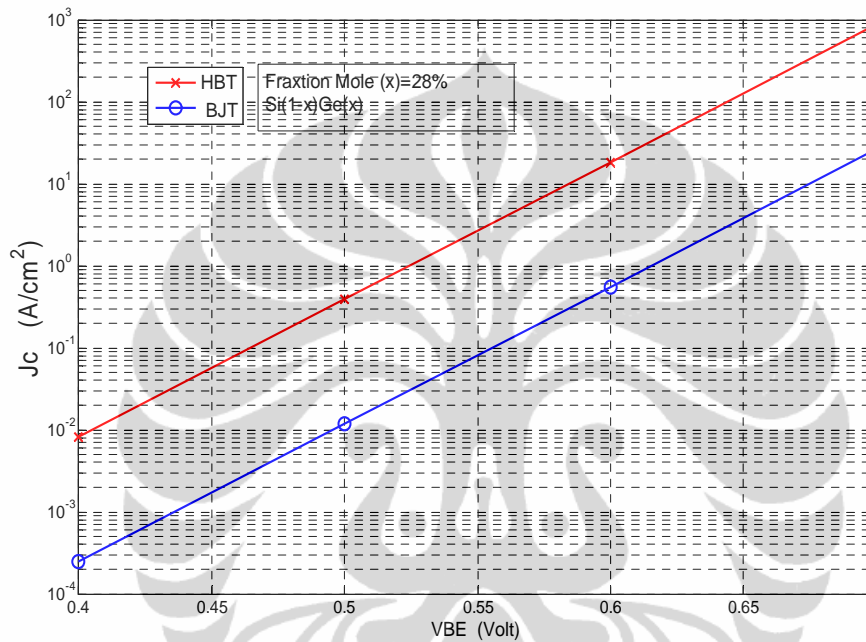
Dengan  $\alpha$  adalah *density of state (DOS)* pada pita konduksi dan pita valensi yaitu perbandingan antara SiGe dan Si dengan nilai 0,4 Persamaan 2.27b. [28].

$$DOS = \frac{(N_C N_V)_{SiGe}}{(N_C N_V)_{Si}} \approx 0,4 \quad (2.27b)$$

Dengan substitusi Persamaan 2.25 ke 2.27a dan 2.27b , akan didapatkan persamaan densitas arus kolektor ( $J_{CSiGe}$ ) seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.28.[45]

$$J_{c_{SiGe}} = J_{c_{Si}} \frac{N_c N_{v_{SiGe}}}{N_c N_{v_{Si}}} \frac{D_{nb_{SiGe}}}{D_{nb_{Si}}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (2.28)$$

dengan  $\Delta E_g$ , adalah energi *bandgap* karena pengaruh *mole fraction*(x), dan heavy doping , jika  $J_{c_{SiGe}} = J_{c_{HBT}}$  dan  $J_{c_{Si}} = J_{c_{BJT}}$  rasio densitas arus kolektor ( $J_c$ ) dari dua properti ini dapat ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27. Rasio  $J_{c_{HBT}}$  dan  $J_{c_{BJT}}$ .

b) Densitas Arus Basis ( $J_B$ )

Arus basis terdiri dari arus difusi dan arus rekombinasi, persamaan densitas arus basis dinyatakan dengan Persamaan 2.29 berikut; [42][ 34]

$$J_{B,dif} = qD_{pE} \frac{dp}{dx} \quad (2.29)$$

Jika  $D_{pE}$  konstanta difusi *hole* pada emiter, untuk lebar emiter yang *sempit* dan dengan diberi *doping* secara merata, Persamaan 2.29 dapat diubah dan dinyatakan menjadi Persamaan 2.30a berikut; [13][20]

$$J_{B,dif} = -\frac{qD_{pE}n_i^2}{N_E W_e} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (2.30a)$$

dengan  $N_E$  konsentrasi donor dan  $W_e$  lebar emiter netral.

Pada HBT SiGe, terjadi peningkatan arus rekombinasi pada basis netral terutama untuk fraksi Ge yang tinggi, arus rekombinasi pada basis netral dinyatakan sebagai berikut [25]:

$$J_{B,rek} = -\frac{qn_i^2 W_B}{2N_B \tau_{nB}} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad (2.30b)$$

dengan  $\tau_{nB}$ , *lifetime* elektron pada basis.

Jika penguatan arus dc atau *current gain* pada transistor didefinisikan sebagai beta ( $\beta$ );

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{J_C}{J_B} \quad (2.31)$$

dengan  $I_C$  arus kolektor dan  $I_B$  arus basis, dapat ditentukan persamaan *Current Gain* ( $\beta_{SiGe}$ ) pada HBT SiGe yaitu rasio Persamaan 2.28 dan Persamaan 2.30b sehingga dapat diturunkan menjadi Persamaan 2.32a dan 2.32b. [26][40]

$$\beta_{SiGe} = \frac{N_{DE} L_E D_{nb}}{N_{AB} W_B D_{pe}} \exp(\Delta E_g / kT) \quad (2.32a)$$

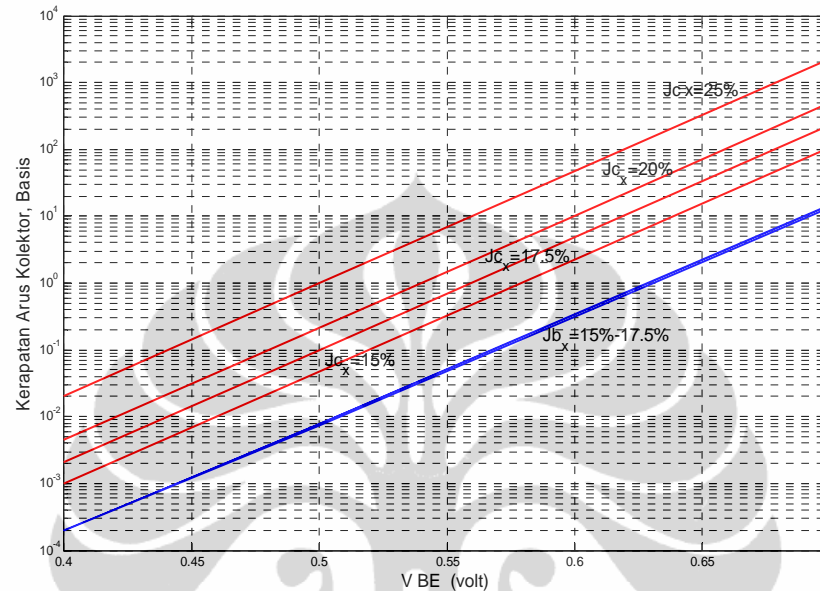
$$\beta_{SiGe} = \beta_{Si} \exp\left(\frac{\Delta E_g(x)}{kT}\right) \quad (2.32b)$$

Dengan  $L_E$  adalah panjang lengan emiter pada arah *lateral*,  $W_B$  atau  $W_b$  adalah *depth* pada basis arah vertikal atau juga disebut *basewidth*,  $N_{DE}$  Konsentrasi donor pada emiter,  $N_{AB}$  Konsentrasi akseptor pada basis,  $\beta_{SiGe}$  adalah *current gain* pada HBT SiGe dan  $\beta_{Si}$ , *current gain* pada BJT, dan  $\Delta E_g(x)$ , energi *bandgap* disebabkan oleh *mole fraction* ( $x$ ) Ge pada SiGe.

Gambar 2.28 menunjukkan rasio kurva densitas arus kolektor  $J_C$  dan densitas arus basis  $J_B$  dalam skala logaritma sebagai fungsi tegangan basis-emiter  $V_{BE}$ . Jika *mole fraction* ( $x$ ) semakin besar, densitas arus kolektor  $J_C$  akan besar pula. Akan tetapi densitas arus basis  $J_B$  tidak berubah untuk semua nilai *mole fraction* ( $x$ ). Pada  $V_{BE}$  rendah, tidak terjadi peningkatan arus basis yang disebabkan oleh peningkatan arus rekombinasi pada basis. Hal ini menyebabkan kemiringan (*slope*) arus basis lebih kecil dari kemiringan arus pada  $V_{BE}$  yang lebih besar. Pada  $V_{BE}$  menengah yang disebut juga daerah linear, arus kolektor dan basis



mempunyai kemiringan yang sama, dan pada umumnya transistor dirancang untuk bekerja pada daerah linear. Pada  $V_{BE}$  yang tinggi terjadi penurunan kemiringan arus kolektor yang disebabkan antara lain oleh tingginya injeksi elektron pada kolektor dan resistansi seri pada basis.



Gambar 2.28. Rasio  $J_c$  dan  $J_b$  HBT dengan *mole fraction* ( $x$ ) bervariasi.

Persamaan *current density emitter*, dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.33a berikut; [9][46]

$$J_c \cdot \infty \cdot J_e = - \frac{qn_{i0}^2}{G_B} \left\{ e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - 1 \right\} \quad (2.33a)$$

$G_B$  adalah *Gummel Plot* yang diturunkan berdasarkan persamaan berikut ;

$$G_B = \int_0^L \left( \frac{p}{D_n} \right) \cdot \left( \frac{n_{i0}^2}{n_i^2} \right) dx \quad (2.33b)$$

Jika Persamaan 2.33a disubstitusikan dengan Persamaan 2.33a akan menjadi Persamaan 2.34.[30]

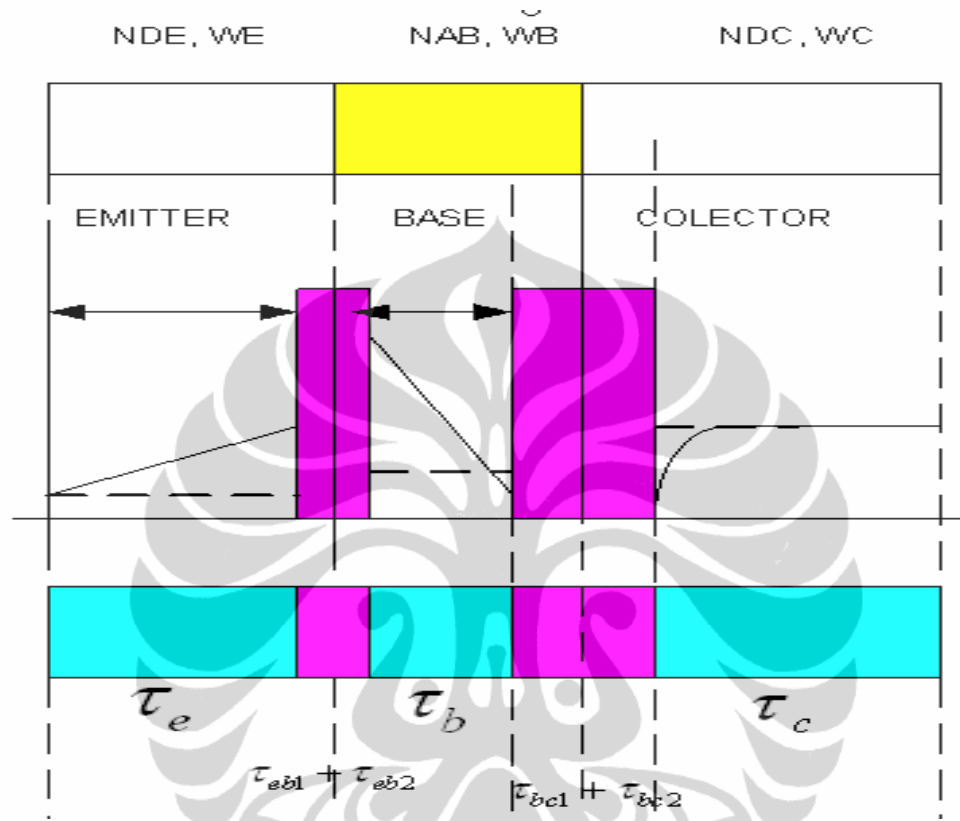
$$G_B = \frac{qn_{i0}^2}{J_c(0,6V)} \exp\left(\frac{0,6V}{V_T}\right) \quad (2.34)$$

Dengan  $V_T = q/kT$ ;  $f_T$  akan naik jika  $G_B$  turun. Hal ini dapat terjadi jika *mole fraction* ( $x$ ) besar,  $N_B$  rendah dan  $w_b$  lebih sempit.

## 2.5.4 Waktu Tunda Frekuensi *Threshold* ( $f_T$ ) dan maksimum ( $f_{maks}$ )

### a) Frekuensi *Threshold* ( $f_T$ )

Untuk menjelaskan frekuensi *cutoff* ( $f_T$ ) dan waktu tunda dari HBT dapat digunakan skematik diagram yang ditunjukkan oleh Gambar 2.29.



Gambar 2.29. Skematik analisis waktu tunda HBT.

Frekuensi *cutoff* ( $f_T$ ) adalah waktu transit yang menyatakan unjuk kerja transistor dan didefinisikan sebagai frekuensi pada saat penguatan tegangan CE (*common emitter*) sama dengan satu. Frekuensi transit ini dapat dihubungkan dengan struktur transistor, yaitu melalui waktu tunda dari emiter ke kolektor  $\tau_{ec}$ , hubungan antara frekuensi transit dan waktu tunda sesuai Persamaan 2.35.[47]

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} \quad (2.35)$$

Waktu tunda total  $\tau_{ec}$  pada transistor bipolar merupakan penjumlahan komponen waktu tunda pada setiap bagian dari transistor, yaitu waktu tunda pada Emiter, E-B SCR (*emitter-base space charge region*), Basis, B-C SCR (*base-*

*collector space charge region*) dan kolektor. Frekuensi *cutoff* atau *threshold* ( $f_T$ ) dapat juga dinyatakan sebagai *emitter-collector transit time* yang dinyatakan dengan persamaan 2.36.[47][49]

$$\tau_{EC} = \tau_{tot} = \frac{1}{2\pi f_T} = \tau_E + \tau_B + \tau_{RC} + \tau_{C,SCR} \quad (2.36)$$

Yang mana,

$$\tau_{EC} = \tau_E + \tau_B + \tau_{RC} + \tau_{EB} + \tau_{CB} \quad (2.37)$$

yang mana  $\tau_E, \tau_B, \tau_{RC}$  dan  $\tau_{C,SCR}$  adalah waktu *charging emitter*, waktu *charging collector* dan *space charge transit time* ditentukan sebagai berikut ; [48]

$$\tau_E = (C_{jc} + C_{je}) \frac{nkT}{qI_C} \text{ atau } \tau_E = \frac{1}{2D_n} \frac{N_B}{N_E} W_B W_E \exp\left(\frac{-\Delta E_g}{kT}\right) \quad (2.38)$$

$D_n$  adalah *diffusion* koefisien dari elektron,

$$\tau_B = \frac{X_B^2}{2D} \text{ atau } \tau_B = \frac{W_B^2}{2D_n} + \frac{W_B}{v_{sat}} \quad (2.39)$$

$$\tau_{RC} = (R_E + R_C) C_{JC} \text{ atau} \quad (2.40)$$

$$\tau_{RC} = \frac{kT}{qI_C} (C_{BE} + C_{BC}) + C_{BC} (R_E + R_C)$$

Dengan  $R_E = \frac{kT}{qJ_e}$ ,  $R_E$ , dan  $R_C$ , resistansi parasitik pada emiter dan kolektor dan  $C_{JC}$  kapasitansi Kolektor.

$$\tau_{C,SCR} = \frac{X_{dep}}{2V_{sat}} \text{ atau } \tau_C = \frac{W_C}{2V_{sat}} \quad (2.41)$$

Dengan demikian Persamaan 2.37 dapat berkembang menjadi Persamaan 2.42a dan 2.38b bahwa frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) adalah;

$$f_T = \frac{1}{2\pi(\tau_E + \tau_B + \tau_{RC} + \tau_{EB} + \tau_{C,scr})} \quad (2.42a)$$

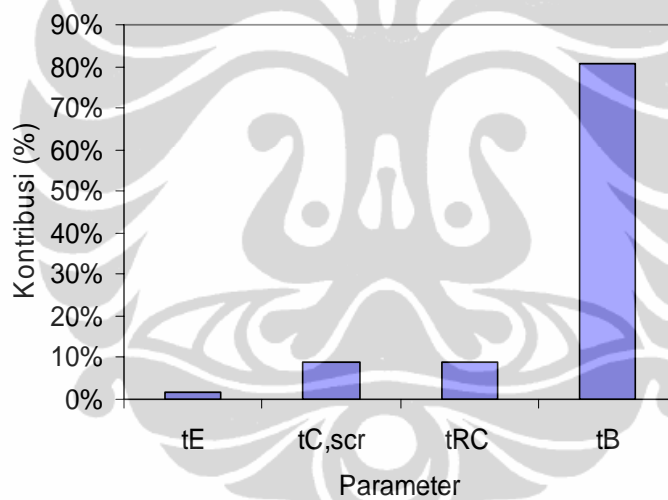
dan pada akhirnya memenuhi Persamaan 2.42b. [48][49]

$$f_T = \frac{1}{2\pi \left\{ \frac{\eta k T}{q I_C} (C_{be} + C_{bc}) + (R_E + R_C) C_{bc} + \frac{W_B + W_C}{V_{sat}} \right\}} \quad (2.42b)$$

kemudian dapat disederhanakan menjadi persamaan 2.43 berikut;

$$f_T = \frac{q I_C \cdot V_{sat}}{2\pi \{ \eta k T (C_{be} + C_{bc}) + (R_E + R_C) C_{bc} + W_B + W_C \}} \quad (2.43)$$

Kontribusi nilai  $\tau_E, \tau_B, \tau_{RC}$  dan  $\tau_{C,SCR}$  terhadap  $\tau_{EC}$  diperlihatkan pada Gambar 2.30 yaitu *time delay* pada basis ( $\tau_B$ ) cukup dominan terhadap *time delay* secara keseluruhan, mencapai 80%, sedangkan  $\tau_c$  dan  $\tau_{cSCR}$  mempunyai kontribusi sekitar 9% dan  $\tau_E$  sekitar 2%. [47]



Gambar 2.30. Distribusi waktu tunda HBT.

Jika  $I_c \sim J_{cSiGe}$ , maka ;

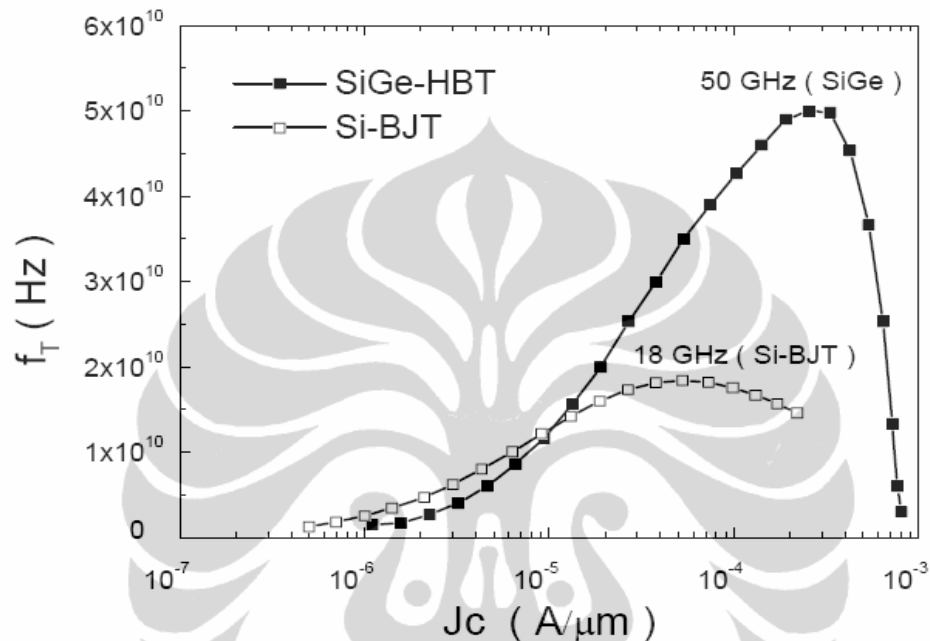
$$J_{cSiGe} = J_{cSi} \frac{N_c N_{vSiGe}}{N_c N_{vSi}} \frac{D_{nbSiGe}}{D_{nbSi}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (2.44a)$$

$$J_{cHBT} = J_{cBJT} \left( DOS \frac{D_{nbSiGe}}{D_{nbSi}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \right) \quad (2.44b)$$

Dengan demikian maka rasio HBT dan BJT  $K_0$  adalah ;

$$K_0 = \frac{Jc_{HBT}}{Jc_{BJT}} = \eta \frac{Dnb_{SGe}}{Dnb_{Si}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (2.45)$$

Dengan asumsi yang sama  $f_{THBT} \sim K_0 \cdot f_{TBJT}$ , sehingga diagram rasio  $f_{THBT}$  dengan  $f_{TBJT}$  ditunjukkan oleh Gambar 2.31,[44]



Gambar 2.31. Grafik perbandingan  $f_T$  SiGe HBT dan Si BJT.[44]

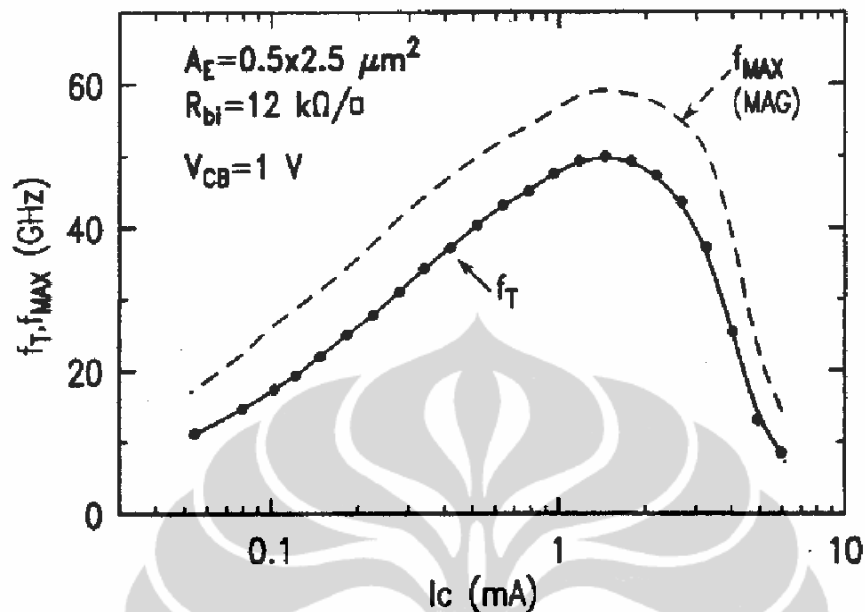
### b) Frekuensi Osilasi Maksimum ( $f_{maks}$ )

Frekuensi maksimum ( $f_{maks}$ ) adalah frekuensi transisi pada saat *Maximum Available Gain* (MAG) sama dengan nol (0), [44]  $f_{maks}$  disebut juga frekuensi osilasi maksimum ( $f_{osc}$ ). Hal ini terjadi ketika *short circuit* pada terminal *output* sehingga *voltage gain* ( $A_v$ ) bernilai 0 dB, dan *current gain* ( $\beta$ ) maksimal. Pada saat ini arus basis ( $I_b$ ) sama dengan arus kolektor ( $I_c$ ), persamaan frekuensi osilasi maksimum dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.46. [17][34][50]

$$f_{max} = \left( \frac{f_T}{8\pi R_{bb} C_{bc}} \right)^{1/2} \quad (2.46)$$

dengan  $f_T$  frekuensi *threshold*,  $R_{bb}$  resistansi basis dan  $C_{bc}$  kapasitansi sambungan basis-kolektor. Untuk memperoleh  $f_{max}$  yang tinggi,  $R_{bb}$  atau  $r_{bb}$  dan  $C_{bc}$  harus rendah. Dari Gambar 2.32 dapat dilihat bahwa pada arus kolektor rendah,  $f_T$  dan

$f_{max}$  rendah dan akan mengalami peningkatan jika  $I_C$  bertambah. Kedua kurva mencapai maksimum pada nilai  $I_C$  yang hampir sama .



Gambar 2.32. Grafik  $f_T$  dan  $f_{max}$  sebagai fungsi arus kolektor.[36]

### 2.5.5 Tegangan Breakdown

Pada transistor bipolar ada dua jenis tegangan *breakdown*, yaitu tegangan *breakdown* pada kondisi emiter terbuka (*open emitter*)  $BV_{CBO}$  dan pada kondisi basis terbuka (*open base*)  $BV_{CEO}$ . Besarnya  $BV_{CBO}$  dapat dihitung dengan Persamaan 2.47. [43]

$$BV_{CBO} = \frac{\epsilon_s E^2}{2qN_C} \quad (2.47)$$

dengan  $\epsilon_s$  permitivitas semikonduktor,  $E$  adalah medan listrik,  $q$  adalah muatan elektron dan  $N_C$  adalah konsentrasi *doping* pada kolektor. Hubungan antara  $BV_{CEO}$  dan  $BV_{CBO}$  dapat dihitung dengan Persamaan 2.48. [38]

$$BV_{CEO} = \frac{BV_{CBO}}{n\sqrt{\beta}} \quad (2.48)$$

dengan  $n$  adalah konstanta empiris yang besarnya antara 3 dan 6, sedangkan  $\beta$  adalah penguatan arus.

### 2.5.6 Resistansi Parasitis

Untuk menerangkan resistansi parasitis pada HBT SiGe dapat diamati dimensi *lateral* dan *cross section* vertikal HBT SiGe, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.33, sehingga dari gambar tersebut dapat diturunkan persamaan  $R_C$  dan  $R_{bb}$ .  $R_C$  sebagai resistansi kolektor dan  $R_{bb}$  sebagai resistansi basis, kedua resistansi tersebut mempunyai persamaan ditunjukkan oleh Persamaan 2.49a dan 2.49b berikut;[17][51]

$$R_C = \frac{\rho_C}{L_e W_{e,contact}} + \rho_{cap} T_{cap} / L_e W_{e,contact} + \rho_{C2} T_{C2} / L_C W_{C,junct} + \rho_{C1} T_{C1} / L_C W_C \quad (2.49a)$$

$$R_{bb} C_{cb} = \left[ \left( \sqrt{\rho_s} \rho_C + \rho_s W_{eb} \right) \left( \frac{\epsilon}{2} \right) \left( \frac{L_c}{L_e} \right) \right] \left[ \frac{W_C}{T_C} \right] + \left[ \left( \frac{\rho_s \epsilon}{12} \right) \left( \frac{L_c}{L_e} \right) \right] \left[ \frac{W_C W_e}{T_C} \right] \quad (2.49b)$$

dengan  $L_C, L_e, T_C, T_{cap}$  sesuai dengan Gambar 2.20a.

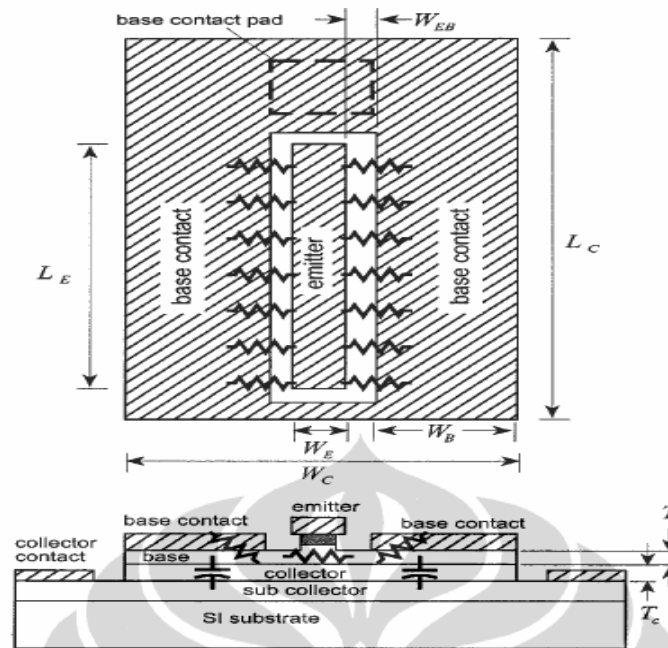
$\rho_s$  adalah *base sheet* resistansi,  $\rho_c$  kontak resistansi.

Hubungan antara  $f_T$ ,  $f_{max}$  dan  $R_B$  atau  $R_{bb}$  sesuai Persamaan 2.50a dan 2.50b.[39][43]

$$f_{maks} = \sqrt{\frac{f_T}{8R_B C_{BC}}} \quad (2.50a)$$

$$\tau_B = R_{bb} C_{BC} = \frac{f_T}{8f_{maks}^2} \quad (2.50b)$$

Dari Persamaan 2.50b diketahui bahwa  $f_{maks}$  berbanding terbalik dengan  $R_{bb}$  Resistansi basis dan  $C_{bc}$  kapasitansi basis-kolektor dan berbanding lurus terhadap  $f_T$ . Penjelasan mengenai  $R_{bb}$  dapat diamati dari Gambar 2.33. yang menunjukkan model potongan melintang HBT pada arah *lateral* dan vertikal.[40]



Gambar 2.33. Model potongan melintang HBT SiGe.[17]

Resistansi basis ( $R_B$  atau  $R_{bb}$ ) merupakan penjumlahan dari resistansi kontak  $R_{b,cont.}$ , Resistansi *base-emitter gap*  $R_{gap}$  dan Resistansi *spreading*  $R_{spread}$ . Dengan demikian Resistansi basis sesuai dengan Persamaan 2.51a dan 2.51b di bawah ini.[17]

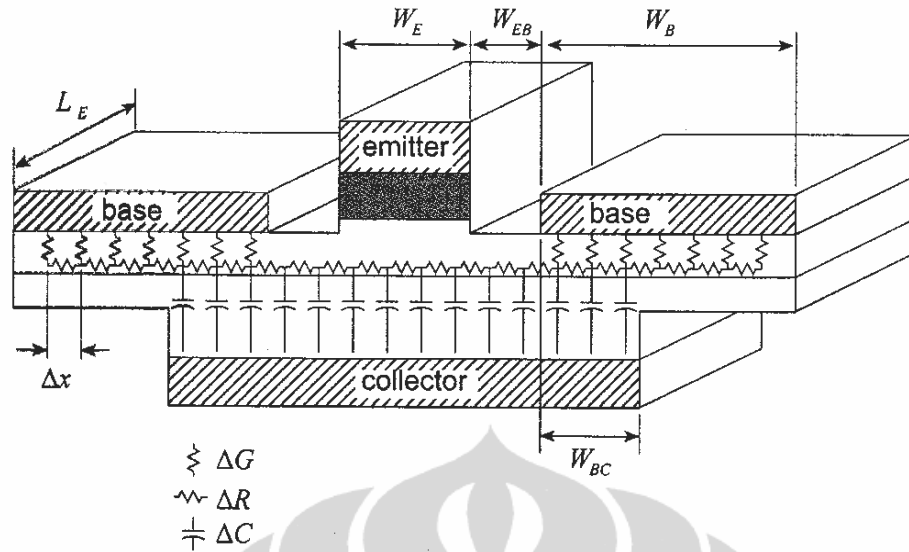
$$R_{bb} = R_{b,con} + R_{gap} + R_{spread} \quad (2.51a)$$

$$R_{b,cont} = \sqrt{\rho_s \rho_c} / 2L_e, \quad R_{gap} = \rho_s W_{eb} / 2L_e, \quad \text{dan} \quad R_{spread} = \rho_a W_c / 12L_c$$

$$R_{bb} = \sqrt{\frac{\rho_s \rho_c}{2L_e}} + \frac{\rho_s W_{eb}}{2L_e} + \frac{\rho_s W_c}{12L_c} \quad (2.51b)$$

Selanjutnya harga  $R_{bb}$  akan berkaitan erat dengan lebar lengan emiter yang merupakan bagian dari *scaling lateral*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.34.





Gambar 2.34 Dimensi lateral dan cross section Geometris HBT.[17]

### 2.5.7 Noise figure ( $F_n$ ) atau $F_{\min}$

Divais frekuensi tinggi khususnya *Radio Frequency Circuit*(RFC), *noise* merupakan hal penting pada frekuensi tinggi *noise factor* dapat dihitung dengan pendekatan *small signal* simulasi dengan Persamaan 2.52. [43][45]

$$F_{\min} = 1 + \frac{I_C}{V_T |y_{21}|^2} \left( \sqrt{\left( \frac{I_B}{I_C} |y_{21}|^2 + |y_{11}|^2 \right) \left( 1 + \frac{2V_T |y_{21}|^2 (r_E + r_B)}{I_C} \right) - I_m^2 (y_{11}) + R(y_{11})} \right) \quad (2.52)$$

Kemudian *noise figure minimum* (dB), dapat dihitung berdasarkan persamaan

$$NF_{\min} = 10 \text{Log}(F_{\min}) \quad (2.53)$$

dengan menggunakan pendekatan lain persamaan *noise figure minimum* atau ( $NF_{\min}$ ) akan sesuai dengan Persamaan 2.53. [42][45]

$$NF_{\min} \approx 1 + \sqrt{2} \frac{f_{\text{maks}}}{f_T} \sqrt{gm(R_E + R_B)} \quad (2.53)$$

Dengan  $gm = I_C / V_{BE}$  atau  $gm = \beta / R_{bb,ac}$ , kemudian Jae sung et all 2004 menentukan Persamaan *minimum noise figure (Fmin)* dengan mengasumsikan bahwa  $R_E \ll R_{bb}$ . [32]

Dengan demikian persamaan *noise figure minimum (F<sub>min</sub>)* adalah, [15][45]

$$F_{\min} = 1 + \frac{1}{\beta} + \sqrt{2 \frac{qI_C}{kT} R_{bb} \left( \frac{f^2}{f_T^2} + \frac{1}{\beta} \right) + \frac{1}{\beta}} \quad (2.54)$$

dengan  $\beta$  adalah ;

$$\beta_{SiGe} = \frac{N_{DE} W_E D_{nb}}{N_{AB} W_B D_{pe}} \exp(\Delta E_g / kT); \text{ dan}$$

$$f_T = \frac{qI_C \cdot V_{sat}}{2\pi \{ \eta kT (C_{be} + C_{bc}) + (R_E + R_C) C_{bc} + W_B + W_C \}}$$

Jika *current gain (β)* besar *noise figure minimum (F<sub>n</sub>)* dapat dinyatakan sesuai persamaan berikut ;

$$F_{\min}^2 = \frac{k_0 \cdot R_{bb} f_q^2}{f_T^2} I_C + k_1 \quad \text{atau} \quad F_{\min}^2 = \frac{R_{bb} f_q^2}{f_T^2} I_C + \frac{k_1}{k_0}$$

$$k_0 = \frac{2q}{kT} \quad \text{jika } q = 1.6021 \times 10^{-19}, k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ dan } T = 300^0 \text{ K, maka } k_0 = 77,41,$$

$$k_1 = 1 + \frac{1}{\beta} \quad \text{jika } \beta \gg 1, k_1 = 1, \text{ sehingga } k_1/k_0 = 0,113658, \text{ dan memenuhi}$$

Persamaan 2.55 berikut;

$$F_{\min} = \frac{f_q}{f_T} \sqrt{R_{bb} \cdot I_C} + 0,113858 \quad 2.55$$

$f_q$ , frekuensi kerja,  $f_T$ , frekuensi *threshold*,  $R_{bb}$ , resistansi parasitis

Jin Tang dkk (2002), merepresentasikan relasi frekuensi *cutoff* atau *threshold* terhadap  $A_e$ , yang dinyatakan dengan Persamaan 2.56, [52]

$$f_T = \frac{KI_B}{2qA_e} = \frac{KI_C}{2qA_e \beta} \quad 2.56$$

Oleh karena itu persamaan  $F_{\min}$  atau  $F_n$  menjadi ;

$$F_{\min} = \frac{2qA_e\beta f_q}{KI_C} \sqrt{R_{bb} \cdot I_C} + 0,113858 \quad 2.57$$

*Noise figure minmum* dalam (db) ,  $A_e$  *stripe emiter* , K konstanta

Dari Persamaan 2.57 dapat diamati bahwa *noise figure* ( $F_{\min}$  atau  $F_n$ ) rendah ketika  $\beta$  dan  $f_T$  tinggi, dengan  $R_{bb}$  atau  $r_{bb}$  rendah, kemudian dari persamaan 2.57 dapat diamati bahwa  $F_{\min}$  berbanding langsung dengan  $A_e$ , untuk mendapatkan nilai  $F_{\min}$  yang akurat, diperlukan beberapa fungsi yaitu:  $f_T = f(I_C)$ ,  $\beta = f(I_C)$ ,  $R_{bb} = f(I_C)$ ,  $F_{(\min \text{ noise figure})} = f(I_C)$  dan  $F_{(\min \text{ noise figure})} = f(f_T)$ .



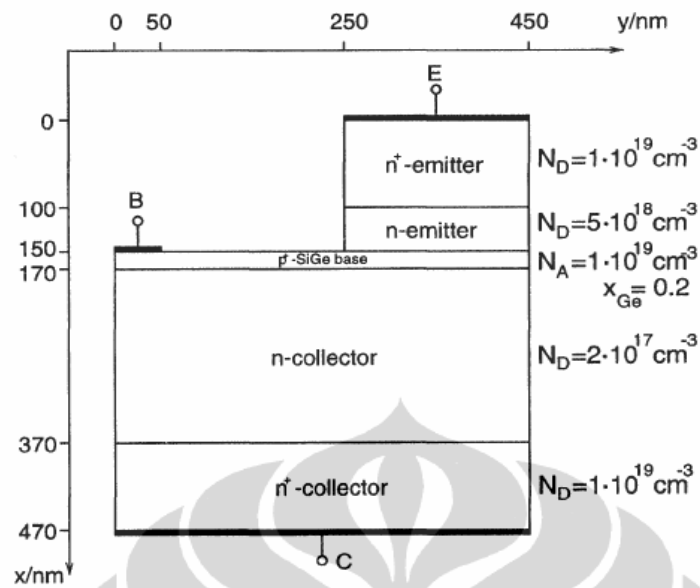
## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Program Simulasi

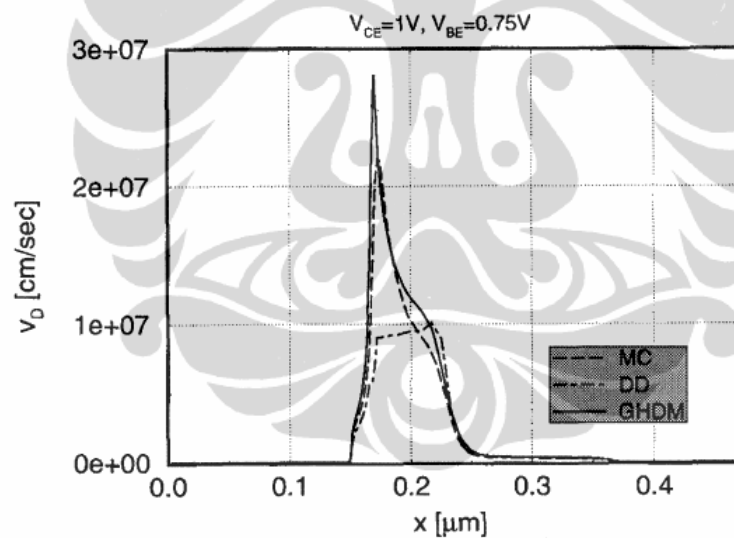
Simulasi komputer digunakan untuk mengoptimalkan karakteristik dan unjuk kerja rancangan divais secara teoritis, kajian teoritis ini dapat dipakai sebagai model divais, untuk kemudian dilakukan pengkajian lebih lanjut sebelum proses fabrikasi dilakukan. Ada tiga pendekatan standar matematis metode simulasi dalam penyusunan model pada rancangan HBT SiGe, yaitu pendekatan *drift-difussion* (DD), *energy-transport* (ET) dan *hydrodynamic* (HD).[4]

Pemodelan rancangan HBT SiGe berdasarkan pada persamaan *Poisson* untuk menyelesaikannya digunakan metode simulasi numerik *Monte Carlo* (MC). Metode ini mampu menyelesaikan perhitungan integral multidimensi dengan syarat dan batasan yang rumit, sehingga dapat mensimulasikan perilaku arus dan tegangan serta parameter keluaran lainnya. MC memfasilitasi investigasi rinci mikroskopis pada perangkat standar pemodelan DD dan HD, implementasi metode ini umumnya dilakukan menggunakan komputer, dengan berbagai teknik simulasi komputer.

B Neichus dkk (2006) telah melakukan pengujian *transient drift-diffusion* (DD) dan *hydrodynamic* (HD) pada pemodelan dua dimensi HBT SiGe dengan menggunakan devais simulasi *Monte Carlo* (MC) hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan matematis *hydrodynamic* lebih akurat dibanding pendekatan *transient drift-diffusion* (DD) pada rancangan HBT SiGe *advanced* dengan *critical thickness*  $<20$  nm. [51] Sebelumnya B Neichus dkk (1998) telah membandingkan hasil simulasi MC dengan DD dan HD berdasarkan waktu relaksasi dari model 2D HBT SiGe, hasilnya menunjukkan bahwa pemodelan MC memiliki kesesuaian dengan hasil pemodelan HD, di sisi lain hasil pemodelan DD menyimpang jauh lebih dari MC yang sehingga menyebabkan kesalahan pada hasil rancangan HBT SiGe.[55] Gambar 3.1(a) menunjukkan model dua dimensi HBT SiGe yang diuji oleh ketiga simulator MC, DD dan HD. Sedangkan Gambar 3.1(b) menunjukkan perbandingan profil *drift velocity* pada HBT SiGe hasil dari pemodelan MC, HD dan DD,



Gambar 3.1(a) Model dua dimensi HBT SiGe.[55]



Gambar 3.1(b) Perbandingan *profil drift velocity* pada HBT SiGe hasil pemodelan MC, HD dan DD.[55]

Christoph J (2000) melakukan riset mengenai rancangan *Ge profile* pada Si/SiGe HBT dengan metode *Full-Band Monte Carlo* (FB-MC) yang direpresentasikan pada model HBT SiGe dua dimensi yang memiliki satu kontak terminal basis, dengan keluaran berupa fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) dan tegangan basis emiter ( $V_{BE}$ ). Memberikan kesimpulan bahwa pendekatan HD lebih akurat dalam penentuan Ge profil dibandingkan dengan pendekatan DD. [53]

Sampai saat ini telah sepuluh *vendor* mengembangkan simulator rancangan devais HBT dengan parameter keluaran satu dimensi (1D), dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D). Model matematis rancangan berdasarkan pada pendekatan matematis *drift-diffusion* (DD), *energy-transport* (ET), *hydrodynamic* (HD) dan *Monte Carlo* (MC).

Tabel 3.1, menunjukkan *state of the art* software simulasi, model matematis dan dimensi perancangan pemodelan HBT SiGe.

Tabel 3.1 Program simulasi Rancangan divais HBT [4]

Nama Software	Model matematis	Dimensi	Pengembang
Atlas-Blaze3D	DD, HD	1D, 2D, 3D	Silvaco
APSYS	DD,ET	2D	Optical interface
Bipole3	DD, HD	Quasi,D3	Bipsim Inc.
Dessis	DD, HD, MC	1D, 2D, 3D	ISE, Trap modeling
FIELDAY	DD	2D,3D	Electrothermal
Jungenmann	DD,HD,MC	2D	Rigorous
Pisces	DD	1D, 2D	Stanford University
MEDICI	DD,HD	2D	Medici inc
Minimos-NT	DD,HD	2D,3D	
NEMO	1D		Schrodinger Poisson Solver
Sentaurus Device	DD, HD, MC	1D, 2D, 3D	Synopsis
Taurus Medici	DD, HD	2D	Synopsis

DD = *drift-diffusion*, ET= *energy-transport*, HD = *hydrodynamic*, MC=*monte carlo*

Pada riset ini digunakan perangkat lunak komersial, yaitu simulasi numerik *Bipole3v.5.3.1G* atau Bipole3 yang memiliki pendekatan DD dan HD, khusus dibuat untuk merancang transistor bipolar atau divais lainnya yang berbasis Si dan SiGe. Pendekatan analisis berdasarkan formula *electron transport Poisson* sehingga menghasilkan model quasi tiga dimensi (Q-3D).[37][38]

Bipole3 adalah program simulasi numerik berbasis TCAD yang dikembangkan oleh Profesor David Roulston bekerjasama dengan *Bipsim Inc* digunakan untuk rancangan devais semikonduktor quasy dua dimensi (2D) yang secara luas telah dikembangkan oleh beberapa Universitas dan industri sebagai integral part dari perkembangan dari design chip silicon. Simulator BIPOLE3G secara lengkap menyediakan karakteristik listrik internal dan eksternal dari model pabrikan *SPICE CAD SiGe HBT* antara lain *impurity profile* dan *layout masker*.

Hasil umpan balik dengan industri semikonduktor terkemuka memungkinkan simulator ini tetap up to date untuk teknologi kedepan .[56]

Dalam pola rancangan HBT SiGe, Bipole3 menyediakan rancangan *double basis contact* , hasil investigasi M.W. Hsieh (2006) HBT SiGe dengan *double basis* kontak mempunyai *maximum output power* yang lebih besar dibandingkan dengan *single basis contact*, hal ini menguntungkan karena akan mereduksi *parasitic resistances*. [16] Kelebihan lain dari software simulasi ini adalah penggunaan *default* parameter pada fisika HBT SiGe, sehingga keterbatasan parameter devais lebih nyata dan memudahkan dalam tahap validasi dengan akurasi yang baik. Beberapa parameter fisika pada material Silikon antara lain, muatan intrinsik  $n_i$ , energi *bandgap narrowing*  $\Delta E_{g,hd}$ , mobilitas elektron  $\mu_{n,p}$ , kecepatan medan listrik  $v$ , rekombinasi SRH (*Shockley-Reed-Hall*). Analisis material heterostruktur Silikon Germanium (SiGe) telah menyediakan parameter fisika material dan parameter *energy bandgap* sebagai fungsi konsentrasi Germanium ( $\Delta E_{g,Ge}$ ).

Bipole3 adalah simulator numerik berbasis *poisson equation* mampu menyelesaikan masalah pada formulasi *electron transport*, dengan persamaan dasar sebagai berikut; [38]

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \psi) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) - \rho_s \quad (3.1)$$

Dengan  $\psi$ , potensial elektrostatik,  $\varepsilon$ , permitivitas dielektrik, q muatan elektron, p dan n konsentrasi hole dan elektron,  $N_D$  dan  $N_A$  adalah konsentarsi impuriti donor dan akseptor serta  $\rho_s$  adalah *surface charge density*.

Untuk menggambarkan pergerakan elektron dan *hole carrier* densitas sebagai pengembangan hasil proses elektron transport dari proses rekombinasi dan generasi dapat ditunjukkan dengan Persamaan 3.2a dan 3.2b berikut ;

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \bar{\partial}_n + (G - R) \quad (3.2a)$$

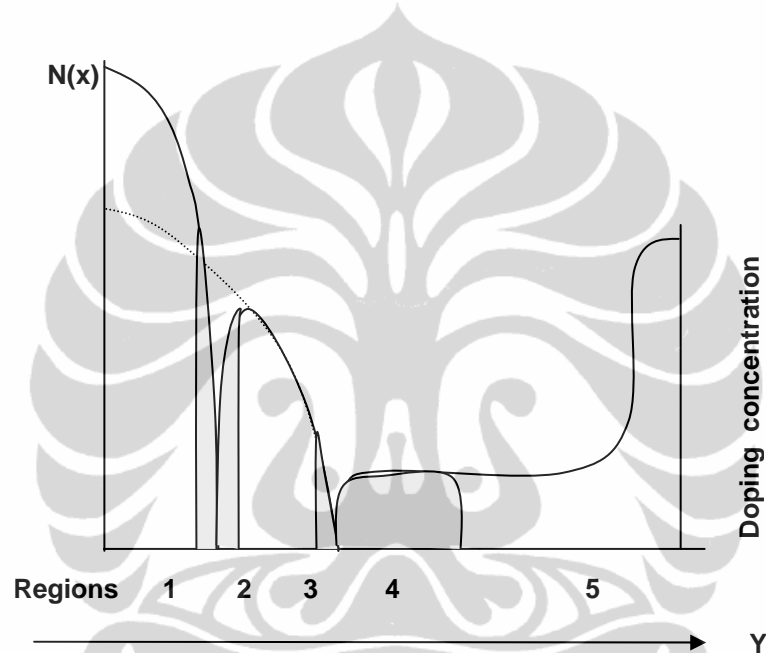
$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \bar{\partial}_p + (G - R) \quad (3.2b)$$

Yang mana  $\bar{\partial}_n$  dan  $\bar{\partial}_p$  adalah densitas elektron dan hole, G dan R *Generation* dan *Recombination rates*. Bentuk persamaan tersebut merupakan

*general framework* dari devais simulasi, persamaan arus densitas umumnya ditentukan dengan aplikasi aproksimasi dan simplikasi dari *transport* elektron.

### 3.2 Analisis arah Vertikal (sumbu x)

Pada arah vertikal (arah-x), program simulasi Bipole3 membagi divais menjadi lima (5) daerah yaitu: 1) emiter netral, 2) emiter-basis *Space Charge Region*, 3) basis netral, 4) basis-kolektor *Space Charge Region* dan 5) kolektor netral, seperti diperlihatkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Grafik impuriti profil *doping* pada daerah netral dan *space charge Region*. [53]

Gambar di atas menunjukkan grafik impuriti profil atau *dopant* keonsentrasi terhadap tebal atau depth devais HBT. Pendekatan persamaan *poisson* dipakai untuk pemecahan electron transport pada emiter-base *space charge region* yaitu pada *region 2* dan *3*, yang ditunjukkan oleh Persamaan 3.3 berikut; [53]

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{N(x) - n(x)} \quad (3.3)$$

Dengan  $J_n = qv_d(x)E(x)$ ,  $v_d$  adalah kecepatan medan elektrik E atau  $\varepsilon$

Untuk *transport* elektron pada daerah *neutral base* (*region 3*) menggunakan Persamaan 3.4 berikut; [53]



$$\frac{dn}{dx} = \left\{ \frac{(N_{eff} + n(x))}{(N_{eff} + 2n(x))} \right\} \left[ \left\{ \frac{J_n(x)}{qD_n(x)} \right\} - \left\{ \frac{n(x)}{(N_{eff}(x) + n(x))} \right\} \frac{dN_{eff}(x)}{dx} \right] \quad (3.4)$$

$D_n$  = koefisien difusi elektron, yang ditentukan dari Einstein relation,  $\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$

Persamaan transport elektron pada neutral emiter (region 1) ditentukan berdasarkan Persamaan 3.5 berikut :

$$\frac{dp}{dx} = \left\{ \frac{(N_{eff}(x) + p(x))}{(N_{eff}(x) + 2p(x))} \right\} \left[ \left( -\frac{J_p(x)}{qD_p(x)} \right) + \left\{ \frac{J_n(x)}{qD_n(x)} \right\} \left\{ \frac{p(x)}{N_d(x) + p(x)} \right\} - \left\{ \frac{p(x)}{(N_{eff}(x) + n(x))} \right\} \frac{dN_{eff}}{dx} \right] \quad (3.5)$$

dengan:

$E$  = medan listrik,  $q$  = muatan listrik,  $N$  = konsentrasi doping,

$N_{eff}$  = doping efektif dengan memasukkan pengaruh  $\Delta E_g$ ,

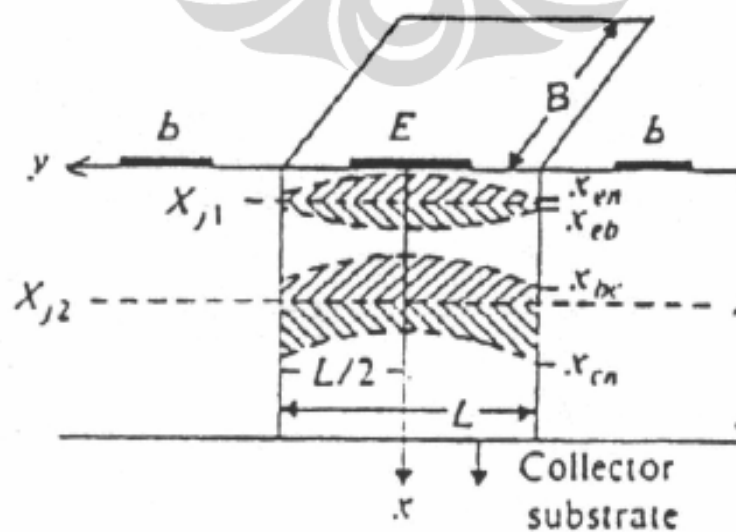
$n$  = konsentrasi elektron,  $p$  = konsentrasi hole,  $D_n$  = koefisien difusi elektron,

$D_p$  = koefisien difusi hole,  $J_n$  = densitas arus elektron,  $J_p$  = densitas arus hole,

$v_d$  = kecepatan drift.

### 3.3 Analisis arah Lateral (sumbu y).

Analisis arah lateral ke arah y, program simulasi Bipole3 menggunakan model divais HBT 121 yaitu masing-masing satu(1) terminal emiter dan kolektor dan dua(2) terminal basis, kearah vertikal (x) pada posisi ini merupakan parameter Depth (ketebalan) dari devais, lebih jelasnya ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut;[53]



Gambar 3.3 Cross section arah vertikal devais model HBT 121. [53]

Solusi arah lateral dari simulator Bipole3, berdasarkan dari arus pembawa muatan mayoritas, yang dibentuk dari arah lateral atau sumbu y pada daerah base region carrier, sehingga memenuhi Persamaan 3.6 berikut, [51]

$$I_p(y) = -qBX_i\mu_p(0,y)V_t[2n(0,y) + N_A(0,y)]\left[\frac{1}{n(0,y)}\left(\frac{dn(0,y)}{dy}\right)\right] \quad (3.6)$$

$I_p(y)$  adalah arus basis,  
 $B$  adalah stripe emiter ( $A_e$ ) sepanjang Emiter,  
 $\mu_p(0,y)$  adalah mobilitas hole dengan  $V_t = kT/q$ ,

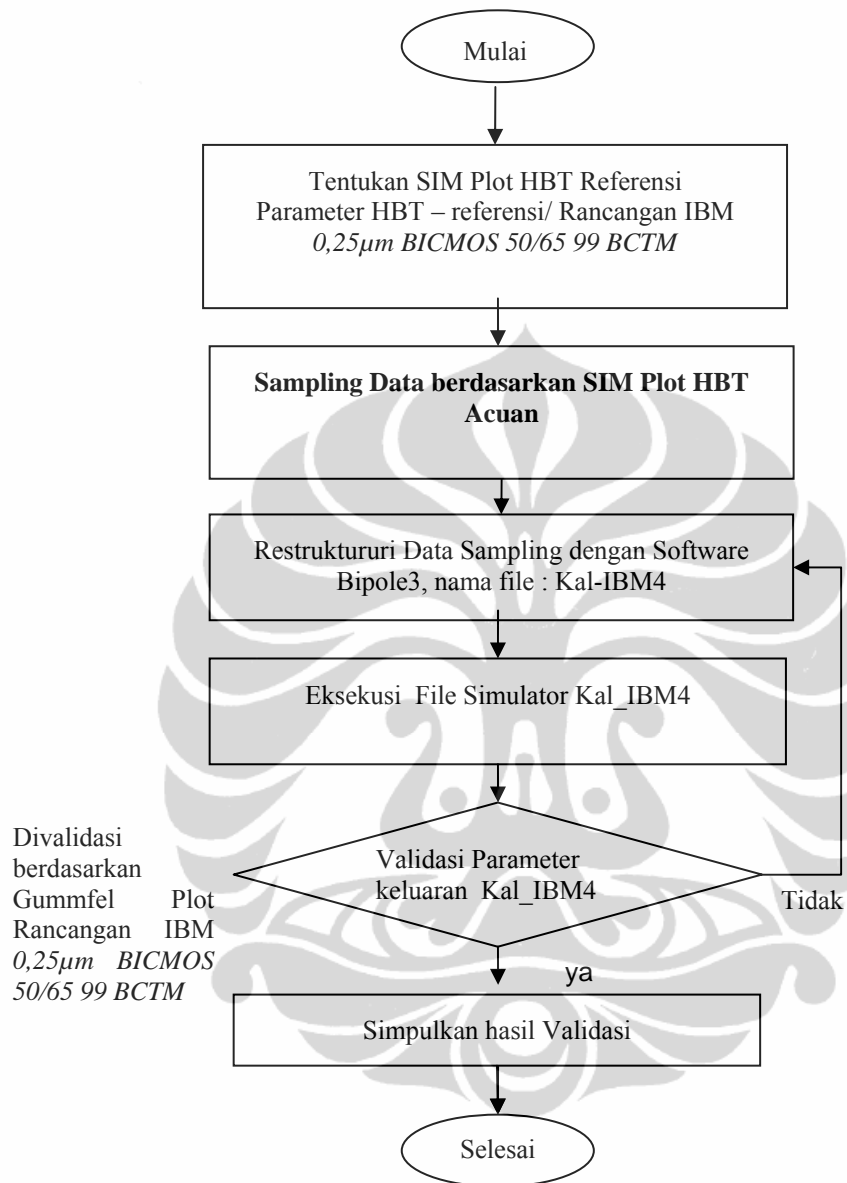
$X_i$  tebal devais sesuai dengan persamaan 3.7

$$X_i = \left[\{N(x_{eb}) + n(x_{eb})\}\mu_p(x_{eb})\right]^{-1} \int [N(x) + n(x)]\mu_p(x)dx \quad (37)$$

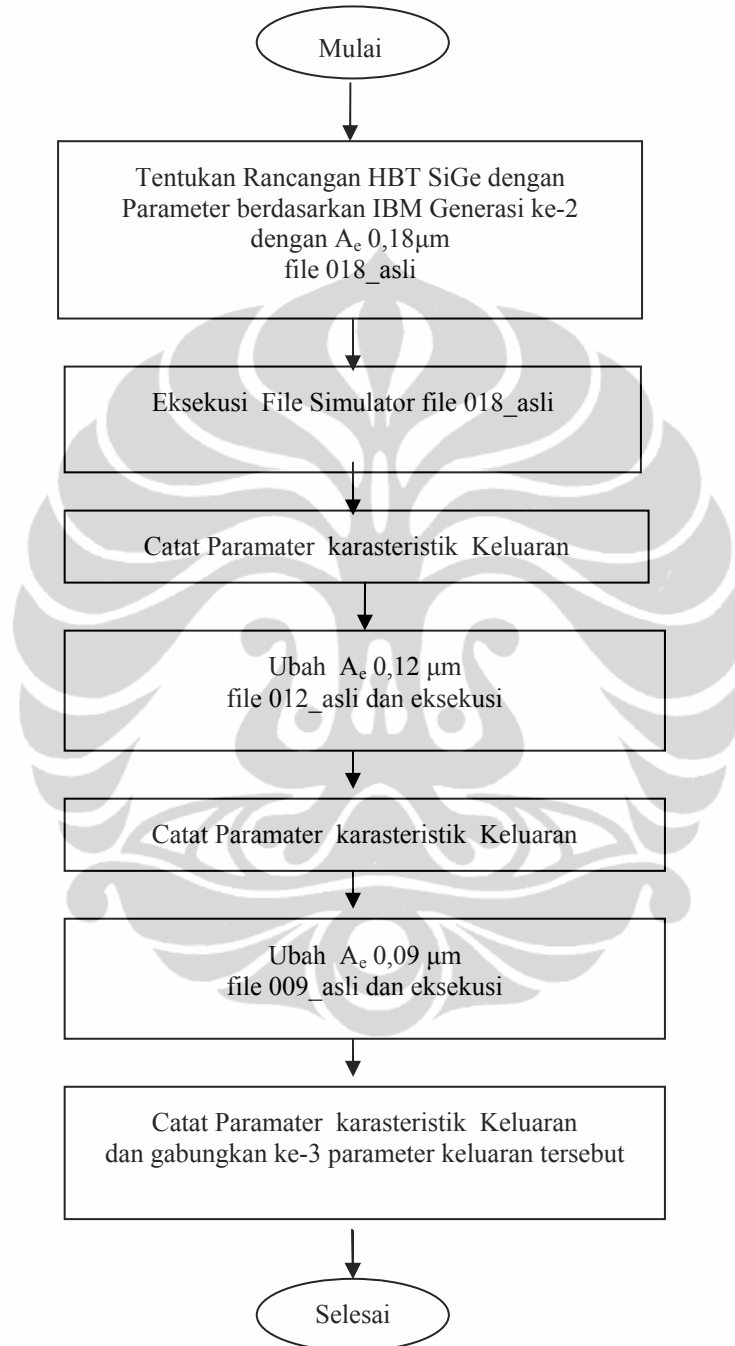
$x_{eb}$  adalah tebal *emiter-base space charge* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1

### 3.4 Tahapan Penelitian

Secara garis besar, tahapan riset yang dilakukan dapat digambarkan dengan diagram alir pada Gambar 3.4a. Validasi dilakukan untuk memperoleh kesesuaian kuantitatif antara hasil simulasi dan data *reference*. Ada dua jenis langkah validasi yang dilakukan yaitu validasi parameter fisika dan validasi dengan referensi model HBT SiGe yang telah dibuat oleh IBM. Langkah selanjutnya adalah meneliti pengaruh penskalaan pada dimensi lateral dan vertikal terhadap kinerja HBT SiGe khususnya terhadap frekuensi *cutoff* ( $f_T$ ) dan frekuensi osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ) dan *noise figure* ( $F_n$ ). Dengan mengetahui pengaruh penskalaan dimensi lateral dan vertikal dapat diperoleh rancangan divais yang mempunyai kinerja lebih baik. Diagram alir 3.4(a) menunjukkan *flow chart* dari tahapan riset ini.

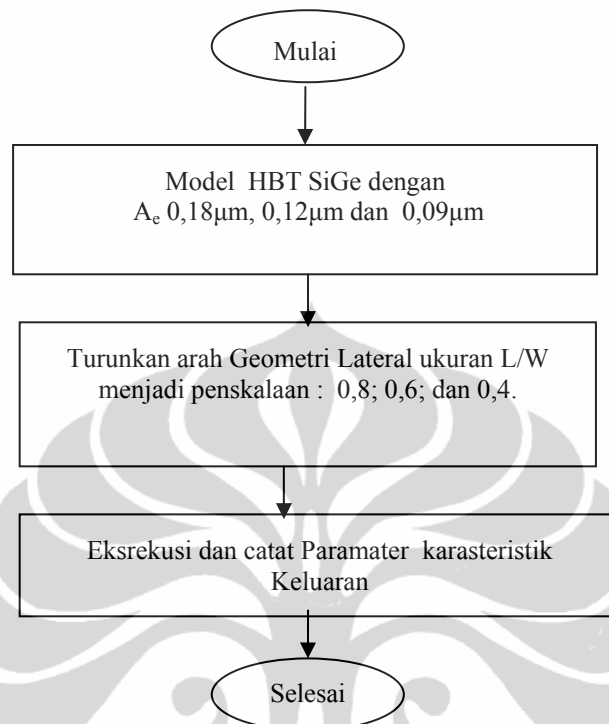
3.4.1) Validasi Model dan *Software* Simulator.Gambar 3.4a Diagram alir validasi model dan *software* simulator.

3.4.2) Menentukan dan mengembangkan Model HBT dengan  $A_e$  0,18 $\mu\text{m}$ , dan pengaturan arah lateral menjadi  $A_e$  0,12  $\mu\text{m}$  dan 0.09  $\mu\text{m}$ .



Gambar 3.4b Diagram alir penyusunan model HBT dengan  $A_e$  0,18 $\mu\text{m}$ , 0,12  $\mu\text{m}$  dan 0.09  $\mu\text{m}$

3.4.3) Penskalaan model HBT  $A_e$  0,18 $\mu\text{m}$ , 0,12  $\mu\text{m}$  dan 0,09  $\mu\text{m}$  kearah Geometri *lateral* dengan skala 1: 0,8, 0,6 dan 0,4.

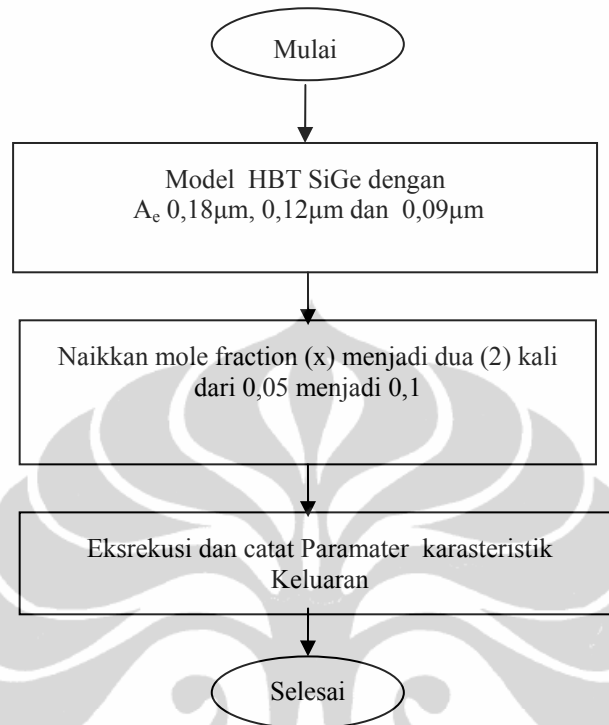


Gambar 3.4c Diagram alir penyusunan model HBT, dengan pengaturan geometri *lateral*.

File simulator yang dihasilkan dari diagram ini adalah ;

- a) 009asli.bip, 009baru6.bip, 009baru7.bip, 009baru8.bip
- b) 012asli.bip, 012baru6.bip, 012baru7.bip, 012baru8.bip
- c) 018asli.bip, 018baru6.bip, 018baru7.bip, 018baru8.bip

3.4.4) Menaikkan *mole fraction* ( $x$ ) dari 0,05 menjadi 0,1 pada model HBT  $A_e$  0,18 $\mu\text{m}$ , 0,12  $\mu\text{m}$  dan 0,09  $\mu\text{m}$ .

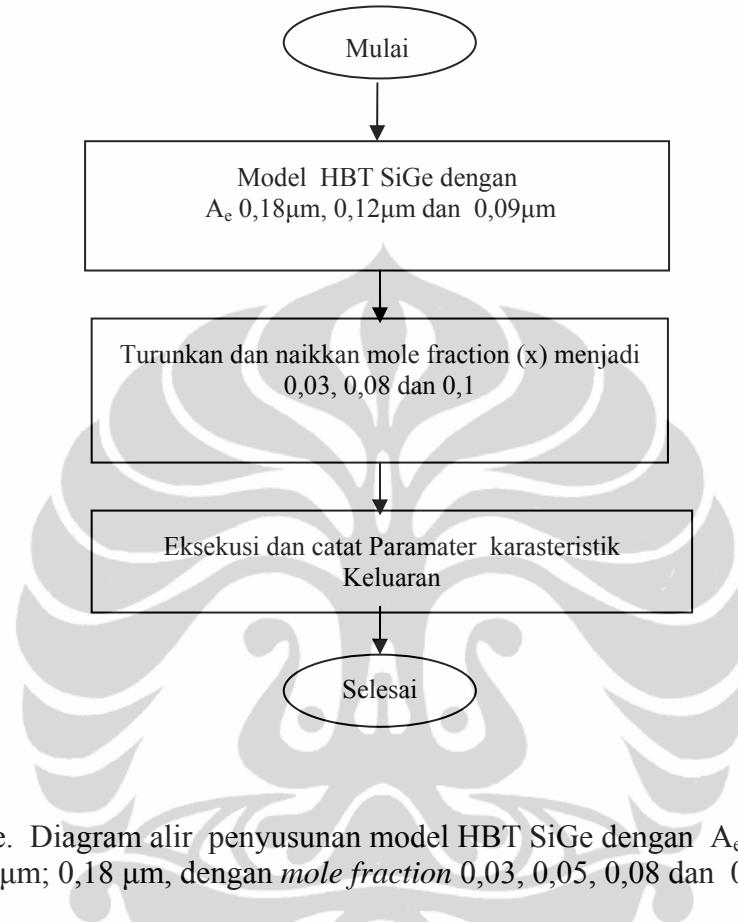


Gambar 3.4d Diagram alir penyusunan model HBT SiGe dengan stripe emiter ( $A_e$ ) atau *lithografi* 0,09  $\mu\text{m}$ ; 0,12  $\mu\text{m}$ ; 0,18  $\mu\text{m}$ , dengan *mole fraction* 0,05 dan 0,1.

File simulator yang dihasilkan dari diagram ini adalah ;

- a) 009asli\_ge05.bip, 009asli\_ge10.bip
- b) 012asli\_ge05.bip, 012asli\_ge10.bip
- c) 018asli\_ge05.bip, 018asli\_ge010.bip

3.4.5) Pengaturan arah vertikal dengan mengatur *mole fraction* ( $x$ ) pada model HBT SiGe  $A_e$  0,09 $\mu\text{m}$ ; 0,12 $\mu\text{m}$ ; 0,18 $\mu\text{m}$ , dari 0,05 menjadi 0,03 ; 0,08 dan 0,1.

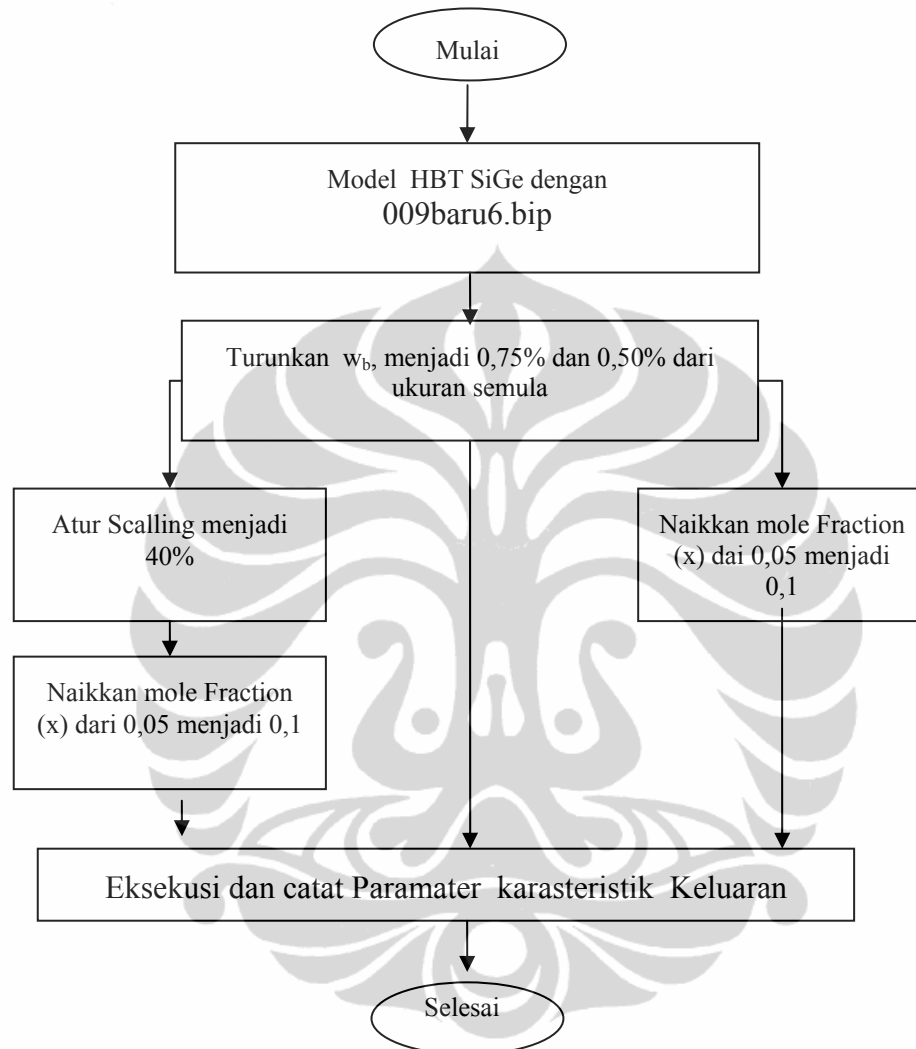


Gambar 3.4e. Diagram alir penyusunan model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,09  $\mu\text{m}$ ; 0,12  $\mu\text{m}$ ; 0,18  $\mu\text{m}$ , dengan *mole fraction* 0,03, 0,05, 0,08 dan 0,1.

File simulator yang dihasilkan dari diagram ini adalah ;

- a) 009asli\_ge03.bip, 009asli\_ge05.bip, 009asli\_ge08.bip, 009asli\_ge10.bip
- b) 012asli\_ge03.bip, 012asli\_ge05.bip, 012asli\_ge08.bip, 012asli\_ge10.bip
- c) 018asli\_ge03.bip, 018asli\_ge05.bip, 018asli\_ge08.bip, 018asli\_ge10.bip

3.4.6) Model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,09  $\mu\text{m}$ ; dengan mole fraction diatur 0,05 dan 0,1 serta  $w_b$  arah vertikal dinaikkan menjadi 1,5 kali serta geometri *lateral* diatur pada skala 0,8 dan 0,6.



Gambar 3.4f. Diagram alir penyusunan model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,09  $\mu\text{m}$ ; 0,12  $\mu\text{m}$ ; 0,18  $\mu\text{m}$ , dengan pengaturan geometri dan *mole fraction* 0,03, 0,05, 0,08 dan 0,1.

File simulator yang dihasilkan dari diagram ini adalah ;

- 009br6\_wb050.bip, 009br6\_wb075.bip
- 009br6ge10\_wb050.bip, 009br6ge10\_wb075.bip
- 009br8\_wb050.bip, 009br8ge10\_wb050.bip, 009br8ge10\_wb075.bip



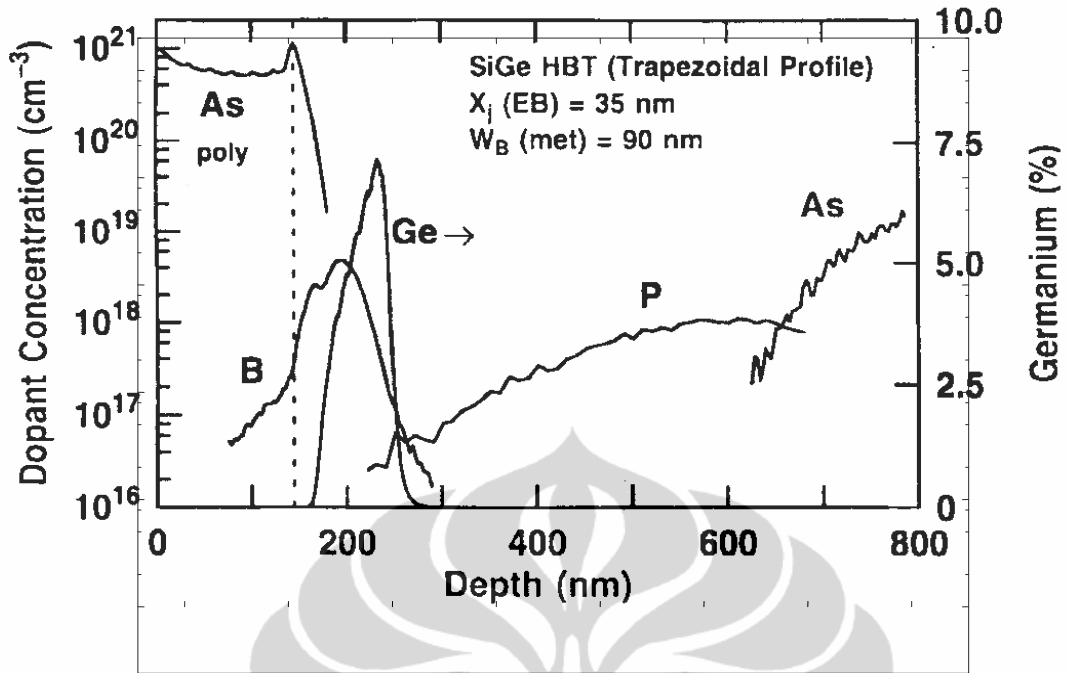
## BAB 4

### RANCANGAN MODEL HBT SiGe

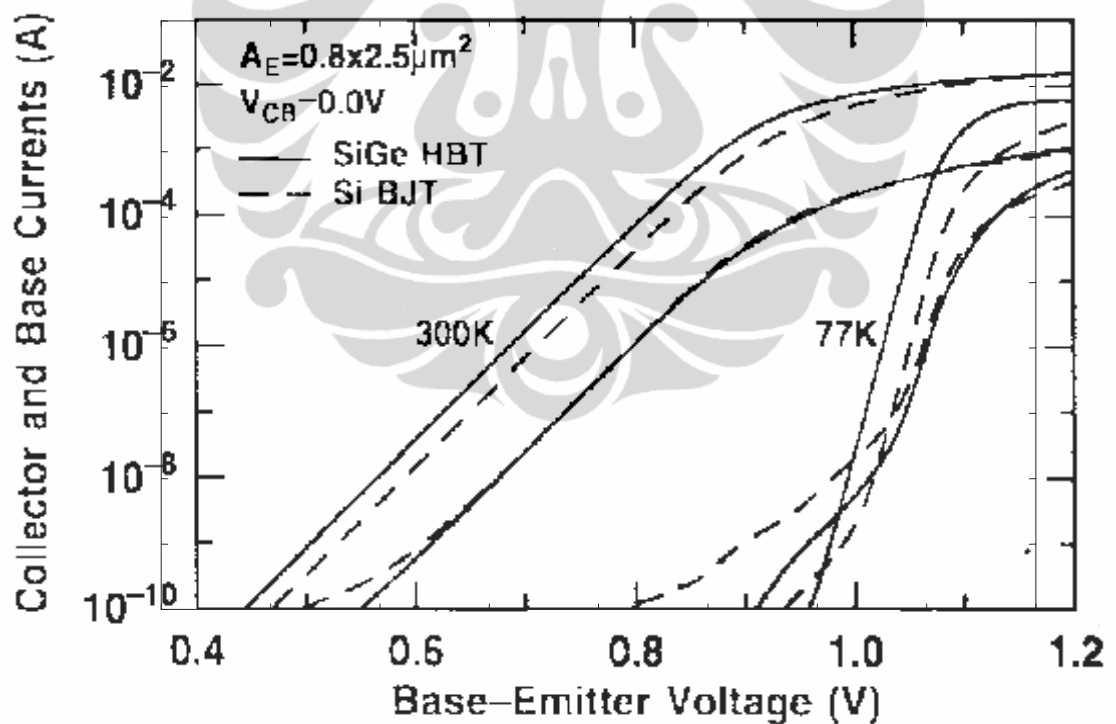
*Heterojunction* Bipolar Transistor Silikon Germanium (HBT SiGe) telah diproduksi dan dikaji oleh berbagai industri manufaktur elektronika. Berdasarkan pada teknologi *epigrowth* unjuk kerja SiGe HBT generasi pertama bekerja pada frekuensi *threshold*  $f_T$  maksimum 45 Ghz dengan *lithography*  $0,50\mu\text{m}$ , generasi kedua sekitar 100 GHz dengan *lithography*  $0,18\mu\text{m}$  dan generasi ketiga yang akan datang bekerja pada  $f_T$  maksimum 200 Ghz dengan *lithography*  $0,12\mu\text{m}$ . [4][9] Saat ini hampir lebih dari 5 (lima) *vendor* mengembangkan divais ini, dengan pabrikasi disesuaikan kemajuan teknologi *lithography*. [8]

Pada Bab 1 dan Bab 3 telah dijelaskan bahwa perancangan pemodelan berdasarkan data model acuan yang dikembangkan sebagai dasar analisis rancangan HBT. Untuk mendapatkan model acuan yang akurat, diperlukan validasi data dan parameter model acuan. Beberapa syarat yang harus dipenuhi, untuk memperoleh hasil yang baik, data pengukuran diambil dari divais dengan karakteristik yang lengkap, begitu juga simulator harus mempunyai model parameter fisika yang lengkap. Parameter yang digunakan sebagai masukan program simulasi harus menggambarkan divais yang sesungguhnya dan seakurat mungkin.

Berdasarkan ketentuan di atas, model acuan yang akan dirancang berdasarkan pada divais yang dibuat oleh IBM dengan teknologi BICMOS, yaitu  $0,50\mu\text{m}$  dengan unjuk kerja  $f_T/f_{\text{maks}}$  bernilai 45/65 Ghz. [57] Disamping itu parameter divais yang dikembangkan IBM ini lebih lengkap data kuantitatifnya dibandingkan dengan yang lain. Data yang digunakan sebagai acuan antara lain; profil *doping* dan *dopant concentration*, ketebalan basis atau *depth* pada arah vertikal, profil *Germanium* pada *Si-Ge*, dan *mole fraction* ( $x$ ). Sebagai dasar pengujian dapat digunakan kurva Gambar *Gummel* (*Gummel plot*). Fungsi arus kolektor ( $I_c$ ) dan arus basis ( $I_b$ ) terhadap  $V_{BE}$ , seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1(a) dan 4.1(b). [9][49]



Gambar 4.1a. Grafik *dopant concentration vs depth* HBT SiGe. eksperimen IBM. [49]



Gambar 4.1b Grafik *gummel plot* HBT SiGe. [49]

Dalam penentuan parameter fisika bahan semikonduktor Si dan SiGe dilakukan dengan cara menyesuaikan parameter fisika simulator dan parameter fisika HBT SiGe yang diperoleh dari berbagai hasil riset yang telah dipublikasikan dan digunakan secara luas. Beberapa parameter yang digunakan dalam pemodelan ini adalah,

- 1) konsentrasi pembawa muatan intrinsik Si.[37]

$$n_i = 3,1 \times 10^{16} (T + 273)^{1,5} e^{-1,206 / 2V_T} \quad (4.1)$$

dengan  $V_T = 0,0259(T+273)/300$ , yaitu sebesar  $1,19 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  pada  $T = 27^0 \text{ C}$ .

Pembawa muatan intrinsik pada SiGe adalah; [30][39]

$$n_{i \text{ SiGe}}^2 = n_{i \text{ Si}}^2 \exp\left[\frac{\Delta E_{g, \text{Ge}}}{kT}\right] \quad (4.2)$$

- 2) model Energi *bandgap* akibat konsentrasi *doping* yang tinggi digunakan persamaan. [28] [30]

$$\Delta E_{g,hd} = C_1 \left[ \ln\left(\frac{N}{C_2}\right) + \sqrt{\ln^2\left(\frac{N}{C_2}\right) + 0,5} \right] \quad (4.3)$$

$N$  konsentrasi *doping*,  $C_1$  dan  $C_2$  sebagai berikut : untuk bahan tipe-n,  $C_1 = 0,009 \text{ eV}$  dan  $C_2 = 1,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , serta bahan tipe-p,  $C_1 = 0,00692 \text{ eV}$  dan  $C_2 = 1,0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

- 3) model mobilitas *hole* dan elektron yang digunakan persamaan sebagai berikut;[37]

$$\mu_n = 88,0(T/300)^{-0,57} + \frac{1250(T/300)^{-2,33}}{1 + \left(\frac{N}{1,26 \times 10^{17} (T/300)^{2,4}}\right)^{-0,88(T/300)^{-0,146}}} \quad (4.4)$$

$$\mu_p = 54,3(T/300)^{-0,57} + \frac{407,0(T/300)^{-2,23}}{1 + \left(\frac{N}{2,35 \times 10^{17} (T/300)^{2,4}}\right)^{-0,88(T/300)^{-0,146}}} \quad (4.5)$$

dengan  $N$  konsentrasi *doping*,  $\mu_n$  mobilitas elektron dan  $\mu_p$  mobilitas *hole*.

- 4) kecepatan medan elektrik ( $v(E)$ ) dan temperatur menggunakan persamaan; [37]

$$v(E) = \frac{\mu_o E}{\left[1 + \left(\frac{E}{E/E_c}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (4.6)$$

dengan  $\mu_o$  'low field' mobility

E medan elektrik,  $E_c = v_s(TK)/\mu_o$

$v_s = 1,1 \times 10^7 (T+27/300)^{-0,4}$  dan  $\beta = 2$  untuk elektron,

$v_s = 0,9 \times 10^7 (T+27/300)^{-0,25}$  dan  $\beta = 1$  untuk hole.

5). konstanta dielektrik untuk Si adalah 11,7.[19]

6). model rekombinasi yang digunakan, yaitu rekombinasi SRH dan Auger, menggunakan persamaan,

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_o \left( \frac{(T+273)}{300} \right)^\gamma}{1 + N/N_{SRH}} \quad (4.7)$$

$\gamma = 0,57$  untuk elektron dan  $1,77$  untuk hole.

Waktu tunda elektron dan hole yang digunakan adalah : pada emiter  $\tau_o = 10^{-7}$  detik,  $N_{SRH} = 4,27 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , pada basis  $\tau_o = 10^{-6}$  detik,  $N_{SRH} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , dan pada kolektor  $\tau_o = 10^{-6}$  detik,  $N_{SRH} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

7). waktu rekombinasi menggunakan persamaan,

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{C_{n,p} N^2} \quad (4.8)$$

$$C_n = 0,83 \times 10^{-31} [(T+273)/300]^{0,72} \text{ cm}^6/\text{s},$$

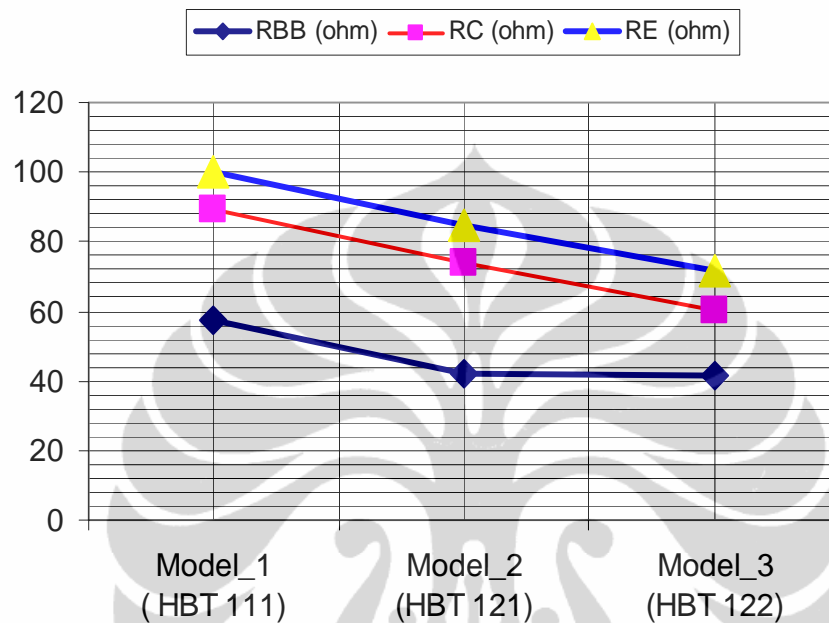
$$C_p = 0,83 \times 10^{-31} [(T+273)/300]^{1,77} \text{ cm}^6/\text{s}.$$

8). parameter fisika bahan SiGe pada simulator yang dipakai untuk nilai penyempitan celah pita energi sesuai dengan persamaan  $\Delta E_{g,SiGe} = 0,74x \cdot [2][9]$

#### 4.1 Perancangan Model HBT Acuan

Simulator bipole3, menyediakan model HBT dengan dua terminal basis serta satu terminal emiter dan kolektor.[37][38] Pemodelan HBT dengan dua kontak terminal basis menghasilkan nilai resistansi basis ( $R_{bb}$ ) yang lebih rendah dibandingkan dengan HBT dengan model HBT satu kontak terminal basis, sehingga mempunyai *noise figure* ( $F_n$ ) yang lebih rendah. [30][39][54] Hasil investigasi M.W. Hsieh dkk 2006, menunjukkan bahwa HBT SiGe dengan terminal kontak masing satu *finger* pada emiter, basis dan kolektor (HBT 111) mempunyai nilai

resistansi  $R_{bb}$ ,  $R_c$  dan  $R_e$  yang lebih besar dibanding model HBT dengan dua(2) *finger* pada basis (HBT 121) dan dua *finger* pada basis dan emiter (HBT 122).[16] HBT 121 dan HBT 122 memiliki nilai  $R_{bb}$  yang sama, Gambar 4.2 menunjukkan bahwa perbandingan parameter HBT SiGe dengan penambahan terminal pada basis, kolektor dan emiter dengan model dikembangkan oleh Mark J Rodwall.[17]

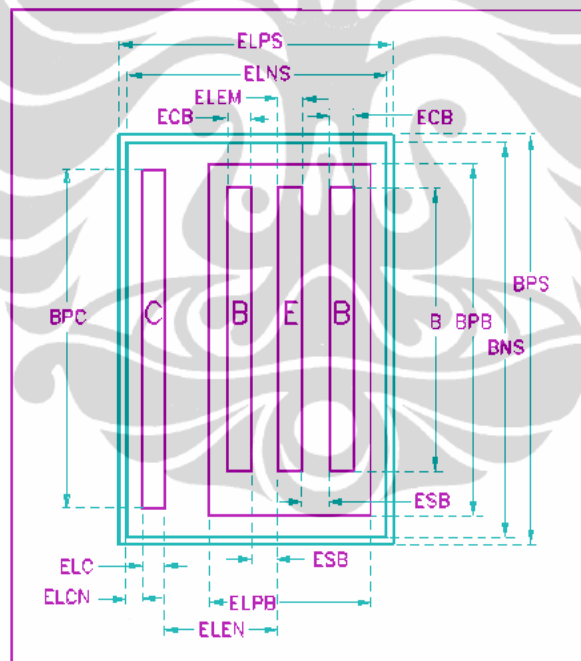


Gambar 4.2 Diagram rasio resistansi parasitis  $R_{bb}$ ,  $R_C$  dan  $R_E$ , pada model HBT SiGe.[17]

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa unjuk kerja keseluruhan dari 3 jenis model HBT111, HBT 121 dan HBT 122, dari parameter model dapat diamati bahwa  $f_T$ ,  $\beta$ ,  $C_{BE0}$  dan  $C_{BC0}$  tertinggi dimiliki oleh model HBT 122 sedangkan untuk nilai Resistensi parasitis  $R_c$ ,  $R_{bb}$  dan  $R_e$  terendah dimiliki oleh model HBT 121.

Tabel 4.1 .Model eksperimen dengan terminal basis, kolektor berbeda ,  
Mark J Rodwall. [17]

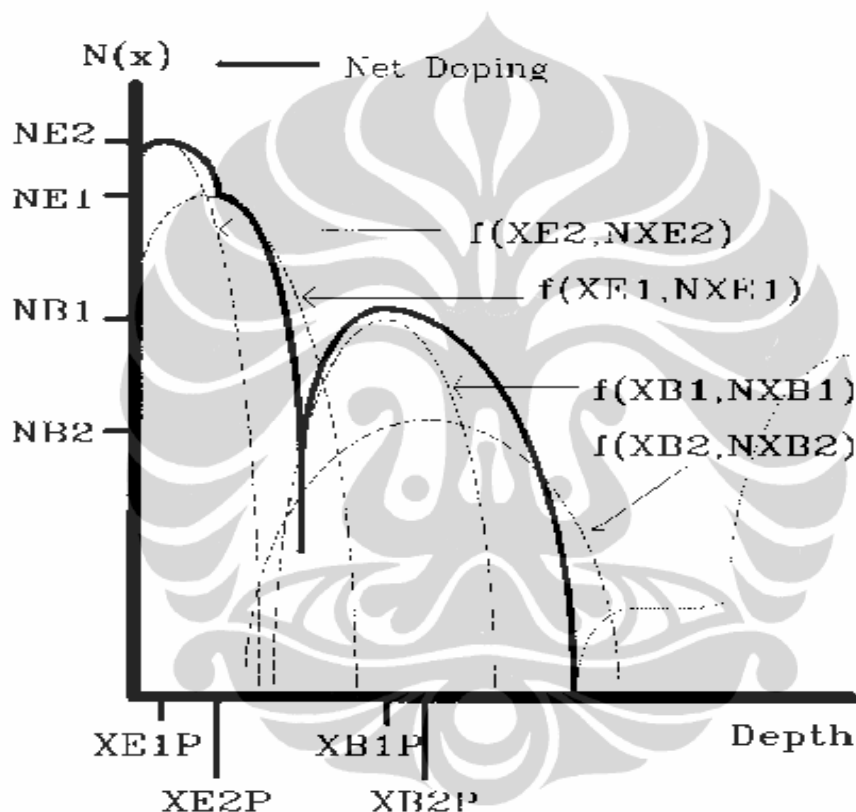
Parameter	Model SiGe HBT		
	Model-1	Model-2	Model-3
<i>Emitter finger</i>	1	1	1
<i>Base finger</i>	1	2	2
<i>Colector Finger</i>	1	1	2
Beta ( $\beta$ )	280	279	279
$f_T$ (GHz)	108	105	118
<i>Gain (db)</i>	17,6	17,5	22
PAE (%)	26	29	40
$R_{bb}$ (ohm)	57,2	41,0	41,8
$R_C$ (ohm)	31,9	31,7	18,4
$R_E$ (ohm)	11,1	11,1	11,2
$C_{BCO}$ (pF)	20.2	21	23.2
$C_{BEO}$ (pF)	82,7	84,4	85,1



Gambar 4.3a. Diagram dimensi lateral model HBT 121. [37]

Simulator bipole3 menyediakan rancangan HBT SiGe dengan satu terminal emiter dan kolektor serta dua terminal basis, selanjutnya model ini disebut HBT 121. Bentuk geometri lateral dari simulator bipole3 diperlihatkan pada Gambar 4.3(a). Beberapa notasi yang digunakan pada parameter geometri arah *lateral* adalah ; **ELPS** (*width of isolation mask*) , **ELNS** (*width of the buried layer distance parallel to ELEM*), **ELEM** (*emitter diffusion width*), **ECB**(*width of base contact window*),

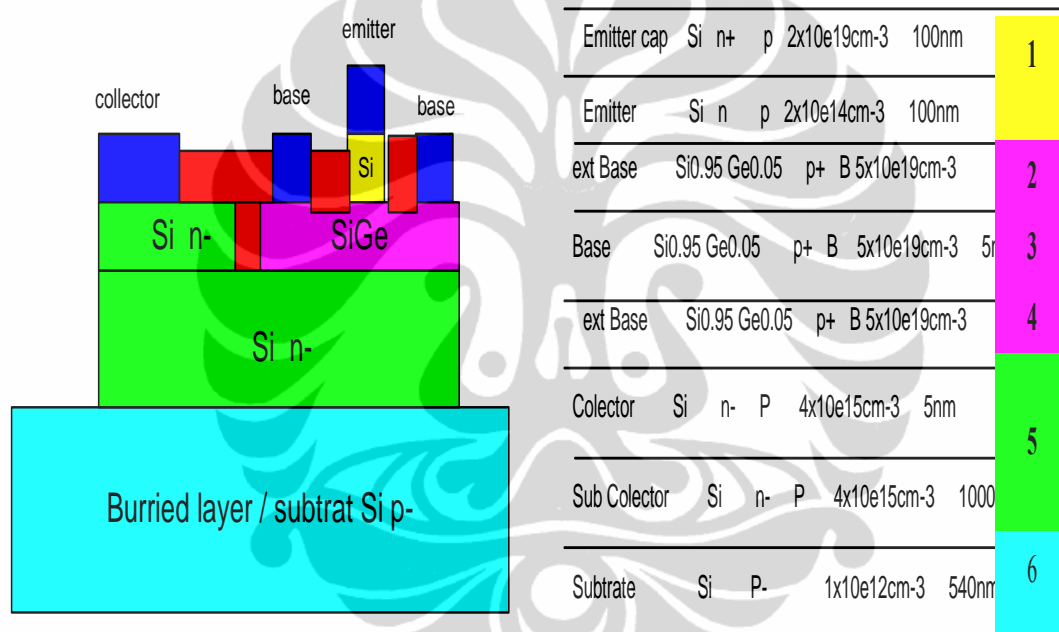
**ELC** (width of collector  $N^+$  contact diffusion (sinker) mask), **ESB**(space between emitter diffusion edge and base contact), **ELCN** (distance between the buried layer mask edge to the collector diffusion mask edge ). **ELEN** (distance between the emitter edge and the collector diffusion contact edge), **ELPB**(width of base region diffusion), **BPC** (length of the collector contact diffusion mask), **B** (total emitter diffusion length), **BPB** (length of Base region diffusion), **BNS** (width of the buried layer mask) dan **BPS**.( inner length of isolation mask).



4.3b. Diagram *profile impurity* model HBT 121.[37]

Selanjutnya pada arah geometri vertikal simulator bipole3 menggunakan parameter impuritas elektron dan ketebalan atau *depth* dari devais. Gambar 4.3(b) menunjukkan bahwa diagram *impurity profile* dari model pada rancangan HBT 121 dengan notasi sebagai berikut; **NE1**(*Peak concentration of emitter diffusion*), **XE1**(*Characteristic length of emitter diffusion*), **NXE1**(*Exponent of first emitter quasi Gaussian*), **XE1P** (*x value corresponding to peak of first donor implant*), **NB1**(*Peak concentration of base diffusion*), **XB1**(*Characteristic length of base diffusion*), **XNB1**(*Exponent of first base quasi Gaussian*), **XB1P**(*x value*

corresponding to peak of first acceptor implant), **NE2**(Peak concentration of second emitter quasi Gaussian), **XE2**(Characteristic length of second (superimposed) emitter Diffusion), **NXE2** (Exponent of second emitter quasi Gaussian), **X2EP**(x value corresponding to peak of second donor implant), **NB2**(Peak concentration of second base quasi Gaussian), **XB2**(Characteristic length of second (superimposed) base Diffusion), **NXB2**(Exponent of second base quasi Gaussian), **XB2P**(x value corresponding to peak of second acceptor implant), **IERF**(1 is used to define the emitter diffusion by an erfc function given by user specified values for NE1) dengan  $N(x) = NE1 [1 - erf(x/XE1)]$ )



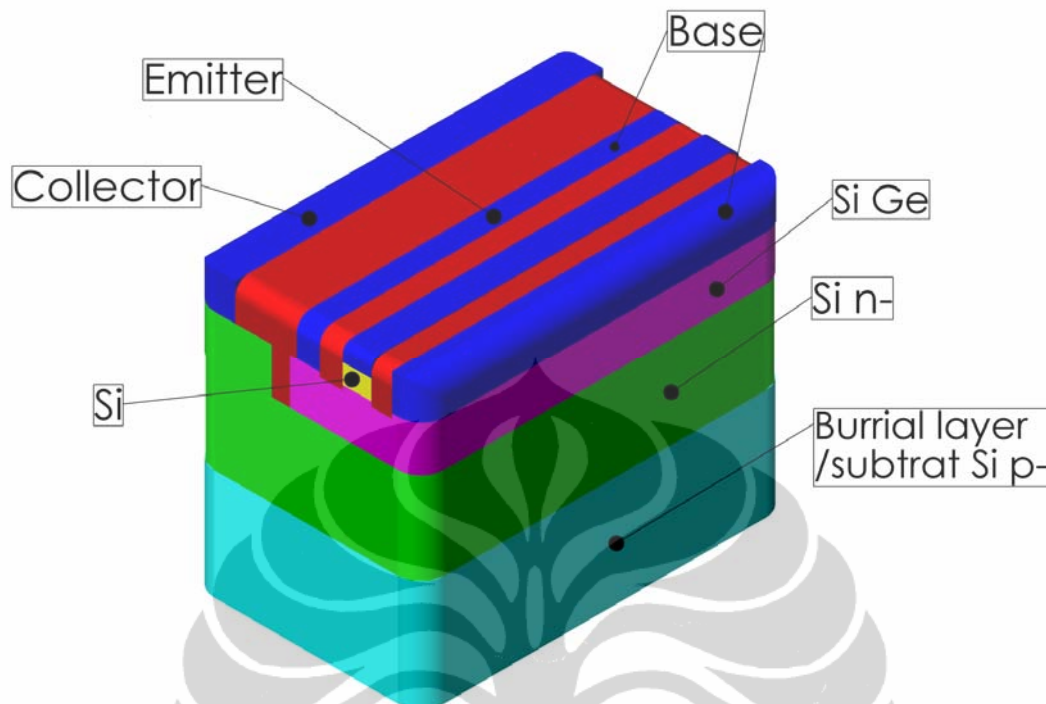
a). Diagram vertikal

b). Skematik vertikal

Gambar 4.4 Diagram dan skematik vertikal HBT 121.

Gambar 4.4(a) dan 4.4(b) menunjukkan *cross section* arah vertikal dari model HBT 121 yang digunakan pada riset ini, bagian ini berkaitan sekali dengan konsentrasi dan *impurity profile* terhadap fungsi *depth*. Profil Germanium pada bagian basis SiGe digunakan profil *trapezium* dengan mole fraction (x) dipilih 3%,5%,8% dan 10%. Gambar 4.4(c), menunjukkan gambar tiga dimensi dari model HBT yang dilakukan pada riset ini, untuk mendapatkan karakteristik yang optimal dengan melakukan analisis penskalaan pada arah *lateral* dan vertikal dari rancangan HBT SiGe.





Gambar 4.4c. Layout 3D model HBT 121.

Ada beberapa tahapan dalam memulai proses pemodelan dengan bipole3 ini, yaitu ;

- a) disusun suatu model HBT SiGe dengan data berdasarkan parameter vertikal yaitu *dopant concentration* terhadap ketebalan *depth*. Data disampling dari *SIMS profile* HBT SiGe IBM secara konvensional berdasarkan titik tertentu nilai *dopant concentration* dan ketebalan (*depth*) devais, Tabel 4.2 menunjukkan data yang terkumpul dari hasil sampling *SIMS profile* HBT SiGe, dengan metode seperti ini maka keakuratan *tools software* yang dipergunakan juga dapat diketahui validitasnya ketika dibandingkan dengan hasil keluaran dari model yang dijadikan referensi.

Tabel 4.2. Data Simulator *Donor & Acceptor Concentrasi*.

No.	Donor concentrasi	Aceptor concentrasi	Depth (nm)	Depth (nm)
1.	1,0E+21	2,8E+17	0	0
2.	3,0E+20	9,0E+17	10	0
3.	5,0E+19	2,5E+18	20	200
4.	1,7E+18	2,2E+18	30	220
5.	3,0E+17	2,5E+18	30	230
6.	6,0E+16	3,5E+18	40	240
7.	2,0E+16	5,0E+18	50	250
8.	1,0E+16	3,8E+18	60	250
9.	1,5E+16	2,2E+18	70	270
10.	1,8E+16	1,0E+18	80	280
11.	2,2E+16	4,5E+17	90	285
12.	3,5E+16	1,8E+17	100	290
13.	4,5E+16	6,5E+16	112	295
14.	5,0E+16	4,5E+16	120	300
15.	6,0E+16	3,0E+16	130	0
16.	6,5E+16	2,0E+16	140	0
17.	7,0E+16	1,8E+16	150	0
18.	1,0E+17	7,0E+15	170	0
19.	1,2E+17	2,0E+15	195	0
20.	2,0E+17	1,0E+15	220	0
21.	2,2E+17	3,0E+14	250	0
22.	3,0E+17	1,0E+14	270	0
23.	4,0E+17	2,0E+13	300	0
24.	5,0E+17	7,0E+12	330	0
25.	1,0E+18	4,0E+11	400	0
26.	1,0E+18	1,0E+11	435	0
27.	1,0E+18	3,0E+10	470	0
28.	1,0E+18	5,0E+09	510	0
29.	9,0E+17	1,0E+09	535	0
30.	1,5E+18	7,0E+08	560	0
31.	3,0E+18	3,0E+08	580	0
32.	6,0E+18	1,0E+08	600	0

b) untuk selanjutnya meng-*create* data tersebut menjadi *file* simulator digunakan bentuk dan aturan dari bipole3, program *file* simulator tersebut dinamakan *file* :

**kal\_ibm4**. Struktur program dalam format *input* sebagai berikut;

**&TITLE** Up to 5 Title Cards.

**&PARAM** Parameter name and value separated by commas.

example: IGRAPH=9,XJ1=1e-4

A # can be used if comments are needed.

example: #Impurity Profile Parameters

**&DATA** This specifies tabular impurity profile data.

The format of this data for tabular impurity profiles is:

N

Donor Conc.,Acceptor Conc.,Depth

Donor Conc.,Acceptor Conc.,Depth

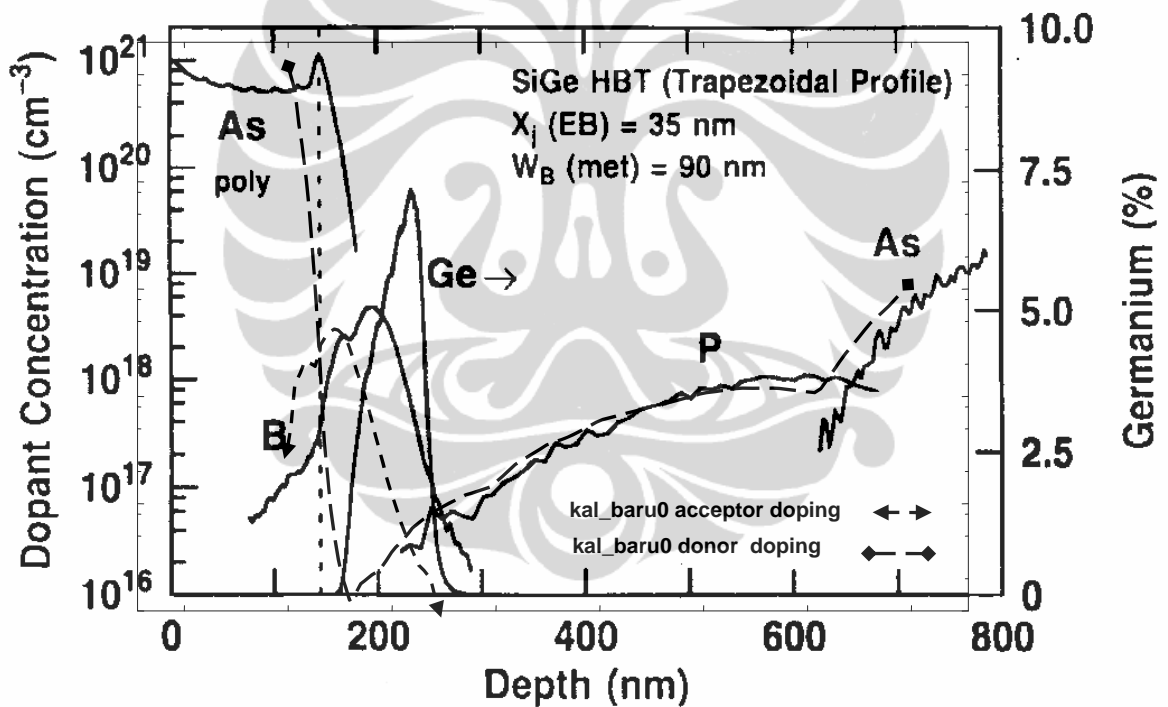
Donor Conc.,Acceptor Conc.,Depth

etc.  
 where:  $N$  specifies the number of  $x$  (depth) values (0  
 &END This ends the file

Struktur Program lengkap dapat dilihat pada Lampiran 1 untuk format input dan Lampiran 2, untuk format keluaran.

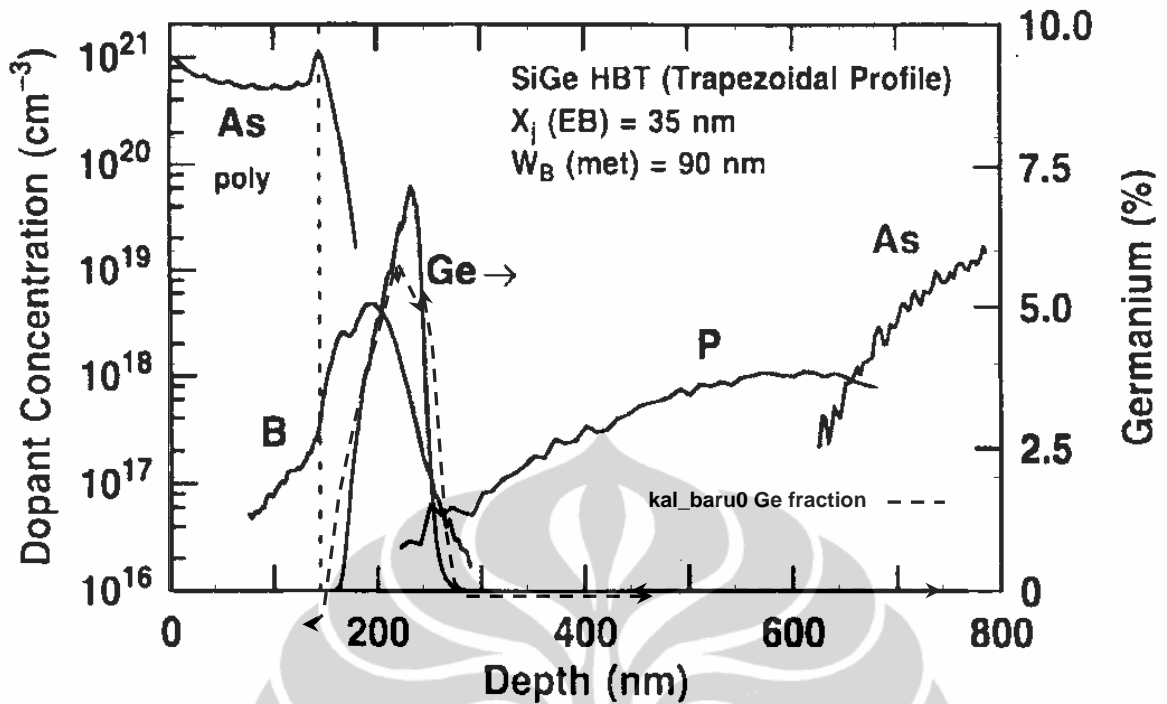
c) membuat “plot” file keluaran **kal\_ibm4** pada SIMS profile HBT SiGe IBM.

Acuan sesuai dengan data eksperimen HBT SiGe IBM Gambar 4.1(a) pada arah vertikal, kemudian ada beberapa penyesuaian yang dilakukan antara lain, konsentrasi *doping* poli-Si simulasi adalah  $10^{21}$  cm<sup>3</sup> dan pertemuan antara bahan tipe-n yang diberi *doping* As dan tipe-p yang diberi *doping* B, kemiringan profil *doping* emiter dalam simulasi diatur agar berpotongan dengan profil *doping* basis pada daerah lekukan seperti diperlihatkan pada Gambar 4.5(a).



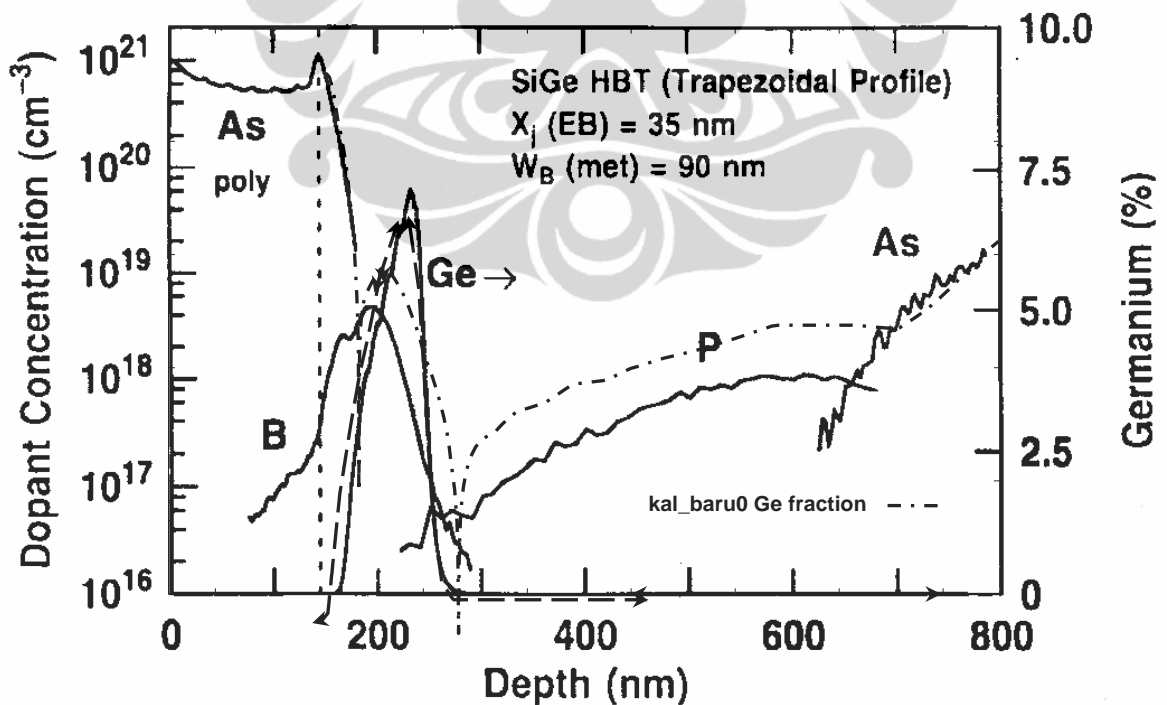
Gambar 4.5a Grafik kalibrasi profil *doping* HBT SiGe.  
 eksperimen IBM — dan simulasi ← → dan ◄ — — ► )

d) menentukan profil Ge acuan dengan data disesuaikan dengan data eksperimen IBM Gambar 4.1a. Profil Ge yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 4.5(a), serta plot diagram *Dopant Concentration* dan profil Ge ditunjukkan Gambar 4.5(b), sebagai tahapan akhir rancangan daerah vertikal.



Gambar 4.5b. Grafik kalibrasi profil Ge HBT SiGe.  
 (eksperimen IBM — dan simulasi - - - )

- e) menggabungkan Gambar 4.5(a) dan 4.5(b) menjadi Gambar 4.5(c), sebagai tahapan akhir dari proses pemodelan ini.



Gambar 4.5c. Grafik kalibrasi profil Ge HBT SiGe.  
 (eksperimen IBM — dan simulasi - - - )

f) untuk selanjutnya mengeksekusi simulator: kal\_ibm sehingga menghasilkan parameter keluaran antara lain ;Collector current ( $I_C$ ), Treshod frequency ( $f_T$ ), Oscillation frequency ( $f_{max}$ ), Current Gain ( $\beta$ ), Breakdown voltage ( $V_{BO}$ ), Sheet ressistansce ( $R_{bb}$ ), Noise figure ( $F_n$ ), nilai setiap parameter ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spesifikasi model simulasi file: kal\_ibm4.bip.

Deskripsi	Simbol	Satuan	Paramater		
			Low Current	max gain	max $f_T$
Collector current	$I_C$	A	3,76e-11	2,18e-6	9,88e-4
Treshod frequency	$f_T$	Hz	1,05e+04	4,96e+08	4,34e+10
Oscillation frequency	$f_{max}$	GHz	1,11e+7	2.51e+09	5,83 e+10
Current Gain	$\beta$		8,60e+1	1,09e+2	7,94e+01
Breakdown voltage	$\beta V_{CEO}$	V	3,5	3,5	3,5
Sheet ressistansce ( $r_b$ )	$r_b$	ohm	3,67e+02	3,37e+02	2,67e+02
Noise figure	$F_n$	dB	3dB, $I_c=0.001A$ , $f_T=40$ Ghz.		
Figure of Merit	$\beta V_{CEO} * f_T$	GHz	1,16e+02		
lateral. emitter width	$A_e$	$\mu m$	0,5		

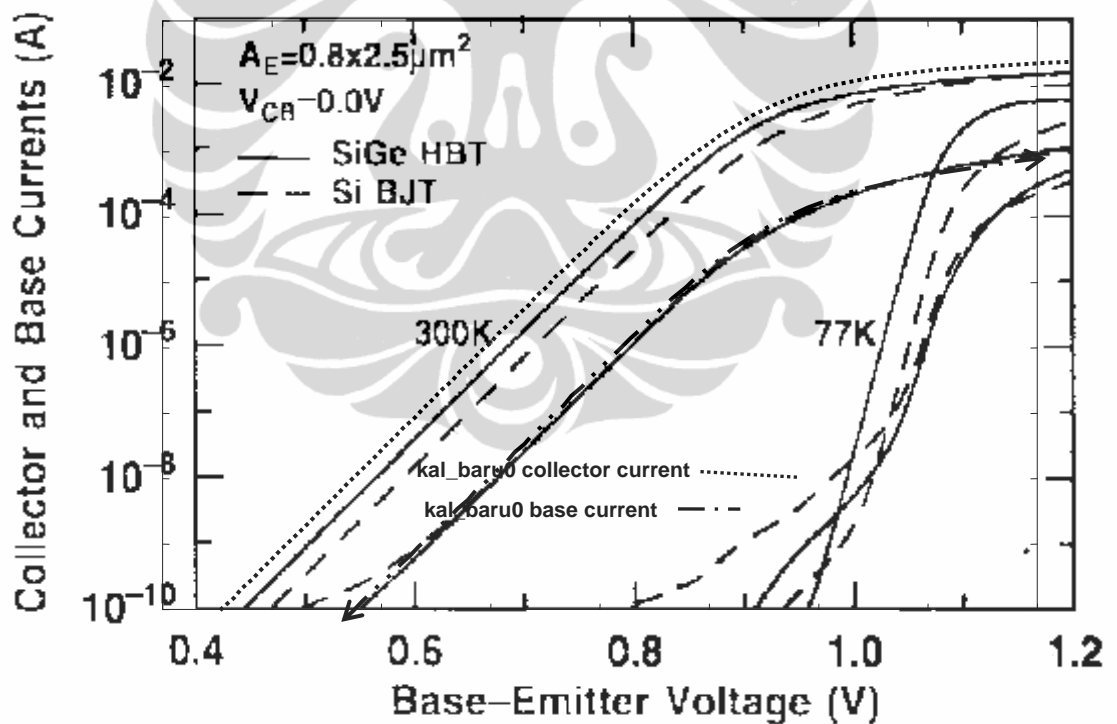
g) untuk memvalidasi karakteristik *output* file simulasi acuan kemudian dibandingkan dengan *Gummel Plot* eksperimen IBM, dari model parameter fisika, profil *doping* dan profil Ge pada Gambar 4.4(b) dengan luas emiter  $A_E$   $0,8 \times 2,5 \mu m^2$ , diperoleh Gambar Gummel yang diperlihatkan pada Gambar 4.5. secara keseluruhan besarnya  $I_B$  simulasi sangat mendekati  $I_B$  eksperimen, ini berarti bahwa profil *doping* emiter beserta parameter fisika yang digunakan sudah tepat.

#### 4.2 Validasi Model HBT Acuan

Dari Gambar 4.6 tampak bahwa secara keseluruhan  $I_c$  simulasi jauh lebih tinggi dari  $I_c$  eksperimen. Hal ini disebabkan adanya parameter fisika yang tidak dapat dimasukkan dalam perhitungan karena keterbatasan kemampuan program *bipole3*, yaitu nilai *effective density of state* (DOS) pada pita konduksi dan valensi  $N_c$  dan  $N_v$ . Perbandingan  $N_c$  dan  $N_v$  bahan SiGe dan Si ( $\alpha$ ) adalah; [31]

$$\alpha = \frac{(N_c N_v)_{SiGe}}{(N_c N_v)_{Si}} = 0,4 \quad (4.10)$$

Jika  $\alpha$  dimasukkan dalam perhitungan, maka secara keseluruhan nilai  $I_c$  yang diperoleh dari hasil simulasi lebih rendah sekitar 10% dari  $I_c$  eksperimen Tabel 4.4 menunjukkan perbandingan Tabel eksperimen dan simulasi setelah DOS ( $\alpha$ ) diperhitungkan.



Gambar 4.6 Kalibrasi *gummel plot* HBT SiGe.

(eksperimen IBM — dan simulasi..... dan -.-)

Tabel 4.4 Perbandingan  $I_c$  eksperimen dan simulasi.

$V_{BE}$ (Volt)	$I_c$ eksperimen (Amp)	$I_c$ simulasi (Amp)	$I_c$ simulasi $\alpha$ (Amp)	Perbedaan (%)
0,5	$9,0 \times 10^{-10}$	$2,23 \times 10^{-9}$	$8,92 \times 10^{-10}$	1
0,6	$3,6 \times 10^{-8}$	$8,7 \times 10^{-8}$	$3,48 \times 10^{-8}$	3
0,7	$2,0 \times 10^{-6}$	$4,71 \times 10^{-6}$	$1,88 \times 10^{-6}$	6
0,8	$6,8 \times 10^{-5}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$6,56 \times 10^{-5}$	4
Rata-rata				3

Dari Tabel 4.4 di atas dapat diamati bahwa perbedaan  $I_c$  simulasi dan eksperimen rata-rata 3 % . Perbedaan ini karena kesalahan *sampling* data. Data hasil pembacaan SIMS mempunyai ketidakpastian sekitar 10 % , oleh sebab itu terjadi perbedaan antara hasil simulasi bipole3 dan data eksperimen. Meskipun demikian dapat dinyatakan bahwa simulator bipole3 cukup baik untuk digunakan perancangan model HBT.

### 4.3 Pengembangan Model HBT SiGe

Penyusunan model HBT SiGe yang akan digunakan sebagai model HBT SiGe referensi dari riset ini berdasarkan pada kajian HBT SiGe yang telah divalidasi dan dikalibrasi, yaitu File **Kal\_ibm4** dengan mengubah lebar *stripe emitter* menjadi  $0,18 \mu\text{m}$  serta panjang lengan emiter  $10 \mu\text{m}$ , sehingga  $A_E$   $0,18 \times 10 \mu\text{m}$ , konsentrasi *doping* emiter  $10^{20} \text{cm}^{-2}$ , profile *doping* pada basis *trapezium*, *mole fraction* Ge (x) 5 %, luas *buried layer*  $15 \times 5 \mu\text{m}^2$  dan lebar basis  $w_b$  20 nm. Gambar 4.7(a) dan Gambar 4.7(b) adalah dimensi lateral, potongan vertikal dan skematik arah vertikal dari model HBT SiGe yang akan dikaji dengan perubahan yaitu a) perubahan lebar emiter arah *lateral*, b) perubahan dimensi skala arah *lateral*, c) dimensi skala arah *lateral* disertai perubahan lebar basis arah vertikal, d) perubahan dimensi arah *lateral* dan lebar basis disertai pengaturan *mole fraction* (x) Ge pada sisi basis.

	Notation	Value	Unit
<p>(a) Lay out Lateral</p>	<b>B</b> , total emitter diffusion length	10.e-4	cm
	<b>BPC</b> , length of collector contact diffusion including the sideways diffusion	12.e-4	cm
	<b>BPS</b> , inner length of isolation =18.e-4	18.e-4	cm
	<b>BPB</b> , length of base diffusion region	12e-4	cm
	<b>BNS</b> , width of buried layer including sideways diffusion	15e-4	cm
	<b>ELPS</b> , width of base diffusion	6.e-4	cm
	<b>ELNS</b> , width of buried layer	3.e-4	cm
	<b>ELEM</b> , Emitter diffusion width	0,18.e-4	cm
	<b>ECB</b> , width of base contact	0,2e-4	cm
	<b>ESB</b> , distance between the edge of the emitter diffusion and the low resistance extrinsic base region	0,2e-4	cm
	<b>ELC</b> , width of collector contact diffusion	0,54e-4	cm
	<b>ELCN</b> , distance between the buried layer edge(after sideways diffusion) to the collector diffusion edge	0,54e-4	cm
	<b>ELEN</b> , distance between the element the emitter edge and the collector diffusion edge	1,0e-4	cm
	<b>ELPB</b> , width of diffusion base	1,1e-4	cm
	<b>ELCN</b> , distance between the buried layer edge(after sideways diffusion) to the collector diffusion edge	0,54e-4	cm
<p>(b) Lay out Vertikal</p>	<b>Impurity</b>	Nilai	Unit
	<b>NEPI</b> , Epitaxial layer concentration	2,0e <sup>16</sup>	
	<b>NE1</b> , Surface <i>doping</i> level for emitter diffusion	1,0e <sup>20</sup>	
	<b>NXE1</b> , Exponent of emitter 'Gaussian'	4,0	
	<b>XE1</b> , Characteristic length of emitter diffusion	0,01e <sup>-4</sup>	μm
	<b>NB1</b> , Peak concentration of base diffusion	1e19	
	<b>NXB1</b> , Exponent of first base quasi Gaussian	4,0	
	<b>XB1</b> , Characteristic length of base diffusion	0,03e-4	μm
	<b>SiGe Layer</b>	20	nm
	<b>IGAP</b> , Base germanium fraction XGE is specified with, IGAP = 7,	7	
	<b>XGE</b> , germanium fraction	0,05	
	<b>W<sub>b</sub></b> , <i>basewidth</i>	0,05e-4	μm

Gambar 4.7 Parameter model HBT SiGe dengan A<sub>e</sub> 0,18μm



Dalam penggunaan program simulasi dari HBT model ini, model HBT simulasi diberi nama *file:018asli*, parameter diatas kemudian disusun dalam sebuah struktur program pemodelan bipole3, bentuk struktur program pemodelan ini sebagai berikut;

```

&TITLE
SiGe HBT ae=018x10
&PARAM
#####
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.18e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.20e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxe1=4.0,xe1=.01e-04,
nbl=1.e19,nxb1=4.0,xb1=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,xe3=.25e-04,xe3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xb12=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xjlg=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm

```

Setelah dieksekusi, model HBT SiGe mempunyai spesifikasi *output* berupa unjuk kerja dari HBT Model acuan antara lain; *collector current*, *threshod frequency* ( $f_T$ ), *oscillation frequenc* ( $f_{osc}$ ), *current gain* ( $\beta$ ), *breakdown voltage*, *sheet. emitter* seperti ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Karakteristik model HBT SiGe.

Deskripsi	Simbol	Satuan	Paramater		
			<i>Low Current</i>	<i>max gain</i>	<i>max f<sub>T</sub></i>
<i>Collector current</i>	$I_C$	A	6,11e-6	8,60e-5	3,97 e-3
<i>Treshod frequency</i>	$f_t$	Hz	7,65e+8	8,66e+8	6,19e+10
<i>Oscillation frequency</i>	$f_{max}$	GHz	1,21.e+10	4,14.e+10	1,36 e+11
<i>Current Gain</i>	$\beta$		1,62e+2	1,69e+2	1,22e+2
<i>Breakdown voltage</i>	$\beta V_{CEO}$	V	-2,7	2,7	2,7
<i>Sheet ressistansce (rb)</i>	$r_b$	ohm	1,14e+1	1,10e+1	9,12e+00
<i>Noise figure</i>	$F_n$	dB	0,5 db saat $I_c=0,001A$ , $f_T = 45$ Ghz. 2 db saat $I_c=0,001A$ , $f_T = 86$ Ghz		
<i>Figure of Merit</i>	$\beta V_{CEO} * f_T$	GHz	1,69		
<i>lateral. emitter width</i>	$A_e$	$\mu m$	0,18		

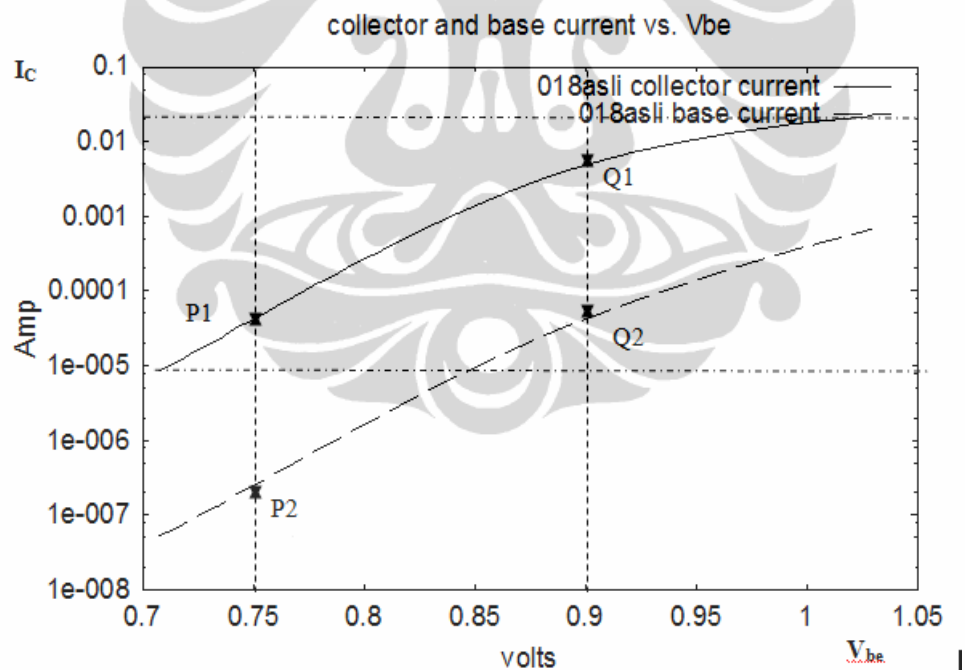
Untuk mendapatkan gambaran yang jelas dari model ini, perlu dilihat beberapa relasi atau persamaan antara parameter, yaitu;

- fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) dan arus basis ( $I_B$ ) terhadap tegangan basis-emiter ( $V_{BE}$ )  
,  $I_c=f(V_{BE})$  dan  $I_b=f(V_{BE})$
- fungsi *current gain* ac dan dc terhadap arus kolektor,  $\beta_{(ac+dc)}=f(I_c)$ ,
- fungsi frekuensi *threshod* dan osilasi terhadap arus kolektor,  $f_T = f(I_c)$  dan  
 $f_{maks} = f(I_c)$ ,
- fungsi *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor,  $F_n= f(I_c)$ .

#### 4.3.1 Relasi Arus Kolektor ( $I_c$ ) dan Basis ( $I_b$ ) terhadap Tegangan basis-emiter ( $V_{BE}$ ); $I_c=f(V_{BE})$ dan $I_b=f(V_{BE})$

Gambar 4.8a menunjukkan grafik fungsi antara arus kolektor ( $I_c$ ) dan arus basis ( $I_b$ ) terhadap tegangan basis-emiter ( $V_{BE}$ ),  $I_c=f(V_{BE})$ , dan  $I_b=f(V_{BE})$ .

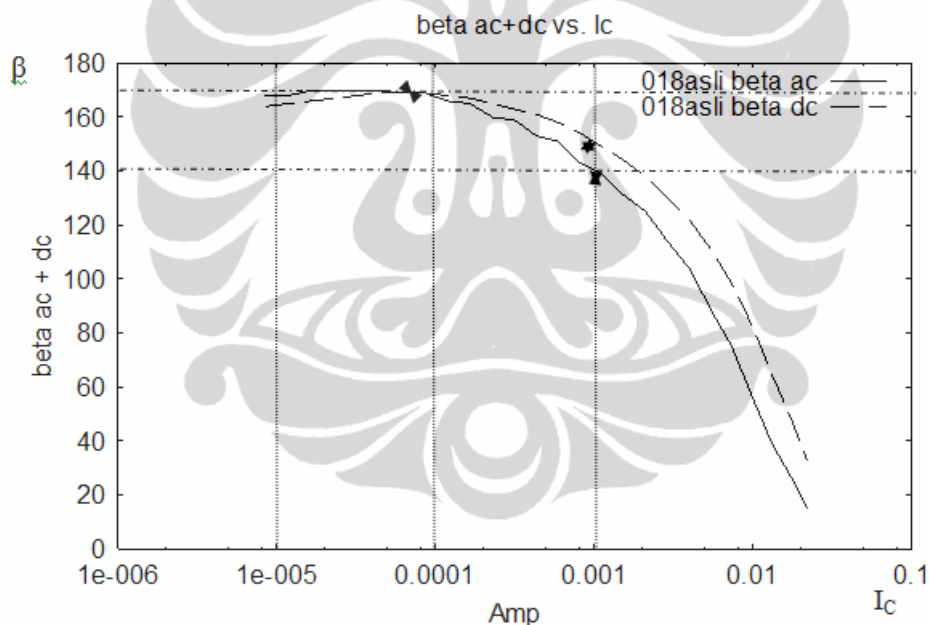
Tegangan terendah dari  $V_{BE}$  sekitar 0,707 Volt, dan tertinggi 1,03 volt, dengan arus kolektor ( $I_c$ ) terendah 50  $\mu$ A, dan tertinggi 50mA, sedangkan untuk arus basis ( $I_b$ ) terendah dicapai 85 nA dan tertinggi 5 mA. Dari grafil tersebut dapat dilihat jarak anantara kurva  $I_c$  dan  $I_b$ , sepanjang  $V_{BE}$  tidak sama, diatas tegangan  $V_{BE}$  0,9 V, kurva  $I_c$  cenderung menurun sedangkan kurva  $I_b$  menaik seperti dapat diamati pada jarak titik  $P_1$ - $Q_1$ ,  $P_2$ - $Q_2$  dan  $P_3$ - $Q_3$ . Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa  $P_1$ - $Q_1$  sama  $P_2$ - $Q_2$ , dan lebih besar dari  $P_3$ - $Q_3$  artinya rasio  $I_c$  terhadap  $I_b$  berbeda sepanjang  $V_{BE}$ , jika rasio  $I_c$  terhadap  $I_b$  adalah penguatan arus ( $\beta$ ),  $\beta = I_{cP1}/I_{bQ1} = I_{cP2}/I_{bQ2} = I_{cP3}/I_{bQ3}$ , penguatan arus ( $\beta$ ) cenderung menurun ketika  $V_{BE}$  naik. Dalam grafik tersebut di atas  $V_{BE}$  0,9 volt, penguatan arus ( $\beta$ ) menurun.



Gambar 4.8a. Grafik fungsi  $I_c$  terhadap  $V_{be}$ , model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,18 $\mu$ m.

### 4.3.2 Relasi *current gain* ( $\beta$ ) terhadap Arus Kolektor ( $I_c$ ), $\beta_{(ac,dc)}=f(I_c)$

Gambar 4.8(b) menunjukkan fungsi *current gain* ( $\beta$ ) dc dan ac terhadap arus kolektor ( $I_c$ );  $\beta_{(ac+dc)} = f(I_c)$ , nilai  $\beta_{ac}$  sama dengan  $\beta_{dc}$  pada  $I_c$  0,0001 Amper sebesar 169 kali. Pada saat  $I_c < 0,000005$  Amper, nilai  $\beta_{ac} > \beta_{dc}$ , kemudian saat  $I_c > 0,0001$  Amper nilai  $\beta_{ac} < \beta_{dc}$ , jadi pada saat arus kolektor ( $I_c$ ) 0,001 *current gain* ac ( $\beta_{ac}$ ) 145 dan *current gain* dc ( $\beta_{dc}$ ) sekitar 150. Untuk arus kolektor ( $I_c$ ) > 0,001  $\beta_{dc} > \beta_{ac}$ , seperti saat  $I_c$  0,001 Amper,  $\beta_{ac} = 60$  dan  $\beta_{dc} = 85$ , perbedaan nilai disebabkan oleh  $R_{bbac}$  lebih kecil  $< R_{bbdc}$ , relasi  $I_c$  terhadap  $\beta_{ac}$  dan  $\beta_{dc}$  bersifat logaritmik negatif serta disebabkan oleh *gradient kurva*  $I_c$  dan  $I_b$  yang tidak sama, di atas  $I_c$  0,01 Amper, *gradient* kurva  $I_c$  relatif lebih landai dibandingkan kurva  $I_b$ . Penurunan  $\beta_{ac}$  pada arus kolektor ( $I_c$ ) yang tinggi dapat pula disebabkan oleh pengaruh frekuensi tinggi, besarnya *current gain* ac adalah  $\beta_{ac} = \frac{\partial I_c}{\partial I_b}$ .

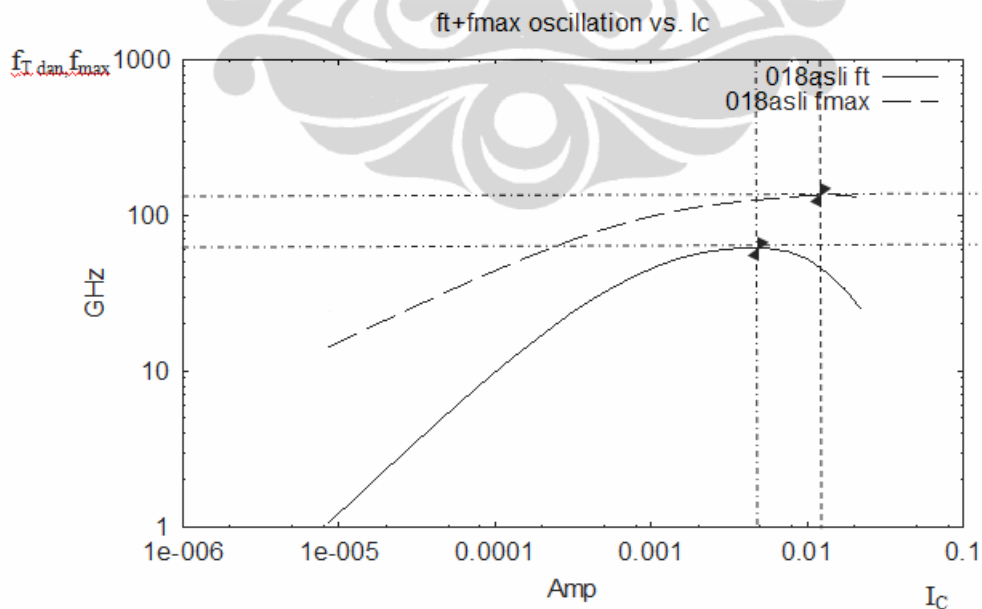


Gambar 4.8b. Grafik fungsi  $\beta$  terhadap  $I_c$ , model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,18 $\mu$ m.

### 4.3.3 Relasi frekuensi *threshol*d dan osilasi terhadap arus kolektor, $f_T = f(I_C)$ dan $f_{maks} = f(I_C)$

Gambar 4.8(c) menunjukkan bahwa grafik fungsi  $f_T = f(I_C)$  dan  $f_{maks} = f(I_C)$ ,  $f_{maks}$  dapat juga disebut sebagai frekuensi osilasi atau  $f_{osc}$ , untuk semua nilai  $I_C$  nilai  $f_T < f_{maks}$ . Hal tersebut terjadi adanya konstanta lain yang dipengaruhi  $C_B$  dan resistansi basis parasitis ( $R_B$  atau  $r_{bb}$ ). Hubungan  $f_T$  dan  $f_{maks}$  dinyatakan pada Persamaan 2.36. Nilai frekuensi *threshol*d tertinggi ( $f_T$ ) 61,9 Ghz dicapai pada saat  $I_C$  0,00034 mA, dan untuk frekuensi osilasi atau  $f_{maks}$  tertinggi dicapai pada 136 GHz pada arus kolektor  $I_C$  0,00034 Amper.

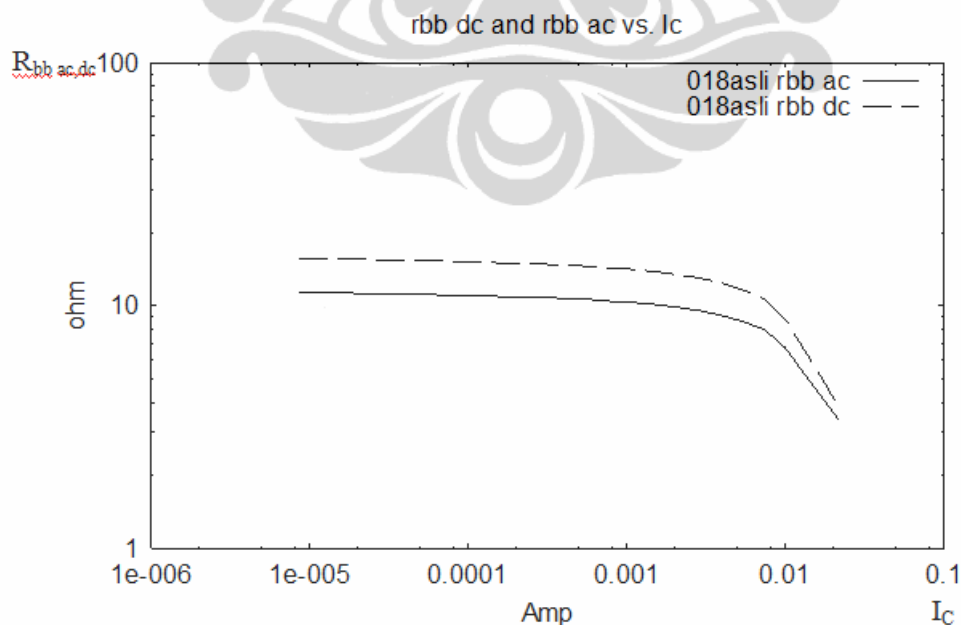
Daerah ekstrim dari kurva  $f_T$  dan  $f_{maks}$  terjadi diantara ( $I_C$ ) diantara 0,001 Amper. dan 0,01 Amper, kedua kurva cenderung naik dengan nilai arah *gradient*  $f_T < f_{maks}$ , saat arus kolektor ( $I_C$ ) 0,001 Amper nilai  $f_T$  47,8 GHz dan akan naik sesuai dengan kenaikan arus kolektor ( $I_C$ ). Ketika  $I_C$  0,0034 Amper,  $f_T$  mencapai nilai tertinggi, yaitu 61,9 Ghz kemudian turun sampai 57,7 GHz saat arus kolektor  $I_C$  0,01 Amper. Untuk frekuensi osilasi atau  $f_{maks}$  terjadi kenaikan dari 101 GHz menjadi 136 GHz ketika  $I_C$  dinaikkan dari 0,001 Amper menjadi 0,01 Amper, relasi  $I_C$  terhadap  $f_T$  dan  $f_{maks}$  bersifat logaritmik positif untuk daerah  $I_C$  tertentu. Pergeseran *peak value* pada dari  $f_T$  ke  $f_{maks}$  tergantung dari nilai resistansi basis ( $R_{bb}$ ) dan caasitansi basis-Kolentor ( $C_{BC}$ ).



Gambar 4.8c. Grafik fungsi  $f_T, f_{maks}$  terhadap  $I_C$  model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,18 $\mu$ m

#### 4.3.4 Relasi Resistansi Parasitis basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor, $R_{bb} = f(I_c)$

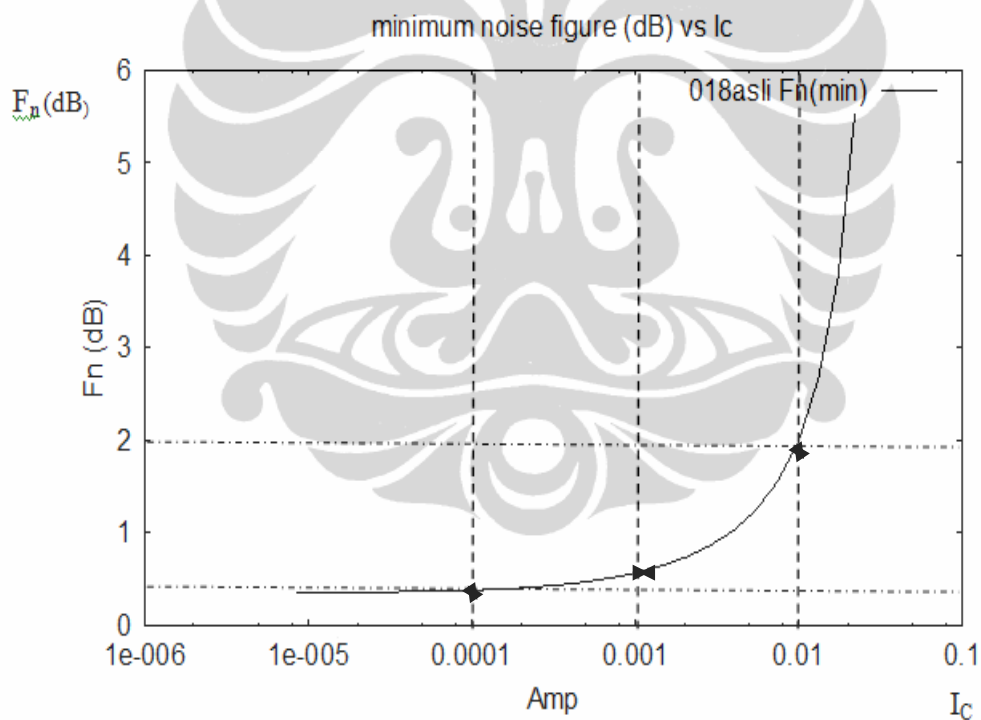
Gambar 4.8(d) menunjukkan grafik fungsi resistansi basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_c$ ),  $R_{bb} = f(I_c)$ .  $R_{bb,dc} = V_{be}/I_b$ ;  $I_c$ ,  $kons$  tan dan  $R_{bb,ac} = \partial V_{be}/\partial I_b$  nilai  $R_{bb,ac} < R_{bb,dc}$ , perbedaan  $R_{bb,dc}$  dan  $R_{bb,ac}$  yang ekstrim pada arus kolektor  $I_c$  lebih besar 0,001 Amper, jika merujuk ke gambar sebelumnya yaitu Gambar 4.8(a) titik ini berada pada tegangan antara basis kolektor ( $V_{BE}$ ) 0,85 volt. Pada saat  $V_{BE} > 0,85$  Volt, nilai  $R_{bb,ac}$  dan  $R_{bb,dc}$  cenderung turun secara tajam, sehingga pada saat arus kolektor ( $I_c$ ) bernilai 0,05 Amper,  $R_{bb,ac} = R_{bb,dc}$ . Saat  $I_c$  0,001 Amper nilai  $R_{bb,ac}$ , 10,1 ohm dan  $R_{bb,dc}$  14,1 ohm, ketika  $I_c$  dinaikkan menjadi 0,01 Amper,  $R_{bb,ac}$  dan  $R_{bb,dc}$  turun menjadi 3,35 ohm dan 3,37 ohm. Dengan demikian relasi  $I_c$  terhadap  $R_{bb,ac}$  dan  $R_{bb,dc}$  bersifat logaritmik negatif. Relasi  $R_{bb}$  terhadap frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) dan frekuensi osilasi ( $f_{maks}$ ) sebagai berikut  $R_{bb} = f_T / (8f_{maks}^2 \cdot C_{BC})$ ,  $R_{bb,dc}$  maupun  $ac$  akan turun sejalan dengan penurunan arus kolektor ( $I_c$ ) atau kenaikan frekuensi. Resistansi basis ( $R_{bb}$ ) merupakan salah satu variabel yang berpengaruh pada nilai *noise figure* ( $F_n$ ).



Gambar 4.8d. Grafik fungsi  $R_{bb(ac,dc)}$  terhadap  $I_c$  model HBT SiGe dengan  $A_e$   $0,18\mu m$ .

#### 4.3.5 Relasi *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor, $F_n = f(I_c)$

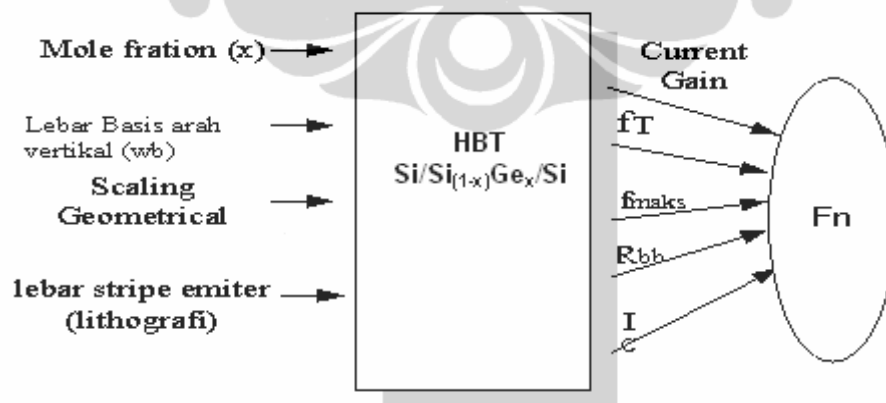
Gambar 4.8(e) adalah grafik *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor,  $F_n = f(I_c)$ , dari diagram tersebut ditunjukkan bahwa nilai *noise figure* ( $F_n$ ) saat arus kolektor ( $I_c$ ) di atas 0,01 Amper akan naik secara linier terhadap perubahan  $I_c$ , tetapi untuk  $I_c < 0,01$  Amper, nilai *noise figure* ( $F_n$ ) menurun secara eksponensial terhadap perubahan arus kolektor ( $I_c$ ). *Noise figure* minimum dicapai sekitar 0,4 dB ketika arus kolektor ( $I_c$ ) 0,001 Amper, dan akan turun secara eksponensial ketika arus kolektor ( $I_c$ ) diperkecil. Nilai *noise figure* ( $F_n$ ) mempunyai relasi hubungan positif *kwadratik* terhadap arus kolektor ( $I_c$ ). Kenaikan *noise figure* ( $F_n$ ) yang ekstrim terjadi di daerah  $I_c$  0,001 Amper sampai 0,01 Amper. Ketika  $I_c$  0,001 Amper  $F_n$  0,40 dB dan saat  $I_c$  dinaikkan menjadi 0,01 Amper,  $F_n$  menjadi 1,58 dB.



Gambar 4.8e. Grafik fungsi  $F_n$  terhadap  $I_c$  model HBT SiGe dengan  $A_e$  0,18 $\mu$ m

#### 4.4 HBT SiGe dengan Perubahan *stripe emitter* ( $A_e$ ) ; 0,18 $\mu\text{m}$ ,0,12 $\mu\text{m}$ dan 0,09 $\mu\text{m}$

Untuk mendapatkan model yang lebih bervariasi, model dikembangkan dengan cara menurunkan *stripe emitter* ( $A_e$ ) arah *lateral* dari 0,18  $\mu\text{m}$  menjadi 0,12  $\mu\text{m}$  dan 0,09  $\mu\text{m}$ , tetapi parameter-parameter lain dibuat tetap. Model ini sejalan dengan kemajuan teknologi *lithography* yang sekarang sedang dikembangkan untuk memperoleh data-data yang lebih bervariasi. Ada tiga perubahan model HBT SiGe yang digunakan sebagai acuan antara lain perubahan  $A_e$  dari 0,18 $\mu\text{m}$  menjadi 0,12  $\mu\text{m}$  dan 0,09 $\mu\text{m}$ . Hasilnya dibandingkan untuk mengetahui parameter nilai keluaran, yaitu *current gain* ( $\beta$ ),  $f_T$ ,  $f_{maks}$  dan  $F_n$ . Untuk memudahkan pengelolaan *file* simulator diberi nama; file **018Asli**, **012Asli** dan **009Asli**. Program simulasi *input* ini dapat dilihat pada lampiran A, sedangkan hasil simulasi merupakan program *output* ada pada lampiran B. Hasil eksekusi dari model HBT SiGe; file 018Asli, 012Asli dan 009Asli ditunjukkan pada Tabel 4.6. Pada Gambar 4.9 menunjukkan diagram pemetaan dari model HBT SiGe yang menjadi kajian pada riset ini.  $N_{[N]}$  menunjukkan model HBT SiGe yang dengan lebar *stripe emitter* yang berbeda ( $A_e$ ) yaitu dari 0,18 $\mu\text{m}$ , 0,12 $\mu\text{m}$  dan 0,09 $\mu\text{m}$ . *Mole fraction* ( $x$ ), lebar basis ( $w_b$ ), *scaling geometri* arah *lateral* adalah merupakan variabel masukan, sedangkan *current gain*,  $f_T$ ,  $f_{maks}$  dan  $F_n$  parameter keluaran dari hasil pemodelan.

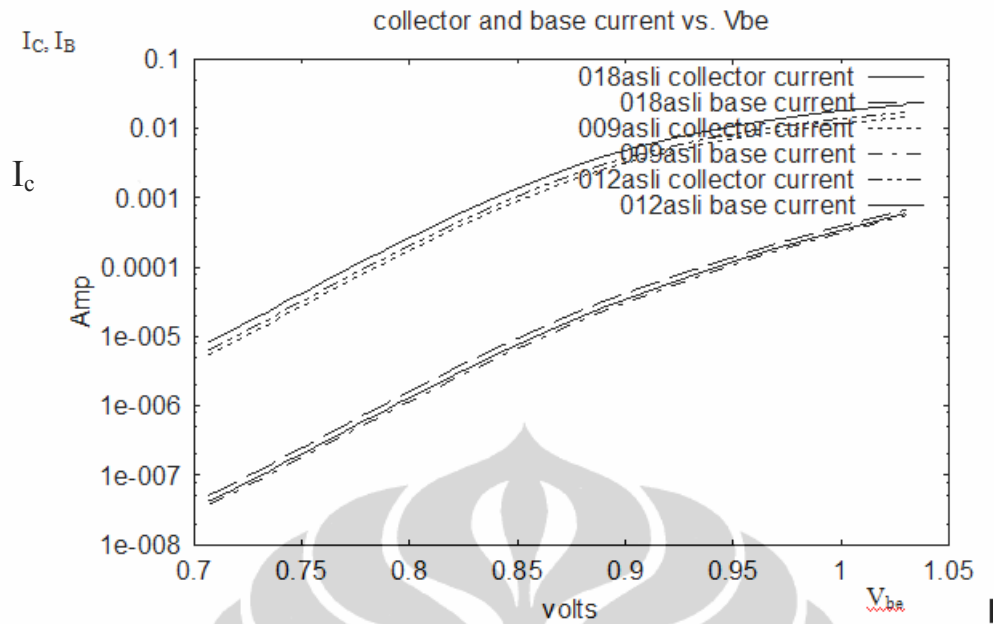


Gambar 4.9. Diagram pemetaan kajian riset HBT.



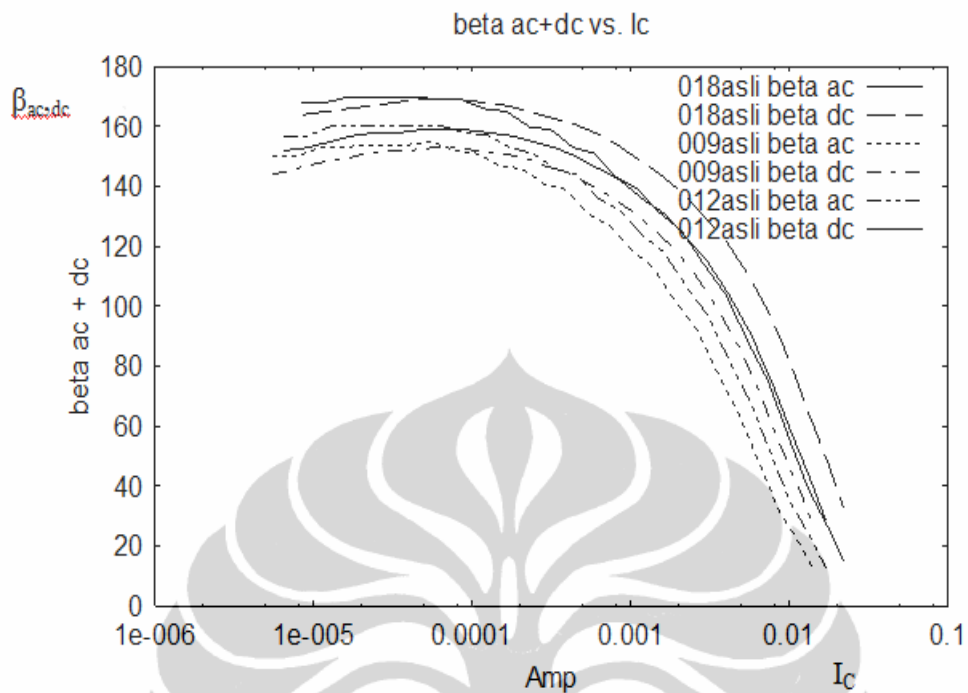
Tabel 4.6 Unjuk Kerja model HBT SiGe dengan  $A_e$  : 0,18  $\mu\text{m}$  ;0,12 $\mu\text{m}$  dan 0,09 $\mu\text{m}$ .

Deskripsi	Simbol	Satuan	File : 018Asli $A_e = 0,18 \mu\text{m}$			File :012Asli $A_e = 0,12 \mu\text{m}$			File : 009Asli $A_e = 0,09 \mu\text{m}$		
			<i>Low Current</i>	<i>max gain</i>	<i>max <math>f_T</math></i>	<i>Low Current</i>	<i>max gain</i>	<i>max <math>f_T</math></i>	<i>Low Current</i>	<i>max gain</i>	<i>max <math>f_T</math></i>
<i>Collector current</i>	$I_c$	A	6,11e-6	8,60e-5	3,97 e-3	4,68e-6	6,59e-5	3,04e-3	3,98e-6	5,61e-05	3,54e-03
<i>Treshod frequency</i>	$f_T$	Hz	7,65e+8	8,66e+8	6,19e+10	7,08e+08	8,15e+09	6,22e+10	6,71e+08	7,82e+09	6,26e+10
<i>Oscillation frequency</i>	$f_{\text{max}}$	GHz	1,21e+10	4,14e+10	1,36 e+11	1,35e+10	4,66e+10	1,41e+11	1,45e+10	5,02e+10	1,58e+11
<i>Current Gain</i>	$\beta$		1,62e+2	1,69e+2	1,22e+2	1,50e+2	1,59e+2	1,15e+2	1,42e+02	1,53e+02	9,90e+01
<i>Breakdown voltage</i>	$\beta V_{\text{CEO}}$	V	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
<i>Sheet rersistansce (rb)</i>	$r_b$	ohm	1,14e+1	1,10e+1	9,12e+00	8,46e+00	8,20e+00	6,59e+00	6,98e+00	6,79e+00	5,59e+00
<i>Noise figure</i>	$F_n$	dB	1,6 dB saat $I_c=0,01\text{A}$ , $f_T = 52,7$ Ghz.			2,2 dB saat $I_c=0,01\text{A}$ , $f_T = 45,1$ Ghz			2,5 dB saat $I_c=0,01\text{A}$ , $f_T = 37,4$ Ghz		
<i>Figure of Merit</i>	$\beta V_{\text{CEO}} * f_T$	GHz	1,69+02			1,72e+02			1,74e+02		
<i>lateral. emitter width</i>	$A_e$	$\mu\text{m}$	0,18			0,12			0,09		



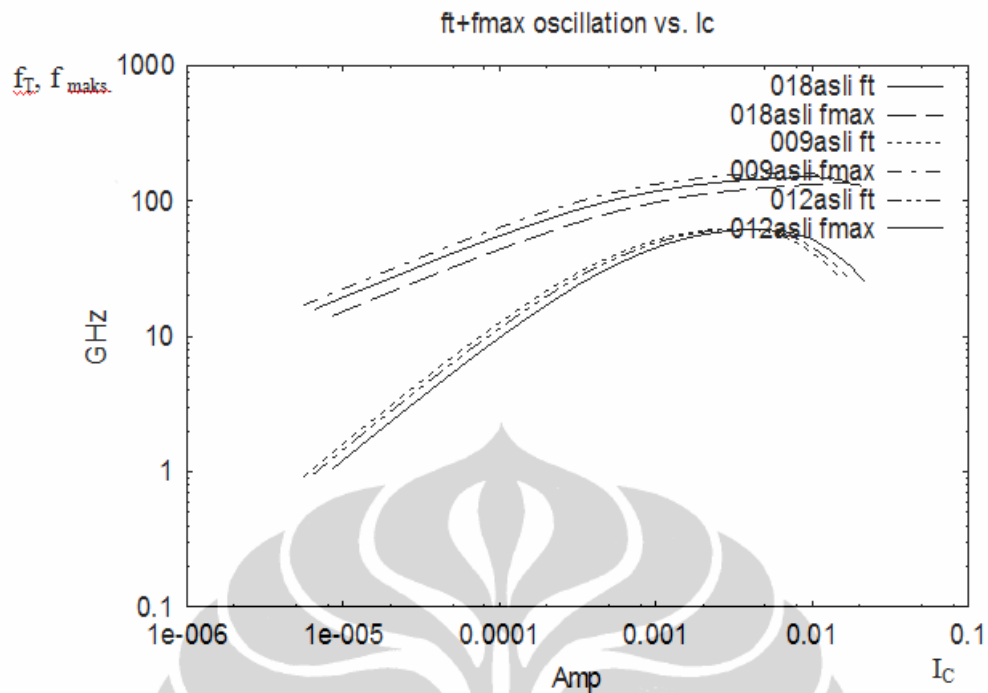
Gambar 4.10 Fungsi arus basis ( $I_B$ ) dan kolektor ( $I_c$ ) terhadap  $V_{be}$  ;  
 $I_B \sim I_c = f(V_{be})$ , simulator 009asli, 012asli dan 018asli.

Grafik fungsi arus kolektor ( $I_c$ ) terhadap  $V_{be}$ ,  $I_c = f(v_{be})$  ditunjukkan pada Gambar 4.10. Nilai  $V_{be}$  berkisar di antara nilai minimum 0,707 Volt, dan maksimum 1,03 volt, menghasilkan  $I_c$  minimum 0,00000058 Amper dan maksimum 0,02 Amper untuk lebar *stripe emitter*  $A_e = 0,18 \mu\text{m}$ . Semakin kecil  $A_e$ , maka kemampuan  $I_c$  dan  $I_b$  semakin kecil pula. Dengan demikian bahwa *stripe emitter* ( $A_e$ ) akan sebanding dengan besarnya arus kolektor ( $I_c$ ) dan arus basis ( $I_b$ ). Akan tetapi perubahan tegangan basis emiter ( $V_{be}$ ) semua model memiliki pola yang sama, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.9a,  $I_c = f(v_{be})$  dan  $I_b = f(V_{be})$ , untuk  $A_e$  0,18 $\mu\text{m}$ ; 0,12 $\mu\text{m}$  dan 0,09 $\mu\text{m}$ . Daerah linier arus kolektor ( $I_c$ ) terhadap tegangan base emiter ( $V_{be}$ ), ketika  $I_c < 0,001$  atau  $V_{be} < 0,83$  volt, dan pada saat  $I_c > 0,01$  atau  $V_{be} < 0,93$  volt. Untuk  $V_{be}$  lebih besar dari satu volt, arus kolektor  $I_c$  cenderung jenuh, sebaliknya arus basis  $I_b$  masih dalam kondisi naik.



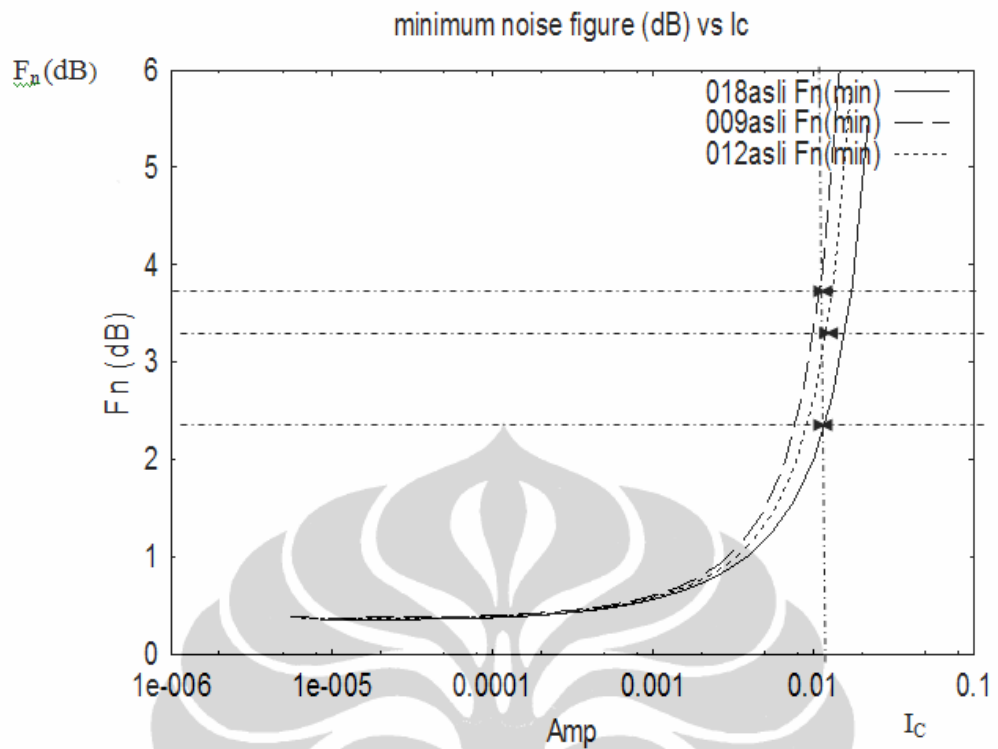
Gambar 4.11 Fungsi *current gain* ( $\beta$ ) terhadap arus kolektor ( $I_c$ );  $\beta=f(I_c)$  simulator 009asli,012asli dan 018asli

Grafik fungsi *current gain* ( $\beta$ ) terhadap arus kolektor  $I_c$ ,  $\beta=f(I_c)$  ditunjukkan pada Gambar 4.11. Nilai  $I_c$  berkisar di antara nilai 0,00000398 Amper dan maksimum 0,02 Amper. Ketika  $I_c$  0,00008 Amper *current gain dc* ( $\beta_{dc}$ ) dan ac ( $\beta_{ac}$ ) untuk setiap ukuran  $A_e$  akan sama, file dengan  $A_e=0,18\mu\text{m}$  tertinggi dengan nilai sekitar 170,  $A_e$  0,12  $\mu\text{m}$  sekitar 160 dan untuk  $A_e=0,09\mu\text{m}$  sekitar 150.  $\beta_{ac}$  mempunyai nilai lebih kecil dari  $\beta_{dc}$  untuk setiap ukuran  $A_e$ , pada saat ketika arus kolektor  $I_c$  lebih besar 0,00008Amper. Sejalan dengan bertambahnya  $I_c$  maka  $\beta_{dc}$  dan  $\beta_{ac}$  akan turun. Hal ini sejalan dengan kenaikan  $V_{be}$ , dari diagram Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa *current gain dc* dan ac berbanding langsung terhadap nilai  $A_e$ ,  $\beta_{(dc,ac)} = k_o A_e$ ,  $k_o$  adalah konstanta.



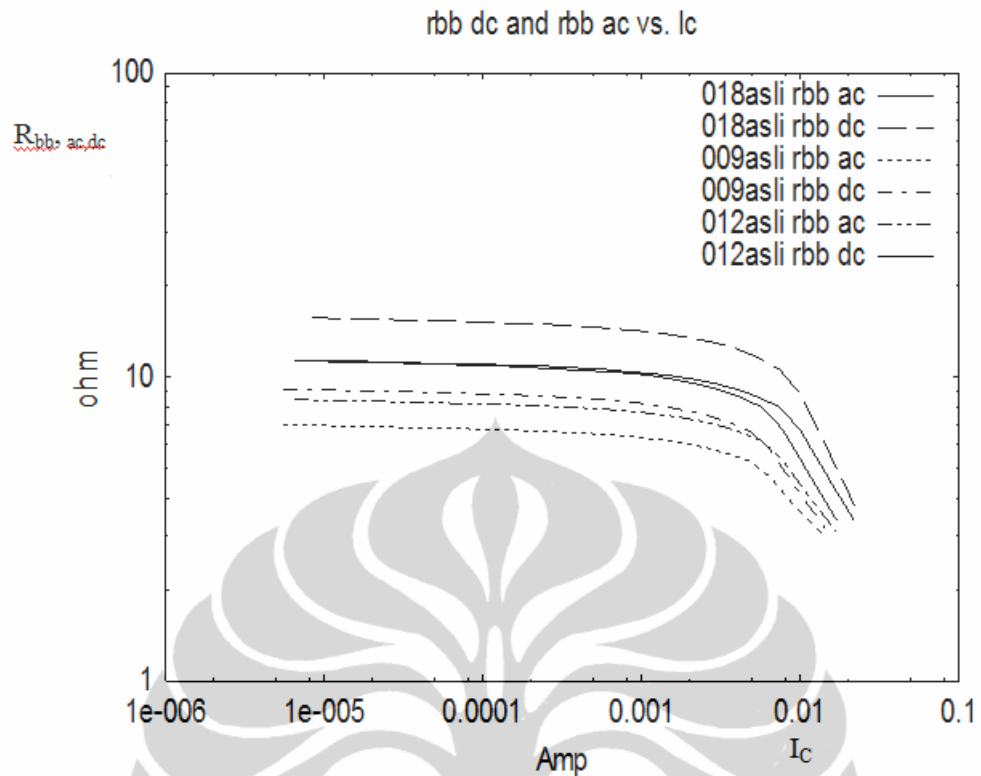
Gambar 4.12 Fungsi  $f_T$  dan  $f_{maks}$  terhadap arus kolektor ( $I_c$ ) ;  
 $f_T \sim f_{maks} = f(I_c)$ , simulator 009asli, 012asli dan 018asli

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa kurva frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) dan frekuensi osilasi maksimum ( $f_{maks}$ ) sebagai fungsi dari arus kolektor  $I_c$ , dari Gambar 4.11 diketahui nilai  $f_{maks}$  lebih besar dibanding  $f_T$ , ini sesuai dengan persamaan ,  $f_{maks} = \left( \frac{f_T}{8\pi R_{bb} C_{bc}} \right)^{1/2}$  , atau  $f_T = k_0 f_{maks}$  ,  $k_0 < 1$ , bergantung pada perubahan  $R_{bb}$  dan  $C_{bc}$ , hubungan  $A_e$  terhadap  $f_T$  dan  $f_{maks}$  berbanding terbalik untuk  $I_c$  tertentu jadi ;  $f_T \approx k_0 \frac{1}{A_e}$  , untuk nilai  $I_c < 0,08$  Amper, dan sebaliknya akan terjadi  $f_T \approx k_0 A_e$  untuk  $I_c > 0,08$  Amper. Titik puncak  $f_T$  untuk semua nilai  $A_e$  berada pada IC yang sama yaitu 0,01 ampere, sedangkan titik puncak  $f_{maks}$  berada pada IC yang berbeda, dengan demikian dapat dinyatakan bahwa perubahan  $A_e$  berpengaruh pada nilai  $f_{maks}$ .



Gambar 4.13 Noise figure ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor ( $I_c$ );  $F_n = f(I_c)$  simulator 009asli, 012asli dan 018asli.

Grafik fungsi *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor ( $I_c$ )  $F_n = f(I_c)$  ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa nilai  $F_n$  dengan  $I_c$  di atas 0,01Amper akan naik secara linier terhadap perubahan  $I_c$ . Nilai  $F_n$  tergantung dari nilai  $A_e$ , semakin kecil  $A_e$  maka  $F_n$  semakin besar,  $A_e = 0,18\mu\text{m}$   $F_n = 2,1$  dB,  $A_e = 0,12\mu\text{m}$   $F_n = 3,1$  dB dan  $A_e = 0,09\mu\text{m}$   $F_n = 3,6$ dB dengan demikian dapat dituliskan bahwa  $F_n \approx f(A_e)$ . Untuk nilai  $I_c$  di bawah 0,001Amper,  $F_n$  turun secara linier pula pada bagian ini *noise figure minimum* ( $F_n$ ) tidak terpengaruh oleh  $A_e$ , ketika arus kolektor ( $I_c$ ) Lebih kecil sama dengan 0,001 Amper, tetapi ketika  $I_c > 0,001$  Amper nilai  $F_n$  berbanding terbalik dengan nilai  $A_e$ ,  $F_n = k_0 / A_e$ , hal ini disebabkan oleh terjadinya penurunan resistansi basis.



Gambar 4.14 Resistansi basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_c$ );  $R_{bb} = f(I_c)$  simulator 009asli, 012asli dan 018asli.

Fungsi Resistansi basis ( $R_{bb}$ ) ac dan dc terhadap Arus Kolektor  $I_c$ .

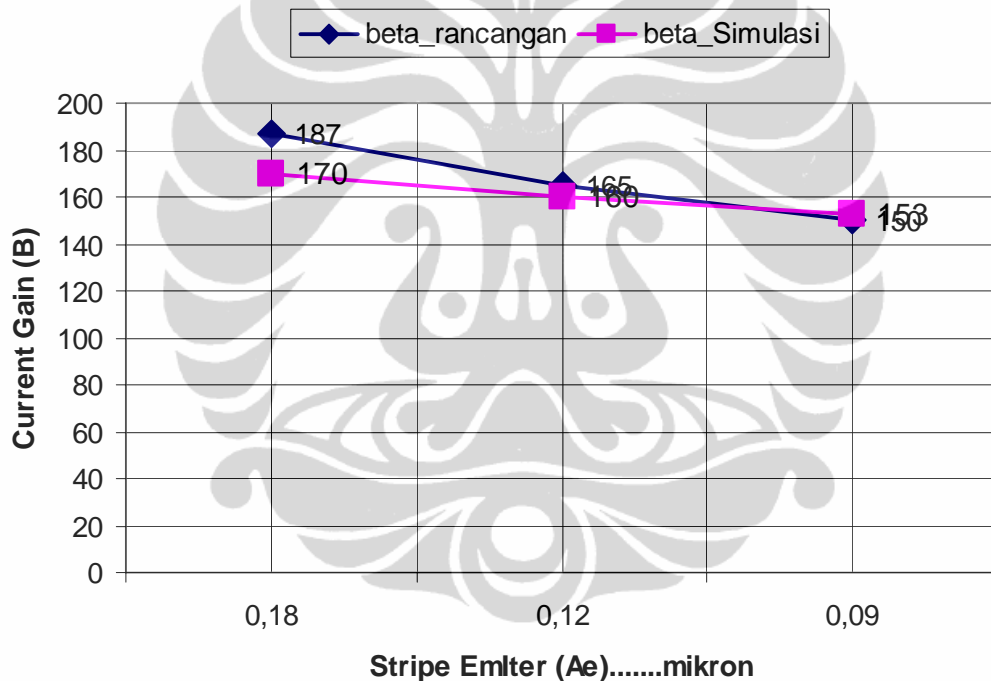
$R_{bb,ac,dc} = f(I_c)$  ditunjukkan oleh Gambar 4.14, nilai  $R_{bb,dc}$  lebih besar  $R_{bb,ac}$  untuk sepanjang arus  $I_c$ .  $R_{bb,dc}$  dan  $ac$  yang paling rendah dimiliki oleh simulator dengan  $A_e = 0,009 \mu m$ , sedangkan untuk  $R_{bb}$  tertinggi oleh  $A_e 0,18 \mu m$ , perubahan ini berpengaruh pada nilai *noise figure* ( $F_n$ ) pada seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13, dengan demikian relasi  $R_{bb}$  dengan  $A_e$  dapat dinyatakan;

$$R_{bb,dc,ac} \approx K_0 \frac{1}{A_e} .$$

#### 4.4.1 Pengaruh *stripe emitter* ( $A_e$ ) terhadap *current gain* ( $\beta$ ), Perbandingan rancangan dan hasil simulasi

Perubahan *stripe emitter* ( $A_e$ ) akan berbanding langsung terhadap nilai maksimal *current gain* ( $\beta$ ), seperti dijelaskan pada bagian di atas Gambar 4.10. menunjukkan bahwa ketika  $A_e 0,18 \mu m$ , nilai *current gain* ( $\beta$ ) 170,  $A_e$  diturunkan menjadi  $0,12 \mu m$ , *current gain* ( $\beta$ ) turun menjadi 160 dan 150 saat  $A_e = 0,09 \mu m$ . Menurut Persamaan 2.32a perubahan *current gain* ( $\beta$ ) yang dominan terjadi jika

*fraction mole* ( $x$ ) dinaikkan menyebabkan bertambahnya bilangan konstanta ( $\Delta E_g / kT$ ). *Stripe emitter* ( $A_e$ ) berpengaruh pada nilai arus kolektor  $I_c$ , semakin besar  $A_e$  maka kemampuan arus melalui terminal emiter semakin besar. Akibatnya *current gain* ( $\beta$ ) pun bertambah pula, seperti ditampilkan pada Gambar 4.10 di atas. Jika hasil rancangan dibandingkan dengan hasil simulasi nilai *current gain* ( $\beta$ ) untuk semua nilai  $A_e$  tidak berbeda jauh besarnya seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15 Persamaan regresi linier untuk *current gain* rancangan ( $\beta_{\text{dsgn}}$ ) adalah  $\beta_{\text{dsgn}} = 0,002454.A_e + 2,718$  sedangkan *current gain* hasil simulasi ( $\beta_{\text{sim}}$ ), adalah  $\beta_{\text{sim}} = 0,005342.A_e + 0,459$ .



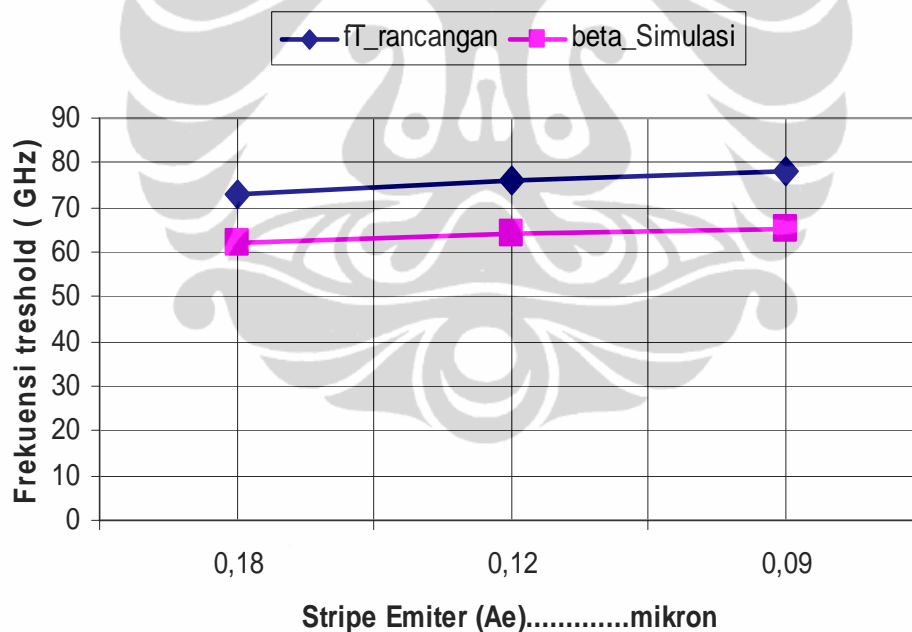
Gambar 4.15 Perbandingan *current gain* ( $\beta$ ) terhadap *stripe emitter* ( $A_e$ ) rancangan dan hasil simulasi.

#### 4.4.2 Pengaruh *stripe emitter* ( $A_e$ ) terhadap frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) dan frekuensi maksimum ( $f_{\text{maks}}$ ), perbandingan rancangan dan hasil simulasi

Jika mengacu pada Persamaan 2.38 frekuensi *threshold* ( $f_T$ ), dipengaruhi oleh lebar basis pada arah vertikal dengan relasi berbanding terbalik, jika lebar

basis arah vertikal mengecil, nilai frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) meningkat. Meskipun tidak terlalu signifikan lebar  $A_e$  juga berpengaruh pada nilai frekuensi *threshol* ( $f_T$ ), dan frekuensi osilasi ( $f_{osc}$ ) dengan  $A_e$   $0,18\mu\text{m}$  mempunyai nilai  $f_T$  48 Ghz dan  $f_{osc}=101\text{Ghz}$ . Jika  $A_e$  diturunkan  $0,12\mu\text{m}$   $f_T$  dan  $f_{osc}$  52,4Ghz dan 123 Ghz. Jika  $A_e$  diturunkan lagi sampai  $0,09\mu\text{m}$  maka  $f_T$  dan  $f_{osc}$  56 Ghz dan 134 GHz, saat  $I_c$  0,001 Amper.

Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa lebar *stripe emitter* ( $A_e$ ) berbanding terbalik dengan nilai  $f_T$  dan  $f_{osc}$ . Gambar 4.16 menunjukkan bahwa hubungan frekuensi HBT SiGe  $f_T$  dan  $f_{osc}$  terhadap lebar *stripe emitter* ( $A_e$ ),  $f(A_e) = k.f(\frac{1}{f_T.f_{osc}})$  saat  $I_c$ , konstan. Gambar 4.15 menunjukkan Perbandingan frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) terhadap *stripe emitter* ( $A_e$ ) rancangan dan hasil Simulasi, persamaan regresi  $f_T$  rancangan ( $f_{T\text{dsgn}}$ ) adalah , sedangkan  $f_T$  simulasi ( $f_{T\text{sim}}$ ), adalah  $f_{T\text{sim}} = -0,03.A_e + 1,62$ .



Gambar 4.16 Perbandingan frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) terhadap *stripe emitter* ( $A_e$ ) rancangan dan hasil simulasi.

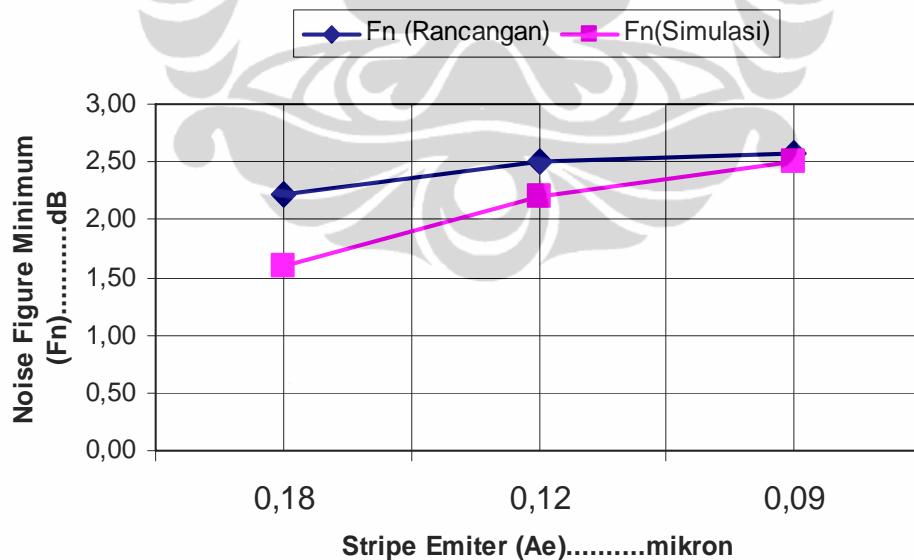
#### 4.4.3 Pengaruh *stripe emitter* ( $A_e$ ) terhadap *noise figure minimum* ( $F_n$ ) perbandingan rancangan dan hasil simulasi

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa kurva *noise figure minimum* ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor ( $I_c$ ) dengan lebar *stripe emitter* ( $A_e$ )  $0,12\mu\text{m}$ ,  $0,12\mu\text{m}$  dan



0,09 $\mu\text{m}$ . Dari gambar tersebut dapat diketahui daerah  $I_c$  0,001 Amper, nilai *noise figure minimum* ( $F_n$ ) untuk semua variabel  $A_e$ , 0,5dB. Ketika  $I_c$  100 mA' nilai *noise figure minimum* ( $F_n$ ) untuk  $A_e=0,12\mu\text{m}$ ;1,5 dB,  $A_e= 0,12\mu\text{m}$ ; 2dB dan  $A_e=0,09 \mu\text{m}$   $F_n= 2,8$  dB. Dari hubungan tersebut dapat dinyatakan bahwa relasi *stripe emitter* ( $A_e$ ) dengan  $F_n$  berbanding terbalik. Dengan demikian dapat dituliskan bahwa ;  $f(A_e) = k.f(\frac{1}{F_n})$  saat  $I_c$ , konstan

*Noise figure minimum* ( $F_n$ ) untuk semua nilai  $A_e=0,5$  dB, saat  $I_c = 0,01$  Amper nilai  $F_n$  untuk  $A_e=0,18\mu\text{m}$  adalah 1,5dB,  $A_e= 0,12\mu\text{m}$  adalah 2dB dan  $A_e=0,09 \mu\text{m}$  adalah 2,8 dB. Dari hubungan tersebut dapat dinyatakan bahwa relasi *stripe emitter* ( $A_e$ ) dengan *noise figure minimum* ( $F_n$ ) berbanding terbalik, yaitu ;  $f(A_e) = k.f(\frac{1}{F_n})$  saat  $I_c$ , konstan. Gambar 4.17 menunjukkan perbandingan *noise figure minimum* ( $F_n$ ) terhadap *stripe emitter* ( $A_e$ ) rancangan dan hasil simulasi. Persamaan regresi rancangan ;  $F_{n,dsgn} = -0,03.A_e + 0,56$  sedangkan *noise figure* simulasi  $F_{n,sim} = -0,05.A_e + 0,6$ .



Gambar 4.17 Perbandingan *noise figure minimum* ( $F_n$ ) terhadap *stripe emitter* ( $A_e$ ) rancangan dan hasil simulasi.

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa unjuk kerja HBT pemodelan dengan menurunkan lebar *stripe emitter*, kecuali unjuk kerja *current gain* dan tahanan

kolektor yang menurun parameter  $BV_{CEO}$ ,  $BV_{CEO} \cdot f_T$ ,  $f_T$  dan  $f_{osc}$  naik sehingga ketiga hubungan tersebut dapat ditentukan bahwa *stripe emitter* ( $A_e$ ), merupakan gabungan fungsi  $f(R_B/R_C)$ ,  $f(1/f_{osc} \cdot f_T)$  dan  $f(\beta/F_n)$ . Relasi tersebut dituliskan

$$A_e \equiv K * \frac{R_B \beta}{R_C f_T f_{osc} F_n}, \text{ saat } I_c \text{ konstan.}$$

Tabel 4.7. Unjuk Kerja HBT:  $A_e$  0,18 $\mu$ m , 0,12 $\mu$ m , 0,09 $\mu$ m

Unjuk kerja	HBT_	HBT_	HBT_
	$A_e = 0,18\mu\text{m}$	$A_e = 0,12\mu\text{m}$	$A_e = 0,09\mu\text{m}$
$\beta$ maksimum .	170	160	153
$BV_{CEO}$ (V)	2,75	2,77	2,8
$BV_{CEO} \cdot f_T$	467,5	443,2	428,4
$R_{bb}$ (ohm)	11	8,2	6,7
$R_C$ (ohm)	58	55	52
$f_T$ (Ghz)	61,9	62,2	62,6
$f_{osc}$ (Ghz)	101	123	134
$F_n$ (dB)	0,4	0,4	0,4

## BAB 5

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Bab 5 ini akan dibahas simulasi rancangan HBT SiGe dengan mengubah bagian *lateral* dan vertikal dari devais HBT SiGe. Pembahasan tersebut antara lain;

- a) Pengaturan *stripe emitter* ( $A_e$ ) dari  $0,18\mu\text{m}$ , menjadi  $0,12\mu\text{m}$  dan  $0,09\mu\text{m}$  dengan adanya kenaikan pada frekuensi oscilasi maksimum ( $f_{\text{maks}}$ ). Selanjutnya *fraction mole* ( $x$ ) dinaikkan dari  $0,05$  menjadi  $0,1$  agar terjadi kenaikan pada *current gain* ( $\beta$ ).
- b) Pengaturan geometri arah lateral, dengan cara penurunan ukuran geometris arah lateral yaitu ukuran W/L yang indentik dengan  $3\mu\text{m}/15\mu\text{m}$  sebagai ukuran skala 1, diturunkan menjadi  $80\%$ ,  $60\%$  dan  $40\%$  dari ukuran semula atau skala  $0,8$ ;  $0,6$  dan  $0,4$ . Penurunan ini berdasarkan acuan *critical thickness* dari Mathhew dan Blakesle, dengan  $A_e$ .  $0,18\mu\text{m}$ ,  $0,12\mu\text{m}$  dan  $0,09\mu\text{m}$ .
- c) Pengaturan *mole fraction* ( $x$ ) dimulai dengan nilai;  $3\%$ ,  $5\%$ ,  $8\%$  dan  $10\%$  pada  $A_e$   $0,18\mu\text{m}$ ,  $0,12\mu\text{m}$  dan  $0,09\mu\text{m}$ . Dengan pengaturan ini *current gain* ( $\beta$ ) akan naik.
- d) Gabungan a) , b) dan c) pada  $A_e=0,09\mu\text{m}$  yaitu dengan cara mengatur lebar basis ( $w_b$ ) arah vertikal dengan memperkecil menjadi  $50\%$  dan  $75\%$  dari ukuran semula  $200\text{ nm}$ , dengan menurunkan  $w_b$ , frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) akan naik. Untuk menaikkan *current gain* ( $\beta$ ) dilakukan dengan pengaturan *fraction mole* ( $x$ ) dan mengatur skala Geometri devais.

Jumlah *file* simulator yang dirancang untuk pembahasan tersebut sejumlah 40 *file* simulator, kemudian untuk memudahkan pengelolaan simulasi tersebut, *file* simulasi yang dikaji ditampilkan pada Tabel 5.1 berikut;

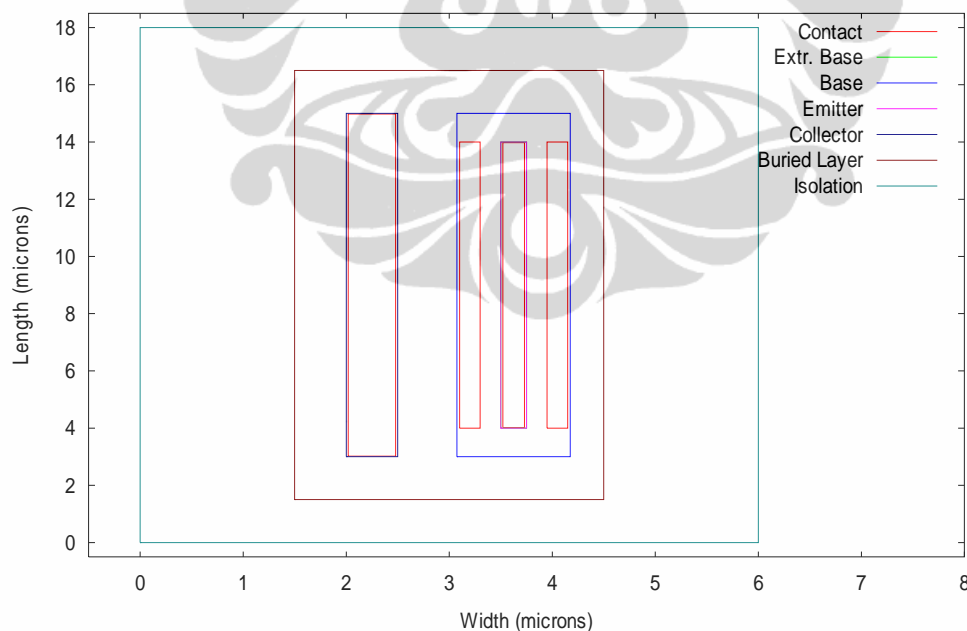
Tabel 5.1 *File-file* Simulasi Model HBT SiGe.

No.	Kelompok <i>File</i>	Nama <i>File</i>	Keterangan
1.	Pengaturan emiter ( $A_e$ ).	<i>Stripe</i> 009asli_ge05.bip 009asli_ge10.bip 012asli_ge05.bip 012asli_ge10.bip 018asli_ge05.bip 018asli_ge10.bip	Model HBT SiGe dengan <i>stripe</i> emiter ( $A_e$ ) atau <i>lithographi</i> 0,09 $\mu\text{m}$ ; 0,12 $\mu\text{m}$ ; 0,18 $\mu\text{m}$ , dengan <i>mole fraction</i> 0,05 dan 0,1.
2.	Pengaturan arah lateral.	<i>Geometri</i> 009asli.bip 009baru6.bip 009baru7.bip 009baru8.bip 012asli.bip 012baru6.bip 012baru7.bip 012baru8.bip 018asli.bip 018baru6.bip 018baru7.bip 018baru8.bip	Model HBT SiGe dengan <i>lithographi</i> 0,09 $\mu\text{m}$ ; 0,12 $\mu\text{m}$ ; 0,18 $\mu\text{m}$ , <i>Geometri</i> arah Lateral diturunkan ukurannya dengan penskalaan : 0,8; 0,6; dan 0,4.
3.	Pengaturan <i>Fraction</i>	<i>Mole</i> 009asli_ge03.bip 009asli_ge05.bip 009asli_ge08.bip 009asli_ge10.bip 012asli_ge03.bip 012asli_ge05.bip 012asli_ge08.bip 012asli_ge10.bip 018asli_ge03.bip 018asli_ge05.bip 018asli_ge08.bip 018asli_ge10.bip	Model HBT SiGe dengan <i>lithographi</i> 0,09 $\mu\text{m}$ ; 0,12 $\mu\text{m}$ ; 0,18 $\mu\text{m}$ , dengan <i>mole fraction</i> diatur dari 0,03 ; 0,08; 0,05 dan 0,1.
4.	Pengaturan Vertikal Pengaturan Ketebalan basis ( $w_b$ ).	<i>Arah dengan Ketebalan</i> 009br6_wb050.bip 009br6_wb075.bip 009br6ge10_wb050.bip 009br6ge10_wb075.bip 009br8_wb050.bip 009br8ge10_wb050.bip 009br8ge10_wb075.bip	Model HBT SiGe dengan <i>lithographi</i> 0,09 $\mu\text{m}$ ; <i>mole fraction</i> diatur 0,05 dan 0,1 serta $w_b$ menjadi 50% dan 75% dengan geometri lateral diatur dengan skala 0,8 dan 0,6.

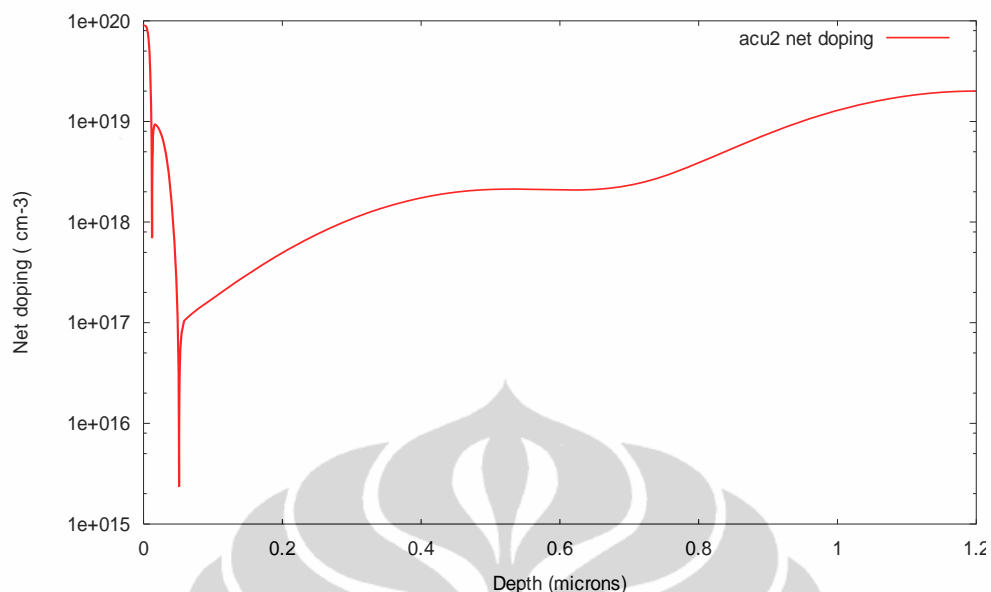
Dari *file-file* simulasi tersebut beberapa karakteristik yang diamati adalah ;  
a) terminal karakteristik *output* antara lain ,  $f_{T+\text{osc maks}} = F(I_C)$ ,  $I_{(b+c)} = F(V_{be})$ ,  $\beta_{(dc+ac)} = F(I_C)$ , b) internal karakteristik  $R_{bb} = F(I_C)$  dan c) karakteristik *noise figure* antara lain,  $F_n = F(I_C)$  dan  $F_n = F(f_T)$ . Pada Bab 4, telah dibuat model HBT SiGe dengan *stripe* emiter ( $A_e$ ) 0,18 ; 0,12 dan 0,09  $\mu\text{m}$ , dari model ini dikaji beberapa perlakuan antara lain pengaturan dimensi geometri lateral, pengaturan geometri lateral dan ketebalan basis ( $w_b$ ), dan pengaturan geometri lateral dan *fraction mole*( $x$ ).

Pengaturan  $A_e$  pada arah lateral dilakukan berdasarkan kemajuan teknologi *lithographi* yang digunakan baik pada skala komersial maupun pada skala riset, yaitu,  $0,18\mu\text{m}$ ;  $0,12\mu\text{m}$  dan  $0,09\mu\text{m}$ , dalam upaya meningkatkan kinerja divais HBT SiGe, pada parameter  $f_T$ ,  $f_{max}$ , dan *current gain* ( $\beta$ ) serta *noise figure minimum* ( $F_n$ ). Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya model HBT sebagai acuan adalah HBT SiGe generasi kedua dari IBM dengan teknologi  $0,25\ \mu\text{m}$  BICMOS dari IBM yang bekerja pada  $f_T$  45 Ghz dengan referensi 99 BTM, model yang dimodifikasi sesuai dengan simulator bipole3. [9]

Ukuran divais pada arah lateral diperlihatkan pada Gambar 5.1(a) dan ukuran beserta profil doping dan profil Ge divais arah vertikal diperlihatkan pada Gambar 5.1(b). Panjang lengan emiter pada arah lateral  $10\mu\text{m}$ , dengan parameter daerah aktif pada arah vertikal jarak dari permukaan sampai dengan sambungan emiter-basis (e-b) adalah  $12\text{nm}$  dan jarak dari permukaan sampai dengan sambungan basis-kolektor (b-c) adalah  $50\text{nm}$ . Kolektor mempunyai struktur *selective implanted collector* (SIC) dengan lebar sekitar  $650\ \text{nm}$ .



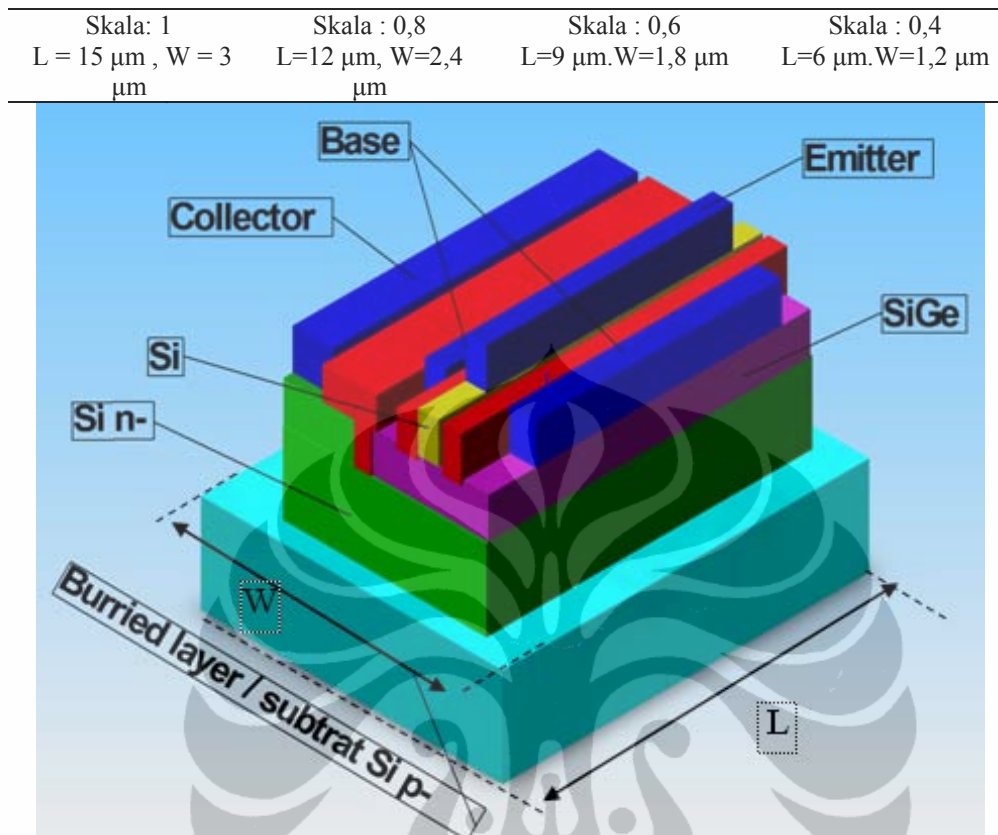
Gambar 5.1a Geometri lateral model HBT SiGe.



Gambar 5.1b. Profil *doping* model HBT SiGe.

### 5.1 Pengaturan dimensi Geometri Lateral dan Ketebalan basis

Pengaturan dimensi lateral dilakukan dengan cara memperkecil ukuran divais yaitu lebar dan panjang divais secara keseluruhan sehingga luas divais berubah, tetapi rasio geometri divais *basis*, kolektor dan emitor tidak berubah, begitu juga untuk rasio E-C-B pada sisi vertikal juga tidak berubah penskalaan dimensi lateral dilakukan berdasarkan pada rasio *wide* ( $w$ ) dan *length* ( $l$ ) dari devais yang dibatasi oleh daerah *burried layer*. Model HBT SiGe memiliki ukuran *wide* ( $w$ )  $3\ \mu\text{m}$  dan *length* ( $l$ )  $15\ \mu\text{m}$ , dengan demikian ukuran yang dibatasi *burried layer* adalah  $3\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  yang dianalogikan sebagai skala 1. Penskalaan arah lateral dilakukan dengan cara menurunkan rasio  $w/l$  dari 1 mejadi 0,8: 0,6: 0,4. Gambar 5.2 menunjukkan pola penskalaan dimensi lateral. pemilihan skala adalah 1; 0,8; 0,6 dan 0,4 berdasarkan pada kemampuan lithographi yang digunakan pada pemodelan ini.. Dengan penskalaan ini akan mengubah parameter geometris, beberapa *file input* simulasi dan *output* dari bahasan ini dapat dilihat pada lampiran . Gambar 5.2 menunjukkan dari bentuk geometri dari model HBT SiGe.



Gambar 5.2 Penskalaan geometris dimensi lateral.

Penskalaan Vertikal atau ketebalam dalam model ini tidak dilakukan, pada pemodelan ini ketebalan dipertahankan 1,2  $\mu\text{m}$  yang diatur adalah ketebalan basis diturunkan menjadi 0,75 dan 0,5 dari ketebalan sumula 500nm menjadi 375 nm dan 250 nm.

Untuk selanjutnya pada bagaian vertikal ini diatur profil Germanium pada basis dibuat trapesium dengan fraksi Ge 5%. Pemilihan ini berdasarkan hasil kajian penelitian sebelumnya bahwa bentuk profil Ge berbentuk trapesium mempunyai nilai  $f_T$  dan  $f_{maks}$  yang tinggi dengan kemudahan dalam pabriaksi. [46]. Kemudian diatur juga nilai *fraction mole* (x) Ge pada Silikon basis dari 5% dinaikkan menjadi 10% , kemudian diturunkan menjadi 8%, 6% dan 3%. Parameter pada daerah nonaktif seperti *burried layer*, isolasi p+, *collector sinker*, *ektrinsic basis resistance* sebagai parameter *default* simulator. Untuk menganalisis rancangan Geometris HBT SiGe dengan pengaturan dimensi lateral

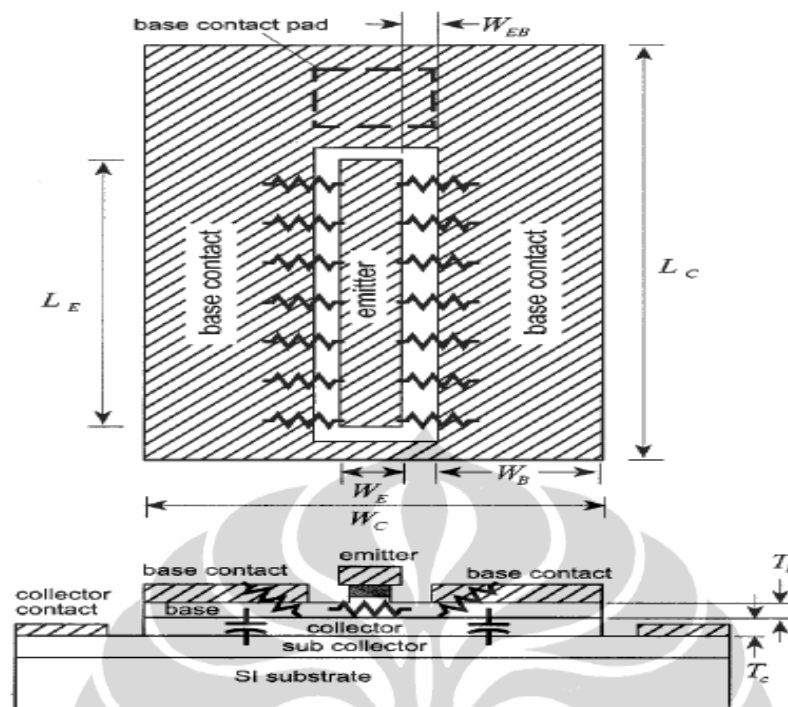
dan vertikal dalam meningkatkan  $f_T$  dan  $f_{maks}$  serta menurunkan *noise figure* ( $F_n$ ), digunakan *file* simulasi hasil seleksi dari Tabel 5.1 di atas berdasarkan pada nilai output karakteristik  $f_T$ ,  $f_{maks}$ , dan *current gain* ( $\beta$ ) yang tinggi dengan nilai  $R_{bb}$  yang rendah.

Untuk mendapatkan *file* simulator yang HBT SiGe yang optimal dapat dipilih parameter output dari hasil eksekusi *file* simulator yang ditunjukkan pada Tabel 5.1 dengan memilih parameter output dengan ;  $f_T$  ,  $f_{maks}$  yang tinggi, serta resistansi basis ( $R_{bb}$ ) yang rendah. Dalam riset ini untuk menurunkan  $R_{bb}$ , dilakukan dengan penskalaan geometri ke arah lateral sehingga panjang lengan emiter ( $L_e$ ) menjadi lebih panjang (dari  $8\mu m$  menjadi  $10\mu m$ ) begitu juga panjang dimensi daerah *buried layer* ( $L_c$ ) yang digunakan dari penskalaan 1 menjadi 0,8. Persamaan yang memenuhi persyaratan dalam mengoptimalkan  $R_{bb}$ , melalui pengaturan panjang lengan emiter ( $L_e$ ), yaitu Persamaan 5.1 seperti yang telah dijelaskan pada bab2 sebelumnya, dengan persamaan  $R_B$  atau  $R_{bb}$  adalah;

$$\begin{aligned}
 R_{bb} &= R_{b,con} + R_{gap} + R_{spread} \\
 R_{b,con} &= \sqrt{\rho_a \rho_c} / 2L_e \\
 R_{gap} &= \rho_a W_{eb} / 2L_e \\
 R_{spread} &= \rho_a W_c / 12L_c
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Gambar 5.3 menunjukkan bahwa dimensi Lateral dan Vertikal dari model HBT SiGe yang sesuai dengan persamaan  $R_B$  atau  $R_{bb}$  pada Persamaan 5.1. Usaha lain untuk meningkatkan  $f_T$  atau  $f_{maks}$  adalah menurunkan kapasitansi  $C_{bc}$ . Kapasitansi  $C_{bc}$  dapat diturunkan dengan cara memperkecil ketebalan basis pada arah vertikal seperti ditunjukkan pada Tabel 5.1 yaitu perubahan *file* : 009asli\_ge8 menjadi *file*: 009br6-wb075. Persamaan yang memenuhi peningkatan  $f_T$  dan  $f_{maks}$ .





Gambar 5.3 Dimensi lateral dan vertikal model HBT SiGe [50].

Jae-Sung Rieh et al, 2004 [15] menjelaskan bahwa *noise figure* minimum ( $F_n$ ), dapat diturunkan dengan memperbesar *current gain* ( $\beta$ ), menurunkan  $R_{bb}$  dan  $I_C$ , serta memperkecil rasio  $f_q/f_T$  dengan  $f_q$  : frekuensi kerja.

Untuk memperbesar  $f_T$  dapat dengan memperkecil lebar basis ( $W_b$ ) arah vertikal, dengan menaikkan *fraction mole* ( $x$ ). Persamaan yang memenuhi pengaturan nilai *current gain* ( $\beta$ ), frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) dan *noise figure* ( $F_n$ ) ditunjukkan oleh Persamaan 5.2(a), Persamaan 5.2(b) dan Persamaan 5.2(c). [26][45]

$$\beta_{SiGe} = \frac{N_{DE} W_E D_{nb}}{N_{AB} W_B D_{pe}} \exp(\Delta E_g / kT) \quad (5.2a)$$

$$f_T = \frac{qI_C \cdot V_{sat}}{2\pi \{ \eta kT (C_{be} + C_{bc}) + (R_E + R_C) C_{bc} + W_B + W_C \}} \quad (5.2b)$$

$$F_{min} = 1 + \frac{1}{\beta} + \sqrt{2 \frac{qI_C}{kT} R_B \left( \frac{f^2}{f_T^2} + \frac{1}{\beta} \right) + 1/\beta} \quad (5.2c)$$

## 5.2. Karakteristik keluaran *file* simulasi HBT SiGe

Untuk mendapatkan jawaban dari riset ini, hasil eksekusi *file* simulator pada Tabel 5.1 akhirnya terpilih beberapa *file* simulator dengan parameter output pada saat  $I_C$  minimal,  $f_T$  dan *current gain* ( $\beta$ ) tertinggi ditunjukkan oleh *file* simulator pilihan sesuai Tabel 5.2 dan parameter output ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.2 *File* simulasi dengan perubahan *lithography*, *fraction mole* (*Ge*), panjang lengan emiter ( $L_e$ ), ketebalan basis arah vertikal ( $W_b$ ).

No.	Nama <i>File</i>	<i>Lithographi</i>	Fraction mole ( <i>Ge</i> )	Panjang Lengan emiter ( $L_e$ )	Ketebalan basis arah vertikal ( $W_b$ )	Faktor Skala
		$\mu\text{m}$	<i>Fraction</i> %	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	
1.	018asli	0,18	5	10	0,5	1
2.	012asli	0,12	5	10	0,5	1
3.	009asli	0,09	5	10	0,5	1
4.	009baru6	0,09	5	8	0,5	0,8
5.	009asli_ge03	0,09	3	10	0,5	1
6.	009asli_ge10	0,09	10	10	0,5	1
7.	009asli_ge08	0,09	8	10	0,5	0,8
8.	009br6-wb075	0,09	5	8	0,0375	0,8
9.	009br6-wb050	0,09	5	8	0,025	0,8

Ketika *file* simulasi tersebut dieksekusi dihasilkan parameter-parameter output  $I_C, V_{be}, \beta, R_{bb}, f_T, f_{Maks}$  seperti ditunjukkan pada Tabel 5.3. Untuk mendapatkan simulator yang terbaik terhadap nilai *noise figure* ( $F_n$ ) maka dipilih *file* simulator dengan ; *current gain* ( $\beta$ ) dan  $f_T$  yang tinggi, dan serta  $I_C$  dan  $R_{bb}$  yang memenuhi dengan Persamaan 5.2(a) dan 5.2(b). Dari tabel tersebut dapat diamati bahwa *file* simulator dengan *current gain* yang tertinggi dimiliki oleh *file* ; 009br6\_wb050 dengan nilai 284 pada saat  $I_C=0,0000153$ Amper, kemudian  $f_T$  tertinggi juga dimiliki oleh file :009br6\_wb050 dengan nilai 79,4 Ghz pada saat arus kolektor  $I_c= 0,00198$  Amper. Resistansi basis terendah dimiliki oleh file; 009asli dengan nilai 5,59 Ohm, sedangkan untuk arus kolektor terendah dengan selisih nilai maksimal dan minimal terlebar dimiliki oleh *file*: 009asli\_ge10.

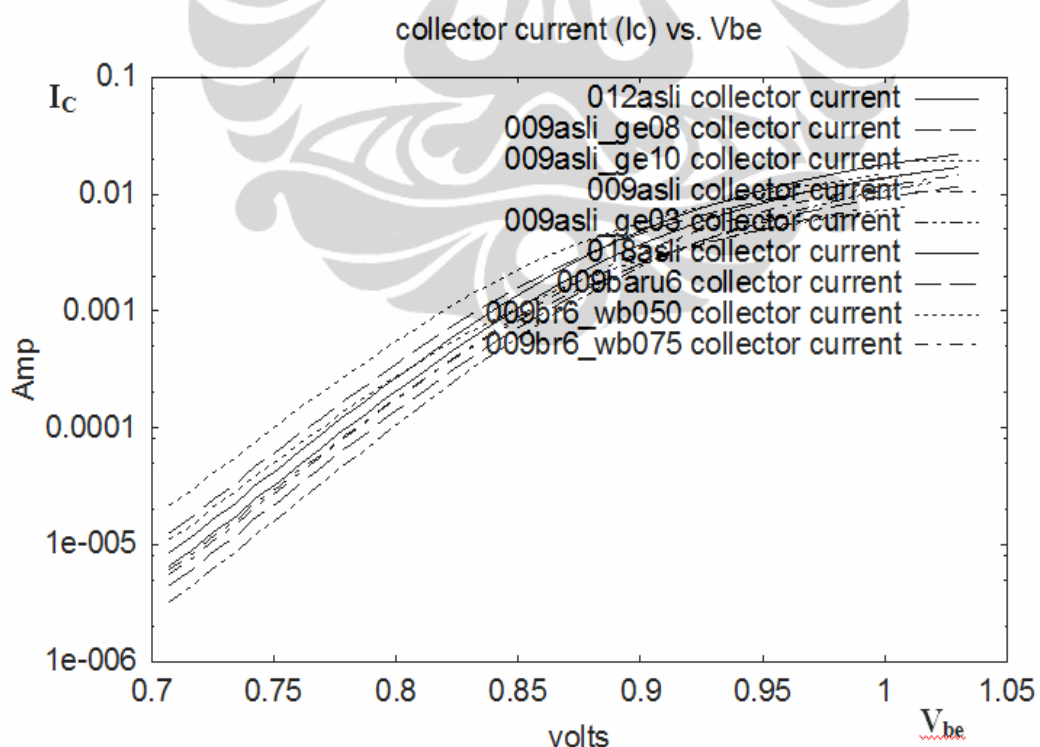
Tabel 5.3. Parameter *output file simulator*.

No,	Nama file	Nama file	Parameter					
			I <sub>C</sub> Amper	V <sub>be</sub> Volt	β	R <sub>bb</sub> ohm	f <sub>T</sub> Hz	f <sub>Maks</sub> Hz
1.	018asli	low current	6,11E-6	7,00E-1	1,62E2	1,14E1	7,65E8	1,21E10
		max gain	8,6E-5	7,69E-1	1,69E2	1,1E1	8,66E9	4,14E10
		max f <sub>T</sub>	3,97E-3	8,9E-1	1,22E2	9,12E0	6,19E10	1,23E11
2.	012asli	low current	4,68E-6	7,00E-1	1,50E2	8,46E0	7,08E8	1,35E10
		max gain	6,59E-5	7,69E-1	1,59E2	8,2E0	8,15E9	4,66E10
		max f <sub>T</sub>	3,04E-3	8,9E-1	1,15E2	6,95E0	6,22E10	1,41E11
3.	009asli	low current	3,98E-6	7,00E-1	1,42E2	6,98E0	6,71E9	1,45E10
		max gain	5,61E-5	7,69E-1	1,53E2	6,79E0	7,82E9	5,02E10
		max f <sub>T</sub>	3,54E-3	9,06E-1	9,9E1	5,59E0	6,262E10	1,58E11
4.	009baru6	low current	3,19E-6	7,00E-1	1,42E2	8,72E0	6,71E8	1,45E10
		max gain	4,49E-5	7,69E-1	1,53E2	8,48E0	7,82E9	5,02E10
		max f <sub>T</sub>	2,84E-3	9,06E-1	9,9E1	6,98E0	6,2E10	1,58E11
5.	009asli_ge03	low current	2,31E-6	7,00E-1	1,10E2	7,03E0	3,94E8	1,11E10
		max gain	6,34E-5	7,87E-1	1,18E2	6,78E0	8,72E9	5,30E10
		max f <sub>T</sub>	2,97E-3	9,09E-1	8,55E1	5,77E0	6,31E109	1,56E11
6.	009asli_ge10	low current	1,55E-5	7,00E-1	2,06E2	6,88E0	4,49E9	2,81E10
		max gain	2,98E-5	7,17E-1	2,07E2	6,83E0	4,58E9	3,82E10
		max f <sub>T</sub>	2,62E-3	8,56E-1	1,41E2	5,78E0	6,198E10	1,54E11
7.	009asli_ge8	low current	9,03E-6	7,00E-1	1,85E2	6,93E0	1,48E9	2,16E10
		max gain	6,44E-5	7,52E-1	1,92E2	6,77E0	8,7E9	5,29E10
		max f <sub>T</sub>	2,94E-3	8,76E-1	1,27E2	5,71E0	6,28E10	1,56E11
8.	009br6_wb075	low current	4,38E-6	7,00E-1	1,75E2	1,26E01	9,42E8	1,46E10
		max gain	3,13E-5	7,52E-1	1,82E2	1,21E01	5,86E9	3,71E10
		max f <sub>T</sub>	2,51E-3	9,00E-1	1,06E2	9,22E00	7,55E10	1,54E11
9.	009br6_wb050	low current	7,97E-6	7,00E-1	2,82E2	2,51E01	1,7E9	1,41E10
		max gain	1,53E-5	7,18E-1	2,84E2	2,42E01	3,18E9	1,97E10
		max f <sub>T</sub>	1,98E-3	8,8E-1	1,41E2	1,47E01	7,94E10	1,27E11

### 5.2.1 Fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) terhadap tegangan basis-emiter ( $V_{be}$ )

$$I_C = F(V_{be})$$

Grafik fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) terhadap tegangan basis-emiter ( $V_{be}$ ) ditunjukkan oleh Gambar 5.4(a), Fungsi  $I_C$  terhadap  $V_{be}$ , dari grafik tersebut ditentukan ketika  $I_C$  di antara 0,001 Amper dan 0,01 Amper dengan tegangan basis emiter ( $V_{be}$ ) berkisar antara 0,82Volt sampai 0,93Volt. Model *file* simulator dengan *stripe* emiter ( $A_e$ )=0,09 $\mu$ m dan *mole fraction*( $x$ )= 10% ditunjukkan oleh *file* : 009\_aslige10 mempunyai arus kolektor terbesar, saat arus kolektor  $I_C$  0,001 Amper tegangan basis emiter ( $V_{be}$ ) sebesar 0,83Volt, sedangkan *file* simulasi lainnya pada tegangan tersebut ( $V_{be}$ ) menghasilkan  $I_C$  lebih kecil 0,001 Amper. *File* simulator dengan selisih arus kolektor terbesar dan terendah dimiliki oleh simulator 009asli\_ge10. Saat  $V_{be}$  dinaikkan sampai 0,93Volt, *file*: 009\_aslige10 menghasilkan  $I_C$  hampir 0,01 Amper, lebih besar dengan *file-file* yang lainnya artinya dengan  $A_e$  yang semakin kecil serta *mole fraction* ( $x$ ) yang tinggi dapat menghasilkan arus kolektor yang tinggi.

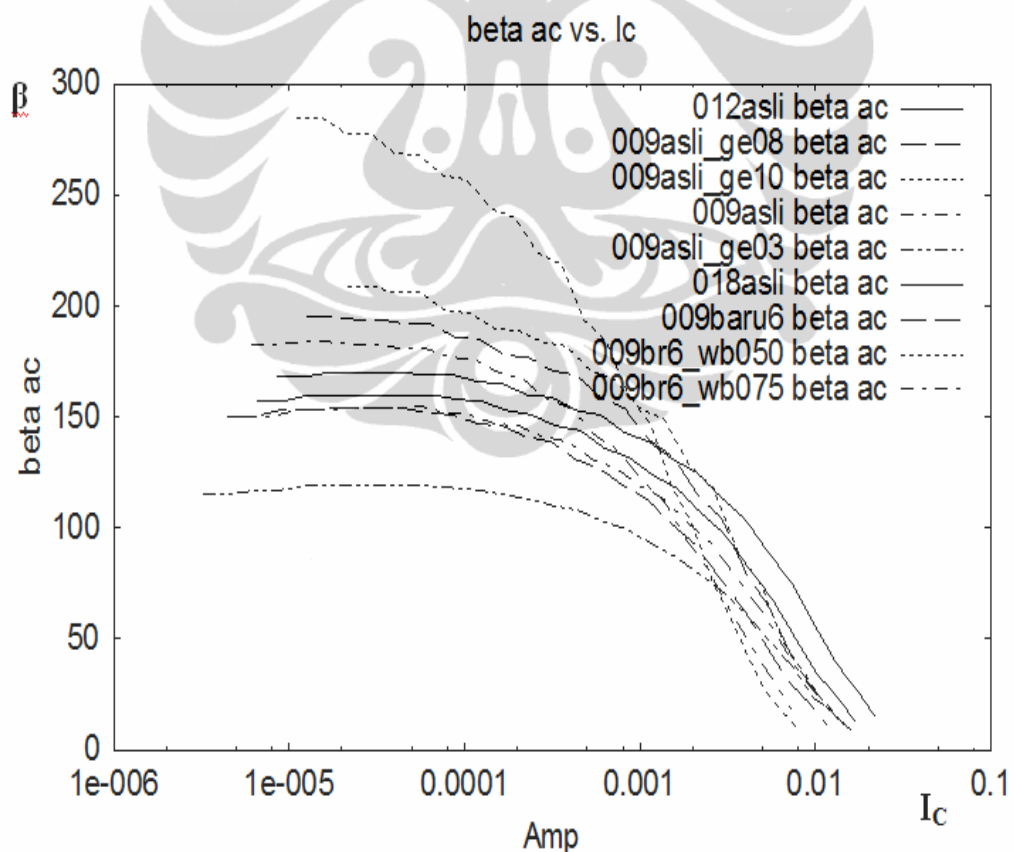


Gambar 5.4a. Grafik fungsi  $I_C$  terhadap  $V_{BE}$ ,  $I_C = F(V_{be})$ ,

### 5.2.2 Fungsi *Current Gain* ( $\beta$ ) terhadap $I_C$ , $\beta_{ac}=F(I_C)$

Gambar 5.4(b) menunjukkan fungsi  $I_C$  terhadap *current gain*  $\beta_{ac}$  ( $\beta_{ac}$ ), dari grafik tersebut ditentukan saat  $I_C$  di antara 0,001Amper sampai 0,01Amper.

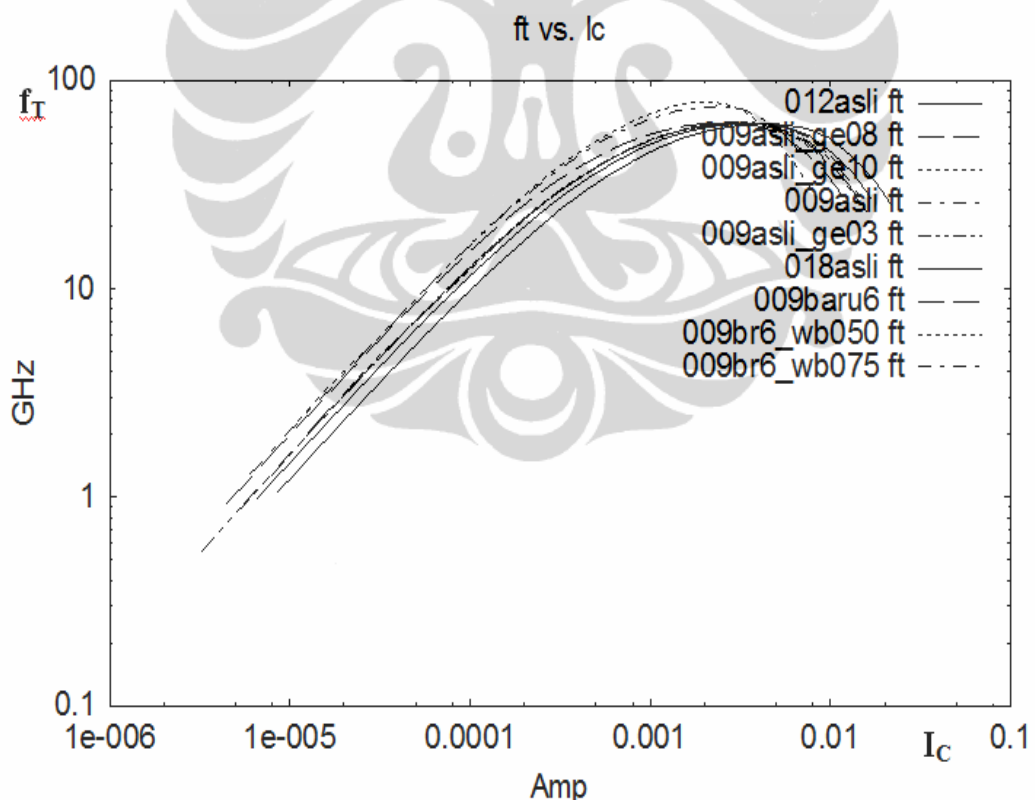
*File* : 009br6\_wb050 mempunyai perubahan arus kolektor terhadap *current gain* yang paling besar, saat  $I_C=0,01$  Amper dan  $\beta_{ac}=10$ , dan ketika  $I_C$  diturunkan menjadi 0,001Amper  $\beta_{ac}$  naik menjadi 165,  $I_C$  diturunkan lagi mejadi 0,0001Amper,  $\beta_{ac}$  sekitar 260. *file* berikutnya yang mempunyai perubahan kenaikan  $\beta_{ac}$ , yang signifikan terhadap penurunan  $I_C$  adalah *file* :009asli\_ge10, yaitu saat  $I_C=0,01$  Amper;  $\beta_{ac}= 20$ , dan ketika  $I_C= 0,001$  Amper;  $\beta_{ac}$  menjadi 165 kemudian ketika  $I_C$  diturunkan lagi mejadi 0,0001 Amper  $\beta_{ac} = 200$ . Nilai  $\beta_{ac}$  terendah dimiliki oleh *file* simulator 009asli\_ge03 dengan nilai 118 pada saat  $I_C= 0,001$  Amper, hal ini terjadi karena *file* ini mempunyai nilai *mole fraction* terendah yaitu 0,03 atau 3%.



Gambar 5.4b. Grafik fungsi *current gain* ( $\beta$ ) terhadap  $I_C$ ,  $\beta_{ac}=F(I_C)$ ,

### 5.2.3 Grafik fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) terhadap frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) dan maksimum ( $f_{maks}$ ) ; $f_T = F(I_C)$ ; $f_{maks} = F(I_C)$

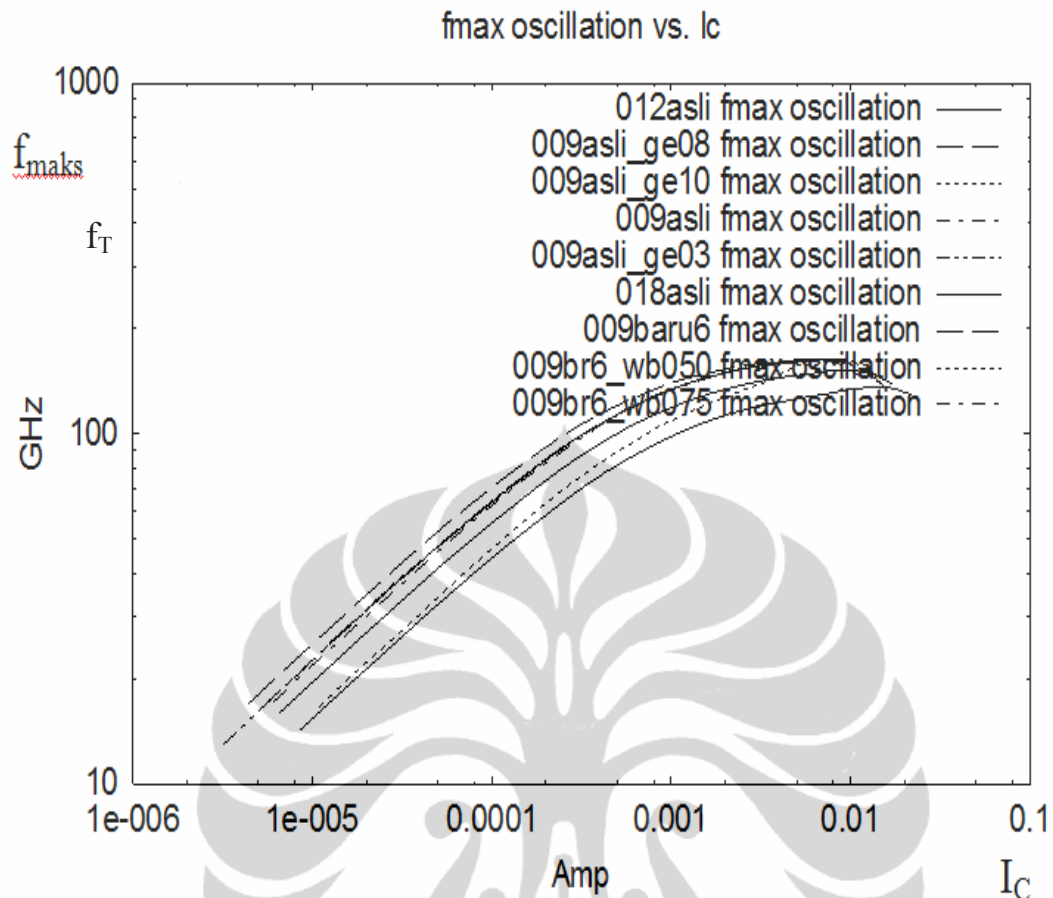
Gambar 5.4© menunjukkan bahwa grafik fungsi frekuensi *threshol* ( $f_T$ ), terhadap arus kolektor ( $I_C$ ), pengaruh  $f_T$  terhadap nilai *noise figure minimum* ( $F_n$ ) cukup signifikan, relasi antara  $f_T$  terhadap  $F_n$  adalah relasi negatif. Dari Gambar 5.4© dapat diamati *file* model HBT SiGe yang mempunyai perubahan yang dominan. Frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) tertinggi dicapai oleh *file* simulator: 009br6\_wb050 dan 009br6\_wb075. Ketika besar arus kolektor ( $I_C$ ) ditentukan 0,0001 Amper,  $f_T$  kedua *file* simulator tersebut bernilai 8Ghz, dan akan naik menjadi 78 Ghz ketika arus kolektor ( $I_C$ ) dinaikkan menjadi 0,001 Amper. Frekuensi *threshol* ( $f_T$ ) tertinggi dicapai pada saat  $I_C = 0,002$  Amper, yaitu 80Ghz, yang dimiliki oleh simulator 009br6\_wb050 dan 009br6\_wb075. Grafik fungsi  $I_C$  terhadap  $f_T$  ditunjukkan Gambar 5.4 ( c );



Gambar 5.4c Grafik fungsi frekuensi *threshol*  $f_T$  terhadap  $I_C$ ,  $f_T = F(I_C)$ .

Gambar 5.4(d) menunjukkan grafik fungsi frekuensi maksimum ( $f_{\max}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ). Nilai frekuensi maksimum ( $f_{\max}$ ) dan frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) sangat dipengaruhi oleh nilai resistansi basis  $R_{bb}$  dan kapasitansi basis-kolektor ( $C_{BC}$ ). Relasi  $f_{\max}$  terhadap  $R_{bb}$  dan  $C_{BC}$  berbanding terbalik (negatif) serta dengan frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) berbanding langsung (positif). Nilai  $f_{\max}$  dipengaruhi oleh parameter lateral devais, simulator 012asli yang tampak pada Gambar 5.4(d) memiliki *peak*  $f_{\max}$  yang paling rendah yaitu 141 Ghz dibanding simulator tetapi beroperasi pada  $I_C > 0,01$  Amper. Jika dibandingkan dengan simulator 009baru dan 009baru6, kedua simulator ini memiliki *peak*  $f_{\max}$  tertinggi yaitu 158 Ghz tetapi dengan  $I_C$  yang berbeda. 0.248 Amper Simulator 009baru6 ini memiliki nilai  $I_C = 0.00248$  Amper, sedangkan untuk 009baru memiliki  $I_C = 0.00534$  Amper. Perbedaan ukuran geometeri lateral dari kedua simulator tersebut menyebabkan penurunan  $I_C$ .

Dengan demikian untuk mendapatkan nilai  $f_{\max}$  yang tinggi, nilai  $R_{bb}$  dan  $C_{BC}$  harus serendah-rendahnya. Nilai  $f_{\max}$  tertinggi dicapai oleh *file* simulator 009baru6, yaitu simulator dengan *lithographi* 0,09 um dengan ukuran diperkecil menjadi 60% dari ukuran *file* simulator 009asli



Gambar 5.4d Grafik fungsi frekuensi maksimum  $f_{\max}$  terhadap  $I_C$ ,  $f_T = F(I_{\max})$

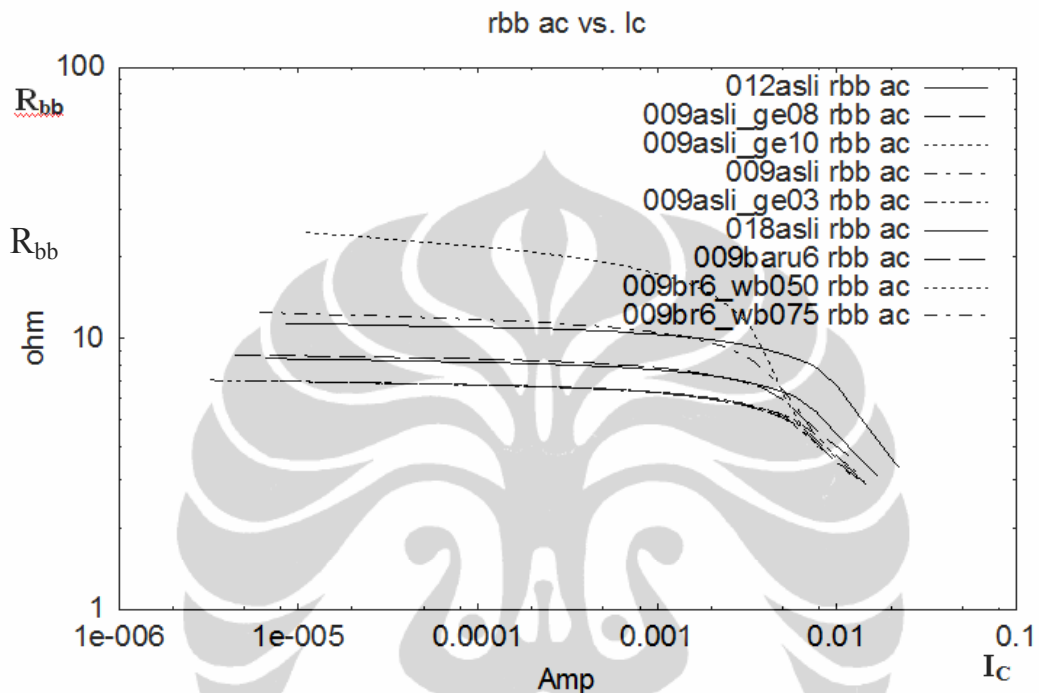
#### 5.2.4 Fungsi Resistansi Basis terhadap $I_C$ , $R_{bb} = F(I_C)$ .

Grafik Resistansi basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ )  $R_{bb} = F(I_C)$  ditunjukkan oleh Gambar 5.4(e) Nilai  $R_{bb}$  atau  $R_B$  terhadap besarnya *noise figure* minimum ( $F_n$ ). Relasi  $R_{bb}$  terhadap  $F_n$  adalah relasi positif, dengan nilai  $R_{bb}$  yang kecil akan menghasilkan  $F_n$  yang rendah. Dari Gambar 5.4(c) dapat diamati *file* model HBT SiGe yang mempunyai perubahan  $R_{bb}$  yang kecil atau rendah adalah *file* simulator *file*: 009asli\_ge10 dan *file* 009asli, saat  $I_C$  ditentukan di antara 0,001Amper pada saat  $I_C = 0,01$ Amper,  $R_{bb} = 14$  ohm, dan ketika  $I_C = 0,01$  Amper  $R_{bb} = 4$  ohm, untuk selanjutnya  $I_C$  diturunkan sampai 0,000 Amper,  $R_{bb} = 21$ ohm. Model simulasi HBT SiGe dengan *stripe* emiter ( $A_e$ ) yang besar 0,18 $\mu$ m cenderung mempunyai  $R_{bb}$  yang lebih besar disbanding dengan *stripe* emiter ( $A_e$ ) 0,09 $\mu$ m antara lain saat  $I_C = 0,01$  Amper,  $R_{bb} = 4$ ohm, ketika  $I$



$c=0,001$ Amper,  $R_{bb}=6$ ohm kemudian  $I_C$  sampai 0,0001 Amper  $R_{bb} = 7,8$  ohm.

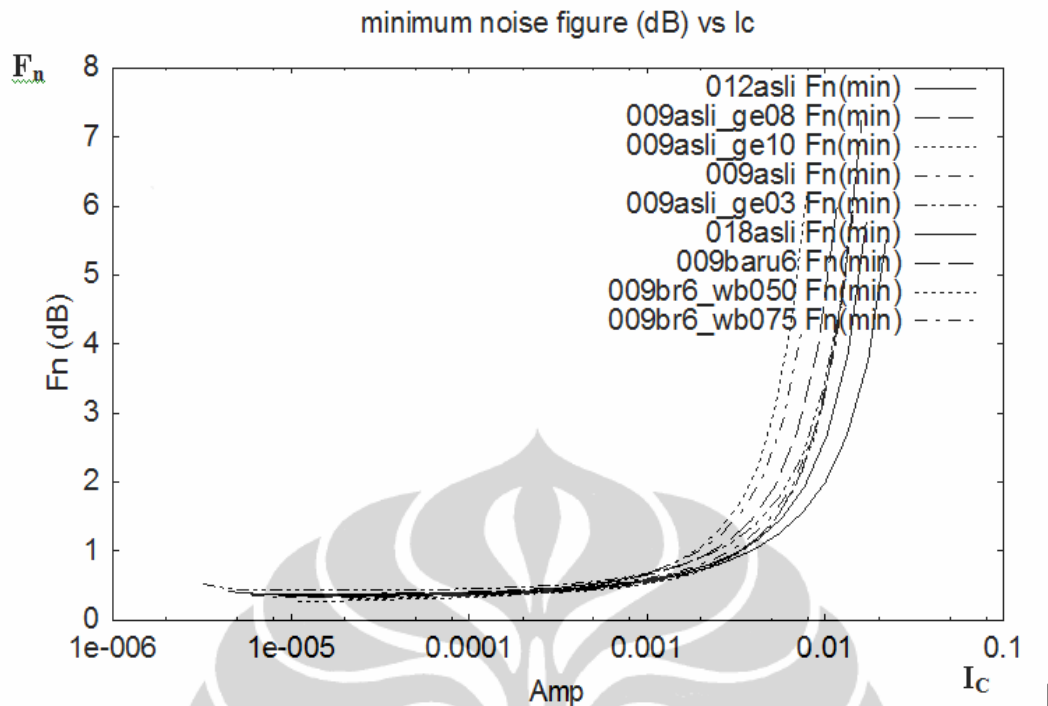
File simulator 009br6\_wb050 memiliki nilai  $R_{bb}$  dengan perubahan yang ekstrim terhadap penurunan arus kolektor ( $I_C$ ) yaitu 18 ohm saat 0,0001 Amper dan turun menjadi 3 ohm saat 0,01 Amper.



Gambar 5.4e. Grafik fungsi resistansi basis terhadap  $I_C$ ,  $R_{bb}=F(I_C)$

### 5.2.5 Fungsi noise figure terhadap $I_C$ , $F_n = F(I_C)$

Gambar 5.4(f) menunjukkan bahwa grafik fungsi noise figure ( $F_n$ ) terhadap  $I_C$ , dipengaruhi oleh nilai  $I_C$  dan  $R_{bb}$  yang rendah serta  $\beta$  dan  $f_T$  yang tinggi. Dari hasil pengamatan grafik fungsi noise figure terhadap  $I_C$  bahwa file:009br6\_wb050, 009asli\_ge10 dan 009asli mempunyai  $F_n$  yang rendah untuk arus kolektor ( $I_C$ )  $< 0,001$  Amper serta mempunyai penurunan yang tajam. Hal ini ditunjukkan pada slope (gradien arah) yang terbesar dibanding simulator yang lain yaitu saat  $I_C= 0,006$  Amper sampai  $I_C =0,01$  Amper, simulator 009asli noise figure ( $F_n$ ) yang tinggi.



Gambar 5.4f Grafik fungsi *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap  $I_C$ ,  $F_n = F(I_C)$

Dari hasil pengamatan dan kajian di atas *file* simulator yang memiliki potensi dengan *noise figure* ( $F_n$ ) yang rendah berdasarkan pada nilai parameter  $R_{bb}$ ,  $I_C$  yang rendah serta  $\beta$  dan  $f_T$  yang tinggi ditunjukkan oleh Tabel 5.4.

Jika nilai kontrol ( $K_0$ );  $k_0 = \frac{I_C \cdot R_{bb}}{\beta \cdot f_T}$ , jika nilai  $k_0$  rendah maka *noise figure* ( $F_n$ )

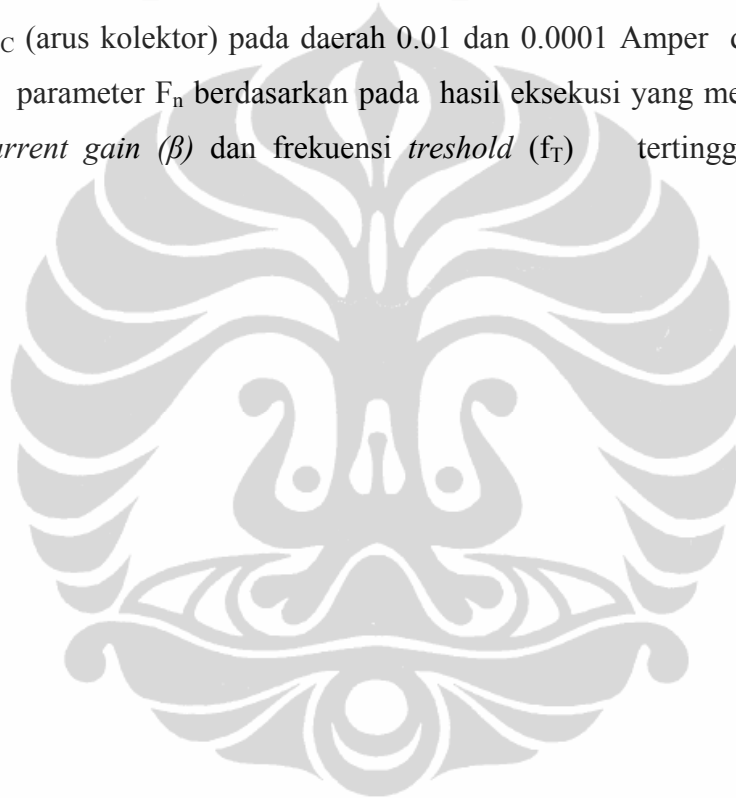
rendah .

Tabel 5.4 Urutan *File Simulator* dengan *noise figure* ( $F_n$ ) terendah berdasarkan pada nilai  $f_T$  maksimal.

No,	Nama file	$I_C$ Amper	Vbe Volt	$\beta$	rbb ohm	$f_T$ Hz	$f_{Maks}$ Hz	Ko
1	009asli_ge10	2.62E-03	8.56E-01	1.41E+02	5.78E+00	6.20E+10	1.54E+11	2.80E-26
2	009asli	1.98E-03	8.80E-01	1.41E+02	1.47E+01	7.94E+10	1.27E+11	3.27E-26
3	009br6_wb050	2.94E-03	8.76E-01	1.27E+02	5.71E+00	6.28E+10	1.56E+11	3.35E-26
4	009asli_ge8	2.51E-03	9.00E-01	1.06E+02	9.22E+00	7.55E+10	1.54E+11	3.83E-26
5	009br6_wb075	3.04E-03	8.90E-01	1.15E+02	6.95E+00	6.22E+10	1.41E+11	4.75E-26
6	012asli	2.97E-03	9.09E-01	8.55E+01	5.77E+00	6.31E+10	1.56E+11	5.03E-26
7	009asli_ge03	3.54E-03	9.06E-01	9.90E+01	5.59E+00	6.26E+10	1.58E+11	5.10E-26
8	009baru6	2.84E-03	9.06E-01	9.90E+01	6.98E+00	6.20E+10	1.58E+11	5.21E-26

### 5.3. Analisis HBT SiGe Model berdasarkan pengaturan dimensi Geometri Lateral dan Vertikal

Berdasarkan pada Tabel 5.4 di atas dapat ditentukan beberapa *file* simulator yang mewakili pada kelompok *file* simulasi seperti yang ditunjukkan Tabel 5.1. Berdasarkan nilai parameter  $I_C$ ,  $R_{bb}$ ,  $f_T$  dan  $\beta$  dapat dipilih beberapa *File* simulator hasil seleksi seperti ditunjukkan pada Tabel 5.5 dengan urutan *file* sebagai berikut; 009asli\_ge10, 009asli, 009br6\_wb050 dan 012asli. Dengan menentukan  $I_C$  (arus kolektor) pada daerah 0.01 dan 0.0001 Amper didapat dan diamati nilai parameter  $F_n$  berdasarkan pada hasil eksekusi yang menghasilkan parameter *Current gain* ( $\beta$ ) dan frekuensi *treshold* ( $f_T$ ) tertinggi serta  $R_{bb}$  terendah.

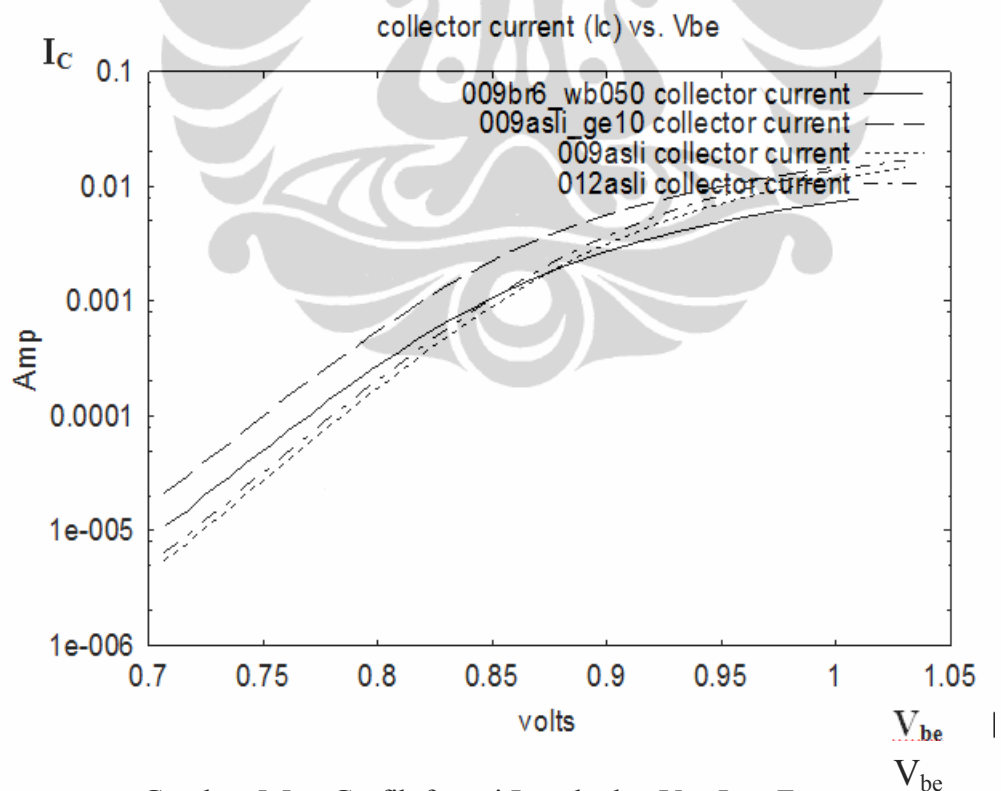


Tabel 5.5 *File* simulasi peningkatan  $f_T$ ,  $f_{maks}$  dan penurunan *noise figure* ( $F_n$ )

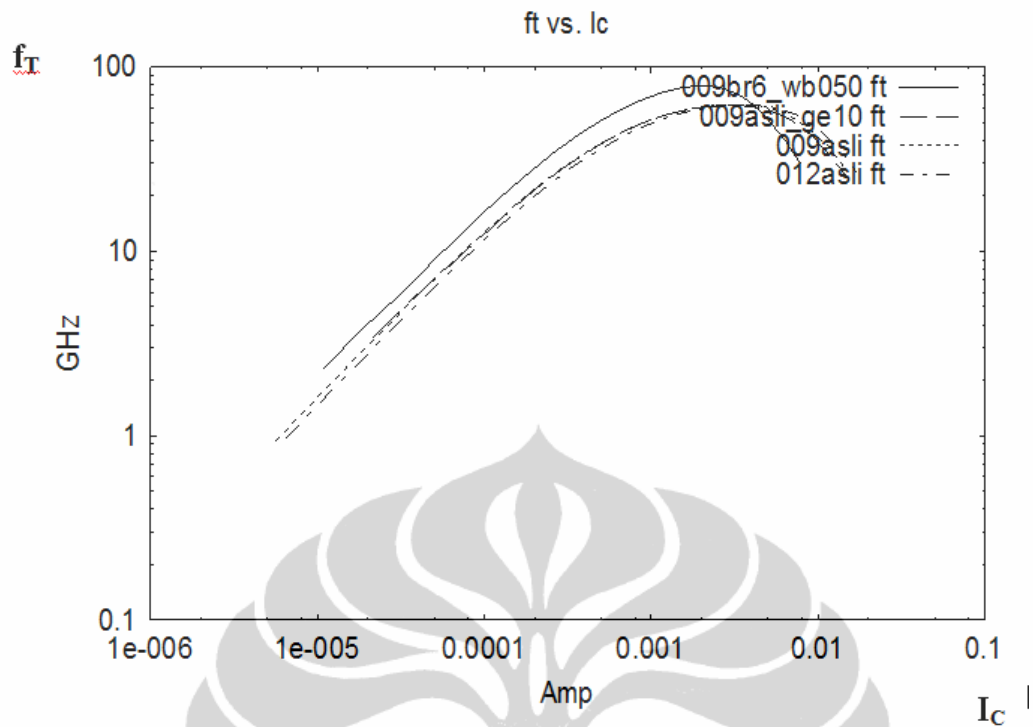
No.	Nama <i>File</i>	Kelompok <i>File</i>	Lithographi	Fraction Mole Germanium	Panjang Lengan emitter ( $L_e$ )	Wb arah vertical ( $W_b$ )
			$\mu\text{m}$	%	cm	cm
1.	009asli_ge10	Pengaturan <i>Stripe</i> emiter ( $A_e$ ).	0,09	10	$10e^{-4}$	$0,05e^{-4}$
2.	009asli	Pengaturan Geometri arah lateral	0,09	5	$10e^{-4}$	$0,05e^{-4}$
3.	009br6-wb050	Pengaturan Arah Vertikal dengan Pengaturan Ketebalan basis ( $w_b$ ).	0,09	5	$8e^{-4}$	$0,03e^{-4}$
4.	012asli	Pengaturan <i>Mole Fraction</i>	0,12	5	$10e^{-4}$	$0,05e^{-4}$

Gambar 5.5(a) menunjukkan grafik  $I_C = f(V_{be})$ , ketika tegangan  $V_{be}$  ditentukan 0,75 volt sampai 0,87 V (daerah linier), arus kolektor  $I_C$  simulator 009asli\_ge10 mempunyai nilai tertinggi yaitu 0,0001 Amper sampai 0,0004 Amper, sedangkan *file* yang lainnya berkisar antara 0,00004 sampai 0,0004 Amper. Tegangan basis ( $V_{be}$ ) yang optimal pada *file* simulator 009asli, 009br6-wb050 dan 012asli dicapai saat arus kolektor 0,0002Amper. Gambar 5.5(a) dapat diamati bahwa kenaikan *fraction mole* (x) dari 5% menjadi 10% menghasilkan kenaikan arus kolektor ( $I_C$ ) dua kalinya dari 0,00005 menjadi 0,0001 Amper pada tegangan basis emiter ( $V_{be}$ )= 0,75 volt.

Jika tegangan basis emiter ( $V_{be}$ ) diperbesar maka akan terjadi titik pertemuan grafik dari ketiga simulator diatas pada saat  $V_{be}$  1 volt dan arus kolektor yang dicapai sekitar 0,02 Amper. *File* simulator 009br6\_wb050, memberikan nilai terbaik karena pada saat  $V_{be}$  dinaikkan arus kolektor ( $I_C$ ) cenderung kembali turun. *File* simulator 009asli, 012asli dan 009asli\_ge10 memiliki titik pertemuan pada arus kolektor ( $I_C$ ) di sekitar 0,02 Amper saat  $V_{be}$  1 Volt.



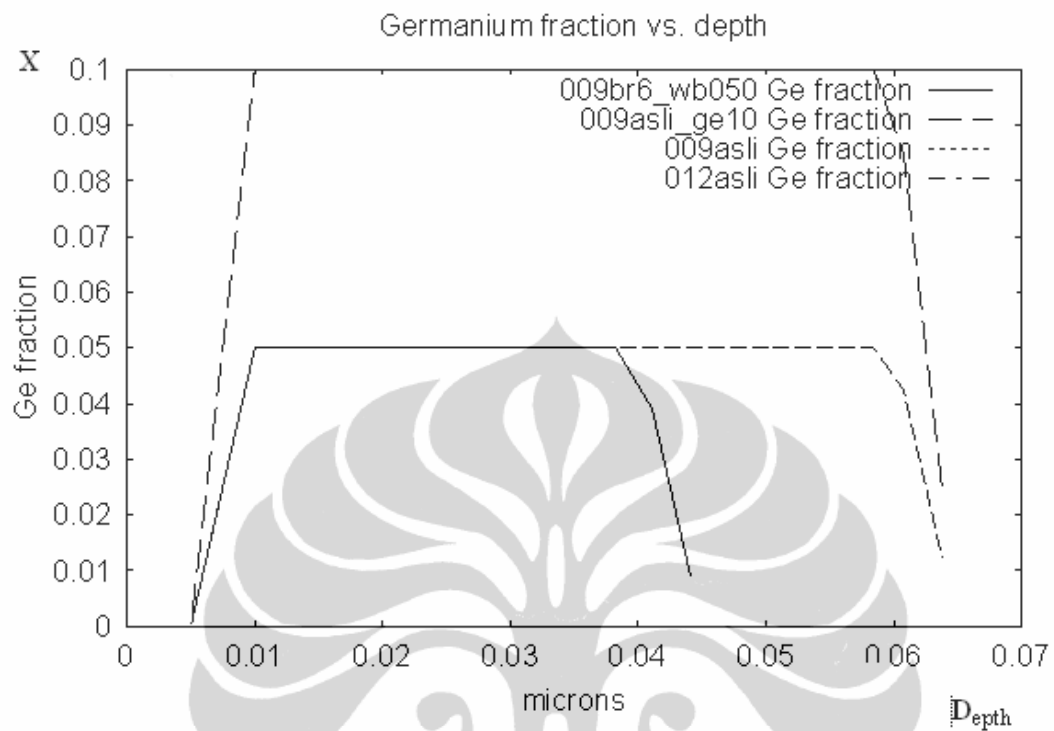
Gambar 5.5a. Grafik fungsi  $I_C$  terhadap  $V_{be}$ ,  $I_C = F(V_{be})$ ,



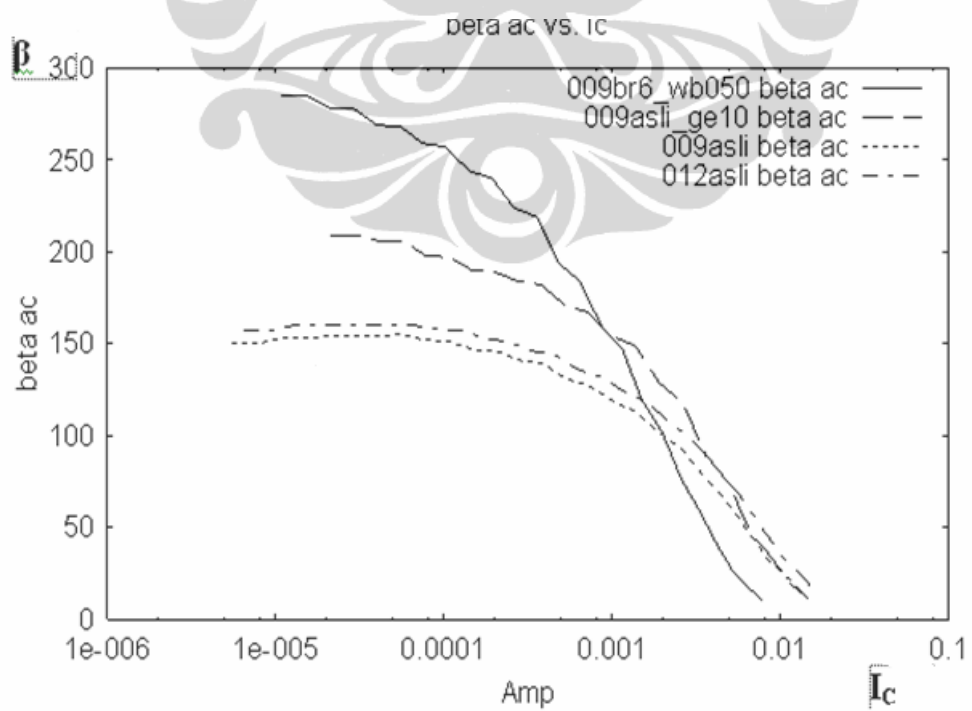
Gambar 5.5b. Grafik fungsi  $f_T$  terhadap  $I_C$ ,  $f_T = F(I_C)$

Fungsi arus kolektor ( $I_C$ ) terhadap  $f_T$ ,  $f_T = F(I_C)$  ditunjukkan oleh Gambar 5.5(d) ditasa simulator 009br6\_wb050, mempunyai nilai frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) terbesar dibanding yang lainnya dengan nilai 80 Ghz pada saat arus kolektor ( $I_C$ ) = 0,002 Amper,  $f_T$  maksimum yang dicapai oleh *file* simulator yang lain berkisar sekitar 74Ghz, dengan  $I_C = 0,002$  Amper. Perpotongan grafik dari keempat simulator di atas dicapai pada saat  $I_C = 0,003$  Amper dengan nilai  $f_T = 70$  Ghz. Pergeseran dan kenaikan nilai  $f_T$  dari simulator 009br6\_wb050, disebabkan karena perubahan ketebalan basis ( $w_b$ ) yang lebih sempit dibandingkan dengan ketebalan basis pada simulator 009asli\_ge10, 009asli dan 012asli.

Frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) tidak terpengaruh oleh perubahan *lithographi*, skala ataupun *fraction mole* ( $x$ ) tetapi dipengaruhi oleh ketebalan basis ( $w_b$ ) atau *depth* basis, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.5( c ) yang menunjukkan diagram *fraction mole* ( $x$ ) terhadap *depth*. Simulator 009br6\_wb050 mempunyai ketebalan basis yang lebih kecil yaitu 0,03  $\mu\text{m}$ .



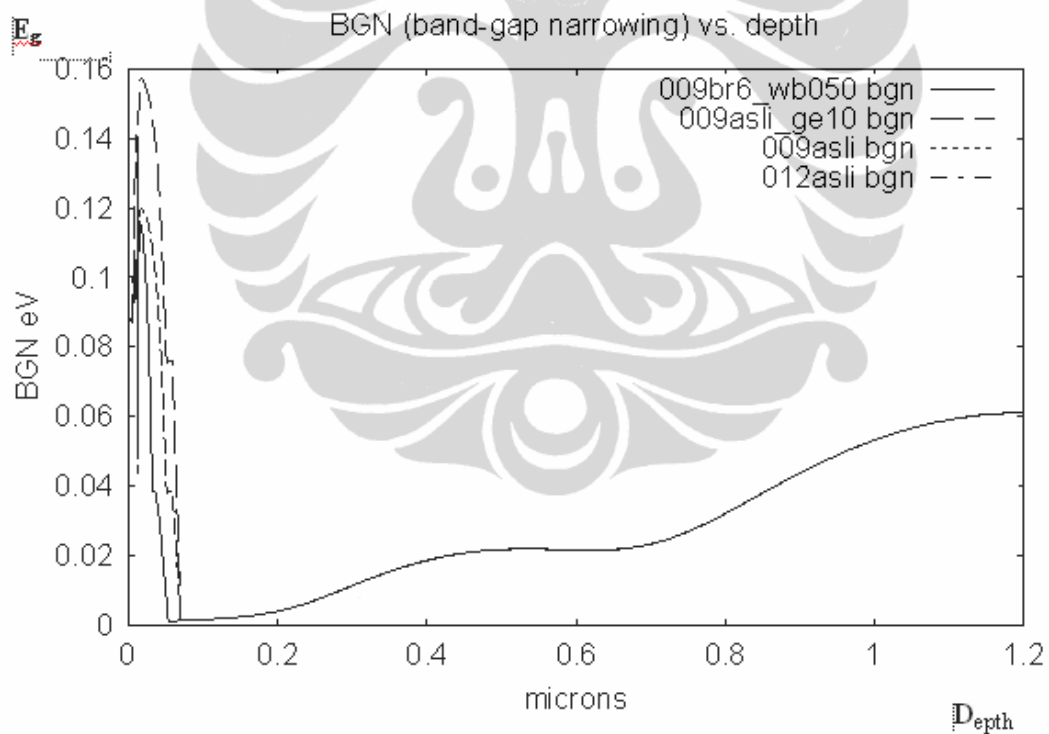
Gambar 5.5c. Grafik fungsi  $fraction$  Ge terhadap  $depth$ .



Gambar 5.5d. Grafik fungsi  $\beta_{ac}$  terhadap  $I_C$ ;  $\beta_{ac}=f(I_C)$ .

Gambar 5.5(d) menunjukkan grafik fungsi *current gain* ( $\beta$ ) ac terhadap arus kolektor ( $I_C$ ),  $\beta_{ac}$  tertinggi diperoleh oleh *file* simulator 009br6\_wb050, 285 saat  $I_C$  0,00001 Amper dan 265 saat  $I_C$  0,0001 Amper. *File* simulator 009asli\_ge10, 009asli dan 012asli masing-masing mempunyai  $\beta_{ac}=200, 155$  dan 152 pada saat  $I_C =0,0001$  Amper.  $I_C$  pertemuan antara simulator 009br6\_wb050 dan 009asli\_ge10 dicapai saat  $I_C$  0,001 Amper dengan, nilai  $\beta_{ac}$  165, pada saat  $V_{be}$  0,87 V.

Nilai  $\beta_{ac}$  berbanding terbalik dengan  $w_b$  dan langsung dengan *fraction mole* ( $x$ ) atau energi *bandgap* ( $\Delta E_g$ ), telah ditunjukkan oleh Gambar 5.5(c) dan Tabel 5.5 bahwa *fraction mole* ( $x$ ) dari ke-empat simulator ini berbeda sehingga tanggapan  $\Delta E_g$  terhadap *depth* (arah vertikal) berbeda pula ditunjukkan oleh Gambar 5.5(e).

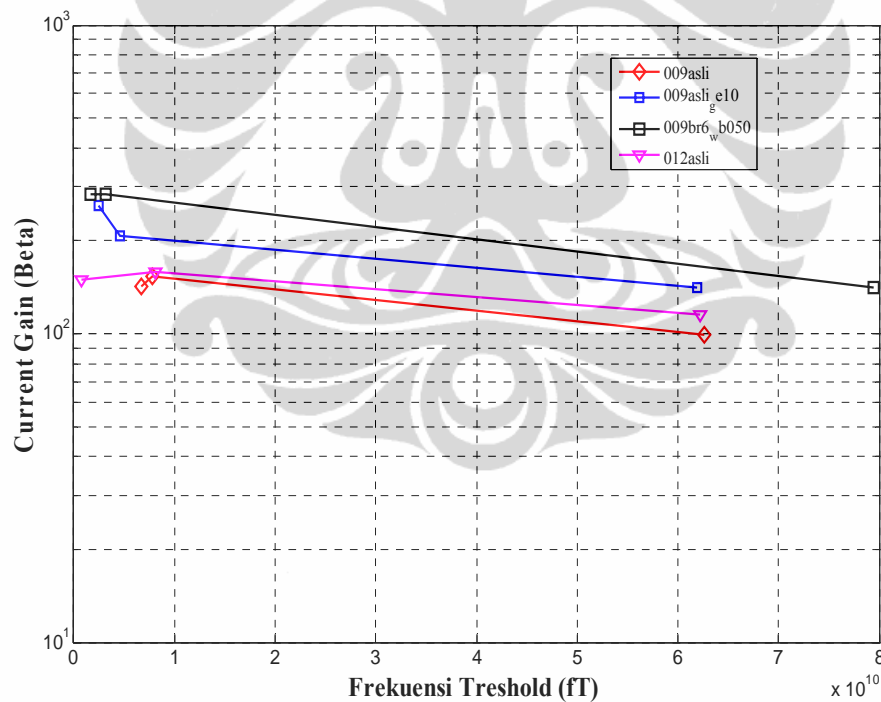


Gambar 5.5e. Grafik fungsi  $E_g$  (BGN) terhadap *depth* .



Simulator 009asli\_ge10 memiliki *fraction mole* 10% sehingga  $\Delta E_g$  yang dihasilkan 0,158 eV lebih besar dibanding simulator 009br6\_wb050 yang mempunyai nilai  $\Delta E_g$  0,12 eV. Kenaikan *current gain* ( $\beta_{ac}$ ) yang dominan dipengaruhi oleh ketebalan basis ( $w_b$ ) yang lebih kecil yaitu 0,05  $\mu\text{m}$ , sehingga akibatnya memiliki *current gain* ( $\beta_{ac}$ ) dan frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) yang tinggi.

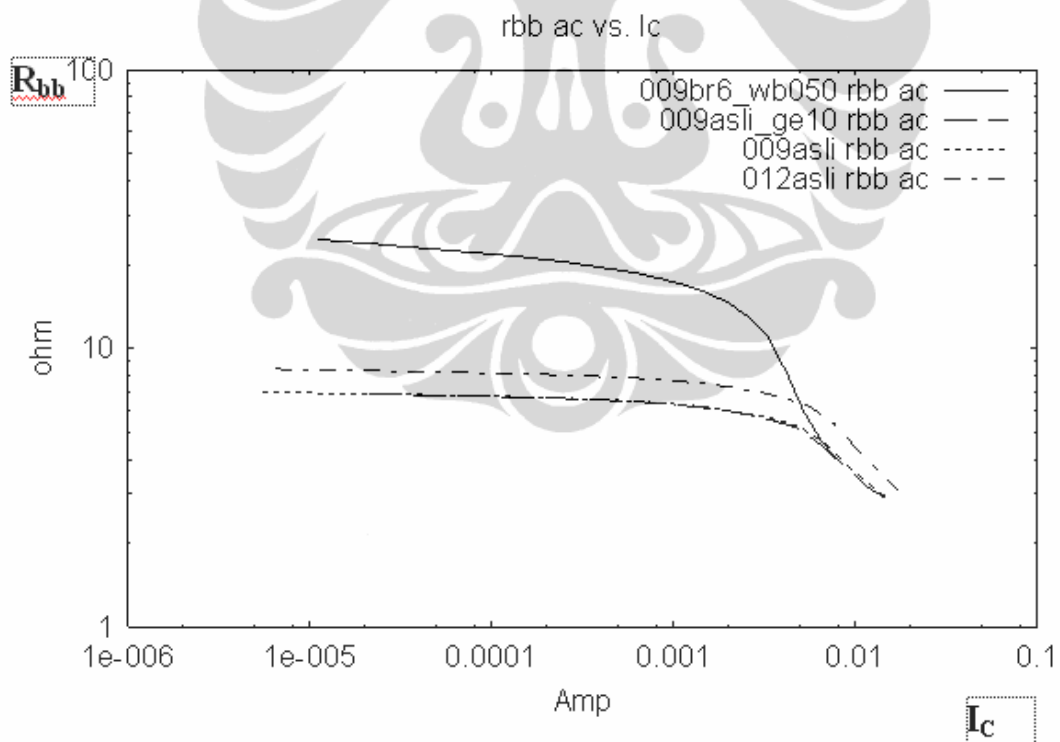
Pengaruh *lithographi* diwakili oleh simulator 009asli dan 012asli mempunyai  $\Delta E_g$  yang sama yaitu sekitar 0,12eV jadi dengan demikian tidak ada pengaruh pada nilai  $\Delta E_g$  terhadap perubahan *lithographi*, sehingga akibatnya adalah frekuensi *threshold* ( $f_T$ ) yang dihasilkan kedua simulator ini sama. Parameter yang akan berbeda dari kedua simulator ini (009asli dan 012asli) adalah Resistansi Basis ( $R_{bb}$ ), sehingga menyebabkan perbedaan pada nilai  $I_C$  dan  $\beta$  maksimum, ditunjukkan pada Tabel 5.6.



Gambar 5.5f. Grafik fungsi *Current gain* ( $\beta$ ) terhadap  $f_T$

Gambar 5.5f menunjukkan diagram fungsi  $f(\beta) = F(f_T)$  untuk simulator 012asli, 009asli, 009asli\_ge10, dan 009br6-wb050, dengan menaikkan *fraction mole* ( $x$ ) dan memperkecil  $w_b$  file : 009br6-wb050, akan menghasilkan *current gain* ( $\beta$ ) yang tinggi sekitar 300 kali, dibanding dengan File: 009asli\_ge10, 009asli, dan 012 asli yang mempunyai *current gain* ( $\beta$ ) 280, 150 dan 105 pada *fraction mole* 10% dan 5%, dan ketebalan basis yang sama. Simulator 009asli dan 012 asli untuk nilai frekuensi *threshol*d tinggi cenderung untuk saling menjauh dan sebaliknya pada saat  $I_C$  rendah, maka nilai *current gain* ( $\beta$ ) akan relatif sama, seperti ditunjukkan ketika  $f_T$  lebih kecil 10 Ghz.

Nilai *current gain* ( $\beta$ ) antara simulator 009asli\_ge10 dan 009br6-wb050 mempunyai nilai sama yakni 165 saat arus kolektor  $I_C=0,001$  Amper yang bertepatan dengan nilai frekuensi 70 Ghz. Simulator 009asli dan 012asli cenderung untuk memiliki selisih *current gain* bertambah besar pada saat frekuensi dinaikkan atau saat arus kolektor  $I_C$  turun.



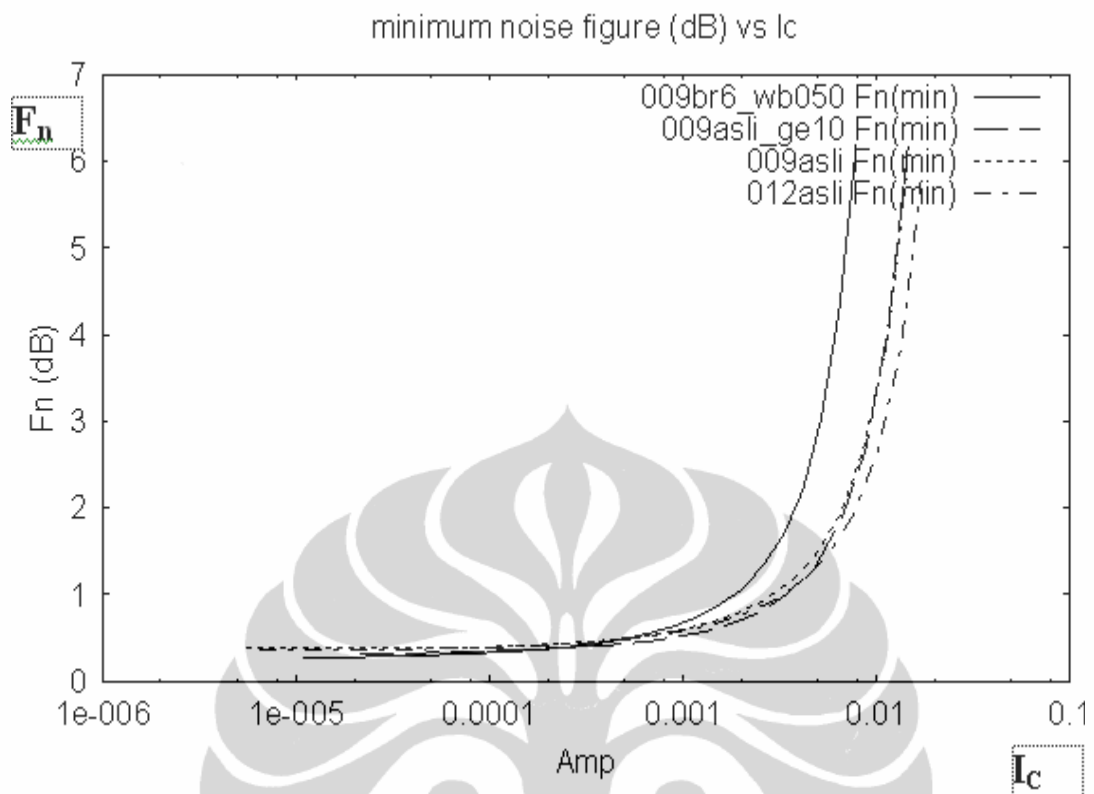
Gambar 5.5g. Grafik fungsi Arus Kolektor ( $I_C$ ) terhadap  $R_{bb}$ ;  $R_{bb}=f(I_C)$ .

Gambar 5.5(g) menunjukkan bahwa fungsi resistansi basis ( $R_{bb}$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ );  $R_{bb}=f(I_C)$ ,  $R_{bb}$  tertinggi dicapai oleh simulator 009br6\_wb050 yaitu sebesar 24 ohm saat  $I_C$  0,0001 Amper sedangkan untuk simulator 012asli, 009asli dan 009asli\_ge10 masing –masing 8 dan 5,8 Ohm. Ketika arus kolektor ( $I_C$ ) dinaikkan, nilai resistansi basis ( $R_{bb}$ ) menurun. Penurunan yang ekstrim dilakukan oleh simulator 009br6\_wb050, dari 18 ohm saat  $I_C=0,001$  Amper menjadi 3,6 ohm ketika  $I_C=0,01$  Amper. Perubahan nilai  $R_{bb}$  ini akan berpengaruh pada nilai *noise figure* ( $F_n$ ) relasi antara  $R_{bb}$  dengan  $F_n$  berbanding langsung.

*Noise figure* ( $F_n$ ) yang rendah akan dicapai pada saat  $R_{bb}$  yang rendah, nilai  $R_{bb}$  dipengaruhi oleh *stripe emitter* ( $A_e$ ), semakin besar  $A_e$  maka  $R_{bb}$  cenderung naik, ditunjukkan oleh simulator 009asli dan 012asli. Resistansi basis ( $R_{bb}$ ) sangat dipengaruhi oleh rancangan *mask –layout* dari komponen HBT seperti lebar kontak  $R_{b,cont.}$ , Resistansi *base-emitter gap*  $R_{gap}$  dan Resistansi *spreading*  $R_{spread.}$

Gambar 5.6 menunjukkan bahwa grafik fungsi *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap arus kolektor ( $I_C$ ). Arus kolektor ditentukan dalam empat area yaitu ;

- a) area\_1  $I_C > 0,004$ .
- b) area\_2  $0,001 < I_C < 0,04$  dan
- c) area\_3  $0,0001 < I_C < 0,001$ ,
- d) area\_4,  $I_C < 0,0001$  Amper;

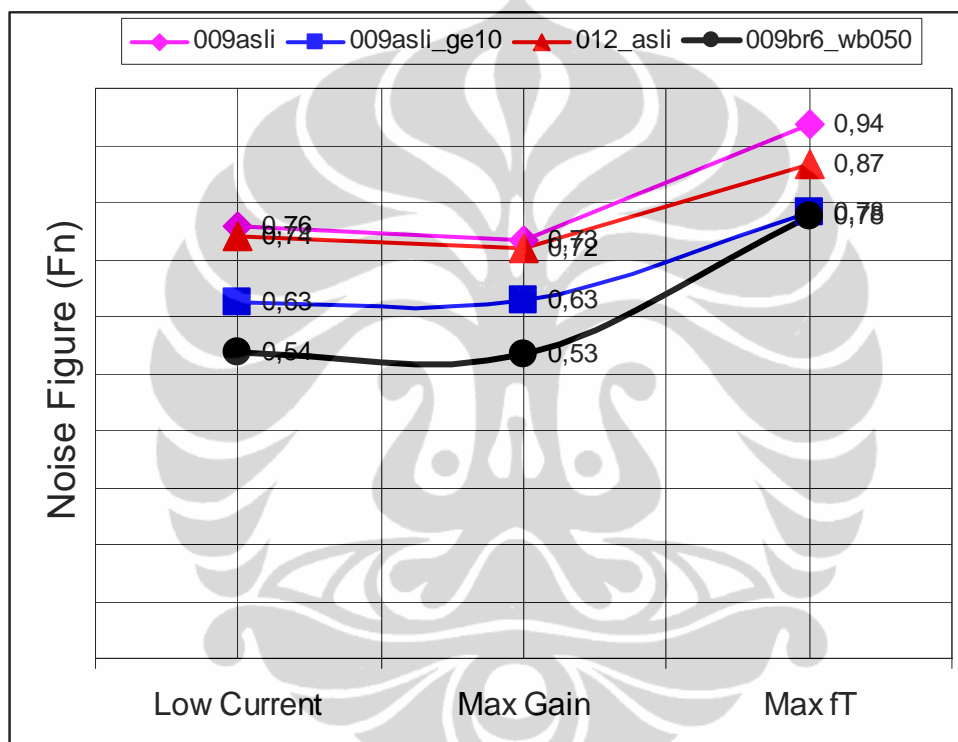


Gambar 5.6. Grafik fungsi *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap Arus Kolektor ( $I_C$ ),  
 $F_n = F(I_C)$

- a) pada area\_1, simulator 009br6\_wb050 memiliki nilai  $F_n = 3$  dB, saat  $I_C = 0,004$  Amper, sedangkan untuk *file* simulator 009asli, 0012asli dan 009asli\_ge10 bernilai sekitar 1,45 dB. Selanjutnya  $I_C > 0,004$  Amper  $F_n$  akan naik secara ekstrim dengan kemiringan hampir mencapai 90 derajat.
- b) pada area\_2, daerah tidak linier berada pada  $0,001 < I_C < 0,004$ . Simulator 009br6\_wb050 memiliki nilai  $F_n$  dengan kenaikan tertinggi yaitu sekitar 2,55 dB/0,004 Amper, sedangkan untuk *file* simulator 009asli, 0012asli dan 009asli\_ge10 bernilai sekitar 0,55 dB/0,004 Amper.
- c) pada area\_3, daerah linier berada pada  $0,0001 < I_C < 0,001$ . Ketiga simulator memiliki nilai  $F_n$  dengan perubahan yang sangat kecil, yaitu dengan kenaikan hampir 0,005 dB/0,001 Amper, kecenderungan simulator 009asli, 0012asli dan 009asli\_ge10 mempunyai nilai  $F_n$  tetap yaitu 0,5 dB, ketika  $I_C$  diturunkan sampai 0,0001 Amper.
- d) pada area\_4, daerah  $I_C < 0,0001$  Amper, ketiga simulator 009asli, 0012asli dan 009asli\_ge10 mempunyai nilai  $F_n$  tetap yaitu 0,5 dB, dan tidak akan berubah

jika  $I_C$  diturunkan, tetapi untuk simulator 009br6\_wb050, masih terjadi penurunan  $F_n$  sampai mendekati 0 (nol).

Untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih komprehensif maka pada Gambar 5.7 ditunjukkan diagram *noise figure* ( $F_n$ ) terhadap parameter pada saat ; *Low Current Collector* , *Maximum Gain* dan *Maximum  $f_T$*  dari hasil eksekusi simulator 009asli,0012asli ,009asli\_ge10 dan 009br6\_wb050, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.7.



Gambar 5.7. Grafik fungsi *noise figure* pada *File HBT Simulasi* . 009asli\_ge03, 009asli\_ge10 dan 009br6\_wb050

Dari diagram Gambar 5.7 dapat diamati bahwa simulator 009br6\_wb050, mempunyai nilai *noise figure* Minum ( $F_n$ ) yang rendah dibanding dengan *file* simulasi 009asli, 012asli, 009asli\_ge10, nilai *noise figure* ( $F_n$ ) tersebut berdasarkan pada kondisi; *low current*( $I_C$ ) , *current gain* maximum dan frekuensi *reshold* ( $f_T$ ) maksimum. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa cara yang terbaik untuk mendapatkan *noise figure* ( $F_n$ ) minimum adalah memperkecil lebar emiter arah lateral, dan mempersempit ketebalan basis ( $w_b$ ) serta menaikkan *fraction mole* ( $x$ ) tetap.

Tabel 5.6 Unjuk Kerja HBT Simulator.

Deskripsi	Simbol	Satuan	File: 012asli			File: 009asli			File : 009asli_ge10			File :009br6-wb050		
			A <sub>e</sub> = 0,12 μm			A <sub>e</sub> = 0,09 μm			A <sub>e</sub> = 0,09 μm			A <sub>e</sub> = 0,09 μm		
			Low Current	max gain	max f <sub>T</sub>	Low Current	max gain	max f <sub>T</sub>	Low Current	max gain	max f <sub>T</sub>	Low Current	max gain	max f <sub>T</sub>
Collector current	I <sub>x</sub>	A	4,68e-6	6,59e-5	max f <sub>T</sub>	3,04E-3	6,34e-5	2,97 e-3	1,55e-5	2,98e-5	2,62e-3	7,97e-6	1,53e-05	1,98e-03
Treshod frequency	f <sub>t</sub>	Hz	7,08e8	8,15e9	<b>6,22e10</b>	3,94e+8	8,72e+9	<b>6,31e+10</b>	2,49e+09	4,58e+09	<b>6,19e+10</b>	1,90e+09	3,18e+09	<b>7,94e+10</b>
Oscillation frequency	fmaks	Hz	1,35e10	4,66e10	<b>1,41e11</b>	1,11.e+10	5,30e+10	<b>1,56 e+11</b>	2,81e+10	3,82e+10	<b>1,54e+11</b>	1,41e+10	1,97e+10	<b>1,27e+11</b>
f <sub>maks</sub> /f <sub>T</sub>			1,2	6,1	2,5	28,2	6,1	2,5	11,3	8,3	2,5	7,4	6,2	1,6
Current gain	β		1,50e2	1,59e2	1,15e2	1,10e+2	1,18e+2	8,55e+1	2,06e+2	2,07e+2	1,41e+2	2,82e+02	2,84e+02	1,41e+01
Breakdown voltage	βV <sub>CEO</sub>	V	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Sheet ressistansce (rb)	r <sub>b</sub>	ohm	8,46e0	8,2e0	6,95e0	7,03e+0	6,78e+0	5,77e+00	6,88e+00	6,83e+00	5,78e+00	2,51e01	2,42e01	1,47e01
Noise Figure	F <sub>n</sub>	dB	0,40 dB saat Ic=0,001A, f= 47 Ghz.			0,40 dB saat Ic=0,001A, f= 48,9 Ghz.			0,36 dB saat Ic=0,001A, f= 56,5 Ghz			0,36 dB saat Ic=0,001A, f= 67,6 Ghz		
Figure Merit of lateral. emitter width	βV <sub>CEO</sub> *f <sub>T</sub>	Ghz	1,81+02			1,81+02			1,64e+02			2,14e+02		
	A <sub>E</sub>	μm	0,012			0,09			0,09			0,09		

## BAB 6

### KESIMPULAN

Disain geometri dengan kombinasi lateral dan vertikal berhasil dirancang, disimulasikan dan terbukti menghasilkan beberapa kelebihan terutama *noise figure* yang sangat rendah pada hasil rancangan devais HBT SiGe seperti diuraikan pada kesimpulan ini, sebagai berikut :

- 1) Model HBT IBM generasi pertama yang memiliki *lithography* 0,50  $\mu\text{m}$  dengan  $f_T = 45$  Ghz,  $\beta=110$ ,  $f_{\text{maks}} = 65$  Ghz,  $R_{\text{bb}} = 18,9$  ohm dan  $\beta V_{\text{CE0}} 3,3$  Volt, dengan  $F_n = 1,07$  dB pada  $f_{\text{inp}}=f_T$  berubah parameternya menjadi  $f_T = 79,4$  Ghz,  $\beta=284$ ,  $f_{\text{maks}} = 127$  Ghz serta  $R_{\text{bb}} = 9,0$  ohm dengan  $V_{\text{CE0}} 2,7$  Volt dan  $F_n = 0,36$  dB pada  $f_{\text{inp}}=f_T$  dengan cara ;
  - a) mengubah parameter lateral dengan cara; menambah terminal basis dari satu menjadi dua, memperkecil ukuran model menjadi 80% dari ukuran semula, menurunkan *lithography* menjadi 0,09  $\mu\text{m}$ .
  - b) mengubah parameter vertikal dengan cara; merubah *profile* germanium SiGe pada basis dari segitiga menjadi trapesium, menaikkan *mole fraction* (x) dari 7,5% menjadi 10%, dan mempersempit lebar basis menjadi 50% dari ukuran semula.
- 2) Parameter lateral berpengaruh pada nilai arus kolektor ( $I_C$ ), resistansi parasitis ( $R_{\text{bb}}$ ) dan frekuensi maksimum ( $f_{\text{maks}}$ ) sedangkan parameter vertikal berpengaruh frekuensi threshold ( $f_T$ ) dan current gain ( $\beta$ ). Pemilihan nilai parameter lateral dan vertikal yang tepat, dapat menghasilkan model dengan *noise figure* ( $F_n$ ) yang rendah dengan frekuensi kerja yang tinggi serta arus kolektor ( $I_C$ ) yang rendah.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. S.M Sze, "*Physics of Semiconductor Devices*," John Wiley and Sons 3<sup>rd</sup> Edition, 1999.
- [2]. Hueting R.J.E., "*Charge Carrier Transport in Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors*", Disertasi, Delft University of Technology, 1997
- [3]. Yinggang Li, Harald Jacobsson, Mingquan Bao and Thomas Lewin, "*High-frequency SiGe MMICs - an Industrial Perspective*" Ericsson AB, Ericsson Research, MHSERC, SE-43184 Mölndal, Sweden, 2004
- [4]. Palankovski, vassil, "*Critical modelling issues of SiGe semiconductor Devices*," journal of Telecommunications and Information Technology, 2007.
- [5]. John D. Cressler, "*Using SiGe HBTs for Mixed-Signal Circuits and Systems*": Opportunities and Challenges School of Electrical and Computer Engineering 777 Atlantic Drive, N.W. Georgia Institute of Technology Atlanta, GA 30332-0250, Abs. 1282, 206th Meeting, © 2004 The Electrochemical Society, Inc.
- [6]. V. Ilderem, S.G. Thomas, J.P. John, S. Wipf, D. Zupac, H. Rueda, F. Chai, R. Reuter\*, J. Kirchgessner, J. Teplik, P. Wenckers\*, T. Baker, M. Clifford, J. Griffiths, M. Tawney, M. McCombs," *The Emergence of SiGe:C HBT Technology for RF Applications*," Digital DNATM Laboratories, Semiconductor Products Sector, \*EMEA-Berlin, Motorola Inc, 2100 E. Elliot Rd, MD: EL741, Tempe, AZ, 85284. Phone: (480) 413-3612, Fax: (480) 413-7918, email: [vida.ilderem@motorola.com](mailto:vida.ilderem@motorola.com), diakses Maret 2007
- [7]. Ivanov, tony "*RF SiGe Devices Technology SiGe BiCMOS Intregation Agere system*" Orlando PL, 2007.
- [8]. Freeman G., dkk, "*A 0.18  $\mu\text{m}$  90 GHz  $f_T$  SiGe HBT BiCMOS, ASIC-Compatible, Copper Interconnect Technology for RF and Microwave Applications*", IEDM Tech. Digest, 569 – 572, 1999
- [9]. Douglas J. Paul, "*Si / SiGe heterostructures: From material and physics to devices and circuits*" Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, CB30HE, U.K., 2006, diakses Maret 2007
- [10]. Zhang S., dkk, "*The Effects of Geometrical Scaling on The Frequency Response and Noise Performance of SiGe HBTs*," IEEE Trans. on Electron Dev. Vol.49, No.3, 2002.
- [11]. K.Das, Mukul dkk, "*Performance Analysis of a SiGe/Si Heteronunction Bipolar Transistor for Different Ge –Composition*," University of Calcuta 92 Acharya P.C road, email:nrd@jeee.org, diakses maret 2006.
- [12]. V.D.Kunz dkk, "*Application of Poly crystalline SiGe for gain Control in SiGe Heterojunction*", Departmen of Electronics & Computer Science, University of Southhamton, Southampton So17 1BJ, England, diakses bulan Juni 2008.
- [13]. Shintadewi Julian E., "*Perancangan Heterojunction Bipolar Transistor Silikon Germanium untuk Memperoleh Frekuensi Cutoff dan Frekuensi Osilasi Maksimum Lebih dari 130 GHz*," Disertasi tidak diterbitkan, Universitas Indonesia, 2004.



- [14]. Tossin Alamsyah<sup>1</sup>, Djoko Hartanto<sup>2</sup>, NR Posepawati<sup>3</sup>, E Shinta Dewi Yulian<sup>4</sup> "The Effect of Stripe emitter Area ( $A_E$ ) at the SiGe HBT Frequency Performance" International Conference on Instrumentation communication information technology and biomedical engineering (icci-bme) 2009, Proceedings ISBN:978-979-1344-67-8 IEEE: CFPO987H-CDR
- [15]. Jae-Sung Rieh et al "SiGe Heterojunction Bipolar Transistors and Circuits Toward Terahertz Communication Applications" IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 10, October 2004.
- [16]. M.W. Hsieh, C.C. Ho, H.P. Wang, C.Y. Lee\*, G.J. Chen\*, D.T. Tang\*, and Y.J. Chan "Frequency Response Improvement of 120 GHz fT SiGe HBT by Optimizing the Contact Configurations" Department of Electrical Engineering, National Central University, Chung-li, Taiwan 32054, R. O. C, 2006
- [17]. Mark J. W. Rodwell et al , " Submicron Scaling of HBTs" IEEE Transaction On Electron Devices, vol 48, no.11 November 2001.
- [18]. Christoph Schelling "Growth and characterization of selforganized and organized Si and Si<sub>(1-x)</sub>Ge<sub>x</sub> nanostructures", Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften Linz, November 2000
- [19]. Sung-Yong Chung, " Si/SiGe Heterostructures Material, Physics, Quantum Functional Devices and Their Intregation with Heterostructures Bipolar Transistor," Dissertation, The Ohio State University, 2005
- [20]. Erdal Suvar, "SiGeC Heterojunction Bipolar Transistors", Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden 2003
- [21]. Haizhou Yin, "Strain Relaxation of SiGe on Compliant BPSG and Its Applications" a Dissertation, Faculty of Princeton University Departemen of Electrical Engineering, 2004 , diakses Maret 2008.
- [22]. A.F. Marshall, D.B. Aubertine, W.D. Nix, and P.C. McIntyre, " Misfit dislocation dissociation and Lomer formation in low mismatch SiGe/Si heterostructures." Geballe Laboratory for Advanced Materials and Department of Materials Science and Engineering, Stanford University, Stanford, California 94305.2004.
- [23]. Siranush E. Bezirganyan, Hayk H. Bezirganyan (Jr.)<sup>1</sup>, Hakob P. Bezirganyan and Petros H. Bezirganyan (Jr.), " Determination of Space Shift of Si / SiGe / Si Heterojunction's Cap Layer by Grazing-angle Incidence X-ray Backdiffraction Technique", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 768 © 2003 Materials Research Society
- [24]. Neamen, Donald, "Semiconductor Physics and Devices – Basic Principles" Richard Irwin Inc, 1992 ISBN-0-256-05405-X
- [25]. Douglas J Paul, " Silicon-Germanium Strained Layer Materials in Microelectronics." Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, CB3 0HE, U.K. *Advanced Materials* 11(3), 191-204 (1999) .
- [26]. Damot Tesfaye, " Online Simulation of Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar transistor Using Nanohub Simulator", Thesis Faculty of Technology, Addis Ababa University, 2008

- [27]. Juan M Lopez-Gonzales, Lusi Prat , ‘*The importance of Bandgap Narrowing Distribution between the conduction and Valence band in Abrupt HBTs*’ , IEEE transaction on Electron devices, vol 44, No. 7 July 1997.
- [28]. Hueting R.J.E, “*On the Optimization of SiGe-Base Bipolar Transistors*”, IEEE Transaction on Electron Devices, vol.42, no. 9, September, 1996.
- [29]. Pejcinovic, Branimir, dkk., “*A Numerical Study of Performance Potential of  $Si_{(1-x)}Ge_x$  Pseudomorphic Heterojunction Bipolar Transistor*”, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 39, No. 9, September 1992.
- [30]. Yun Shi, ” On the Consistent Modeling of Band-Gap Narrowing for Accurate Device-Level Simulation of Scaled SiGe HBTs.” IEEE Transaction On Electron Devices, vol.50, May 2003.
- [31]. E. Shintadewi Julian<sup>1</sup> ,Tossin Alamsyah<sup>2</sup>, “ *The Nonlinear Model of Heavy Doping Induced Bandgap Narrowing in SiGe HBT* ” Quality in Research, University of Indonesia, 2006
- [32]. Alamsyah Tossin<sup>1</sup> , E. Shintadewi Julian<sup>2</sup> Djoko Hartanto<sup>3</sup>, NR Puspawati<sup>4</sup>, “*Modelling of Bandgap Narrowing (BGN) in SiGe HBT by Gauss-Newton method* “, Seminar Nasional FMIPA, – UMM MALANG, 2010
- [33]. Alamsyah, Tossin dkk, “ *Modeling energi bandgap pada HBT SiGe*” Seminar hasil Penelitian Dasar, DP2M Dikti, Nopember , tahun 2006.
- [34]. Onur Esame, Yasar Gurbuz\*, Ibrahim Tekin, Ayhan Bozkurt, ” *Performance comparison of state-of-the-art heterojunction bipolar devices (HBT) based on AlGaAs/GaAs, Si/SiGe and InGaAs/InP.*” Microelectronics Journal 35 (2004) 901–908., [www.elsevier.com/locate/mejo](http://www.elsevier.com/locate/mejo), 2004
- [35]. Tossin Alamsyah<sup>1</sup>, Djoko Hartanto<sup>2</sup>, NR Poespawati<sup>3</sup>, ” *Penskalaan Dimensi Lateral pada Heterojunction Bipolar Transistor  $Si / Si_{1-x}Ge_x$ .*” Seminar Nasional Penelitian Teknologi Industri Universitas Trisakti ISBN 978-979-18625-1-8 ,28 Januari 2009
- [36]. Liang-Hung Lu, Saeed Mohammadi, Zhenqiang Ma, George E. Ponchak +, Samuel A. Alterovitz +, Karl M. Strohm ++, Johann-Friedrich Luy ++, ”*IPower SiGe Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs) Fabricated by Fully Self-Aligned Double Mesa Technology.*” The University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2122 +NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH 44135 ++Dailmer-Chrysler Research Center, Ulm, Germany ; Diakses Maret 2008
- [37]. BIPOLE3 v.5.3 .REFERENCE MANUAL February 2006 BIPSIM Inc.,131 Langarth Street East, London, Ontario,,NC6 1Z4 Canada email: [info@bipsim.com](mailto:info@bipsim.com) <http://www.bipsim.com>
- [38]. BIPOLE3 TUTORIAL GUIDE BIPSIM Inc. 131 Langarth St. East, London, Ontario, N6C 1Z4 Canada email: [info@bipsim.com](mailto:info@bipsim.com) <http://www.bipism.com>, 2006
- [39]. J.C.J Paasschens, W.J Klosssteman, R.J Havens, ” *Modelling two SiGe HBT spevific feature for circuit Simulation*”, Philips Research Laboratories, email:jeroen.Passchens@Philips.com, IEEE 2001
- [40]. Tianbing Chen, ” *Operation of SiGe BiCMOS Technology Under Extreme Environments.*” Dissertation School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology December 2005

- [41]. Saeed Mohammadi, C. R. Selvakumar, ,” *Analysis of BJT’s, Pseudo-HBT’s, and HBT’s by Including the Effect of Neutral Base Recombination.*” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 41, NO. 10. OCTOBER 1994
- [42]. Liang, Qingqing, ”*Systematic Analysis and Optimization of Broadband Noise and Linearity in Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistor,*” Dissertation , School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, 2004.
- [43]. Michael Schroter a,\*, Hung Tran a, Wolfgang Kraus b “*Germanium profile design options for SiGe LEC HBTs*” a Department of Electron devices and Integrated Circuits, University of Technology Dresden, 13, D-01062 Dresden, Germany, 2003
- [44]. M.D.R. Hashim, R.F. Lever, P. Ashburn and G.J. Parker.” *Effect of Transistor Geometry on the Electrical Characteristics of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> Heterojunction Bipolar Transistors at Low Temperatures.*” JOURNAL DE PHYSIQUE IV Colloque 3, supplement au Journal de Physique 111, Volume 6, avril 1996
- [45]. Mukul K Das 1 , N. R. Das 2 and P. K. Basu 2.” *Performance Analysis of a SiGe/Si Heterojunction Bipolar Transistor for Different Ge-composition.*” Computer Centre, 2 Institute of Radio Physics and Electronics University of Calcutta, 92 Acharya P. C. Road, diakses Maret 2008
- [46]. L.C.M. van den Oever<sup>1</sup>, L. K. Nanver<sup>1</sup>, J. W. Slotboom “*Comparing the High-Frequency Performance of Box-Ge and Graded-Ge SiGe HBT's*” Delft University of Technology Laboratory of Electronic Components, Technology and Materials (ECTM) – DIMES, Feldmannweg 17, P.O. Box 5053, 2600 GB Delft, The Netherlands Tel.: +31 - 15 278 2185, Email: loever@dimes.tudelft.nl, diakses maret 2008
- [47]. J.Eberhardt, E. Kasper, “*To the limit of SiGe Hetero Bipolar Transistor : HBT Design over 200 Ghz*”, University of Stuttgart, diakses bulan Juli 2007.
- [48]. Agnieszka Zaręba and Andrzej Jakubowski, ” *Optimization of selected parameters of SiGe HBT transistors.*” Paper invited Journal of Telecommunication and Information Technology , 2000.
- [49]. John D. Cressler, “*SiGe HBT Technology: A New Contender for Si-Based RF and Microwave Circuit Applications,*” invited Paper , IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Vol. 46, No. 5, May 1998
- [50]. J.Gebner, dkk, “*Simulation of the Frequency Limits of SiGe HBTs*”, Technische Universität Ilmenau, Institut Festkörperelektronika [2007] joerg.gessner@e-technik.tu-ilmenau.de.
- [51]. B.Neinhus, P. Graf, S. Decker, and B. Meinerzhagen, ” *Examination of Transient Drift-Diffusion and Hydrodynamic Modelling Accuracy for SiGe HBTs by 2D Monte-Carlo Device Simulation,*” Institut Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik Univer Bremen, Kufsteiner Straße Postfach 33 04 40, 28334 Bremen, Germany, E-mail: [neinhus@item.uni-bremen.de](mailto:neinhus@item.uni-bremen.de), diakses Maret 2008
- [52]. Jin Tang, et al, ” *Modeling and Characterization of SiGe HBT Low-Frequency Noise Figures-of-Merit for RFIC Applications,*” IEEE

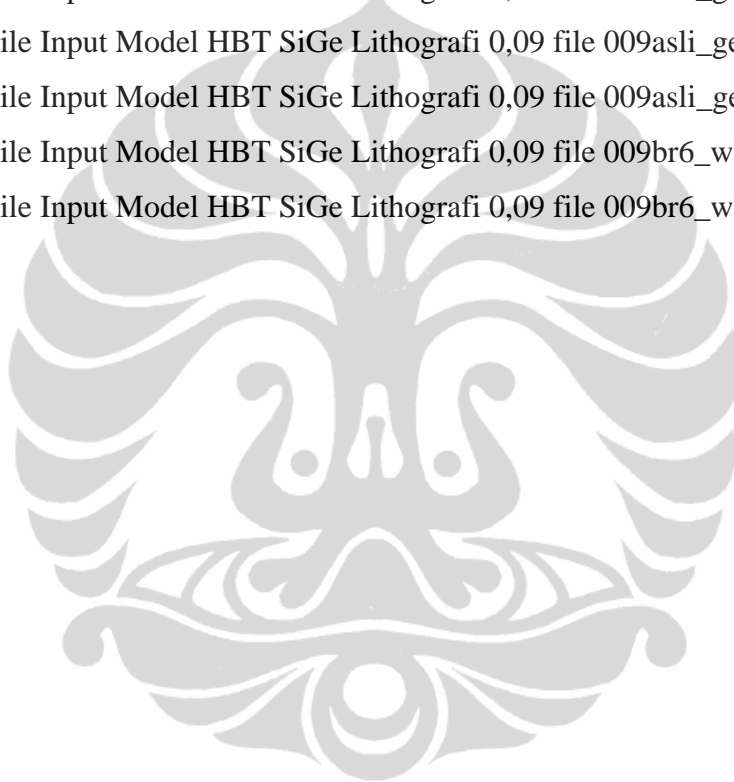
Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol 50, No.11, November 2002.

- [53]. Christoph Jungemann dkk ,” *Full-Band Monte Carlo Devices Simulation of a Si/SiGe-HBT with a Resistive Ge Profile.*” IECE Transaction Electron, Vol.E83-Cno.8 August 2000.
- [54]. Roulston D.J., *Bipole3 User’s Manual*, Bipsim Inc., Canada, 2006.
- [55]. B. NEINHIS\*, S. DECKER, P. GRAF, F. M. BUFLER and B. MEINERZHAGEN,” *Consistent Hydrodynamic and Monte-Carlo Simulation of SiGe HBTs Based on Table Models for the Relaxation Times.*” VLSI DESIGN 1998, Vol. 8, Nos. (1-4), pp. 387-391
- [56]. [Http://www.bipole3.com/mainframe.html](http://www.bipole3.com/mainframe.html)
- [57]. IBM Global Engineering Solutions “*SiGe BiCMOS 6WL: Next-generation benefits in a lower-cost technology*” [www.ibm.com](http://www.ibm.com) , diakses Mei 2009



## **LAMPIRAN A**

1. File Input Model Acuan File\_Kal\_IBM4
2. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,18 file 018asli
3. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,12file 012asli
4. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli
5. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009baru6
6. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge03
7. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge10
8. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge8
9. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb075
10. File Input Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050



```
&TITLE
kal_ibm4 : Kalibrasi dengan IBM HBT, tabulated profile
          non equilibrium transport ion=20, Vcb=0V, isic=1

&PARAM
# Bias Voltages
VCIN=0.0,VBEMIN=0.4,VBEMAX=1.1,
# Epi parameters
XEND=0.6e-4,TEPI=0.6e-4,NEPI=5.0e16,XSUB=0.05e-4,
IPLUS=1,REXTSQ=2,
# Integrated device parameters & mask layout definition
MASK=1,IC=1,LOCAT=1,
ELEM=0.8e-4,ESB=0.8e-4,ECB=0.8e-4,ELPB=2.8e-4,ELEN=1.8e-4,
ELC=0.8e-4,ELCN=0.4e-4,ELNS=6.0e-4,ELPS=6.5e-4,
B=2.5e-4,BPB=3.0e-4,BPC=3.0e-4,BNS=4.0e-4,BPS=4.5e-4,WPS=0.05e-4,
# Polysilicon emitter data
IPOLY=-3,WPOL=.15E-04,NPOL=1.0e21,DELTA=7,
# Impurity profile data for active region
NPN=1,IMPUR=-3,
# SIC Layer
ISIC=1,
# Recombination parameter
TAUDE=10e-9,PEE=1.2,
# Bandgap parameter
IGAP=-7,DELEG=0.74,CBGN1=0.00692,CBGN2=1.3e17,CBGN3=0.009,CBGN4=1.3e17,
ISIGE=5,
# Mobility model and parameter base on Klaasen paper parameter, include mi
IMOB=0,
CMUPA1=1.3,CMUPA2=17.5,CMUPA3=1.0,
# Side wall
IEDGE=2,
# Step size and precision
RA=1.1,NTOT=50,ION=20,IPRIN1=4,IPRIN2=3,
&DATA
32
1.0E+21  2.8e+17  0          0
3.0E+20  9.0E+17  0.010E-4  0
5.0E+19  2.5E+18  0.020E-4  0.002
1.7E+18  2.2E+18  0.030E-4  0.018
3.0E+17  2.5E+18  0.035E-4  0.026
6.0E+16  3.5E+18  0.042E-4  0.033
2.0E+16  5.0E+18  0.050E-4  0.041
1.0E+16  3.8E+18  0.060E-4  0.050
```

1.5E+16	2.2E+18	0.070E-4	0.057
1.8E+16	1.0E+18	0.080E-4	0.065
2.2E+16	4.5E+17	0.088E-4	0.072
3.5E+16	1.8E+17	0.100E-4	0.055
4.5E+16	6.5E+16	0.112E-4	0.015
5.0E+16	4.5E+16	0.120E-4	0.003
6.0E+16	3.0E+16	0.130E-4	0
6.5E+16	2.0E+16	0.140E-4	0
7.0E+16	1.8E+16	0.150E-4	0
1.0E+17	7.0E+15	0.170E-4	0
1.2E+17	2.0E+15	0.195E-4	0
2.0E+17	1.0E+15	0.220E-4	0
2.2E+17	3.0E+14	0.250E-4	0
3.0E+17	1.0E+14	0.270E-4	0
4.0E+17	2.0E+13	0.300E-4	0
5.0E+17	7.0E+12	0.330E-4	0
1.0E+18	4.0E+11	0.400E-4	0
1.0E+18	1.0E+11	0.435E-4	0
1.0E+18	3.0E+10	0.470E-4	0
9.0E+17	5.0E+09	0.510E-4	0
1.5E+18	1.0E+09	0.535E-4	0
3.0E+18	7.0E+08	0.560E-4	0
6.0E+18	3.0E+08	0.580E-4	0
1.0E+19	1.0E+08	0.600E-4	0

&END

```
&TITLE
SiGe HBT ae=018x10
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.18e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.20e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,x3=.25e-04,x3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm
```



```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```
&TITLE
SiGe HBT ae=012x10
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.12e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,x3=.25e-04,x3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm
```

```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```
&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,xs3=.25e-04,xs3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm
```

```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```
&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10, bl 12um
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=8.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=9.6e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=12.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=9.6e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,x3=.25e-04,x3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm
```

```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```
&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,xe3=.25e-04,xe3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.03,xgep=0.03,
xjlg=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm
```



```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```

&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,x3=.25e-04,x3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rextsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.10,xgep=0.10,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm

```

```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```

&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=10.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=12.e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=15.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=12.e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.035e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,xs3=.25e-04,xs3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rectsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.08,xgep=0.08,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.06e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm

```

```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```

&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10, bl 12um
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=8.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=9.6e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=12.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=9.6e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.028e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,xs3=.25e-04,xs3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rextsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.05e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm

```

```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



```

&TITLE
SiGe HBT ae=0.09x10, bl 12um
&PARAM
#####:
# 1) Layout definintions
mask=1,ic=2,
elem=0.09e-4,b=8.e-4
elpb=1.1e-4,bpb=9.6e-4
esb=0.20e-4,ecb=0.2e-04,
elns=3.e-4,bns=12.e-4
elps=6.e-4,bps=18.e-4
bpc=9.6e-4,elcn=0.5e-4,elc=0.5e-4,elen=1.0e-4
wps=0.02e-4
# 2) impurity profile
impur=1,
NEPI=2.0E+16
nel=1.e20,nxel=4.0,xel=.01e-04,
nbl=1.e19,nxbl=4.0,xbl=.022e-04,
# 3) SIC for analytic fit profile
isic=1,ne3=2e18,xs3=.25e-04,xs3p=.5e-04,
# 4) Buried layer parameters
xend=1.2e-4,tepi=1.2e-04,nbur=3,nsubo=2e19,xsub=0.3e-04,xbl2=.5e-04,
# 5) Poly emitter
wpol=0.2e-4,npol=1e21,ipoly=3,
# 6) Contacts
rpcon=1.0e-7,rncon=1.e-7
# 7) collector Sinker
ncol=1.e20,xncol=5.e-5,
# 8) Extrinsic base + Link base
iplus=1,rextsq=2,
# 9) P+ isolation
npwal=1.e20,xpw=0.7e-04,p3=0,
# 10) SiGe layer
igap=7,isige=1,xge=0.05,xgep=0.05,
xj1g=0.01e-4,xram1=0.005e-4,
xj2g=0.04e-4,xram2=0.005e-4
# 11) Peripheral injection
neut2d=1,
# 12) Recombination
pee=1.2, taue=1e-8,
# 13) numerical precision
RA=1.1,arev=.001,
# hdm

```

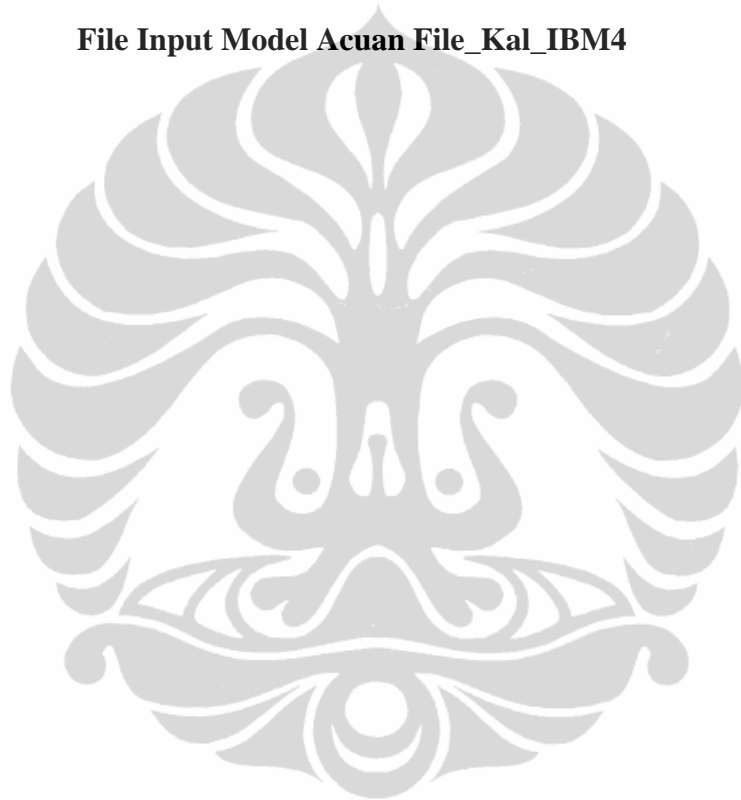


```
ihdm=2,  
# breakdown voltage calculation  
ion=20,iprin1=4,iprin2=3,  
# 14) Bias  
vcin=0.0,vbemin=0.7,vbemax=1.0,  
&END
```



## **LAMPIRAN B**

**File Input Model Acuan File\_Kal\_IBM4**



```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*       Electrical Engineering Department, Universitas Indonesia
*                               ** NO COPYING IS PERMITTED **
*
*****
```

Input file: c:\shinta\bipole5.3.1\kal\_ibm4.bip

KAL\_IBM4 : KALIBRASI DENGAN IBM HBT, TABULATED PROFILE

NON EQUILIBRIUM TRANSPORT ION=20, VCB=0V, ISIC=1

the non-default valued parameters are:

B	=0.2500E-03,	BNS	=0.4000E-03,	BPB	=0.3000E-03,	BPC	=0.30001		
BPS	=0.4500E-03,	CBGN1	=0.6920E-02,	CBGN2	=0.1300E+18,	CBGN4	=0.13001		
CMUPA1	=0.1300E+01,	CMUPA2	=0.1750E+02,	CMUPA3	=0.1000E+01,	DELEG	=0.74001		
DELTA	=0.7000E+01,	ECB	=0.8000E-04,	ELC	=0.8000E-04,	ELCN	=0.40001		
ELEM	=0.8000E-04,	ELEN	=0.1800E-03,	ELNS	=0.6000E-03,	ELPB	=0.28001		
ELPS	=0.6500E-03,	ESB	=0.8000E-04,	IC	=	1,	IGAP =		
IMOB	=	0,	IMPUR	=	-3,	ION	=	20,	IPLUS =
IPOLY	=	-3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=	3,	ISIC =
ISIGE	=	5,	LOCAT	=	1,	MASK	=	1,	NEPI =0.50001
NPOL	=0.1000E+22,	NTOT	=	50,	PEE	=0.1200E+01,	RA	=0.11001	
REXTSQ	=0.2000E+01,	TAUDE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.6000E-04,	VBEMAX	=0.11001		
VBEMIN	=0.4000E+00,	VCIN	=0.0000E+00,	WPOL	=0.1500E-04,	WPS	=0.50001		
XEND	=0.6000E-04,	XSUB	=0.5000E-05						

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 5 Tabular Ge fraction

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
8.00E-05 2.50E-04 8.00E-05 8.00E-05 3.00E-04 2.80E-04

32 lines of tabulated impurity profile values used, nepi = 0.500E+17

Note: In collector sinker, a value xsub = 0.500E-05 is used

XJ1 = 2.94E-06 XJ2 = 1.18E-05 XEND = 6.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.95E+03 8.49E+01 4.08E+03 5.41E+02 1.32E+02 1.10 605

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEM EG GUEM EG/MU BETMAX  
1.58E+13 2.08E+13 8.46E+11 2.33E+09 8.58E+14 2.99E+12 2.42E+10 1.04E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

NOTE: vertical tabular or implanted impurity profiles represented for  
sidewall analysis by quasi gaussian functions with following values

NE1 NXE1 XE1 NB1 NXB1 XB1  
9.98E+20 1.62E+00 9.96E-07 4.94E+18 1.68E+00 4.77E-06

ionization integral results: table 4-2

using ionization co-efficients of marsland with

non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.887E-05	0.186E-04	0.377E+00	0.585E+05	0.405E-32	0.100E+01	0.247E+33
0.879E-05	0.189E-04	0.433E+00	0.641E+05	0.406E-32	0.100E+01	0.246E+33
0.870E-05	0.192E-04	0.494E+00	0.701E+05	0.407E-32	0.100E+01	0.246E+33
0.861E-05	0.196E-04	0.565E+00	0.769E+05	0.414E-32	0.100E+01	0.241E+33
0.852E-05	0.201E-04	0.648E+00	0.843E+05	0.292E-27	0.100E+01	0.342E+28
0.843E-05	0.204E-04	0.744E+00	0.926E+05	0.359E-22	0.100E+01	0.279E+23
0.834E-05	0.208E-04	0.853E+00	0.102E+06	0.489E-18	0.100E+01	0.204E+19
0.825E-05	0.212E-04	0.978E+00	0.111E+06	0.110E-14	0.100E+01	0.200E+15

```

0.825E-05 0.213E-04 0.978E+00 0.111E+06 0.112E-14 0.100E+01 0.889E+15
0.816E-05 0.217E-04 0.112E+01 0.122E+06 0.613E-12 0.100E+01 0.163E+13
0.808E-05 0.222E-04 0.128E+01 0.134E+06 0.105E-09 0.100E+01 0.955E+10
0.799E-05 0.225E-04 0.146E+01 0.147E+06 0.697E-08 0.100E+01 0.144E+09
0.790E-05 0.229E-04 0.167E+01 0.161E+06 0.214E-06 0.100E+01 0.468E+07
0.781E-05 0.235E-04 0.190E+01 0.176E+06 0.349E-05 0.100E+01 0.287E+06
0.772E-05 0.240E-04 0.215E+01 0.192E+06 0.344E-04 0.100E+01 0.290E+05
0.763E-05 0.246E-04 0.244E+01 0.210E+06 0.227E-03 0.100E+01 0.440E+04
0.754E-05 0.250E-04 0.276E+01 0.228E+06 0.109E-02 0.100E+01 0.920E+03
0.745E-05 0.256E-04 0.312E+01 0.248E+06 0.399E-02 0.100E+01 0.250E+03
0.736E-05 0.262E-04 0.352E+01 0.270E+06 0.118E-01 0.101E+01 0.838E+02
0.728E-05 0.268E-04 0.396E+01 0.293E+06 0.292E-01 0.103E+01 0.332E+02
0.719E-05 0.274E-04 0.445E+01 0.318E+06 0.623E-01 0.107E+01 0.150E+02
0.710E-05 0.279E-04 0.499E+01 0.345E+06 0.117E+00 0.113E+01 0.754E+01
0.701E-05 0.285E-04 0.559E+01 0.373E+06 0.197E+00 0.124E+01 0.408E+01
0.692E-05 0.291E-04 0.624E+01 0.403E+06 0.300E+00 0.143E+01 0.233E+01
0.683E-05 0.297E-04 0.695E+01 0.435E+06 0.420E+00 0.173E+01 0.138E+01
0.674E-05 0.303E-04 0.772E+01 0.469E+06 0.550E+00 0.222E+01 0.820E+00
0.665E-05 0.307E-04 0.856E+01 0.504E+06 0.679E+00 0.312E+01 0.472E+00
0.656E-05 0.313E-04 0.946E+01 0.541E+06 0.803E+00 0.508E+01 0.245E+00
0.647E-05 0.319E-04 0.104E+02 0.580E+06 0.918E+00 0.122E+02 0.894E-01
0.639E-05 0.325E-04 0.115E+02 0.621E+06 0.102E+01-0.446E+02-0.219E-01

```

```

vbr = 1.13E+01 +/- 4.%, x = 3.25E-05 ioniz. integral: plane junction 2
0.214E-05 0.402E-05 0.985E+00 0.858E+06 0.145E+00 0.117E+01

```

ionization integral results: table 4-3

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.212E-05	0.407E-05	0.107E+01	0.906E+06	0.162E+00	0.119E+01
0.211E-05	0.411E-05	0.116E+01	0.956E+06	0.181E+00	0.122E+01
0.209E-05	0.416E-05	0.125E+01	0.101E+07	0.201E+00	0.125E+01
0.208E-05	0.421E-05	0.135E+01	0.106E+07	0.222E+00	0.129E+01
0.206E-05	0.426E-05	0.146E+01	0.112E+07	0.244E+00	0.132E+01
0.205E-05	0.431E-05	0.157E+01	0.117E+07	0.266E+00	0.136E+01
0.204E-05	0.436E-05	0.169E+01	0.123E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.202E-05	0.441E-05	0.181E+01	0.130E+07	0.315E+00	0.146E+01
0.201E-05	0.447E-05	0.195E+01	0.136E+07	0.341E+00	0.152E+01
0.199E-05	0.452E-05	0.209E+01	0.143E+07	0.367E+00	0.158E+01
0.198E-05	0.458E-05	0.224E+01	0.150E+07	0.395E+00	0.165E+01
0.197E-05	0.463E-05	0.240E+01	0.157E+07	0.423E+00	0.173E+01

```

0.197E-05 0.469E-05 0.256E+01 0.164E+07 0.452E+00 0.183E+01
0.195E-05 0.469E-05 0.256E+01 0.164E+07 0.452E+00 0.183E+01
0.194E-05 0.475E-05 0.274E+01 0.172E+07 0.482E+00 0.193E+01
0.192E-05 0.481E-05 0.293E+01 0.180E+07 0.513E+00 0.205E+01
0.191E-05 0.487E-05 0.312E+01 0.188E+07 0.545E+00 0.220E+01
0.189E-05 0.493E-05 0.333E+01 0.197E+07 0.577E+00 0.236E+01
0.188E-05 0.500E-05 0.355E+01 0.205E+07 0.610E+00 0.257E+01
0.187E-05 0.507E-05 0.377E+01 0.214E+07 0.644E+00 0.281E+01
0.185E-05 0.513E-05 0.401E+01 0.224E+07 0.679E+00 0.311E+01
0.184E-05 0.519E-05 0.427E+01 0.233E+07 0.714E+00 0.350E+01
0.182E-05 0.527E-05 0.453E+01 0.243E+07 0.750E+00 0.400E+01
0.181E-05 0.533E-05 0.481E+01 0.254E+07 0.787E+00 0.470E+01
0.180E-05 0.541E-05 0.510E+01 0.264E+07 0.825E+00 0.570E+01
0.178E-05 0.547E-05 0.540E+01 0.275E+07 0.863E+00 0.728E+01
0.177E-05 0.555E-05 0.572E+01 0.287E+07 0.902E+00 0.102E+02
0.175E-05 0.562E-05 0.606E+01 0.298E+07 0.941E+00 0.169E+02
0.174E-05 0.570E-05 0.641E+01 0.310E+07 0.981E+00 0.529E+02
0.172E-05 0.577E-05 0.677E+01 0.323E+07 0.102E+01-0.458E+02

```

vbr = 6.58E+00 +/- 1.%, x = 5.77E-06 ioniz. integral: sidewall junction :  
0.730E-05 0.220E-04 0.845E+00 0.104E+06 0.125E-04 0.100E+01 0.798E+05

ionization integral results: table 4-5

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.724E-05	0.222E-04	0.889E+00	0.108E+06	0.194E-04	0.100E+01	0.516E+05
0.718E-05	0.224E-04	0.934E+00	0.112E+06	0.295E-04	0.100E+01	0.339E+05
0.712E-05	0.227E-04	0.982E+00	0.116E+06	0.440E-04	0.100E+01	0.227E+05
0.706E-05	0.229E-04	0.103E+01	0.120E+06	0.646E-04	0.100E+01	0.155E+05
0.700E-05	0.232E-04	0.108E+01	0.124E+06	0.934E-04	0.100E+01	0.107E+05
0.694E-05	0.234E-04	0.113E+01	0.128E+06	0.133E-03	0.100E+01	0.752E+04
0.688E-05	0.237E-04	0.119E+01	0.133E+06	0.187E-03	0.100E+01	0.536E+04
0.683E-05	0.239E-04	0.125E+01	0.137E+06	0.259E-03	0.100E+01	0.387E+04
0.677E-05	0.241E-04	0.130E+01	0.142E+06	0.354E-03	0.100E+01	0.283E+04
0.671E-05	0.244E-04	0.137E+01	0.146E+06	0.478E-03	0.100E+01	0.209E+04
0.665E-05	0.247E-04	0.143E+01	0.151E+06	0.638E-03	0.100E+01	0.157E+04
0.659E-05	0.249E-04	0.149E+01	0.156E+06	0.842E-03	0.100E+01	0.119E+04
0.653E-05	0.252E-04	0.156E+01	0.161E+06	0.110E-02	0.100E+01	0.908E+03
0.647E-05	0.255E-04	0.163E+01	0.166E+06	0.142E-02	0.100E+01	0.702E+03
0.641E-05	0.257E-04	0.170E+01	0.172E+06	0.182E-02	0.100E+01	0.548E+03
0.635E-05	0.260E-04	0.178E+01	0.177E+06	0.231E-02	0.100E+01	0.431E+03

```
0.629E-05 0.263E-04 0.185E+01 0.182E+06 0.291E-02 0.100E+01 0.343E+03
0.623E-05 0.265E-04 0.193E+01 0.188E+06 0.363E-02 0.100E+01 0.274E+03
0.617E-05 0.268E-04 0.201E+01 0.194E+06 0.450E-02 0.100E+01 0.221E+03
0.612E-05 0.271E-04 0.210E+01 0.200E+06 0.552E-02 0.101E+01 0.180E+03
0.606E-05 0.274E-04 0.218E+01 0.205E+06 0.673E-02 0.101E+01 0.147E+03
0.600E-05 0.276E-04 0.227E+01 0.212E+06 0.816E-02 0.101E+01 0.122E+03
0.594E-05 0.279E-04 0.236E+01 0.218E+06 0.981E-02 0.101E+01 0.101E+03
0.588E-05 0.282E-04 0.246E+01 0.224E+06 0.117E-01 0.101E+01 0.843E+02
0.582E-05 0.285E-04 0.255E+01 0.230E+06 0.139E-01 0.101E+01 0.708E+02
0.576E-05 0.288E-04 0.265E+01 0.237E+06 0.164E-01 0.102E+01 0.599E+02
0.570E-05 0.291E-04 0.275E+01 0.244E+06 0.193E-01 0.102E+01 0.508E+02
0.564E-05 0.293E-04 0.286E+01 0.251E+06 0.225E-01 0.102E+01 0.434E+02
0.558E-05 0.296E-04 0.297E+01 0.258E+06 0.261E-01 0.103E+01 0.373E+02
0.552E-05 0.299E-04 0.308E+01 0.265E+06 0.302E-01 0.103E+01 0.321E+02
0.547E-05 0.302E-04 0.319E+01 0.272E+06 0.347E-01 0.104E+01 0.278E+02
0.541E-05 0.305E-04 0.331E+01 0.279E+06 0.397E-01 0.104E+01 0.242E+02
0.535E-05 0.308E-04 0.342E+01 0.287E+06 0.452E-01 0.105E+01 0.211E+02
0.529E-05 0.311E-04 0.355E+01 0.294E+06 0.513E-01 0.105E+01 0.185E+02
0.523E-05 0.314E-04 0.367E+01 0.302E+06 0.579E-01 0.106E+01 0.163E+02
0.517E-05 0.317E-04 0.380E+01 0.310E+06 0.651E-01 0.107E+01 0.143E+02
0.511E-05 0.320E-04 0.393E+01 0.318E+06 0.730E-01 0.108E+01 0.127E+02
0.505E-05 0.323E-04 0.406E+01 0.326E+06 0.814E-01 0.109E+01 0.113E+02
0.499E-05 0.326E-04 0.420E+01 0.334E+06 0.905E-01 0.110E+01 0.100E+02
```

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 8.32E-08 F/sq.cm RBSQ = 3.04E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 8.32E-08 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm,

RBB = 3.19E+02 RBEXT = 5.97E-01 IC = 1 NBUR = 0

P+ Sidewall cap. = 0.00E+00 F; Total plane BL capacitance = 1.99E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.00E-06 ohm; RCEXT\*CSUB = 6.65E-22 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

\*\*\* WARNING: collector-substrate sidewall capacitance simulation incomplete  
Re-run using iedge=-10 with user input values

CCS(PERIPHERY)= 0.00E+00 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 2.11E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 4.49E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 1.33E-12 F/CM. CJC(PLANE)= 8.32E-08 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 1.04E-14 CJCO = 8.52E-15 CJCS = 1.99E-15

vioeb=0.957 viocb=0.890 xbc= 8.32E-06 xcc= 2.098E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 1.00E-08 taue = 1.00E-07 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = -3

wpol = 0.150E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm-3

delta = 0.700E+01 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	cc
	jn		vox		tpoly		vsur	
1	1.80E-03	1.36E+02	4.00E-01	9.23E-06	2.39E-13	5.96E-13	1.72E+04	4.271
1	-1.32E-05	1.28E+02	1.00E+00	9.72E-10	8.04E-13	8.57E-14	9.23E+10	-1.811
1	1.40E-05	1.16E-05	3.55E+17	2.22E+17	3.36E+09	2.11E+09	5.53E-07	9.051
	1.80E-03		3.31E-10		9.46E-14		1.86E+05	
.								
2	3.58E-03	1.35E+02	4.18E-01	4.73E-06	2.41E-13	5.95E-13	3.37E+04	4.271
2	-2.65E-05	1.28E+02	1.01E+00	7.08E-10	8.03E-13	8.57E-14	9.23E+10	5.291
2	2.79E-05	1.16E-05	3.52E+17	2.22E+17	6.73E+09	4.25E+09	5.59E-07	9.051
	3.58E-03		6.59E-10		9.52E-14		1.86E+05	
.								
3	7.13E-03	1.34E+02	4.36E-01	2.38E-06	2.43E-13	5.94E-13	6.69E+04	4.271
3	-5.30E-05	1.28E+02	1.01E+00	5.17E-10	8.02E-13	8.57E-14	9.23E+10	1.891
3	5.56E-05	1.16E-05	3.48E+17	2.22E+17	1.35E+10	8.59E+09	5.60E-07	9.051
	7.13E-03		1.31E-09		9.57E-14		1.86E+05	
.								
4	1.42E-02	1.34E+02	4.54E-01	1.20E-06	2.46E-13	5.88E-13	1.32E+05	4.271
4	-1.06E-04	1.28E+02	1.01E+00	3.77E-10	8.06E-13	8.76E-14	9.22E+10	-2.851
4	1.11E-04	1.15E-05	3.45E+17	2.22E+17	2.69E+10	1.74E+10	5.61E-07	9.171
	1.42E-02		2.60E-09		9.63E-14		1.86E+05	
.								
5	2.81E-02	1.33E+02	4.72E-01	6.12E-07	2.48E-13	5.95E-13	2.60E+05	4.361



5	-2.12E-04	1.27E+02	1.01E+00	2.70E-10	8.30E-13	8.57E-14	9.05E+10	2.75E+05
5	2.21E-04	1.16E-05	3.41E+17	2.22E+17	5.38E+10	3.51E+10	5.68E-07	9.05E+05
	2.81E-02		5.17E-09		9.70E-14		1.86E+05	
6	5.59E-02	1.32E+02	4.90E-01	3.13E-07	2.51E-13	5.96E-13	5.08E+05	4.36E+05
6	-4.24E-04	1.27E+02	1.01E+00	1.98E-10	8.30E-13	8.57E-14	9.03E+10	-4.51E+05
6	4.40E-04	1.16E-05	3.37E+17	2.22E+17	1.08E+11	7.10E+10	5.80E-07	9.05E+05
	5.59E-02		1.03E-08		9.76E-14		1.86E+05	
7	1.11E-01	1.31E+02	5.08E-01	1.61E-07	2.54E-13	5.96E-13	9.90E+05	4.36E+05
7	-8.48E-04	1.27E+02	1.01E+00	1.45E-10	8.31E-13	8.57E-14	9.02E+10	-2.47E+05
7	8.77E-04	1.16E-05	3.34E+17	2.22E+17	2.15E+11	1.44E+11	5.92E-07	9.05E+05
	1.11E-01		2.04E-08		9.83E-14		1.86E+05	
8	2.20E-01	1.30E+02	5.25E-01	8.23E-08	2.56E-13	5.95E-13	1.93E+06	4.36E+05
8	-1.69E-03	1.26E+02	1.01E+00	1.04E-10	8.30E-13	8.57E-14	9.01E+10	4.96E+05
8	1.74E-03	1.16E-05	3.30E+17	2.22E+17	4.31E+11	2.90E+11	6.06E-07	9.05E+05
	2.20E-01		4.05E-08		9.88E-14		1.86E+05	
9	4.36E-01	1.29E+02	5.43E-01	4.27E-08	2.59E-13	5.96E-13	3.73E+06	4.45E+05
9	-3.38E-03	1.26E+02	1.01E+00	7.66E-11	8.58E-13	8.57E-14	8.85E+10	-6.88E+05
9	3.47E-03	1.16E-05	3.26E+17	2.22E+17	8.61E+11	5.87E+11	6.21E-07	9.05E+05
	4.36E-01		8.02E-08		9.96E-14		1.86E+05	
10	8.66E-01	1.28E+02	5.61E-01	2.17E-08	2.62E-13	5.94E-13	7.32E+06	4.45E+05
10	-6.74E-03	1.25E+02	1.01E+00	5.64E-11	8.56E-13	8.57E-14	8.86E+10	1.71E+05
10	6.92E-03	1.16E-05	3.21E+17	2.21E+17	1.72E+12	1.19E+12	6.29E-07	9.05E+05
	8.66E-01		1.59E-07		1.00E-13		1.86E+05	
11	1.71E+00	1.27E+02	5.79E-01	1.10E-08	2.66E-13	5.95E-13	1.44E+07	4.45E+05
11	-1.35E-02	1.24E+02	1.01E+00	4.18E-11	8.57E-13	8.57E-14	8.83E+10	7.04E+05
11	1.38E-02	1.16E-05	3.17E+17	2.21E+17	3.45E+12	2.41E+12	6.31E-07	9.05E+05
	1.71E+00		3.15E-07		1.01E-13		1.86E+05	
12	3.40E+00	1.26E+02	5.97E-01	5.62E-09	2.69E-13	5.94E-13	2.82E+07	4.45E+05
12	-2.69E-02	1.23E+02	1.01E+00	3.02E-11	8.55E-13	8.57E-14	8.83E+10	2.47E+05
12	2.75E-02	1.16E-05	3.12E+17	2.21E+17	6.89E+12	4.88E+12	6.39E-07	9.05E+05
	3.40E+00		6.25E-07		1.02E-13		1.86E+05	
13	6.73E+00	1.25E+02	6.15E-01	2.91E-09	2.73E-13	5.95E-13	5.43E+07	4.53E+05
13	-5.37E-02	1.23E+02	1.01E+00	2.24E-11	8.84E-13	8.57E-14	8.67E+10	8.85E+05
13	5.48E-02	1.16E-05	3.08E+17	2.20E+17	1.38E+13	9.87E+12	6.59E-07	9.05E+05
	6.73E+00		1.24E-06		1.03E-13		1.86E+05	

```

.
14  1.33E+01 1.24E+02 6.33E-01 1.50E-09 2.76E-13 5.95E-13 1.05E+08 4.531
14 -1.07E-01 1.22E+02 1.01E+00 1.67E-11 8.84E-13 8.57E-14 8.64E+10 2.331
14  1.09E-01 1.16E-05 3.03E+17 2.20E+17 2.76E+13 2.00E+13 6.73E-07 9.051
    1.33E+01          2.45E-06          1.03E-13          1.86E+05
.
15  2.63E+01 1.23E+02 6.51E-01 7.63E-10 2.81E-13 6.03E-13 2.05E+08 4.531
15 -2.14E-01 1.21E+02 1.02E+00 1.25E-11 8.82E-13 8.39E-14 8.61E+10 3.091
15  2.18E-01 1.18E-05 2.98E+17 2.20E+17 5.51E+13 4.07E+13 6.76E-07 8.941
    2.63E+01          4.84E-06          1.04E-13          1.86E+05
.
16  5.21E+01 1.22E+02 6.68E-01 3.94E-10 2.85E-13 5.94E-13 3.94E+08 4.611
16 -4.26E-01 1.20E+02 1.01E+00 9.14E-12 9.11E-13 8.57E-14 8.49E+10 2.301
16  4.33E-01 1.16E-05 2.92E+17 2.19E+17 1.10E+14 8.27E+13 6.93E-07 9.051
    5.21E+01          9.58E-06          1.05E-13          1.86E+05
.
17  1.03E+02 1.21E+02 6.86E-01 2.06E-10 2.89E-13 5.96E-13 7.42E+08 4.611
17 -8.48E-01 1.20E+02 1.01E+00 6.87E-12 9.13E-13 8.57E-14 8.46E+10-2.571
17  8.61E-01 1.16E-05 2.87E+17 2.18E+17 2.21E+14 1.68E+14 7.20E-07 9.051
    1.03E+02          1.89E-05          1.06E-13          1.86E+05
.
18  2.03E+02 1.20E+02 7.04E-01 1.06E-10 2.94E-13 5.95E-13 1.41E+09 4.611
18 -1.70E+00 1.18E+02 1.02E+00 5.21E-12 9.13E-13 8.57E-14 8.43E+10 7.791
18  1.72E+00 1.16E-05 2.81E+17 2.18E+17 4.41E+14 3.43E+14 7.24E-07 9.051
    2.03E+02          3.74E-05          1.07E-13          1.86E+05
.
19  4.00E+02 1.19E+02 7.22E-01 5.50E-11 3.00E-13 5.95E-13 2.62E+09 4.701
19 -3.37E+00 1.17E+02 1.02E+00 3.87E-12 9.42E-13 8.57E-14 8.28E+10 4.971
19  3.42E+00 1.16E-05 2.75E+17 2.17E+17 8.82E+14 6.98E+14 7.48E-07 9.051
    4.00E+02          7.37E-05          1.08E-13          1.86E+05
.
20  7.88E+02 1.18E+02 7.40E-01 2.90E-11 3.05E-13 5.97E-13 4.70E+09 4.701
20 -6.71E+00 1.16E+02 1.02E+00 2.96E-12 9.46E-13 8.57E-14 8.23E+10-1.491
20  6.79E+00 1.16E-05 2.68E+17 2.16E+17 1.76E+15 1.42E+15 7.76E-07 9.051
    7.88E+02          1.45E-04          1.09E-13          1.86E+05
.
21  1.55E+03 1.16E+02 7.58E-01 1.51E-11 3.13E-13 5.95E-13 8.25E+09 4.701
21 -1.34E+01 1.14E+02 1.03E+00 2.24E-12 9.49E-13 8.57E-14 8.20E+10 4.041
21  1.36E+01 1.16E-05 2.61E+17 2.16E+17 3.53E+15 2.92E+15 7.86E-07 9.051
    1.55E+03          2.85E-04          1.11E-13          1.86E+05
.
22  3.03E+03 1.14E+02 7.76E-01 8.15E-12 3.20E-13 6.02E-13 1.34E+10 4.781
22 -2.65E+01 1.13E+02 1.03E+00 1.74E-12 9.83E-13 8.39E-14 8.00E+10 3.041
22  2.68E+01 1.18E-05 2.53E+17 2.13E+17 7.06E+15 5.95E+15 8.25E-07 8.941

```

Lampiran B.1 File Output Model Acuan File\_Kal\_IBM4.  
9 of 15

22	2.00E+01	1.10E+02	2.55E+17	2.13E+17	7.00E+13	3.33E+13	8.33E+07	8.33E+07
	3.03E+03		5.57E-04		1.12E-13		1.86E+05	
.								
23	5.89E+03	1.11E+02	7.94E-01	4.42E-12	3.33E-13	6.04E-13	2.04E+10	4.78E+09
23	-5.31E+01	1.10E+02	1.08E+00	1.35E-12	1.00E-12	8.39E-14	7.87E+10	5.48E+09
23	5.37E+01	1.18E-05	2.45E+17	2.13E+17	1.41E+16	1.23E+16	8.45E-07	8.94E+08
	5.89E+03		1.08E-03		1.16E-13		1.86E+05	
.								
24	1.13E+04	1.08E+02	8.13E-01	2.50E-12	3.48E-13	6.07E-13	2.79E+10	4.94E+09
24	-1.05E+02	1.06E+02	1.10E+00	1.09E-12	1.07E-12	8.28E-14	7.55E+10	1.72E+09
24	1.06E+02	1.18E-05	2.36E+17	2.10E+17	2.82E+16	2.53E+16	9.06E-07	8.89E+08
	1.13E+04		2.09E-03		1.19E-13		1.86E+05	
.								
25	2.14E+04	1.01E+02	8.33E-01	1.50E-12	3.74E-13	6.11E-13	3.43E+10	5.10E+09
25	-2.12E+02	1.00E+02	1.21E+00	8.92E-13	1.18E-12	8.18E-14	7.08E+10	-1.89E+09
25	2.14E+02	1.19E-05	2.25E+17	2.08E+17	5.65E+16	5.29E+16	9.42E-07	8.84E+08
	2.14E+04		3.94E-03		1.26E-13		1.87E+05	
.								
26	3.94E+04	9.14E+01	8.55E-01	9.72E-13	4.20E-13	6.24E-13	3.77E+10	5.28E+09
26	-4.31E+02	9.03E+01	1.37E+00	7.83E-13	1.34E-12	7.81E-14	6.46E+10	-1.10E+09
26	4.36E+02	1.22E-05	2.14E+17	2.06E+17	1.13E+17	1.12E+17	9.92E-07	8.64E+08
	3.94E+04		7.25E-03		1.39E-13		1.88E+05	
.								
27	6.99E+04	7.94E+01	8.79E-01	7.19E-13	4.90E-13	6.50E-13	3.73E+10	5.61E+09
27	-8.81E+02	7.84E+01	1.62E+00	6.87E-13	1.65E-12	7.26E-14	5.56E+10	2.98E+09
27	8.92E+02	1.27E-05	2.00E+17	1.99E+17	2.26E+17	2.37E+17	1.12E-06	8.31E+08
	6.99E+04		1.29E-02		1.59E-13		1.90E+05	
.								
28	1.21E+05	6.35E+01	9.08E-01	5.72E-13	6.19E-13	6.83E-13	3.32E+10	6.62E+09
28	-1.91E+03	6.26E+01	2.05E+00	6.60E-13	2.20E-12	6.47E-14	4.46E+10	8.60E+09
28	1.94E+03	1.33E-05	1.83E+17	1.93E+17	4.52E+17	5.24E+17	1.23E-06	7.93E+08
	1.21E+05		2.23E-02		1.97E-13		1.93E+05	
.								
29	2.14E+05	4.67E+01	9.47E-01	4.66E-13	8.40E-13	6.98E-13	2.71E+10	9.75E+09
29	-4.58E+03	4.59E+01	2.67E+00	6.52E-13	3.16E-12	5.38E-14	3.35E+10	1.32E+09
29	4.65E+03	1.35E-05	1.62E+17	1.87E+17	9.03E+17	1.19E+18	1.37E-06	7.80E+08
	2.14E+05		3.93E-02		2.62E-13		1.99E+05	
.								
30	3.73E+05	3.10E+01	1.00E+00	4.55E-13	1.23E-12	6.08E-13	1.94E+10	1.56E+09
30	-1.21E+04	3.04E+01	3.71E+00	6.11E-13	5.27E-12	5.15E-14	2.23E+10	-1.75E+09
30	1.23E+04	1.17E-05	1.36E+17	1.67E+17	1.81E+18	2.58E+18	1.68E-06	9.00E+08
	3.73E+05		6.85E-02		3.81E-13		2.09E+05	
.								
31	6.25E+05	1.63E+01	1.08E+00	5.18E-13	2.11E-12	5.44E-13	1.22E+10	2.20E+09

```

31 -3.83E+04 1.59E+01 5.63E+00 5.72E-13 9.26E-12 4.54E-14 1.33E+10 2.83E+09
31 3.93E+04 1.03E-05 1.06E+17 1.45E+17 3.61E+18 5.42E+18 2.12E-06 1.02E+09
    6.25E+05          1.14E-01          6.82E-13          2.25E+05
.
32 1.00E+06 7.34E+00 1.18E+00 6.44E-13 3.97E-12 4.33E-13 7.27E+09 2.86E+09
32 -1.36E+05 7.07E+00 8.23E+00 5.15E-13 1.63E-11 4.80E-14 7.68E+09 -1.74E+09
32 1.42E+05 8.10E-06 7.89E+16 1.15E+17 7.23E+18 1.07E+19 2.90E-06 1.30E+09
    1.00E+06          1.81E-01          1.40E-12          2.52E+05
.
33 1.48E+06 2.74E+00 1.30E+00 8.39E-13 8.49E-12 6.78E-13 3.83E+09 3.82E+09
33 -5.39E+05 2.58E+00 1.19E+01 5.01E-13 3.10E-11 5.47E-15 3.96E+09 2.83E+09
33 5.73E+05 1.23E-05 5.68E+16 9.10E+16 1.45E+19 2.10E+19 3.93E-06 8.56E+09
    1.48E+06          2.62E-01          3.38E-12          2.88E+05

```

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value

rbe/sq = 5.28E+03 rbase(intrinsic) = 3.59E+02

gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu

5.51E+11 1.56E+09 2.77E+12 2.24E+10

lateral simulation: emitter width = 0.800E-04 cm, vcb = 0.507E-02 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff

1	5.25E-11	4.07E-01	8.74E+01	1.46E+04	5.46E+02	6.00E-13	1.04E+00	2.51E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

1	5.25E-11	2.03E-09	9.12E+01	1.31E+07	3.66E+02	1.28E-14	9.28E-15	1.69E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

2	7.33E-11	4.17E-01	8.85E+01	2.03E+04	5.44E+02	8.28E-13	1.04E+00	3.51E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

2	7.33E-11	2.83E-09	9.12E+01	1.55E+07	3.65E+02	1.29E-14	9.28E-15	1.96E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

3	1.02E-10	4.25E-01	8.98E+01	2.83E+04	5.43E+02	1.14E-12	1.04E+00	4.90E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

3	1.02E-10	3.94E-09	9.34E+01	1.82E+07	3.65E+02	1.29E-14	9.28E-15	2.41E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

4	1.43E-10	4.34E-01	9.08E+01	3.93E+04	5.42E+02	1.57E-12	1.04E+00	6.84E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

4	1.43E-10	5.48E-09	9.36E+01	2.15E+07	3.64E+02	1.29E-14	9.28E-15	2.80E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

5	1.99E-10	4.42E-01	9.21E+01	5.47E+04	5.41E+02	2.16E-12	1.04E+00	9.55E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

5	1.99E-10	7.64E-09	9.54E+01	2.54E+07	3.63E+02	1.30E-14	9.28E-15	3.44E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

6	2.78E-10	4.52E-01	9.30E+01	7.62E+04	5.38E+02	2.99E-12	1.04E+00	1.33E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

6	2.78E-10	1.07E-08	9.56E+01	3.01E+07	3.61E+02	1.30E-14	9.30E-15	4.04E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

7	3.88E-10	4.59E-01	9.44E+01	1.06E+05	5.37E+02	4.11E-12	1.04E+00	1.86E-01
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

7	3.88E-10	1.49E-08	9.82E+01	3.55E+07	3.61E+02	1.30E-14	9.29E-15	4.91E-11
---	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

8	5.42E-10	4.69E-01	9.56E+01	1.48E+05	5.36E+02	5.66E-12	1.04E+00	2.59E-01
8	5.42E-10	2.07E-08	9.87E+01	4.19E+07	3.60E+02	1.31E-14	9.28E-15	5.73E-11
9	7.55E-10	4.77E-01	9.67E+01	2.05E+05	5.35E+02	7.82E-12	1.04E+00	3.62E-01
9	7.55E-10	2.89E-08	9.94E+01	4.95E+07	3.59E+02	1.32E-14	9.28E-15	6.95E-11
10	1.05E-09	4.86E-01	9.75E+01	2.84E+05	5.34E+02	1.08E-11	1.04E+00	5.05E-01
10	1.05E-09	4.04E-08	9.96E+01	5.83E+07	3.58E+02	1.33E-14	9.28E-15	8.26E-11
11	1.47E-09	4.94E-01	9.84E+01	3.94E+05	5.32E+02	1.50E-11	1.04E+00	7.05E-01
11	1.47E-09	5.64E-08	1.01E+02	6.88E+07	3.57E+02	1.35E-14	9.28E-15	1.00E-11
12	2.05E-09	5.03E-01	9.92E+01	5.47E+05	5.31E+02	2.07E-11	1.04E+00	9.84E-01
12	2.05E-09	7.87E-08	1.01E+02	8.12E+07	3.56E+02	1.36E-14	9.28E-15	1.20E-11
13	2.86E-09	5.12E-01	1.00E+02	7.59E+05	5.30E+02	2.86E-11	1.04E+00	1.37E-01
13	2.86E-09	1.10E-07	1.03E+02	9.57E+07	3.56E+02	1.38E-14	9.28E-15	1.44E-11
14	4.00E-09	5.21E-01	1.01E+02	1.05E+06	5.29E+02	3.94E-11	1.04E+00	1.92E-01
14	4.00E-09	1.53E-07	1.04E+02	1.13E+08	3.55E+02	1.39E-14	9.28E-15	1.71E-11
15	5.57E-09	5.29E-01	1.02E+02	1.45E+06	5.27E+02	5.45E-11	1.04E+00	2.67E-01
15	5.57E-09	2.13E-07	1.04E+02	1.33E+08	3.54E+02	1.41E-14	9.28E-15	2.04E-11
16	7.76E-09	5.38E-01	1.03E+02	2.01E+06	5.26E+02	7.55E-11	1.04E+00	3.72E-01
16	7.76E-09	2.97E-07	1.04E+02	1.56E+08	3.53E+02	1.42E-14	9.28E-15	2.46E-11
17	1.08E-08	5.47E-01	1.03E+02	2.78E+06	5.24E+02	1.05E-10	1.04E+00	5.18E-01
17	1.08E-08	4.14E-07	1.05E+02	1.84E+08	3.52E+02	1.44E-14	9.28E-15	2.95E-11
18	1.51E-08	5.55E-01	1.04E+02	3.86E+06	5.24E+02	1.45E-10	1.04E+00	7.23E-01
18	1.51E-08	5.77E-07	1.06E+02	2.17E+08	3.51E+02	1.45E-14	9.28E-15	3.59E-11
19	2.10E-08	5.64E-01	1.04E+02	5.36E+06	5.22E+02	2.01E-10	1.04E+00	1.01E+00
19	2.10E-08	8.04E-07	1.06E+02	2.56E+08	3.51E+02	1.45E-14	9.28E-15	4.29E-11
20	2.93E-08	5.73E-01	1.05E+02	7.46E+06	5.21E+02	2.80E-10	1.04E+00	1.40E+00
20	2.93E-08	1.12E-06	1.06E+02	3.03E+08	3.50E+02	1.46E-14	9.28E-15	5.24E-11
21	4.08E-08	5.82E-01	1.05E+02	1.04E+07	5.19E+02	3.88E-10	1.04E+00	1.96E+00
21	4.08E-08	1.56E-06	1.07E+02	3.57E+08	3.49E+02	1.46E-14	9.28E-15	6.25E-11

22	5.69E-08	5.90E-01	1.06E+02	1.44E+07	5.18E+02	5.37E-10	1.04E+00	2.73E+00
22	5.69E-08	2.18E-06	1.08E+02	4.21E+08	3.48E+02	1.47E-14	9.28E-15	7.62E-15
23	7.93E-08	5.99E-01	1.07E+02	2.00E+07	5.17E+02	7.45E-10	1.04E+00	3.80E+00
23	7.93E-08	3.03E-06	1.08E+02	4.97E+08	3.47E+02	1.48E-14	9.28E-15	9.01E-15
24	1.10E-07	6.07E-01	1.07E+02	2.76E+07	5.16E+02	1.03E-09	1.04E+00	5.29E+00
24	1.10E-07	4.23E-06	1.08E+02	5.85E+08	3.46E+02	1.50E-14	9.28E-15	1.11E-14
25	1.54E-07	6.17E-01	1.07E+02	3.80E+07	5.14E+02	1.44E-09	1.04E+00	7.38E+00
25	1.54E-07	5.89E-06	1.08E+02	6.88E+08	3.45E+02	1.53E-14	9.28E-15	1.33E-14
26	2.14E-07	6.24E-01	1.07E+02	5.25E+07	5.12E+02	1.99E-09	1.04E+00	1.03E+00
26	2.14E-07	8.19E-06	1.08E+02	8.09E+08	3.44E+02	1.54E-14	9.28E-15	1.66E-14
27	2.99E-07	6.34E-01	1.08E+02	7.25E+07	5.11E+02	2.77E-09	1.04E+00	1.43E+00
27	2.99E-07	1.14E-05	1.08E+02	9.53E+08	3.43E+02	1.55E-14	9.27E-15	1.98E-14
28	4.16E-07	6.42E-01	1.08E+02	1.01E+08	5.10E+02	3.86E-09	1.04E+00	1.99E+00
28	4.16E-07	1.59E-05	1.08E+02	1.12E+09	3.42E+02	1.56E-14	9.26E-15	2.48E-14
29	5.79E-07	6.52E-01	1.08E+02	1.40E+08	5.09E+02	5.37E-09	1.04E+00	2.78E+00
29	5.79E-07	2.21E-05	1.08E+02	1.33E+09	3.41E+02	1.56E-14	9.25E-15	2.98E-14
30	8.06E-07	6.59E-01	1.08E+02	1.93E+08	5.07E+02	7.45E-09	1.04E+00	3.86E+00
30	8.06E-07	3.08E-05	1.09E+02	1.56E+09	3.41E+02	1.58E-14	9.26E-15	3.74E-14
31	1.12E-06	6.69E-01	1.08E+02	2.65E+08	5.05E+02	1.04E-08	1.04E+00	5.38E+00
31	1.12E-06	4.30E-05	1.09E+02	1.83E+09	3.39E+02	1.60E-14	9.28E-15	4.47E-14
32	1.56E-06	6.76E-01	1.09E+02	3.63E+08	5.04E+02	1.44E-08	1.04E+00	7.49E+00
32	1.56E-06	5.96E-05	1.09E+02	2.15E+09	3.38E+02	1.63E-14	9.28E-15	5.67E-14
33	2.18E-06	6.87E-01	1.09E+02	4.96E+08	5.02E+02	2.00E-08	1.04E+00	1.04E+00
33	2.18E-06	8.29E-05	1.09E+02	2.51E+09	3.37E+02	1.66E-14	9.28E-15	6.87E-14
34	3.03E-06	6.94E-01	1.08E+02	6.82E+08	5.00E+02	2.79E-08	1.04E+00	1.45E+00
34	3.03E-06	1.15E-04	1.08E+02	2.95E+09	3.36E+02	1.67E-14	9.28E-15	8.80E-14
35	4.24E-06	7.04E-01	1.08E+02	9.46E+08	4.99E+02	3.92E-08	1.04E+00	2.03E+00
35	4.24E-06	1.61E-04	1.08E+02	3.48E+09	3.35E+02	1.67E-14	9.28E-15	1.08E-13
36	5.85E-06	7.11E-01	1.08E+02	1.28E+09	4.97E+02	5.40E-08	1.04E+00	2.80E+00
36	5.85E-06	2.00E-04	1.08E+02	4.06E+09	3.34E+02	1.60E-14	9.28E-15	1.00E-13

Lampiran B.1 File Output Model Acuan File\_Kal\_IBM4.  
13 of 15

36	5.85E-06	2.22E-04	1.08E+02	4.06E+09	3.34E+02	1.69E-14	9.28E-15	1.39E-11
37	8.14E-06	7.21E-01	1.08E+02	1.74E+09	4.95E+02	7.52E-08	1.04E+00	3.90E+00
37	8.14E-06	3.09E-04	1.08E+02	4.74E+09	3.32E+02	1.72E-14	9.28E-15	1.71E-11
38	1.13E-05	7.29E-01	1.08E+02	2.34E+09	4.93E+02	1.05E-07	1.04E+00	5.42E+00
38	1.13E-05	4.28E-04	1.07E+02	5.51E+09	3.31E+02	1.75E-14	9.28E-15	2.21E-11
39	1.57E-05	7.38E-01	1.08E+02	3.14E+09	4.91E+02	1.46E-07	1.04E+00	7.54E+00
39	1.57E-05	5.93E-04	1.07E+02	6.39E+09	3.30E+02	1.79E-14	9.28E-15	2.78E-11
40	2.18E-05	7.46E-01	1.07E+02	4.20E+09	4.90E+02	2.03E-07	1.04E+00	1.05E+00
40	2.18E-05	8.19E-04	1.06E+02	7.41E+09	3.28E+02	1.80E-14	9.28E-15	3.59E-11
41	3.03E-05	7.56E-01	1.07E+02	5.61E+09	4.88E+02	2.83E-07	1.04E+00	1.46E+00
41	3.03E-05	1.14E-03	1.06E+02	8.58E+09	3.27E+02	1.81E-14	9.28E-15	4.56E-11
42	4.20E-05	7.64E-01	1.06E+02	7.30E+09	4.86E+02	3.94E-07	1.04E+00	2.02E+00
42	4.20E-05	1.56E-03	1.05E+02	9.81E+09	3.26E+02	1.85E-14	9.27E-15	5.92E-11
43	5.82E-05	7.73E-01	1.06E+02	9.36E+09	4.83E+02	5.49E-07	1.04E+00	2.81E+00
43	5.82E-05	2.14E-03	1.05E+02	1.11E+10	3.24E+02	1.91E-14	9.26E-15	7.64E-11
44	8.05E-05	7.81E-01	1.05E+02	1.19E+10	4.80E+02	7.68E-07	1.04E+00	3.88E+00
44	8.05E-05	2.92E-03	1.02E+02	1.26E+10	3.22E+02	1.94E-14	9.25E-15	9.93E-11
45	1.11E-04	7.91E-01	1.04E+02	1.49E+10	4.76E+02	1.08E-06	1.03E+00	5.40E+00
45	1.11E-04	3.97E-03	1.01E+02	1.42E+10	3.19E+02	1.95E-14	9.25E-15	1.28E-11
46	1.53E-04	8.00E-01	1.02E+02	1.82E+10	4.72E+02	1.50E-06	1.03E+00	7.46E+00
46	1.53E-04	5.35E-03	9.81E+01	1.57E+10	3.16E+02	1.99E-14	9.25E-15	1.67E-11
47	2.12E-04	8.10E-01	1.01E+02	2.15E+10	4.67E+02	2.10E-06	1.02E+00	1.04E+00
47	2.12E-04	7.16E-03	9.72E+01	1.72E+10	3.12E+02	2.06E-14	9.25E-15	2.17E-11
48	2.90E-04	8.19E-01	9.78E+01	2.48E+10	4.60E+02	2.96E-06	1.02E+00	1.43E+00
48	2.90E-04	9.39E-03	9.09E+01	1.86E+10	3.07E+02	2.11E-14	9.24E-15	2.80E-11
49	3.98E-04	8.30E-01	9.50E+01	2.80E+10	4.51E+02	4.19E-06	1.00E+00	1.98E+00
49	3.98E-04	1.21E-02	8.82E+01	2.00E+10	3.01E+02	2.16E-14	9.24E-15	3.58E-11
50	5.40E-04	8.40E-01	9.02E+01	3.06E+10	4.40E+02	5.99E-06	9.93E-01	2.72E+00
50	5.40E-04	1.54E-02	7.91E+01	2.12E+10	2.93E+02	2.21E-14	9.22E-15	4.57E-11

```

51 7.36E-04 8.53E-01 8.56E+01 3.25E+10 4.25E+02 8.59E-06 9.72E-01 3.78E+00
51 7.36E-04 1.93E-02 7.50E+01 2.24E+10 2.82E+02 2.26E-14 9.20E-15 5.81E-15

52 9.88E-04 8.64E-01 7.94E+01 3.34E+10 4.06E+02 1.24E-05 9.56E-01 5.17E+00
52 9.88E-04 2.35E-02 6.55E+01 2.33E+10 2.67E+02 2.37E-14 9.18E-15 7.30E-15

53 1.34E-03 8.80E-01 7.36E+01 3.33E+10 3.80E+02 1.81E-05 9.25E-01 7.22E+00
53 1.34E-03 2.79E-02 6.09E+01 2.42E+10 2.48E+02 2.53E-14 9.14E-15 9.10E-15

54 1.79E-03 8.96E-01 6.44E+01 3.21E+10 3.44E+02 2.78E-05 8.93E-01 1.00E+00
54 1.79E-03 3.23E-02 4.71E+01 2.52E+10 2.21E+02 2.67E-14 9.11E-15 1.14E-15

55 2.43E-03 9.17E-01 5.52E+01 2.98E+10 2.99E+02 4.40E-05 8.49E-01 1.43E+00
55 2.43E-03 3.68E-02 3.95E+01 2.64E+10 1.87E+02 2.81E-14 9.06E-15 1.43E-15

56 3.33E-03 9.45E-01 4.51E+01 2.67E+10 2.39E+02 7.39E-05 7.92E-01 2.10E+00
56 3.33E-03 4.08E-02 3.01E+01 2.85E+10 1.45E+02 2.97E-14 9.04E-15 1.80E-15

57 4.57E-03 9.75E-01 3.47E+01 2.27E+10 1.71E+02 1.32E-04 7.67E-01 2.98E+00
57 4.57E-03 4.48E-02 2.15E+01 3.20E+10 9.71E+01 3.18E-14 9.05E-15 2.32E-15

58 6.20E-03 1.01E+00 2.57E+01 1.83E+10 1.13E+02 2.42E-04 7.49E-01 4.14E+00
58 6.20E-03 4.81E-02 1.48E+01 3.61E+10 6.12E+01 3.51E-14 9.14E-15 3.03E-15

59 8.22E-03 1.05E+00 1.82E+01 1.44E+10 6.71E+01 4.51E-04 7.52E-01 5.47E+00
59 8.22E-03 5.15E-02 9.63E+00 4.26E+10 3.42E+01 3.92E-14 9.26E-15 4.04E-15

60 1.07E-02 1.10E+00 1.14E+01 1.03E+10 3.89E+01 9.41E-04 7.53E-01 7.13E+00
60 1.07E-02 5.48E-02 5.15E+00 4.75E+10 1.94E+01 4.43E-14 9.39E-15 5.50E-15

61 1.39E-02 1.16E+00 7.23E+00 7.37E+09 2.17E+01 1.92E-03 7.48E-01 9.28E+00
61 1.39E-02 5.76E-02 3.20E+00 5.40E+10 1.05E+01 5.07E-14 9.56E-15 7.51E-15

```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	3.76E-11	4.00E-01	8.60E+01	3.67E+02	1.05E+04	1.11E+00
max gain	2.18E-06	6.87E-01	1.09E+02	3.37E+02	4.96E+08	2.51E+00
max ft	9.88E-04	8.64E-01	7.94E+01	2.67E+02	3.34E+10	2.33E+10

bvceo = 3.5E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.16E+02 qhz



note: rsmin not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02



```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*                               Electrical Engineering Department, University Indonesia
*                               *COPYRIGHTED BY BIPOLAR TECHNOLOGY LTD **
*
*****
```

Input file: c:\shinta\tossin\018asli.bip

SIGE HBT AE=018X10

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.1000E-02,	BNS	=0.1500E-02,	BPB	=0.12001			
BPC	=0.1200E-02,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.1800E-04,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.3500E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.5000E-01,	XGEP	=0.5000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.60001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
1.80E-05 1.00E-03 2.00E-05 2.00E-05 1.20E-03 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.210E+01 0.773E+02 0.954E+06 0.419E-09 0.000E+00 0.419E-09 0.400E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 5.16E+00 1.32E+01 3.10E-07

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-06

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 1.17E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 2.56E+11 1.79E+09 8.76E+13 2.24E+12 3.97E+10 2.22E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2  
using ionization co-efficients of marsland with  
non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

using ionization co-efficients of var overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05

ionization integral results: table 4-5  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm,

RBB = 8.56E+00 RBEXT = 2.52E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 7.99E-14 F; Total plane BL capacitance = 3.74E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.04E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 5.79E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.62E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.17E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 1.69E-14 CJCO = 1.67E-14 CJCS = 8.36E-14

vioeb=0.961 viocb=0.893 xbc= 3.79E-06 xcc= 1.276E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.497E-03

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.825E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.770E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.497E-03

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	(
1	2.36E+02	2.30E+02	7.00E-01	1.64E-10	1.24E-14	4.10E-13	9.53E+08	2.07E+09
1	-1.02E+00	2.23E+02	1.00E+00	2.11E-12	7.01E-13	7.67E-14	1.33E+11	1.46E+11
1	1.06E+00	8.24E-06	5.68E+17	9.12E+16	8.98E+14	1.44E+14	1.36E-06	1.28E-06
.								
2	4.67E+02	2.28E+02	7.18E-01	8.66E-11	1.30E-14	4.10E-13	1.79E+09	2.11E+09
2	-2.05E+00	2.21E+02	1.02E+00	1.22E-12	7.25E-13	7.67E-14	1.30E+11	1.48E+11
2	2.11E+00	8.24E-06	5.55E+17	9.13E+16	1.80E+15	2.96E+14	1.41E-06	1.28E-06
.								
3	9.24E+02	2.25E+02	7.36E-01	4.54E-11	1.37E-14	4.10E-13	3.37E+09	2.11E+09
3	-4.10E+00	2.19E+02	1.02E+00	7.04E-13	7.26E-13	7.67E-14	1.30E+11	2.93E+11
3	4.22E+00	8.24E-06	5.41E+17	9.13E+16	3.59E+15	6.07E+14	1.46E-06	1.28E-06
.								
4	1.82E+03	2.22E+02	7.54E-01	2.40E-11	1.45E-14	4.10E-13	6.19E+09	2.15E+09
4	-8.22E+00	2.16E+02	1.03E+00	4.16E-13	7.53E-13	7.67E-14	1.27E+11	3.13E+11
4	8.44E+00	8.24E-06	5.27E+17	9.14E+16	7.19E+15	1.25E+15	1.53E-06	1.28E-06
.								
5	3.59E+03	2.18E+02	7.72E-01	1.29E-11	1.54E-14	4.10E-13	1.11E+10	2.15E+09
5	-1.65E+01	2.13E+02	1.04E+00	2.49E-13	7.58E-13	7.67E-14	1.26E+11	1.34E+11
5	1.69E+01	8.24E-06	5.12E+17	9.14E+16	1.44E+16	2.57E+15	1.60E-06	1.28E-06
.								
6	7.03E+03	2.12E+02	7.90E-01	7.05E-12	1.69E-14	4.07E-13	1.87E+10	2.22E+09
6	-3.32E+01	2.07E+02	1.05E+00	1.53E-13	7.96E-13	7.71E-14	1.23E+11	-1.35E+11
6	3.40E+01	8.20E-06	4.96E+17	9.13E+16	2.87E+16	5.31E+15	1.69E-06	1.28E-06
.								
7	1.37E+04	2.05E+02	8.09E-01	3.80E-12	1.89E-14	4.25E-13	3.05E+10	2.22E+09
7	-6.68E+01	2.00E+02	1.09E+00	9.64E-14	8.12E-13	7.39E-14	1.20E+11	7.69E+11
7	6.85E+01	8.50E-06	4.84E+17	9.13E+16	5.75E+16	1.09E+16	1.72E-06	1.24E-06
.								
8	2.63E+04	1.95E+02	8.28E-01	2.19E-12	2.16E-14	4.23E-13	4.38E+10	2.26E+09
8	-1.35E+02	1.91E+02	1.14E+00	6.18E-14	8.65E-13	7.39E-14	1.15E+11	1.20E+11
8	1.38E+02	8.50E-06	4.76E+17	9.12E+16	1.15E+17	2.23E+16	1.83E-06	1.24E-06
.								
9	5.05E+04	1.85E+02	8.49E-01	1.27E-12	2.53E-14	4.37E-13	5.79E+10	2.30E+09
9	-2.73E+02	1.80E+02	1.23E+00	4.15E-14	9.07E-13	7.13E-14	1.11E+11	1.44E+11
9	2.80E+02	8.76E-06	4.68E+17	9.12E+16	2.30E+17	4.58E+16	1.90E-06	1.20E-06
.								
10	9.66E+04	1.73E+02	8.72E-01	8.10E-13	3.03E-14	4.64E-13	6.64E+10	2.42E+09
10	-5.59E+02	1.68E+02	1.38E+00	2.82E-14	9.98E-13	6.66E-14	1.02E+11	1.01E+11
10	5.74E+02	9.28E-06	4.58E+17	9.08E+16	4.60E+17	9.52E+16	2.09E-06	1.13E-06
.								
11	1.05E+05	1.50E+02	8.00E-01	5.50E-13	3.00E-14	5.00E-13	6.00E+10	2.50E+09
11	-1.00E+02	1.50E+02	1.00E+00	1.00E-14	1.00E-13	1.00E-14	1.00E+11	1.00E+11
11	1.00E+02	1.00E-06	1.00E+17	1.00E+16	1.00E+15	1.00E+14	1.00E-06	1.00E-06



```

11  1.85E+05 1.58E+02 9.00E-01 5.58E-13 3.84E-14 5.35E-13 6.80E+10 2.65E+01
11  -1.17E+03 1.53E+02 1.66E+00 1.99E-14 1.13E-12 5.69E-14 9.03E+10 -3.26E+01
11  1.20E+03 1.06E-05 4.47E+17 9.01E+16 9.20E+17 2.02E+17 2.30E-06 9.95E+01
.
12  3.49E+05 1.36E+02 9.37E-01 4.41E-13 5.47E-14 6.38E-13 5.87E+10 4.10E+01
12  -2.56E+03 1.32E+02 2.23E+00 1.53E-14 1.52E-12 4.57E-14 7.05E+10 1.82E+01
12  2.65E+03 1.25E-05 4.32E+17 8.91E+16 1.84E+18 4.47E+17 2.59E-06 8.44E+01
.
13  6.26E+05 1.02E+02 9.87E-01 4.13E-13 1.04E-13 5.27E-13 3.39E+10 1.12E+01
13  -6.12E+03 9.77E+01 3.32E+00 1.46E-14 3.58E-12 5.22E-14 3.73E+10 7.61E+01
13  6.40E+03 1.02E-05 4.12E+17 8.80E+16 3.68E+18 1.06E+18 2.90E-06 1.03E+01
*
14  1.04E+06 6.24E+01 1.05E+00 4.64E-13 1.91E-13 4.45E-13 1.72E+10 1.85E+01
14  -1.66E+04 5.83E+01 5.12E+00 1.61E-14 8.08E-12 5.93E-14 1.81E+10 -9.85E+01
14  1.78E+04 8.40E-06 3.87E+17 8.56E+16 7.36E+18 2.63E+18 3.51E-06 1.25E+01
*
15  1.58E+06 2.93E+01 1.14E+00 5.82E-13 3.96E-13 4.22E-13 8.43E+09 2.60E+01
15  -5.40E+04 2.64E+01 7.78E+00 1.99E-14 1.74E-11 6.21E-14 8.70E+09 -6.21E+01
15  5.98E+04 7.50E-06 3.55E+17 8.20E+16 1.47E+19 6.51E+18 4.44E-06 1.40E+01

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.497E-03

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sq = 5.84E+03 rbase(intrinsic) = 8.73E+00  
gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu  
1.68E+11 1.26E+09 2.05E+12 3.64E+10

lateral simulation: emitter width = 0.180E-04 cm, vcb = -0.497E-03 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	8.50E-06	7.07E-01	1.64E+02	1.05E+09	1.57E+01	5.19E-08	1.44E+00	3.28E+00
1	8.50E-06	3.29E-04	1.68E+02	1.42E+10	1.14E+01	3.07E-14	1.82E-14	7.53E-14
2	1.19E-05	7.17E-01	1.65E+02	1.44E+09	1.56E+01	7.19E-08	1.44E+00	4.57E+00
2	1.19E-05	4.59E-04	1.68E+02	1.67E+10	1.13E+01	3.13E-14	1.82E-14	8.96E-14
3	1.65E-05	7.25E-01	1.66E+02	1.96E+09	1.56E+01	9.92E-08	1.44E+00	6.37E+00
3	1.65E-05	6.33E-04	1.70E+02	1.95E+10	1.13E+01	3.18E-14	1.82E-14	1.14E-14
4	2.30E-05	7.35E-01	1.67E+02	2.66E+09	1.55E+01	1.37E-07	1.44E+00	8.88E+00
4	2.30E-05	8.72E-04	1.70E+02	2.27E+10	1.12E+01	3.24E-14	1.82E-14	1.40E-14

5	3.20E-05	7.42E-01	1.68E+02	3.60E+09	1.54E+01	1.90E-07	1.44E+00	1.23E+00
5	3.20E-05	1.21E-03	1.70E+02	2.65E+10	1.12E+01	3.30E-14	1.82E-14	1.82E-14
6	4.45E-05	7.52E-01	1.69E+02	4.86E+09	1.54E+01	2.64E-07	1.44E+00	1.72E+00
6	4.45E-05	1.67E-03	1.70E+02	3.09E+10	1.11E+01	3.38E-14	1.82E-14	2.36E-14
7	6.18E-05	7.60E-01	1.69E+02	6.51E+09	1.53E+01	3.66E-07	1.44E+00	2.39E+00
7	6.18E-05	2.31E-03	1.69E+02	3.58E+10	1.11E+01	3.45E-14	1.82E-14	3.13E-14
8	8.60E-05	7.69E-01	1.69E+02	8.66E+09	1.52E+01	5.09E-07	1.44E+00	3.32E+00
8	8.60E-05	3.19E-03	1.69E+02	4.14E+10	1.10E+01	3.53E-14	1.82E-14	4.14E-14
9	1.19E-04	7.77E-01	1.68E+02	1.14E+10	1.51E+01	7.08E-07	1.44E+00	4.59E+00
9	1.19E-04	4.38E-03	1.66E+02	4.76E+10	1.10E+01	3.62E-14	1.82E-14	5.55E-14
10	1.65E-04	7.87E-01	1.67E+02	1.47E+10	1.50E+01	9.88E-07	1.44E+00	6.37E+00
10	1.65E-04	6.00E-03	1.65E+02	5.43E+10	1.09E+01	3.72E-14	1.82E-14	7.47E-14
11	2.28E-04	7.95E-01	1.65E+02	1.89E+10	1.50E+01	1.38E-06	1.44E+00	8.80E+00
11	2.28E-04	8.15E-03	1.60E+02	6.17E+10	1.09E+01	3.78E-14	1.82E-14	1.01E-14
12	3.15E-04	8.05E-01	1.63E+02	2.40E+10	1.48E+01	1.93E-06	1.44E+00	1.22E+00
12	3.15E-04	1.10E-02	1.59E+02	6.98E+10	1.08E+01	3.81E-14	1.81E-14	1.35E-14
13	4.33E-04	8.14E-01	1.61E+02	2.95E+10	1.47E+01	2.70E-06	1.44E+00	1.67E+00
13	4.33E-04	1.48E-02	1.53E+02	7.79E+10	1.07E+01	3.89E-14	1.81E-14	1.82E-14
14	5.96E-04	8.23E-01	1.58E+02	3.54E+10	1.45E+01	3.78E-06	1.44E+00	2.30E+00
14	5.96E-04	1.98E-02	1.51E+02	8.57E+10	1.06E+01	4.01E-14	1.81E-14	2.44E-14
15	8.18E-04	8.33E-01	1.54E+02	4.15E+10	1.43E+01	5.33E-06	1.44E+00	3.16E+00
15	8.18E-04	2.62E-02	1.43E+02	9.35E+10	1.04E+01	4.11E-14	1.81E-14	3.25E-14
16	1.12E-03	8.43E-01	1.49E+02	4.77E+10	1.41E+01	7.53E-06	1.44E+00	4.34E+00
16	1.12E-03	3.43E-02	1.39E+02	1.01E+11	1.03E+01	4.18E-14	1.81E-14	4.31E-14
17	1.54E-03	8.54E-01	1.44E+02	5.32E+10	1.38E+01	1.07E-05	1.44E+00	5.94E+00
17	1.54E-03	4.43E-02	1.31E+02	1.08E+11	1.01E+01	4.30E-14	1.80E-14	5.66E-14
18	2.11E-03	8.65E-01	1.38E+02	5.74E+10	1.34E+01	1.53E-05	1.44E+00	8.15E+00
18	2.11E-03	5.64E-02	1.25E+02	1.14E+11	9.85E+00	4.50E-14	1.80E-14	7.41E-14
19	2.89E-03	8.77E-01	1.30E+02	6.03E+10	1.30E+01	2.22E-05	1.44E+00	1.12E+00

```

19 2.89E-03 7.03E-02 1.14E+02 1.19E+11 9.53E+00 4.72E-14 1.79E-14 9.59E-14
20 3.97E-03 8.90E-01 1.22E+02 6.19E+10 1.24E+01 3.25E-05 1.44E+00 1.53E+00
20 3.97E-03 8.56E-02 1.04E+02 1.23E+11 9.12E+00 4.94E-14 1.78E-14 1.23E-14
21 5.43E-03 9.06E-01 1.11E+02 6.14E+10 1.16E+01 4.90E-05 1.43E+00 2.10E+00
21 5.43E-03 1.02E-01 8.87E+01 1.27E+11 8.60E+00 5.20E-14 1.77E-14 1.56E-14
22 7.40E-03 9.23E-01 9.82E+01 5.88E+10 1.06E+01 7.53E-05 1.43E+00 2.87E+00
22 7.40E-03 1.17E-01 7.47E+01 1.30E+11 7.96E+00 5.51E-14 1.75E-14 1.98E-14
23 9.98E-03 9.44E-01 8.21E+01 5.27E+10 8.79E+00 1.22E-04 1.43E+00 3.87E+00
23 9.98E-03 1.31E-01 5.58E+01 1.34E+11 6.71E+00 5.85E-14 1.75E-14 2.63E-14
24 1.32E-02 9.67E-01 6.45E+01 4.30E+10 6.55E+00 2.05E-04 1.43E+00 5.13E+00
24 1.32E-02 1.43E-01 3.89E+01 1.36E+11 5.22E+00 6.16E-14 1.76E-14 3.76E-14
25 1.74E-02 9.95E-01 4.82E+01 3.36E+10 4.88E+00 3.60E-04 1.43E+00 6.72E+00
25 1.74E-02 1.53E-01 2.66E+01 1.35E+11 4.10E+00 6.59E-14 1.78E-14 5.40E-14
26 2.20E-02 1.03E+00 3.25E+01 2.50E+10 3.76E+00 6.78E-04 1.43E+00 8.53E+00
26 2.20E-02 1.59E-01 1.47E+01 1.29E+11 3.35E+00 7.18E-14 1.80E-14 7.81E-14

```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	6.11E-06	7.00E-01	1.62E+02	1.14E+01	7.65E+08	1.21E+10
max gain	8.60E-05	7.69E-01	1.69E+02	1.10E+01	8.66E+09	4.14E+10
max ft	3.97E-03	8.90E-01	1.22E+02	9.12E+00	6.19E+10	1.23E+11

bvceo = 2.7E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.69E+02 ghz

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.000E+00



SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
1.20E-05 1.00E-03 2.00E-05 2.00E-05 1.20E-03 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.211E+01 0.774E+02 0.751E+06 0.419E-09 0.000E+00 0.419E-09 0.315E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 5.16E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 1.75E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 2.56E+11 1.79E+09 8.76E+13 2.24E+12 3.97E+10 2.22E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2

using ionization co-efficients of marsland with

non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

using ionization co-efficients of var overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05

ionization integral results: table 4-5

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm,

RBB = 5.71E+00 RBEXT = 2.53E+00 IC = 2 NBUR = 3



P+ Sidewall cap. = 7.99E-14 F; Total plane BL capacitance = 3.74E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.04E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 5.79E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.62E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.17E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 1.23E-14 CJCO = 1.67E-14 CJCS = 8.36E-14

vioeb=0.961 viocb=0.893 xbc= 3.79E-06 xcc= 1.276E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.130E-02

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.825E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.195E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.130E-02

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vr
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	cr
1	2.36E+02	2.30E+02	7.00E-01	1.64E-10	1.24E-14	4.10E-13	9.53E+08	2.07E+09
1	-1.02E+00	2.23E+02	1.00E+00	2.11E-12	7.01E-13	5.44E-14	1.35E+11	1.47E+11
1	1.06E+00	8.24E-06	5.68E+17	9.12E+16	8.98E+14	1.44E+14	1.36E-06	1.28E-06
.								
2	4.67E+02	2.28E+02	7.18E-01	8.66E-11	1.30E-14	4.10E-13	1.79E+09	2.11E+09
2	-2.05E+00	2.21E+02	1.02E+00	1.22E-12	7.25E-13	5.44E-14	1.32E+11	1.48E+11
2	2.11E+00	8.24E-06	5.55E+17	9.13E+16	1.80E+15	2.96E+14	1.41E-06	1.28E-06
.								
3	9.24E+02	2.25E+02	7.36E-01	4.54E-11	1.37E-14	4.10E-13	3.37E+09	2.11E+09
3	-4.10E+00	2.19E+02	1.02E+00	7.04E-13	7.26E-13	5.44E-14	1.32E+11	2.94E+11
3	4.22E+00	8.24E-06	5.41E+17	9.13E+16	3.59E+15	6.07E+14	1.46E-06	1.28E-06
.								
4	1.82E+03	2.22E+02	7.54E-01	2.40E-11	1.45E-14	4.10E-13	6.20E+09	2.15E+09
4	-8.22E+00	2.16E+02	1.03E+00	4.16E-13	7.53E-13	5.44E-14	1.29E+11	3.14E+11
4	8.44E+00	8.24E-06	5.27E+17	9.14E+16	7.19E+15	1.25E+15	1.53E-06	1.28E-06
.								
5	3.59E+03	2.18E+02	7.72E-01	1.29E-11	1.54E-14	4.10E-13	1.11E+10	2.15E+09
5	-1.65E+01	2.13E+02	1.03E+00	2.49E-13	7.58E-13	5.44E-14	1.29E+11	1.35E+11
5	1.69E+01	8.24E-06	5.12E+17	9.14E+16	1.44E+16	2.57E+15	1.60E-06	1.28E-06
.								
6	7.03E+03	2.12E+02	7.90E-01	7.05E-12	1.69E-14	4.07E-13	1.88E+10	2.22E+09
6	-3.32E+01	2.07E+02	1.05E+00	1.53E-13	7.95E-13	5.46E-14	1.25E+11	-3.25E+11
6	3.40E+01	8.20E-06	4.96E+17	9.13E+16	2.87E+16	5.31E+15	1.69E-06	1.28E-06
.								
7	1.37E+04	2.05E+02	8.09E-01	3.80E-12	1.89E-14	4.24E-13	3.06E+10	2.22E+09
7	-6.68E+01	2.00E+02	1.09E+00	9.64E-14	8.12E-13	5.24E-14	1.22E+11	9.80E+11
7	6.85E+01	8.50E-06	4.84E+17	9.13E+16	5.75E+16	1.09E+16	1.72E-06	1.24E-06
.								
8	2.63E+04	1.95E+02	8.28E-01	2.19E-12	2.15E-14	4.23E-13	4.41E+10	2.26E+09
8	-1.35E+02	1.91E+02	1.14E+00	6.17E-14	8.64E-13	5.24E-14	1.17E+11	1.19E+11
8	1.38E+02	8.50E-06	4.76E+17	9.12E+16	1.15E+17	2.23E+16	1.83E-06	1.24E-06
.								
9	5.05E+04	1.85E+02	8.49E-01	1.27E-12	2.52E-14	4.37E-13	5.84E+10	2.30E+09
9	-2.73E+02	1.80E+02	1.23E+00	4.14E-14	9.06E-13	5.05E-14	1.12E+11	1.82E+11
9	2.80E+02	8.76E-06	4.68E+17	9.12E+16	2.30E+17	4.58E+16	1.90E-06	1.20E-06
.								
10	9.67E+04	1.73E+02	8.72E-01	8.09E-13	3.03E-14	4.64E-13	6.71E+10	2.42E+09
10	-5.59E+02	1.68E+02	1.38E+00	2.81E-14	9.96E-13	4.72E-14	1.04E+11	-5.56E+11
10	5.74E+02	9.28E-06	4.58E+17	9.08E+16	4.60E+17	9.52E+16	2.09E-06	1.13E-06
.								
11	1.05E+05	1.50E+02	8.00E-01	5.55E-13	3.00E-14	5.00E-13	6.00E+10	2.00E+09
11	-1.00E+02	1.50E+02	1.00E+00	1.00E-14	1.00E-13	1.00E-14	1.00E+11	1.00E+11
11	1.00E+02	1.00E-06	1.00E+17	1.00E+16	1.00E+14	1.00E+14	1.00E-06	1.00E-06

```

11  1.85E+05 1.58E+02 9.00E-01 5.57E-13 3.83E-14 5.33E-13 6.87E+10 2.65E+00
11  -1.17E+03 1.54E+02 1.66E+00 1.98E-14 1.13E-12 4.03E-14 9.15E+10 -1.41E+00
11  1.20E+03 1.06E-05 4.47E+17 9.01E+16 9.20E+17 2.02E+17 2.30E-06 9.95E+00
.
12  3.50E+05 1.37E+02 9.37E-01 4.40E-13 5.44E-14 6.42E-13 5.96E+10 3.97E+00
12  -2.56E+03 1.32E+02 2.23E+00 1.52E-14 1.49E-12 3.20E-14 7.18E+10 -1.16E+00
12  2.65E+03 1.26E-05 4.32E+17 8.91E+16 1.84E+18 4.47E+17 2.59E-06 8.35E+00
.
13  6.30E+05 1.03E+02 9.87E-01 4.10E-13 1.02E-13 5.41E-13 3.45E+10 1.12E+00
13  -6.12E+03 9.83E+01 3.32E+00 1.44E-14 3.51E-12 3.55E-14 3.80E+10 -2.50E+00
13  6.41E+03 1.05E-05 4.12E+17 8.80E+16 3.68E+18 1.06E+18 2.90E-06 1.00E+00
.
14  1.05E+06 6.30E+01 1.05E+00 4.61E-13 1.89E-13 4.54E-13 1.77E+10 1.82E+00
14  -1.66E+04 5.88E+01 5.13E+00 1.58E-14 7.86E-12 4.03E-14 1.86E+10 -1.97E+00
14  1.78E+04 8.70E-06 3.87E+17 8.56E+16 7.36E+18 2.63E+18 3.51E-06 1.21E+00
*
15  1.61E+06 2.97E+01 1.14E+00 5.72E-13 3.90E-13 4.62E-13 8.75E+09 2.54E+00
15  -5.40E+04 2.67E+01 7.79E+00 1.93E-14 1.67E-11 3.88E-14 9.04E+09 -1.03E+00
15  6.01E+04 8.40E-06 3.55E+17 8.20E+16 1.47E+19 6.51E+18 4.44E-06 1.25E+00

```

```

*** Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by *
vcb(av) = -0.130E-02

```

```

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value
rbe/sq = 5.84E+03 rbase(intrinsic) = 5.83E+00
gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu
1.68E+11 1.26E+09 2.05E+12 3.64E+10

```

```

lateral simulation: emitter width = 0.120E-04 cm, vcb = -0.130E-02 volts
n ic      vbe      beta      ft      rbdc      ib      crowd     jcmax
n ic      gm       betac     fmosc    rbac      cbet     cbct      cdiff

1 6.52E-06 7.07E-01 1.52E+02 9.75E+08 1.13E+01 4.29E-08 1.66E+00 3.28E+00
1 6.52E-06 2.52E-04 1.57E+02 1.59E+10 8.44E+00 2.24E-14 1.82E-14 5.33E-14

2 9.10E-06 7.17E-01 1.53E+02 1.34E+09 1.13E+01 5.93E-08 1.66E+00 4.57E+00
2 9.10E-06 3.52E-04 1.57E+02 1.87E+10 8.40E+00 2.28E-14 1.82E-14 6.40E-14

3 1.27E-05 7.25E-01 1.55E+02 1.83E+09 1.12E+01 8.16E-08 1.66E+00 6.37E+00
3 1.27E-05 4.86E-04 1.60E+02 2.18E+10 8.38E+00 2.32E-14 1.82E-14 8.17E-14

4 1.76E-05 7.35E-01 1.57E+02 2.47E+09 1.12E+01 1.13E-07 1.66E+00 8.88E+00
4 1.76E-05 6.69E-04 1.60E+02 2.55E+10 8.34E+00 2.36E-14 1.82E-14 1.01E-14

```

5	2.45E-05	7.42E-01	1.58E+02	3.36E+09	1.12E+01	1.56E-07	1.66E+00	1.23E+00
5	2.45E-05	9.26E-04	1.60E+02	2.97E+10	8.31E+00	2.41E-14	1.82E-14	1.33E-14
6	3.42E-05	7.52E-01	1.58E+02	4.55E+09	1.11E+01	2.16E-07	1.66E+00	1.72E+00
6	3.42E-05	1.28E-03	1.60E+02	3.47E+10	8.27E+00	2.46E-14	1.82E-14	1.73E-14
7	4.74E-05	7.60E-01	1.59E+02	6.11E+09	1.10E+01	2.99E-07	1.66E+00	2.39E+00
7	4.74E-05	1.77E-03	1.60E+02	4.03E+10	8.24E+00	2.51E-14	1.82E-14	2.31E-14
8	6.59E-05	7.69E-01	1.59E+02	8.15E+09	1.10E+01	4.14E-07	1.66E+00	3.32E+00
8	6.59E-05	2.45E-03	1.60E+02	4.66E+10	8.20E+00	2.58E-14	1.82E-14	3.06E-14
9	9.13E-05	7.77E-01	1.59E+02	1.07E+10	1.09E+01	5.75E-07	1.66E+00	4.59E+00
9	9.13E-05	3.36E-03	1.58E+02	5.36E+10	8.17E+00	2.64E-14	1.82E-14	4.11E-14
10	1.27E-04	7.87E-01	1.58E+02	1.40E+10	1.09E+01	8.01E-07	1.66E+00	6.37E+00
10	1.27E-04	4.60E-03	1.57E+02	6.13E+10	8.13E+00	2.71E-14	1.82E-14	5.54E-14
11	1.75E-04	7.95E-01	1.57E+02	1.80E+10	1.08E+01	1.12E-06	1.66E+00	8.79E+00
11	1.75E-04	6.26E-03	1.53E+02	6.98E+10	8.09E+00	2.76E-14	1.82E-14	7.47E-14
12	2.42E-04	8.05E-01	1.55E+02	2.29E+10	1.07E+01	1.56E-06	1.66E+00	1.22E+00
12	2.42E-04	8.47E-03	1.51E+02	7.91E+10	8.03E+00	2.78E-14	1.82E-14	1.01E-14
13	3.32E-04	8.14E-01	1.53E+02	2.84E+10	1.06E+01	2.18E-06	1.66E+00	1.67E+00
13	3.32E-04	1.14E-02	1.46E+02	8.83E+10	7.97E+00	2.83E-14	1.82E-14	1.35E-14
14	4.57E-04	8.23E-01	1.50E+02	3.42E+10	1.05E+01	3.05E-06	1.66E+00	2.30E+00
14	4.57E-04	1.52E-02	1.44E+02	9.75E+10	7.90E+00	2.92E-14	1.82E-14	1.81E-14
15	6.27E-04	8.33E-01	1.46E+02	4.04E+10	1.04E+01	4.30E-06	1.66E+00	3.16E+00
15	6.27E-04	2.01E-02	1.36E+02	1.07E+11	7.82E+00	2.99E-14	1.81E-14	2.41E-14
16	8.61E-04	8.43E-01	1.42E+02	4.68E+10	1.03E+01	6.08E-06	1.66E+00	4.33E+00
16	8.61E-04	2.63E-02	1.32E+02	1.15E+11	7.71E+00	3.04E-14	1.81E-14	3.19E-14
17	1.18E-03	8.54E-01	1.36E+02	5.24E+10	1.01E+01	8.66E-06	1.66E+00	5.94E+00
17	1.18E-03	3.40E-02	1.24E+02	1.23E+11	7.58E+00	3.13E-14	1.81E-14	4.19E-14
18	1.62E-03	8.65E-01	1.31E+02	5.70E+10	9.82E+00	1.24E-05	1.66E+00	8.15E+00
18	1.62E-03	4.33E-02	1.18E+02	1.30E+11	7.42E+00	3.28E-14	1.81E-14	5.47E-14
19	2.22E-03	8.77E-01	1.23E+02	6.03E+10	9.51E+00	1.80E-05	1.66E+00	1.12E+00

```

19 2.22E-03 5.40E-02 1.07E+02 1.36E+11 7.21E+00 3.44E-14 1.80E-14 7.05E-14
20 3.04E-03 8.90E-01 1.15E+02 6.22E+10 9.12E+00 2.65E-05 1.66E+00 1.53E+00
20 3.04E-03 6.58E-02 9.72E+01 1.41E+11 6.95E+00 3.60E-14 1.79E-14 8.96E-14
21 4.16E-03 9.06E-01 1.04E+02 6.21E+10 8.61E+00 4.01E-05 1.65E+00 2.10E+00
21 4.16E-03 7.81E-02 8.21E+01 1.45E+11 6.60E+00 3.79E-14 1.78E-14 1.13E-14
22 5.67E-03 9.23E-01 9.11E+01 6.00E+10 7.98E+00 6.23E-05 1.65E+00 2.86E+00
22 5.67E-03 9.01E-02 6.81E+01 1.48E+11 6.18E+00 4.01E-14 1.77E-14 1.42E-14
23 7.66E-03 9.43E-01 7.54E+01 5.44E+10 6.77E+00 1.02E-04 1.65E+00 3.86E+00
23 7.66E-03 1.01E-01 5.06E+01 1.51E+11 5.37E+00 4.26E-14 1.77E-14 1.86E-14
24 1.02E-02 9.66E-01 5.83E+01 4.51E+10 5.27E+00 1.74E-04 1.65E+00 5.12E+00
24 1.02E-02 1.10E-01 3.44E+01 1.52E+11 4.36E+00 4.49E-14 1.78E-14 2.62E-14
25 1.34E-02 9.95E-01 4.30E+01 3.58E+10 4.14E+00 3.11E-04 1.65E+00 6.73E+00
25 1.34E-02 1.18E-01 2.35E+01 1.48E+11 3.61E+00 4.80E-14 1.79E-14 3.71E-14
26 1.70E-02 1.03E+00 2.83E+01 2.68E+10 3.37E+00 6.00E-04 1.65E+00 8.56E+00
26 1.70E-02 1.23E-01 1.26E+01 1.39E+11 3.09E+00 5.23E-14 1.80E-14 5.28E-14

```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	4.68E-06	7.00E-01	1.50E+02	8.46E+00	7.08E+08	1.35E+10
max gain	6.59E-05	7.69E-01	1.59E+02	8.20E+00	8.15E+09	4.66E+10
max ft	3.04E-03	8.90E-01	1.15E+02	6.95E+00	6.22E+10	1.41E+11

bvceo = 2.8E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.72E+02 ghz

note: rsmn not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.000E+00

```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*       Electrical Engineering Department, University of Indonesia
*                               ** * * * * * **
*
*****
```

Input file: c:\shinta\tossin\009asli.bip

SIGE HBT AE=0.09X10

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.1000E-02,	BNS	=0.1500E-02,	BPB	=0.12001			
BPC	=0.1200E-02,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.3500E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.5000E-01,	XGEP	=0.5000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.60001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
9.00E-06 1.00E-03 2.00E-05 2.00E-05 1.20E-03 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.212E+01 0.779E+02 0.650E+06 0.419E-09 0.000E+00 0.419E-09 0.273E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 5.16E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 2.34E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 2.56E+11 1.79E+09 8.76E+13 2.24E+12 3.97E+10 2.22E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2  
using ionization co-efficients of marsland with  
non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man



using ionization cross coefficients of val overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05

ionization integral results: table 4-5  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm,

RBB = 4.29E+00 RBEXT = 2.53E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 7.99E-14 F; Total plane BL capacitance = 3.74E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.04E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 5.79E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.62E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.17E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 1.00E-14 CJCO = 1.67E-14 CJCS = 8.36E-14

vioeb=0.961 viocb=0.893 xbc= 3.79E-06 xcc= 1.276E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.371E-03

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.825E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.879E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.371E-03

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	(
1	2.36E+02	2.30E+02	7.00E-01	1.64E-10	1.24E-14	4.10E-13	9.53E+08	2.07E+09
1	-1.02E+00	2.23E+02	1.00E+00	2.11E-12	7.01E-13	4.22E-14	1.37E+11	1.47E+11
1	1.06E+00	8.24E-06	5.68E+17	9.12E+16	8.98E+14	1.44E+14	1.36E-06	1.28E+06
.								
2	4.67E+02	2.28E+02	7.18E-01	8.66E-11	1.30E-14	4.10E-13	1.79E+09	2.11E+09
2	-2.05E+00	2.21E+02	1.02E+00	1.22E-12	7.25E-13	4.22E-14	1.34E+11	1.48E+11
2	2.11E+00	8.24E-06	5.55E+17	9.13E+16	1.80E+15	2.96E+14	1.41E-06	1.28E+06
.								
3	9.24E+02	2.25E+02	7.36E-01	4.54E-11	1.37E-14	4.10E-13	3.37E+09	2.11E+09
3	-4.10E+00	2.19E+02	1.02E+00	7.04E-13	7.26E-13	4.22E-14	1.34E+11	2.94E+11
3	4.22E+00	8.24E-06	5.41E+17	9.13E+16	3.59E+15	6.07E+14	1.46E-06	1.28E+06
.								
4	1.82E+03	2.22E+02	7.54E-01	2.40E-11	1.45E-14	4.10E-13	6.20E+09	2.15E+09
4	-8.22E+00	2.16E+02	1.03E+00	4.16E-13	7.53E-13	4.22E-14	1.31E+11	3.14E+11
4	8.44E+00	8.24E-06	5.27E+17	9.14E+16	7.19E+15	1.25E+15	1.53E-06	1.28E+06
.								
5	3.59E+03	2.18E+02	7.72E-01	1.29E-11	1.54E-14	4.10E-13	1.11E+10	2.15E+09
5	-1.65E+01	2.13E+02	1.03E+00	2.49E-13	7.58E-13	4.22E-14	1.30E+11	1.35E+11
5	1.69E+01	8.24E-06	5.12E+17	9.14E+16	1.44E+16	2.57E+15	1.60E-06	1.28E+06
.								
6	7.03E+03	2.12E+02	7.90E-01	7.05E-12	1.69E-14	4.07E-13	1.88E+10	2.22E+09
6	-3.32E+01	2.07E+02	1.05E+00	1.53E-13	7.95E-13	4.24E-14	1.26E+11	-9.16E+11
6	3.40E+01	8.20E-06	4.96E+17	9.13E+16	2.87E+16	5.31E+15	1.69E-06	1.28E+06
*								
7	1.37E+04	2.05E+02	8.09E-01	3.80E-12	1.89E-14	4.24E-13	3.07E+10	2.22E+09
7	-6.68E+01	2.00E+02	1.09E+00	9.64E-14	8.12E-13	4.06E-14	1.23E+11	1.93E+11
7	6.85E+01	8.50E-06	4.84E+17	9.13E+16	5.75E+16	1.09E+16	1.72E-06	1.24E+06
.								
8	2.63E+04	1.95E+02	8.28E-01	2.19E-12	2.15E-14	4.23E-13	4.42E+10	2.26E+09
8	-1.35E+02	1.91E+02	1.14E+00	6.17E-14	8.64E-13	4.06E-14	1.18E+11	1.44E+11
8	1.38E+02	8.50E-06	4.76E+17	9.12E+16	1.15E+17	2.23E+16	1.83E-06	1.24E+06
.								
9	5.05E+04	1.85E+02	8.49E-01	1.27E-12	2.52E-14	4.36E-13	5.86E+10	2.30E+09
9	-2.73E+02	1.80E+02	1.23E+00	4.14E-14	9.06E-13	3.92E-14	1.13E+11	3.41E+11
9	2.80E+02	8.76E-06	4.68E+17	9.12E+16	2.30E+17	4.58E+16	1.90E-06	1.20E+06
.								
10	9.68E+04	1.73E+02	8.72E-01	8.08E-13	3.03E-14	4.63E-13	6.74E+10	2.42E+09
10	-5.59E+02	1.69E+02	1.38E+00	2.81E-14	9.95E-13	3.66E-14	1.04E+11	-3.03E+11
10	5.74E+02	9.28E-06	4.58E+17	9.08E+16	4.60E+17	9.52E+16	2.09E-06	1.13E+06
.								
11	1.05E+05	1.50E+02	8.00E-01	5.56E-13	3.00E-14	5.00E-13	6.01E+10	2.55E+09

Lampiran B.4. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli.  
8 of 10

```

11  1.85E+05 1.58E+02 9.00E-01 5.56E-13 3.82E-14 5.33E-13 6.91E+10 2.65E+00
11  -1.17E+03 1.54E+02 1.66E+00 1.98E-14 1.13E-12 3.12E-14 9.21E+10 -2.87E+00
11  1.20E+03 1.06E-05 4.47E+17 9.01E+16 9.20E+17 2.02E+17 2.30E-06 9.95E+00
*
12  3.51E+05 1.37E+02 9.37E-01 4.39E-13 5.43E-14 6.45E-13 6.01E+10 3.89E+00
12  -2.56E+03 1.32E+02 2.23E+00 1.51E-14 1.47E-12 2.46E-14 7.25E+10 7.83E+00
12  2.65E+03 1.27E-05 4.32E+17 8.91E+16 1.84E+18 4.47E+17 2.59E-06 8.30E+00
.
13  6.30E+05 1.03E+02 9.87E-01 4.09E-13 1.02E-13 5.56E-13 3.48E+10 1.09E+00
13  -6.12E+03 9.84E+01 3.33E+00 1.44E-14 3.47E-12 2.67E-14 3.83E+10 4.35E+00
13  6.41E+03 1.08E-05 4.12E+17 8.80E+16 3.68E+18 1.06E+18 2.90E-06 9.75E+00
*
14  1.05E+06 6.31E+01 1.05E+00 4.59E-13 1.88E-13 4.87E-13 1.78E+10 1.79E+00
14  -1.66E+04 5.90E+01 5.13E+00 1.57E-14 7.76E-12 2.90E-14 1.88E+10 2.41E+00
14  1.78E+04 9.30E-06 3.87E+17 8.56E+16 7.36E+18 2.63E+18 3.51E-06 1.13E+00
.
15  1.61E+06 2.98E+01 1.14E+00 5.72E-13 3.89E-13 4.75E-13 8.79E+09 2.51E+00
15  -5.41E+04 2.68E+01 7.81E+00 1.92E-14 1.66E-11 2.89E-14 9.09E+09 3.75E+00
15  6.01E+04 8.70E-06 3.55E+17 8.20E+16 1.47E+19 6.51E+18 4.44E-06 1.21E+00

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.371E-03

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sq = 5.84E+03 rbase(intrinsic) = 4.37E+00  
gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu  
1.68E+11 1.26E+09 2.05E+12 3.64E+10

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = 0.371E-03 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	5.55E-06	7.07E-01	1.44E+02	9.25E+08	9.14E+00	3.84E-08	1.88E+00	3.28E+00
1	5.55E-06	2.15E-04	1.50E+02	1.70E+10	6.96E+00	1.82E-14	1.82E-14	4.23E-10
2	7.74E-06	7.17E-01	1.46E+02	1.27E+09	9.10E+00	5.30E-08	1.88E+00	4.57E+00
2	7.74E-06	2.99E-04	1.50E+02	2.00E+10	6.94E+00	1.86E-14	1.82E-14	5.13E-10
3	1.08E-05	7.25E-01	1.48E+02	1.74E+09	9.07E+00	7.28E-08	1.88E+00	6.37E+00
3	1.08E-05	4.13E-04	1.53E+02	2.34E+10	6.92E+00	1.89E-14	1.82E-14	6.58E-10
4	1.50E-05	7.35E-01	1.49E+02	2.36E+09	9.03E+00	1.00E-07	1.88E+00	8.88E+00
4	1.50E-05	5.69E-04	1.53E+02	2.73E+10	6.89E+00	1.92E-14	1.82E-14	8.21E-10

5	2.09E-05	7.42E-01	1.51E+02	3.20E+09	9.00E+00	1.38E-07	1.88E+00	1.23E+00
5	2.09E-05	7.88E-04	1.54E+02	3.19E+10	6.87E+00	1.96E-14	1.82E-14	1.08E-14
6	2.91E-05	7.52E-01	1.52E+02	4.34E+09	8.96E+00	1.92E-07	1.88E+00	1.72E+00
6	2.91E-05	1.09E-03	1.54E+02	3.73E+10	6.84E+00	2.00E-14	1.82E-14	1.42E-14
7	4.03E-05	7.60E-01	1.52E+02	5.85E+09	8.92E+00	2.65E-07	1.88E+00	2.39E+00
7	4.03E-05	1.51E-03	1.54E+02	4.33E+10	6.82E+00	2.04E-14	1.82E-14	1.90E-14
8	5.61E-05	7.69E-01	1.53E+02	7.82E+09	8.88E+00	3.67E-07	1.88E+00	3.32E+00
8	5.61E-05	2.08E-03	1.55E+02	5.02E+10	6.79E+00	2.10E-14	1.82E-14	2.52E-14
9	7.77E-05	7.77E-01	1.53E+02	1.03E+10	8.84E+00	5.09E-07	1.88E+00	4.59E+00
9	7.77E-05	2.86E-03	1.52E+02	5.78E+10	6.76E+00	2.15E-14	1.82E-14	3.40E-14
10	1.08E-04	7.87E-01	1.52E+02	1.35E+10	8.80E+00	7.07E-07	1.88E+00	6.37E+00
10	1.08E-04	3.91E-03	1.51E+02	6.61E+10	6.73E+00	2.21E-14	1.82E-14	4.58E-14
11	1.49E-04	7.95E-01	1.51E+02	1.74E+10	8.75E+00	9.85E-07	1.88E+00	8.79E+00
11	1.49E-04	5.32E-03	1.47E+02	7.54E+10	6.70E+00	2.24E-14	1.82E-14	6.18E-14
12	2.05E-04	8.05E-01	1.50E+02	2.22E+10	8.69E+00	1.37E-06	1.88E+00	1.22E+00
12	2.05E-04	7.21E-03	1.46E+02	8.55E+10	6.66E+00	2.26E-14	1.82E-14	8.34E-14
13	2.83E-04	8.14E-01	1.47E+02	2.76E+10	8.62E+00	1.92E-06	1.88E+00	1.67E+00
13	2.83E-04	9.68E-03	1.41E+02	9.56E+10	6.61E+00	2.31E-14	1.82E-14	1.12E-14
14	3.89E-04	8.23E-01	1.45E+02	3.35E+10	8.54E+00	2.68E-06	1.88E+00	2.30E+00
14	3.89E-04	1.29E-02	1.39E+02	1.06E+11	6.56E+00	2.38E-14	1.82E-14	1.50E-14
15	5.34E-04	8.33E-01	1.41E+02	3.97E+10	8.45E+00	3.78E-06	1.88E+00	3.16E+00
15	5.34E-04	1.71E-02	1.31E+02	1.16E+11	6.50E+00	2.44E-14	1.82E-14	2.00E-14
16	7.32E-04	8.43E-01	1.37E+02	4.61E+10	8.33E+00	5.35E-06	1.88E+00	4.33E+00
16	7.32E-04	2.24E-02	1.27E+02	1.25E+11	6.42E+00	2.48E-14	1.81E-14	2.64E-14
17	1.00E-03	8.54E-01	1.32E+02	5.19E+10	8.19E+00	7.63E-06	1.88E+00	5.94E+00
17	1.00E-03	2.89E-02	1.19E+02	1.34E+11	6.32E+00	2.55E-14	1.81E-14	3.46E-14
18	1.38E-03	8.65E-01	1.26E+02	5.66E+10	8.01E+00	1.09E-05	1.88E+00	8.15E+00
18	1.38E-03	3.68E-02	1.13E+02	1.42E+11	6.20E+00	2.67E-14	1.81E-14	4.50E-14
19	1.89E-03	8.77E-01	1.19E+02	6.02E+10	7.77E+00	1.59E-05	1.88E+00	1.12E+00

```

19 1.89E-03 4.59E-02 1.02E+02 1.48E+11 6.05E+00 2.80E-14 1.81E-14 5.79E-1.
20 2.59E-03 8.90E-01 1.10E+02 6.24E+10 7.48E+00 2.35E-05 1.88E+00 1.53E+0!
20 2.59E-03 5.60E-02 9.26E+01 1.54E+11 5.85E+00 2.93E-14 1.80E-14 7.33E-1.
21 3.54E-03 9.06E-01 9.90E+01 6.26E+10 7.10E+00 3.57E-05 1.88E+00 2.10E+0!
21 3.54E-03 6.64E-02 7.77E+01 1.58E+11 5.59E+00 3.09E-14 1.79E-14 9.21E-1.
22 4.82E-03 9.23E-01 8.64E+01 6.08E+10 6.63E+00 5.58E-05 1.88E+00 2.86E+0!
22 4.82E-03 7.67E-02 6.39E+01 1.60E+11 5.28E+00 3.26E-14 1.79E-14 1.15E-1.
23 6.52E-03 9.43E-01 7.10E+01 5.57E+10 5.73E+00 9.17E-05 1.88E+00 3.86E+0!
23 6.52E-03 8.60E-02 4.71E+01 1.63E+11 4.67E+00 3.47E-14 1.78E-14 1.48E-1.
24 8.64E-03 9.66E-01 5.43E+01 4.67E+10 4.60E+00 1.59E-04 1.88E+00 5.12E+0!
24 8.64E-03 9.38E-02 3.15E+01 1.63E+11 3.91E+00 3.65E-14 1.79E-14 2.06E-1.
25 1.14E-02 9.95E-01 3.97E+01 3.74E+10 3.75E+00 2.86E-04 1.88E+00 6.73E+0!
25 1.14E-02 1.00E-01 2.15E+01 1.57E+11 3.35E+00 3.91E-14 1.79E-14 2.87E-1.
26 1.45E-02 1.03E+00 2.58E+01 2.82E+10 3.16E+00 5.61E-04 1.88E+00 8.57E+0!
26 1.45E-02 1.05E-01 1.13E+01 1.45E+11 2.95E+00 4.26E-14 1.80E-14 4.05E-1.

```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	3.98E-06	7.00E-01	1.42E+02	6.98E+00	6.71E+08	1.45E+10
max gain	5.61E-05	7.69E-01	1.53E+02	6.79E+00	7.82E+09	5.02E+10
max ft	3.54E-03	9.06E-01	9.90E+01	5.59E+00	6.26E+10	1.58E+11

bvceo = 2.8E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.74E+02 ghz

note: rsmin not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.000E+00

\*\*\*\*\*

\*

\*

BIPSIM Inc & University of Waterloo

\*

\*

Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program

\*

\*

BIPOLE3 Version v.5.3.1G created 20 Feb 2006

\*

\*

(c) D.J. Roulston

\*

\*

\*

\*\* This BIPOLE3 copy is for educational use by: \*\*

\*

Electrical Engineering Department, University Indonesia

\*

\*

\*\*\*\*\*

Input file: c:\shinta\tossin\009baru6.bip

SIGE HBT AE=0.09X10, BL 12UM

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.8000E-03,	BNS	=0.1200E-02,	BPB	=0.96001			
BPC	=0.9600E-03,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.3500E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.5000E-01,	XGEP	=0.5000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.60001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									



SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
9.00E-06 8.00E-04 2.00E-05 2.00E-05 9.60E-04 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.212E+01 0.779E+02 0.650E+06 0.419E-09 0.000E+00 0.419E-09 0.273E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 6.45E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 2.92E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 2.56E+11 1.79E+09 8.76E+13 2.24E+12 3.97E+10 2.22E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2

using ionization co-efficients of marsland with

non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

using ionization co-efficients of var overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05

ionization integral results: table 4-5

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm.

RBB = 5.35E+00 RBEXT = 3.15E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 6.65E-14 F; Total plane BL capacitance = 2.99E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.30E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 6.02E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.62E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.17E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 8.04E-15 CJCO = 1.34E-14 CJCS = 6.95E-14

vioeb=0.961 viocb=0.893 xbc= 3.79E-06 xcc= 1.276E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.371E-03

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.825E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.879E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.371E-03

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	(
1	2.36E+02	2.30E+02	7.00E-01	1.64E-10	1.24E-14	4.10E-13	9.53E+08	2.07E+09
1	-1.02E+00	2.23E+02	1.00E+00	2.11E-12	7.01E-13	4.22E-14	1.37E+11	1.47E+11
1	1.06E+00	8.24E-06	5.68E+17	9.12E+16	8.98E+14	1.44E+14	1.36E-06	1.28E-06
.								
2	4.67E+02	2.28E+02	7.18E-01	8.66E-11	1.30E-14	4.10E-13	1.79E+09	2.11E+09
2	-2.05E+00	2.21E+02	1.02E+00	1.22E-12	7.25E-13	4.22E-14	1.34E+11	1.48E+11
2	2.11E+00	8.24E-06	5.55E+17	9.13E+16	1.80E+15	2.96E+14	1.41E-06	1.28E-06
.								
3	9.24E+02	2.25E+02	7.36E-01	4.54E-11	1.37E-14	4.10E-13	3.37E+09	2.11E+09
3	-4.10E+00	2.19E+02	1.02E+00	7.04E-13	7.26E-13	4.22E-14	1.34E+11	2.94E+11
3	4.22E+00	8.24E-06	5.41E+17	9.13E+16	3.59E+15	6.07E+14	1.46E-06	1.28E-06
.								
4	1.82E+03	2.22E+02	7.54E-01	2.40E-11	1.45E-14	4.10E-13	6.20E+09	2.15E+09
4	-8.22E+00	2.16E+02	1.03E+00	4.16E-13	7.53E-13	4.22E-14	1.31E+11	3.14E+11
4	8.44E+00	8.24E-06	5.27E+17	9.14E+16	7.19E+15	1.25E+15	1.53E-06	1.28E-06
.								
5	3.59E+03	2.18E+02	7.72E-01	1.29E-11	1.54E-14	4.10E-13	1.11E+10	2.15E+09
5	-1.65E+01	2.13E+02	1.03E+00	2.49E-13	7.58E-13	4.22E-14	1.30E+11	1.35E+11
5	1.69E+01	8.24E-06	5.12E+17	9.14E+16	1.44E+16	2.57E+15	1.60E-06	1.28E-06
.								
6	7.03E+03	2.12E+02	7.90E-01	7.05E-12	1.69E-14	4.07E-13	1.88E+10	2.22E+09
6	-3.32E+01	2.07E+02	1.05E+00	1.53E-13	7.95E-13	4.24E-14	1.26E+11	-9.16E+11
6	3.40E+01	8.20E-06	4.96E+17	9.13E+16	2.87E+16	5.31E+15	1.69E-06	1.28E-06
*								
7	1.37E+04	2.05E+02	8.09E-01	3.80E-12	1.89E-14	4.24E-13	3.07E+10	2.22E+09
7	-6.68E+01	2.00E+02	1.09E+00	9.64E-14	8.12E-13	4.06E-14	1.23E+11	1.93E+11
7	6.85E+01	8.50E-06	4.84E+17	9.13E+16	5.75E+16	1.09E+16	1.72E-06	1.24E-06
.								
8	2.63E+04	1.95E+02	8.28E-01	2.19E-12	2.15E-14	4.23E-13	4.42E+10	2.26E+09
8	-1.35E+02	1.91E+02	1.14E+00	6.17E-14	8.64E-13	4.06E-14	1.18E+11	1.44E+11
8	1.38E+02	8.50E-06	4.76E+17	9.12E+16	1.15E+17	2.23E+16	1.83E-06	1.24E-06
.								
9	5.05E+04	1.85E+02	8.49E-01	1.27E-12	2.52E-14	4.36E-13	5.86E+10	2.30E+09
9	-2.73E+02	1.80E+02	1.23E+00	4.14E-14	9.06E-13	3.92E-14	1.13E+11	3.41E+11
9	2.80E+02	8.76E-06	4.68E+17	9.12E+16	2.30E+17	4.58E+16	1.90E-06	1.20E-06
.								
10	9.68E+04	1.73E+02	8.72E-01	8.08E-13	3.03E-14	4.63E-13	6.74E+10	2.42E+09
10	-5.59E+02	1.69E+02	1.38E+00	2.81E-14	9.95E-13	3.66E-14	1.04E+11	-3.03E+11
10	5.74E+02	9.28E-06	4.58E+17	9.08E+16	4.60E+17	9.52E+16	2.09E-06	1.13E-06
.								
11	1.05E+05	1.50E+02	8.00E-01	5.56E-13	3.00E-14	5.00E-13	6.01E+10	2.55E+09

```

11  1.85E+05 1.58E+02 9.00E-01 5.56E-13 3.82E-14 5.33E-13 6.91E+10 2.65E+00
11  -1.17E+03 1.54E+02 1.66E+00 1.98E-14 1.13E-12 3.12E-14 9.21E+10 -2.87E+00
11  1.20E+03 1.06E-05 4.47E+17 9.01E+16 9.20E+17 2.02E+17 2.30E-06 9.95E+00
*
12  3.51E+05 1.37E+02 9.37E-01 4.39E-13 5.43E-14 6.45E-13 6.01E+10 3.89E+00
12  -2.56E+03 1.32E+02 2.23E+00 1.51E-14 1.47E-12 2.46E-14 7.25E+10 7.83E+00
12  2.65E+03 1.27E-05 4.32E+17 8.91E+16 1.84E+18 4.47E+17 2.59E-06 8.30E+00
.
13  6.30E+05 1.03E+02 9.87E-01 4.09E-13 1.02E-13 5.56E-13 3.48E+10 1.09E+00
13  -6.12E+03 9.84E+01 3.33E+00 1.44E-14 3.47E-12 2.67E-14 3.83E+10 4.35E+00
13  6.41E+03 1.08E-05 4.12E+17 8.80E+16 3.68E+18 1.06E+18 2.90E-06 9.75E+00
*
14  1.05E+06 6.31E+01 1.05E+00 4.59E-13 1.88E-13 4.87E-13 1.78E+10 1.79E+00
14  -1.66E+04 5.90E+01 5.13E+00 1.57E-14 7.76E-12 2.90E-14 1.88E+10 2.41E+00
14  1.78E+04 9.30E-06 3.87E+17 8.56E+16 7.36E+18 2.63E+18 3.51E-06 1.13E+00
.
15  1.61E+06 2.98E+01 1.14E+00 5.72E-13 3.89E-13 4.75E-13 8.79E+09 2.51E+00
15  -5.41E+04 2.68E+01 7.81E+00 1.92E-14 1.66E-11 2.89E-14 9.09E+09 3.75E+00
15  6.01E+04 8.70E-06 3.55E+17 8.20E+16 1.47E+19 6.51E+18 4.44E-06 1.21E+00

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.371E-03

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sq = 5.84E+03 rbase(intrinsic) = 5.46E+00  
gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu  
1.68E+11 1.26E+09 2.05E+12 3.64E+10

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = 0.371E-03 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	4.44E-06	7.07E-01	1.44E+02	9.25E+08	1.14E+01	3.08E-08	1.88E+00	3.28E+00
1	4.44E-06	1.72E-04	1.50E+02	1.70E+10	8.70E+00	1.46E-14	1.46E-14	3.39E-10
2	6.19E-06	7.17E-01	1.46E+02	1.27E+09	1.14E+01	4.24E-08	1.88E+00	4.57E+00
2	6.19E-06	2.40E-04	1.50E+02	2.00E+10	8.67E+00	1.49E-14	1.46E-14	4.10E-10
3	8.62E-06	7.25E-01	1.48E+02	1.74E+09	1.13E+01	5.83E-08	1.88E+00	6.37E+00
3	8.62E-06	3.31E-04	1.53E+02	2.34E+10	8.64E+00	1.51E-14	1.46E-14	5.27E-10
4	1.20E-05	7.35E-01	1.49E+02	2.36E+09	1.13E+01	8.04E-08	1.88E+00	8.88E+00
4	1.20E-05	4.56E-04	1.53E+02	2.73E+10	8.61E+00	1.54E-14	1.46E-14	6.58E-10

5	1.67E-05	7.42E-01	1.51E+02	3.20E+09	1.12E+01	1.11E-07	1.88E+00	1.23E+00
5	1.67E-05	6.31E-04	1.54E+02	3.19E+10	8.58E+00	1.57E-14	1.46E-14	8.67E-14
6	2.33E-05	7.52E-01	1.52E+02	4.34E+09	1.12E+01	1.53E-07	1.88E+00	1.72E+00
6	2.33E-05	8.75E-04	1.54E+02	3.72E+10	8.55E+00	1.60E-14	1.46E-14	1.14E-14
7	3.23E-05	7.60E-01	1.52E+02	5.85E+09	1.11E+01	2.12E-07	1.88E+00	2.39E+00
7	3.23E-05	1.21E-03	1.54E+02	4.33E+10	8.52E+00	1.64E-14	1.46E-14	1.52E-14
8	4.49E-05	7.69E-01	1.53E+02	7.82E+09	1.11E+01	2.94E-07	1.88E+00	3.32E+00
8	4.49E-05	1.67E-03	1.54E+02	5.02E+10	8.48E+00	1.68E-14	1.46E-14	2.02E-14
9	6.22E-05	7.77E-01	1.53E+02	1.03E+10	1.10E+01	4.07E-07	1.88E+00	4.59E+00
9	6.22E-05	2.29E-03	1.52E+02	5.78E+10	8.45E+00	1.72E-14	1.46E-14	2.72E-14
10	8.63E-05	7.87E-01	1.52E+02	1.35E+10	1.10E+01	5.67E-07	1.88E+00	6.37E+00
10	8.63E-05	3.13E-03	1.51E+02	6.61E+10	8.41E+00	1.77E-14	1.46E-14	3.67E-14
11	1.19E-04	7.95E-01	1.51E+02	1.74E+10	1.09E+01	7.89E-07	1.88E+00	8.79E+00
11	1.19E-04	4.26E-03	1.47E+02	7.53E+10	8.37E+00	1.80E-14	1.46E-14	4.95E-14
12	1.65E-04	8.05E-01	1.49E+02	2.22E+10	1.09E+01	1.10E-06	1.88E+00	1.22E+00
12	1.65E-04	5.77E-03	1.46E+02	8.54E+10	8.32E+00	1.81E-14	1.46E-14	6.68E-14
13	2.26E-04	8.14E-01	1.47E+02	2.76E+10	1.08E+01	1.54E-06	1.88E+00	1.67E+00
13	2.26E-04	7.75E-03	1.41E+02	9.56E+10	8.26E+00	1.85E-14	1.46E-14	8.97E-14
14	3.11E-04	8.23E-01	1.45E+02	3.35E+10	1.07E+01	2.15E-06	1.88E+00	2.30E+00
14	3.11E-04	1.03E-02	1.39E+02	1.06E+11	8.19E+00	1.90E-14	1.46E-14	1.20E-14
15	4.27E-04	8.33E-01	1.41E+02	3.97E+10	1.06E+01	3.03E-06	1.88E+00	3.16E+00
15	4.27E-04	1.37E-02	1.31E+02	1.16E+11	8.12E+00	1.95E-14	1.45E-14	1.60E-14
16	5.87E-04	8.43E-01	1.37E+02	4.61E+10	1.04E+01	4.29E-06	1.88E+00	4.33E+00
16	5.87E-04	1.79E-02	1.27E+02	1.25E+11	8.02E+00	1.98E-14	1.45E-14	2.11E-14
17	8.04E-04	8.54E-01	1.32E+02	5.19E+10	1.02E+01	6.11E-06	1.88E+00	5.94E+00
17	8.04E-04	2.32E-02	1.19E+02	1.34E+11	7.90E+00	2.04E-14	1.45E-14	2.77E-14
18	1.10E-03	8.65E-01	1.26E+02	5.66E+10	1.00E+01	8.75E-06	1.88E+00	8.15E+00
18	1.10E-03	2.95E-02	1.13E+02	1.42E+11	7.75E+00	2.14E-14	1.45E-14	3.61E-14
19	1.51E-03	8.77E-01	1.18E+02	6.02E+10	9.71E+00	1.28E-05	1.88E+00	1.12E+00



```

19 1.51E-03 3.68E-02 1.02E+02 1.48E+11 7.55E+00 2.24E-14 1.45E-14 4.63E-1.
20 2.07E-03 8.90E-01 1.10E+02 6.24E+10 9.34E+00 1.88E-05 1.88E+00 1.53E+0!
20 2.07E-03 4.48E-02 9.26E+01 1.54E+11 7.30E+00 2.34E-14 1.44E-14 5.87E-1.
21 2.84E-03 9.06E-01 9.90E+01 6.26E+10 8.87E+00 2.86E-05 1.88E+00 2.10E+0!
21 2.84E-03 5.32E-02 7.76E+01 1.58E+11 6.98E+00 2.47E-14 1.44E-14 7.37E-1.
22 3.86E-03 9.23E-01 8.64E+01 6.08E+10 8.28E+00 4.47E-05 1.88E+00 2.86E+0!
22 3.86E-03 6.14E-02 6.39E+01 1.60E+11 6.59E+00 2.61E-14 1.43E-14 9.21E-1.
23 5.22E-03 9.43E-01 7.10E+01 5.57E+10 7.15E+00 7.35E-05 1.88E+00 3.86E+0!
23 5.22E-03 6.89E-02 4.71E+01 1.63E+11 5.83E+00 2.78E-14 1.43E-14 1.19E-1.
24 6.92E-03 9.66E-01 5.43E+01 4.67E+10 5.74E+00 1.28E-04 1.88E+00 5.12E+0!
24 6.92E-03 7.51E-02 3.15E+01 1.63E+11 4.89E+00 2.92E-14 1.43E-14 1.65E-1.
25 9.11E-03 9.95E-01 3.97E+01 3.74E+10 4.68E+00 2.29E-04 1.88E+00 6.73E+0!
25 9.11E-03 8.03E-02 2.15E+01 1.57E+11 4.18E+00 3.13E-14 1.44E-14 2.30E-1.
26 1.16E-02 1.03E+00 2.58E+01 2.82E+10 3.95E+00 4.49E-04 1.88E+00 8.57E+0!
26 1.16E-02 8.38E-02 1.13E+01 1.45E+11 3.69E+00 3.41E-14 1.44E-14 3.24E-1.

```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	3.19E-06	7.00E-01	1.42E+02	8.72E+00	6.71E+08	1.45E+10
max gain	4.49E-05	7.69E-01	1.53E+02	8.48E+00	7.82E+09	5.02E+10
max ft	2.84E-03	9.06E-01	9.90E+01	6.98E+00	6.26E+10	1.58E+11

bvceo = 2.8E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.74E+02 ghz

note: rsmn not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.000E+00

\*\*\*\*\*

\*

\*

BIPSIM Inc & University of Waterloo

\*

\*

Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program

\*

\*

BIPOLE3 Version v.5.3.1G created 20 Feb 2006

\*

\*

(c) D.J. Roulston

\*

\*

\*

\*\* This BIPOLE3 copy is for educational use by: \*\*  
Electrical Eng

\*

\*

\*

\*\*\*\*\*

Input file: c:\shinta\tossin\tossin\_ge\009asli\_ge03.bip

SIGE HBT AE=0.09X10

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.1000E-02,	BNS	=0.1500E-02,	BPB	=0.12001			
BPC	=0.1200E-02,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.3500E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.3000E-01,	XGEP	=0.3000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.60001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
9.00E-06 1.00E-03 2.00E-05 2.00E-05 1.20E-03 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.225E+01 0.875E+02 0.204E+06 0.120E-08 0.000E+00 0.120E-08 0.245E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 5.16E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 2.34E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 4.57E+11 3.23E+09 8.76E+13 2.48E+12 4.39E+10 1.36E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2

using ionization co-efficients of marsland with

non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

using ionization cross coefficients of var overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05

ionization integral results: table 4-5

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.17E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm,

RBB = 4.29E+00 RBEXT = 2.53E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 7.99E-14 F; Total plane BL capacitance = 3.74E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.04E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 5.79E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.53E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.17E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 9.96E-15 CJCO = 1.66E-14 CJCS = 8.36E-14

vioeb=0.986 viocb=0.908 xbc= 3.78E-06 xcc= 1.280E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.281E-02

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.946E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.162E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.281E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.047E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.225E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.281E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.011E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.189E-02

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.011E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	(
1	1.33E+02	1.22E+02	7.00E-01	2.84E-10	3.12E-14	4.05E-13	5.51E+08	2.07E+09
1	-1.08E+00	1.20E+02	1.00E+00	3.28E-12	6.99E-13	4.22E-14	1.35E+11	3.29E+11
1	1.10E+00	8.24E-06	9.87E+17	1.63E+17	5.03E+14	8.30E+13	1.33E-06	1.28E-06
.								
2	2.63E+02	1.21E+02	7.18E-01	1.49E-10	3.22E-14	4.05E-13	1.04E+09	2.07E+09
2	-2.17E+00	1.19E+02	1.01E+00	2.01E-12	6.99E-13	4.22E-14	1.35E+11	2.58E+11
2	2.21E+00	8.24E-06	9.71E+17	1.63E+17	1.01E+15	1.69E+14	1.37E-06	1.28E-06
.								
3	5.21E+02	1.20E+02	7.36E-01	7.80E-11	3.34E-14	4.05E-13	1.98E+09	2.11E+09
3	-4.34E+00	1.18E+02	1.02E+00	1.15E-12	7.23E-13	4.22E-14	1.32E+11	1.97E+11
3	4.41E+00	8.24E-06	9.55E+17	1.63E+17	2.01E+15	3.44E+14	1.42E-06	1.28E-06
.								
4	1.03E+03	1.19E+02	7.54E-01	4.08E-11	3.47E-14	4.05E-13	3.73E+09	2.11E+09
4	-8.68E+00	1.17E+02	1.02E+00	6.63E-13	7.24E-13	4.22E-14	1.32E+11	2.14E+11
4	8.82E+00	8.24E-06	9.37E+17	1.63E+17	4.02E+15	7.01E+14	1.47E-06	1.28E-06
.								
5	2.04E+03	1.17E+02	7.72E-01	2.16E-11	3.62E-14	4.05E-13	6.85E+09	2.15E+09
5	-1.74E+01	1.16E+02	1.02E+00	3.89E-13	7.50E-13	4.22E-14	1.29E+11	2.05E+11
5	1.76E+01	8.24E-06	9.18E+17	1.63E+17	8.05E+15	1.43E+15	1.54E-06	1.28E-06
.								
6	4.03E+03	1.16E+02	7.90E-01	1.16E-11	3.81E-14	4.05E-13	1.22E+10	2.15E+09
6	-3.48E+01	1.14E+02	1.03E+00	2.31E-13	7.53E-13	4.22E-14	1.29E+11	2.51E+11
6	3.53E+01	8.24E-06	8.99E+17	1.63E+17	1.61E+16	2.93E+15	1.62E-06	1.28E-06
.								
7	7.91E+03	1.13E+02	8.08E-01	6.28E-12	4.08E-14	4.20E-13	2.07E+10	2.22E+09
.								



Lampiran B.6.File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge03.  
8 of 11

```

7  -7.00E+01 1.12E+02 1.05E+00 1.39E-13 7.89E-13 4.06E-14 1.23E+11-3.921
7  7.09E+01 8.50E-06 8.78E+17 1.63E+17 3.22E+16 6.00E+15 1.70E-06 1.241
*
8  1.55E+04 1.10E+02 8.27E-01 3.36E-12 4.44E-14 4.19E-13 3.35E+10 2.221
8  -1.41E+02 1.08E+02 1.08E+00 8.69E-14 8.00E-13 4.06E-14 1.22E+11 1.251
8  1.43E+02 8.50E-06 8.61E+17 1.63E+17 6.44E+16 1.23E+16 1.73E-06 1.241
.
9  2.99E+04 1.06E+02 8.47E-01 1.95E-12 4.92E-14 4.18E-13 4.73E+10 2.261
9  -2.83E+02 1.04E+02 1.14E+00 5.51E-14 8.47E-13 4.06E-14 1.18E+11-2.711
9  2.87E+02 8.50E-06 8.48E+17 1.63E+17 1.29E+17 2.51E+16 1.86E-06 1.241
.
10 5.76E+04 1.00E+02 8.68E-01 1.13E-12 5.65E-14 4.49E-13 6.13E+10 2.301
10 -5.75E+02 9.88E+01 1.25E+00 3.65E-14 8.85E-13 3.76E-14 1.11E+11 2.521
10 5.83E+02 9.06E-06 8.33E+17 1.63E+17 2.58E+17 5.16E+16 1.91E-06 1.161
.
11 1.10E+05 9.34E+01 8.92E-01 7.35E-13 6.72E-14 4.75E-13 6.89E+10 2.421
11 -1.18E+03 9.21E+01 1.42E+00 2.54E-14 9.74E-13 3.52E-14 1.03E+11 2.261
11 1.20E+03 9.58E-06 8.15E+17 1.62E+17 5.15E+17 1.08E+17 2.09E-06 1.101
.
12 2.10E+05 8.47E+01 9.21E-01 5.25E-13 8.50E-14 5.59E-13 6.82E+10 2.691
12 -2.48E+03 8.34E+01 1.75E+00 1.82E-14 1.12E-12 2.93E-14 8.88E+10 1.021
12 2.52E+03 1.11E-05 7.94E+17 1.61E+17 1.03E+18 2.30E+17 2.34E-06 9.451
.
13 3.96E+05 7.22E+01 9.60E-01 4.20E-13 1.22E-13 6.21E-13 5.54E+10 5.181
13 -5.48E+03 7.08E+01 2.38E+00 1.44E-14 1.67E-12 2.50E-14 6.53E+10-2.951
13 5.58E+03 1.23E-05 7.66E+17 1.59E+17 2.06E+18 5.13E+17 2.61E-06 8.561
.
14 6.96E+05 5.23E+01 1.01E+00 4.08E-13 1.74E-13 5.37E-13 3.13E+10 1.211
14 -1.33E+04 5.09E+01 3.63E+00 1.45E-14 3.93E-12 2.71E-14 3.41E+10 2.121
14 1.37E+04 1.05E-05 7.30E+17 1.57E+17 4.12E+18 1.23E+18 2.93E-06 1.001
.
15 1.14E+06 3.12E+01 1.08E+00 4.76E-13 2.94E-13 4.66E-13 1.60E+10 1.911
15 -3.66E+04 3.00E+01 5.53E+00 1.58E-14 8.66E-12 2.97E-14 1.68E+10 2.041
15 3.81E+04 9.00E-06 6.82E+17 1.51E+17 8.24E+18 3.05E+18 3.69E-06 1.171
.
16 1.73E+06 1.43E+01 1.17E+00 6.02E-13 6.28E-13 4.93E-13 7.85E+09 2.631
16 -1.21E+05 1.34E+01 8.41E+00 1.92E-14 1.85E-11 2.75E-14 8.09E+09 3.281
16 1.29E+05 9.00E-06 6.25E+17 1.45E+17 1.65E+19 7.48E+18 4.68E-06 1.171

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.189E-02

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sg = 5.89E+03 rbase(intrinsic) = 4.42E+00

100/sq = 3.00E+11 1base(INCLINSE) = 4.42E+00

gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu

3.00E+11 2.27E+09 2.20E+12 3.89E+10

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = 0.189E-02 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	3.22E-06	7.07E-01	1.11E+02	5.44E+08	9.21E+00	2.89E-08	1.93E+00	1.85E+00
1	3.22E-06	1.24E-04	1.15E+02	1.30E+10	7.01E+00	1.78E-14	1.82E-14	3.10E-14
2	4.49E-06	7.17E-01	1.12E+02	7.52E+08	9.17E+00	3.99E-08	1.93E+00	2.58E+00
2	4.49E-06	1.74E-04	1.15E+02	1.53E+10	6.98E+00	1.81E-14	1.82E-14	3.69E-14
3	6.25E-06	7.25E-01	1.14E+02	1.03E+09	9.14E+00	5.50E-08	1.93E+00	3.59E+00
3	6.25E-06	2.40E-04	1.17E+02	1.80E+10	6.96E+00	1.84E-14	1.82E-14	4.67E-14
4	8.72E-06	7.35E-01	1.14E+02	1.40E+09	9.10E+00	7.62E-08	1.93E+00	5.01E+00
4	8.72E-06	3.32E-04	1.17E+02	2.10E+10	6.94E+00	1.87E-14	1.82E-14	5.67E-14
5	1.21E-05	7.42E-01	1.16E+02	1.93E+09	9.07E+00	1.05E-07	1.93E+00	6.97E+00
5	1.21E-05	4.61E-04	1.19E+02	2.47E+10	6.92E+00	1.90E-14	1.82E-14	7.31E-14
6	1.69E-05	7.52E-01	1.16E+02	2.63E+09	9.03E+00	1.45E-07	1.93E+00	9.72E+00
6	1.69E-05	6.41E-04	1.19E+02	2.89E+10	6.89E+00	1.94E-14	1.82E-14	9.30E-14
7	2.35E-05	7.60E-01	1.17E+02	3.59E+09	9.00E+00	2.01E-07	1.93E+00	1.35E+00
7	2.35E-05	8.90E-04	1.19E+02	3.38E+10	6.87E+00	1.98E-14	1.82E-14	1.23E-14
8	3.28E-05	7.69E-01	1.18E+02	4.86E+09	8.95E+00	2.79E-07	1.93E+00	1.88E+00
8	3.28E-05	1.23E-03	1.19E+02	3.94E+10	6.84E+00	2.02E-14	1.82E-14	1.62E-14
9	4.56E-05	7.77E-01	1.18E+02	6.53E+09	8.92E+00	3.86E-07	1.93E+00	2.62E+00
9	4.56E-05	1.71E-03	1.19E+02	4.58E+10	6.81E+00	2.07E-14	1.82E-14	2.17E-14
10	6.34E-05	7.87E-01	1.18E+02	8.72E+09	8.87E+00	5.36E-07	1.93E+00	3.64E+00
10	6.34E-05	2.36E-03	1.19E+02	5.30E+10	6.78E+00	2.12E-14	1.82E-14	2.90E-14
11	8.80E-05	7.95E-01	1.18E+02	1.15E+10	8.83E+00	7.45E-07	1.93E+00	5.06E+00
11	8.80E-05	3.25E-03	1.18E+02	6.10E+10	6.76E+00	2.17E-14	1.82E-14	3.92E-14
12	1.22E-04	8.04E-01	1.18E+02	1.50E+10	8.79E+00	1.04E-06	1.93E+00	7.02E+00
12	1.22E-04	4.45E-03	1.17E+02	6.98E+10	6.73E+00	2.23E-14	1.82E-14	5.34E-14

13	1.69E-04	8.13E-01	1.17E+02	1.93E+10	8.74E+00	1.45E-06	1.93E+00	9.72E+00
13	1.69E-04	6.07E-03	1.15E+02	7.95E+10	6.69E+00	2.26E-14	1.82E-14	7.22E-11
14	2.34E-04	8.22E-01	1.16E+02	2.45E+10	8.67E+00	2.02E-06	1.93E+00	1.35E+00
14	2.34E-04	8.24E-03	1.13E+02	8.99E+10	6.65E+00	2.28E-14	1.82E-14	9.71E-11
15	3.23E-04	8.31E-01	1.14E+02	3.03E+10	8.60E+00	2.83E-06	1.93E+00	1.86E+00
15	3.23E-04	1.11E-02	1.10E+02	1.00E+11	6.60E+00	2.32E-14	1.82E-14	1.30E-11
16	4.46E-04	8.41E-01	1.13E+02	3.63E+10	8.52E+00	3.96E-06	1.93E+00	2.56E+00
16	4.46E-04	1.48E-02	1.08E+02	1.10E+11	6.54E+00	2.41E-14	1.82E-14	1.74E-11
17	6.13E-04	8.51E-01	1.10E+02	4.25E+10	8.41E+00	5.58E-06	1.93E+00	3.52E+00
17	6.13E-04	1.95E-02	1.03E+02	1.20E+11	6.48E+00	2.47E-14	1.82E-14	2.31E-11
18	8.43E-04	8.61E-01	1.07E+02	4.88E+10	8.29E+00	7.89E-06	1.93E+00	4.84E+00
18	8.43E-04	2.53E-02	9.94E+01	1.30E+11	6.39E+00	2.51E-14	1.81E-14	3.05E-11
19	1.16E-03	8.72E-01	1.03E+02	5.44E+10	8.13E+00	1.13E-05	1.93E+00	6.65E+00
19	1.16E-03	3.25E-02	9.30E+01	1.38E+11	6.29E+00	2.57E-14	1.81E-14	3.98E-11
20	1.58E-03	8.83E-01	9.80E+01	5.87E+10	7.94E+00	1.62E-05	1.93E+00	9.11E+00
20	1.58E-03	4.10E-02	8.72E+01	1.45E+11	6.16E+00	2.68E-14	1.81E-14	5.13E-11
21	2.17E-03	8.96E-01	9.22E+01	6.17E+10	7.68E+00	2.35E-05	1.93E+00	1.25E+00
21	2.17E-03	5.07E-02	7.95E+01	1.51E+11	5.99E+00	2.82E-14	1.80E-14	6.54E-11
22	2.97E-03	9.09E-01	8.55E+01	6.31E+10	7.36E+00	3.47E-05	1.93E+00	1.71E+00
22	2.97E-03	6.12E-02	7.13E+01	1.56E+11	5.77E+00	2.96E-14	1.80E-14	8.24E-11
23	4.05E-03	9.26E-01	7.72E+01	6.25E+10	6.93E+00	5.25E-05	1.93E+00	2.33E+00
23	4.05E-03	7.20E-02	6.10E+01	1.59E+11	5.48E+00	3.14E-14	1.79E-14	1.03E-11
24	5.51E-03	9.44E-01	6.70E+01	5.96E+10	6.37E+00	8.23E-05	1.93E+00	3.17E+00
24	5.51E-03	8.24E-02	4.90E+01	1.61E+11	5.10E+00	3.30E-14	1.79E-14	1.31E-11
25	7.42E-03	9.66E-01	5.56E+01	5.38E+10	5.44E+00	1.33E-04	1.93E+00	4.27E+00
25	7.42E-03	9.17E-02	3.74E+01	1.64E+11	4.48E+00	3.50E-14	1.78E-14	1.69E-11
26	9.73E-03	9.89E-01	4.20E+01	4.44E+10	4.30E+00	2.32E-04	1.93E+00	5.60E+00
26	9.73E-03	9.87E-02	2.35E+01	1.63E+11	3.72E+00	3.69E-14	1.79E-14	2.32E-11
27	1.27E-02	1.02E+00	3.13E+01	3.54E+10	3.57E+00	4.07E-04	1.93E+00	7.33E+00

27 1.27E-02 1.05E-01 1.72E+01 1.56E+11 3.22E+00 3.96E-14 1.80E-14 3.22E-14

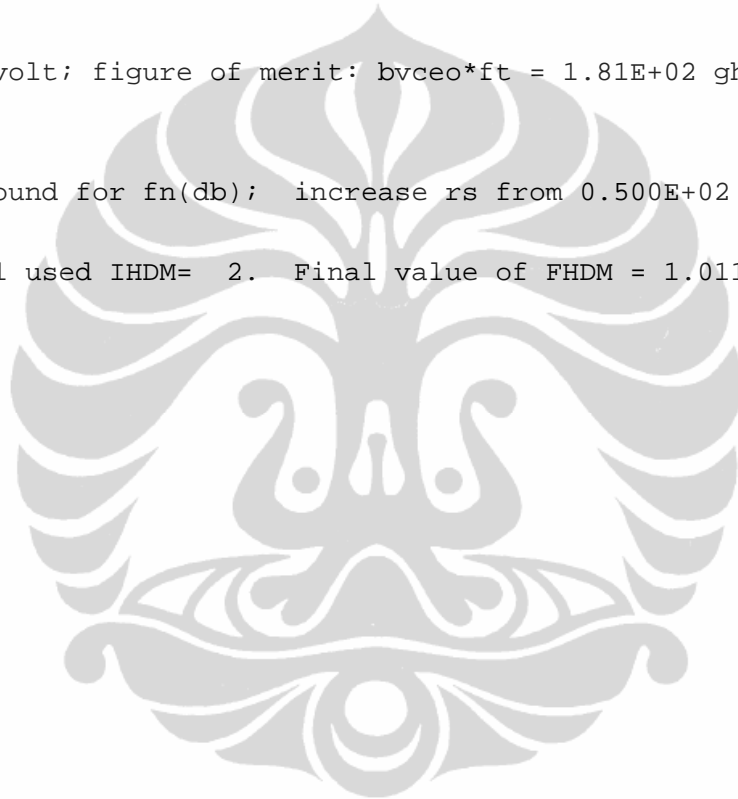
summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	2.31E-06	7.00E-01	1.10E+02	7.03E+00	3.94E+08	1.11E+10
max gain	6.34E-05	7.87E-01	1.18E+02	6.78E+00	8.72E+09	5.30E+10
max ft	2.97E-03	9.09E-01	8.55E+01	5.77E+00	6.31E+10	1.56E+11

bvceo = 2.9E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.81E+02 ghz

note: rsmn not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.011E+00



```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*       Electrical Engineering Department, University of Indonesia
*                               * * * * *
*****
```

Input file: c:\shinta\tossin\tossin\_ge\009asli\_ge10.bip

SIGE HBT AE=0.09X10

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.1000E-02,	BNS	=0.1500E-02,	BPB	=0.12001			
BPC	=0.1200E-02,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.3500E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.1000E+00,	XGEP	=0.1000E+00,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.60001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
9.00E-06 1.00E-03 2.00E-05 2.00E-05 1.20E-03 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.189E+01 0.592E+02 0.749E+07 0.303E-10 0.000E+00 0.303E-10 0.227E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 5.16E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 2.34E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 5.99E+10 4.22E+08 8.76E+13 1.91E+12 3.40E+10 8.05E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2  
using ionization co-efficients of marsland with  
non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

using ionization cross coefficients of var overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05



ionization integral results: table 4-5

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.19E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.19E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm.

RBB = 4.26E+00 RBEXT = 2.53E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 7.99E-14 F; Total plane BL capacitance = 3.74E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.04E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 5.79E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.86E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.19E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 1.03E-14 CJCO = 1.69E-14 CJCS = 8.36E-14

vioeb=0.900 viocb=0.854 xbc= 3.80E-06 xcc= 1.267E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.158E-02

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.629E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.131E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.158E-02

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

Lampiran B. 7. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge10.  
7 of 10

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vt
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	rc
1	9.67E+02	1.18E+03	7.00E-01	4.27E-11	2.10E-15	4.09E-13	3.58E+09	2.15E+01
1	-8.20E-01	1.03E+03	1.00E+00	6.46E-13	7.45E-13	4.23E-14	1.33E+11	3.16E+01
1	9.39E-01	8.20E-06	1.36E+17	2.14E+16	3.83E+15	6.05E+14	1.47E-06	1.28E+01
.								
2	1.89E+03	1.15E+03	7.18E-01	2.36E-11	2.36E-15	4.09E-13	6.31E+09	2.18E+01
2	-1.65E+00	1.01E+03	1.04E+00	3.97E-13	7.79E-13	4.23E-14	1.29E+11	2.86E+01
2	1.88E+00	8.20E-06	1.30E+17	2.14E+16	7.65E+15	1.27E+15	1.53E-06	1.28E+01
.								
3	3.67E+03	1.11E+03	7.36E-01	1.29E-11	2.72E-15	4.08E-13	1.10E+10	2.18E+01
3	-3.31E+00	9.76E+02	1.06E+00	2.49E-13	7.94E-13	4.23E-14	1.28E+11	1.59E+01
3	3.76E+00	8.20E-06	1.24E+17	2.14E+16	1.53E+16	2.66E+15	1.61E-06	1.28E+01
.								
4	7.07E+03	1.05E+03	7.55E-01	7.22E-12	3.29E-15	4.08E-13	1.83E+10	2.22E+01
4	-6.76E+00	9.25E+02	1.08E+00	1.61E-13	8.45E-13	4.23E-14	1.23E+11	7.08E+01
4	7.65E+00	8.20E-06	1.17E+17	2.14E+16	3.06E+16	5.61E+15	1.70E-06	1.28E+01
.								
5	1.36E+04	9.89E+02	7.73E-01	3.90E-12	4.01E-15	4.26E-13	2.97E+10	2.22E+01
5	-1.37E+01	8.76E+02	1.11E+00	1.06E-13	8.77E-13	4.06E-14	1.18E+11	7.62E+01
5	1.55E+01	8.50E-06	1.13E+17	2.14E+16	6.12E+16	1.16E+16	1.72E-06	1.24E+01
.								
6	2.61E+04	9.35E+02	7.93E-01	2.24E-12	4.90E-15	4.24E-13	4.28E+10	2.26E+01
6	-2.79E+01	8.30E+02	1.14E+00	6.83E-14	9.41E-13	4.06E-14	1.13E+11	3.72E+01
6	3.14E+01	8.50E-06	1.11E+17	2.14E+16	1.22E+17	2.38E+16	1.85E-06	1.24E+01
.								
7	5.04E+04	8.84E+02	8.13E-01	1.26E-12	6.01E-15	4.37E-13	5.75E+10	2.30E+01
7	-5.70E+01	7.85E+02	1.21E+00	4.53E-14	9.82E-13	3.91E-14	1.09E+11	1.06E+01
7	6.42E+01	8.76E-06	1.09E+17	2.14E+16	2.45E+17	4.90E+16	1.90E-06	1.20E+01
.								
8	9.80E+04	8.33E+02	8.37E-01	7.87E-13	7.49E-15	4.64E-13	6.67E+10	2.42E+01
8	-1.18E+02	7.37E+02	1.35E+00	2.99E-14	1.06E-12	3.65E-14	1.01E+11	-1.77E+01
8	1.33E+02	9.28E-06	1.07E+17	2.13E+16	4.90E+17	1.02E+17	2.09E-06	1.13E+01
*								
9	1.90E+05	7.66E+02	8.65E-01	5.44E-13	9.89E-15	5.51E-13	6.80E+10	2.65E+01
9	-2.49E+02	6.71E+02	1.65E+00	2.05E-14	1.19E-12	3.01E-14	8.96E+10	3.02E+01
9	2.84E+02	1.09E-05	1.04E+17	2.11E+16	9.80E+17	2.17E+17	2.33E-06	9.67E+01
.								
10	3.61E+05	6.55E+02	9.02E-01	4.35E-13	1.53E-14	6.46E-13	5.79E+10	4.20E+01
10	-5.52E+02	5.59E+02	2.26E+00	1.58E-14	1.61E-12	2.45E-14	6.93E+10	2.65E+01
10	6.47E+02	1.27E-05	1.01E+17	2.09E+16	1.96E+18	4.83E+17	2.60E-06	8.31E+01
.								
11	6.55E+05	6.00E+02	8.54E-01	4.00E-13	8.10E-14	5.00E-13	8.07E+10	3.15E+01

Lampiran B. 7. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge10.  
8 of 10

```

11 6.55E+05 4.88E+02 9.54E-01 4.03E-13 3.10E-14 5.39E-13 3.37E+10 1.15E+00
11 -1.34E+03 3.94E+02 3.39E+00 1.49E-14 3.71E-12 2.74E-14 3.69E+10 1.83E+00
11 1.66E+03 1.05E-05 9.62E+16 2.06E+16 3.92E+18 1.15E+18 2.92E-06 1.00E+00
.
12 1.09E+06 2.93E+02 1.02E+00 4.67E-13 9.27E-14 4.69E-13 1.71E+10 1.85E+00
12 -3.71E+03 2.16E+02 5.28E+00 1.60E-14 8.23E-12 2.99E-14 1.81E+10 -2.37E+00
12 5.04E+03 9.00E-06 9.00E+16 1.99E+16 7.84E+18 2.86E+18 3.61E-06 1.17E+00
.
13 1.67E+06 1.34E+02 1.11E+00 5.88E-13 2.26E-13 4.75E-13 8.38E+09 2.57E+00
13 -1.24E+04 8.58E+01 8.08E+00 1.96E-14 1.77E-11 2.87E-14 8.66E+09 2.08E+00
13 1.94E+04 8.70E-06 8.26E+16 1.91E+16 1.57E+19 7.04E+18 4.57E-06 1.21E+00

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.158E-02

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sq = 5.70E+03 rbase(intrinsic) = 4.27E+00  
gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu  
4.07E+10 3.05E+08 1.82E+12 3.24E+10

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = 0.158E-02 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	2.15E-05	7.07E-01	2.07E+02	3.38E+09	8.98E+00	1.04E-07	1.79E+00	1.34E+00
1	2.15E-05	8.31E-04	2.09E+02	3.28E+10	6.86E+00	1.95E-14	1.83E-14	1.09E-11
2	2.98E-05	7.17E-01	2.07E+02	4.58E+09	8.94E+00	1.44E-07	1.79E+00	1.85E+00
2	2.98E-05	1.15E-03	2.09E+02	3.82E+10	6.83E+00	2.00E-14	1.83E-14	1.43E-11
3	4.10E-05	7.25E-01	2.07E+02	6.00E+09	8.91E+00	1.98E-07	1.79E+00	2.55E+00
3	4.10E-05	1.55E-03	2.06E+02	4.38E+10	6.81E+00	2.04E-14	1.83E-14	1.87E-11
4	5.67E-05	7.35E-01	2.06E+02	7.77E+09	8.86E+00	2.75E-07	1.79E+00	3.53E+00
4	5.67E-05	2.07E-03	2.06E+02	5.00E+10	6.78E+00	2.09E-14	1.83E-14	2.41E-11
5	7.78E-05	7.43E-01	2.04E+02	1.01E+10	8.82E+00	3.81E-07	1.79E+00	4.84E+00
5	7.78E-05	2.80E-03	1.98E+02	5.72E+10	6.75E+00	2.14E-14	1.83E-14	3.23E-11
6	1.07E-04	7.52E-01	2.02E+02	1.31E+10	8.77E+00	5.31E-07	1.79E+00	6.67E+00
6	1.07E-04	3.80E-03	1.97E+02	6.53E+10	6.72E+00	2.21E-14	1.83E-14	4.35E-11
7	1.47E-04	7.60E-01	1.99E+02	1.70E+10	8.73E+00	7.39E-07	1.79E+00	9.14E+00
7	1.47E-04	5.14E-03	1.90E+02	7.44E+10	6.68E+00	2.22E-14	1.83E-14	5.87E-11

Lampiran B. 7. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge10.  
9 of 10

7	1.47E-04	5.14E-03	1.90E+02	7.44E+10	8.08E+00	2.25E-14	1.82E-14	9.07E-14
8	2.02E-04	7.70E-01	1.96E+02	2.17E+10	8.66E+00	1.03E-06	1.79E+00	1.26E+00
8	2.02E-04	6.96E-03	1.89E+02	8.44E+10	6.64E+00	2.25E-14	1.82E-14	7.93E-14
9	2.76E-04	7.79E-01	1.92E+02	2.70E+10	8.59E+00	1.44E-06	1.79E+00	1.72E+00
9	2.76E-04	9.36E-03	1.84E+02	9.44E+10	6.60E+00	2.30E-14	1.82E-14	1.07E-14
10	3.80E-04	7.89E-01	1.89E+02	3.28E+10	8.51E+00	2.01E-06	1.79E+00	2.37E+00
10	3.80E-04	1.26E-02	1.82E+02	1.05E+11	6.54E+00	2.38E-14	1.82E-14	1.45E-14
11	5.22E-04	7.98E-01	1.84E+02	3.91E+10	8.41E+00	2.84E-06	1.79E+00	3.25E+00
11	5.22E-04	1.67E-02	1.71E+02	1.15E+11	6.48E+00	2.43E-14	1.82E-14	1.94E-14
12	7.20E-04	8.09E-01	1.79E+02	4.57E+10	8.29E+00	4.02E-06	1.79E+00	4.48E+00
12	7.20E-04	2.21E-02	1.67E+02	1.25E+11	6.40E+00	2.47E-14	1.82E-14	2.58E-14
13	9.93E-04	8.19E-01	1.72E+02	5.17E+10	8.14E+00	5.79E-06	1.79E+00	6.18E+00
13	9.93E-04	2.87E-02	1.54E+02	1.34E+11	6.29E+00	2.54E-14	1.82E-14	3.40E-14
14	1.37E-03	8.30E-01	1.65E+02	5.65E+10	7.95E+00	8.34E-06	1.79E+00	8.55E+00
14	1.37E-03	3.67E-02	1.49E+02	1.42E+11	6.16E+00	2.66E-14	1.82E-14	4.45E-14
15	1.89E-03	8.43E-01	1.53E+02	6.00E+10	7.70E+00	1.24E-05	1.79E+00	1.18E+00
15	1.89E-03	4.58E-02	1.29E+02	1.48E+11	6.00E+00	2.80E-14	1.81E-14	5.72E-14
16	2.62E-03	8.56E-01	1.41E+02	6.19E+10	7.38E+00	1.85E-05	1.78E+00	1.63E+00
16	2.62E-03	5.57E-02	1.18E+02	1.54E+11	5.78E+00	2.95E-14	1.80E-14	7.26E-14
17	3.59E-03	8.72E-01	1.22E+02	6.15E+10	6.96E+00	2.93E-05	1.78E+00	2.23E+00
17	3.59E-03	6.56E-02	8.98E+01	1.57E+11	5.50E+00	3.11E-14	1.80E-14	9.14E-14
18	4.89E-03	8.90E-01	1.05E+02	5.91E+10	6.45E+00	4.68E-05	1.78E+00	3.05E+00
18	4.89E-03	7.51E-02	7.46E+01	1.60E+11	5.16E+00	3.28E-14	1.79E-14	1.15E-14
19	6.60E-03	9.11E-01	8.00E+01	5.27E+10	5.41E+00	8.24E-05	1.78E+00	4.11E+00
19	6.60E-03	8.37E-02	4.79E+01	1.62E+11	4.46E+00	3.47E-14	1.79E-14	1.52E-14
20	8.80E-03	9.36E-01	5.97E+01	4.37E+10	4.36E+00	1.47E-04	1.78E+00	5.48E+00
20	8.80E-03	9.14E-02	3.39E+01	1.61E+11	3.76E+00	3.66E-14	1.80E-14	2.14E-14
21	1.15E-02	9.65E-01	4.00E+01	3.42E+10	3.55E+00	2.88E-04	1.78E+00	7.18E+00
21	1.15E-02	9.72E-02	1.94E+01	1.53E+11	3.21E+00	3.94E-14	1.80E-14	3.03E-14

22 1.47E-02 9.98E-01 2.57E+01 2.55E+10 3.07E+00 5.72E-04 1.78E+00 9.17E+0!  
22 1.47E-02 1.01E-01 1.12E+01 1.39E+11 2.89E+00 4.36E-14 1.81E-14 4.32E-1:

lateral simulation terminated:

increase ntot or decrease vbemax or decrease bmlat

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	1.55E-05	7.00E-01	2.06E+02	6.88E+00	2.49E+09	2.81E+10
max gain	2.98E-05	7.17E-01	2.07E+02	6.83E+00	4.58E+09	3.82E+10
max ft	2.62E-03	8.56E-01	1.41E+02	5.78E+00	6.19E+10	1.54E+11

bvceo = 2.7E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.64E+02 ghz

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.000E+00

```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*       Electrical Engineering Dept. Universitas Indonesia
*                               * APPROVED *
*
*****
```

Input file: c:\shinta\tossin\tossin\_ge\009asli\_ge08.bip

SIGE HBT AE=0.09X10

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.1000E-02,	BNS	=0.1500E-02,	BPB	=0.12001			
BPC	=0.1200E-02,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.3500E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.8000E-01,	XGEP	=0.8000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.60001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.600E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
9.00E-06 1.00E-03 2.00E-05 2.00E-05 1.20E-03 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 3.50E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.196E+01 0.634E+02 0.303E+07 0.759E-10 0.000E+00 0.759E-10 0.230E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 5.16E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
5.20E-06 1.23E-06 5.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
2.69E+03 7.85E+02 4.56E+03 7.91E+01 2.34E+02 1.10 638

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.80E+13 3.15E+13 1.07E+11 7.49E+08 8.76E+13 2.01E+12 3.57E+10 4.76E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2  
using ionization co-efficients of marsland with  
non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm



xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.419E-05	0.878E-05	0.157E+00	0.595E+05	0.462E-32	0.100E+01	0.217E+33
0.415E-05	0.908E-05	0.191E+00	0.668E+05	0.463E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.411E-05	0.938E-05	0.231E+00	0.748E+05	0.464E-32	0.100E+01	0.216E+33
0.407E-05	0.998E-05	0.276E+00	0.835E+05	0.465E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.403E-05	0.103E-04	0.330E+00	0.928E+05	0.466E-32	0.100E+01	0.215E+33
0.399E-05	0.106E-04	0.393E+00	0.103E+06	0.467E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.395E-05	0.109E-04	0.464E+00	0.114E+06	0.121E-31	0.100E+01	0.826E+32
0.392E-05	0.115E-04	0.544E+00	0.125E+06	0.325E-25	0.100E+01	0.308E+26
0.388E-05	0.118E-04	0.636E+00	0.137E+06	0.445E-20	0.100E+01	0.225E+21
0.384E-05	0.121E-04	0.740E+00	0.150E+06	0.445E-16	0.100E+01	0.225E+17
0.380E-05	0.127E-04	0.855E+00	0.164E+06	0.609E-13	0.100E+01	0.164E+14
0.376E-05	0.130E-04	0.986E+00	0.179E+06	0.182E-10	0.100E+01	0.549E+11
0.372E-05	0.136E-04	0.113E+01	0.194E+06	0.169E-08	0.100E+01	0.591E+09
0.368E-05	0.139E-04	0.129E+01	0.211E+06	0.636E-07	0.100E+01	0.157E+08
0.364E-05	0.145E-04	0.147E+01	0.228E+06	0.119E-05	0.100E+01	0.844E+06
0.360E-05	0.148E-04	0.167E+01	0.247E+06	0.127E-04	0.100E+01	0.785E+05
0.356E-05	0.151E-04	0.188E+01	0.266E+06	0.887E-04	0.100E+01	0.113E+05
0.353E-05	0.157E-04	0.212E+01	0.286E+06	0.438E-03	0.100E+01	0.228E+04
0.349E-05	0.160E-04	0.238E+01	0.307E+06	0.164E-02	0.100E+01	0.607E+03
0.345E-05	0.166E-04	0.266E+01	0.329E+06	0.495E-02	0.100E+01	0.201E+03
0.341E-05	0.169E-04	0.296E+01	0.352E+06	0.125E-01	0.101E+01	0.793E+02
0.337E-05	0.175E-04	0.329E+01	0.377E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.333E-05	0.178E-04	0.364E+01	0.402E+06	0.519E-01	0.105E+01	0.183E+02
0.329E-05	0.184E-04	0.402E+01	0.428E+06	0.899E-01	0.110E+01	0.101E+02
0.325E-05	0.187E-04	0.443E+01	0.455E+06	0.143E+00	0.117E+01	0.601E+01
0.321E-05	0.193E-04	0.487E+01	0.483E+06	0.210E+00	0.127E+01	0.376E+01
0.317E-05	0.196E-04	0.533E+01	0.512E+06	0.290E+00	0.141E+01	0.245E+01
0.314E-05	0.199E-04	0.583E+01	0.542E+06	0.380E+00	0.161E+01	0.163E+01
0.310E-05	0.205E-04	0.636E+01	0.573E+06	0.475E+00	0.191E+01	0.110E+01
0.306E-05	0.208E-04	0.692E+01	0.606E+06	0.573E+00	0.234E+01	0.745E+00
0.302E-05	0.214E-04	0.750E+01	0.639E+06	0.670E+00	0.303E+01	0.493E+00
0.298E-05	0.217E-04	0.813E+01	0.673E+06	0.763E+00	0.423E+01	0.310E+00
0.294E-05	0.220E-04	0.879E+01	0.708E+06	0.853E+00	0.679E+01	0.173E+00
0.290E-05	0.226E-04	0.948E+01	0.744E+06	0.937E+00	0.158E+02	0.675E-01
0.286E-05	0.229E-04	0.102E+02	0.781E+06	0.103E+01	-0.302E+02	-0.321E-01

vbr = 9.95E+00 +/- 2.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.756E-06 0.208E-05 0.121E+01 0.161E+07 0.222E+00 0.128E+01

ionization integral results: table 4-3  
using ionization coefficients of van overstraeten and de man

using ionization cross coefficients of var overlappen and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.749E-06	0.209E-05	0.126E+01	0.165E+07	0.230E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.239E+00	0.131E+01
0.737E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.247E+00	0.133E+01
0.731E-06	0.214E-05	0.140E+01	0.177E+07	0.256E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.145E+01	0.181E+07	0.264E+00	0.136E+01
0.718E-06	0.216E-05	0.150E+01	0.185E+07	0.273E+00	0.137E+01
0.712E-06	0.218E-05	0.155E+01	0.189E+07	0.281E+00	0.139E+01
0.706E-06	0.219E-05	0.160E+01	0.193E+07	0.290E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.221E-05	0.165E+01	0.198E+07	0.299E+00	0.143E+01
0.693E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.202E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.687E-06	0.223E-05	0.176E+01	0.206E+07	0.316E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.325E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.187E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.662E-06	0.228E-05	0.198E+01	0.222E+07	0.351E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.360E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.231E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.235E+07	0.377E+00	0.161E+01
0.637E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.386E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.227E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.233E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.168E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.239E+01	0.251E+07	0.412E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.582E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01
0.563E-06	0.248E-05	0.294E+01	0.288E+07	0.488E+00	0.195E+01
0.557E-06	0.249E-05	0.301E+01	0.292E+07	0.496E+00	0.199E+01
0.550E-06	0.251E-05	0.307E+01	0.296E+07	0.504E+00	0.202E+01
0.544E-06	0.252E-05	0.314E+01	0.300E+07	0.513E+00	0.205E+01
0.538E-06	0.253E-05	0.320E+01	0.304E+07	0.521E+00	0.209E+01
0.532E-06	0.254E-05	0.327E+01	0.308E+07	0.529E+00	0.212E+01
0.526E-06	0.255E-05	0.333E+01	0.312E+07	0.537E+00	0.216E+01
0.519E-06	0.256E-05	0.340E+01	0.316E+07	0.545E+00	0.220E+01
0.513E-06	0.257E-05	0.346E+01	0.320E+07	0.553E+00	0.224E+01
0.386E-05	0.219E-04	0.845E+00	0.132E+06	0.704E-04	0.100E+01 0.142E+05

ionization integral results: table 4-5

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.384E-05	0.224E-04	0.906E+00	0.139E+06	0.117E-03	0.100E+01	0.856E+04
0.381E-05	0.230E-04	0.969E+00	0.147E+06	0.188E-03	0.100E+01	0.532E+04
0.379E-05	0.235E-04	0.104E+01	0.154E+06	0.294E-03	0.100E+01	0.340E+04
0.376E-05	0.240E-04	0.111E+01	0.162E+06	0.447E-03	0.100E+01	0.224E+04
0.373E-05	0.245E-04	0.118E+01	0.170E+06	0.664E-03	0.100E+01	0.151E+04
0.371E-05	0.251E-04	0.126E+01	0.179E+06	0.963E-03	0.100E+01	0.104E+04
0.368E-05	0.256E-04	0.134E+01	0.187E+06	0.137E-02	0.100E+01	0.731E+03
0.366E-05	0.262E-04	0.142E+01	0.196E+06	0.190E-02	0.100E+01	0.525E+03
0.363E-05	0.267E-04	0.151E+01	0.205E+06	0.260E-02	0.100E+01	0.384E+03
0.361E-05	0.273E-04	0.160E+01	0.215E+06	0.349E-02	0.100E+01	0.285E+03
0.358E-05	0.278E-04	0.169E+01	0.224E+06	0.462E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.355E-05	0.283E-04	0.179E+01	0.234E+06	0.601E-02	0.101E+01	0.165E+03
0.353E-05	0.289E-04	0.189E+01	0.244E+06	0.772E-02	0.101E+01	0.129E+03
0.350E-05	0.295E-04	0.199E+01	0.255E+06	0.979E-02	0.101E+01	0.101E+03
0.348E-05	0.300E-04	0.210E+01	0.266E+06	0.123E-01	0.101E+01	0.806E+02
0.345E-05	0.306E-04	0.221E+01	0.277E+06	0.152E-01	0.102E+01	0.649E+02
0.343E-05	0.311E-04	0.233E+01	0.288E+06	0.186E-01	0.102E+01	0.529E+02
0.340E-05	0.317E-04	0.245E+01	0.299E+06	0.225E-01	0.102E+01	0.434E+02
0.338E-05	0.323E-04	0.257E+01	0.311E+06	0.270E-01	0.103E+01	0.360E+02
0.335E-05	0.328E-04	0.270E+01	0.323E+06	0.322E-01	0.103E+01	0.301E+02
0.332E-05	0.334E-04	0.283E+01	0.336E+06	0.379E-01	0.104E+01	0.254E+02
0.330E-05	0.340E-04	0.296E+01	0.348E+06	0.444E-01	0.105E+01	0.215E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.18E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.78E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.18E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm,

RBB = 4.29E+00 RBEXT = 2.53E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 7.99E-14 F; Total plane BL capacitance = 3.74E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.04E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 5.79E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.58E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.76E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 4.66E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.18E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 1.02E-14 CJCO = 1.68E-14 CJCS = 8.36E-14

vioeb=0.925 viocb=0.871 xbc= 3.79E-06 xcc= 1.271E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3  
wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm<sup>-3</sup>  
delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.672E-03

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.675E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.331E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.672E-03

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

Lampiran B.8. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge8.  
7 of 10

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	(
1	5.54E+02	6.13E+02	7.00E-01	7.24E-11	3.81E-15	4.08E-13	2.13E+09	2.151
1	-9.05E-01	5.68E+02	1.00E+00	1.01E-12	7.33E-13	4.23E-14	1.34E+11	-2.771
1	9.75E-01	8.20E-06	2.43E+17	3.82E+16	2.14E+15	3.38E+14	1.42E-06	1.281
.								
2	1.09E+03	6.03E+02	7.18E-01	3.89E-11	4.11E-15	4.08E-13	3.91E+09	2.151
2	-1.81E+00	5.61E+02	1.02E+00	5.97E-13	7.36E-13	4.23E-14	1.34E+11	-3.481
2	1.95E+00	8.20E-06	2.34E+17	3.83E+16	4.29E+15	7.00E+14	1.48E-06	1.281
.								
3	2.15E+03	5.91E+02	7.36E-01	2.08E-11	4.51E-15	4.08E-13	7.10E+09	2.181
3	-3.63E+00	5.51E+02	1.03E+00	3.61E-13	7.67E-13	4.23E-14	1.30E+11	-2.911
3	3.90E+00	8.20E-06	2.25E+17	3.83E+16	8.57E+15	1.46E+15	1.54E-06	1.281
.								
4	4.19E+03	5.74E+02	7.54E-01	1.14E-11	5.04E-15	4.08E-13	1.24E+10	2.181
4	-7.29E+00	5.37E+02	1.05E+00	2.23E-13	7.78E-13	4.23E-14	1.29E+11	-1.231
4	7.81E+00	8.20E-06	2.16E+17	3.83E+16	1.71E+16	3.04E+15	1.62E-06	1.281
.								
5	8.11E+03	5.49E+02	7.73E-01	6.28E-12	5.86E-15	4.07E-13	2.07E+10	2.221
5	-1.48E+01	5.14E+02	1.07E+00	1.42E-13	8.22E-13	4.23E-14	1.25E+11	3.281
5	1.58E+01	8.20E-06	2.08E+17	3.83E+16	3.43E+16	6.34E+15	1.71E-06	1.281
.								
6	1.56E+04	5.19E+02	7.91E-01	3.41E-12	6.99E-15	4.25E-13	3.30E+10	2.221
6	-3.01E+01	4.87E+02	1.11E+00	9.23E-14	8.51E-13	4.06E-14	1.20E+11	1.111
6	3.20E+01	8.50E-06	2.02E+17	3.83E+16	6.86E+16	1.31E+16	1.73E-06	1.241
.								
7	2.99E+04	4.92E+02	8.11E-01	2.00E-12	8.32E-15	4.23E-13	4.62E+10	2.261
7	-6.07E+01	4.62E+02	1.16E+00	5.99E-14	9.15E-13	4.06E-14	1.15E+11	2.241
7	6.46E+01	8.50E-06	1.99E+17	3.82E+16	1.37E+17	2.67E+16	1.87E-06	1.241
.								
8	5.74E+04	4.65E+02	8.32E-01	1.15E-12	1.01E-14	4.55E-13	5.94E+10	2.341
8	-1.24E+02	4.36E+02	1.25E+00	3.99E-14	9.91E-13	3.76E-14	1.07E+11	2.301
8	1.32E+02	9.06E-06	1.95E+17	3.82E+16	2.74E+17	5.51E+16	1.93E-06	1.161
.								
9	1.11E+05	4.35E+02	8.56E-01	7.24E-13	1.25E-14	4.81E-13	6.83E+10	2.421
9	-2.55E+02	4.07E+02	1.41E+00	2.74E-14	1.05E-12	3.52E-14	1.01E+11	1.571
9	2.73E+02	9.58E-06	1.91E+17	3.80E+16	5.49E+17	1.15E+17	2.10E-06	1.101
.								
10	2.14E+05	3.97E+02	8.86E-01	5.12E-13	1.65E-14	5.61E-13	6.82E+10	2.731
10	-5.41E+02	3.68E+02	1.74E+00	1.92E-14	1.20E-12	2.94E-14	8.83E+10	-2.821
10	5.82E+02	1.11E-05	1.86E+17	3.77E+16	1.10E+18	2.47E+17	2.34E-06	9.481
.								
11	1.06E+05	4.06E+02	8.95E-01	4.17E-13	2.54E-14	6.11E-13	5.40E+10	5.501
11	-2.55E+02	4.07E+02	1.41E+00	2.74E-14	1.05E-12	3.52E-14	1.01E+11	1.571
11	2.73E+02	9.58E-06	1.91E+17	3.80E+16	5.49E+17	1.15E+17	2.10E-06	1.101

Lampiran B.8. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009asli\_ge8.  
8 of 10

```

11 4.06E+05 3.36E+02 9.25E-01 4.17E-13 2.54E-14 6.11E-13 5.40E+10 5.78E
11 -1.21E+03 3.06E+02 2.41E+00 1.51E-14 1.86E-12 2.55E-14 6.32E+10-1.81E
11 1.33E+03 1.20E-05 1.79E+17 3.73E+16 2.19E+18 5.54E+17 2.62E-06 8.78E
.
12 7.20E+05 2.41E+02 9.80E-01 4.04E-13 5.45E-14 5.25E-13 3.01E+10 1.27E
12 -2.99E+03 2.12E+02 3.69E+00 1.52E-14 4.26E-12 2.78E-14 3.27E+10-2.65E
12 3.40E+03 1.02E-05 1.70E+17 3.69E+16 4.39E+18 1.33E+18 2.95E-06 1.03E
.
13 1.18E+06 1.39E+02 1.05E+00 4.79E-13 1.46E-13 4.73E-13 1.51E+10 1.97E
13 -8.47E+03 1.15E+02 5.69E+00 1.66E-14 9.37E-12 2.94E-14 1.59E+10 2.89E
13 1.02E+04 9.00E-06 1.59E+17 3.55E+16 8.78E+18 3.33E+18 3.72E-06 1.17E
.
14 1.78E+06 6.12E+01 1.14E+00 6.15E-13 3.13E-13 5.02E-13 7.48E+09 2.72E
14 -2.91E+04 4.62E+01 8.61E+00 1.97E-14 1.98E-11 2.73E-14 7.71E+09-8.49E
14 3.86E+04 9.00E-06 1.45E+17 3.37E+16 1.76E+19 8.07E+18 4.81E-06 1.17E

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.672E-03

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sq = 5.76E+03 rbase(intrinsic) = 4.32E+00  
gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu  
7.27E+10 5.42E+08 1.89E+12 3.37E+10

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = -0.672E-03 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	1.25E-05	7.07E-01	1.88E+02	2.03E+09	9.05E+00	6.68E-08	1.81E+00	7.70E+00
1	1.25E-05	4.85E-04	1.95E+02	2.53E+10	6.91E+00	1.89E-14	1.83E-14	7.13E-14
2	1.75E-05	7.17E-01	1.90E+02	2.78E+09	9.01E+00	9.21E-08	1.81E+00	1.07E+00
2	1.75E-05	6.76E-04	1.95E+02	2.96E+10	6.88E+00	1.93E-14	1.83E-14	9.06E-14
3	2.42E-05	7.25E-01	1.91E+02	3.72E+09	8.98E+00	1.27E-07	1.81E+00	1.49E+00
3	2.42E-05	9.22E-04	1.94E+02	3.44E+10	6.86E+00	1.97E-14	1.83E-14	1.19E-14
4	3.36E-05	7.35E-01	1.92E+02	4.93E+09	8.94E+00	1.75E-07	1.81E+00	2.06E+00
4	3.36E-05	1.25E-03	1.94E+02	3.97E+10	6.83E+00	2.02E-14	1.83E-14	1.54E-14
5	4.65E-05	7.42E-01	1.92E+02	6.57E+09	8.90E+00	2.42E-07	1.81E+00	2.85E+00
5	4.65E-05	1.71E-03	1.92E+02	4.59E+10	6.80E+00	2.06E-14	1.83E-14	2.05E-14
6	6.44E-05	7.52E-01	1.92E+02	8.70E+09	8.86E+00	3.25E-07	1.81E+00	3.95E+00

5	6.44E-05	7.32E-01	1.92E+02	5.29E+10	6.77E+00	2.12E-14	1.83E-14	2.72E-11
6	6.44E-05	2.35E-03	1.92E+02	5.29E+10	6.77E+00	2.12E-14	1.83E-14	2.72E-11
7	8.86E-05	7.60E-01	1.90E+02	1.14E+10	8.82E+00	4.65E-07	1.81E+00	5.44E+00
7	8.86E-05	3.20E-03	1.86E+02	6.06E+10	6.75E+00	2.16E-14	1.83E-14	3.65E-11
8	1.22E-04	7.70E-01	1.89E+02	1.48E+10	8.77E+00	6.47E-07	1.81E+00	7.50E+00
8	1.22E-04	4.35E-03	1.85E+02	6.92E+10	6.71E+00	2.22E-14	1.83E-14	4.92E-11
9	1.68E-04	7.78E-01	1.86E+02	1.89E+10	8.71E+00	9.02E-07	1.81E+00	1.03E+00
9	1.68E-04	5.87E-03	1.78E+02	7.86E+10	6.68E+00	2.24E-14	1.83E-14	6.62E-11
10	2.31E-04	7.88E-01	1.83E+02	2.40E+10	8.65E+00	1.26E-06	1.81E+00	1.42E+00
10	2.31E-04	7.92E-03	1.77E+02	8.88E+10	6.63E+00	2.26E-14	1.82E-14	8.93E-11
11	3.16E-04	7.97E-01	1.80E+02	2.95E+10	8.57E+00	1.76E-06	1.81E+00	1.94E+00
11	3.16E-04	1.06E-02	1.71E+02	9.89E+10	6.58E+00	2.32E-14	1.82E-14	1.20E-11
12	4.34E-04	8.06E-01	1.77E+02	3.54E+10	8.49E+00	2.46E-06	1.81E+00	2.66E+00
12	4.34E-04	1.41E-02	1.69E+02	1.09E+11	6.52E+00	2.41E-14	1.82E-14	1.61E-11
13	5.95E-04	8.16E-01	1.71E+02	4.17E+10	8.38E+00	3.47E-06	1.81E+00	3.65E+00
13	5.95E-04	1.87E-02	1.59E+02	1.19E+11	6.45E+00	2.47E-14	1.82E-14	2.16E-11
14	8.18E-04	8.26E-01	1.66E+02	4.79E+10	8.25E+00	4.92E-06	1.81E+00	5.02E+00
14	8.18E-04	2.44E-02	1.54E+02	1.28E+11	6.37E+00	2.51E-14	1.82E-14	2.88E-11
15	1.12E-03	8.37E-01	1.58E+02	5.35E+10	8.09E+00	7.11E-06	1.81E+00	6.90E+00
15	1.12E-03	3.15E-02	1.40E+02	1.37E+11	6.26E+00	2.58E-14	1.82E-14	3.79E-11
16	1.55E-03	8.49E-01	1.50E+02	5.82E+10	7.88E+00	1.03E-05	1.81E+00	9.51E+00
16	1.55E-03	3.99E-02	1.32E+02	1.45E+11	6.12E+00	2.69E-14	1.81E-14	4.88E-11
17	2.13E-03	8.62E-01	1.39E+02	6.13E+10	7.61E+00	1.54E-05	1.81E+00	1.31E+00
17	2.13E-03	4.94E-02	1.15E+02	1.51E+11	5.93E+00	2.81E-14	1.81E-14	6.22E-11
18	2.94E-03	8.76E-01	1.27E+02	6.28E+10	7.27E+00	2.31E-05	1.81E+00	1.80E+00
18	2.94E-03	5.96E-02	1.04E+02	1.56E+11	5.71E+00	2.96E-14	1.80E-14	7.84E-11
19	4.02E-03	8.92E-01	1.09E+02	6.16E+10	6.78E+00	3.67E-05	1.81E+00	2.47E+00
19	4.02E-03	6.97E-02	7.97E+01	1.59E+11	5.38E+00	3.13E-14	1.80E-14	9.92E-11
20	5.48E-03	9.11E-01	9.20E+01	5.78E+10	6.16E+00	5.96E-05	1.81E+00	3.36E+00
20	5.48E-03	7.93E-02	6.39E+01	1.61E+11	4.97E+00	3.30E-14	1.79E-14	1.28E-11

```
21 7.36E-03 9.34E-01 7.03E+01 5.06E+10 5.10E+00 1.05E-04 1.81E+00 4.52E+0!
21 7.36E-03 8.76E-02 4.16E+01 1.63E+11 4.25E+00 3.50E-14 1.79E-14 1.70E-1:

22 9.70E-03 9.59E-01 5.08E+01 4.11E+10 4.07E+00 1.91E-04 1.81E+00 5.95E+0!
22 9.70E-03 9.43E-02 2.72E+01 1.60E+11 3.56E+00 3.69E-14 1.80E-14 2.39E-1:

23 1.26E-02 9.90E-01 3.42E+01 3.17E+10 3.39E+00 3.70E-04 1.81E+00 7.76E+0!
23 1.26E-02 9.96E-02 1.65E+01 1.50E+11 3.10E+00 3.99E-14 1.81E-14 3.38E-1:

24 1.60E-02 1.02E+00 2.13E+01 2.33E+10 2.98E+00 7.52E-04 1.81E+00 9.82E+0!
24 1.60E-02 1.03E-01 8.78E+00 1.34E+11 2.83E+00 4.44E-14 1.81E-14 4.82E-1:
```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	9.03E-06	7.00E-01	1.85E+02	6.93E+00	1.48E+09	2.16E+10
max gain	6.44E-05	7.52E-01	1.92E+02	6.77E+00	8.70E+09	5.29E+10
max ft	2.94E-03	8.76E-01	1.27E+02	5.71E+00	6.28E+10	1.56E+11

bvceo = 2.7E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.68E+02 ghz

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.000E+00



```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*       Electrical Engineering Department, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
*                               ** NO COPYING IS PERMITTED **
*
*****
```

Input file: c:\shinta\tossin\tossin\_wb\009br6\_wb075.bip

SIGE HBT AE=0.09X10, BL 12UM

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.8000E-03,	BNS	=0.1200E-02,	BPB	=0.96001			
BPC	=0.9600E-03,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.2800E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.5000E-01,	XGEP	=0.5000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.50001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
0.100E-05 0.500E-06 0.500E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
9.00E-06 8.00E-04 2.00E-05 2.00E-05 9.60E-04 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 2.80E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
0.993E+00 0.183E+02 0.120E+08 0.283E-10 0.000E+00 0.283E-10 0.339E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 6.45E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
4.20E-06 1.24E-06 4.13E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
3.37E+03 7.82E+02 6.79E+03 7.90E+01 3.03E+02 1.10 642

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
1.18E+13 2.52E+13 1.81E+11 1.24E+09 8.77E+13 2.24E+12 3.97E+10 3.21E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2  
using ionization co-efficients of marsland with  
non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.332E-05	0.789E-05	0.145E+00	0.558E+05	0.510E-32	0.100E+01	0.196E+33
0.329E-05	0.819E-05	0.172E+00	0.618E+05	0.293E-31	0.100E+01	0.342E+32
0.326E-05	0.849E-05	0.204E+00	0.682E+05	0.207E-29	0.100E+01	0.483E+30
0.323E-05	0.879E-05	0.240E+00	0.751E+05	0.297E-27	0.100E+01	0.336E+28
0.320E-05	0.909E-05	0.281E+00	0.825E+05	0.593E-25	0.100E+01	0.169E+26
0.317E-05	0.939E-05	0.328E+00	0.903E+05	0.133E-22	0.100E+01	0.754E+23
0.314E-05	0.969E-05	0.381E+00	0.986E+05	0.278E-20	0.100E+01	0.360E+21
0.311E-05	0.103E-04	0.439E+00	0.108E+06	0.472E-18	0.100E+01	0.212E+19
0.308E-05	0.106E-04	0.506E+00	0.117E+06	0.591E-16	0.100E+01	0.169E+17
0.306E-05	0.109E-04	0.581E+00	0.127E+06	0.510E-14	0.100E+01	0.196E+15
0.303E-05	0.112E-04	0.664E+00	0.137E+06	0.293E-12	0.100E+01	0.341E+13
0.300E-05	0.118E-04	0.754E+00	0.149E+06	0.112E-10	0.100E+01	0.893E+11
0.297E-05	0.121E-04	0.857E+00	0.160E+06	0.287E-09	0.100E+01	0.349E+10
0.294E-05	0.124E-04	0.969E+00	0.173E+06	0.502E-08	0.100E+01	0.199E+09
0.291E-05	0.127E-04	0.109E+01	0.185E+06	0.622E-07	0.100E+01	0.161E+08
0.288E-05	0.133E-04	0.122E+01	0.199E+06	0.562E-06	0.100E+01	0.178E+07
0.285E-05	0.136E-04	0.137E+01	0.213E+06	0.384E-05	0.100E+01	0.260E+06
0.283E-05	0.139E-04	0.153E+01	0.228E+06	0.205E-04	0.100E+01	0.488E+05
0.280E-05	0.142E-04	0.170E+01	0.244E+06	0.880E-04	0.100E+01	0.114E+05
0.277E-05	0.148E-04	0.189E+01	0.260E+06	0.313E-03	0.100E+01	0.319E+04
0.274E-05	0.151E-04	0.209E+01	0.277E+06	0.945E-03	0.100E+01	0.106E+04
0.271E-05	0.154E-04	0.231E+01	0.294E+06	0.248E-02	0.100E+01	0.402E+03
0.268E-05	0.160E-04	0.254E+01	0.312E+06	0.575E-02	0.101E+01	0.173E+03
0.265E-05	0.163E-04	0.279E+01	0.331E+06	0.120E-01	0.101E+01	0.824E+02
0.262E-05	0.166E-04	0.306E+01	0.351E+06	0.228E-01	0.102E+01	0.429E+02
0.260E-05	0.169E-04	0.335E+01	0.371E+06	0.399E-01	0.104E+01	0.240E+02
0.257E-05	0.175E-04	0.365E+01	0.392E+06	0.652E-01	0.107E+01	0.143E+02
0.254E-05	0.178E-04	0.397E+01	0.414E+06	0.998E-01	0.111E+01	0.902E+01
0.251E-05	0.181E-04	0.431E+01	0.436E+06	0.145E+00	0.117E+01	0.591E+01
0.248E-05	0.187E-04	0.467E+01	0.459E+06	0.200E+00	0.125E+01	0.401E+01
0.245E-05	0.190E-04	0.505E+01	0.482E+06	0.263E+00	0.136E+01	0.280E+01
0.242E-05	0.193E-04	0.545E+01	0.507E+06	0.335E+00	0.150E+01	0.199E+01
0.239E-05	0.196E-04	0.587E+01	0.532E+06	0.411E+00	0.170E+01	0.143E+01
0.236E-05	0.199E-04	0.632E+01	0.557E+06	0.491E+00	0.197E+01	0.104E+01
0.234E-05	0.205E-04	0.678E+01	0.584E+06	0.572E+00	0.234E+01	0.748E+00
0.231E-05	0.208E-04	0.727E+01	0.611E+06	0.652E+00	0.288E+01	0.533E+00
0.228E-05	0.211E-04	0.778E+01	0.638E+06	0.697E+00	0.330E+01	0.435E+00
0.225E-05	0.214E-04	0.831E+01	0.666E+06	0.775E+00	0.444E+01	0.290E+00
0.222E-05	0.217E-04	0.886E+01	0.695E+06	0.850E+00	0.665E+01	0.177E+00
0.219E-05	0.220E-04	0.944E+01	0.725E+06	0.920E+00	0.125E+02	0.866E-01
0.216E-05	0.226E-04	0.100E+02	0.755E+06	0.987E+00	0.786E+02	0.129E-01
0.213E-05	0.229E-04	0.107E+02	0.785E+06	0.105E+01	0.199E+02	0.479E-01

0.775E-06 0.203E-05 0.107E+01 0.149E+07 0.196E+00 0.124E+01

vbr = 1.02E+01 +/- 1.%, x = 2.29E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.775E-06 0.203E-05 0.107E+01 0.149E+07 0.196E+00 0.124E+01

ionization integral results: table 4-3

using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.769E-06	0.205E-05	0.112E+01	0.153E+07	0.204E+00	0.126E+01
0.763E-06	0.206E-05	0.116E+01	0.157E+07	0.212E+00	0.127E+01
0.757E-06	0.208E-05	0.121E+01	0.161E+07	0.221E+00	0.128E+01
0.750E-06	0.209E-05	0.125E+01	0.165E+07	0.229E+00	0.130E+01
0.744E-06	0.211E-05	0.130E+01	0.169E+07	0.237E+00	0.131E+01
0.738E-06	0.212E-05	0.135E+01	0.173E+07	0.246E+00	0.133E+01
0.732E-06	0.213E-05	0.139E+01	0.177E+07	0.255E+00	0.134E+01
0.725E-06	0.215E-05	0.144E+01	0.181E+07	0.263E+00	0.136E+01
0.719E-06	0.216E-05	0.149E+01	0.185E+07	0.272E+00	0.137E+01
0.713E-06	0.218E-05	0.154E+01	0.189E+07	0.280E+00	0.139E+01
0.707E-06	0.219E-05	0.159E+01	0.193E+07	0.289E+00	0.141E+01
0.700E-06	0.220E-05	0.165E+01	0.197E+07	0.298E+00	0.142E+01
0.694E-06	0.222E-05	0.170E+01	0.201E+07	0.307E+00	0.144E+01
0.688E-06	0.223E-05	0.175E+01	0.205E+07	0.315E+00	0.146E+01
0.681E-06	0.224E-05	0.181E+01	0.210E+07	0.324E+00	0.148E+01
0.675E-06	0.226E-05	0.186E+01	0.214E+07	0.333E+00	0.150E+01
0.669E-06	0.227E-05	0.192E+01	0.218E+07	0.342E+00	0.152E+01
0.663E-06	0.228E-05	0.197E+01	0.222E+07	0.350E+00	0.154E+01
0.656E-06	0.230E-05	0.203E+01	0.226E+07	0.359E+00	0.156E+01
0.650E-06	0.231E-05	0.209E+01	0.230E+07	0.368E+00	0.158E+01
0.644E-06	0.232E-05	0.215E+01	0.234E+07	0.377E+00	0.160E+01
0.638E-06	0.234E-05	0.221E+01	0.239E+07	0.385E+00	0.163E+01
0.631E-06	0.235E-05	0.226E+01	0.243E+07	0.394E+00	0.165E+01
0.625E-06	0.236E-05	0.232E+01	0.247E+07	0.403E+00	0.167E+01
0.619E-06	0.237E-05	0.238E+01	0.251E+07	0.411E+00	0.170E+01
0.613E-06	0.239E-05	0.245E+01	0.255E+07	0.420E+00	0.172E+01
0.606E-06	0.240E-05	0.251E+01	0.259E+07	0.429E+00	0.175E+01
0.600E-06	0.241E-05	0.257E+01	0.264E+07	0.437E+00	0.178E+01
0.594E-06	0.243E-05	0.263E+01	0.268E+07	0.446E+00	0.180E+01
0.588E-06	0.244E-05	0.269E+01	0.272E+07	0.454E+00	0.183E+01
0.581E-06	0.245E-05	0.276E+01	0.276E+07	0.463E+00	0.186E+01
0.575E-06	0.246E-05	0.282E+01	0.280E+07	0.471E+00	0.189E+01
0.569E-06	0.247E-05	0.288E+01	0.284E+07	0.480E+00	0.192E+01

```
0.563E-06 0.248E-05 0.295E+01 0.288E+07 0.488E+00 0.195E+01
0.556E-06 0.250E-05 0.301E+01 0.292E+07 0.497E+00 0.199E+01
0.550E-06 0.251E-05 0.308E+01 0.296E+07 0.505E+00 0.202E+01
0.544E-06 0.252E-05 0.314E+01 0.300E+07 0.513E+00 0.205E+01
0.538E-06 0.253E-05 0.320E+01 0.304E+07 0.521E+00 0.209E+01
0.531E-06 0.254E-05 0.327E+01 0.308E+07 0.529E+00 0.212E+01
0.297E-05 0.201E-04 0.807E+00 0.143E+06 0.124E-03 0.100E+01 0.807E+04
```

ionization integral results: table 4-5  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.295E-05	0.205E-04	0.859E+00	0.150E+06	0.191E-03	0.100E+01	0.525E+04
0.292E-05	0.210E-04	0.913E+00	0.157E+06	0.286E-03	0.100E+01	0.350E+04
0.290E-05	0.214E-04	0.969E+00	0.165E+06	0.419E-03	0.100E+01	0.239E+04
0.288E-05	0.218E-04	0.103E+01	0.172E+06	0.600E-03	0.100E+01	0.166E+04
0.286E-05	0.223E-04	0.109E+01	0.180E+06	0.844E-03	0.100E+01	0.118E+04
0.284E-05	0.227E-04	0.115E+01	0.188E+06	0.117E-02	0.100E+01	0.857E+03
0.282E-05	0.232E-04	0.122E+01	0.196E+06	0.158E-02	0.100E+01	0.632E+03
0.280E-05	0.236E-04	0.128E+01	0.205E+06	0.211E-02	0.100E+01	0.473E+03
0.278E-05	0.241E-04	0.135E+01	0.214E+06	0.277E-02	0.100E+01	0.360E+03
0.276E-05	0.245E-04	0.143E+01	0.222E+06	0.359E-02	0.100E+01	0.277E+03
0.274E-05	0.250E-04	0.150E+01	0.232E+06	0.460E-02	0.100E+01	0.216E+03
0.272E-05	0.254E-04	0.158E+01	0.241E+06	0.581E-02	0.101E+01	0.171E+03
0.270E-05	0.259E-04	0.166E+01	0.250E+06	0.725E-02	0.101E+01	0.137E+03
0.268E-05	0.263E-04	0.174E+01	0.260E+06	0.896E-02	0.101E+01	0.111E+03
0.266E-05	0.268E-04	0.182E+01	0.270E+06	0.110E-01	0.101E+01	0.903E+02
0.264E-05	0.272E-04	0.191E+01	0.280E+06	0.133E-01	0.101E+01	0.744E+02

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.14E-07 F/sq.cm RBSQ = 3.51E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.14E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm.

RBB = 9.30E+00 RBEXT = 3.15E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 6.65E-14 F; Total plane BL capacitance = 2.99E-15 F  
Coll. contact resistance RCEXT = 1.30E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 6.01E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.56E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 7.24E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 3.86E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.14E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 7.74E-15 CJCO = 1.29E-14 CJCS = 6.95E-14

vioeb=0.952 viocb=0.895 xbc= 2.96E-06 xcc= 1.219E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301  
taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3

wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm-3

delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 5 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.291E-02

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.572E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.115E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.440E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.309E-02

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.397E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.256E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.300E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.397E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.214E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.162E-03

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.228E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.487E-04

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.242E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 1 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.196E-04

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.242E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	...
1	4.30E+02	4.00E+02	7.00E-01	8.83E-11	4.02E-15	3.43E-13	1.78E+09	1.271
1	-1.08E+00	3.87E+02	1.00E+00	6.10E-13	2.66E-13	4.14E-14	2.44E+11	2.711
1	1.11E+00	8.47E-06	5.60E+17	8.86E+16	9.24E+14	1.46E+14	1.34E-06	1.241
.								
2	8.44E+02	3.92E+02	7.18E-01	4.75E-11	4.28E-15	3.43E-13	3.28E+09	1.271
2	-2.15E+00	3.80E+02	1.03E+00	3.56E-13	2.66E-13	4.14E-14	2.43E+11	2.921
2	2.22E+00	8.47E-06	5.48E+17	8.88E+16	1.85E+15	3.00E+14	1.38E-06	1.241
.								
3	1.67E+03	3.86E+02	7.36E-01	2.50E-11	4.54E-15	3.43E-13	6.16E+09	1.301
.								

Lampiran B.9.File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb075.  
8 of 11

3	-4.32E+00	3.74E+02	1.03E+00	2.10E-13	2.76E-13	4.14E-14	2.39E+11	1.98E+06	1.24E+01
3	4.45E+00	8.47E-06	5.34E+17	8.90E+16	3.70E+15	6.16E+14	1.44E-06	1.24E+01	1.24E+01
4	3.26E+03	3.76E+02	7.54E-01	1.37E-11	4.91E-15	3.43E-13	1.10E+10	1.30E+01	1.30E+01
4	-8.66E+00	3.65E+02	1.05E+00	1.27E-13	2.78E-13	4.14E-14	2.39E+11	2.29E+01	2.29E+01
4	8.92E+00	8.47E-06	5.20E+17	8.92E+16	7.39E+15	1.27E+15	1.52E-06	1.24E+01	1.24E+01
5	6.38E+03	3.66E+02	7.73E-01	7.30E-12	5.34E-15	3.42E-13	1.98E+10	1.32E+01	1.32E+01
5	-1.74E+01	3.56E+02	1.05E+00	7.76E-14	2.90E-13	4.14E-14	2.34E+11	8.75E+01	8.75E+01
5	1.79E+01	8.47E-06	5.05E+17	8.93E+16	1.48E+16	2.62E+15	1.59E-06	1.24E+01	1.24E+01
6	1.24E+04	3.54E+02	7.91E-01	4.02E-12	5.92E-15	3.42E-13	3.34E+10	1.35E+01	1.35E+01
6	-3.51E+01	3.44E+02	1.08E+00	4.84E-14	3.05E-13	4.14E-14	2.29E+11	3.51E+01	3.51E+01
6	3.60E+01	8.47E-06	4.92E+17	8.94E+16	2.96E+16	5.40E+15	1.66E-06	1.24E+01	1.24E+01
7	2.39E+04	3.37E+02	8.10E-01	2.26E-12	6.77E-15	3.55E-13	5.27E+10	1.41E+01	1.41E+01
7	-7.09E+01	3.28E+02	1.13E+00	3.10E-14	3.26E-13	3.99E-14	2.19E+11	1.71E+01	1.71E+01
7	7.28E+01	8.74E-06	4.81E+17	8.95E+16	5.92E+16	1.11E+16	1.73E-06	1.21E+01	1.21E+01
8	4.55E+04	3.18E+02	8.31E-01	1.30E-12	7.90E-15	3.53E-13	7.67E+10	1.44E+01	1.44E+01
8	-1.43E+02	3.10E+02	1.22E+00	2.06E-14	3.51E-13	3.99E-14	2.12E+11	-1.92E+01	-1.92E+01
8	1.47E+02	8.74E-06	4.74E+17	8.95E+16	1.18E+17	2.26E+16	1.77E-06	1.21E+01	1.21E+01
9	8.56E+04	2.94E+02	8.53E-01	8.31E-13	9.62E-15	3.77E-13	9.68E+10	1.50E+01	1.50E+01
9	-2.91E+02	2.87E+02	1.37E+00	1.43E-14	3.76E-13	3.71E-14	1.99E+11	2.67E+01	2.67E+01
9	2.99E+02	9.28E-06	4.66E+17	8.95E+16	2.37E+17	4.66E+16	1.90E-06	1.13E+01	1.13E+01
10	1.61E+05	2.69E+02	8.79E-01	5.67E-13	1.21E-14	4.10E-13	1.09E+11	1.64E+01	1.64E+01
10	-5.98E+02	2.61E+02	1.61E+00	1.02E-14	4.32E-13	3.37E-14	1.79E+11	-1.48E+01	-1.48E+01
10	6.15E+02	1.01E-05	4.56E+17	8.92E+16	4.73E+17	9.72E+16	2.09E-06	1.05E+01	1.05E+01
*									
11	2.96E+05	2.34E+02	9.12E-01	4.23E-13	1.68E-14	4.88E-13	1.06E+11	1.99E+01	1.99E+01
11	-1.26E+03	2.27E+02	2.08E+00	7.98E-15	5.43E-13	2.75E-14	1.48E+11	-3.16E+01	-3.16E+01
11	1.31E+03	1.18E-05	4.44E+17	8.90E+16	9.47E+17	2.08E+17	2.24E-06	8.89E+01	8.89E+01
12	5.26E+05	1.88E+02	9.55E-01	3.74E-13	2.76E-14	4.75E-13	7.05E+10	6.69E+01	6.69E+01
12	-2.79E+03	1.80E+02	2.93E+00	7.10E-15	1.35E-12	2.66E-14	8.48E+10	1.05E+01	1.05E+01
12	2.92E+03	1.14E-05	4.29E+17	8.82E+16	1.89E+18	4.64E+17	2.51E-06	9.24E+01	9.24E+01
13	8.67E+05	1.29E+02	1.01E+00	3.94E-13	6.28E-14	4.19E-13	3.72E+10	1.27E+01	1.27E+01
13	-6.73E+03	1.20E+02	4.40E+00	8.02E-15	3.37E-12	2.87E-14	4.11E+10	2.93E+01	2.93E+01
13	7.20E+03	9.90E-06	4.09E+17	8.69E+16	3.79E+18	1.10E+18	2.90E-06	1.06E+01	1.06E+01
14	1.35E+06	7.28E+01	1.09E+00	4.47E-13	1.60E-13	2.79E-13	1.88E+10	1.91E+01	1.91E+01



```

14      1.55E+00  7.28E+01  1.09E+00  4.47E-15  1.00E-15  3.75E-15  1.00E+10  1.51
14     -1.86E+04  6.53E+01  6.50E+00  1.03E-14  7.43E-12  3.07E-14  1.99E+10 -2.031
14      2.07E+04  8.70E-06  3.83E+17  8.48E+16  7.57E+18  2.77E+18  3.48E-06  1.211

```

```

*** Warning: b-c non-convergence  1 times for lines preceded by  *
      vcb(av) = 0.196E-04

```

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value

rbe/sq = 9.87E+03 rbase(intrinsic) = 9.24E+00

gubaseg gubaseg/mu guemeg guemeg/mu

1.00E+11 7.35E+08 2.06E+12 3.66E+10

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = 0.196E-04 volts

n	ic	vbe	beta	ft	rbdc	ib	crowd	jcmax
n	ic	gm	betac	fmosc	rbac	cbet	cbct	cdiff
1	6.07E-06	7.07E-01	1.77E+02	1.30E+09	1.71E+01	3.42E-08	1.41E+00	5.96E+00
1	6.07E-06	2.35E-04	1.83E+02	1.71E+10	1.25E+01	1.45E-14	1.40E-14	2.18E-10
2	8.43E-06	7.17E-01	1.79E+02	1.78E+09	1.70E+01	4.72E-08	1.41E+00	8.28E+00
2	8.43E-06	3.26E-04	1.83E+02	2.02E+10	1.24E+01	1.47E-14	1.40E-14	2.71E-10
3	1.17E-05	7.25E-01	1.80E+02	2.41E+09	1.69E+01	6.50E-08	1.41E+00	1.15E+00
3	1.17E-05	4.47E-04	1.84E+02	2.35E+10	1.23E+01	1.50E-14	1.40E-14	3.52E-10
4	1.63E-05	7.35E-01	1.81E+02	3.23E+09	1.67E+01	8.99E-08	1.41E+00	1.60E+00
4	1.63E-05	6.09E-04	1.84E+02	2.74E+10	1.22E+01	1.53E-14	1.40E-14	4.48E-10
5	2.26E-05	7.42E-01	1.82E+02	4.36E+09	1.66E+01	1.24E-07	1.41E+00	2.21E+00
5	2.26E-05	8.37E-04	1.83E+02	3.19E+10	1.22E+01	1.57E-14	1.40E-14	5.92E-10
6	3.13E-05	7.52E-01	1.82E+02	5.86E+09	1.65E+01	1.72E-07	1.41E+00	3.07E+00
6	3.13E-05	1.15E-03	1.83E+02	3.71E+10	1.21E+01	1.62E-14	1.40E-14	7.80E-10
7	4.33E-05	7.60E-01	1.82E+02	7.87E+09	1.63E+01	2.38E-07	1.41E+00	4.25E+00
7	4.33E-05	1.59E-03	1.81E+02	4.31E+10	1.20E+01	1.65E-14	1.40E-14	1.05E-10
8	6.00E-05	7.70E-01	1.82E+02	1.05E+10	1.62E+01	3.30E-07	1.41E+00	5.89E+00
8	6.00E-05	2.18E-03	1.81E+02	5.01E+10	1.19E+01	1.69E-14	1.40E-14	1.41E-10
9	8.29E-05	7.78E-01	1.80E+02	1.39E+10	1.61E+01	4.59E-07	1.41E+00	8.13E+00
9	8.29E-05	2.97E-03	1.77E+02	5.77E+10	1.18E+01	1.72E-14	1.40E-14	1.90E-10
10	1.15E-04	7.88E-01	1.79E+02	1.81E+10	1.59E+01	6.39E-07	1.41E+00	1.12E+00

10	1.15E-04	4.03E-03	1.76E+02	6.62E+10	1.17E+01	1.76E-14	1.40E-14	2.56E-11
11	1.57E-04	7.96E-01	1.77E+02	2.32E+10	1.57E+01	8.92E-07	1.41E+00	1.55E+00
11	1.57E-04	5.41E-03	1.70E+02	7.53E+10	1.16E+01	1.79E-14	1.40E-14	3.45E-11
12	2.17E-04	8.06E-01	1.74E+02	2.93E+10	1.56E+01	1.25E-06	1.41E+00	2.13E+00
12	2.17E-04	7.23E-03	1.67E+02	8.51E+10	1.15E+01	1.83E-14	1.40E-14	4.65E-11
13	2.96E-04	8.15E-01	1.69E+02	3.62E+10	1.54E+01	1.75E-06	1.41E+00	2.91E+00
13	2.96E-04	9.54E-03	1.58E+02	9.53E+10	1.13E+01	1.86E-14	1.40E-14	6.18E-11
14	4.06E-04	8.25E-01	1.65E+02	4.40E+10	1.51E+01	2.46E-06	1.41E+00	3.98E+00
14	4.06E-04	1.25E-02	1.54E+02	1.06E+11	1.12E+01	1.88E-14	1.40E-14	8.14E-11
15	5.52E-04	8.35E-01	1.58E+02	5.18E+10	1.48E+01	3.49E-06	1.41E+00	5.42E+00
15	5.52E-04	1.60E-02	1.42E+02	1.16E+11	1.10E+01	1.92E-14	1.40E-14	1.06E-11
16	7.51E-04	8.46E-01	1.51E+02	5.92E+10	1.45E+01	4.96E-06	1.41E+00	7.37E+00
16	7.51E-04	2.03E-02	1.35E+02	1.25E+11	1.08E+01	1.99E-14	1.40E-14	1.38E-11
17	1.02E-03	8.58E-01	1.42E+02	6.58E+10	1.41E+01	7.17E-06	1.41E+00	1.00E+00
17	1.02E-03	2.54E-02	1.22E+02	1.34E+11	1.05E+01	2.07E-14	1.39E-14	1.77E-11
18	1.38E-03	8.70E-01	1.33E+02	7.11E+10	1.36E+01	1.04E-05	1.41E+00	1.36E+00
18	1.38E-03	3.11E-02	1.12E+02	1.41E+11	1.02E+01	2.17E-14	1.39E-14	2.26E-11
19	1.87E-03	8.85E-01	1.20E+02	7.43E+10	1.30E+01	1.56E-05	1.41E+00	1.84E+00
19	1.87E-03	3.71E-02	9.39E+01	1.48E+11	9.75E+00	2.26E-14	1.39E-14	2.86E-11
20	2.51E-03	9.00E-01	1.06E+02	7.55E+10	1.22E+01	2.37E-05	1.41E+00	2.47E+00
20	2.51E-03	4.31E-02	7.98E+01	1.54E+11	9.22E+00	2.34E-14	1.38E-14	3.60E-11
21	3.36E-03	9.18E-01	8.95E+01	7.22E+10	1.09E+01	3.75E-05	1.41E+00	3.30E+00
21	3.36E-03	4.89E-02	6.10E+01	1.58E+11	8.32E+00	2.44E-14	1.38E-14	4.72E-11
22	4.43E-03	9.39E-01	7.25E+01	6.41E+10	9.09E+00	6.11E-05	1.41E+00	4.36E+00
22	4.43E-03	5.41E-02	4.55E+01	1.61E+11	7.13E+00	2.57E-14	1.38E-14	6.63E-11
23	5.79E-03	9.63E-01	5.51E+01	5.35E+10	6.99E+00	1.05E-04	1.41E+00	5.69E+00
23	5.79E-03	5.84E-02	3.08E+01	1.64E+11	5.72E+00	2.73E-14	1.38E-14	9.49E-11
24	7.34E-03	9.89E-01	3.86E+01	4.16E+10	5.26E+00	1.90E-04	1.41E+00	7.22E+00
24	7.34E-03	6.13E-02	1.83E+01	1.62E+11	4.56E+00	2.92E-14	1.39E-14	1.38E-11

lateral simulation terminated:  
increase ntot or decrease vbemax or decrease bmlat

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	4.38E-06	7.00E-01	1.75E+02	1.26E+01	9.42E+08	1.46E+10
max gain	3.13E-05	7.52E-01	1.82E+02	1.21E+01	5.86E+09	3.71E+10
max ft	2.51E-03	9.00E-01	1.06E+02	9.22E+00	7.55E+10	1.54E+11

bvceo = 2.5E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 1.91E+02 ghz

note: rsmin not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.242E+00

```
*****
*
*                               BIPSIM Inc & University of Waterloo
*
*       Quasi 3D Bipolar Device Simulation and Model Generation Program
*
*                               BIPOLE3 Version v.5.3.1G   created 20 Feb 2006
*
*                               (c) D.J. Roulston
*
*                               ** This BIPOLE3 copy is for educational use by: **
*                               Electrical Engineering Department, University Indonesia
*                               ** M. H. P. I. N. I. S. I. A. N. I. D. O. **
*
*****
```

Input file: c:\shinta\tossin\tossin\_wb\009br6\_wb050.bip

SIGE HBT AE=0.09X10, BL 12UM

the non-default valued parameters are:

AREV	=0.1000E-02,	B	=0.8000E-03,	BNS	=0.1200E-02,	BPB	=0.96001			
BPC	=0.9600E-03,	BPS	=0.1800E-02,	ECB	=0.2000E-04,	ELC	=0.50001			
ELCN	=0.5000E-04,	ELEM	=0.9000E-05,	ELEN	=0.1000E-03,	ELNS	=0.30001			
ELPB	=0.1100E-03,	ELPS	=0.6000E-03,	ESB	=0.2000E-04,	IC	=			
IGAP	=	7,	IHDM	=	2,	IMPUR	=	1,	ION	=
IPLUS	=	1,	IPOLY	=	3,	IPRIN1	=	4,	IPRIN2	=
ISIC	=	1,	ISIGE	=	1,	MASK	=	1,	NB1	=0.10001
NBUR	=	3,	NCOL	=0.1000E+21,	NE1	=0.1000E+21,	NE3	=0.20001		
NEPI	=0.2000E+17,	NEUT2D	=	1,	NPOL	=0.1000E+22,	NSUBO	=0.20001		
NXB1	=0.4000E+01,	NXE1	=0.4000E+01,	P3	=0.0000E+00,	PEE	=0.12001			
RA	=0.1100E+01,	REXTSQ	=0.2000E+01,	RNCON	=0.1000E-06,	RPCON	=0.10001			
TAUE	=0.1000E-07,	TEPI	=0.1200E-03,	VBEMAX	=0.1000E+01,	VCIN	=0.00001			
WPOL	=0.2000E-04,	WPS	=0.2000E-05,	XB1	=0.2200E-05,	XBL2	=0.50001			
XE1	=0.1000E-05,	XE3	=0.2500E-04,	XE3P	=0.5000E-04,	XEND	=0.12001			
XGE	=0.5000E-01,	XGEP	=0.5000E-01,	XJ1G	=0.1000E-05,	XJ2G	=0.40001			
XNCOL	=0.5000E-04,	XPW	=0.7000E-04,	XRAM1	=0.5000E-06,	XRAM2	=0.50001			
XSUB	=0.3000E-04									

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

SILICON NPN TRANSISTOR TEMPERATURE = 27. DEG C (NI = 1.19E+10)

SiGe base heterojunction: ISIGE = 1

XJ1G XRAM1 XJ2G XRAM2  
 0.100E-05 0.500E-06 0.400E-05 0.500E-06

MASK DATA ELEM B ESB ECB BPB ELPB  
 9.00E-06 8.00E-04 2.00E-05 2.00E-05 9.60E-04 1.10E-04

PROFILE DATA NE1 NB1 NEPI XE1 XB1 XEND NXE1 NXI  
 1.00E+20 1.00E+19 2.00E+16 1.00E-06 2.20E-06 1.20E-04 4.0 4.0

IMPLANTED COLLECTOR PROFILE 2.0E+18 AT X = 5.0E-05 FOR XE3 = 2.5E-05 NXE3  
 PHI = 8.9E+13 RANGE = 5.0E-05 SIG = 1.8E-05

bip2neut 2-d simulation (per cm):

felat fqlat betas ibbm ibbo ibb ic  
 0.632E+00 0.401E+01 0.114E+10 0.561E-12 0.000E+00 0.561E-12 0.637E-03

COLLECTOR SINKER: NCOL XNCOL NXNCOL Rsink Rsink/sq Rsink\*cm  
 1.00E+20 5.00E-05 2.00E+00 6.45E+00 1.32E+01 3.10E-01

PROFILE INTEGRATION: XEPI XJ1 XJ2 TEPI XSUB NSUB  
 3.32E-06 1.25E-06 3.26E-06 1.20E-04 3.00E-05 2.00E-05

RB-OHM/SQ RE-OHM/SQ RBE-OHM/SQ RC-OHM/SQ REPI RA NPO  
 4.29E+03 7.80E+02 1.16E+04 7.90E+01 3.12E+02 1.10 648

GUBASE GUBASETOT GUBASEG GUBASEG/MU GUEM GUEMEG GUEMEG/MU BETMAX  
 6.64E+12 1.97E+13 1.17E+11 7.63E+08 8.78E+13 2.24E+12 3.97E+10 5.21E+01

SPECIFIED VALUE OF EXTRINSIC BASE SHEET RESISTANCE: 0.200E+01 OHM/SQ USED

ionization integral results: table 4-2  
 using ionization co-efficients of marsland with  
 non-equilibrium transport effects included, with lambda = 0.553E+02 nm

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.255E-05	0.741E-05	0.158E+00	0.579E+05	0.468E-32	0.100E+01	0.214E+33
0.253E-05	0.771E-05	0.182E+00	0.630E+05	0.469E-32	0.100E+01	0.213E+33
0.251E-05	0.801E-05	0.209E+00	0.683E+05	0.470E-32	0.100E+01	0.213E+33
0.249E-05	0.831E-05	0.240E+00	0.739E+05	0.471E-32	0.100E+01	0.212E+33
0.246E-05	0.861E-05	0.273E+00	0.799E+05	0.472E-32	0.100E+01	0.212E+33
0.244E-05	0.891E-05	0.311E+00	0.861E+05	0.473E-32	0.100E+01	0.211E+33
0.242E-05	0.921E-05	0.353E+00	0.927E+05	0.474E-32	0.100E+01	0.211E+33
0.240E-05	0.951E-05	0.399E+00	0.997E+05	0.475E-32	0.100E+01	0.210E+33
0.238E-05	0.981E-05	0.450E+00	0.107E+06	0.476E-32	0.100E+01	0.210E+33
0.236E-05	0.101E-04	0.506E+00	0.115E+06	0.187E-31	0.100E+01	0.535E+32
0.234E-05	0.104E-04	0.568E+00	0.123E+06	0.158E-26	0.100E+01	0.632E+27
0.232E-05	0.107E-04	0.635E+00	0.131E+06	0.221E-22	0.100E+01	0.452E+23
0.230E-05	0.110E-04	0.708E+00	0.140E+06	0.581E-19	0.100E+01	0.172E+20
0.228E-05	0.113E-04	0.788E+00	0.149E+06	0.398E-16	0.100E+01	0.252E+17
0.226E-05	0.116E-04	0.874E+00	0.159E+06	0.916E-14	0.100E+01	0.109E+15
0.224E-05	0.119E-04	0.967E+00	0.169E+06	0.871E-12	0.100E+01	0.115E+13
0.222E-05	0.122E-04	0.107E+01	0.179E+06	0.402E-10	0.100E+01	0.249E+11
0.220E-05	0.125E-04	0.118E+01	0.190E+06	0.103E-08	0.100E+01	0.975E+09
0.218E-05	0.128E-04	0.129E+01	0.201E+06	0.160E-07	0.100E+01	0.624E+08
0.216E-05	0.131E-04	0.142E+01	0.213E+06	0.167E-06	0.100E+01	0.598E+07
0.214E-05	0.134E-04	0.155E+01	0.225E+06	0.125E-05	0.100E+01	0.803E+06
0.212E-05	0.140E-04	0.169E+01	0.237E+06	0.700E-05	0.100E+01	0.143E+06
0.210E-05	0.143E-04	0.184E+01	0.250E+06	0.311E-04	0.100E+01	0.321E+05
0.208E-05	0.146E-04	0.200E+01	0.263E+06	0.113E-03	0.100E+01	0.883E+04
0.206E-05	0.149E-04	0.217E+01	0.277E+06	0.349E-03	0.100E+01	0.287E+04
0.204E-05	0.152E-04	0.236E+01	0.291E+06	0.931E-03	0.100E+01	0.107E+04
0.202E-05	0.155E-04	0.255E+01	0.306E+06	0.220E-02	0.100E+01	0.453E+03
0.200E-05	0.158E-04	0.275E+01	0.321E+06	0.469E-02	0.100E+01	0.212E+03
0.198E-05	0.161E-04	0.296E+01	0.336E+06	0.913E-02	0.101E+01	0.109E+03
0.196E-05	0.164E-04	0.319E+01	0.352E+06	0.165E-01	0.102E+01	0.598E+02
0.194E-05	0.167E-04	0.343E+01	0.368E+06	0.277E-01	0.103E+01	0.351E+02
0.192E-05	0.170E-04	0.367E+01	0.385E+06	0.439E-01	0.105E+01	0.218E+02
0.190E-05	0.173E-04	0.393E+01	0.402E+06	0.661E-01	0.107E+01	0.141E+02
0.188E-05	0.176E-04	0.420E+01	0.420E+06	0.949E-01	0.110E+01	0.954E+01
0.186E-05	0.179E-04	0.449E+01	0.438E+06	0.131E+00	0.115E+01	0.665E+01
0.184E-05	0.182E-04	0.479E+01	0.456E+06	0.173E+00	0.121E+01	0.477E+01
0.182E-05	0.185E-04	0.509E+01	0.475E+06	0.223E+00	0.129E+01	0.349E+01
0.180E-05	0.188E-04	0.542E+01	0.494E+06	0.277E+00	0.138E+01	0.260E+01
0.178E-05	0.191E-04	0.575E+01	0.514E+06	0.337E+00	0.151E+01	0.197E+01
0.176E-05	0.194E-04	0.610E+01	0.533E+06	0.400E+00	0.167E+01	0.150E+01
0.174E-05	0.197E-04	0.646E+01	0.554E+06	0.464E+00	0.187E+01	0.115E+01
0.172E-05	0.200E-04	0.683E+01	0.574E+06	0.530E+00	0.213E+01	0.886E+00

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

```

0.172E-05 0.200E-04 0.685E+01 0.574E+06 0.550E+00 0.215E+01 0.680E+00
0.170E-05 0.203E-04 0.722E+01 0.595E+06 0.596E+00 0.247E+01 0.678E+00
0.168E-05 0.206E-04 0.761E+01 0.617E+06 0.660E+00 0.294E+01 0.514E+00
0.166E-05 0.209E-04 0.802E+01 0.638E+06 0.723E+00 0.361E+01 0.383E+00
0.164E-05 0.212E-04 0.845E+01 0.660E+06 0.784E+00 0.463E+01 0.275E+00
0.162E-05 0.215E-04 0.888E+01 0.683E+06 0.842E+00 0.634E+01 0.187E+00
0.160E-05 0.218E-04 0.932E+01 0.705E+06 0.898E+00 0.978E+01 0.114E+00
0.158E-05 0.221E-04 0.978E+01 0.728E+06 0.951E+00 0.202E+02 0.521E-01
0.156E-05 0.224E-04 0.102E+02 0.750E+06 0.100E+01-0.240E+04-0.417E-03

```

vbr = 1.02E+01 +/- 2.%, x = 2.24E-05 ioniz. integral: plane junction 2  
0.768E-06 0.205E-05 0.113E+01 0.154E+07 0.206E+00 0.126E+01

ionization integral results: table 4-3  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult
0.761E-06	0.207E-05	0.117E+01	0.158E+07	0.214E+00	0.127E+01
0.755E-06	0.208E-05	0.122E+01	0.162E+07	0.223E+00	0.129E+01
0.749E-06	0.210E-05	0.126E+01	0.166E+07	0.231E+00	0.130E+01
0.743E-06	0.211E-05	0.131E+01	0.170E+07	0.240E+00	0.132E+01
0.736E-06	0.212E-05	0.136E+01	0.174E+07	0.248E+00	0.133E+01
0.730E-06	0.214E-05	0.141E+01	0.178E+07	0.257E+00	0.135E+01
0.724E-06	0.215E-05	0.146E+01	0.182E+07	0.265E+00	0.136E+01
0.717E-06	0.217E-05	0.151E+01	0.186E+07	0.274E+00	0.138E+01
0.711E-06	0.218E-05	0.156E+01	0.190E+07	0.283E+00	0.139E+01
0.705E-06	0.219E-05	0.161E+01	0.194E+07	0.292E+00	0.141E+01
0.699E-06	0.221E-05	0.166E+01	0.198E+07	0.300E+00	0.143E+01
0.692E-06	0.222E-05	0.171E+01	0.202E+07	0.309E+00	0.145E+01
0.686E-06	0.223E-05	0.177E+01	0.207E+07	0.318E+00	0.147E+01
0.680E-06	0.225E-05	0.182E+01	0.211E+07	0.327E+00	0.149E+01
0.673E-06	0.226E-05	0.188E+01	0.215E+07	0.336E+00	0.150E+01
0.667E-06	0.227E-05	0.194E+01	0.219E+07	0.344E+00	0.153E+01
0.661E-06	0.229E-05	0.199E+01	0.223E+07	0.353E+00	0.155E+01
0.655E-06	0.230E-05	0.205E+01	0.227E+07	0.362E+00	0.157E+01
0.648E-06	0.231E-05	0.211E+01	0.232E+07	0.371E+00	0.159E+01
0.642E-06	0.233E-05	0.217E+01	0.236E+07	0.380E+00	0.161E+01
0.636E-06	0.234E-05	0.223E+01	0.240E+07	0.388E+00	0.163E+01
0.629E-06	0.235E-05	0.229E+01	0.244E+07	0.397E+00	0.166E+01
0.623E-06	0.237E-05	0.235E+01	0.248E+07	0.406E+00	0.168E+01
0.617E-06	0.238E-05	0.241E+01	0.253E+07	0.415E+00	0.171E+01
0.610E-06	0.239E-05	0.247E+01	0.257E+07	0.423E+00	0.173E+01

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

```

0.604E-06 0.240E-05 0.253E+01 0.261E+07 0.432E+00 0.176E+01
0.598E-06 0.242E-05 0.259E+01 0.265E+07 0.441E+00 0.179E+01
0.592E-06 0.243E-05 0.265E+01 0.269E+07 0.449E+00 0.182E+01
0.585E-06 0.244E-05 0.272E+01 0.273E+07 0.458E+00 0.184E+01
0.579E-06 0.245E-05 0.278E+01 0.277E+07 0.466E+00 0.187E+01
0.573E-06 0.247E-05 0.284E+01 0.282E+07 0.475E+00 0.190E+01
0.566E-06 0.248E-05 0.291E+01 0.286E+07 0.483E+00 0.193E+01
0.560E-06 0.249E-05 0.297E+01 0.290E+07 0.492E+00 0.197E+01
0.554E-06 0.250E-05 0.304E+01 0.294E+07 0.500E+00 0.200E+01
0.548E-06 0.251E-05 0.310E+01 0.298E+07 0.508E+00 0.203E+01
0.541E-06 0.252E-05 0.317E+01 0.302E+07 0.516E+00 0.207E+01
0.535E-06 0.253E-05 0.323E+01 0.306E+07 0.525E+00 0.210E+01
0.529E-06 0.254E-05 0.330E+01 0.310E+07 0.533E+00 0.214E+01
0.522E-06 0.256E-05 0.336E+01 0.314E+07 0.541E+00 0.218E+01
0.216E-05 0.194E-04 0.904E+00 0.178E+06 0.633E-03 0.100E+01 0.158E+04

```

ionization integral results: table 4-5  
using ionization co-efficients of van overstraeten and de man

xstart	xstop	vx	ef	se	mult	hfe
0.214E-05	0.198E-04	0.951E+00	0.186E+06	0.854E-03	0.100E+01	0.117E+04
0.213E-05	0.202E-04	0.100E+01	0.193E+06	0.113E-02	0.100E+01	0.881E+03
0.211E-05	0.205E-04	0.105E+01	0.201E+06	0.148E-02	0.100E+01	0.673E+03
0.209E-05	0.209E-04	0.110E+01	0.209E+06	0.192E-02	0.100E+01	0.521E+03
0.208E-05	0.212E-04	0.116E+01	0.217E+06	0.244E-02	0.100E+01	0.408E+03
0.206E-05	0.216E-04	0.121E+01	0.225E+06	0.308E-02	0.100E+01	0.324E+03

\*\*\*\*\* warning: edge analysis incomplete for junction 2 theta = 0.14E+01 :  
CJ(edge) unreliable. Verify profile data; use IEDGE = -1

No input values of ext. base capacitance per sq. cm ccext1 or ccext2  
Computed active region value will be used

(Input) values of extrinsic base sheet resistance and capacitance F/sq.cm

Outside Active Base Area CJC = 1.12E-07 F/sq.cm RBSQ = 4.52E+03ohm/;  
P+ Extrinsic Base Contact Area CJC = 1.12E-07 F/sq.cm RBSQ = 2.00E+00 ohm.

RBB = 2.24E+01 RBEXT = 3.15E+00 IC = 2 NBUR = 3

P+ Sidewall cap. = 6.65E-14 F; Total plane BL capacitance = 2.99E-15 F



Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

Coll. contact resistance RCEXT = 1.30E+01 ohm; RCEXT\*CSUB = 6.01E-13 sec

Sidewall simulation uses IEDGE = 2

CCS(PERIPHERY)= 2.22E-11 F/CM. CCS(PLANE)= 8.31E-09 F/SQ.CM, FOR VCS=0

CJE(PERIPHERY)= 1.48E-12 F/CM. CJE(PLANE)= 5.04E-07 F/SQ.CM, FOR VBE=0

CJC(PERIPHERY)= 3.16E-13 F/CM. CJC(PLANE)= 1.12E-07 F/SQ.CM, FOR VCB=0

ZERO BIAS CAPACITANCES: CJEO = 6.02E-15 CJCO = 1.25E-14 CJCS = 6.95E-14

vioeb=0.853 viocb=0.897 xbc= 2.26E-06 xcc= 1.168E-05

recombination parameters: itaue = 1, itaub = 1, itauc = 0 cn(emit) = 8.301

taude = 6.00E-09 taue = 1.00E-08 taub = 1.00E-06 tauc = 1.00E-06

polysilicon emitter: ipoly = 3

wpol = 0.200E-04 cm, npol = 0.100E+22 cm-3

delta = 0.000E+00 angstroms, xe = 0.400E+00 ev, xh = 0.100E+01 ev

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.318E-02

Hydrodynamic Model total reduction factor = 0.495E+00

Warning: near punch through: rpm = 1.48E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 5 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.271E-03

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.000E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.210E-02

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

Warning: near punch through: rpm = 1.48E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.047E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.885E-03

Warning: near punch through: rpm = 1.48E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.095E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 4 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.115E-02

Warning: near punch through: rpm = 1.48E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.147E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.116E-02

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.200E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 5 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.271E-03

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.147E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.116E-02

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.160E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.174E-03

--

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.173E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 3 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = -0.935E-03

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.186E+00

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.127E-02

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

vertical simulation (1-d) results: vcin = 0.000

Hydrodynamic model iterations: FHDM = 1.186E+00

nj	jn	betae	vbe	tre	tem	tscl	ftot	wl
nj	jp	betat	m	tqbe	tbase	trc	ftmax	vc
nj	jp(tot)	wscl	nd(0)	na(0)	no	po	cje	...
1	8.75E+02	7.84E+02	7.00E-01	4.12E-11	1.06E-15	3.68E-13	3.81E+09	4.64E+09
1	-1.12E+00	7.57E+02	1.00E+00	1.25E-13	6.50E-14	4.06E-14	3.35E+11	2.02E+11
1	1.16E+00	8.71E-06	5.39E+17	8.08E+16	1.01E+15	1.52E+14	1.27E-06	1.21E-06
.								
2	1.71E+03	7.61E+02	7.18E-01	2.28E-11	1.15E-15	3.68E-13	6.82E+09	5.04E+09
2	-2.25E+00	7.35E+02	1.05E+00	7.52E-14	7.26E-14	4.06E-14	3.30E+11	2.33E+11
2	2.32E+00	8.71E-06	5.27E+17	8.13E+16	2.03E+15	3.13E+14	1.31E-06	1.21E-06
.								
3	3.31E+03	7.32E+02	7.37E-01	1.24E-11	1.28E-15	3.68E-13	1.23E+10	5.24E+09
3	-4.53E+00	7.08E+02	1.07E+00	4.67E-14	7.67E-14	4.06E-14	3.27E+11	1.21E+11
3	4.68E+00	8.71E-06	5.14E+17	8.18E+16	4.06E+15	6.46E+14	1.36E-06	1.21E-06
.								
4	6.40E+03	6.99E+02	7.55E-01	6.73E-12	1.44E-15	3.68E-13	2.20E+10	5.44E+09
4	-9.15E+00	6.77E+02	1.08E+00	2.98E-14	8.12E-14	4.06E-14	3.24E+11	1.16E+11
4	9.45E+00	8.71E-06	5.01E+17	8.23E+16	8.12E+15	1.34E+15	1.42E-06	1.21E-06
.								
5	1.23E+04	6.62E+02	7.74E-01	3.76E-12	1.65E-15	3.66E-13	3.72E+10	5.85E+09
5	-1.85E+01	6.41E+02	1.11E+00	1.92E-14	8.81E-14	4.07E-14	3.21E+11	6.85E+11
5	1.91E+01	8.69E-06	4.89E+17	8.29E+16	1.62E+16	2.76E+15	1.49E-06	1.21E-06
.								
6	2.33E+04	6.20E+02	7.93E-01	2.15E-12	1.94E-15	3.81E-13	5.95E+10	6.05E+09
6	-3.75E+01	6.02E+02	1.16E+00	1.27E-14	9.46E-14	3.91E-14	3.08E+11	2.32E+11
6	3.87E+01	8.99E-06	4.81E+17	8.24E+16	3.25E+16	5.65E+15	1.55E-06	1.17E-06

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

```

6      3.07E+01  8.99E+00  4.01E+17  8.34E+16  3.29E+16  3.09E+15  1.99E+00  1.17E
.
7      4.37E+04  5.75E+02  8.13E-01  1.28E-12  2.34E-15  3.78E-13  8.77E+10  6.65E
7      -7.60E+01  5.58E+02  1.24E+00  8.65E-15  1.09E-13  3.92E-14  3.01E+11 -1.11E
7      7.84E+01  8.97E-06  4.75E+17  8.38E+16  6.49E+16  1.16E+16  1.62E-06  1.17E
*
8      8.03E+04  5.19E+02  8.35E-01  8.30E-13  2.98E-15  4.04E-13  1.13E+11  7.26E
8      -1.55E+02  5.03E+02  1.40E+00  6.36E-15  1.26E-13  3.64E-14  2.80E+11  2.27E
8      1.60E+02  9.53E-06  4.68E+17  8.43E+16  1.30E+17  2.38E+16  1.73E-06  1.11E
.
9      1.45E+05  4.58E+02  8.60E-01  5.64E-13  3.99E-15  4.41E-13  1.32E+11  8.47E
9      -3.17E+02  4.43E+02  1.63E+00  4.91E-15  1.58E-13  3.30E-14  2.50E+11  2.85E
9      3.28E+02  1.03E-05  4.60E+17  8.46E+16  2.60E+17  4.94E+16  1.83E-06  1.02E
.
10     2.54E+05  3.84E+02  8.90E-01  4.33E-13  5.95E-15  5.26E-13  1.31E+11  1.11E
10     -6.61E+02  3.70E+02  2.07E+00  4.22E-15  2.20E-13  2.69E-14  2.04E+11 -2.16E
10     6.86E+02  1.22E-05  4.50E+17  8.49E+16  5.19E+17  1.04E+17  1.97E-06  8.63E
.
11     4.25E+05  2.99E+02  9.27E-01  3.80E-13  1.03E-14  5.20E-13  9.42E+10  4.65E
11     -1.42E+03  2.85E+02  2.77E+00  4.17E-15  7.51E-13  2.58E-14  1.22E+11 -3.56E
11     1.49E+03  1.20E-05  4.37E+17  8.50E+16  1.04E+18  2.27E+17  2.17E-06  8.78E
.
12     6.65E+05  2.06E+02  9.72E-01  3.92E-13  2.30E-14  4.75E-13  5.25E+10  9.79E
12     -3.22E+03  1.94E+02  3.90E+00  5.00E-15  2.11E-12  2.70E-14  6.04E+10  2.01E
12     3.43E+03  1.08E-05  4.22E+17  8.47E+16  2.08E+18  5.19E+17  2.49E-06  9.75E
.
13     1.01E+06  1.26E+02  1.03E+00  4.12E-13  6.50E-14  4.28E-13  2.83E+10  1.52E
13     -8.02E+03  1.15E+02  5.36E+00  6.84E-15  4.69E-12  2.87E-14  3.06E+10  1.80E
13     8.81E+03  9.60E-06  4.01E+17  8.38E+16  4.16E+18  1.26E+18  2.90E-06  1.10E
*
14     1.50E+06  6.50E+01  1.11E+00  4.72E-13  1.78E-13  3.83E-13  1.51E+10  2.13E
14     -2.30E+04  5.60E+01  7.50E+00  9.87E-15  9.49E-12  3.10E-14  1.58E+10 -2.38E
14     2.68E+04  8.40E-06  3.73E+17  8.19E+16  8.31E+18  3.21E+18  3.52E-06  1.25E

```

\*\*\* Warning: b-c non-convergence 2 times for lines preceded by \*  
vcb(av) = 0.127E-02

Sheet & base resistance values etc. at 1st (lowest) vbe bias value  
rbe/sq = 2.30E+04 rbase(intrinsic) = 2.15E+01

Warning: near punch through: rpm = 1.49E+00

```

gubaseg  gubaseg/mu  guemeg  guemeg/mu
3.52E+10  2.43E+08  2.07E+12  3.68E+10

```

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

```

lateral simulation: emitter width = 0.900E-05 cm, vcb = 0.127E-02 volts
n ic      vbe      beta      ft      rbdc      ib      crowd     jcmay
n ic      gm      betac     fmosc    rbac      cbet     cbct      cdiff

1 1.10E-05 7.07E-01 2.83E+02 2.32E+09 3.53E+01 3.89E-08 1.27E+00 1.21E+00
1 1.10E-05 4.26E-04 2.85E+02 1.66E+10 2.47E+01 1.54E-14 1.35E-14 1.97E-14

2 1.53E-05 7.18E-01 2.84E+02 3.18E+09 3.46E+01 5.39E-08 1.27E+00 1.68E+00
2 1.53E-05 5.91E-04 2.85E+02 1.97E+10 2.42E+01 1.57E-14 1.35E-14 2.63E-14

3 2.10E-05 7.25E-01 2.82E+02 4.20E+09 3.40E+01 7.45E-08 1.27E+00 2.31E+00
3 2.10E-05 7.90E-04 2.78E+02 2.28E+10 2.39E+01 1.59E-14 1.35E-14 3.45E-14

4 2.90E-05 7.35E-01 2.81E+02 5.48E+09 3.33E+01 1.03E-07 1.27E+00 3.19E+00
4 2.90E-05 1.05E-03 2.78E+02 2.63E+10 2.34E+01 1.62E-14 1.35E-14 4.47E-14

5 3.99E-05 7.43E-01 2.77E+02 7.31E+09 3.28E+01 1.44E-07 1.27E+00 4.37E+00
5 3.99E-05 1.42E-03 2.69E+02 3.06E+10 2.30E+01 1.65E-14 1.35E-14 5.99E-14

6 5.50E-05 7.53E-01 2.75E+02 9.75E+09 3.21E+01 2.00E-07 1.27E+00 6.03E+00
6 5.50E-05 1.94E-03 2.68E+02 3.57E+10 2.26E+01 1.69E-14 1.35E-14 8.07E-14

7 7.53E-05 7.61E-01 2.70E+02 1.28E+10 3.16E+01 2.79E-07 1.27E+00 8.26E+00
7 7.53E-05 2.62E-03 2.59E+02 4.13E+10 2.22E+01 1.72E-14 1.35E-14 1.08E-14

8 1.03E-04 7.71E-01 2.66E+02 1.68E+10 3.10E+01 3.89E-07 1.27E+00 1.14E+00
8 1.03E-04 3.54E-03 2.57E+02 4.76E+10 2.18E+01 1.76E-14 1.35E-14 1.45E-14

9 1.41E-04 7.79E-01 2.60E+02 2.16E+10 3.03E+01 5.42E-07 1.27E+00 1.55E+00
9 1.41E-04 4.72E-03 2.44E+02 5.46E+10 2.14E+01 1.80E-14 1.35E-14 1.95E-14

10 1.93E-04 7.89E-01 2.54E+02 2.75E+10 2.95E+01 7.58E-07 1.27E+00 2.12E+00
10 1.93E-04 6.27E-03 2.40E+02 6.24E+10 2.09E+01 1.83E-14 1.35E-14 2.63E-14

11 2.61E-04 7.98E-01 2.46E+02 3.43E+10 2.88E+01 1.06E-06 1.27E+00 2.87E+00
11 2.61E-04 8.20E-03 2.24E+02 7.06E+10 2.04E+01 1.87E-14 1.35E-14 3.48E-14

12 3.56E-04 8.09E-01 2.38E+02 4.20E+10 2.80E+01 1.50E-06 1.27E+00 3.91E+00
12 3.56E-04 1.06E-02 2.19E+02 7.91E+10 1.98E+01 1.92E-14 1.35E-14 4.55E-14

13 4.78E-04 8.18E-01 2.25E+02 5.00E+10 2.71E+01 2.13E-06 1.26E+00 5.25E+00
13 4.78E-04 1.35E-02 1.94E+02 8.76E+10 1.92E+01 1.97E-14 1.35E-14 5.91E-14

```

Lampiran B.10. File Output Model HBT SiGe Lithografi 0,09 file 009br6\_wb050.

```

14 6.44E-04 8.29E-01 2.13E+02 5.80E+10 2.61E+01 3.03E-06 1.26E+00 7.07E+00
14 6.44E-04 1.70E-02 1.84E+02 9.62E+10 1.86E+01 2.04E-14 1.34E-14 7.69E-14

15 8.59E-04 8.41E-01 1.96E+02 6.56E+10 2.50E+01 4.37E-06 1.26E+00 9.44E+00
15 8.59E-04 2.09E-02 1.60E+02 1.05E+11 1.78E+01 2.10E-14 1.34E-14 9.89E-14

16 1.15E-03 8.53E-01 1.81E+02 7.24E+10 2.37E+01 6.33E-06 1.26E+00 1.26E+00
16 1.15E-03 2.54E-02 1.47E+02 1.13E+11 1.69E+01 2.15E-14 1.34E-14 1.27E-14

17 1.51E-03 8.66E-01 1.61E+02 7.71E+10 2.21E+01 9.39E-06 1.26E+00 1.66E+00
17 1.51E-03 3.00E-02 1.19E+02 1.20E+11 1.59E+01 2.22E-14 1.33E-14 1.61E-14

18 1.98E-03 8.80E-01 1.41E+02 7.94E+10 2.03E+01 1.40E-05 1.26E+00 2.18E+00
18 1.98E-03 3.46E-02 1.02E+02 1.27E+11 1.47E+01 2.30E-14 1.33E-14 2.05E-14

19 2.57E-03 8.96E-01 1.18E+02 7.75E+10 1.78E+01 2.17E-05 1.26E+00 2.83E+00
19 2.57E-03 3.90E-02 7.67E+01 1.34E+11 1.30E+01 2.39E-14 1.33E-14 2.74E-14

20 3.31E-03 9.14E-01 9.69E+01 7.12E+10 1.48E+01 3.41E-05 1.26E+00 3.63E+00
20 3.31E-03 4.30E-02 5.90E+01 1.40E+11 1.10E+01 2.50E-14 1.33E-14 3.86E-14

21 4.19E-03 9.34E-01 7.51E+01 6.16E+10 1.07E+01 5.58E-05 1.26E+00 4.61E+00
21 4.19E-03 4.65E-02 4.09E+01 1.50E+11 8.19E+00 2.65E-14 1.33E-14 5.59E-14

22 5.19E-03 9.55E-01 5.56E+01 5.00E+10 7.34E+00 9.34E-05 1.26E+00 5.71E+00
22 5.19E-03 4.91E-02 2.66E+01 1.58E+11 5.96E+00 2.82E-14 1.33E-14 8.27E-14

23 6.45E-03 9.80E-01 3.90E+01 3.91E+10 5.46E+00 1.65E-04 1.26E+00 7.08E+00
23 6.45E-03 5.16E-02 1.75E+01 1.58E+11 4.70E+00 3.03E-14 1.33E-14 1.21E-14

24 7.87E-03 1.01E+00 2.55E+01 2.96E+10 4.39E+00 3.09E-04 1.26E+00 8.64E+00
24 7.87E-03 5.41E-02 9.91E+00 1.49E+11 3.98E+00 3.25E-14 1.34E-14 1.76E-14

```

summary of terminal characteristics for vcb = 0.00E+00

	ic	vbe	beta	rb	ft	fmosc
low current	7.97E-06	7.00E-01	2.82E+02	2.51E+01	1.70E+09	1.41E+10
max gain	1.53E-05	7.18E-01	2.84E+02	2.42E+01	3.18E+09	1.97E+10
max ft	1.98E-03	8.80E-01	1.41E+02	1.47E+01	7.94E+10	1.27E+11

bvceo = 2.7E+00 volt; figure of merit: bvceo\*ft = 2.14E+02 ghz

note: rsmin not found for fn(db); increase rs from 0.500E+02

Hydrodynamic Model used IHDM= 2. Final value of FHDM = 1.186E+00



