

**RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN  
FREKUENSI KERJA BERSKALA TERAHERTZ  
MENGUNAKAN BAHAN CARBON NANOTUBE**

**SKRIPSI**

Oleh

**ANDI AGUNG MATUTU**

**0404030083**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

**RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN  
FREKUENSI KERJA BERSKALA TERAHERTZ  
MENGUNAKAN BAHAN CARBON NANOTUBE**

Oleh

**ANDI AGUNG MATUTU**

**0404030083**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GENAP 2007/2008**

# **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

## **RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN FREKUENSI KERJA BERSKALA TERAHERTZ MENGGUNAKAN BAHAN CARBON NANOTUBE**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 19 Mei 2008

(Andi Agung Matutu)  
NPM 04 04 03 008 3

# PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN FREKUENSI  
KERJA BERSKALA TERAHERTZ MENGGUNAKAN BAHAN CARBON  
NANOTUBE**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada 27 Mei 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 27 Mei 2008

Dosen Pembimbing,

Arief Udhiarto, MT.

NIP 040 050 003 2

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Prof. Dr. Ir. Djoko Hartanto, M.Sc.**

selaku Ketua Sensor Device Research Group atas kontribusinya dalam memberikan pengarahan, diskusi dan bimbingan yang diberikan oleh beliau setiap minggunya, dimana penulis mendapat banyak sekali masukan yang dituangkan dalam skripsi ini.

**Arief Udhiarto, ST, MT.**

selaku Dosen Pembimbing skripsi atas kontribusinya dalam menentukan judul dan telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan, petunjuk, dan saran-saran serta kemudahan lainnya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Andi Agung Matutu  
NPM 04 04 03 008 3  
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing  
Arief Udhiarto, MT.

**RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN FREKUENSI  
KERJA BERSKALA TERAHERTZ MENGGUNAKAN BAHAN CARBON  
NANOTUBE**

**ABSTRAK**

Seiring dengan perkembangan kemajuan teknologi, semakin banyak aplikasi-aplikasi yang membutuhkan divais dengan kecepatan operasi tinggi. Dioda Schottky sebagai sebuah divais dengan kecepatan operasi tinggi banyak dipakai dalam aplikasi-aplikasi seperti *power converter*, *RF detectors* dan *mixers*. Dioda Schottky yang dipakai sekarang ini masih menggunakan bahan semikonduktor konvensional seperti Silikon sebagai material dasarnya.

Pada skripsi ini dilakukan desain dan simulasi sebuah dioda Schottky yang menggunakan Carbon Nanotube (CNT) sebagai pengganti Silikon sebagai material semikonduktor dalam dioda Schottky tersebut. CNT yang digunakan adalah *semiconducting CNT* dengan *chirality* tertentu. Setelah dioda Schottky didesain, dilakukan simulasi menggunakan CNTBANDS 2.0 untuk mengetahui parameter-parameter yang digunakan dalam perhitungan dan analisis.

Dari hasil perhitungan yang didasarkan pada parameter-parameter yang didapatkan melalui simulasi dengan CNTBANDS 2.0, didapatkan hasil kecepatan operasi dioda Schottky CNT yang mencapai skala terahertz, yaitu sebesar 8.1 THz untuk *chirality* (7,0) dan 0.42 THz untuk *chirality* (32,0). Kecepatan operasi dioda Schottky CNT ini bergantung pada parameter *chirality* dari CNT yang digunakan dalam divais. Dengan pertimbangan penggunaan CNT untuk divais yang ada sekarang ini terutama dari segi diameter maka diambil CNT dengan *chirality* (26,0) yang memiliki diameter sebesar 2.03 nm sebagai bahan untuk dioda Schottky CNT.

**Kata kunci : Carbon Nanotube, Dioda Schottky, Chirality.**

Andi Agung Matutu  
NPM 04 04 03 008 3  
Electrical Engineering Department

Counsellor  
Arief Udhiarto, ST, MT.

**DESIGN OF SCHOTTKY DIODE WITH TERAHERTZ SCALE  
OPERATION FREQUENCY USING CARBON NANOTUBE MATERIAL**

**ABSTRACT**

Along with technology development nowadays, more of applications need devices with high operation speed. Schottky diode as a high operation speed device is mainly used in applications such as power converter, RF detectors and mixers. The current Schottky diode is still using conventional semiconductor material such as Silicon for the material.

The goal of this research is to design and simulate a Schottky diode which using Carbon Nanotube (CNT) to replace Silicon as semiconductor material in Schottky diode. The type of CNT which is used in this research is semiconducting CNT with certain chirality. After designing Schottky diode, simulation is performed using CNTBANDS 2.0 to get the parameter of the CNT which is used in calculation and analysis.

From the calculation based on the parameters obtained from simulation with CNTBANDS 2.0, we obtain CNT Schottky diode with terahertz scale operation speed, range from 8.1 THz for chirality (7,0) to 0.42 THz for chirality (32,0). The operation speed of CNT Schottky diode depends on chirality of the CNT used in the device. Due to application of CNT in the devices reason especially from the diameter of CNT parameter, we choose CNT with chirality (26,0) that has 2.03 nm of diameter as a material for CNT Schottky diode.

**Keywords : *Carbon Nanotube, Dioda Schottky, Chirality.***

# DAFTAR ISI

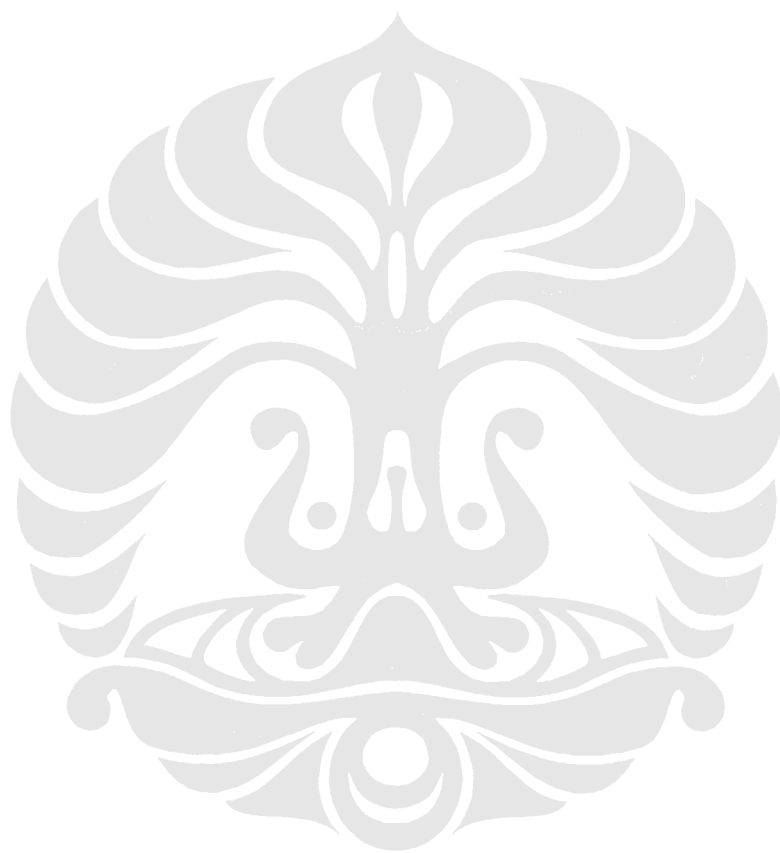
	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	1
1.3 TUJUAN PENELITIAN	1
1.4 BATASAN MASALAH	1
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	2
1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN	2
BAB II LANDASAN TEORI	3
2.1 <i>METAL-SEMICONDUCTOR CONTACT</i>	3
2.1.1 Jenis-jenis Kontak	3
2.1.2 <i>Rectifying Contact</i>	4
2.1.3 Mekanisme Transport dari <i>Carriers</i>	5
2.2 DIODA SCHOTTKY	6
2.3 CARBON NANOTUBE	8
2.3.1 Jenis-jenis CNT	8
2.3.2 Karakteristik Elektrik CNT	9
2.3.3 <i>Bandgap</i> VS Diameter	12



2.3.4	Transport Elektron di CNT	13
2.3.5	<i>Quantum Capacitance</i> CNT	14
2.4	METAL-CNT <i>CONTACT</i>	14
2.5	CNTBANDS 2.0	16
2.5.1	<i>Molecular Structure</i>	17
2.5.2	<i>Molecular Structure Unit Cell</i>	18
2.5.3	<i>Density of States VS Energy</i>	18
2.5.4	<i>Energy VS Axial Wave Vector</i>	19
2.5.5	<i>Lowest Subband</i>	20
2.5.6	<i>Output Log</i>	21
BAB III SIMULASI PARAMETER CARBON NANOTUBE DAN PERHITUNGAN		22
3.1	RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN MATERIAL CNT	22
3.2	SIMULASI PARAMETER CNT DENGAN CNTBANDS 2.0	25
3.2.1	Parameter <i>Input</i>	25
3.2.2	Parameter <i>Output</i>	26
3.2.3	Hasil Simulasi	27
3.3	HUBUNGAN DIAMETER, <i>BANDGAP</i> DAN <i>CHIRALITY</i>	28
3.4	AFINITAS ELEKTRON CNT	30
3.5	HUBUNGAN TINGGI <i>SCHOTTKY BARRIER</i> DENGAN <i>CHIRALITY</i>	31
3.6	KAPASITANSI CNT	32
3.7	FREKUENSI <i>CUT-OFF</i>	36
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI		39
4.1	HUBUNGAN <i>CHIRALITY</i> DENGAN KAPASITANSI DAN KECEPATAN OPERASI DIODA SCHOTTKY CNT	39
4.2	PERBANDINGAN DENGAN DIODA SCHOTTKY SILIKON	42
4.3	PEMILIHAN <i>CHIRALITY</i> CNT UNTUK APLIKASI DIODA SCHOTTKY	43
BAB IV KESIMPULAN		45
DAFTAR ACUAN		46

DAFTAR PUSTAKA  
LAMPIRAN

48  
51



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Diagram karakteristik I-V dari Ohmic <i>contact</i> dan <i>Rectifying contact (Schottky)</i>	3
<b>Gambar 2.2</b> p-type <i>Semiconductor</i> dan Metal Band Diagram: a) sebelum digabung b) sesudah digabung	4
<b>Gambar 2.3</b> Kondisi <i>forward bias</i> pada sistem Gambar 2.2	4
<b>Gambar 2.4</b> Kondisi <i>reverse bias</i> pada sistem Gambar 2.2	5
<b>Gambar 2.5</b> Transport mechanism <i>carriers</i> pada <i>Schottky barrier</i>	5
<b>Gambar 2.6</b> Lambang dari dioda Schottky	6
<b>Gambar 2.7</b> (a) SWNT (b) MWNT	8
<b>Gambar 2.8</b> (a) <i>Zigzag CNT</i> (b) <i>Armchair CNT</i>	9
<b>Gambar 2.9</b> (a)Konfigurasi elektron Silikon (b)Konfigurasi elektron CNT (c)Ikatan elektron pada CNT	10
<b>Gambar 2.10</b> 3-D <i>Bandstructure</i> dari jaringan $\square$ elektron	11
<b>Gambar 2.11</b> (a) <i>Semiconducting CNT</i> (b) <i>Metallic CNT</i>	12
<b>Gambar 2.12</b> Diagram hubungan antara <i>bandgap</i> dengan diameter CNT	12
<b>Gambar 2.13</b> Tinggi <i>Schottky barrier</i> antara Silikon dengan berbagai macam metal	15
<b>Gambar 2.14</b> (a) <i>End-bonded contact</i> (b) <i>Side-contacted contact</i>	16
<b>Gambar 2.15</b> Tampilan awal dari CNTBANDS 2.0	17
<b>Gambar 2.16</b> <i>Output CNTBANDS 2.0</i> untuk <i>molecular structure</i>	18
<b>Gambar 2.17</b> <i>Output CNTBANDS 2.0</i> untuk <i>molecular structure unit cell</i>	18
<b>Gambar 2.18</b> <i>Output CNTBANDS 2.0</i> untuk <i>DOS vs Energy</i>	19
<b>Gambar 2.19</b> <i>Output CNTBANDS 2.0</i> untuk <i>Energy VS Axial Wave Vector</i>	20
<b>Gambar 2.20</b> <i>Output CNTBANDS 2.0</i> untuk <i>Lowest Subband</i>	20
<b>Gambar 2.21</b> <i>Output CNTBANDS 2.0</i> untuk <i>Output Log</i>	21
<b>Gambar 3.1</b> Desain perancangan diode <i>Schottky</i> dengan CNT	23
<b>Gambar 3.2</b> <i>Band diagram</i> Al-CNT-Au sebelum digabungkan	23

<b>Gambar 3.3</b>	<i>Band diagram Al-CNT-Au kondisi equilibrium</i>	24
<b>Gambar 3.4</b>	<i>Band diagram Al-CNT-Au kondisi forward bias</i>	24
<b>Gambar 3.5</b>	<i>Band diagram Al-CNT-Au kondisi reverse bias</i>	25
<b>Gambar 3.6</b>	Output Log CNTBANDS 2.0 untuk CNT (20,0)	26
<b>Gambar 3.7</b>	Grafik <i>Chirality VS Diameter</i>	28
<b>Gambar 3.8</b>	Grafik <i>Bandgap VS Chirality</i>	29
<b>Gambar 3.9</b>	Grafik <i>Bandgap VS Diameter</i>	29
<b>Gambar 3.10</b>	Grafik <i>Afinitas Elektron VS Chirality</i>	30
<b>Gambar 3.11</b>	<i>Band Diagram Al-CNT-Au dalam kondisi equilibrium</i>	31
<b>Gambar 3.12</b>	Grafik <i>Tinggi Barrier VS Chirality</i>	32
<b>Gambar 3.13</b>	Grafik <i>Total Capacitance Vs Chirality</i>	35
<b>Gambar 3.14</b>	Grafik <i>Capacitance VS Frekuensi cut-off</i>	37
<b>Gambar 3.15</b>	Grafik <i>Frekuensi cut-off Vs Chirality</i>	38
<b>Gambar 4.1</b>	Hubungan Kapasitansi dengan Frekuensi <i>cut-off</i> dioda Schottky CNT	41
<b>Gambar 4.2</b>	Hubungan Frekuensi <i>cut-off</i> dengan <i>chirality</i> CNT yang digunakan	41

## DAFTAR TABEL

	Halaman	
<b>Tabel 3.1</b>	Tabel Data Hasil Simulasi CNTBANDS 2.0	27
<b>Tabel 3.2</b>	Tabel Hasil Perhitungan Kapasitansi	35
<b>Tabel 3.3</b>	Tabel Hasil Perhitungan frekuensi <i>cut-off</i>	37
<b>Tabel 4.1</b>	Tabel Perbandingan dioda Schottky	43



## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> <i>Datasheet</i> Dioda Schottky MAS70 Series MOSPEC Semiconductor	51
<b>Lampiran 2</b> <i>Datasheet</i> Dioda Schottky H270X Series Hewlett Packard	53



## DAFTAR SINGKATAN

CNT	Carbon Nanotube
DOS	Density of States
MWNT	Multi-Walled Nanotube
SWNT	Single-Walled Nanotube
TE Current	Thermionic emission Current



## DAFTAR ISTILAH

Armchair	Salah satu struktur CNT yang berbentuk lengan kursi
Ballistic transport	Metode aliran elektron yang tanpa hambatan.
Chiral	Struktur CNT yang selain Armchair dan <i>Zigzag</i>
Chirality	Karakteristik dari CNT yang menunjukkan arah gulungan graphene
Doping	Memberikan suatu tambahan (dopant) agar suatu material kekurangan atau kelebihan elektron
Junction	Sambungan antara dua buah semikonduktor
Metal	Material yang mampu menghantarkan arus
Metallic	Bersifat metal
Scattering	Gerakan elektron secara acak
Schottky barrier	Penghalang carriers yang terbentuk pada junction
Zigzag	Suatu bentuk struktur CNT yang berkelok-kelok



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Seiring dengan pesatnya kemajuan teknologi terutama di bidang elektronika dan telekomunikasi, kebutuhan akan divais yang mampu beroperasi pada kecepatan tinggi semakin meningkat. Salah satu divais yang dipakai dalam aplikasi berkecepatan tinggi seperti *power converter*, *RF detectors* dan *mixers* adalah dioda Schottky. Hal ini disebabkan dioda Schottky ini memiliki kelebihan yaitu *forward voltage* yang tergolong rendah dan kecepatan operasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan dioda *pn* konvensional. Dioda Schottky yang ada saat ini menggunakan Silikon sebagai material semikonduktor utama.

Perkembangan teknologi nano mengakibatkan divais-divais yang tadinya hanya menggunakan bahan semikonduktor standar seperti Silikon mulai menggunakan bahan-bahan berskala nano seperti Carbon Nanotube (CNT). Dengan penggunaan teknologi nano dalam sebuah dioda Schottky diharapkan akan didapatkan sebuah divais yang mempunyai kecepatan lebih tinggi dibandingkan dengan dioda Schottky yang berbasis Silikon.

### 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Masalah yang diangkat pada penelitian ini adalah untuk mendapatkan sebuah dioda Schottky dengan menggunakan CNT yang memiliki frekuensi kerja berskala terahertz.

### 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan rancangan dioda Schottky yang menggunakan CNT yang beroperasi pada frekuensi kerja berskala terahertz.

### 1.4 BATASAN MASALAH

Pada skripsi ini dilakukan perancangan dioda Schottky dengan menggunakan CNT yang bersifat *semiconducting*. Perhitungan yang dilakukan

berdasarkan pada parameter yang didapatkan melalui simulasi dengan CNTBANDS 2.0. Analisis kecepatan operasi dioda Schottky didasarkan pada perhitungan kapasitansi dan frekuensi *cut-off* dari masing-masing dioda.

## **1.5 METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan dengan studi literatur, mensimulasikan hasil studi literatur tersebut dengan CNTBANDS 2.0 dan menganalisis hasil simulasi untuk mendapatkan hasil dan kesimpulan.

## **1.6 SISTEMATIKA PENELITIAN**

Skripsi ini terdiri dari 5 bab dimana sistematika penulisan yang diterapkan adalah sebagai berikut. Bab 1 sebagai pendahuluan yang membahas tentang latar belakang pemilihan tema, tujuan, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan. Bab 2 berisi teori-teori tentang kontak antara metal-semikonduktor, dioda Schottky dan *carbon nanotube* beserta sifat-sifat yang dimiliki oleh *carbon nanotube*. Bab 3 akan menjelaskan tentang desain dan simulasi dengan menggunakan CNTBANDS 2.0 serta perhitungan yang dilakukan. Bab 4 berisi tentang analisis dari hasil simulasi dan perhitungan yang dilakukan. Bab 5 sebagai penutup akan berisi kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

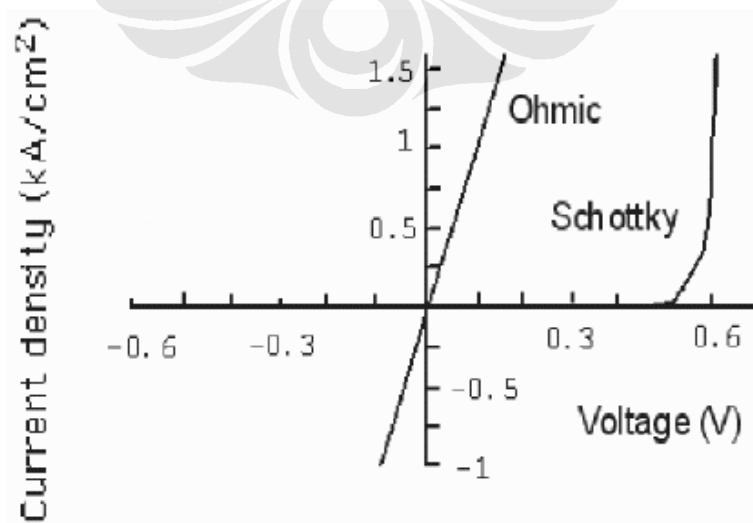
## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 METAL-SEMICONDUCTOR CONTACT

##### 2.1.1 Jenis-jenis Kontak

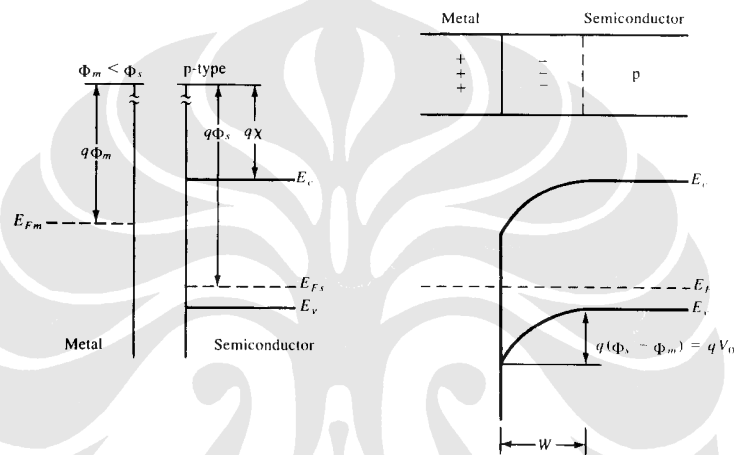
Kontak antara metal dan semikonduktor memiliki dua karakteristik utama, yaitu *Ohmic contact* dan *Rectifying contact*. Tipe *Ohmic contact* terjadi apabila *n-type* semikonduktor digabungkan dengan metal yang memiliki *workfunction* yang lebih kecil dari *workfunction n-type* semikonduktor tersebut, atau bila *p-type* semikonduktor digabungkan dengan metal yang memiliki *workfunction* yang lebih besar dari *workfunction p-type* semikonduktor tersebut. Disebut *Ohmic contact* karena bila dilihat dari karakteristik grafik I-V terlihat linear dan memenuhi persamaan  $V = I \cdot R$ . Jenis kontak yang kedua adalah *Rectifying contact*. Tipe *Rectifying Contact* ini terjadi apabila *n-type semikonduktor* digabungkan dengan metal yang memiliki *workfunction* yang lebih besar dari *workfunction n-type* semikonduktor tersebut, atau bila *p-type semikonduktor* digabungkan dengan metal yang memiliki *workfunction* yang lebih kecil dari *workfunction p-type* semikonduktor tersebut<sup>[1]</sup>. Disebut *Rectifying contact* karena bila dilihat dari karakteristik grafik I-V terlihat seperti karakteristik dioda (penyearah). Gambar 2.1 menunjukkan karakteristik *Ohmic contact* dan *Rectifying contact*.



Gambar 2.1 Diagram karakteristik I-V dari *Ohmic contact* dan *Rectifying contact* (Schottky)<sup>[2]</sup>

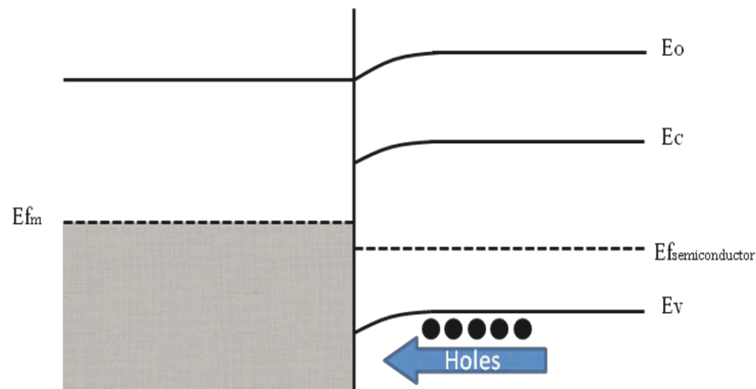
### 2.1.2 Rectifying Contact

Karakteristik *rectifying contact* dapat dijelaskan dengan menggunakan metode *band diagram*. Gambar 2.2 menunjukkan *band diagram* dari *p-type semikonduktor* yang digabungkan dengan metal yang memiliki *workfunction* lebih kecil dari *workfunction p-type* tersebut. Kondisi sesaat setelah kedua material digabungkan dan tidak terjadi lagi perpindahan elektron (Fermi level telah sama) disebut kondisi *equilibrium*<sup>[1]</sup>. Pada sistem Gambar 2.2, dapat dilihat terbentuknya *Schottky barrier* pada *junction* dalam kondisi *equilibrium*.



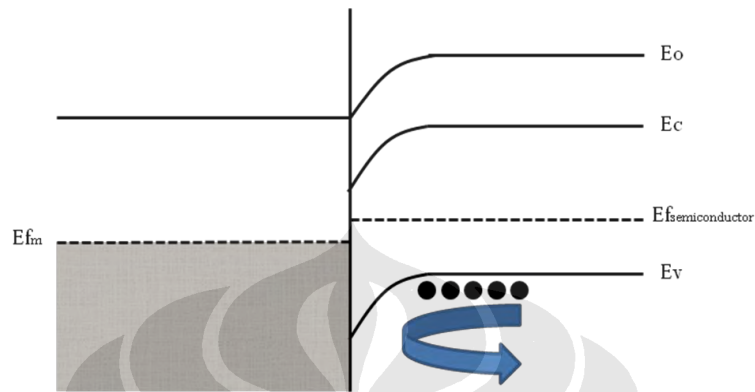
Gambar 2.2 *p-type Semiconductor* dan *Metal Band Diagram*: a) sebelum digabung b) sesudah digabung<sup>[3]</sup>

Gambar 2.3 menunjukkan kondisi *band diagram* ketika sistem berada pada kondisi *forward bias*. Pada kondisi ini, *majority carriers (holes)* dari semikonduktor dapat melewati *junction* antara metal dan semikonduktor.



Gambar 2.3 Kondisi *forward bias* pada sistem Gambar 2.2

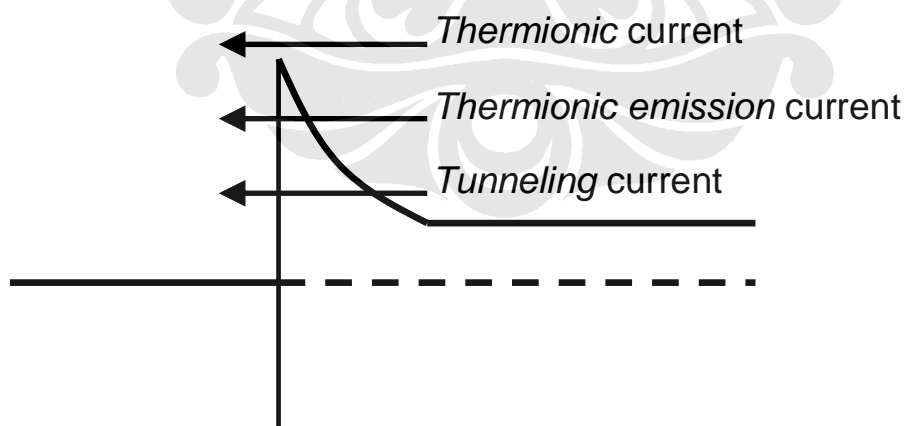
Gambar 2.4 menunjukkan kondisi *band diagram* ketika sistem berada pada kondisi *reverse bias*. Pada kondisi ini, *majority carriers* (holes) tidak dapat melewati *junction* dikarenakan tingginya *Schottky barrier* yang terbentuk pada *junction*.



Gambar 2.4 Kondisi *reverse bias* pada sistem Gambar 2.2

### 2.1.3 Mekanisme Transport dari *Carriers*

Pada sistem dengan *Schottky barrier*, terdapat 2 mekanisme utama dari *carriers transport* yaitu *thermionic emission current* (TE current) dan *tunneling current*<sup>[4]</sup>. Gambar 2.5 menunjukkan mekanisme dari *carriers transport* pada *Schottky barrier*.



Gambar 2.5 *Transport mechanism carriers* pada *Schottky barrier*<sup>[2]</sup>

Pada mekanisme *thermionic emission*, aliran arus terjadi hanya pada saat *carriers* mempunyai energy yang setara atau lebih besar dari *Schottky barrier*. Sedangkan pada mekanisme *tunneling*, aliran arus terjadi disebabkan sifat

gelombang dari elektron yang membuat elektron mampu menembus lapisan tipis dari *Schottky barrier*.<sup>[5]</sup>

Pada kenyataannya, kedua mekanisme di atas terjadi secara bersamaan, hanya saja biasanya hanya satu mekanisme saja yang mendominasi dari total arus yang mengalir, dimana hal ini tergantung dari karakteristik *Schottky barrier* itu sendiri.<sup>[6][7]</sup>

## 2.2 DIODA SCHOTTKY

Dioda Schottky adalah salah satu jenis dioda yang bekerja berdasarkan prinsip *Schottky barrier*. Prinsip kerja dioda jenis ini ditemukan oleh fisikawan Jerman, Walter H. Schottky pada tahun 1938<sup>[8]</sup>. Gambar 2.6 berikut menunjukkan lambang dari dioda Schottky :



Gambar 2.6 Lambang dari dioda Schottky<sup>[8]</sup>

Cara kerja dari dioda Schottky ini memanfaatkan *Schottky barrier* yang terbentuk pada persambungan antara metal dan semikonduktor. Seperti telah dijelaskan di SubBab 2.1, karakteristik *Schottky barrier* ini bersifat *rectifying* (menyearahkan) dimana pada saat diberikan *forward bias* dapat dilewati oleh *majority carriers* namun pada saat diberikan *reverse bias*, *Schottky barrier* yang terbentuk menghalangi perpindahan *majority carriers* sehingga tidak dapat dilewati arus.

Dioda Schottky ini disebut juga sebagai *majority carriers* divais. Hal ini berarti, bila semikonduktor yang digunakan menggunakan doping tipe *n*, hanya *carrier* tipe *n* (elektron) yang berperan besar dalam mode operasi divais tersebut. Hal ini berbeda dengan dioda *pn* konvensional dimana proses penyearahan melibatkan rekombinasi antara elektron dan *hole* (*majority carriers* dan *minority carriers*) yang cukup lambat. Hal ini menyebabkan proses transisi divais dari

kondisi ON ke OFF atau sebaliknya memiliki waktu yang cukup signifikan, hal ini yang disebut dengan *switching time*. Pada dioda *pn*, *switching time* ini dapat mencapai skala *microseconds*<sup>[9]</sup>. Berbeda dengan dioda *pn*, proses rekombinasi pada dioda Schottky tidak terjadi, oleh sebab itu *switching time* pada dioda Schottky dapat lebih cepat daripada dioda *pn*.<sup>[8]</sup>

Karena tidak terdapat rekombinasi *pn* pada dioda Schottky maka kecepatan operasi pada divais ini sangat dipengaruhi oleh kapasitansi yang terbentuk antara persambungan antara metal dan semikonduktor. Pada divais seperti dioda dan transistor, kapasitansi pada *junction* ini disebut juga *parasitic capacitance*<sup>[10]</sup>. Besar kapasitansi yang terdapat pada persambungan tersebut dirumuskan sebagai berikut<sup>[2]</sup> :

$$C_J = \frac{\epsilon_s \cdot A}{W} \quad (2.1)$$

dimana :  $C_J$  = kapasitansi persambungan (Farad)  
 $\epsilon_s$  = permitivitas semikonduktor (F/m)  
 $A$  = luas permukaan *junction* (m<sup>2</sup>)  
 $W$  = lebar dari Schottky barrier (m)

Salah satu parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas sebuah dioda Schottky adalah dengan melihat nilai frekuensi *cut-off* dioda tersebut<sup>[11]</sup>, dimana besar dari frekuensi *cut-off* sebuah dioda Schottky dirumuskan sebagai berikut<sup>[7][12]</sup>:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_J} \quad (2.2)$$

dimana :  $f_c$  = frekuensi *cut-off* (Hz)  
 $R_s$  = resistansi seri dioda Schottky (Ohm)  
 $C_J$  = kapasitansi persambungan (Farad)

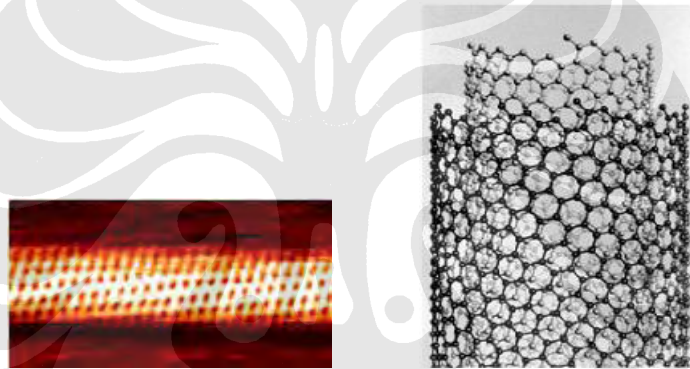
Parameter frekuensi *cut-off* dari dioda Schottky ini terkait langsung dengan performa sebuah dioda Schottky dimana semakin besar nilai frekuensi *cut-off* ini

maka dioda Schottky tersebut akan mampu semakin cepat dalam beroperasi. Dioda Schottky yang ada di pasaran saat ini mampu beroperasi pada skala *gigahertz*<sup>[13]</sup>.

## 2.3 CARBON NANOTUBE

### 2.3.1 Jenis-jenis CNT

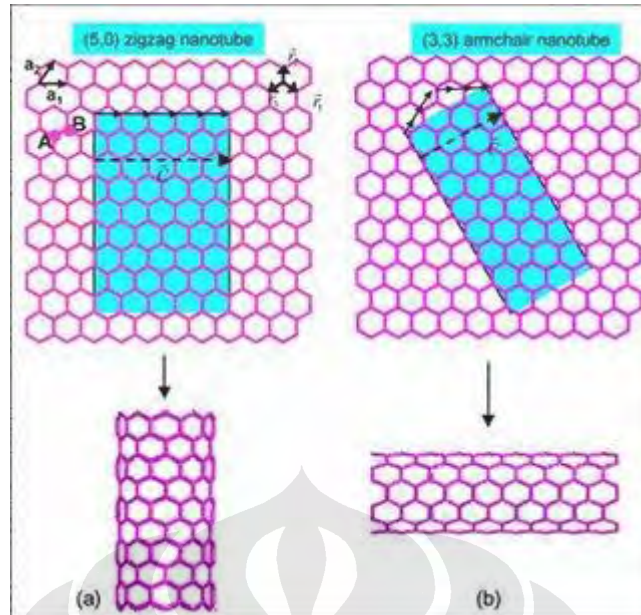
Dilihat dari karakteristik ketebalan dindingnya, CNT dibedakan menjadi 2 jenis yaitu Single Wall Carbon Nanotube (SWNT) dan Multi Wall Carbon Nanotube (MWNT). Untuk SWNT hanya mempunyai satu lapis dinding, sedangkan untuk MWNT mempunyai lapisan yang lebih dari satu. Gambar 2.7 menunjukkan bentuk fisik dari SWNT dan MWNT.



Gambar 2.7 (a) SWNT<sup>[14]</sup> (b) MWNT<sup>[15]</sup>

Berdasarkan vector arah gulungannya, CNT dibedakan menjadi 3 jenis utama yaitu armchair CNT, zigzag CNT dan chiral CNT. Tipe-tipe CNT inilah yang menentukan karakteristik dari CNT, apakah CNT tersebut bersifat seperti metal atau seperti semikonduktor. Pembentukan tabung dari CNT dapat dibayangkan seperti menggulung lapisan graphene menurut arah tertentu. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut :



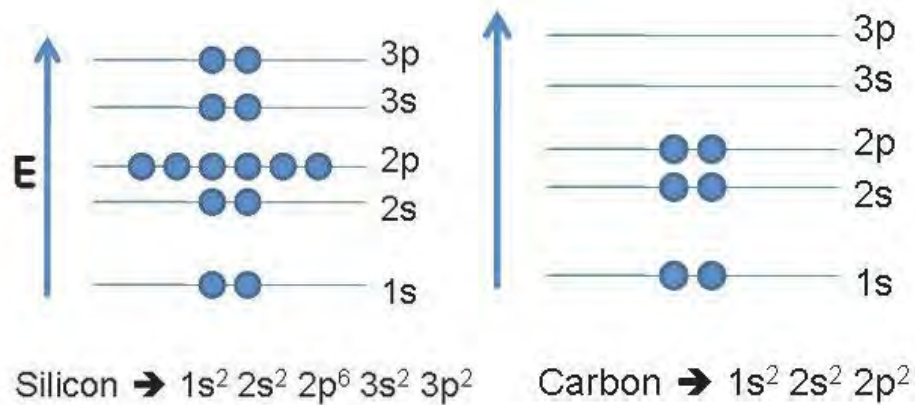


Gambar 2.8 (a) Zigzag CNT (b) Armchair CNT<sup>[14]</sup>

Dari Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa pada lembaran graphene terbentuk dari vektor basis  $\mathbf{a}_1 = a(\sqrt{3}, 0)$  dan  $\mathbf{a}_2 = a(\sqrt{3}/2, 3/2)$  dengan  $a$  merupakan jarak antar atom carbon sebesar 0.142 nm. A dan B adalah dua atom dalam satu unit cell graphene. Vektor arah penggulungan lembaran graphene dinyatakan dengan  $\mathbf{C} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$ , dimana diameter dari CNT dapat ditentukan sebesar  $R = C/2\pi$ . Pada saat vektor  $\mathbf{C}$  terletak sama dengan salah satu vektor basis dari graphene, maka terbentuk apa yang disebut sebagai "zig-zag" carbon nanotube  $(n,0)$ . Kemudian, apabila vektor  $\mathbf{C}$  terletak tepat pada pertengahan antara kedua vektor basis, maka terbentuklah "armchair" carbon nanotube  $(n,n)$ . Selain kedua tipe spesial di atas, maka carbon nanotube yang terbentuk mempunyai chirality tertentu yang dinyatakan dengan  $(n,m)$ .

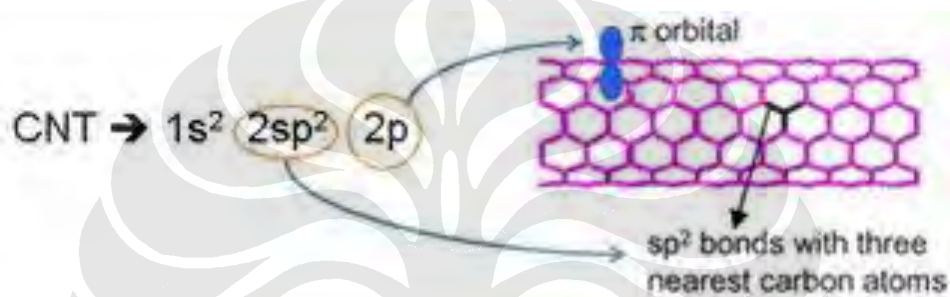
### 2.3.2 Karakteristik Elektrik CNT

Karakteristik elektrik dari CNT dapat ditinjau dari konfigurasi elektronnya, seperti dapat dilihat pada Gambar 2.9 di bawah ini :



(a)

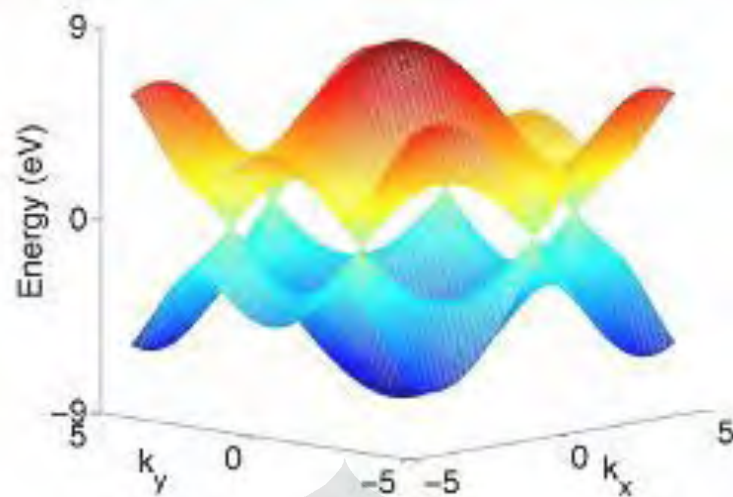
(b)



Gambar 2.9 (a)Konfigurasi elektron Silikon (b)Konfigurasi elektron CNT (c)Ikatan elektron pada CNT

Pada atom carbon biasa (elektron valensi 6), susunan dari elektronnya adalah  $1s^2 2s^2 2p^2$ , sedangkan pada carbon nanotube, susunan dari elektronnya adalah  $1s^2 2sp^2 2p$ . Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8, bahwa 3 elektron yang berada pada sub-kulit s dan p membentuk ikatan dengan 3 buah elektron dari atom carbon yang terdekat, membentuk jaringan heksagonal sepanjang lembaran graphene. Sedangkan satu elektron bebas yang berada pada sub-kulit p membentuk  $\pi$  orbital yang tegak lurus dengan lembaran graphene, yang pada akhirnya juga tegak lurus terhadap permukaan CNT. Jaringan  $\pi$  orbital inilah yang akan menentukan karakteristik elektrik dari CNT.

Bandstructure dari graphene yang terdiri dari hanya jaringan  $\pi$  elektron ini dapat digambarkan sebagai berikut :



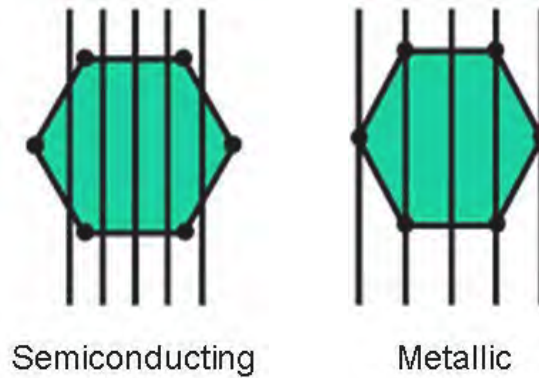
Gambar 2.10 3-D Bandstructure dari jaringan [1] elektron<sup>[14]</sup>

Bandstructure di atas di-plot sebagai fungsi dari  $k_x$  dan  $k_y$  dimana  $k$  ini adalah vektor pergerakan elektron sepanjang solid-material. Pita konduksi dan pita valensi dari graphene ini bertemu di enam titik  $[\pm 4\pi/3\sqrt{3}a, 0]$ ;  $(\pm 2\pi/3\sqrt{3}a, 2\pi/3a)$  di sudut dari Brillouin Zone. Graphene itu sendiri merupakan material semi-metal sehingga tingkat energi Ferminya hanya terdiri dari titik-titik.

Untuk mendapatkan karakteristik dari CNT, dapat dimulai dari graphene bandstructure dan mendefinisikan vektor gelombangnya menjadi :

$$kC = k_x C_x + k_y C_y = 2\pi p \quad (2.3)$$

dengan  $C$  merupakan vektor arah seperti telah dijelaskan di atas, dan  $p$  merupakan integer. Persamaan 2.3 mendefinisikan garis yang melintas di bidang  $(k_x, k_y)$ . Nilai dari  $C_x$ ,  $C_y$  dan  $p$  menentukan dimana letak perpotongan antara garis tersebut dengan bandstructure graphene, dimana setiap CNT mempunyai nilai  $C_x$ ,  $C_y$  dan  $p$  yang berbeda tergantung dari chiralitinya. Dari letak perpotongan inilah dapat dilihat sifat dari sebuah CNT apakah bersifat metallic atau semiconducting seperti pada Gambar 2.11 di bawah ini :

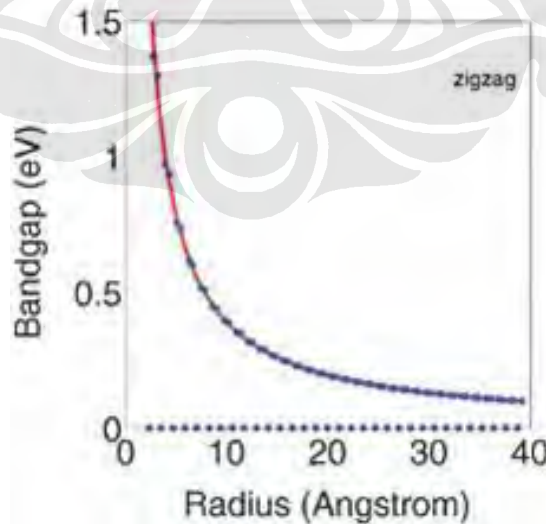


Gambar 2.11 (a)Semiconducting CNT (b)Metallic CNT<sup>[14]</sup>

Bila perpotongan garis  $k_y$  memotong Fermi point dari bandstructure grapheme, maka CNT tersebut bersifat metallic, dan bila tidak memotong maka CNT bersifat semiconducting dengan nilai bandgap yang dapat ditentukan dari dua buah garis yang mendekati Fermi point. CNT bersifat metallic bila terdapat garis  $k_y = (2\pi p/Cy) - (Cx/Cy)k_x$  memotong Fermi point dari graphene. Hal ini berakibat pada kondisi  $|n - m| = 3 \cdot I$  dengan I adalah integer.

### 2.3.3 Bandgap VS Diameter

Bandgap dari semiconducting CNT berbanding terbalik dengan diameter dari CNT seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.12 di bawah ini :



Gambar 2.12 Diagram hubungan antara bandgap dengan diameter CNT<sup>[14]</sup>

Hubungan antara bandgap dengan diameter dapat ditentukan dari dua buah garis yang berada paling dekat dengan Fermi point, yang dapat dirumuskan :

$$E_g = \frac{\gamma\alpha}{R} \quad (2.4)$$

dengan :  $E_g$  = bandgap CNT (eV)

$R$  = diameter CNT (nm)

$\gamma$  = energi ikatan karbon (2.7 eV)

$\alpha$  = jarak atom carbon terdekat ( 0.142 nm )

### 2.3.4 Transport Elektron di CNT

CNT termasuk kedalam nanostructured material dimana lebih spesifik lagi dapat dikategorikan sebagai nanowire. Karakteristik khusus dari nanowire adalah 1-D system, dimana elektron hanya dapat bergerak dalam satu dimensi saja, ke depan atau belakang. Namun, konduktivitas dari nanowire ini biasanya rendah (lebih rendah dari bulk material biasa) yang disebabkan oleh adanya *edge effect* sebagai akibat adanya atom-atom yang tidak terikat secara sempurna atau bahkan tidak terikat sama sekali (*unbonded atom*) di permukaan nanowire. Pada CNT, yang atom-atomnya terikat secara sempurna, tidak ditemukan fenomena *edge effect* ini, akibatnya konduktivitas dari carbon nanotube tergolong tinggi (selain faktor *ballistic transport* tentunya).

Pada prinsipnya, mekanisme transport elektron di carbon nanotube sama seperti di nanowire lainnya, yaitu melalui *channel* yang terbentuk dari kuantisasi tingkat energi elektron yang melalui nanowire tersebut. Hal ini disebabkan ketika terjadi *electron wavefunction confinement* pada suatu material, maka akan terjadi kuantisasi tingkat energi dari elektron, yang berakibat pada *discontinuity* pada *density of states* dari elektron. Transport elektron di nanotube terjadi akibat *tunneling* melalui channel yang terbentuk akibat perbedaan *density of states* ini. Ini berarti elektron tidak terlokalisasi di titik tertentu melainkan tersebar secara merata di sepanjang tabung. Umumnya, *defect* pada suatu material akan menyebabkan timbulnya lokalisasi elektron, namun pada nanotube hal ini tidak terjadi karena peristiwa *tunneling* di atas. Peristiwa *ballistic transport* itu sendiri

terjadi ketika *wavefunction* dari elektron menjadi seragam dan setiap elektron memiliki *wavenumber* yang sama. Karena dalam nanotube ini terjadi *confinement wavefunction electron* maka peristiwa *ballistic transport* ini dapat terjadi sepanjang tabung. Dengan adanya fenomena *ballistic transport* ini maka elektron mengalir tanpa adanya gangguan dari *phonon* dan *scattering*.

### 2.3.5 Quantum Capacitance CNT

Karena CNT merupakan struktur 1-D yang mempunyai tingkat energi kuantum yang terkuantisasi (*finite*), maka untuk menambahkan 1 elektron ke dalam CNT dibutuhkan suatu energi tambahan. Dengan menyamakan besar energi yang dibutuhkan ini ( $\Delta E$ ) dengan *effective quantum capacitance* ( $e^2/C_Q$ ) maka didapat persamaan untuk menghitung besarnya *quantum capacitance* untuk setiap unit satuan panjang<sup>[14]</sup>:

$$C_Q = \frac{4e^2}{\hbar\pi v_f} \quad (2.5)$$

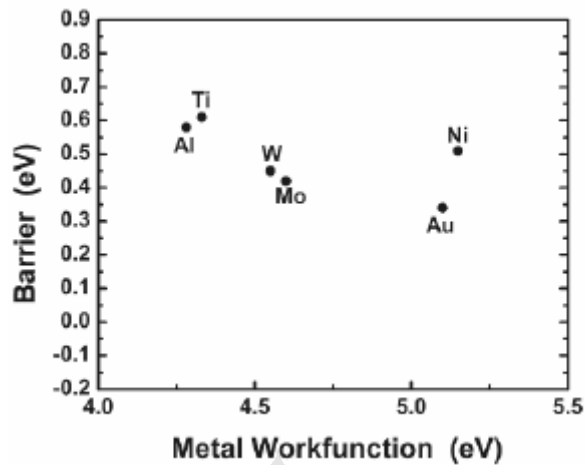
dimana:

- $C_Q$  = *quantum capacitance* (F/m)
- $\hbar$  = konstanta Planck ( $6.63 \times 10^{-34}$  Js)
- $v_f$  = CNT *Fermi velocity* ( $8 \times 10^5$  m/s)

Dari Persamaan 2.5 didapatkan besarnya *quantum capacitance* (CQ) untuk CNT adalah sebesar  $400 \text{ aF}/\mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>.

## 2.4 METAL-CNT CONTACT

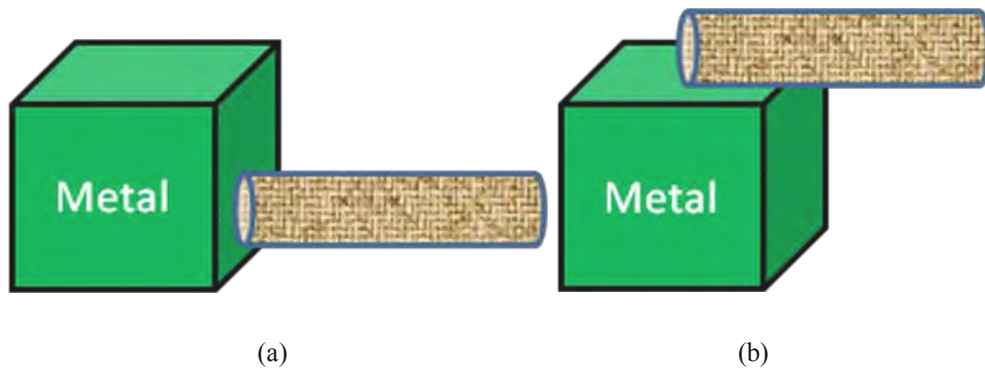
Dalam kontak antara metal dan semikonduktor biasa, telah dibuktikan melalui eksperimen bahwa fenomena *Fermi level pinning*<sup>[14]</sup>, yang menyebabkan timbulnya efek dari *Schottky barrier*. Gambar 2.13 menunjukkan tinggi dari *Schottky barrier* yang terbentuk antara Silikon dengan berbagai macam metal :



Gambar 2.13 Tinggi Schottky barrier antara Silikon dengan berbagai macam metal<sup>[14]</sup>

Dapat dilihat bahwa tinggi *Schottky barrier* yang terbentuk hampir konstan untuk semua metal terhadap Silikon. Hal ini membuktikan bahwa pada intinya tinggi barrier bersifat independent terhadap *workfunction* dari metal yang dipakai. Persamaan sederhana  $\Phi_{\text{barrier}} = \chi_{\text{metal}} - \chi_{\text{semikonduktor}}$  (tinggi barrier  $\Phi_{\text{barrier}}$  adalah besar *workfunction* metal  $\chi_{\text{metal}}$  dikurangi besar afinitas elektron semikonduktor  $\chi_{\text{semikonduktor}}$ ) gagal menjelaskan konstannya tinggi *barrier* yang terbentuk antara Silikon dengan berbagai macam metal. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan konsep *Fermi level pinning* dimana pada interface antara metal dengan Silikon terjadi *Fermi level pinning* yang mendominasi sehingga *barrier* yang terbentuk nyaris konstan untuk semua metal.<sup>[14]</sup>

Pada kontak antara metal dengan CNT, hal ini dapat dihindari dengan menerapkan bentuk interface yang tepat antara metal dengan CNT. Secara teoritis dibuktikan pada *end-bonded contact* antara metal dengan CNT, pengaruh dari *Fermi level pinning* dapat dihindari<sup>[14]</sup>. Lain halnya dengan tipe *side-contacted* dimana *Fermi level pinning* mendominasi yang dapat berakibat timbulnya elektron tunneling yang lebih dominan sehingga *Schottky barrier* dapat dilewati elektron.<sup>[7]</sup>



Gambar 2.14 (a)End-bonded contact (b)Side-contacted contact

Pada *end-bonded contact*, karakteristik dari *Schottky barrier* lebih dipengaruhi oleh pemilihan *workfunction* dari metal yang digunakan, tingkat doping CNT yang dibutuhkan dan afinitas elektron CNT itu sendiri.

## 2.5 CNTBANDS 2.0

CNTBANDS 2.0 merupakan sebuah simulator online yang disediakan oleh [www.nanohub.org](http://www.nanohub.org) untuk mendapatkan beberapa parameter dasar dari Carbon Nanotube (CNT) dan Carbon Nanoribbon (CNR). CNTBANDS 2.0 ini dibuat oleh Jing Guo dkk berdasarkan script oleh M.P. Anantram dari NASA Ames Research Center. CNTBANDS 2.0 adalah simulator berbasis MATLAB script dan membutuhkan Java SE Runtime Environment dalam penggunaannya<sup>[16]</sup>.

Untuk tampilan awal dari CNTBANDS 2.0 ini dapat dilihat pada Gambar 2.15 berikut :





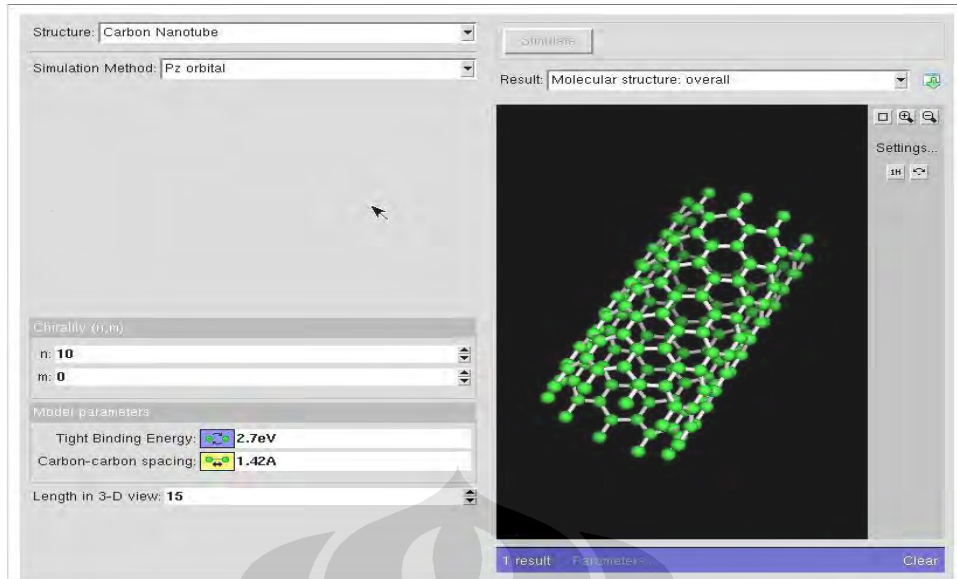
Gambar 2.15 Tampilan awal dari CNTBANDS 2.0<sup>[16]</sup>

Dari Gambar 2.15 dapat dilihat parameter-parameter input yang dimasukkan untuk melakukan simulasi. Yang pertama adalah *chirality* dari CNT berupa nilai dari  $n$  dan  $m$ . Kemudian yang kedua adalah besarnya *Tight Binding Energy* atau besar energi ikatan antar atom Carbon dalam CNT, dinyatakan dalam eV. Yang terakhir adalah *Carbon-carbon spacing* atau besar jarak antar atom Carbon dalam CNT yang dinyatakan dalam Å (angstrom).

Untuk hasil keluaran dari CNTBANDS 2.0 ini ditampilkan dalam bentuk gambar atau diagram, sebagai berikut :

### 2.5.1 Molecular Structure

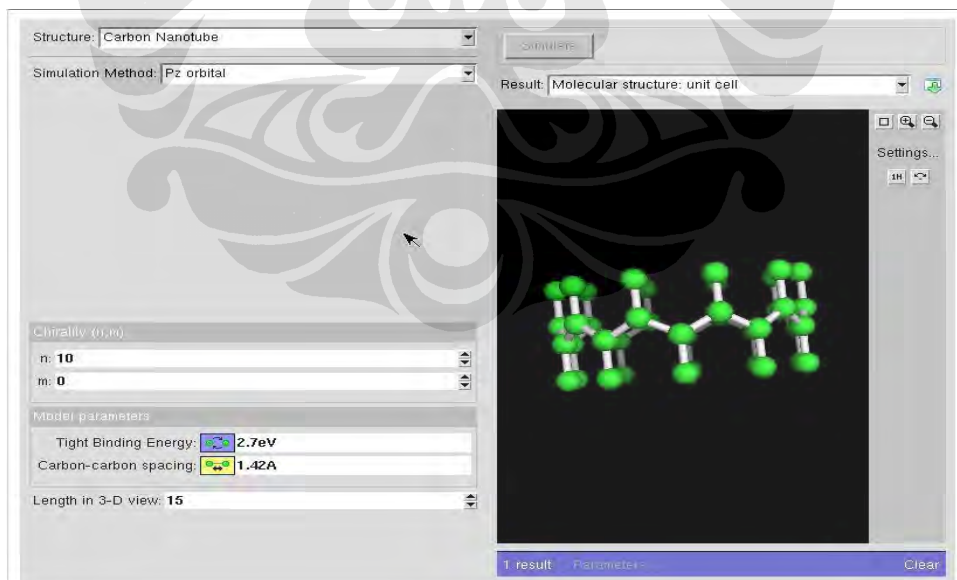
Yaitu bentuk dari CNT itu sendiri secara struktural, dari hasil keluaran ini dapat dilihat karakteristik dari suatu CNT tersebut apakah tergolong *zig-zag* CNT atau *armchair* CNT. Gambar 2.16 berikut menunjukkan contoh hasil keluaran dari CNTBANDS 2.0 untuk *molecular structure* :



Gambar 2.16 Output CNTBANDS 2.0 untuk *molecular structure*<sup>[16]</sup>

### 2.5.2 Molecular Structure Unit Cell

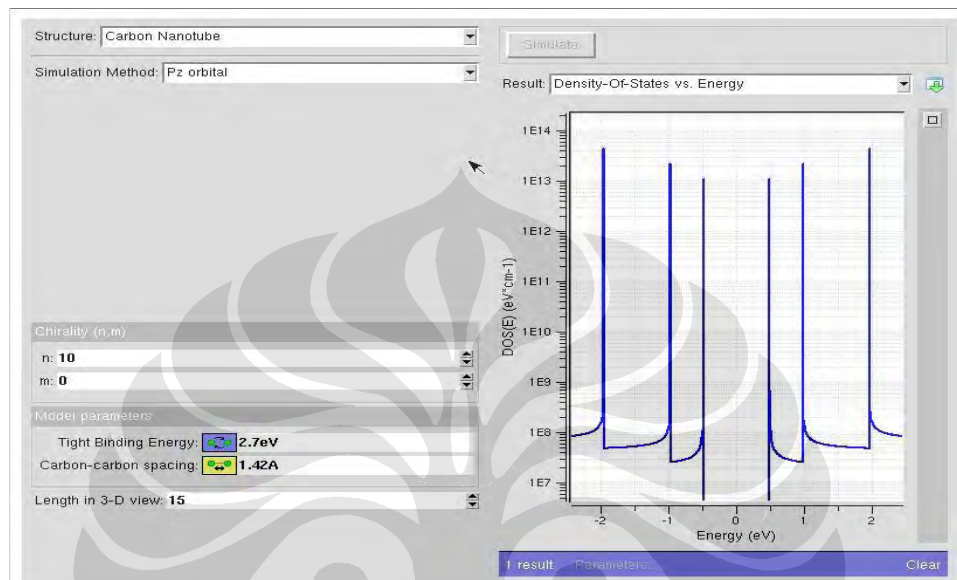
Untuk *output* ini menggambarkan struktur dari CNT per *unit cell*. Gambar 2.17 berikut menunjukkan contoh hasil keluaran CNTBANDS 2.0 untuk *molecular structure unit cell* :



Gambar 2.17 Output CNTBANDS 2.0 untuk *molecular structure unit cell*<sup>[16]</sup>

### 2.5.3 Density of States VS Energy

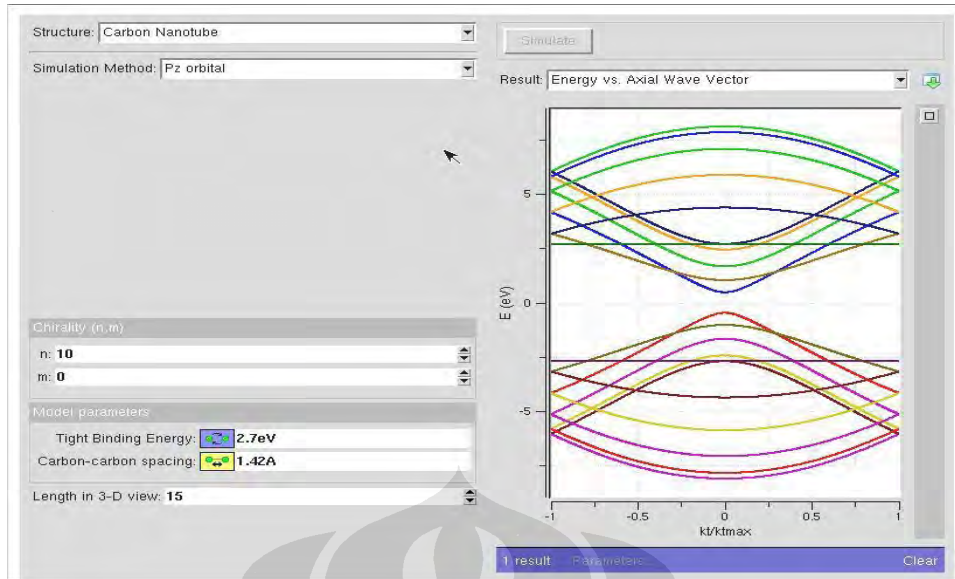
*Output* ini menunjukkan diagram dari *Density of States VS Energy*. Pada Gambar 2.18 berikut merupakan diagram dari CNT (10,0) yang merupakan *semiconducting* CNT. Dapat dilihat bahwa terdapat *zero Density of States* di sekitar *Fermi level* yang menunjukkan adanya *states* yang tidak dapat ditempati oleh elektron di level energi tersebut (*bandgap*).



Gambar 2.18 *Output* CNTBANDS 2.0 untuk *DOS vs Energy*<sup>[16]</sup>

#### 2.5.4 Energy VS Axial Wave Vector

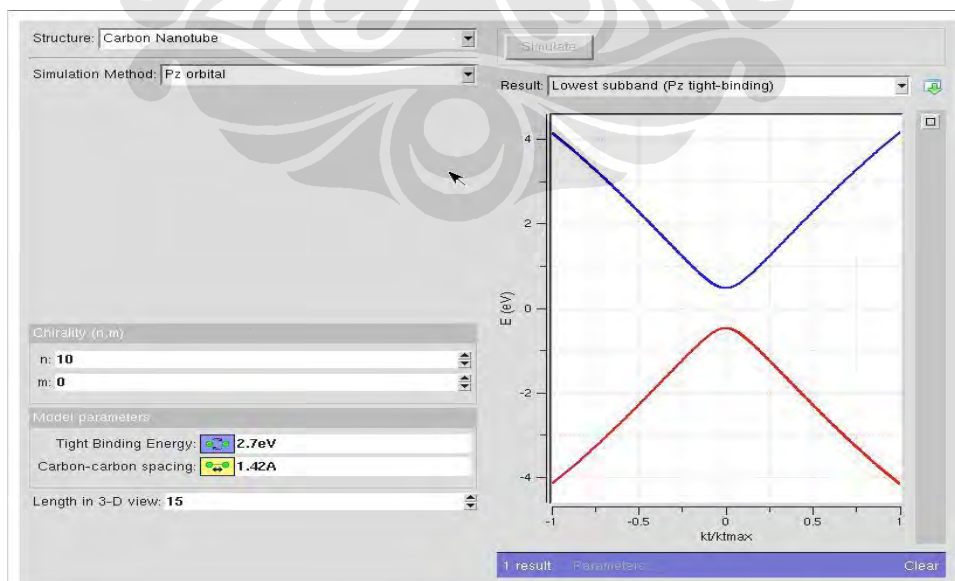
*Output* ini menunjukkan diagram dari *Energy VS Axial Wave Vector*. Dari hasil *output* ini dapat dilihat apakah suatu CNT bersifat *semiconducting* atau *metallic*, yang ditunjukkan oleh ada tidaknya perpotongan dari *energy band* terhadap *Fermi level*. Gambar 2.19 berikut menunjukkan diagram dari CNT (10,0) yang secara teoritis bersifat *semiconducting*. Dapat dilihat bahwa tidak ada satu pun dari *energy band* yang memotong *Fermi level* sehingga dapat disimpulkan bahwa CNT (10,0) memang bersifat *semiconducting*.



Gambar 2.19 Output CNTBANDS 2.0 untuk *Energy VS Axial Wave Vector*<sup>[16]</sup>

### 2.5.5 Lowest Subband

*Output* ini menunjukkan diagram *Lowest Subband* dari diagram *Energy VS Axial Wave Vector* sebelumnya. Diagram ini berguna untuk menentukan *Subband* terendah yang ada, terutama pada *semiconducting CNT* yang memiliki *energy band* yang banyak dan rumit. Gambar 2.20 berikut menunjukkan contoh *output* dari CNTBANDS 2.0 untuk diagram *Lowest Subband* :



Gambar 2.20 Output CNTBANDS 2.0 untuk *Lowest Subband*<sup>[16]</sup>

### 2.5.6 Output Log

*Output* ini menunjukkan informasi detail (*log*) dari simulasi yang telah dilakukan, mulai dari *input* yang dimasukkan hingga hasil *output* yang didapatkan berupa parameter-parameter dari CNT tersebut. Gambar 2.21 berikut menunjukkan contoh *Output Log* dari CNTBANDS 2.0 :

```
OutputLog - Notepad
File Edit Format View Help
*****
Basic Input Parameters
*****
Nanotube parameters (n,m)
1,0
Carbon center to center distance (A)
1.4200
Tight binding overlap integral (eV)
2.7000
*****
Basic Output Parameters
*****
Nanotube diameter (nm)
0.78289
Nanotube circumference (nm)
1.0
Chiral angle (degrees)
0
Length of unit cell (nm)
0.42600
Number of hexagons (unit cell)
20
DOS Energy Range (eV) [-x : x]
2.4400
Boundary of Brillouin Zone (ktmax)
7.3746e+09
Bandgap Magnitude (eV)
0.04808
Bandgap Magnitude in units of overlap parameter (t)
0.35114
kt at bandgap
-1.8185e-17
```

Gambar 2.21 *Output* CNTBANDS 2.0 untuk *Output Log*<sup>[16]</sup>

## BAB 3

# SIMULASI PARAMETER *CARBON NANOTUBE* DAN PERHITUNGAN

### 3.1 RANCANG BANGUN DIODA SCHOTTKY DENGAN MATERIAL CNT

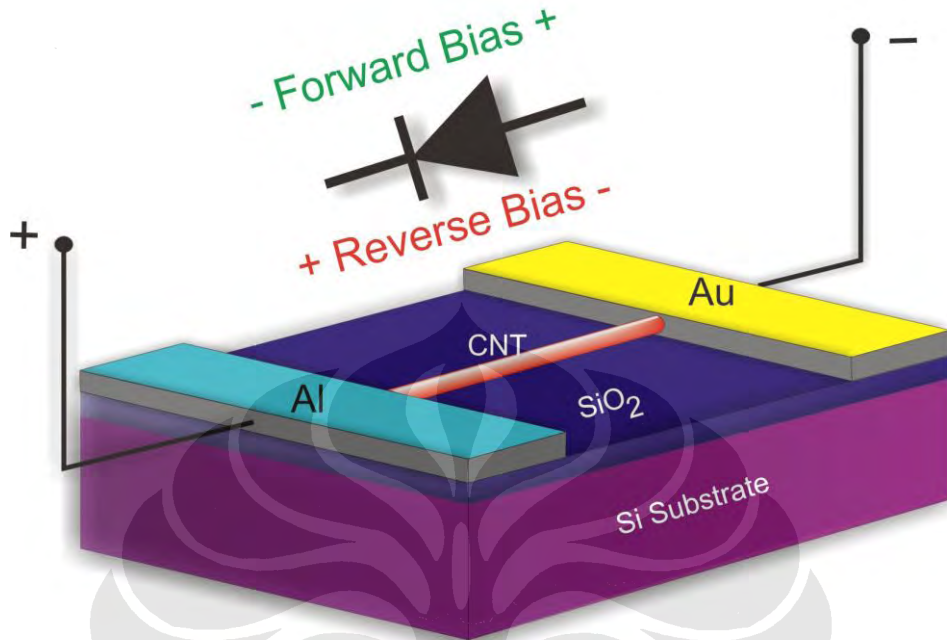
Perancangan dioda *Schottky* dengan menggunakan material *Carbon Nanotube* (CNT) menitikberatkan pada menggantikan semikonduktor silikon dengan CNT pada divais tersebut. Pada dioda *Schottky* silikon, karakteristik *Schottky* barrier timbul dari *junction* antara *n-type* silikon dengan metal yang memiliki *workfunction* lebih tinggi dari Silikon, atau antara *p-type* silikon dengan metal yang memiliki *workfunction* yang lebih rendah dari silikon.

CNT yang digunakan dalam perancangan ini dipilih *p-type*. Pemilihan *p-type* CNT ini didasarkan pada kemudahan pembuatannya dimana CNT intrinsik (i-CNT) akan berubah menjadi *p-type* CNT ketika diekspos ke udara bebas<sup>[17]</sup>. Sifat *p-type* ini timbul karena adsorpsi atom-atom oksigen ke dalam CNT. Dari *band diagram* juga dapat dilihat bahwa *p-type* CNT ini memiliki *Fermi level* yang mendekati *valence band* dibandingkan *conduction band*.

*Schottky barrier* akan terbentuk pada kontak CNT dengan metal apabila jenis metal yang digunakan merupakan metal yang memiliki *workfunction* lebih rendah dibandingkan dengan *workfunction p-type* CNT. CNT memiliki *workfunction* sekitar 4,5 eV<sup>[15]</sup> sehingga dibutuhkan metal dengan *workfunction* di bawah nilai tersebut. Metal yang dipilih adalah alumunium yang memiliki *workfunction* 4,25 eV. Kemudian untuk *contact* CNT dengan dunia luar tentunya dibutuhkan karakteristik *Ohmic contact* yang dapat terjadi bila digunakan metal yang memiliki *workfunction* lebih tinggi dari *workfunction* CNT. Untuk itu dipilih Au sebagai metal *contact* CNT ke dunia luar yang memiliki *workfunction* sebesar 4,8 eV.

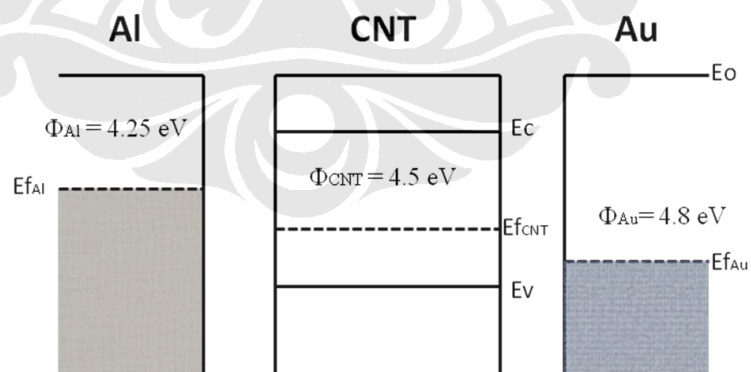


Gambar 3.1 berikut menunjukkan desain perancangan *Schottky* diode dengan menggunakan CNT sebagai semikonduktor :



Gambar 3.1 Desain perancangan diode *Schottky* dengan menggunakan CNT

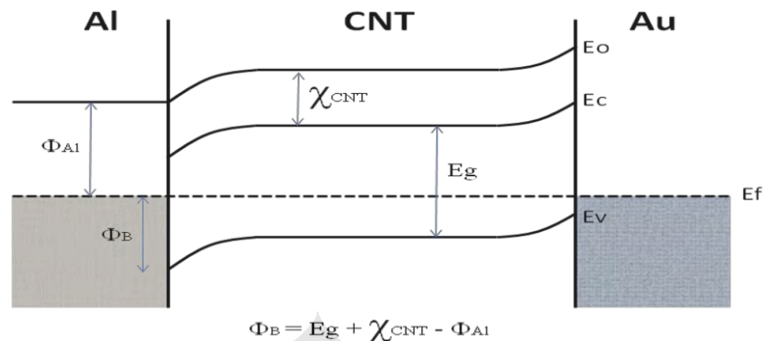
Pada Gambar 3.2, dapat dilihat kondisi *band diagram* dari ketiga material sebelum digabungkan.



Gambar 3.2 *Band diagram* Al-CNT-Au sebelum digabungkan

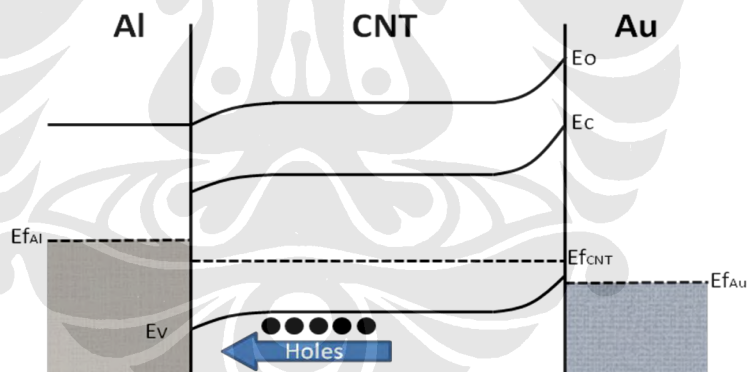
Dapat dilihat pada Gambar 3.3, pada kondisi *equilibrium*, *bending* yang terjadi antara Al dengan CNT merupakan karakteristik dari *Schottky barrier* pada *p-type semiconductor* (*bending* ke bawah) sedangkan *bending* yang terjadi antara

CNT dengan Au merupakan karakteristik dari *Ohmic contact* pada *p-type semiconductor* (*bending ke atas*).



Gambar 3.3 *Band diagram* Al-CNT-Au kondisi *equilibrium*

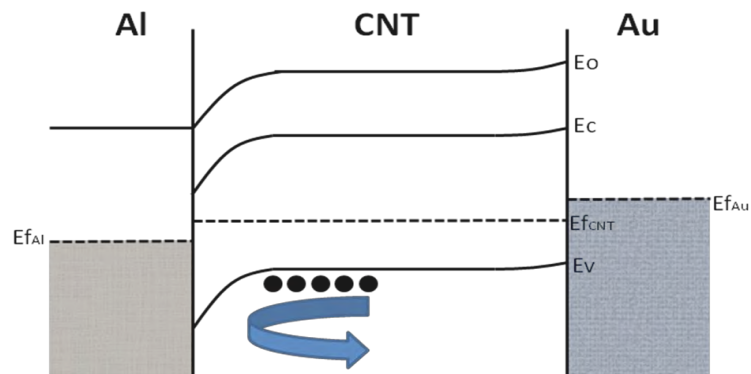
Pada kondisi *forward bias* (tegangan CNT lebih positif dari tegangan Al), maka *band diagram* menjadi seperti pada Gambar 3.4. Pada kondisi ini, *majority carriers* (*holes*) dapat melewati *junction* antara Al dengan CNT, begitu juga dengan *junction* antara CNT dengan Au.



Gambar 3.4 *Band diagram* Al-CNT-Au kondisi *forward bias*

Pada kondisi *reverse bias* (tegangan CNT lebih negatif dari tegangan Al), maka *band diagram* menjadi seperti pada Gambar 3.5. Pada kondisi ini, *majority carriers* (*hole*) akan terhalang oleh tingginya *Schottky barrier* yang terbentuk pada *junction* antara Al dengan CNT sehingga *hole* tidak dapat mengalir. Sedangkan pada *junction* antara CNT dengan Au tetap menunjukkan karakteristik dari *ohmic contact*.





Gambar 3.5 Band diagram Al-CNT-Au kondisi reverse bias

### 3.2 SIMULASI PARAMETER CNT DENGAN CNTBANDS 2.0

Parameter-parameter yang dibutuhkan dalam merancang Dioda Schottky dengan *Carbon Nanotube* (CNT) yang memiliki karakteristik yang tepat dapat diperoleh dengan melakukan simulasi menggunakan CNTBANDS 2.0. Seperti telah dijelaskan dalam Bab 2, CNTBANDS 2.0 merupakan software untuk melakukan simulasi mengenai karakteristik dari sebuah CNT, terutama dilihat dari segi *chirality* yang dimiliki oleh CNT tersebut.

Dalam perancangan di SubBab 3.1, CNT yang digunakan adalah *semiconducting* CNT dimana secara teoritis *semiconducting* CNT adalah CNT yang memiliki *chirality* dimana nilai  $n \neq m$  dan  $n-m \neq 3I$  dimana  $I$  adalah bilangan bulat.<sup>[14]</sup>

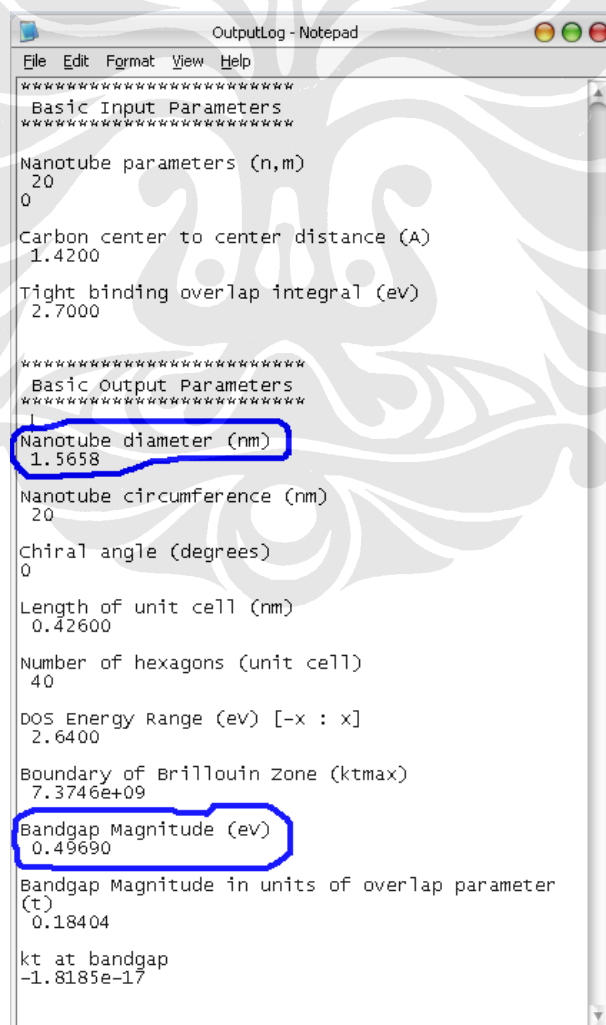
#### 3.2.1 Parameter Input

Dalam simulasi ini *input* yang dimasukkan berupa nilai  $m$  yang selalu bernilai 0 dan nilai  $n$  yang bervariasi mulai dari CNT (4,0) hingga CNT (32,0). Hal ini dikarenakan CNT yang akan digunakan dalam desain adalah *semiconducting* CNT. Untuk CNT dengan *chirality* yang memiliki nilai  $n$  berkelipatan 3 tidak dimasukkan ke dalam program simulasi karena CNT jenis ini adalah *metallic* CNT, sebagai contoh CNT (9,0), CNT (12,0) dan seterusnya. Parameter input yang dimasukkan dibatasi hingga hanya untuk CNT dengan diameter  $\sim 2.5$  nm, atau CNT yang memiliki *chirality* sebesar (32,0).

Untuk parameter *tight binding energy*, nilai energi ikatan antar atom karbon pada CNT adalah konstanta sebesar 2.7 eV<sup>[14]</sup>. Begitu juga dengan parameter jarak antara setiap atom karbon (*carbon-carbon spacing*), besarnya adalah 0.142 nm.<sup>[14]</sup>

### 3.2.2 Parameter Output

Parameter-parameter hasil keluaran dari CNTBANDS 2.0 secara lebih mendetail dapat dilihat pada bagian Subbab 2.4 mengenai CNTBANDS 2.0, namun pada penelitian ini hasil keluaran yang digunakan sebagai referensi dasar dalam menentukan parameter dari CNT adalah pada parameter Output Log. Gambar 3.6 berikut menunjukkan contoh dari Output Log dari satu sesi simulasi untuk CNT (20,0) :



```
OutputLog - Notepad
File Edit Format View Help
*****
Basic Input Parameters
*****
Nanotube parameters (n,m)
20
0
Carbon center to center distance (A)
1.4200
Tight binding overlap integral (ev)
2.7000
*****
Basic Output Parameters
*****
Nanotube diameter (nm)
1.5658
Nanotube circumference (nm)
20
Chiral angle (degrees)
0
Length of unit cell (nm)
0.42600
Number of hexagons (unit cell)
40
DOS Energy Range (ev) [-x : x]
2.6400
Boundary of Brillouin Zone (ktmax)
7.3746e+09
Bandgap Magnitude (ev)
0.49690
Bandgap Magnitude in units of overlap parameter
(t)
0.18404
kt at bandgap
-1.8185e-17
```

Gambar 3.6 Output Log CNTBANDS 2.0 untuk CNT (20,0)

Dari sejumlah parameter yang berhasil didapatkan dari sesi simulasi di dalam Output Log, terdapat dua parameter yang digunakan sebagai bahan referensi dalam penelitian ini yaitu parameter diameter dari CNT dan besarnya *bandgap* dari CNT tersebut.

### 3.2.3 Hasil Simulasi

Setelah melakukan simulasi terhadap 20 jenis chirality CNT, kemudian data hasil simulasi diolah dengan menggunakan Microsoft Excel 2003 untuk mendapatkan gambaran karakteristik dari masing-masing CNT secara keseluruhan dalam sebuah tabel. Tabel 3.1 berikut merupakan hasil data simulasi yang dilakukan dengan CNTBANDS 2.0 :

Tabel 3.1 Tabel Data Hasil Simulasi CNTBANDS 2.0

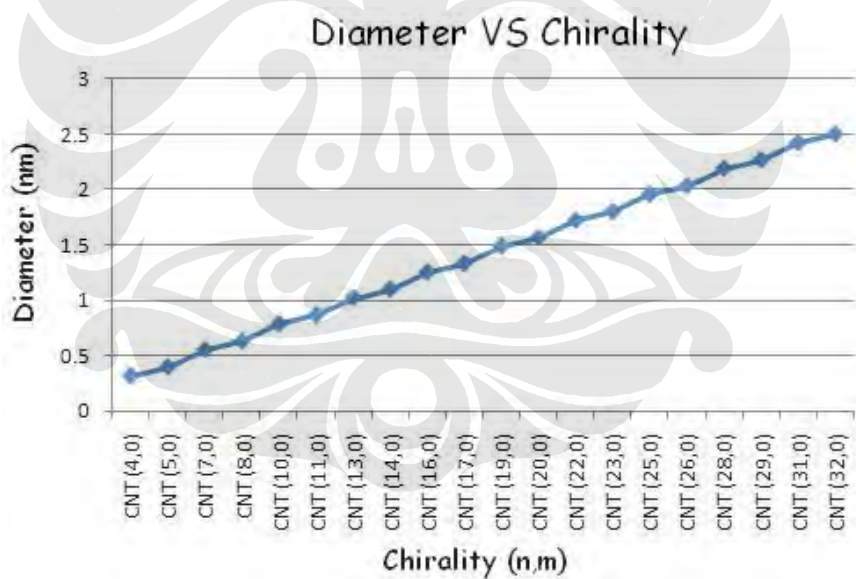
Chirality (n,m)	Diameter (nm)	Circumference (nm)	Unit Cell	Bandgap (eV)
CNT (4,0)	0.31315	4	8	2.2368
CNT (5,0)	0.39144	5	10	2.0626
CNT (7,0)	0.54802	7	14	1.3337
CNT (8,0)	0.62631	8	16	1.267
CNT (10,0)	0.78289	10	20	0.94808
CNT (11,0)	0.86118	11	22	0.91352
CNT (13,0)	1.0178	13	26	0.7351
CNT (14,0)	1.096	14	28	0.7146
CNT (16,0)	1.2526	16	32	0.60016
CNT (17,0)	1.3309	17	34	0.58603
CNT (19,0)	1.4875	19	38	0.50704
CNT (20,0)	1.5658	20	40	0.4969
CNT (22,0)	1.7224	22	44	0.43892
CNT (23,0)	1.8006	23	46	0.4313
CNT (25,0)	1.9572	25	50	0.38693
CNT (26,0)	2.0355	26	52	0.38099
CNT (28,0)	2.1921	28	56	0.34595
CNT (29,0)	2.2704	29	58	0.34119
CNT (31,0)	2.4269	31	62	0.31281
CNT (32,0)	2.5052	32	64	0.30892

Parameter diameter adalah besarnya diameter dari tabung CNT yang terbentuk dengan chirality tertentu, dinyatakan dalam nanometer ( $10^{-9}$  m). Parameter *circumference* adalah besarnya keliling dari tabung CNT, dinyatakan dalam nanometer ( $10^{-9}$  m). Kemudian untuk parameter *unit cell* adalah jumlah

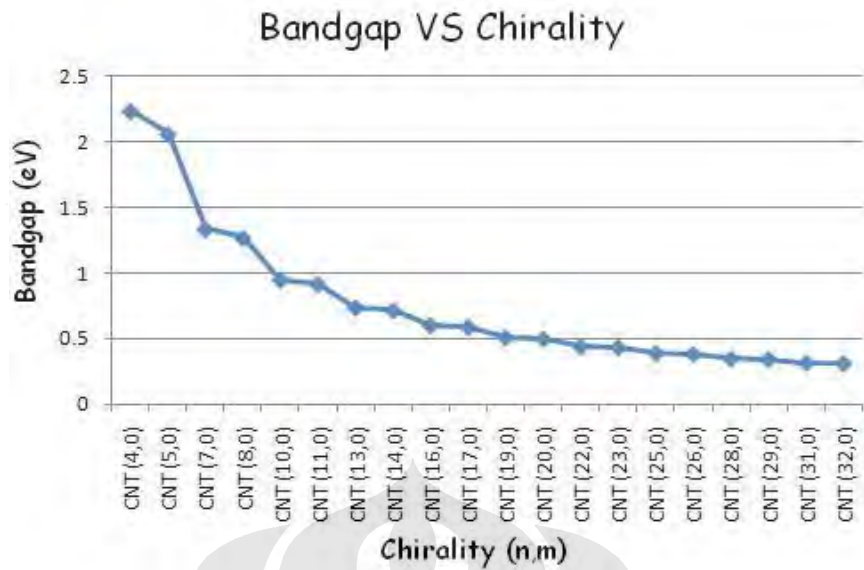
heksagon yang terbentuk sepanjang keliling dari *unit cell* sebuah CNT. Selanjutnya adalah parameter *bandgap* yang merupakan besarnya *bandgap* yang dimiliki oleh sebuah CNT dengan *chirality* tertentu, dinyatakan dalam elektron volt (eV). Khusus untuk CNT dengan *chirality* (4,0) dan (5,0) ternyata memiliki karakteristik elektrik yang berbeda dibandingkan dengan zig-zag CNT lainnya yang disimulasikan. Untuk CNT dengan *chirality* tersebut ternyata memiliki sifat *metallic* (*non-semiconducting*), sifat *metallic* ini timbul disebabkan oleh hibridisasi  $\sigma^*-\pi^*$ . [18]

### 3.3 HUBUNGAN DIAMETER, *BANDGAP* DAN *CHIRALITY*

Dari Tabel 3.1, dapat dilihat hubungan antara *chirality* CNT yang disimulasikan dengan besarnya diameter CNT dan besarnya *bandgap* CNT. Hubungan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7 dan Gambar 3.8 berikut:

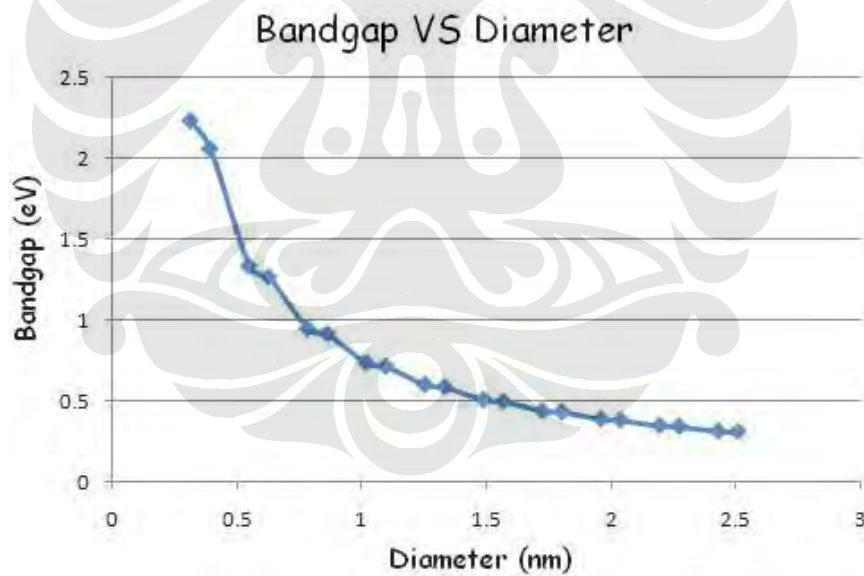


Gambar 3.7 Grafik *Chirality VS Diameter*



Gambar 3.8 Grafik *Bandgap VS Chirality*

Selanjutnya hubungan antara diameter dengan *bandgap* dari CNT hasil simulasi ditunjukkan oleh Gambar 3.9 berikut :



Gambar 3.9 Grafik *Bandgap VS Diameter*

Dari Gambar 3.9 dapat dilihat bahwa hubungan antara parameter *bandgap* dari CNT dengan besar diameter yang dimiliki adalah berbanding terbalik. Hal ini berarti semakin besar diameter dari sebuah *semiconducting* CNT maka besarnya *bandgap* yang dimiliki oleh CNT tersebut akan semakin kecil.

### 3.4 AFINITAS ELEKTRON CNT

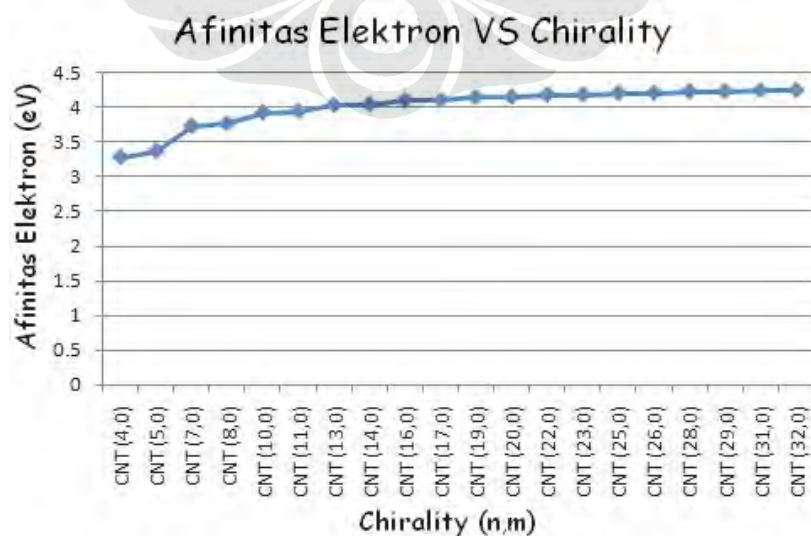
Afinitas elektron adalah besarnya energi yang dibutuhkan oleh suatu atom atau molekul untuk melepaskan sebuah elektron<sup>[19]</sup>, dilambangkan dengan  $\chi$ . Pada CNT, parameter afinitas elektron ini tergantung kepada *tube index (chirality)* dimana besar dari afinitas elektron CNT dirumuskan sebagai besarnya nilai afinitas elektron dari *graphite* (4.4 eV) dikurangi setengah dari nilai *bandgap* CNT yang dimaksud<sup>[20]</sup>. Persamaan 3.1 berikut menunjukkan persamaan untuk perhitungan afinitas elektron CNT:

$$\chi_{CNT} = \chi_{graphite} - \left( \frac{E_{g_{CNT}}}{2} \right) \quad (3.1)$$

dimana:

- $\chi_{CNT}$  = afinitas elektron CNT (eV)
- $\chi_{graphite}$  = afinitas elektron *graphite* (4.4 eV)
- $E_{g_{CNT}}$  = bandgap CNT (eV)

Dari Persamaan 3.1 dapat dilihat bahwa besarnya afinitas elektron CNT tergantung kepada besarnya *bandgap* CNT, yang secara langsung dipengaruhi oleh diameter dari CNT dan juga *tube index* CNT tersebut. Gambar 3.10 berikut menunjukkan grafik hubungan antara *chirality* CNT dengan besar afinitas elektron yang dimiliki oleh CNT tersebut:

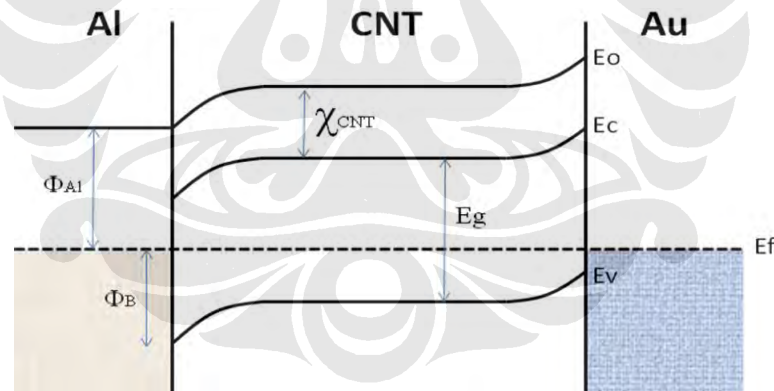


Gambar 3.10 Grafik *Afinitas Elektron VS Chirality*

Dari Gambar 3.10 dapat dilihat bahwa hubungan antara besarnya nilai afinitas elektron CNT dengan *chirality* yang dimiliki adalah sebanding. Hal ini disebabkan semakin besar nilai  $n$  pada *tube index* (*chirality*), maka diameter CNT tersebut akan semakin besar yang mengakibatkan nilai *bandgap* dari CNT akan semakin kecil (hubungan antara diameter CNT dengan *bandgap* CNT adalah berbanding terbalik), sehingga dari Persamaan 3.1 dapat dimengerti bahwa nilai afinitas elektron CNT akan semakin besar.

### 3.5 HUBUNGAN TINGGI SCHOTTKY BARRIER DENGAN CHIRALITY

*Schottky barrier* yang terbentuk pada persambungan antara metal dengan CNT memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung dari *tube index* (*chirality*) dan diameter dari CNT tersebut. Karakteristik yang dimaksud adalah besarnya tinggi barrier yang terbentuk, dimana dalam penelitian ini digunakan metal Aluminium yang memiliki *workfunction* sebesar 4.25 eV<sup>[2]</sup>. Gambar 3.11 berikut menunjukkan *band diagram* untuk persambungan antara metal Aluminium dengan CNT:



Gambar 3.11 *Band Diagram* Al-CNT-Au dalam kondisi equilibrium

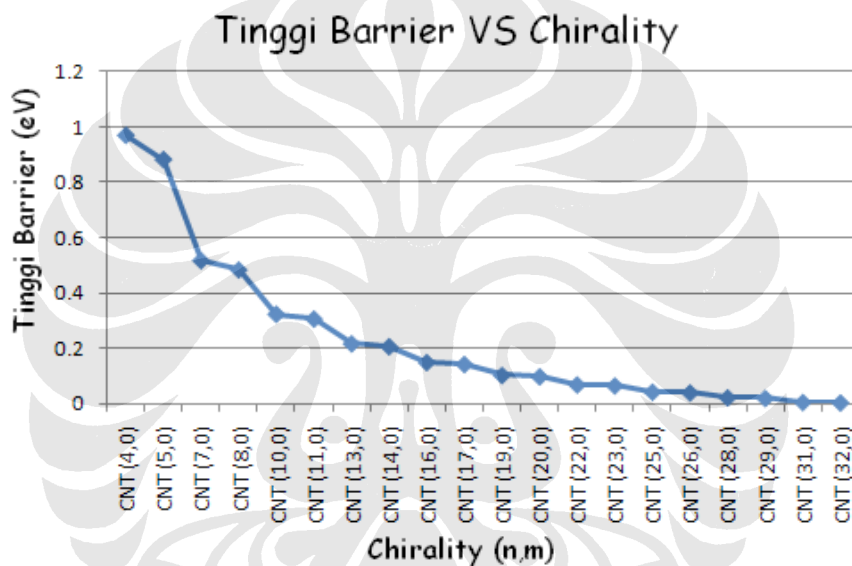
Dari Gambar 3.11 dapat dirumuskan besarnya tinggi *barrier* ( $\Phi_B$ ) yang terbentuk antara Aluminium dengan CNT adalah sebesar nilai *workfunction* Aluminium dikurangi afinitas elektron CNT. Persamaan 3.2 berikut menunjukkan perhitungan untuk besarnya tinggi *barrier* ( $\Phi_B$ ) yang terbentuk pada persambungan antara Aluminium dengan CNT:

$$\phi_B = \phi_{Al} - \chi_{CNT} \quad (3.2)$$



dimana:  $\Phi_B$  = tinggi barrier (eV)  
 $\Phi_{Al}$  = workfunction Aluminium (4.25 eV)  
 $\chi_{CNT}$  = afinitas elektron CNT (eV)

Dari hasil simulasi dan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan nilai afinitas elektron CNT sehingga perhitungan untuk tinggi *barrier* ( $\Phi_B$ ) pun dapat dilakukan. Gambar 3.12 berikut menunjukkan grafik hubungan antara *chirality* CNT yang disimulasikan dengan besarnya tinggi *barrier* ( $\Phi_B$ ) yang terbentuk pada persambungan antara Aluminium dengan CNT:



Gambar 3.12 Grafik *Tinggi Barrier VS Chirality*

Dari Gambar 3.12 dapat dilihat bahwa hubungan antara besarnya tinggi *barrier* ( $\Phi_B$ ) dengan *chirality* adalah berbanding terbalik. Hal ini disebabkan semakin besar nilai  $n$  pada *tube index* (*chirality*) maka besar afinitas elektron CNT juga akan semakin besar, dimana berdasarkan Persamaan 3.2 maka hal ini akan membuat tinggi *barrier* ( $\Phi_B$ ) yang terbentuk pada persambungan antara Aluminium dengan CNT akan semakin kecil.

### 3.6 KAPASITANSI CNT

Seperti yang telah dibahas pada SubBab 2.2 mengenai dioda Schottky, bahwa pada persambungan antara semikonduktor dengan metal (Aluminium)



akan timbul kapasitansi yang disebut *junction capacitance*. Besar *junction capacitance* ini dirumuskan sebagai berikut<sup>[2]</sup>:

$$C_J = \frac{\epsilon_s \cdot A}{W} \quad (3.3)$$

dimana :  $C_J$  = kapasitansi persambungan (Farad)  
 $\epsilon_s$  = permitivitas semikonduktor (F/m)  
 $A$  = luas permukaan persambungan (m<sup>2</sup>)  
 $W$  = lebar dari Schottky barrier (m)

Berdasarkan Persamaan 3.3, besar kapasitansi yang terbentuk tergantung kepada nilai permitivitas dari CNT ( $\epsilon_s$ ), lebar Schottky barrier yang terbentuk ( $W$ ) dan luas permukaan dari persambungan antara CNT dengan Aluminium ( $A$ ). Dari studi yang telah dilakukan oleh Manohara *dkk*<sup>[21]</sup>, telah didapatkan parameter permitivitas CNT ( $\epsilon_s$ ) dan lebar Schottky barrier ( $W$ ) yang terbentuk untuk aplikasi dioda Schottky. Untuk nilai  $\epsilon_s$  adalah sebesar  $7.039 \times 10^{-11}$  F/m dan nilai  $W$  adalah sebesar  $5.9 \times 10^{-12}$  m. Nilai  $W$  yang digunakan dalam perhitungan ini adalah nilai  $W$  tersebut dengan asumsi CNT yang digunakan dalam penelitian ini memiliki konsentrasi doping yang sama dengan CNT yang digunakan oleh Manohara *dkk*<sup>[21]</sup> karena lebar dari Schottky barrier yang terbentuk pada persambungan tergantung kepada konsentrasi doping CNT yang digunakan.

Dengan asumsi tersebut, maka besar kapasitansi yang terbentuk pada persambungan tergantung kepada luas permukaan persambungan ( $A$ ), dimana dalam hal ini adalah luas permukaan dari diameter CNT. Besar luas permukaan CNT dirumuskan sebagai berikut:

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (3.4)$$

dimana:  $A$  = luas permukaan persambungan (m<sup>2</sup>)  
 $d$  = diameter CNT (m)

Seperti yang telah dibahas di SubBab 2.2.5 mengenai *quantum capacitance* maka pengaruh *quantum capacitance* yang terdapat pada CNT juga turut dimasukkan ke dalam perhitungan, dimana besar dari *quantum capacitance* ( $C_Q$ ) adalah 400 aF untuk setiap 1 mikrometer panjang CNT<sup>[14]</sup>. Dengan mengasumsikan CNT yang digunakan memiliki panjang yang sama dengan CNT yang digunakan oleh Manohara *dkk*<sup>[21]</sup> yaitu 2.5 mikrometer maka besar total  $C_Q$  adalah 1 pF.

Besar kapasitansi total ( $C_T$ ) CNT adalah total besarnya *junction capacitance* ( $C_J$ ) dengan besarnya *quantum capacitance* ( $C_Q$ ) yang terhubung secara seri, dirumuskan sebagai berikut:

$$C_T = \frac{C_J C_Q}{C_J + C_Q} \quad (3.5)$$

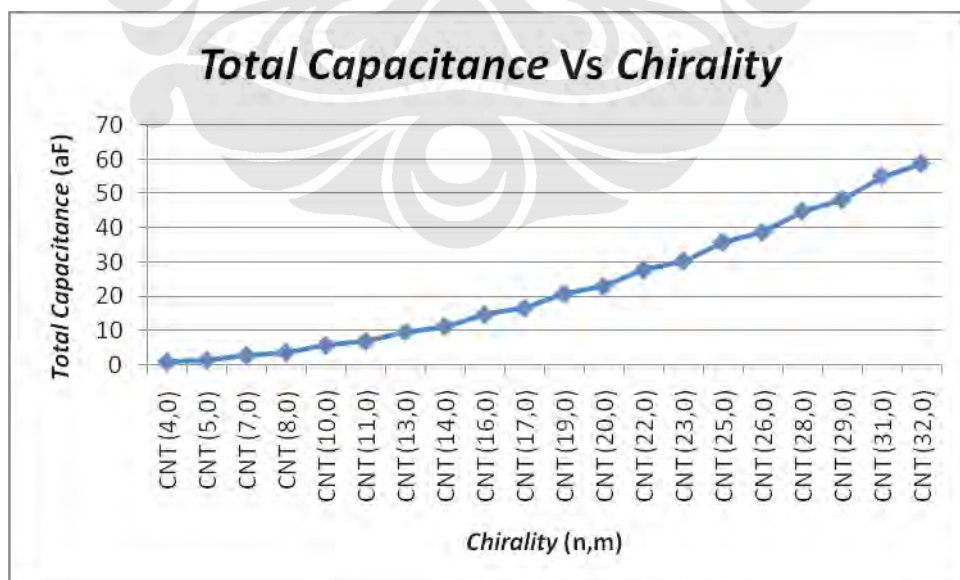
dimana :  $C_T$  = kapasitansi total  
 $C_J$  = kapasitansi persambungan  
 $C_Q$  = *quantum capacitance*

sehingga berdasarkan Persamaan 3.3, Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5 untuk CNT dengan panjang 2.5  $\mu\text{m}$ , maka dapat dibuat tabel seperti di bawah ini:

Tabel 3.2 Tabel Hasil Perhitungan Kapasitansi

Chirality (n,m)	Diameter (nm)	Total Capacitance (aF)
CNT (4,0)	0.31315	0.918402471
CNT (5,0)	0.39144	1.435021449
CNT (7,0)	0.54802	2.812679226
CNT (8,0)	0.62631	3.673717074
CNT (10,0)	0.78289	5.740207726
CNT (11,0)	0.86118	6.945659107
CNT (13,0)	1.0178	9.701732367
CNT (14,0)	1.096	11.24980081
CNT (16,0)	1.2526	14.69423711
CNT (17,0)	1.3309	16.58869629
CNT (19,0)	1.4875	20.72209019
CNT (20,0)	1.5658	22.96102206
CNT (22,0)	1.7224	27.78334793
CNT (23,0)	1.8006	30.36336603
CNT (25,0)	1.9572	35.87430071
CNT (26,0)	2.0355	38.80198754
CNT (28,0)	2.1921	45.00179013
CNT (29,0)	2.2704	48.27390161
CNT (31,0)	2.4269	55.15798827
CNT (32,0)	2.5052	58.77435749

Dari Tabel 3.2 dapat dibuat grafik hubungan *chirality* CNT dengan *total capacitance* sebagai berikut:



Gambar 3.13 Grafik *Total Capacitance Vs Chirality*

Dari Gambar 3.13 dapat dilihat bahwa hubungan antara *capacitance* dengan *chirality* CNT adalah sebanding, ditandai dengan semakin besarnya *capacitance* yang terjadi seiring dengan semakin besarnya diameter CNT (*chirality*).

### 3.7 FREKUENSI *CUT-OFF*

Untuk mengukur performa dari sebuah divais berkecepatan tinggi seperti dioda Schottky dapat menggunakan parameter frekuensi *cut-off* seperti telah dibahas pada SubBab 2.2 mengenai dioda Schottky. Namun pada perhitungan frekuensi *cut-off* untuk dioda Schottky yang menggunakan CNT sebagai material dasar, parameter kapasitansi yang digunakan adalah kapasitansi total, dengan memasukkan parameter *quantum capacitance* ke dalam perhitungan. Besar frekuensi *cut-off* ini dirumuskan sebagai berikut <sup>[11]</sup>:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC_T} \quad (3.6)$$

dimana:

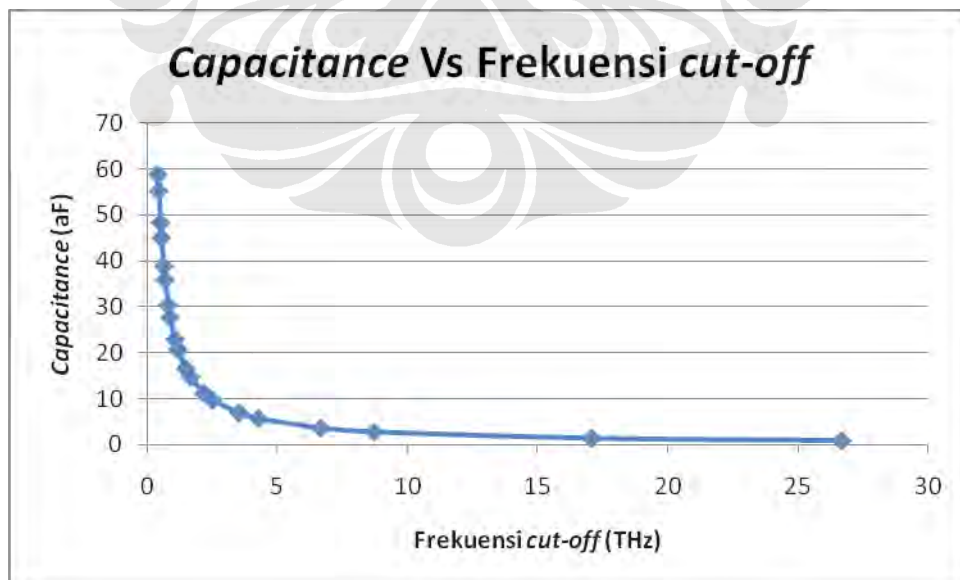
- $f_c$  = frekuensi *cut-off* (Hz)
- $R$  = resistansi (Ohm)
- $C_T$  = kapasitansi total (F)

Untuk CNT yang memiliki karakteristik *ballistic transport*, resistansi ini didefinisikan sebesar  $\hbar/4e^2$  atau sebesar  $6.5 \text{ k}\Omega$ <sup>[14]</sup>. Dengan menggunakan parameter kapasitansi total ( $C_T$ ) yang telah dihitung sebelumnya di SubBab 3.6 untuk Persamaan 3.6, maka besarnya frekuensi *cut-off* untuk setiap *chirality* CNT dapat dihitung dan dimasukkan ke dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 3.3 Tabel Hasil Perhitungan frekuensi *cut-off*

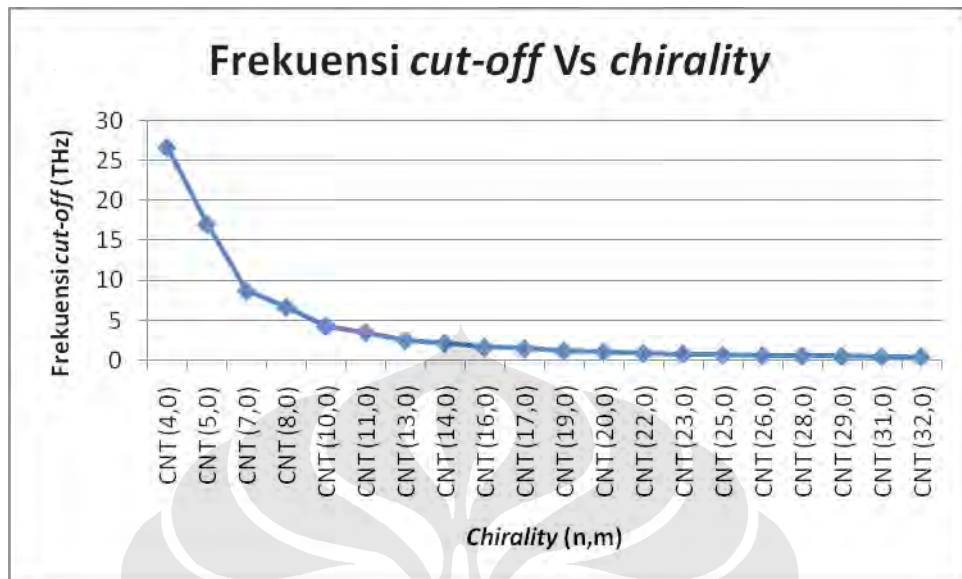
Chirality (n,m)	Total Capacitance (aF)	Frekuensi <i>cut-off</i> (THz)
CNT (4,0)	0.918402471	26.67675749
CNT (5,0)	1.435021449	17.07291554
CNT (7,0)	2.812679226	8.710556034
CNT (8,0)	3.673717074	6.668994783
CNT (10,0)	5.740207726	4.268138222
CNT (11,0)	6.945659107	3.527383021
CNT (13,0)	9.701732367	2.525322187
CNT (14,0)	11.24980081	2.177816338
CNT (16,0)	14.69423711	1.667320312
CNT (17,0)	16.58869629	1.476909311
CNT (19,0)	20.72209019	1.182313163
CNT (20,0)	22.96102206	1.067025672
CNT (22,0)	27.78334793	0.881823172
CNT (23,0)	30.36336603	0.806893411
CNT (25,0)	35.87430071	0.682940141
CNT (26,0)	38.80198754	0.631410955
CNT (28,0)	45.00179013	0.544422787
CNT (29,0)	48.27390161	0.50752061
CNT (31,0)	55.15798827	0.444178636
CNT (32,0)	58.77435749	0.416848453

Dari Tabel 3.3 dapat dibuat grafik hubungan antara frekuensi *cut-off* yang dimiliki oleh dioda Schottky dengan kapasitansi total yang dimiliki, sebagai berikut:



Gambar 3.14 Grafik *Capacitance* VS Frekuensi *cut-off*

Kemudian hubungan antara besarnya frekuensi *cut-off* dengan *chirality* CNT yang digunakan digambarkan dalam Gambar 3.15 berikut:



Gambar 3.15 Grafik Frekuensi *cut-off* Vs Chirality

## BAB 4

### ANALISIS HASIL SIMULASI

Setelah mendapatkan parameter-parameter Carbon Nanotube (CNT) dengan menggunakan CNTBANDS 2.0, untuk kemudian dilakukan perhitungan berdasarkan parameter-parameter tersebut, maka langkah selanjutnya adalah menganalisis hasil perhitungan yang telah dilakukan dalam rangka menentukan CNT yang cocok untuk digunakan sebagai bahan dasar pembuatan dioda Schottky dilihat dari segi *chirality* dan diameter CNT tersebut.

#### 4.1 HUBUNGAN CHIRALITY DENGAN KAPASITANSI DAN KECEPATAN OPERASI DIODA SCHOTTKY CNT

Salah satu fitur penting dari dioda Schottky adalah kecepatan operasinya yang tergolong cukup tinggi bila dibandingkan dengan dioda *pn*. Kecepatan operasi yang tinggi ini dapat dicapai karena dalam pengoperasiannya, pada dioda Schottky tidak melibatkan proses rekombinasi antara elektron dan *hole* yang cukup lambat, seperti halnya yang terjadi pada dioda *pn*. Pada dioda Schottky, hanya *majority carriers* (elektron atau *holes*) saja yang terlibat dalam mode operasinya.

Namun, pada kenyataannya kecepatan dari dioda Schottky ini masih dibatasi oleh faktor *parasitic capacitance* yang timbul dari persambungan antara metal dan semikonduktor yang digunakan. *Parasitic capacitance* ini disebut juga *junction capacitance* karena terletak pada persambungan (*junction*) antara metal dan semikonduktor. Khusus untuk dioda Schottky dengan material CNT sebagai semikonduktor juga terdapat apa yang disebut sebagai *quantum capacitance*. *Quantum capacitance* ini timbul akibat karakteristik dari CNT sebagai 1-D material yang hanya membolehkan elektron bergerak dalam satu dimensi saja.

Pada SubBab 3.6 telah dilakukan perhitungan kapasitansi total untuk setiap CNT dengan *chirality* tertentu yang telah disimulasikan sebelumnya dengan menggunakan CNTBANDS 2.0. Sebagai hasilnya adalah semakin kecil *chirality*

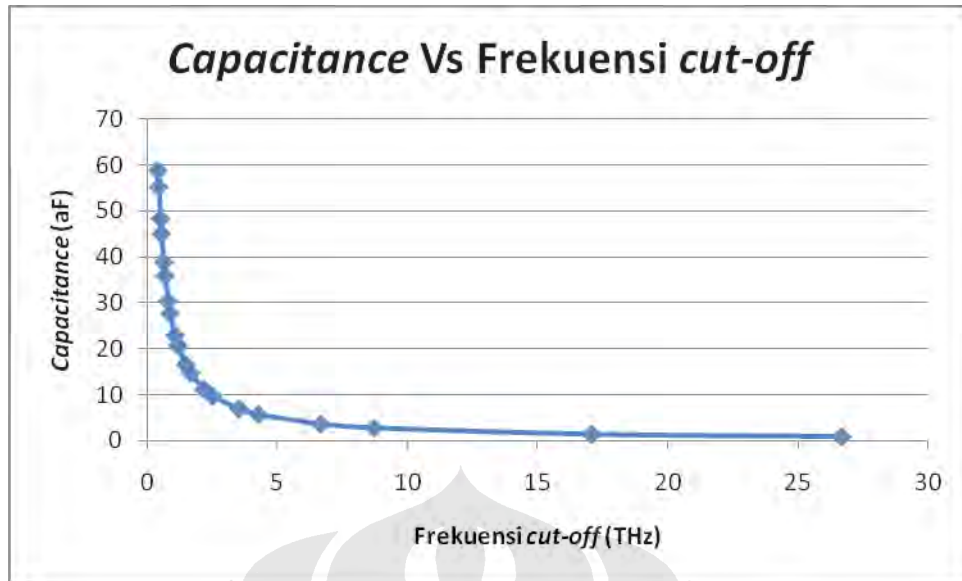
maka kapasitansi total dari CNT tersebut juga akan semakin kecil. Kapasitansi terkecil yang didapat dalam penelitian ini dicapai oleh CNT dengan *chirality* (4,0) yang memiliki diameter 0.3 nm sebesar  $0.9184 \times 10^{-18}$  Farad. Dengan kapasitansi sebesar ini maka kecepatan operasi yang dapat diperoleh oleh dioda Schottky yang menggunakan CNT (4,0) akan mampu mencapai  $26.6768 \times 10^{12}$  Hz (~26 THz). Namun, karena untuk CNT (4,0) dan CNT (5,0) bersifat *metallic* yang disebabkan oleh hibridisasi  $\sigma^*-\pi^*$ , maka CNT dengan *chirality* ini tidak dapat digunakan sebagai semikonduktor dalam dioda Schottky. Oleh karena itu, untuk kecepatan operasi tertinggi dioda Schottky yang menggunakan CNT sebagai material semikonduktor secara teoritis dicapai oleh CNT dengan *chirality* (7,0), dimana kapasitansi untuk CNT dengan *chirality* tersebut adalah sebesar  $2.8127 \times 10^{-18}$  Farad dan mampu mencapai kecepatan sebesar  $8.7106 \times 10^{12}$  Hz (~8.71 THz).

Untuk CNT dengan *chirality* (32,0) yang merupakan *chirality* terbesar dari semua CNT yang disimulasikan, kapasitansi yang didapat adalah sebesar  $58.7744 \times 10^{-18}$  Farad dan mampu mencapai kecepatan operasi sebesar  $0.4169 \times 10^{12}$  Hz (~416.9 GHz). Dari hasil ini dapat dilihat bahwa kecepatan operasi dioda Schottky yang menggunakan CNT sebagai material semikonduktor sangat bergantung kepada *chirality* dari CNT tersebut.

Hubungan antara *chirality* dengan kecepatan operasi dioda Schottky CNT ini terkait secara langsung dengan diameter dari CNT, dimana dengan berubahnya *chirality* dari sebuah CNT maka diameter CNT tersebut pun juga akan berubah, yang mengakibatkan luas permukaan dari persambungan antara CNT dengan metal akan menjadi berubah pula. Dengan perubahan luas permukaan dari persambungan antara CNT dengan metal, maka parameter yang akan dipengaruhi adalah kapasitansi persambungan yang secara langsung akan mempengaruhi kecepatan operasi dari dioda Schottky CNT tersebut.

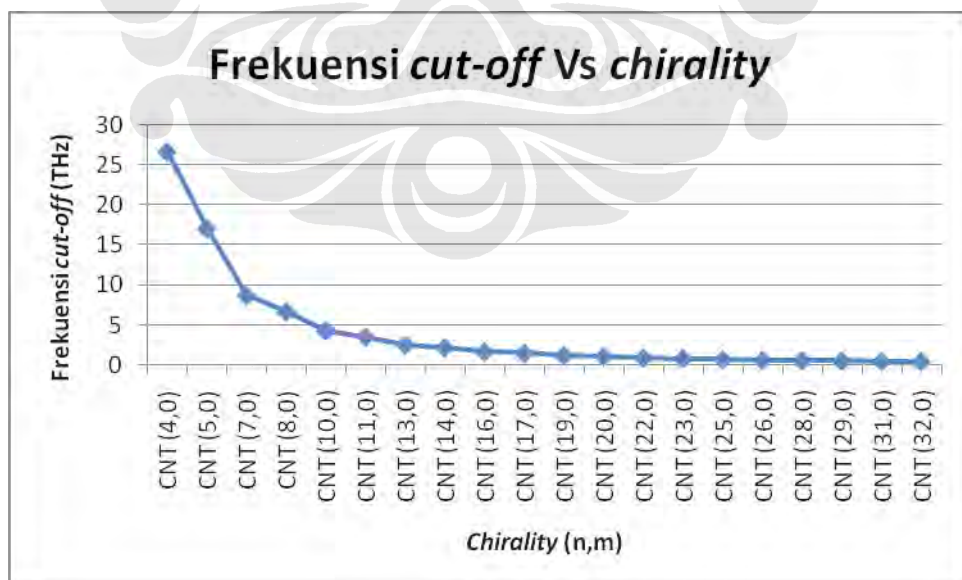
Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan di Bab 3, hubungan antara kapasitansi dengan kecepatan operasi dari dioda Schottky CNT dapat digambarkan sebagai berikut:





Gambar 4.1 Hubungan Kapasitansi dengan Frekuensi *cut-off* dioda Schottky CNT

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa kapasitansi berbanding terbalik dengan kecepatan operasi dari dioda Schottky CNT, dimana semakin besar kapasitansi yang terbentuk pada divais justru akan semakin mengurangi kecepatan operasi dari dioda Schottky CNT tersebut. Kemudian untuk menentukan karakteristik dari CNT (*chirality*) yang paling cocok digunakan sebagai material semikonduktor pada dioda Schottky dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2 Hubungan Frekuensi *cut-off* dengan *chirality* CNT yang digunakan

Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa *chirality* dari CNT yang digunakan berbanding terbalik dengan kecepatan operasi dioda Schottky, dimana semakin besar *chirality* dari CNT maka kecepatan operasi dioda Schottky CNT tersebut justru akan semakin berkurang. Hal ini dapat dipahami sebab semakin besar *chirality* dari CNT yang digunakan dalam dioda, maka diameter CNT tersebut juga akan semakin besar, yang berarti luas permukaan persambungan antara CNT dengan aluminium juga akan semakin besar. Perubahan ini akan menyebabkan kapasitansi total yang dimiliki oleh CNT akan semakin besar yang pada akhirnya akan menyebabkan turunnya kecepatan operasi dari dioda Schottky CNT tersebut.

#### 4.2 PERBANDINGAN DENGAN DIODA SCHOTTKY SILIKON

Performa dari dioda Schottky CNT ini dapat diperbandingkan dengan dioda Schottky yang menggunakan silikon sebagai bahan dasarnya. Sebagai parameter perbandingan adalah kecepatan operasi dari masing-masing dioda Schottky, ditunjukkan oleh besarnya frekuensi *cut-off* dioda Schottky tersebut. Untuk dioda Schottky silikon, digunakan produk dari MOSPEC Semiconductor yaitu dioda Schottky MAS70 Series<sup>[22]</sup>, dan produk dari Hewlett Packard yaitu dioda Schottky H270X Series<sup>[23]</sup>. Untuk *datasheet* dari produk ini dapat dilihat pada Lampiran 1 dan Lampiran 2.

Dioda Schottky MAS70 Series dari MOSPEC Semiconductor memiliki kapasitansi sebesar  $2 \times 10^{-12}$  F (2 pF) dan resistansi sebesar 100 Ohm sehingga berdasarkan Persamaan 3.6 maka besarnya frekuensi *cut-off* dari dioda Schottky ini adalah sebesar  $0.795 \times 10^9$  Hz (~0.795 GHz). Dioda Schottky H270X Series dari Hewlett Packard memiliki kapasitansi sebesar  $6.7 \times 10^{-12}$  F (6.7 pF) dan resistansi sebesar 0.65 Ohm sehingga besarnya frekuensi *cut-off* dari dioda Schottky H270X Series ini adalah sebesar  $3.6545 \times 10^{10}$  Hz (~36.545 GHz). Sebagai bahan perbandingan dapat digunakan dioda Schottky CNT dengan *chirality* (32,0) yang merupakan *chirality* terbesar di antara CNT yang disimulasikan. CNT dengan *chirality* (32,0) memiliki kapasitansi sebesar  $58.7744 \times 10^{-18}$  Farad (~58.8 aF) dan mampu mencapai kecepatan operasi sebesar  $0.4169 \times 10^{12}$  Hz (~416.9 GHz). Tabel 4.1 berikut menunjukkan perbandingan ketiga dioda Schottky:

Tabel 4.1 Tabel Perbandingan dioda Schottky

Parameter	MAS70 Series	H270X Series	Dioda Schottky CNT (32,0)
Kapasitansi	2 pF	6.7 pF	58.8 aF
Resistansi	100 Ohm	0.65 Ohm	6.5 kOhm
Frekuensi <i>cut-off</i>	0.795 GHz	36.545 GHz	416.9 GHz

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa kecepatan operasi dioda Schottky CNT memiliki kecepatan operasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan operasi yang dimiliki oleh dioda Schottky yang menggunakan silikon sebagai material semikonduktornya. Hal ini disebabkan oleh bahan CNT itu sendiri yang berskala nanometer sehingga kapasitansi yang ditimbulkan dapat jauh lebih rendah dari dioda Schottky konvensional yang menggunakan silikon. Walaupun resistansi yang dimiliki oleh CNT merupakan resistansi *quantum* yang besarnya mencapai limit  $\sim 6.5$  kOhm namun kecepatan yang mampu dicapai oleh dioda Schottky CNT ini secara teoritis berada dalam skala ratusan *gigahertz*.

#### 4.3 PEMILIHAN *CHIRALITY* CNT UNTUK APLIKASI DIODA SCHOTTKY

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan di Bab 3 dan analisis yang telah dilakukan di SubBab 4.1 dan SubBab 4.2 maka dapat dilihat bahwa dioda Schottky dengan menggunakan CNT mempunyai kecepatan operasi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan dioda Schottky yang menggunakan silikon sebagai material konduktornya.

Dari hasil studi yang dilakukan Manohara *dkk*<sup>[21]</sup>, CNT yang berhasil ditumbuhkan untuk aplikasi dioda Schottky mempunyai diameter  $\sim 2$  nm dengan panjang  $\sim 2.5$   $\mu\text{m}$ . Dengan mengambil asumsi bahwa CNT yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai karakteristik yang sama untuk aplikasi dioda Schottky, maka dari 20 jenis *chirality* yang disimulasikan dengan CNTBANDS 2.0, untuk diameter  $\sim 2$  nm mempunyai *chirality* (26,0).

CNT dengan *chirality* (26,0) mempunyai kapasitansi total sebesar  $38.801 \times 10^{-18}$  Farad sehingga mampu mencapai kecepatan operasi sebesar  $0.6314 \times 10^{12}$  Hz ( $\sim 631,4$  GHz). Kecepatan operasi ini masih sangat tinggi bila dibandingkan

dengan dioda Schottky yang menggunakan silikon sebagai material semikonduktornya.



## BAB 5

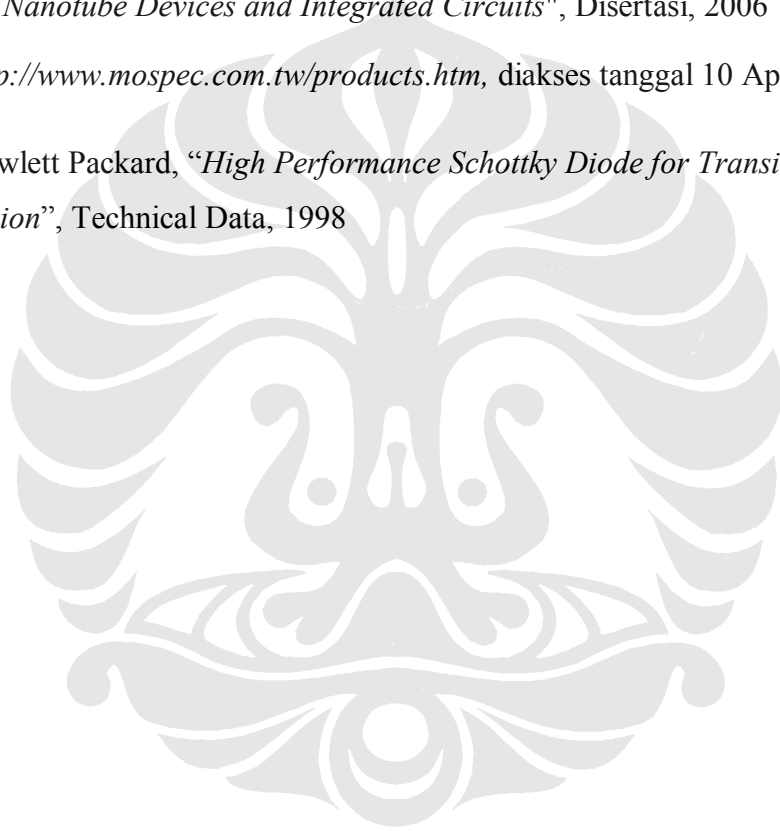
### KESIMPULAN

Dari simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan CNTBANDS 2.0 didapatkan hubungan antara *chirality* CNT dengan parameter-parameter elektrik yang dimiliki oleh CNT tersebut. Untuk afinitas elektron dari CNT berbanding lurus dengan *chirality* dan diameternya, sedangkan untuk besarnya tinggi barrier yang terbentuk pada aplikasi dioda Schottky berbanding terbalik dengan *chirality* dan diameter dari CNT yang digunakan. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan untuk menghitung kapasitansi total dan kecepatan operasi dioda Schottky CNT, kecepatan operasi paling besar dicapai oleh CNT dengan *chirality* (7,0) sebesar 8.71 THz dan paling kecil dengan *chirality* (32,0) sebesar 0.42 THz. Dengan memperhitungkan aplikasi dioda Schottky CNT yang telah berhasil dibuat maka *chirality* yang dipilih dalam penelitian ini adalah CNT (26,0) yang mempunyai kecepatan operasi sebesar 0.631 THz.

## DAFTAR ACUAN

- [1] R. F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals* (Addison-Wesley, New York, 1996).
- [2] [http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc\\_dariniai/diod/schottky.htm](http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/schottky.htm), diakses tanggal 15 November 2007
- [3] Djoko Hartanto, Arief Udhiarto, "Ohmic Contacts and Schottky Barriers", Presentation Slide, 11 April 2004
- [4] Ali Javey, et al, "Ballistic Carbon Nanotube Field Effect Transistor", Nature vol.424, 7 Agustus 2003
- [5] [http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/ch3\\_2.htm](http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/ch3_2.htm), diakses tanggal 2 April 2008
- [6] C. Lu, L. An, Q. Fu, and J. Liu, "Schottky diodes from asymmetric metal-nanotube contacts", Appl. Phys. Lett. 88, 133501 (2006)
- [7] Swaminathan Sankaran, Kenneth K.O, "Schottky Barrier Diodes for Millimeter Wave Detection in a Foundry CMOS Process", Silicon Microwave Integrated Circuits and System Research Group (SiMICS) University of Florida, 2002
- [8] [http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Schottky_diode), diakses tanggal 14 Maret 2008
- [9] [http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/design\\_center/articles/Diodes](http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/design_center/articles/Diodes), diakses tanggal 2 April 2008
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Parasitic\\_capacitance](http://en.wikipedia.org/wiki/Parasitic_capacitance), diakses tanggal 10 April 2008
- [11] Peter J. Burke, "Carbon Nanotube Devices for GHz to THz Applications", Invited Paper, 2005
- [12] "Basic of Schottky Barrier Diodes", Application note
- [13] H. M. Manohara, E. W. Wong, E. Schlecht, B. D. Hunt, and P. H. Siegel, "Carbon Nanotube Schottky Diodes Using Ti-Schottky and Pt-Ohmic Contacts for High Frequency applications", Nano Letters. Vol. 5, No. 7, 1469-1474 (2005)
- [14] M. P. Anantram, F. Leonard, "Physics of Carbon Nanotube Electronic Devices", Institute of Physics Publishing, 1 Februari 2006
- [15] Julia Van Meter Cline, "Characterization of Schottky Barrier Carbon Nanotube Transistors and Their Application to Digital Circuit Design", Thesis, Juni 2004

- [16] <http://www.nanohub.org>, diakses bulan Februari-April 2008
- [17] M. Daenen, *et al*, “*The Wondrous World of Carbon Nanotubes*”, Eindhoven University of Technology, 27 Februari 2003
- [18] Bin Shan, Kyeongjae Cho, “*First Principles Study of Work Functions of Single Wall Carbon Nanotubes*”, April 2005
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_affinity](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_affinity), diakses tanggal 14 Maret 2008
- [20] Akin Akturk, “*Thermal and Performance Modeling of Nanoscale MOSFETs, Carbon Nanotube Devices and Integrated Circuits*”, Disertasi, 2006
- [21] <http://www.mospec.com.tw/products.htm>, diakses tanggal 10 April 2008
- [22] Hewlett Packard, “*High Performance Schottky Diode for Transient Suppresion*”, Technical Data, 1998



## DAFTAR PUSTAKA

- Akturk, Akin. "*Thermal and Performance Modeling of Nanoscale MOSFETs, Carbon Nanotube Devices and Integrated Circuits*". Disertasi. 2006
- Akturk, Akin., Pennington, Gary., Goldsman, Neil. "*Quantum Modeling and Proposed Designs of CNT-Embedded Nanoscale MOSFETs*". Jurnal IEEE Vol. 52, No. 4. April 2005
- Appenzeller, Joerg., et al. "*Comparing Carbon Nanotube Transistors-The Ideal Choice: A Novel Tunnelling Device Design*". Jurnal IEEE. Desember 2005
- Appenzeller, Joerg. "*Electronic Transport in Semiconducting Carbon Nanotubes*". IBM Research Center. 2002
- Anantram, M. P., Leonard, F. "*Physics of Carbon Nanotube Electronic Devices*". Institute of Physics Publishing, 1 Februari 2006
- Avouris, Phaedon., et al. "*Carbon Nanotube Electronics*". IBM Research Division. 2002
- Brenner, Donald.W., Lyshevki, Sergey E., Iafrate, Gerald J. "*Handbook of Nanosciences, Engineering and Technology*", CRC Press London. 2003
- Burke, Peter J. "*Carbon Nanotube Devices for GHz to THz Applications*", Invited Paper. 2005
- Carey, David. "*Nanoelectric and Devices*". McGraw-Hill, Inc. 2004
- Cline, Julia V. M., "*Characterization of Schottky Barrier Carbon Nanotube Transistors and Their Application to Digital Circuit Design*". Thesis, June 2004
- Daenen, M. et al. "*The Wondrous World of Carbon Nanotubes*". Eindhoven University of Technology. 27 Februari 2003
- Datta, Supriyo. "*Fundamental of Nanoelectronics*". Purdue University. 2004
- Dragoman, Mircea. "*Introduction in Nanoelectronics*". [www.laas.fr/~mdragoma/](http://www.laas.fr/~mdragoma/). 2004
- ECE497NC Lecture 14. "*Carbon Nanotubes and Nanotube Transistors*". 10 Maret 2004
- Etezad, Maryam., Kahrizi, Mojtaba. "*Schottky Barrier Carbon Nanotube Field Effect Transistor: Electronic Characterizations*". Jurnal IEEE. Mei 2006



Guo, Jing., et al. "*Carbon Nanotube Field Effect Transistors*". World Scientific Publishing Company. 2004

[http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc\\_dariniai/diod/schottky.htm](http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/schottky.htm)

<http://www.mospec.com.tw/products.htm>

<http://www.nanohub.org>

[http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/design\\_center/articles/Diodes](http://www.powerdesigners.com/InfoWeb/design_center/articles/Diodes)

<http://www.wikipedia.org>

Javey, Ali. "*Ballistic Carbon Nanotube Field Effect Transistor*". Nature vol.424, 7 Agustus 2003

Karalar, Tufan C. "*A literature review on Carbon Nanotube Transistors and thoughts on their potential to sustain Moore's Law*". IEEE Project Report. 2002

Klimeck, Gerhard. "*Bandstructure in Nanoelectronics*". Purdue University. 2006

Manohara, Harish M. "*Carbon Nanotube Schottky Diodes Using Ti-Schottky and Pt-Ohmic Contacts for High Frequency Applications*". Nano Letters Vol.5, No.7, 1469-1474. 2005

Owens, Frank J. "*Introduction to Nanotechnology*". Wiley Interscience Publishing Company. 2003

Pierret, R.F., "*Semiconductor Device Fundamentals*". Addison-Wesley, New York. 1996

Rahman, Anisur., et al. "*Theory of Ballistic Nanotransistor*". Jurnal IEEE. September 2003

Roy, Kaushik. "*Carbon Nanotube Transistors: Modelling and Circuit*". Purdue University. 2006

Sands, Tim. "*Nanomaterials-Quantum Dots, Nanowires and Nanotubes*". Purdue University. 2002

Sankaran, Swaminathan., Kenneth K.O, "*Schottky Barrier Diodes for Millimeter Wave Detection in a Foundry CMOS Process*", Silicon Microwave Integrated Circuits and System Research Group (SiMICS) University of Florida, 2002

Singh, Jasprit. “*Semiconductor Devices Basic Principles*”. McGraw-Hill, Inc. 2004

Streetman, Ben G., “*Solid State Electronic Devices*”. Prentice-Hall, 2<sup>nd</sup> Edition

Sundaran, Vivek. “*Info on CNT*”. University of Colorado. 2005

Sze, S.M., “*Physics of Semiconductor Devices*”. John Wiley & Sons, Singapore. 1981

Tang, Zikang., Sheng, Ping. “*Nano Science and Technology: Novel Structure and Phenomena*”. CRC Press London. 2003



# LAMPIRAN

## LAMPIRAN 1 DATASHEET DIODA SCHOTTKY MAS70 SERIES

MOSPEC SEMICONDUCTOR



### MAS70 Series

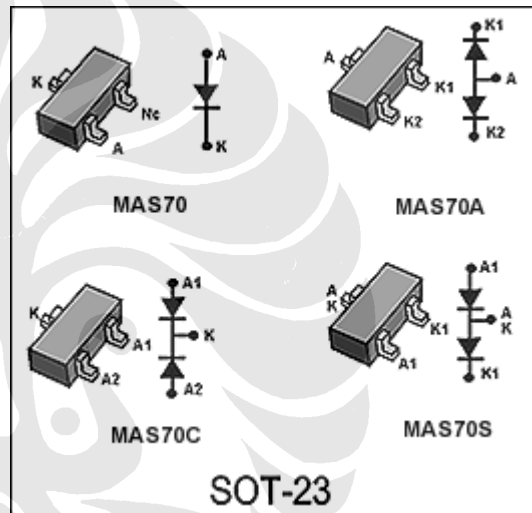
### SMALL SIGNAL SCHOTTKY DIODE

#### FEATURES AND BENEFITS

- \* Surface mount device
- \* Extremely fast switching
- \* Negligible switching losses
- \* Low forward voltage drop
- \* Very small conduction losses

#### DESCRIPTION

Schottky barrier diode encapsulated in a SOT-23 small SMD package  
Single and double diodes with different pinning are available



#### MAXIMUM RATINGS

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MAS70	UNIT
Peak Repetitive Reverse Voltage	$V_{RRM}$	70	V
Working Peak Reverse Voltage	$V_{RWM}$		
DC Blocking Voltage	$V_R$		
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	49	V
Average Rectifier Forward Current	$I_{F(AV)}$	100	mA
Peak Repetitive Forward Current (Rated $V_R$ , Square Wave, 20 KHz)	$I_{FRM}$	200	mA
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_j, T_{stg}$	-65 to +125	°C

#### THERMAL RESISTANCE

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATED	UNIT
Junction to Ambient ( * )	$R_{th(j-a)}$	625	°C/W

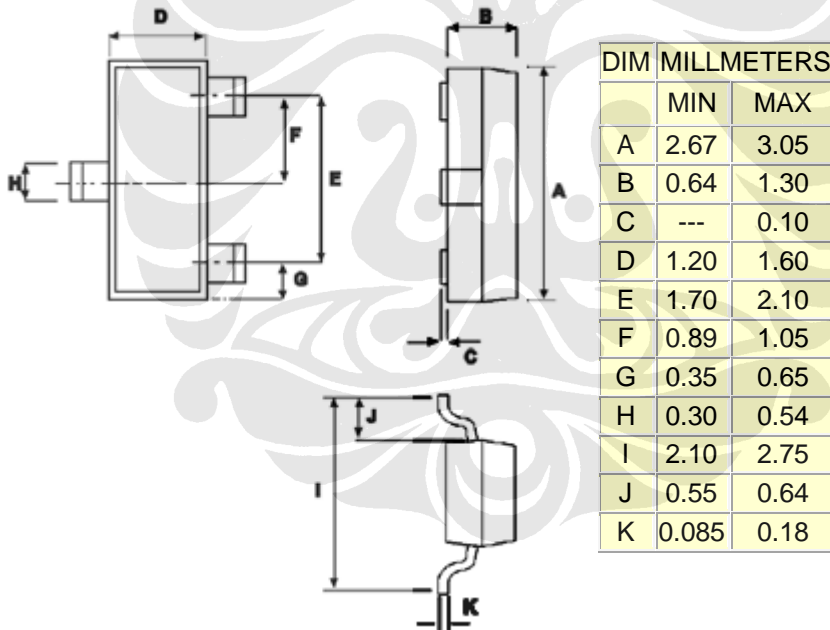
(\*) Mounted on ceramic substrate: 7 x 5 x 0.5 mm

**STATIC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (per diode for double type)**

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX.	UNIT
Forward Voltage ( $T_C = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ) ( $I_F = 1.0\text{ mA}$ ) ( $I_P = 15\text{ mA}$ )	$V_F$			410 1000	mV
Reverse Breakdown Voltage ( $I_R = 100\text{ }\mu\text{A}$ )	$V_R$	70			V
Diode Capacitance ( $V_R = 0\text{ V}$ , $f = 1.0\text{ MHz}$ )	$C_j$		1.5	2.0	pF
Reverse Current ( $V_R = 50\text{ V}$ )	$I_R$			100	$\mu\text{A}$
Reverse Recovery Time ( $I_F = 10\text{ mA}$ , $I_R = 10\text{ mA}$ , $I_{rr} = 1.0\text{ mA}$ , $R_L = 100\text{ }\Omega$ )	$T_{rr}$			5.0	ns

**PACKAGE MECHANICAL DATA**

**SOT-23**



PART NO.	MAS70	MAS70C	MAS70A	MAS70S
MARKING	M7	M7C	M7A	M7S



# High Performance Schottky Diode for Transient Suppression

## Technical Data

HSMS-2700/-2702  
-270B/-270C

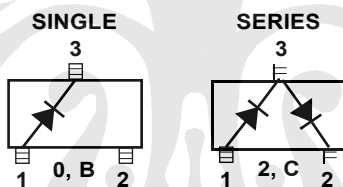
### Features

- Ultra-low Series Resistance for Higher Current Handling
- Picosecond Switching
- Low Capacitance

### Applications

RF and computer designs that require circuit protection, high-speed switching, and voltage clamping.

### Package Lead Code Identification (Top View)



### Description

The HSMS-2700 series of Schottky diodes, commonly referred to as clipping/clamping diodes, are optimal for circuit and waveshape preservation applications with high speed switching. Ultra-low series resistance,  $R_S$ , makes them ideal for protecting sensitive circuit elements against higher current transients carried on data lines. With picosecond switching, the HSMS-270x can respond to noise spikes with rise times as fast as 1 ns. Low capacitance minimizes waveshape loss that causes signal degradation.

### HSMS-270x DC Electrical Specifications, $T_A = +25^\circ\text{C}$ [1]

Part Number HSMS-	Package Marking Code <sup>[2]</sup>	Lead Code	Configuration	Package	Maximum Forward Voltage $V_F$ (mV)	Minimum Breakdown Voltage $V_{BR}$ (V)	Typical Capacitance $C_T$ (pF)	Typical Series Resistance $R_S$ ( $\Omega$ )	Maximum Eff. Carrier Lifetime $\tau$ (ps)
-2700	J0	0	Single	SOT-23	550 <sup>[3]</sup>	15 <sup>[4]</sup>	6.7 <sup>[5]</sup>	0.65	100 <sup>[6]</sup>
-270B		B		SOT-323 (3-lead SC-70)					
-2702	J2	2	Series	SOT-23	550 <sup>[3]</sup>	15 <sup>[4]</sup>	6.7 <sup>[5]</sup>	0.65	100 <sup>[6]</sup>
-270C		C		SOT-323 (3-lead SC-70)					

#### Notes:

1.  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , where  $T_A$  is defined to be the temperature at the package pins where contact is made to the circuit board.
2. Package marking code is laser marked.
3.  $I_F = 100$  mA; 100% tested

4.  $I_F = 100 \mu\text{A}$ ; 100% tested
5.  $V_F = 0$ ;  $f = 1 \text{ MHz}$
6. Measured with Karkauer method at 20 mA; guaranteed by design.



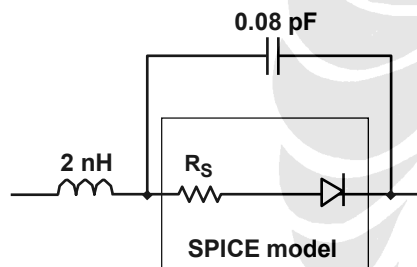
### Absolute Maximum Ratings, $T_A = 25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameter	Unit	Absolute Maximum <sup>[1]</sup>	
			HSMS-2700/-2702	HSMS-270B/-270C
$I_F$	DC Forward Current	mA	350	750
$I_{F\text{-peak}}$	Peak Surge Current (1 $\mu\text{s}$ pulse)	A	1.0	1.0
$P_T$	Total Power Dissipation	mW	250	825
$P_{\text{INV}}$	Peak Inverse Voltage	V	15	15
$T_J$	Junction Temperature	$^\circ\text{C}$	150	150
$T_{\text{STG}}$	Storage Temperature	$^\circ\text{C}$	-65 to 150	-65 to 150
$\theta_{\text{JC}}$	Thermal Resistance, junction to lead	$^\circ\text{C}/\text{W}$	500	150

#### Note:

1. Operation in excess of any one of these conditions may result in permanent damage to the device.

### Linear and Non-linear SPICE Model



### SPICE Parameters

Parameter	Unit	Value
BV	V	25
CJO	pF	6.7
EG	eV	0.55
IBV	A	10E-4
IS	A	1.4E-7
N		1.04
RS	$\Omega$	0.65
PB	V	0.6
PT		2
M		0.5

## Typical Performance

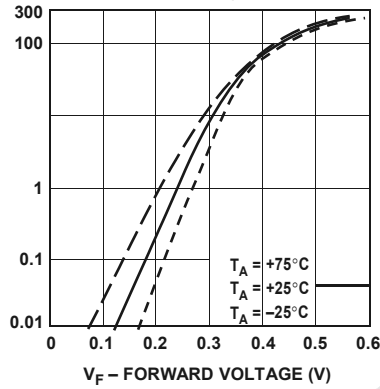


Figure 1. Forward Current vs. Forward Voltage at Temperature for HSMS-2700 and HSMS-2702.

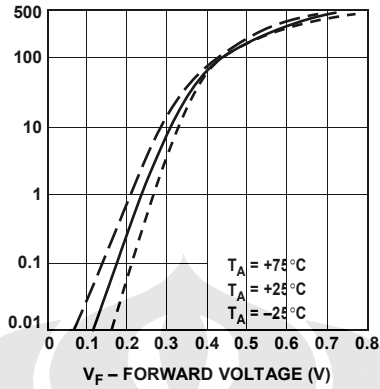


Figure 2. Forward Current vs. Forward Voltage at Temperature for HSMS-270B and HSMS-270C.

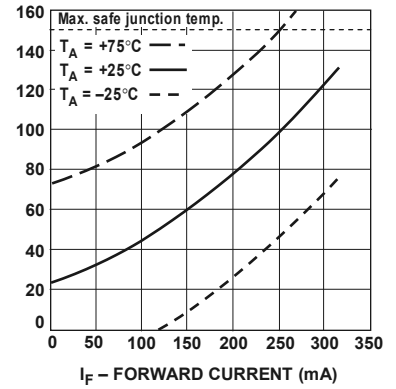


Figure 3. Junction Temperature vs. Forward Current as a Function of Heat Sink Temperature for the HSMS-2700 and HSMS-2702. Note: Data is calculated from SPICE parameters.

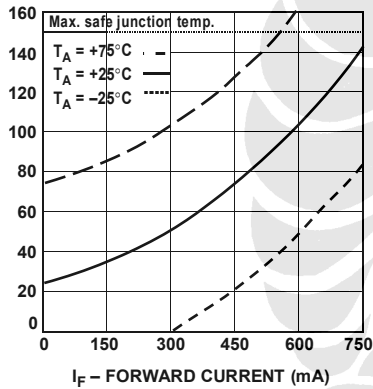


Figure 4. Junction Temperature vs. Current as a Function of Heat Sink Temperature for HSMS-270B and HSMS-270C. Note: Data is calculated from SPICE parameters.

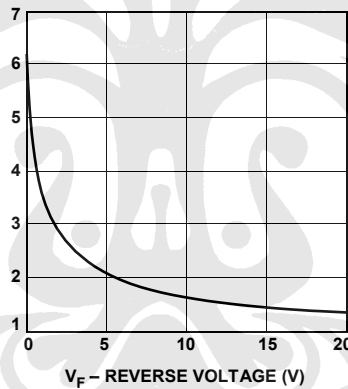
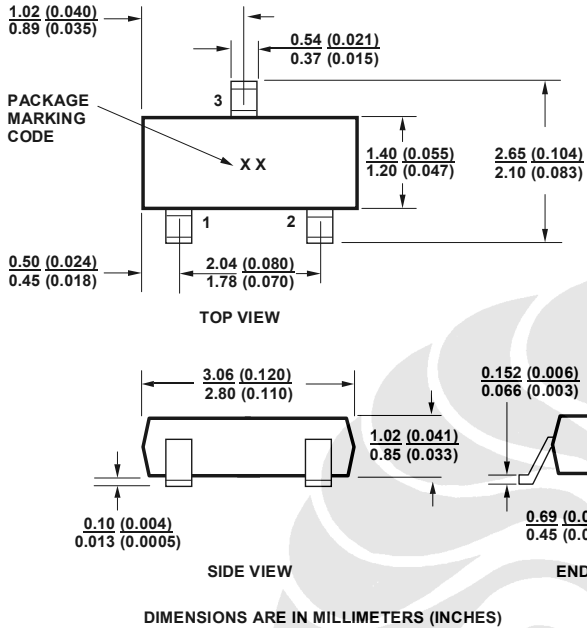


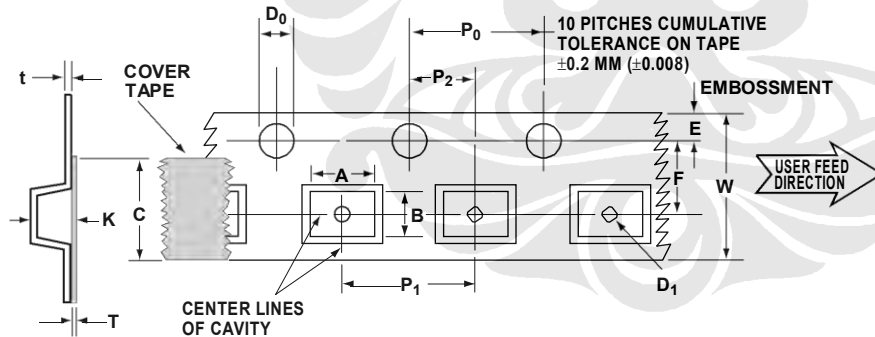
Figure 5. Total Capacitance vs. Reverse Voltage.



## Package Dimensions Outline SOT-23



## Tape Dimensions and Product Orientation For Outline SOT-23

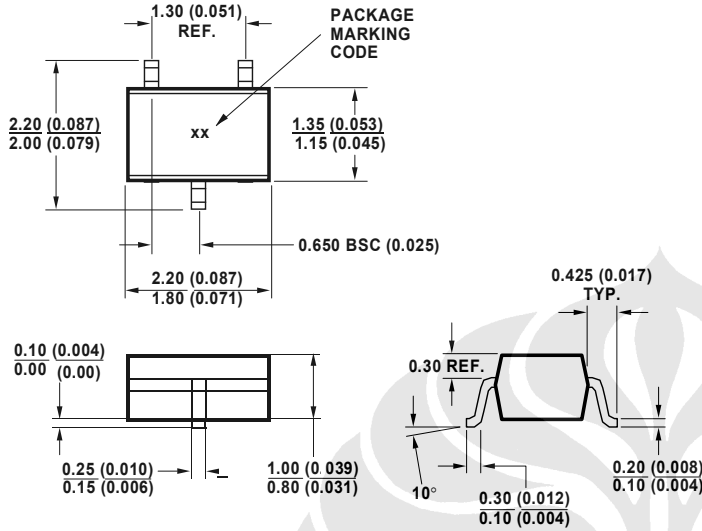


	DESCRIPTION	SYMBOL	SIZE (mm)	SIZE (INCHES)
CAVITY	LENGTH	A	$3.15 \pm 0.15$	$0.124 \pm 0.006$
	WIDTH	B	$2.65 \pm 0.25$	$0.104 \pm 0.010$
	DEPTH	K	$1.30 \pm 0.10$	$0.051 \pm 0.004$
	PITCH	$P_1$	$4.00 \pm 0.10$	$0.157 \pm 0.004$
	BOTTOM HOLE DIAMETER	$D_1$	1.00 min.	0.04 min.
PERFORATION	DIAMETER	$D_0$	$1.55 + 0.10/-0$	$0.061 + 0.004/-0$
	PITCH	$P_0$	$4.00 \pm 0.10$	$0.157 \pm 0.004$
	POSITION	E	$1.75 \pm 0.10$	$0.069 \pm 0.004$
CARRIER TAPE	WIDTH	W	$8.00 \pm 0.2$	$0.315 \pm 0.008$
	THICKNESS	t	$0.30 \pm 0.05$	$0.012 \pm 0.002$
COVER TAPE	WIDTH	C	$5.40 \pm 0.25$	$0.205 \pm 0.010$
	TAPE THICKNESS	T	$0.064 \pm 0.01$	$0.003 \pm 0.0004$

DISTANCE BETWEEN CENTERLINE	CAVITY TO PERFORATION (WIDTH DIRECTION)	F	3.50 ± 0.10	0.138 ± 0.004
	CAVITY TO PERFORATION (LENGTH DIRECTION)	P <sub>2</sub>	2.00 ± 0.05	0.079 ± 0.002

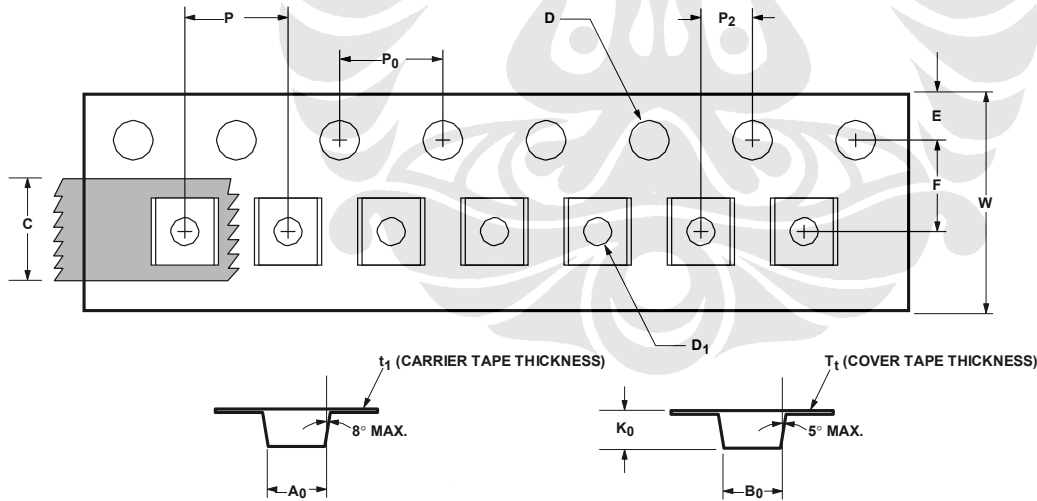


### Package Dimensions Outline SOT-323 (SC-70 3 Lead)



DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS (INCHES)

### Tape Dimensions and Product Orientation For Outline SOT-323 (SC-70 3 Lead)



	DESCRIPTION	SYMBOL	SIZE (mm)	SIZE (INCHES)
CAVITY	LENGTH	A <sub>0</sub>	2.24 ± 0.10	0.088 ± 0.004
	WIDTH	B <sub>0</sub>	2.34 ± 0.10	0.092 ± 0.004
	DEPTH	K <sub>0</sub>	1.22 ± 0.10	0.048 ± 0.004
	PITCH	P	4.00 ± 0.10	0.157 ± 0.004
	BOTTOM HOLE DIAMETER	D <sub>1</sub>	1.00 + 0.25	0.039 + 0.010
	PERFORATION	DIAMETER	D	1.55 ± 0.05
PITCH		P <sub>0</sub>	4.00 ± 0.10	0.157 ± 0.004
POSITION		E	1.75 ± 0.10	0.069 ± 0.004
CARRIER TAPE	WIDTH	W	8.00 ± 0.30	0.315 ± 0.012
	THICKNESS	t <sub>1</sub>	0.255 ± 0.013	0.010 ± 0.0005
COVER TAPE	WIDTH	C	5.4 ± 0.10	0.205 ± 0.004
	TAPE THICKNESS	T <sub>t</sub>	0.062 ± 0.001	0.0025 ± 0.00004

DISTANCE	CAVITY TO PERFORATION (WIDTH DIRECTION)	F	$3.50 \pm 0.05$	$0.138 \pm 0.002$
	CAVITY TO PERFORATION (LENGTH DIRECTION)	P <sub>2</sub>	$2.00 \pm 0.05$	$0.079 \pm 0.002$



## Applications Information Schottky Diode Fundamentals

The HSMS-270x series of clipping/clamping diodes are Schottky devices. A Schottky device is a rectifying, metal-semiconductor contact formed between a metal and an n-doped or a p-doped semiconductor. When a metal-semiconductor junction is formed, free electrons flow across the junction from the semiconductor and fill the free-energy states in the metal. This flow of electrons creates a depletion or potential across the junction. The difference in energy levels between semiconductor and metal is called a Schottky barrier.

P-doped, Schottky-barrier diodes excel at applications requiring ultra low turn-on voltage (such as zero-biased RF detectors). But their very low, breakdown-voltage and high series-resistance make them unsuitable for the clipping and clamping applications involving high forward currents and high

discussion will focus entirely on n-doped Schottky diodes.

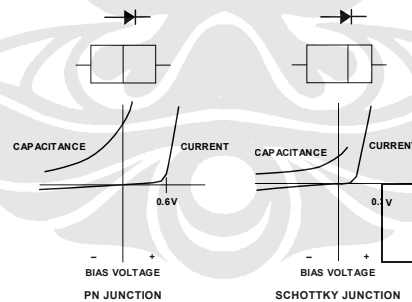
Under a forward bias (metal connected to positive in an n-doped Schottky), or forward voltage,  $V_F$ , there are many electrons with enough thermal energy to cross the barrier potential into the metal. Once the applied bias exceeds the built-in potential of the junction, the forward current,  $I_F$ , will increase rapidly as  $V_F$  increases.

When the Schottky diode is reverse biased, the potential barrier for electrons becomes large; hence, there is a small probability that an electron will have sufficient thermal energy to

cross the junction. The reverse leakage current will be in the nanoampere to microampere range, depending upon the diode type, the reverse voltage, and the temperature.

In contrast to a conventional p-n junction, current in the Schottky diode is carried only by majority carriers (electrons). Because no minority-carrier (hole) charge storage effects are present, Schottky diodes have carrier lifetimes of less than 100 ps. This extremely fast switching time makes the Schottky diode an ideal rectifier at frequencies of 50 GHz and higher.

Another significant difference between Schottky and p-n diodes is the forward voltage drop. Schottky diodes have a threshold of typically 0.3 V in comparison to that of 0.6 V in p-n junction diodes. See Figure 6.



**Figure 6.**

Through the careful manipulation of the diameter of the Schottky contact and the choice of metal deposited on the n-doped silicon, the important characteristics of the diode (junction capacitance,  $C_J$ ; parasitic series resistance,  $R_S$ ; breakdown voltage,  $V_{BR}$ ; and forward voltage,  $V_F$ ) can be optimized for specific applications. The HSMS-270x series and

Both diodes have similar barrier heights; and this is indicated by corresponding values of saturation current,  $I_S$ . Yet, different contact diameters and epitaxial-layer thickness result in very different values of  $C_J$  and  $R_S$ . This is seen by comparing their SPICE parameters in Table 1.

**Table 1. HSMS-270x and HBAT-540x SPICE Parameters.**

Parameter	HSMS-270x	HBAT-540x
BV	25 V	40 V
CJO	<b>6.7 pF</b>	<b>3.0 pF</b>
EG	0.55 eV	0.55 eV
IBV	10E-4 A	10E-4 A
IS	1.4E-7 A	1.0E-7 A
N	1.04	1.0
RS	<b>0.65 <math>\Omega</math></b>	<b>2.4 <math>\Omega</math></b>
PB	0.6 V	0.6 V
PT	2	2
M	0.5	0.5

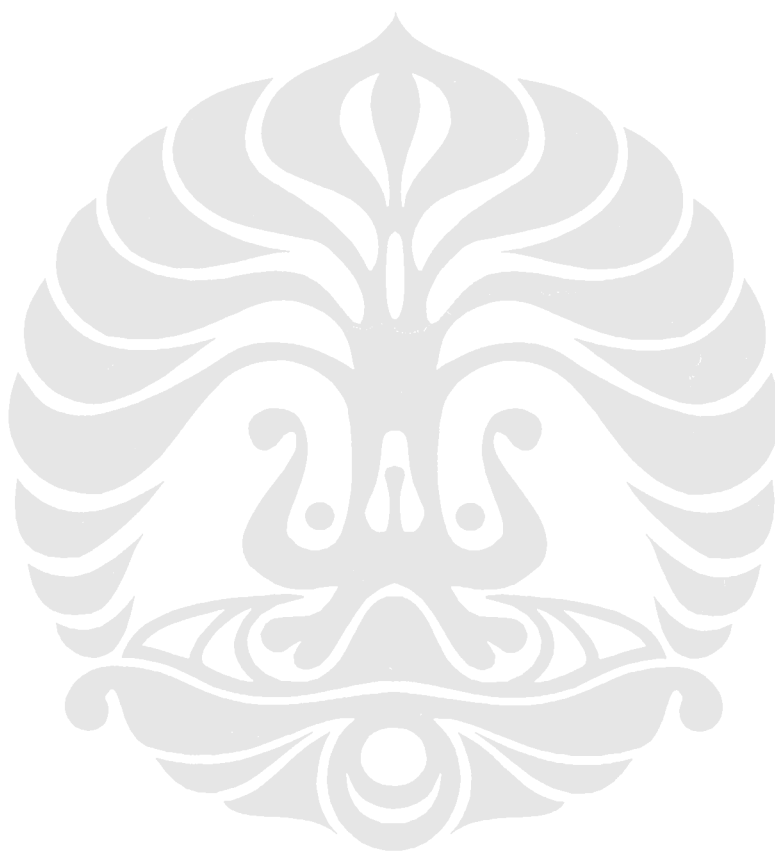
At low values of  $I_F \leq 1$  mA, the forward voltages of the two diodes are nearly identical.

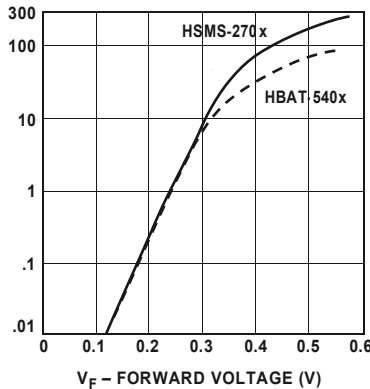
10 mA, the lower series resistance of the HSMS-270x allows for a

gives the HSMS-270x a much higher current handling capability. The trade-off is a higher value of junction capacitance. The forward voltage and current plots illustrate the differences in these two

HBAT-540x series of diodes are a case in point.

Schottky diodes, as shown in  
Figure 7.



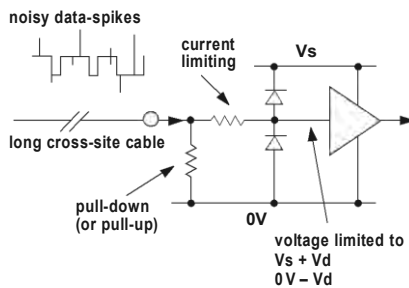


**Figure 7. Forward Current vs. Forward Voltage at 25°C.**

Because the automatic, pick-and-place equipment used to assemble these products selects dice from adjacent sites on the wafer, the two diodes which go into the HSMS-2702 or HSMS-270C (series pair) are closely matched — without the added expense of testing and binning.

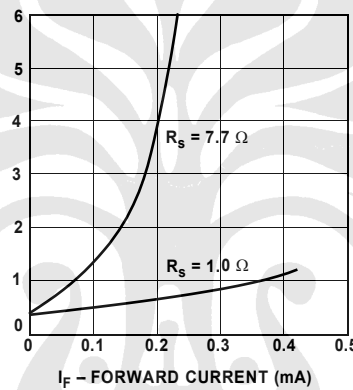
### Current Handling in Clipping/Clamping Circuits

The purpose of a clipping/clamping diode is to handle high currents, protecting delicate circuits downstream of the diode. Current handling capacity is determined by two sets of characteristics, those of the chip or device itself and those of the package into which it is mounted.



**Figure 8. Two Schottky Diodes Are Used for Clipping/Clamping in a Circuit.**

Consider the circuit shown in Figure 8, in which two Schottky diodes are used to protect a circuit from noise spikes on a stream of digital data. The ability of the diodes to limit the voltage spikes is related to their ability to sink the associated current spikes. The importance of current handling capacity is shown in Figure 9, where the forward voltage generated by a forward current is compared in two diodes.



**Figure 9. Comparison of Two Diodes.**

The first is a conventional Schottky diode of the type generally used in RF circuits, with an  $R_S$  of  $7.7 \Omega$ . The second is a Schottky diode of identical characteristics, save the  $R_S$  of  $1.0 \Omega$ . For the conventional diode, the relatively high value of  $R_S$  causes the voltage across the diode's terminals to rise as current increases. The power dissipated in the diode heats the junction, causing  $R_S$  to climb, giving rise to a runaway thermal condition. In the second diode with low  $R_S$ , such heating does not take place and the voltage across the diode terminals is maintained at a low limit even at high values of current.

Maximum reliability is obtained in a Schottky diode when the steady state junction temperature is maintained at or below  $150^\circ\text{C}$ , although brief excursions to higher junction temperatures can be tolerated with no significant impact upon mean-time-to-failure, MTTF. In order to compute the junction temperature, Equations (1) and (3) below must be simultaneously solved.

$$I_F = I_S \left[ e^{\frac{11600 (V_F - I_F R_S)}{n T_J}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_S = I_0 \left( \frac{T_J}{298} \right)^{\frac{2}{n}} e^{-4060 \left( \frac{1}{T_J} - \frac{1}{298} \right)} \quad (2)$$

$$T_J = V_F I_F \theta_{JC} + T_A \quad (3)$$

where:

$I_F$  = forward current

$I_S$  = saturation current

$V_F$  = forward voltage

$R_S$  = series resistance

$T_J$  = junction temperature

$I_0$  = saturation current at  $25^\circ\text{C}$

$n$  = diode ideality factor

$\theta_{JC}$  = thermal resistance from junction to case (diode lead)

=  $\theta_{\text{package}} + \theta_{\text{chip}}$

$T_A$  = ambient (diode lead) temperature

Equation (1) describes the forward V-I curve of a Schottky diode. Equation (2) provides the value for the diode's saturation current, which value is plugged into (1). Equation (3) gives the value of junction temperature as a function of power dissipated in the diode and ambient (lead) temperature.

The key factors in these equations are:  $R_S$ , the series resistance of the diode where heat is generated under high current conditions;

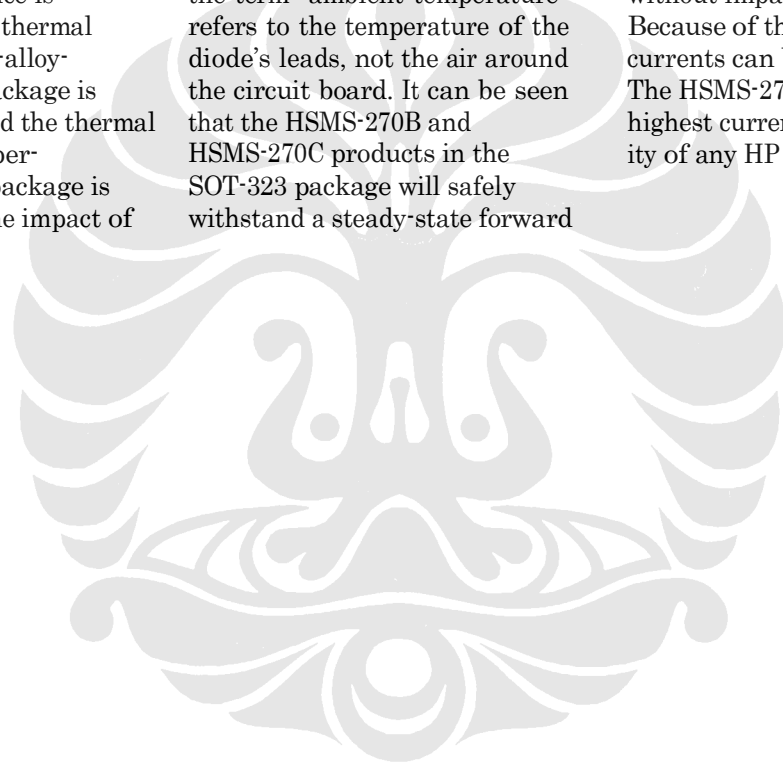
$\theta_{\text{chip}}$ , the chip thermal resistance of the Schottky die; and  $\theta_{\text{package}}$ , or the package thermal resistance.

$R_S$  for the HSMS-270x family of diodes is typically  $0.7 \Omega$  and is the lowest of any Schottky diode available from Hewlett-Packard. Chip thermal resistance is typically  $40^\circ\text{C}/\text{W}$ ; the thermal resistance of the iron-alloy-leadframe, SOT-23 package is typically  $460^\circ\text{C}/\text{W}$ ; and the thermal resistance of the copper-leadframe, SOT-323 package is typically  $110^\circ\text{C}/\text{W}$ . The impact of

package thermal resistance on the current handling capability of these diodes can be seen in Figures 3 and 4. Here the computed values of junction temperature vs. forward current are shown for three values of ambient temperature. The SOT-323 products, with their copper leadframes, can safely handle almost twice the current of the larger SOT-23 diodes. Note that the term "ambient temperature" refers to the temperature of the diode's leads, not the air around the circuit board. It can be seen that the HSMS-270B and HSMS-270C products in the SOT-323 package will safely withstand a steady-state forward

current of 550 mA when the diode's terminals are maintained at  $75^\circ\text{C}$ .

For pulsed currents and transient current spikes of less than one microsecond in duration, the junction does not have time to reach thermal steady state. Moreover, the diode junction may be taken to temperatures higher than  $150^\circ\text{C}$  for short time-periods without impacting device MTTF. Because of these factors, higher currents can be safely handled. The HSMS-270x family has the highest current handling capability of any HP diode.





## Part Number Ordering Information

Part Number	No. of Devices	Container
HSMS-2700-BLK	100	Antistatic Bag
HSMS-2700-TR1	3,000	7" Reel
HSMS-2700-TR2	10,000	13" Reel
HSMS-2702-BLK	100	Antistatic Bag
HSMS-2702-TR1	3,000	7" Reel
HSMS-2702-TR2	10,000	13" Reel
HSMS-270B-BLK	100	Antistatic Bag
HSMS-270B-TR1	3,000	7" Reel
HSMS-270B-TR2	10,000	13" Reel
HSMS-270C-BLK	100	Antistatic Bag
HSMS-270C-TR1	3,000	7" Reel
HSMS-270C-TR2	10,000	13" Reel

[www.hp.com/go/rf](http://www.hp.com/go/rf)

For technical assistance or the location of your nearest Hewlett-Packard sales office, distributor or representative call:

**Americas/Canada:** 1-800-235-0312 or 408-654-8675

**Far East/Australasia:** Call your local HP sales office.

**Japan:** (81 3) 3335-8152

**Europe:** Call your local HP sales office.

Data subject to change.

Copyright © 1998 Hewlett-Packard Co.

Obsoletes 5967-6196E

5968-2351E (10/98)

