

STUDI TENTANG PENGARUH *DOPING* TINGGI TERHADAP RESISTANSI BASIS DAN *BANDGAP* NARROWING PADA Si/Si_{1-x}Ge_x/Si HBT

Achmad Fadhol

Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya 60117, Indonesia

E-mail: afdolurr@yahoo.com

Abstrak

Heterojunction adalah sambungan yang dibentuk antara dua material semikonduktor dengan *bandgap* yang berbeda yang mempunyai ketipisan di bawah 50nm yang menumbuhkan lapisan campuran Si_{1-x}Ge_x sebagai basis. Sambungan tersebut dapat berupa sambungan yang *abrupt* atau *graded*. Pada penelitian ini dipelajari formulasi dari pengaruh konsentrasi *doping* terhadap tahanan basis dan *bandgap narrowing* pada Si/Si_{1-x}Ge_x/Si *Heterojunction Bipolar Transistor* dengan sambungan emitter-basis yang *abrupt*, selain memperhatikan mobilitas dan lebar basis pada resistansi basis juga pengaruh fraksi mole pada energi *bandgap*. Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi *doping* dari $N_B=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $N_B=5.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ pada basis dapat menurunkan nilai resistansi basis sebesar 3.6 %, menaikkan *bandgap narrowing* sebesar 0.126, dan meningkatkan kerapatan arus kolektor sebesar 1.36 kali pada Ge sebesar 24%.

Abstract

Study About High Influence Doping to Base Resistance and Bandgap Narrowing at Si/Si_{1-x}Ge_x/Si Heterojunction Bipolar Transistor. *Heterojunction* is a link formed between two semiconductor materials and different *bandgap* which has thinness under 50nm and grow the mixture of plate SiGe as bases. The link is an *abrupt* link or *graded* one. In this research learnt formulation of *doping* concentration influence to basis resistance and *bandgap narrowing* through Si/Si_{1-x}Ge_x/Si *Heterojunction Bipolar Transistor* with *abrupt* emitter-basis link, besides taking care to mobility and basis wide to basis resistance, it is also influence of mole fraction to *bandgap* power. From the result shows that *doping* concentration addition of $N_B=5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ to $N_B=5.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ in basis can decrease resistance basis value about 3.6%, increase *bandgap narrowing* about 0.126, and increase collector current density for about 1.36 times to Ge 24%.

Keywords : *Heterojunction, doping, bandgap narrowing*

1. Pendahuluan

Konsep awal HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) telah disampaikan sekitar lima puluh tahun yang lalu tepatnya tahun 1951 oleh Shockley dan Kromer yang bertujuan untuk memperbaiki unjuk kerja dari sebuah transistor homojunction bipolar yang ada saat itu. Untuk memperbaiki unjuk kerja tersebut digunakan komposisi material yang menghasilkan *bandgap* lebih lebar pada emitter dibandingkan pada basis. Adapun unjuk kerja yang dimaksud adalah penguatan arus (*current gain*), efisiensi emitter dan kecepatan yang tinggi.

Untuk memenuhi hal tersebut di atas maka digunakan beberapa teori [1]. Pertama memberikan konsentrasi

doping yang tinggi pada emitter sehingga diperoleh penguatan yang besar, dengan konsentrasi *doping* yang tinggi pada emitter dapat menyebabkan penyempitan *bandgap* yang mengakibatkan peningkatan injeksi dari basis yang pada akhirnya akan mengurangi penguatan yang ingin diperoleh. Kedua untuk mendapatkan penguatan yang besar dan divais yang cepat, konsentrasi *doping* pada basis harus rendah dan basis harus dibuat tipis, akan tetapi hal ini dapat menyebabkan resistansi basis menjadi tinggi sehingga dapat menurunkan kecepatan divais.

Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan solusi yang ditawarkan adalah membuat transistor bipolar dengan *bandgap* yang lebih sempit pada basis yang disebut *Heterojunction Bipolar Transistor*. Dengan cara ini

dapat digunakan bahan semikonduktor yang *bandgap*-nya lebih lebar pada emitter, resistansi basis dapat dibuat rendah dengan memberikan konsentrasi *doping* yang tinggi pada basis dan basis dapat dibuat tipis.

Adapun material yang dapat memberikan *Heterojunction Bipolar Transistor* dengan unjuk kerja yang baik sampai saat ini antara lain Si/SiGe, GaAlAs/GaAs dan InGaAs/InAlAs/InP.

Pada penelitian ini dipelajari tentang pengaruh konsentrasi *doping* yang tinggi terhadap resistansi basis dan *bandgap narrowing* pada Si/Si_{1-x}Ge_x/Si *Heterojunction Bipolar Transistor* dengan lebar basis dan fraksi mole yang berbeda-beda.

2. Metode

Pada perancangan divais SiGe heterojunction bipolar transistor tipe npn ini persamaan mobilitas yang dipakai diambil dari persamaan yang digunakan oleh Zeljka Matutinovic-Krstelj [2].

$$\mu_{p,drift} = 20 + \frac{350}{1 + \left(\frac{N_B}{10^{17} \text{ cm}^{-3}}\right)^{0.5}} \tag{1}$$

μ_p adalah mayoritas carrier *hole mobility* didalam basis. Dengan mengetahui harga mayoritas carrier *hole mobility* didalam *hole* tersebut, maka kita akan mendapatkan juga harga dari resistansi basis didalam basis dengan menggunakan persamaan seperti di bawah ini [3]

$$R_B = \frac{1}{q\mu_p N_B W_B} \tag{2}$$

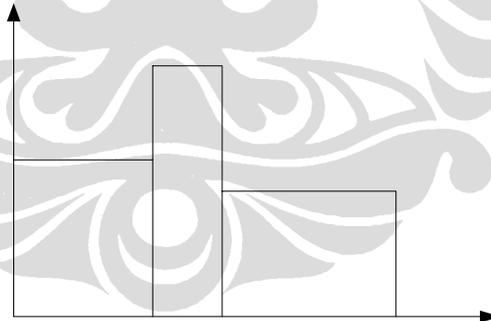
dengan q : muatan electron, N_B : konsentrasi *doping* basis dan W_B : lebar basis.

Pada penelitian sambungan yang terbentuk berupa sambungan *abrupt* dan persamaan *bandgap narrowing* yang dipakai adalah sebagai berikut [2]

$$\Delta E_g = 286 + 27.4 \log_{10} \left(\frac{N_B}{10^{18} \text{ cm}^{-3}} \right) + 688x \tag{3}$$

dengan ΔE_g : energi *bandgap narrowing*, x : mole fraction.

Persamaan dasar arus kolektor untuk mekanisme *difusi* dan *drift* yang digunakan pada pemodelan ini adalah



Gambar 1. Profil *doping* pada emitter, basis dan kolektor

Tabel 1. Struktur divais

Emiter	Basis	Kolektor
N_E : 10^{18} cm^{-3}	N_B : $5 \cdot 10^{18}, 5 \cdot 10^{19}, 5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	N_C : $7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
W_E : 50 nm	W_B : 10,20,30,40,50 nm	Bahan : Si
Bahan : Si	Bahan : Si _{1-x} Ge _x x : 8% s/d 24% , interval 4%	

persamaan arus yang digunakan oleh Benedicte Le Tron [4]. Untuk transistor bipolar *npn* berlaku dengan

$$J_{C(Si)} = \frac{kT\mu_n n_{io}^2}{N_B W_B} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \exp\left(\frac{\Delta E_{gb}}{kT}\right) \quad (4)$$

k : konstanta Boltzman, T : temperature, μ_n : mobilitas elektron (pembawa minoritas) didalam basis, n_{io}^2 : konsentrasi pembawa muatan intrinsik, q : muatan elektron, V_{BE} : tegangan B-E, N_B : konsentrasi *doping* pada basis, W_B : lebar basis dan ΔE_{gb} : *bandgap narrowing (doping induced)* dalam basis.

Sedangkan persamaan untuk konsentrasi pembawa intrinsic diberikan sebagai berikut [4]

$$n_{io}^2 = 4\left(\frac{2\pi k}{h^2}\right)^3 (m_n m_p)^{3/2} T^3 \exp\left(\frac{-E_G}{kT}\right) \quad (5)$$

dengan h : konstanta Planck, m_n : massa efektif electron, m_p : massa efektif *hole* dan E_G adalah Variasi bandgap silicon. Perubahan konsentrasi pembawa muatan intrinsik ini mempengaruhi besarnya arus rekombinasi pada basis netral, arus rekombinasi pada *base space-charge region* dan arus kolektor.

Pengaruh mekanisme *drift*-difusi pada HBT dihitung dengan cara yang sama seperti pada BJT. Perbedaannya adalah karena basis HBT terbuat dari SiGe maka nilai

parameter yang digunakan berbeda dengan nilai parameter Si, terutama pada nilai *bandgap narrowing* yang selain dipengaruhi oleh konsentrasi *doping* yang tinggi, juga dipengaruhi oleh besarnya fraksi mol Ge.

Adapun kerapatan arus electron untuk SiGe adalah sebagai berikut [4]

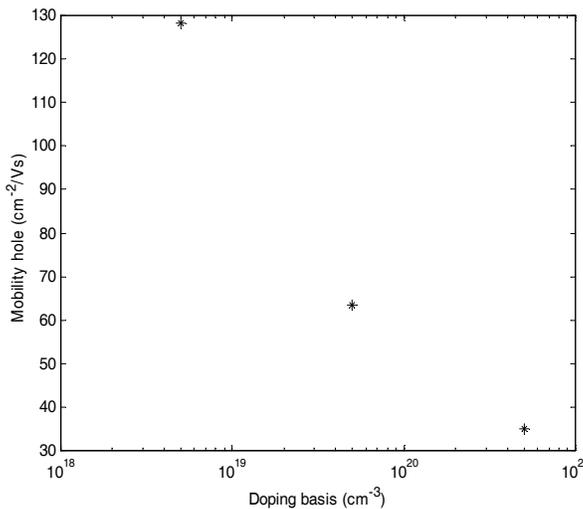
$$J_{C(SiGe)} = J_{C(Si)} \frac{N_C N_{V(SiGe)} \mu_{n(SiGe)}}{N_C N_{V(Si)} \mu_{n(Si)}} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right) \quad (6)$$

dengan N_C : konsentrasi konduksi, N_V : konsentrasi valensi dan ΔE_g : *bandgap narrowing* pada basis (germanium).

Struktur divais yang digunakan dalam penulisan ini seperti yang terlihat dalam Gambar 1. Adapun Struktur divais yang digunakan dalam perhitungan nilai N_E dan W_E dibuat tetap yaitu 10^{18} cm^{-3} dan 50 nm, sedangkan nilai N_B dan W_B bervariasi seperti yang terlihat dalam Tabel 1.

3. Hasil dan Pembahasan

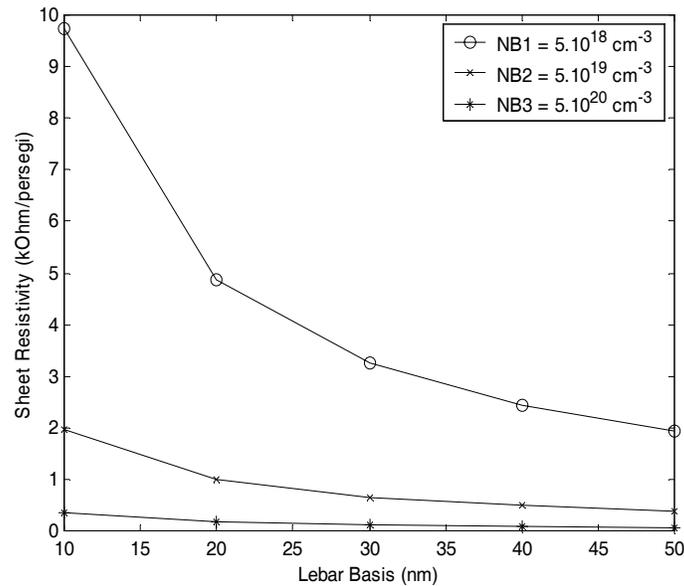
Pada analisa ini struktur divais yang digunakan seperti yang terlihat dalam Tabel 1, sedangkan perhitungannya dilakukan dengan bantuan *MatLab* dan hasilnya sebagian besar dinyatakan dalam bentuk tabel dan grafik.



Gambar 2. Pengaruh *doping* pada basis terhadap mobilitas *hole*

Tabel 2. Pengaruh *doping* pada basis terhadap mobilitas *hole*

NB (cm ⁻³)	μ_p
NB1 = 5 x 10 ¹⁸	128.15
NB2 = 5 x 10 ¹⁹	63.36
NB3 = 5 x 10 ²⁰	34.98



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi *doping* terhadap resistansi basis dengan lebar basis yang berbeda

Tabel 3. Pengaruh N_B terhadap resistansi basis dengan W_B yang berbeda

W_B (nm)	10	20	30	40	50
R_{B1} (k Ω/\square)	9.744	4.872	3.248	2.436	1.948
R_{B2} (k Ω/\square)	1.972	0.986	0.657	0.493	0.394
R_{B3} (k Ω/\square)	0.357	0.178	0.119	0.089	0.071

Dengan menggunakan persamaan 1 dapat diperoleh pengaruh *doping* pada basis terhadap mobilitas *hole* seperti pada Gambar 2. Pada gambar tersebut terlihat bahwa semakin besar *doping* basis yang diberikan maka mobilitas *hole* semakin kecil.

Adapun besarnya mobilitas ditunjukkan dalam Tabel 2. Dengan menaikkan konsentrasi *doping* pada basis dari $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ diperoleh penurunan mobilitas *hole* sebesar 27,3 %.

Sedangkan hubungan antara mobilitas *hole* dengan resistansi basis juga diperlihatkan pada Gambar 3. Dalam gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin besar *doping* yang diberikan nilai resistansi basis semakin kecil. Adapun hubungannya dengan lebar basis untuk konsentrasi *doping* yang sama besar, nilai resistansi basis bertambah kecil dengan semakin melebarnya basis.

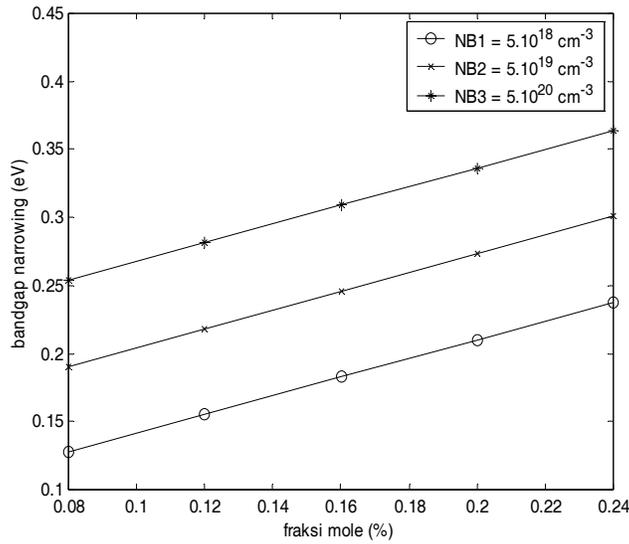
Bila Gambar 3 dibuatkan tabel diperoleh nilai resistansi basis yang bervariasi seperti pada Tabel 3. Dari hasil perhitungan yang terlihat pada Tabel 3 diketahui bahwa

penambahan konsentrasi *doping* pada basis dari $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ menyebabkan menurunnya resistansi basis sebesar 3.6 %. Sedangkan untuk penambahan lebar basis pada konsentrasi *doping* yang sama dari 10 nm menjadi 50 nm dapat menurunkan nilai resistansi basis sebesar 20 % kali.

Pengaruh perubahan konsentrasi *doping* pada basis dan fraksi mol Ge terhadap *bandgap narrowing* diperlihatkan dalam Gambar 4 dan Tabel 4.

Pada grafik tersebut terlihat bahwa *bandgap narrowing* (ΔE_g) semakin besar bila konsentrasi *doping* yang diberikan pada basis semakin tinggi. Sedangkan untuk fraksi mol (x) Ge semakin besar maka nilai *bandgap narrowing* (ΔE_g) juga akan besar pada konsentrasi *doping* yang sama, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Fraksi mole (x) Ge diberikan dari 0.08 sampai 0.24 dengan *step* 0.04.

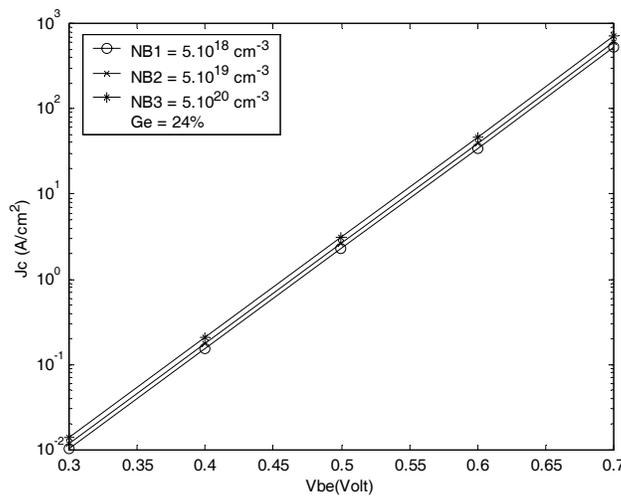
Dari hasil perhitungan diketahui bahwa penambahan konsentrasi *doping* pada basis dari $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ menyebabkan meningkatnya *bandgap*



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi *doping* terhadap *bandgap narrowing* dengan fraksi mol yang berbeda-beda

Tabel 4. Pengaruh konsentrasi *doping* terhadap *bandgap narrowing* dengan fraksi mol yang berbeda-beda

(x) %	8	12	16	20	24
ΔE_{g1} (eV)	0.127	0.155	0.182	0.210	0.237
ΔE_{g2} (eV)	0.190	0.218	0.245	0.273	0.300
ΔE_{g3} (eV)	0.253	0.281	0.309	0.336	0.364



Gambar 5. Pengaruh konsentrasi *doping* terhadap kerapatan arus kolektor

narrowing sebesar 0.126. Adapun penambahan fraksi mol dari 8% menjadi 24% untuk konsentrasi *doping* yang sama dapat meningkatkan *bandgap narrowing* sebesar 0.11.

Pada Gambar 5 memperlihatkan pengaruh perubahan konsentrasi *doping* terhadap kerapatan arus kolektor *heterojunction bipolar transistor* dengan V_{BE} yang berbeda-beda pada Ge sebesar 24%. Dalam gambar

tersebut dapat dilihat bahwa untuk nilai konsentrasi *doping* semakin besar akan menghasilkan kerapatan arus kolektor yang semakin besar pula. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa penambahan konsentrasi *doping* dari $NB = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $NB = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ menyebabkan meningkatnya harga kerapatan arus sebesar 1.36 kali.

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa dengan menaikkan konsentrasi *doping* pada basis dari $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ diperoleh penurunan mobilitas *hole* sebesar 27.3 % dan resistansi basis sebesar 3.6 %. Sedangkan untuk penambahan lebar basis pada konsentrasi *doping* yang sama dari 10 nm menjadi 50 nm dapat menurunkan nilai resistansi basis sebesar 20 %. Penambahan konsentrasi *doping* pada basis dari $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ menyebabkan meningkatnya *bandgap narrowing* sebesar 0.126. Adapun penambahan

fraksi mol dari 8% menjadi 24% untuk konsentrasi *doping* yang sama dapat meningkatkan *bandgap narrowing* sebesar 0.11. Perubahan konsentrasi *doping* dari $NB = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ menjadi $NB = 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ menyebabkan meningkatnya harga kerapatan arus sebesar 1.36 kali untuk Ge sebesar 24%.

Daftar Acuan

- [1] Jasprit Singh, Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology, McGraw Hill, New York, 1995.
- [2] Z. Matutinovic-Krstelj, V. Venkataraman, E.J. Prinz, J.C. Sturm, C.W. Magee, IEEE Transactions on Electron Devices 43 (1996) 457.
- [3] P. Ashburn, H. Boussetta, M.D.R. Hashim, A. Chantre, M. Mouis, G.J. Parker, G. Vincent, IEEE Transactions on Electron Devices 43 (1996) 774.
- [4] B. Le Tron, M.D.R. Hashim, P. Ashburn, M. Mouis, A. Chantre, G. Vincent, IEEE Transactions on Electron Devices 44 (1997) 715.

