

**PENGGUNAAN *CARBON NANOTUBE* (3,3) SEBAGAI  
*TOP CONTACT METAL* PADA SOLAR SEL UNTUK  
MEMINIMALKAN *SHADOWING LOSS***

**SKRIPSI**

Oleh

**MARNI**

**0403037084**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
JANUARI, 2008**

**PENGGUNAAN *CARBON NANOTUBE* (3,3) SEBAGAI  
*TOP CONTACT METAL* PADA SOLAR SEL UNTUK  
MEMINIMALKAN *SHADOWING LOSS***

Oleh

**MARNI**

**0403037084**



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

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
JANUARI, 2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **PENGGUNAAN *CARBON NANOTUBE* (3,3) SEBAGAI *TOP CONTACT METAL* PADA SOLAR SEL UNTUK MEMINIMALKAN *SHADOWING LOSS***

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, 9 Januari 2008

Marni

NPM 0403037084

## PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PENGGUNAAN *CARBON NANOTUBE (3,3)* SEBAGAI  
*TOP CONTACT METAL* PADA SOLAR SEL UNTUK  
MEMINIMALKAN *SHADOWING LOSS***

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 2 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 9 Januari 2008

Dosen Pembimbing

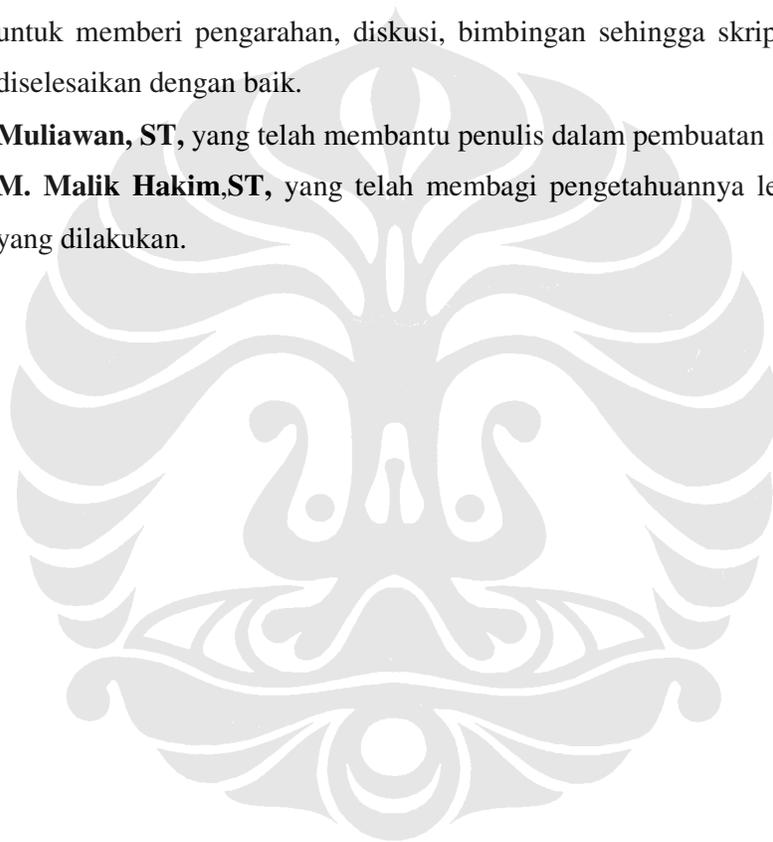
Arief Udhiarto

NIP 040 050 003 2

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. **Arief Udhiarto, MT**, selaku dosen pembimbing yang telah menentukan tema dan menyetujui penelitian ini sebagai bagian dari penelitian pada Sensor Device Research Group (SDRG) dan bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi, bimbingan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. **Muliawan, ST**, yang telah membantu penulis dalam pembuatan simulasi.
3. **M. Malik Hakim, ST**, yang telah membagi pengetahuannya lewat diskusi yang dilakukan.



Marni

0403037084

Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing

Arief Udhiarto, MT

**PENGGUNAAN *CARBON NANOTUBE* (3,3)  
SEBAGAI *TOP CONTACT METAL* PADA SOLAR  
SEL UNTUK MEMINIMALKAN *SHADOWING LOSS***

**ABSTRAK**

Efisiensi divais solar sel merupakan salah satu parameter yang menunjukkan unjuk kerja divais tersebut. Salah satu parameter yang berpengaruh terhadap efisiensi divais solar sel yaitu disain *top contact metal*. Disain *top contact metal* akan berpengaruh terhadap *power loss* yang diakibatkan oleh *shadowing loss* yang besarnya hingga 13,1%[1]. Berbagai riset telah dilakukan untuk mendapatkan disain *Top contact metal* dengan *shadowing loss* yang sekecil mungkin. *Carbon nanotube* (*CNT*) memiliki potensi untuk dijadikan sebagai *Top contact metal*.

Pada riset ini dilakukan perancangan, perhitungan dan simulasi penggunaan *CNT* (3,3) sebagai *top contact metal*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MatLab* 7.1.

Berdasarkan analisis yang dilakukan, *CNT* berpotensi untuk dijadikan sebagai *top contact metal* pada silikon solar sel jika *didoping* dengan maksimum *doping* sebesar  $3.25 \cdot 10^{11} / \text{cm}^3$ . Pemilihan *CNT* (3,3) didasarkan pada *work function* yang dimilikinya.

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh hasil bahwa dengan penggunaan *CNT* (3,3), *shadowing loss* yang dihasilkan yaitu 0%. Hal ini berarti *shadowing loss* dapat dihilangkan sebesar 13.1%. Dengan demikian penggunaan *CNT*(3,3) dapat meningkatkan efisiensi solar sel sampai dengan 13,1%.

**Kata kunci : Efisiensi, Carbon nanotube, solar sel, top contact metal**

Marni

0403037084

Electrical Engineering Department

Counsellor

Arief Udhiarto,MT

## **THE USE CARBON NANOTUBE (3,3) AS TOP CONTACT METAL ON SOLAR CELLS TO MINIMIZE SHADOWING LOSS**

### **ABSTRACT**

Solar cells efficiency is one of the parameter which show the performance of solar cell. The efficiency of solar cell is affected by top contact metal design. Shadowing loss as the effect of top contact metal design can reduce solar cell efficiency until 13.1%[1]. Many research had been conduct to reduce the shadowing loss as much as possible. CNT (3,3) as a material with metallic properties is potential to be applied as top contact metal.

This research is conduct to design, calculate, and simulate the potential of CNT as top contact metal to reduce shadowing loss. Simulation is ran by MatLab 7.1. Based on analysis, CNT is potential to act as top metal contact at silicon solar cell with maximum doping at  $3.25 \cdot 10^{11} /\text{cm}^3$ . CNT (3,3) is choosed based on its work function.

From calculation, the use of CNT (3,3) resulted shadowing loss 0%. That means shadowing loss can be reduced up to 13.1% or increasing the efficiency of solar cell up to 13.1%.

**Key words: Efficiency, Carbon nanotube, solar cells, top contact metal**

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	x
DAFTAR ISTILAH	xi
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2 TUJUAN PENULISAN	1
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENULISAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB 2 DASAR TEORI	3
2.1 KARAKTERISTIK <i>CNT</i>	3
2.2 SEMIKONDUKTOR	6
2.3 METAL- <i>SEMICONDUCTOR CONTACT</i>	10
2.4 SOLAR SEL	11
BAB 3 PERANCANGAN, PERHITUNGAN DAN SIMULASI	21
3.1 PERANCANGAN SOLAR SEL	21
3.2 PEMILIHAN <i>CARBON NANOTUBE</i>	22
3.3 PERHITUNGAN DAN SIMULASI KONSENTRASI <i>DOPING</i> PADA PERMUKAAN SOLAR SEL	23
3.4 PERHITUNGAN <i>POWER LOSS</i>	27
BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI DAN PERHITUNGAN	32
4.1 ANALISIS HASIL PEMILIHAN <i>CNT</i>	32
4.2 ANALISIS HASIL SIMULASI	32
4.3 ANALISIS HASIL PERHITUNGAN <i>POWER LOSS</i>	34
BAB 5 KESIMPULAN	37
DAFTAR ACUAN	38
DAFTAR PUSTAKA	40
LAMPIRAN	41

## DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1 Struktur *CNT*
- Gambar 2.2 *Bundle SWNT*
- Gambar 2.3 Energi *gap* vs diameter pada *CNT*
- Gambar 2.4 *Work function single-wall CNT*
- Gambar 2.5 Skematik dari pita valensi pada *silicon*
- Gambar 2.6 Konsentrasi *carrier* instrinsik pada dua temperatur
- Gambar 2.7 Material Semikonduktor (Si) yang *didoping* oleh bahan impuritis untuk menghasilkan *n* dan tipe-p
- Gambar 2.8 Diagram pita energi untuk metal dan semikonduktor tipe-n
- Gambar 2.9 Posisi *Fermi level* pada semikonduktor sebagai fungsi konsentrasi *doping*
- Gambar 2.10 Struktur solar sel
- Gambar 2.11 Karakteristik I-V pada iluminasi solar sel
- Gambar 2.12 Kurva I-V menunjukkan arus *short-circuit*
- Gambar 2.13 Kurva I-V menunjukkan tegangan *open-circuit*
- Gambar 2.14 Grafik sel dengan nilai *Fill Factor* yang tinggi : *output* arus dan daya
- Gambar 2.15 Gambar untuk menghitung besarnya *power loss* akibat adanya resistensi *lateral* pada *top diffused layer*
- Gambar 3.1 Perancangan *top contact* metal pada solar sel
- Gambar 3.2 Solar sel dengan *CNT(3,3)* sebagai *top contact* metal
- Gambar 3.3 Perancangan solar sel
- Gambar 3.4 *Work function CNT*
- Gambar 3.5 Diagram energi pada semikonduktor (permukaan divais solar sel)
- Gambar 3.6 Tampilan *GUI* untuk perhitungan besar konsentrasi *doping*, dan jenis hubungan yang dibentuk
- Gambar 3.7 Grafik ketika *doping* konsentrasi dalam keadaan maksimum
- Gambar 3.8 Grafik ketika besar konsentrasi *doping* pada semikonduktor tipe-n kurang dari konsentrasi *doping* maksimum

Gambar 3.9 Grafik ketika besar konsentrasi *doping* lebih dari konsentrasi *doping* maksimum

Gambar 3.10 Grafik hubungan antara semikonduktor *intrinsik* dengan *CNT* (3,3)



## DAFTAR LAMPIRAN

		Hal
Lampiran 1	<i>Listing</i> program perhitungan besar konsentrasi <i>doping</i> pada semikonduktor tipe-n	42

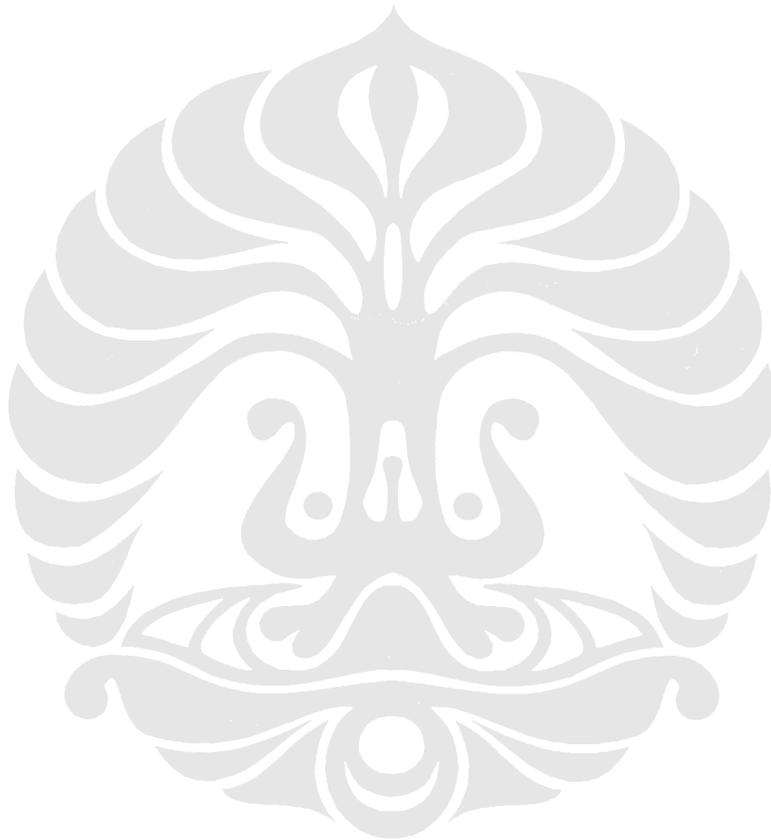


## DAFTAR ISTILAH

<i>Diffusion length</i>	Jarak yang ditempuh pembawa muatan selama life time.
<i>Divais</i>	Bahan semikonduktor yang sudah diberikan pola tertentu untuk menghasilkan fungsi tertentu sesuai dengan yang diinginkan perancangannya.
<i>Donor</i>	<i>Impuritas</i> yang menyumbangkan sejumlah elektron pada bahan semikonduktor.
<i>Doped layer</i>	Lapisan yang diberi <i>doping</i> .
<i>Doping</i>	Material pembentuk divais yang dicampurkan ke dalam bahan semikonduktor.
<i>Shading/shadowing</i>	Efek yang terjadi karena terhalangnya sinar matahari oleh <i>top contact</i> metal.
<i>Field Emission (FE)</i>	Mekanisme aliran elektron pada hubungan antara metal dengan semikonduktor tipe-n dengan <i>doping</i> tinggi ( $ND \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ).
<i>Generation</i>	Peristiwa lepasnya elektron dari ikatannya sehingga terbentuk pasangan elektron bebas dan hole.
<i>Interfacial</i>	Daerah antara satu proses dengan proses lainnya.
<i>Konduktivitas</i>	Tingkat hantar jenis suatu material konduktor listrik.
<i>Konversi</i>	Pengubahan suatu bentuk energi menjadi bentuk lain.
<i>Mobilitas</i>	Ukuran yang dipergunakan untuk menyatakan kemampuan suatu partikel untuk bergerak dalam suatu material.
<i>Carrier</i>	Muatan pembawa dalam suatu bahan semikonduktor.
<i>Photon</i>	Energi dari radiasi cahaya.
<i>Thermionic Emission</i>	Mekanisme aliran elektron pada hubungan antara metal dengan semikonduktor tipe-n dengan <i>doping</i> rendah ( $ND \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ).
<i>Thermionic-field Emission (TFE)</i>	Mekanisme aliran elektron pada hubungan antara metal dengan semikonduktor tipe-n dengan <i>doping</i> $10^{17} \leq ND \leq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

*Transparansi* Tingkat kemampuan suatu material untuk meneruskan cahaya yang melewatinya.

*Uniform* Memiliki sifat yang seragam atau sama.



## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
A	Panjang <i>fraksional</i> sel	cm
A	Luas penampang konduktor metal	cm <sup>2</sup>
A**	<i>Konstanta Richadson</i>	A/cm <sup>2</sup> /K <sup>2</sup>
B	Lebar <i>fraksional</i> sel	cm
FF	<i>Fill Factor</i>	
h	<i>Konstanta Planck</i>	J.s
I	Arus Listrik	A
I <sub>D</sub>	Arus yang melalui <i>p-n junction</i>	A
I <sub>L</sub>	Arus <i>iluminasi</i>	A
I <sub>m</sub>	Arus maksimum <i>power point</i>	A
I <sub>s</sub>	Arus saturasi <i>p-n junction</i>	A
I <sub>sc</sub>	Arus <i>short circuit</i>	A
J	Rapat Arus listrik	A/cm <sup>2</sup>
K	<i>Konstanta Boltzman</i>	J/K
kT	Energi <i>Thermal</i>	eV
l	Panjang konduktor metal	cm
m	Massa <i>electron</i>	kg
m*	Massa <i>electron</i> efektif	kg
N <sub>D</sub>	<i>Densitas impuritas donor</i>	cm <sup>-3</sup>
P	Daya	W
P <sub>in</sub>	Daya yang diberikan matahari	W
P <sub>cf</sub>	<i>Contact loss</i>	%
P <sub>sb</sub>	<i>Busbar Shadowing loss</i>	%
P <sub>sf</sub>	<i>Finger Shadowing loss</i>	%
P <sub>rb</sub>	<i>Busbar resistive loss</i>	%
P <sub>rf</sub>	<i>Finger resistive loss</i>	%
P <sub>tl</sub>	<i>Top layer loss</i>	%

Q	Besar muatan listrik	C
R	Resistensi	$\Omega$
S	Jarak <i>spacing</i> antar <i>finger</i>	cm
T	Temperatur	K
t	Tebal <i>sheet</i>	$\mu\text{m}$
$t_b$	Transparansi <i>busbar</i>	
$t_f$	Transparansi <i>finger</i>	
V	Tegangan	V
$V_m$	Tegangan maksimum <i>power point</i>	V
$V_{oc}$	Tegangan <i>open circuit</i>	V
$v_{oc}$	Normalisasi $V_{oc}$	V
$W_b$	Lebar <i>busbar</i>	cm
$W_f$	Lebar <i>finger</i>	cm
$\rho$	Resistivitas	$\Omega\cdot\text{cm}$
$\rho_c$	<i>Specific contact resistance</i>	$\Omega\cdot\text{cm}^2$
$\rho_i$	<i>Specific interfacial resistance</i>	$\Omega\cdot\text{cm}^2$
$\rho_s$	<i>Sheet resistance</i>	$\Omega/\text{sq}$
$\rho_{smb}$	<i>Sheet resistance</i> dari <i>busbar</i>	$\Omega/\text{sq}$
$\eta$	Efisiensi divais solar sel	%
$\Phi_B$	<i>Barrier height diode schottky</i>	V

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Kelangkaan sumber energi yang dialami oleh negara-negara yang ada di dunia menyebabkan mereka mengharuskan melakukan diversifikasi sumber energi di bumi. Solar sel adalah salah satu teknologi yang ditemukan untuk mewujudkan ide diversifikasi energi tersebut. Hingga tahun 2007, efisiensi solar sel dari bahan *Silicon crystalline* yang telah dihasilkan dalam skala laboratorium mencapai 42,8%[2].

Efisiensi solar sel dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya yaitu disain *top contact metal*. Disain *Top contact metal* akan menimbulkan beberapa *power loss*, diantaranya *shadowing loss*. *Shadowing loss* adalah *power loss* akibat terhalangnya cahaya matahari yang akan mengenai permukaan divais. *Shadowing loss* dapat diminimumkan dengan mendisain *spacing* antar *finger* sebesar mungkin.

Metode lain untuk meminimumkan *shadowing loss* yaitu dengan memilih bahan *top contact metal* yang dapat meneruskan cahaya matahari, sehingga cahaya matahari masih dapat mengenai permukaan divais solar sel yang tertutup oleh bahan *top contact metal*. Salah satu contoh bahan yang memiliki potensi sebagai *top contact metal* adalah *CNT* yang dapat menghasilkan *shadowing loss* yang minimum.

*CNT* merupakan material berukuran dalam skala *nano*, karena ukurannya, *CNT* bersifat transparan terhadap cahaya matahari[3] sehingga dapat meneruskan cahaya matahari. Dengan begitu *CNT* dapat diasumsikan memiliki koefisien transparansi sebesar 1, sehingga akan meminimumkan *shadowing loss*.

## 1.2 TUJUAN PENULISAN

Tujuan penulisan skripsi yaitu mendisain *top contact metal* pada solar sel silikon menggunakan *CNT* serta menganalisis rugi-rugi yang diakibatkannya.

### **1.3 BATASAN MASALAH**

Lingkup permasalahan skripsi dibatasi pada disain penggunaan *CNT* sebagai *top contact metal* dengan pendekatan secara teori.

### **1.4 METODOLOGI PENULISAN**

Metode yang dipakai dalam penulisan skripsi yaitu mencari bahan-bahan yang berhubungan dengan tema skripsi. Setelah itu dilakukan perhitungan dan simulasi dengan mengaplikasikan parameter-parameter yang berhubungan dengan kontak antara metal dengan divais solar sel. Perhitungan dan simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MatLab*.

### **1.5 SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan skripsi dibagi dalam lima bab yaitu sebagai berikut: BAB 1 berisi pendahuluan yang di dalamnya mencakup latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan; BAB 2 berisi dasar teori yang menjelaskan karakteristik metal *CNT*, semikonduktor, kontak antara metal dan semikonduktor dan efisiensi solar sel; BAB 3 berisi metode perancangan, perhitungan dan simulasi *doping* pada semikonduktor dan *power loss* pada kontak antara metal dan semikonduktor; BAB 4 berisi analisis dari hasil yang diperoleh; BAB 5 berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil riset.

## BAB 2 DASAR TEORI

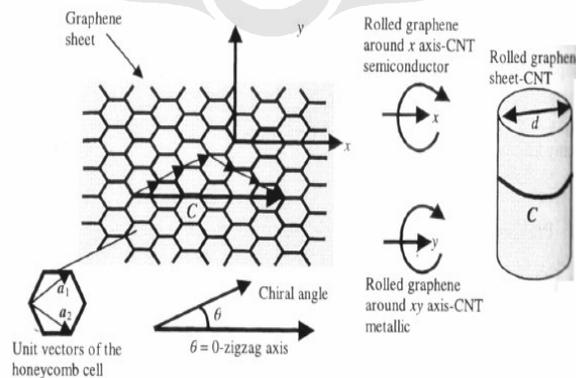
### 2.1 KARAKTERISTIK CNT

#### 2.1.1 Single Wall CNT

*Single Wall Carbon nanotube (SWNT)* yaitu CNT yang hanya terdiri atas satu dinding ( terdiri atas satu lapis atom ). SWNT biasanya dalam bentuk *bundle* dimana antar SWNT terjadi gaya *van der Waals*. SWNT dapat digambarkan seperti lembaran struktur grafit ( *graphene* ) yang menggulung dengan diameter dalam ukuran *nano* dan panjangnya hingga beberapa mikron. SWNT terdiri atas dua bagian yaitu bagian dinding dan bagian ujung penutup. Struktur ikatan atom karbon pada kedua bagian tersebut berbeda, ikatan atom karbon pada bagian dinding berbentuk heksagon dan bagian ujung berbentuk *pentagon*.

SWNT memiliki struktur yang berbeda-beda tergantung bagaimana lembaran *graphene* menggulung. Cara Penggulungan *graphene* membentuk silinder ditentukan oleh pasangan  $n$  dan  $m$ , hal ini dinamakan vektor *chiral*, dimana  $n$  dan  $m$  adalah bilangan unit vektor. Jika  $m = 0$  atau  $n = 0$  maka struktur yang dibentuk adalah *zig-zag*, struktur ini memiliki sudut *chiral*  $0^\circ$ ,  $n = m$  membentuk struktur *armchair* dan memiliki sudut *chiral*  $30^\circ$  dan  $n \neq m$  dinamakan *chiral* yang memiliki sudut *chiral* antara  $0^\circ$  dan  $30^\circ$ .

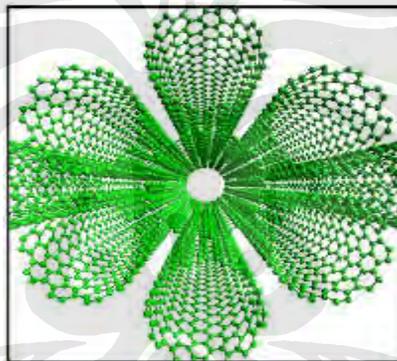
CNT bersifat metal jika perbedaan nilai  $n$  dan  $m$  dapat dibagi tiga atau berstruktur *armchair*. Struktur CNT ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur CNT[4]

*CNT* akan memiliki karakteristik sebagai metal jika berstruktur *armchair* atau jika perbedaan nilai  $n$  dan  $m$  dapat dibagi dengan 3, sedangkan selain itu memiliki karakteristik sebagai semikonduktor. Hal ini berhubungan dengan *Bandstructure* pada *graphene*. *Bandstructure graphene* di-plot sebagai fungsi dari  $k_x$  dan  $k_y$  dimana  $k$  ini adalah vektor pergerakan elektron sepanjang solid-material. *Graphene* itu sendiri merupakan material semi-metal sehingga tingkat energi *Ferminya* hanya terdiri dari titik-titik. Bila perpotongan garis  $k_y$  memotong *Fermi point* dari *bandstructure grapheme*, maka *CNT* tersebut bersifat metal dan bila tidak memotong maka *CNT* bersifat semikonduktor dengan nilai *bandgap* yang dapat ditentukan dari dua buah garis yang mendekati *fermi point*.

*CNT* disintesis dalam bentuk *bundle*. Gambar 2.2 menunjukkan *CNT* dalam bentuk *bundle*.



Gambar 2.2 *bundle SWNT*[5]

### 2.1.2 Resistivity dan Maximum current density

*CNT* memiliki resistivitas dalam orde  $10^{-4}$  ohm cm pada 300K[6]. Nilai resistivitas tersebut dua orde lebih besar dibandingkan dengan Aluminium yang memiliki resistivitas  $2.665 \times 10^{-6}$  ohm cm[7].

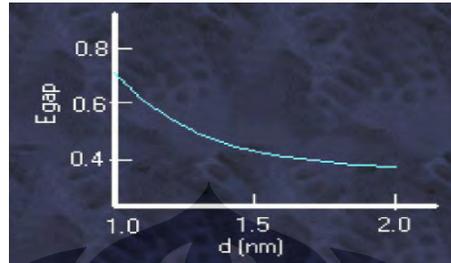
Selain resistivitas, densitas arus dalam *CNT* juga telah dihitung yang hasilnya menunjukkan bahwa *CNT* mampu melewatkan arus listrik hingga orde  $10^{13}$  A/cm<sup>2</sup>[5].

### 2.1.3 Band gap

*CNT* memiliki *band gap* yang dipengaruhi oleh diameter. Hubungan keduanya dapat dirumuskan melalui Persamaan (2.1)[4]:

$$E_{gap} = \frac{2y_0 a_{cc}}{d} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan  $y_0$  adalah energi ikatan antar atom C yaitu  $(2.7 \pm 0.1)$  eV,  $a_{cc}$  adalah jarak terdekat antar atom C yaitu 0.142 nm dan  $d$  adalah diameter *CNT*. Grafik yang menunjukkan hubungan antara energi *gap* dan diameter ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Energi *gap* vs diameter pada *CNT*[4]

#### 2.1.4 Sifat Tembus Cahaya

Suatu bahan atau material akan memiliki sifat tembus cahaya dipengaruhi oleh dua hal [3] yaitu pertama jenis material tersebut yang menyebabkan material tersebut bersifat tembus cahaya, kedua dari ukuran material, dengan ukuran yang tertentu (mencapai batas ) ukuran yang menyebabkan material tersebut bersifat tembus cahaya. Material yang memiliki celah *gap/band gap* dengan nilai tertentu akan memiliki kemungkinan transparan terhadap cahaya tertentu tergantung oleh besar energi *gap* yang dimiliki material tersebut. Sebagai contoh TCO (*Transparent Conducting Oxide*) memiliki besar energi *gap* 3,2 eV, maka material TCO akan tembus oleh cahaya yang memiliki energi kurang dari 3,2 eV yaitu cahaya yang memiliki panjang kurang dari 320 nm. Material dengan ukuran tertentu juga dapat memiliki sifat tembus cahaya jika memiliki ukuran dibawah 150 nm[3]. Rowell *at al* [8] telah berhasil memfabrikasi *CNT* dengan cara *printed film* dari *CNT* di atas *plastic* sehingga *CNT* tersebut berperan sebagai elektroda transparan yang dapat meneruskan 85% cahaya yang memiliki panjang 550 nm.

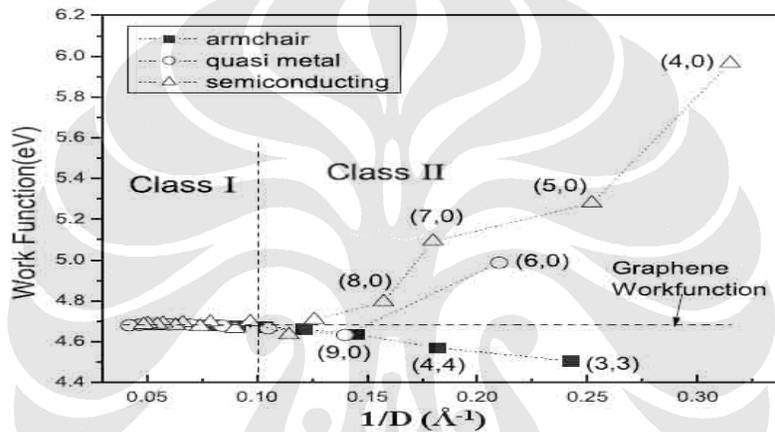
#### 2.1.5 Work function

*Work function* merupakan perbedaan energi antara energi pada *Vacuum level* ( $E_0$ ) dengan energi *Fermi* ( $E_F$ ) pada suatu material. Besar *work function* yang dimiliki oleh suatu benda akan menentukan tipe hubungan yang dibentuk, jika material tersebut mengalami kontak dengan material lain. Hubungan/kontak yang dibentuk dapat berupa *ohmic contact* atau *non-ohmic contact*.

*Work Function single-wall CNT* dapat diklasifikasikan menjadi dua kelas[9] yaitu:

- 1) Kelas I (Diameter ( $D$ )  $> 1\text{nm}$ ), besar *work function* yaitu  $4.66\text{ eV}$ , besar *work function* ini bersifat stabil dan tidak dipengaruhi oleh *chirality CNT*.
- 2) Kelas II (Diameter ( $D$ )  $< 1\text{nm}$ ), *work function* kelas II dipengaruhi oleh *chirality CNT*. *CNT* dengan *chirality*  $(n,0)$  memiliki *work function* yang besarnya naik secara drastic seiring dengan menurunnya diameter dan *CNT* dengan *chirality*  $(n,n)$  memiliki *work function* yang besarnya turun secara drastic seiring dengan turunnya diameter.

Besar *work function* dengan berbagai *chirality* ditunjukkan pada Gambar 2.4:



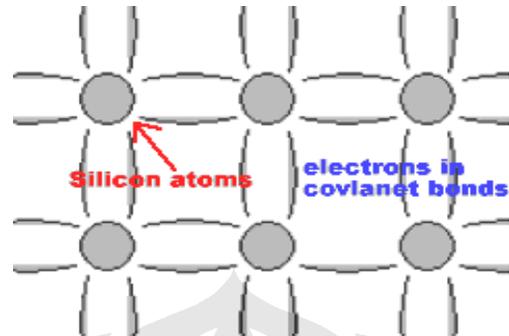
Gambar 2.4 Besar *Work function* single-wall CNT[9]

## 2.2 SEMIKONDUKTOR

Suatu bahan dikatakan sebagai bahan semikonduktor jika memiliki hantaran diantara penghantar dan isolator dan juga konduktivitas bahan tersebut dapat dikontrol secara presisi dengan pengaturan *doping*. Pada temperatur kamar, tahanan penghantar yang baik sekitar  $10^{-6}\ \Omega\text{cm}$ , sedangkan tahanan semikonduktor berkisar dari  $10^{-3}$  sampai dengan  $10^6\ \Omega\text{cm}$ . Isolator yang baik sebaiknya mempunyai tahanan sekitar  $10^{12}\ \Omega\text{cm}$ [10].

Jika penghantaran semikonduktor terutama hanya ditentukan oleh *carrier* yang dibangkitkan oleh panas, maka semikonduktor ini disebut semikonduktor murni atau *intrinsik*. Jika semikonduktor pada kondisi  $0^\circ\text{K}$ , maka semikonduktor akan bersifat sebagai isolator, karena tidak ada elektron yang bebas pada pita konduksi, sebaliknya jika semikonduktor dijaga pada suhu kamar, maka akan ada

elektron yang berpindah ke pita konduksi sebagai elektron yang bebas. Proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 skematik dari pita valensi pada *silicon* [11]

Contoh bahan semikonduktor yaitu bahan dari Golongan IV yaitu Si dan Ge. Untuk mendapatkan elektron/*hole* bebas maka diperlukan energi tambahan, misalnya dari panas atau cahaya. Penambahan *doping* terhadap bahan semikonduktor juga dapat meningkatkan jumlah elektron atau hole. Semikonduktor yang *didoping* oleh bahan lain dinamakan semikonduktor *ekstrinsik*. Pada umumnya unsur yang digunakan sebagai *dopant* semikonduktor Si dan Ge yaitu dari grup III dan V. Unsur dari grup III yaitu Boron, Indium, Gallium, dan Aluminium, sedangkan dari grup V yaitu Fosfor, Antimon dan Arsenik. Berdasarkan jenis *dopant* yang digunakan maka semikonduktor ekstrinsik dibagi menjadi dua, yaitu semikonduktor tipe-n dan tipe-p. Semikonduktor tipe-n adalah semikonduktor yang memiliki elektron berlebih yaitu jika Si dan Ge *didoping* oleh unsur dari grup V. Semikonduktor tipe-p adalah semikonduktor yang kekurangan elektron yaitu jika semikonduktor golongan IV *didoping* oleh unsur-unsur dari grup III.

Teknologi semikonduktor adalah teknologi dasar yang digunakan untuk berbagai macam divais termasuk salah satunya yaitu solar sel. Hal terpenting suatu material untuk dijadikan sebagai material pada divais solar sel yaitu:

- a. *Band gap*
- b. Jumlah *electron* bebas untuk hantaran
- c. Pembangkitan dan rekombinasi sebagai respons terhadap cahaya matahari yang menyinari material tersebut.

Beberapa parameter pada semikonduktor yaitu:

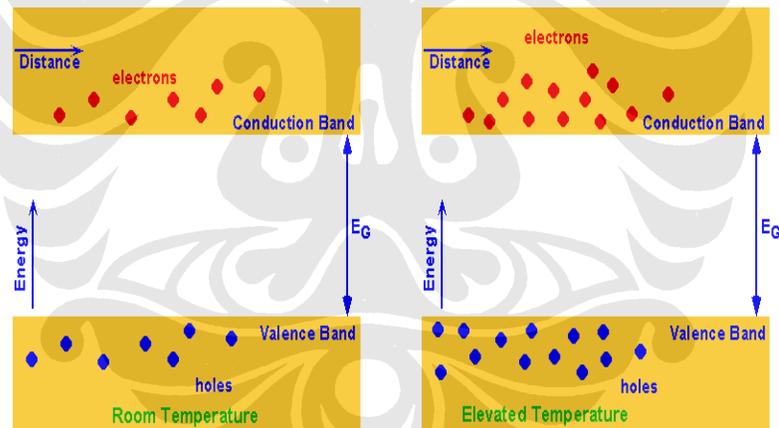
### 2.2.1 Band gap

*Band gap* adalah perbedaan energi antara satu pita dengan pita lain dalam *band* diagram suatu material.

### 2.2.2 Konsentrasi *carrier intrinsic*

Pemberian energi termal dapat menyebabkan berpindahnya elektron dari pita valensi menuju pita konduksi, hal ini mengakibatkan adanya *carrier* yang bebas pada kedua pita yaitu elektron pada pita konduksi dan *hole* pada pita valensi. Konsentrasi *carrier* ini dinamakan konsentrasi instrinsik ( $n_i$ ). Konsentrasi *carrier* instrinsik adalah jumlah elektron pada pita konduksi atau jumlah *hole* pada pita valensi pada material *intrinsic*. Jumlah ini dipengaruhi oleh *band gap* dan temperatur pada material. Semakin tinggi temperatur pada material, maka semakin banyak pula jumlah elektron yang berpindah ke pita konduksi.

Gambar 2.6 menunjukkan pengaruh temperatur terhadap jumlah elektron.

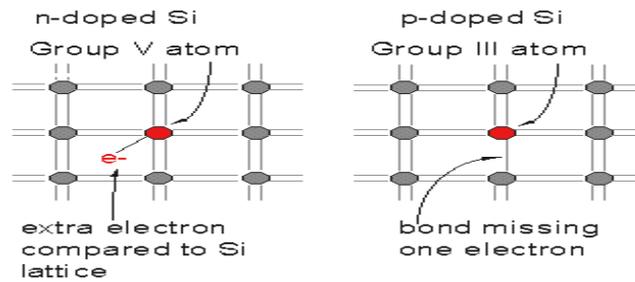


Gambar 2.6 Konsentrasi *carrier* instrinsik pada dua temperatur [11]

### 2.2.3 Doping

Material semikonduktor golongan IV yang *didoping* dengan unsur dari golongan V akan membentuk semikonduktor tipe-n dan jika *didoping* dengan unsur dari golongan III akan menghasilkan semikonduktor tipe-p.

Gambar 2.7 menunjukkan ketika material semikonduktor golongan IV *didoping* oleh unsur-unsur dari golongan V dan golongan III.



Gambar 2.7 Material Semikonduktor (Si) yang didoping oleh bahan impuritis untuk menghasilkan tipe-n dan tipe-p [11]

### 2.2.4 Penyerapan cahaya

Jika *photon* yang berasal dari cahaya matahari mengenai permukaan divais solar sel maka kemungkinan yang akan terjadi adalah:

- Photon* akan dipantulkan
- Photon* akan ditransmisikan melalui divais
- Photon* akan diserap dan membangkitkan elektron sehingga menghasilkan elektron bebas.

Kemungkinan yang diharapkan terjadi pada solar sel yaitu kemungkinan yang c. Ketiga kemungkinan tersebut terjadi berdasarkan energi yang dimiliki oleh *photon*.

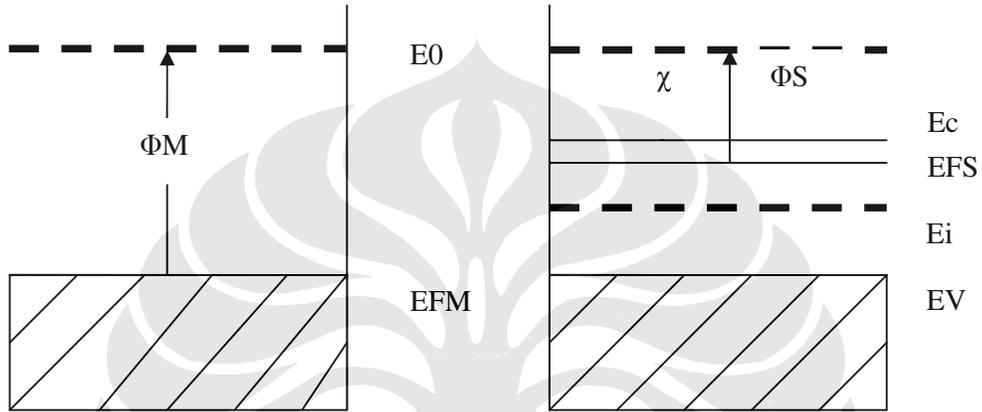
- Jika  $E_{ph} < E_G$  (*band gap*), maka energi *photon* akan ditransmisikan melalui divais.
- $E_{ph} = E_G$ , maka energi *photon* akan tepat diserap dan menghasilkan elektron-hole.
- $E_{ph} > E_G$ , *photon* dengan energi ini tidak hanya melepaskan elektron tetapi memberikan sisa energinya kepada elektron sehingga elektron akan memiliki energi yang lebih besar.

Kekuatan suatu material untuk menyerap cahaya dengan berbagai panjang gelombang dinamakan *koefisien* penyerapan. *Koefisien* penyerapan dipengaruhi oleh panjang gelombang dan bahan. Ketergantungan ini menyebabkan berbedanya panjang gelombang yang dapat menembus satu material dengan jarak yang berbeda-beda (kedalaman material).

### 2.3 METAL-SEMICONDUCTOR CONTACT

*Metal-semiconductor (MS) contact* memiliki peranan penting pada divais *solid-state*. Hal ini karena untuk berhubungan dengan bagian *eksternal*, maka suatu divais membutuhkan suatu penghubung yaitu metal.

Hubungan *MS contact* dapat dijelaskan dengan menggunakan teori pita energi yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



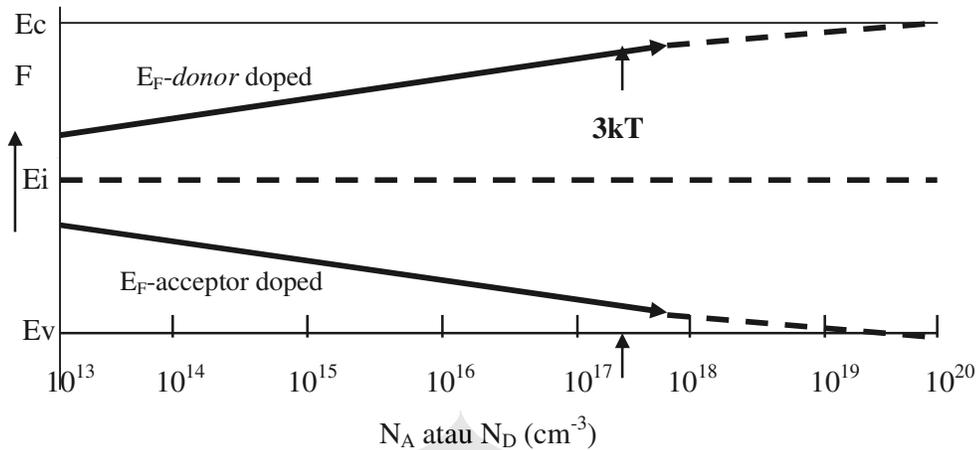
Gambar 2.8 diagram pita energi untuk metal (kiri) dan semikonduktor tipe-n (kanan)[10]

Dalam *MS contact*, *work function* memiliki peranan penting. *Work function* adalah perbedaan energi antara energi referensi ( $E_0$ ) dengan energi *Fermi* ( $E_F$ ). *Work function* metal terentang dari 3.66 eV (Magnesium) hingga 5.15 eV (Nikel). Persamaan yang berhubungan dengan *Work function* semikonduktor terdapat pada Persamaan (2.2)[10].

$$\Phi_S = \chi + (E_C - E_F) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan  $\chi$  adalah afinitas elektron yang merupakan perbedaan antara energi referensi dan energi pada pita konduksi ( $E_0 - E_C$ ). Besar afinitas elektron berbeda-beda untuk tiap bahan semikonduktor, yaitu 4.0 eV (Ge), 4.3 eV (Si) dan 4.07 eV (GaAs).

Dari Persamaan (2.2), *work function* semikonduktor dapat berubah besarnya tergantung besar dari parameter ( $E_C - E_F$ ). Besar ( $E_C - E_F$ ) dapat berubah dengan *doping* yang dilakukan pada bahan semikonduktor. Pengaruh *doping* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Posisi *fermi level* pada semikonduktor sebagai fungsi konsentrasi *doping*[10]

Gambar 2.9, didapat dari Persamaan 2.3 dan 2.4:

$$E_F - E_i = kT \ln (N_D / n_i) \dots\dots\dots (2.3)$$

$$E_i - E_F = kT \ln (N_A / n_i) \dots\dots\dots (2.4)$$

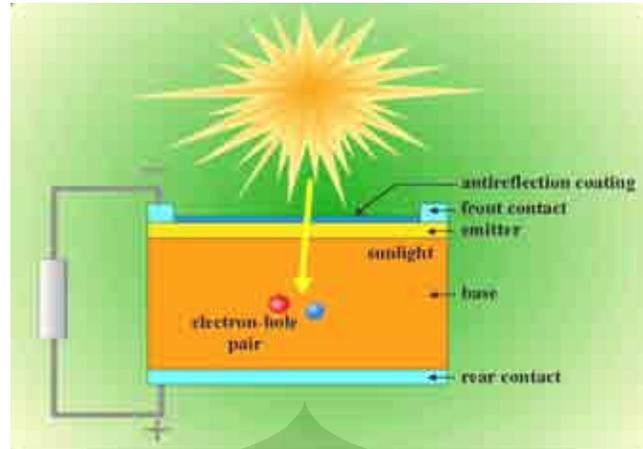
Berdasarkan *Work function*, kontak antara metal dan semikonduktor terdiri dari dua jenis yaitu:

1. *Ohmic-contact*, terjadi jika  $\Phi_M < \Phi_S$  untuk tipe-n dan  $\Phi_M > \Phi_S$  untuk p-type
2. *Rectifying contact*, terjadi jika  $\Phi_M > \Phi_S$  untuk tipe-n dan  $\Phi_M < \Phi_S$  untuk p-type

## 2.4 SOLAR SEL

### 2.4.1 Prinsip Kerja Solar Sel

Pada dasarnya solar sel terdiri dari *p-n junction*, prinsip kerja solar sel yaitu cahaya matahari (*photon*) dengan energi tertentu mengenai permukaan divais solar sel, jika energi *photon* lebih besar dari energi *band gap* bahan solar sel, maka energi *photon* tersebut akan mengeksitasi elektron sehingga dihasilkan pasangan elektron-hole. Jika energi *photon* cukup besar, maka akan dihasilkan banyak pasangan elektron-hole, sehingga akan terjadi pengumpulan muatan sejenis yang apabila divais dihubungkan dengan beban akan mengalir arus listrik. Prinsip kerja solar sel dapat dijelaskan pada Gambar 2.10.



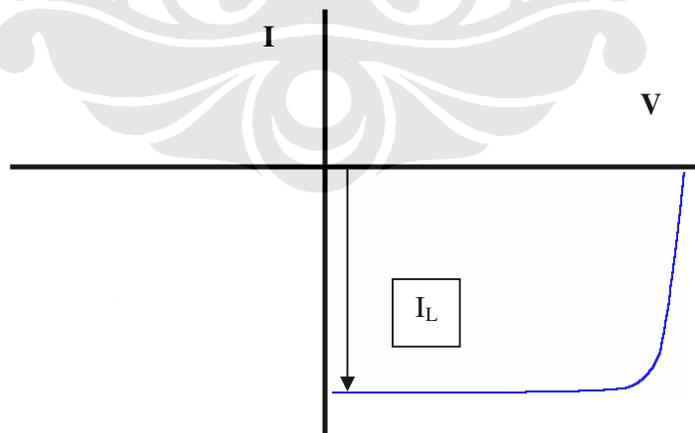
Gambar 2.10 struktur solar sel[11]

## 2.4.2 Parameter solar sel

Solar sel memiliki beberapa parameter diuraikan dibawah ini.

### 1. Kurva karakteristik I-V

Dalam pembahasan mengenai divais solar sel, kurva I-V pada dasarnya merupakan kurva karakteristik arus-tegangan yang menggambarkan unjuk kerja suatu divais solar sel. Kurva I-V merupakan superposisi kurva I-V dioda solar sel pada keadaan gelap dengan arus yang dibangkitkan oleh cahaya. Kurva karakteristik melalui kuadran IV, sehingga daya dapat dihasilkan dari divais, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11



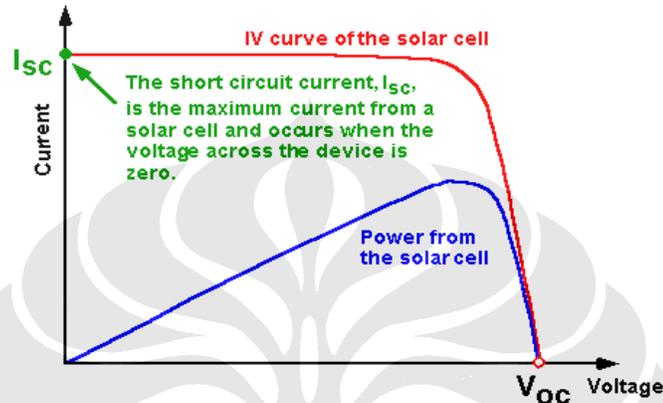
Gambar 2.11 Karakteristik I-V pada iluminasi solar sel.[11]

Gambar 2.11 menunjukkan saat divais dikenakan iluminasi dengan cahaya konstan. Pada saat terjadi iluminasi cahaya, maka kurva karakteristik I akan bergerak

sejauh  $I_L$  hal ini disebabkan adanya pengumpulan elektron yang dibangkitkan pada proses *generation*.  $I_L$  merupakan arus hasil iluminasi cahaya matahari.

## 2. Arus *short-circuit*

Arus *short circuit* disebabkan oleh proses *generation* dan pengumpulan dari *carrier* yang dihasilkan dari iluminasi oleh cahaya matahari. Kurva I-V yang menunjukkan arus *short circuit* dijelaskan pada Gambar 2.12.

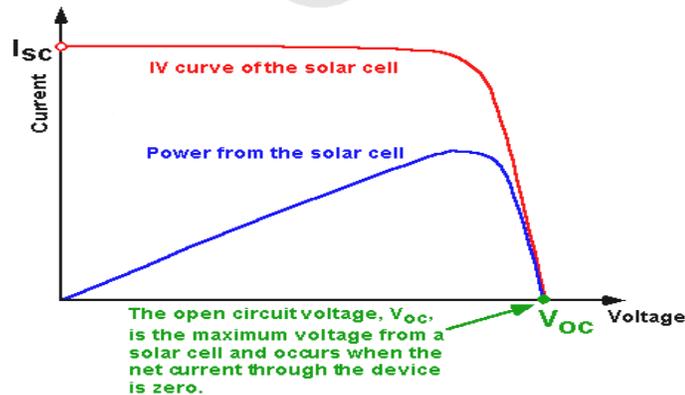


Gambar 2.12 kurva I-V menunjukkan arus short-circuit[11]

Arus *short circuit* berbanding lurus terhadap intensitas cahaya matahari yang menyinari permukaan divais. Faktor-faktor yang mempengaruhi arus *short circuit* yaitu luas daerah permukaan divais solar sel, jumlah *photon*, spektrum pancaran cahaya, karakteristik optik dan probabilitas pengumpulan.

## 3. Tegangan *open-circuit*

Tegangan *Open Circuit* ( $V_{oc}$ ) merupakan tegangan maksimum yang dapat dihasilkan oleh divais solar sel.  $V_{oc}$  berhubungan erat dengan besar arus yang dapat dihasilkan oleh divais solar sel. Kurva I-V yang menunjukkan tegangan *open circuit* dijelaskan pada Gambar 2.13



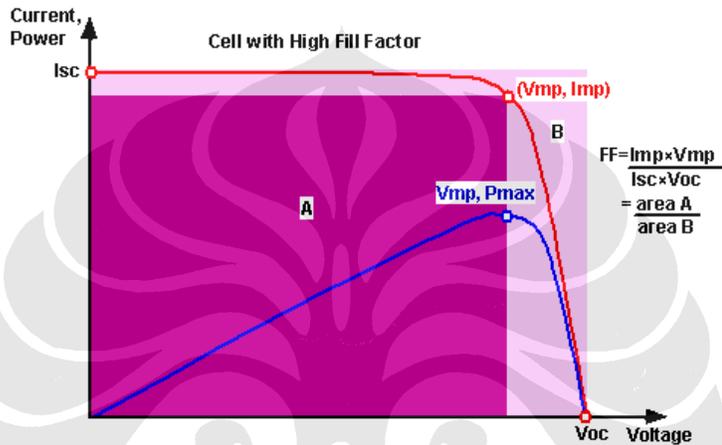
Gambar 2.13 kurva I-V menunjukkan tegangan open-circuit[11]

$V_{oc}$  akan meningkat secara logaritmis terhadap kenaikan intensitas cahaya matahari. Hubungan antara keduanya dapat dilihat pada Persamaan (2.5):

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right) \dots\dots\dots (2.5)$$

**4. Fill Factor**

*Fill factor* merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui kualitas suatu divais. Gambar 2.14 menjelaskan grafik suatu sel dengan nilai *fill factor*.



Gambar 2.14 Gambar suatu sel dengan nilai fill factor[11]

*Fill factor* akan menentukan besarnya daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh divais, sehingga akan menentukan besarnya arus dan tegangan maksimum *power point*. Pada Gambar 2.14 daerah yang dibentuk oleh  $V_m I_m$  jelas lebih kecil nilainya dibandingkan  $V_{oc} I_{sc}$ . Perbandingan antara  $V_m I_m$  dengan  $V_{oc} I_{sc}$  disebut *Fill factor*. Divais solar sel memiliki kualitas yang baik jika nilai dari *Fill factor* yang dimilikinya bernilai mendekati 1.

Untuk menghitung nilai dari *Fill factor* dapat digunakan Persamaan (2.6):

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc}} + 1 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan  $v_{oc}$  adalah normalisasi dari  $V_{oc}$  yang dinyatakan dengan Persamaan (2.7):

$$v_{oc} = \frac{q}{nkT} V_{oc} \dots\dots\dots (2.7)$$

Selain itu *Fill factor* dapat dihitung melalui Persamaan (2.8):

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \dots\dots\dots (2.8)$$

## 5. Efisiensi

Efisiensi adalah parameter yang menunjukkan kualitas unjuk kerja suatu divais solar sel yang didefinisikan sebagai perbandingan antara energi maksimum yang dapat dihasilkan oleh divais terhadap energi yang diterima dari matahari. Pengukuran efisiensi dipengaruhi oleh spektrum dan intensitas pancaran cahaya matahari dan temperatur solar sel, sehingga pengukuran efisiensi solar sel berbeda-beda pada tempat dan kondisi yang berbeda. Pada permukaan bumi, pada umumnya efisiensi solar sel diukur dengan menggunakan standar AM1,5 dengan suhu ruangan 25°C.

Untuk menghitung efisiensi divais solar sel dapat menggunakan Persamaan (2.9)

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.8) ke Persamaan (2.9) diperoleh Persamaan (2.10):

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \dots\dots\dots 2.10)$$

### 2.4.3 Top contact metal

#### *Series resistance*

*Series resistance* terdiri dari *contact resistance* antara bahan semikonduktor dengan *top contact metal*, resistensi bahan *top contact metal*, dan resistensi bahan semikonduktor.

*Contact resistance* dapat diminimalkan dengan memberikan *doping* konsentrasi *donor* yang tinggi pada *top diffused layer*, sedangkan resistensi *top contact metal* dapat dikurangi dengan menggunakan bahan metal yang memiliki resistivitas yang rendah sebagai bahan pembuatan *top contact metal*.

#### **Parameter top contact metal**

##### **1. Resistive loss**

*Resistive loss* adalah *power loss* yang diakibatkan oleh adanya resistivitas/hambat jenis konduktor metal. Besarnya resistivitas suatu bahan dipengaruhi oleh konduktivitas bahan tersebut.

Berdasarkan hukum resistivitas resistensi suatu bahan (R) dengan ukuran tertentu dirumuskan dengan Persamaan (2.11):

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan  $\rho$  = resistivitas /hambat jenis, l adalah ukuran panjang bahan, dan A adalah luas penampang bahan.

Dari Persamaan (2.11) diketahui bahwa resistensi suatu bahan dipengaruhi oleh resistivitas bahan dan ukuran bahan tersebut. Oleh karena itu untuk meminimumkan resistensi pada suatu bahan dapat dilakukan dengan melakukan pemilihan bahan yang digunakan sebagai *top contact metal* dan mendesain konduktor metal yang optimum sesuai fungsi dan kegunaannya.

**2. Shadowing loss**

*Shadowing loss* adalah *power loss* yang diakibatkan oleh tertutupnya sebagian permukaan divais solar sel oleh *top contact metal*, sehingga menghalangi cahaya matahari sampai ke permukaan divais. *Shadowing loss* didefinisikan sebagai rasio antara luas daerah permukaan yang tertutup oleh *top contact metal* dengan luas daerah permukaan divais secara keseluruhan. *Shadowing loss* dipengaruhi oleh transparansi *top contact metal* yang menutup permukaan divais. Nilai transparansi berkisar antara 0 dan 1. Transparansi yang bernilai 0 mengakibatkan daerah yang tertutup oleh *top contact metal* berada dalam keadaan gelap sempurna, sedangkan jika bernilai 1, maka dapat dikatakan bahwa daerah permukaan divais seolah-olah tidak tertutup oleh *top contact metal* ataupun penghalang lainnya. Material dengan nilai transparansi 1 mengakibatkan tidak adanya *shadowing loss*.

Perhitungan *Shadowing loss* dengan koefisien transparansi *top contact metal* dirumuskan dengan Persamaan (2.12) dan (2.13)[12]

Untuk *shadowing loss* pada busbar ( $P_{sb}$ ):

$$P_{sb} = (1 - t_b) \frac{n_t W_b}{W_c} \dots\dots\dots (2.12)$$

$t_b$  adalah koefisien transparansi busbar,  $n_t$  adalah jumlah busbar yang digunakan pada divais solar sel,  $W_b$  adalah lebar busbar dan  $W_c$  adalah lebar divais solar sel, sedangkan *shadowing loss* pada finger ( $P_{sf}$ ):

$$P_{sf} = (1 - t_f) \frac{W_f}{S} \dots \dots \dots (2.13)$$

$t_f$  adalah koefisien transparansi *finger*,  $W_f$  adalah lebar *finger*, dan  $S$  adalah jarak *spacing* antar *finger*.

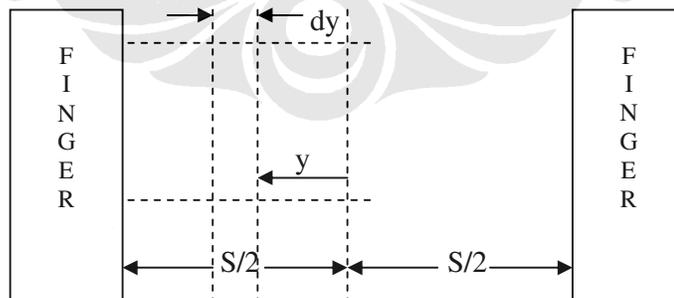
Dalam disain *top contact metal*, *shadowing loss* cukup berpengaruh, yaitu diperkirakan maksimum 13,1% [1].

### 3. Top layer loss

Arus yang berhasil dibangkitkan oleh divais solar sel melalui proses *generation* akan mengalir secara tegak lurus, dan salah satu arah yang dituju adalah ke atas. Setelah mencapai *top diffused layer*, arus akan mengalir secara lateral agar mampu mencapai *top contact metal*. Adanya aliran arus tersebut menyebabkan pada *top diffused layer* terjadi resistensi yang disebut dengan *lateral resistance*.

*Lateral resistance* dapat dihitung sebagai fungsi dari jarak *spacing* antar *finger*. Karena jarak yang ditempuh oleh elektron yang mengalir pada emitter pada kenyataannya tidak konstan. Arus dapat berasal dari daerah yang dekat dengan letak *top contact metal* atau sebaliknya.

*Sheet resistivity* dari *top diffused layer* akan sangat berpengaruh terhadap jarak *spacing* antar *finger*. Hal ini berhubungan dengan perhitungan *power loss* yang disebabkan oleh *top layer loss*. Untuk menghitung besarnya *top layer loss*, dapat dilakukan dengan menggunakan analisis Gambar 2.15.



Gambar 2.15 gambar untuk menghitung besarnya *power loss* akibat adanya resistensi lateral pada *top diffused layer* [11]

Berdasarkan Gambar 2.15 besarnya incremental *power loss* pada bagian  $dy$  dapat diketahui dengan Persamaan (2.14) dan (2.15);

$$dP = I^2 dR \dots\dots\dots (2.14)$$

$$dR = \frac{\rho_s}{b} dy \dots\dots\dots (2.15)$$

$\rho_s$  adalah *sheet resistance* dari *top diffused layer*,  $b$  adalah panjang *finger*, dan  $y$  adalah jarak *spacing* antara dua buah *grid finger*, sedangkan  $I$  merupakan besarnya aliran arus lateral pada *top diffused layer* yang didefinisikan oleh Persamaan (2.16)

$$I = J \cdot b \cdot y \dots\dots\dots (2.16)$$

$J$  adalah densitas arus pada *Top diffused layer*.

Arus lateral akan mengalami peningkatan secara linear sampai maksimum pada daerah yang berada tepat dibawah *top contact metal*. Hal ini akan terjadi, jika kondisi iluminasi dari sinar matahari yang diterima oleh permukaan divais solar sel adalah *uniform*.

Besarnya *power loss* dapat dihitung dengan mengintegrasikan *incremental power loss* pada Persamaan (2.14) dalam bentuk Persamaan (2.17):

$$P_{loss} = \int I^2 dR \dots\dots\dots (2.17)$$

$$P_{loss} = \int_0^{S/2} \frac{J^2 b^2 y^2 \rho_s}{b} dy \dots\dots\dots (2.18)$$

$$P_{loss} = \frac{J^2 b \rho_s S^3}{24} \dots\dots\dots (2.19)$$

sedangkan pada *maximum power point* besarnya daya yang dapat dihasilkan dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.20):

$$P_m = V_{mp} \cdot J_{mp} \cdot b \cdot \frac{S}{2} \dots\dots\dots (2.20)$$

sehingga besarnya *lateral loss* maksimum yang merupakan *top layer loss* dapat dihitung dengan Persamaan (2.21):

$$P_{tl} = \frac{P_{loss}}{P_m} = \frac{\rho_s J_{mp}}{12 \cdot V_{mp}} S^2 \dots\dots\dots (2.21)$$

#### 4. Contact loss

*Contact loss* merupakan *power loss* yang terjadi karena adanya *contact resistance* yang terjadi antara *top contact metal* dengan *top diffused layer*. Dengan

kata lain hubungan antara keduanya adalah hubungan antara metal dengan semikonduktor. *Contact resistance* terdiri atas *contact resistivity* ( $\Omega$ ) dan *specific contact resistance*,  $\rho_c$  ( $\Omega\text{cm}^2$ ). Dalam penurunan rumus secara teoritis, istilah  $\rho_c$  digantikan oleh *specific interfacial resistance*  $\rho_i$ . Sedangkan  $\rho_c$  dipergunakan dalam pembahasan mengenai kontak antara metal semikonduktor secara riil.

*Specific interfacial resistance* dalam keadaan *thermionic emission* dapat dirumuskan dengan Persamaan (2.22):

$$\rho_i(TE) = \rho_1 e^{q\phi_B / kT} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dengan  $\rho_1$  didefinisikan oleh Persamaan (2.23)

$$\rho_1 = \frac{k}{qA^{**}T} \dots\dots\dots (2.23)$$

sedangkan pada kondisi *thermionic-field emission*,  $\rho_i$  dinyatakan oleh Persamaan (2.24):

$$\rho_i(TFE) = C_1 \rho_1 e^{q\phi_B / E_0} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dan untuk *field emission* dinyatakan oleh Persamaan (2.25)

$$\rho_i(FE) = C_2 \rho_1 e^{q\phi_B / E_{00}} \dots\dots\dots (2.25)$$

$C_1$  dan  $C_2$  adalah fungsi dari  $N_D$ ,  $T$  dan  $\Phi_B$ , energi  $E_{00}$  adalah karakteristik energi pada proses *tunneling* yang didefinisikan Persamaan (2.26):

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_D}{K_S \epsilon_0 m^*}} \dots\dots\dots (2.26)$$

$K_S$  adalah konstanta dielektrik semikonduktor dan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas vakum.

Hubungan antara  $E_{00}$  dan  $E_0$  pada Persamaan (2.24) didefinisikan oleh

Persamaan (2.27):

$$E_0 = E_{00} \coth(E_{00} / kT) \dots\dots\dots (2.27)$$

Dengan memasukan Persamaan (2.26) ke Persamaan (2.25), maka diperoleh Persamaan (2.28):

$$\rho_i(FE) = C_2 \rho_1 \exp(C_3 / \sqrt{N_D}) \dots\dots\dots (2.28)$$

Dengan  $C_3$  adalah konstanta.

Dengan melakukan logaritma terhadap Persamaan (2.28) dapat diketahui bahwa terdapat hubungan antara *specific interfacial resistance* ( $\rho_i$ ) dengan *doping konsentrasi* ( $N_D$ ) yang dinyatakan dalam bentuk Persamaan (2.29).

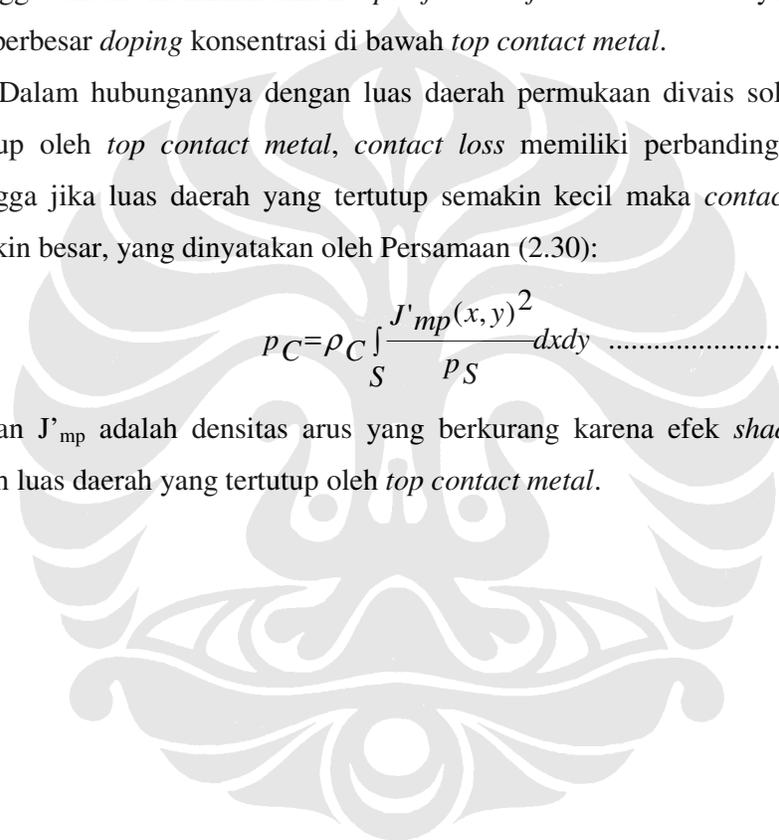
$$\log[\rho_i(FE)] \approx \frac{1}{\sqrt{N_D}} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dari Persamaan (2.29) dapat diketahui bahwa dalam kondisi *field-emission*, *specific interfacial resistance* dipengaruhi oleh besarnya *doping konsentrasi*. Sehingga untuk meminimumkan *specific interfacial resistance* yaitu dengan memperbesar *doping konsentrasi* di bawah *top contact metal*.

Dalam hubungannya dengan luas daerah permukaan divais solar sel yang tertutup oleh *top contact metal*, *contact loss* memiliki perbandingan terbalik, sehingga jika luas daerah yang tertutup semakin kecil maka *contact loss* akan semakin besar, yang dinyatakan oleh Persamaan (2.30):

$$p_C = \rho_C \int_S \frac{J'_{mp}(x,y)^2}{p_S} dx dy \dots\dots\dots (2.30)$$

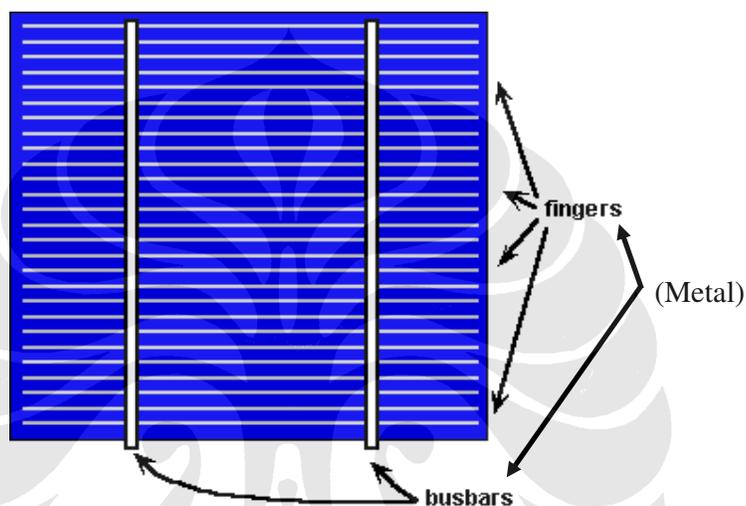
Dengan  $J'_{mp}$  adalah densitas arus yang berkurang karena efek *shading* dan  $p_s$  adalah luas daerah yang tertutup oleh *top contact metal*.



## BAB 3 PERANCANGAN, PERHITUNGAN DAN SIMULASI

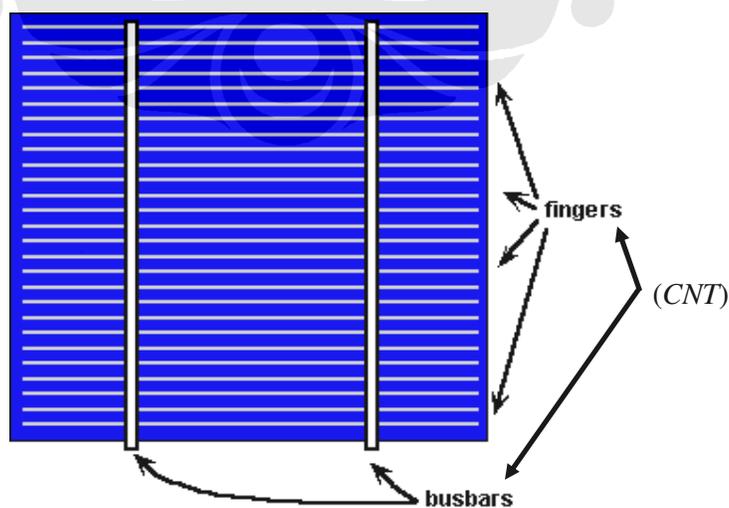
### 3.1 PERANCANGAN SOLAR SEL

*Top contact metal* pada solar sel terdiri dari *finger* dan *busbar*. Gambar 3.1 menunjukkan perancangan *top contact metal* pada suatu divais solar sel.



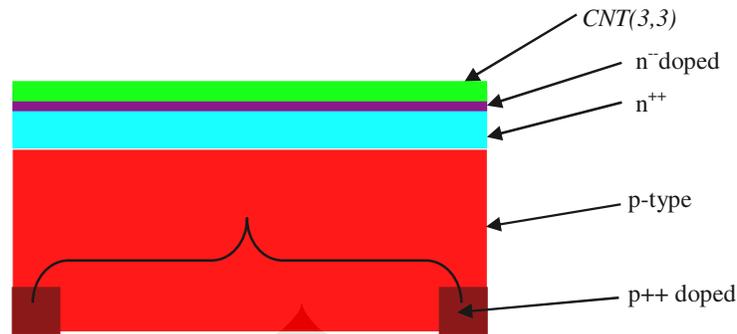
Gambar 3.1 Perancangan *Top contact metal* pada solar sel.[11]

Dalam riset ini, *finger* dan *busbar* pada Gambar 3.1 diganti dengan menggunakan *CNT* (3,3). Gambar 3.2 menunjukkan divais solar sel dengan *CNT* (3,3) yang digunakan sebagai *top contact metal*.



Gambar 3.2 Solar sel dengan *CNT*(3,3) sebagai *top contact metal*

Perancangan solar sel yang digunakan dalam riset ini ditunjukkan oleh Gambar 3.3.

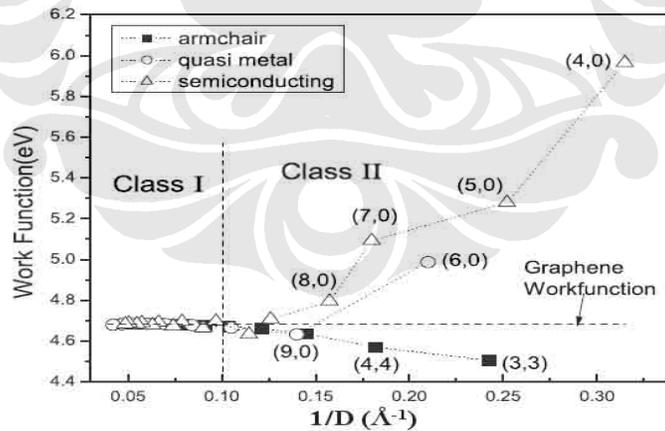


Gambar 3.3 Perancangan solar sel

Perancangan solar sel pada riset ini menggunakan rancangan dasar solar sel yang terdiri atas emiter ( $n^{++}$ ) dan base (p). Lapisan atas (*top layer*) pada emiter diberikan *doping* yang besar konsentrasi *doping* didapatkan dari simulasi. Bahan *top contact metal* yang digunakan yaitu CNT (3,3).

### 3.2 PEMILIHAN CARBON NANOTUBE

CNT dapat digunakan sebagai *top contact metal* berdasarkan *work function* yang dimilikinya. CNT memiliki *work function* yang berbeda untuk setiap *chirality*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Work function CNT.[9]

Tidak semua CNT dapat digunakan sebagai *Top contact metal* pada divais solar sel. CNT yang dipilih adalah CNT yang memiliki *work function* tertentu, sehingga akan membentuk *ohmic contact* dengan permukaan divais solar sel.

Dari Gambar 3.4 dapat dikatakan bahwa semakin kecil diameter *CNT*, maka semakin kecil *work function* yang dimilikinya. *CNT* yang akan digunakan dalam riset ini adalah *CNT* (3,3).

### 3.3 PERHITUNGAN DAN SIMULASI KONSENTRASI *DOPING* PADA PERMUKAAN SOLAR SEL

Divais solar sel pada dasarnya merupakan *p-n junction* yang dikenai *photon* yang akan membangkitkan elektron. Elektron-elektron yang dibangkitkan akan dikumpulkan oleh metal untuk dialirkan ke *eksternal* divais solar sel. Hubungan yang dibentuk antara metal dan divais solar sel adalah hubungan yang bersifat *ohmic*.

Untuk dapat membentuk *ohmic contact*, ada dua hal yang dapat dilakukan yaitu:

1. Memilih bahan metal yang digunakan
2. Pengaturan *doping* pada permukaan divais solar sel.

Untuk menentukan konsentrasi *doping* pada permukaan divais solar sel, maka dapat digunakan Persamaan (3.1).

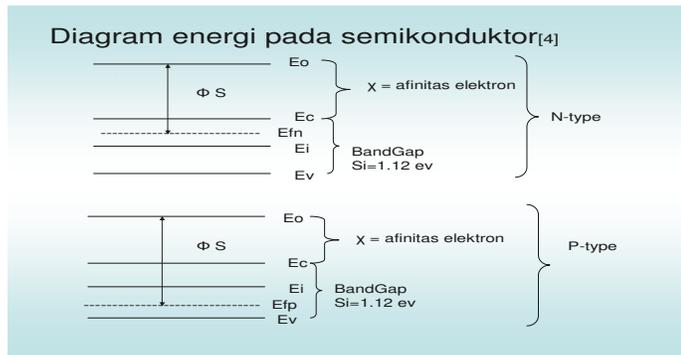
$$E_F - E_i = kT \ln (N_D / n_i) \dots\dots\dots (3.1)$$

Dari Persamaan (3.1) dapat diturunkan menjadi Persamaan (3.2):

$$N_D = n_i e^{(E_F - E_i) / kT} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dari Persamaan (3.2), dapat diketahui batas minimal konsentrasi *doping* yang dilakukan terhadap permukaan divais jika *work function* dari *CNT* yang digunakan diketahui.

Untuk menyelesaikan Persamaan (3.2), maka diperlukan persamaan lain yang dapat diturunkan dari Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram energi pada semikonduktor (permukaan divais solar sel).[10]

Dari Gambar 3.5 di dapat Persamaan (3.3) dan (3.4):

$$E_0 - E_{fn} = (E_0 - E_c) + (E_c - E_i) - (E_{fn} - E_i) \dots\dots\dots (3.3)$$

$$E_{fn} - E_i = (E_0 - E_c) + (E_c - E_i) - (E_0 - E_{fn}) \dots\dots\dots (3.4)$$

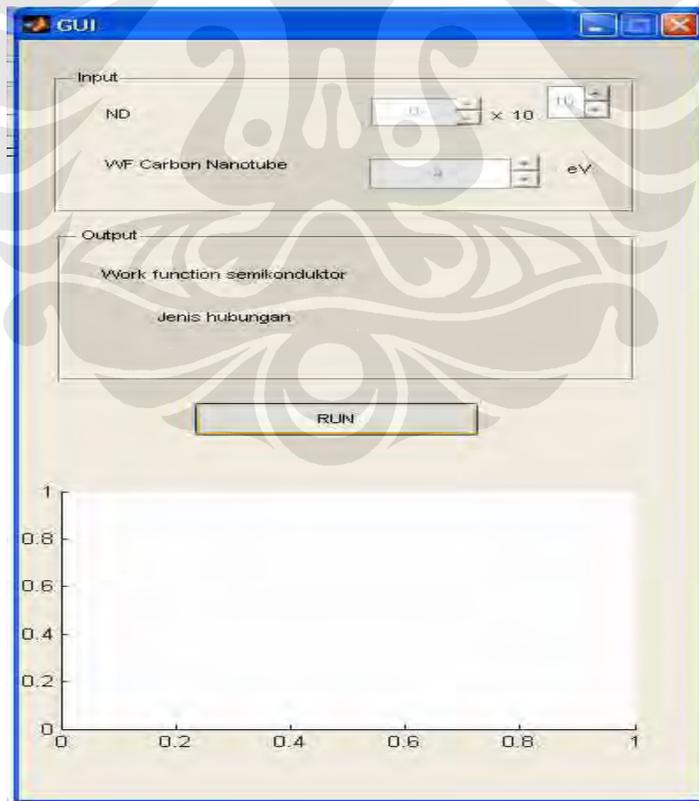
Dengan  $E_0 - E_c = 4.03 \text{ eV}$ ,  $E_c - E_i = 0.56 \text{ eV}$ . maka Persamaan (3.3) menjadi

$$E_0 - E_{fn} = 4.03 \text{ eV} + 0.56 \text{ eV} - (E_{fn} - E_i) \dots\dots\dots (3.5)$$

Dengan menggunakan Persamaan (3.2) dan (3.5) dalam simulasi, maka akan didapatkan besar konsentrasi *doping* yang maksimum. Simulasi yang dibuat dapat digunakan untuk *CNT* dengan rentang *Work function* dari 4.0 hingga 6.0 eV dan Besar konsentrasi *doping* dari  $10^{10}$  hingga  $10^{20} / \text{cm}^3$ .

Simulasi ini digunakan untuk mengetahui *work function* semikonduktor tipe-n, tipe hubungan yang dibentuk oleh *CNT* dengan semikonduktor tipe-n serta grafik hubungan antara *work function* semikonduktor dengan besar konsentrasi *doping*.

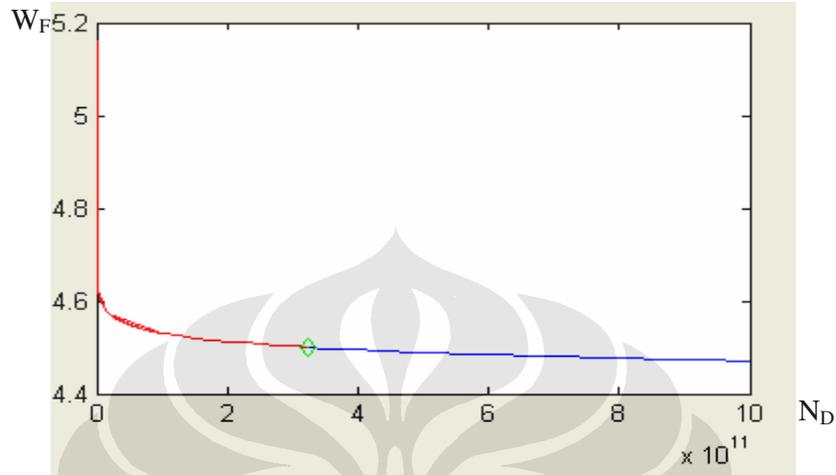
Gambar 3.6 menunjukkan tampilan dari *GUI* yang digunakan untuk menjalankan program perhitungan.



Gambar 3.6 Tampilan *GUI* untuk perhitungan besar konsentrasi *doping*, dan jenis hubungan yang dibentuk.

### 3.3.1 Hasil simulasi dengan konsentrasi *doping* maksimum.

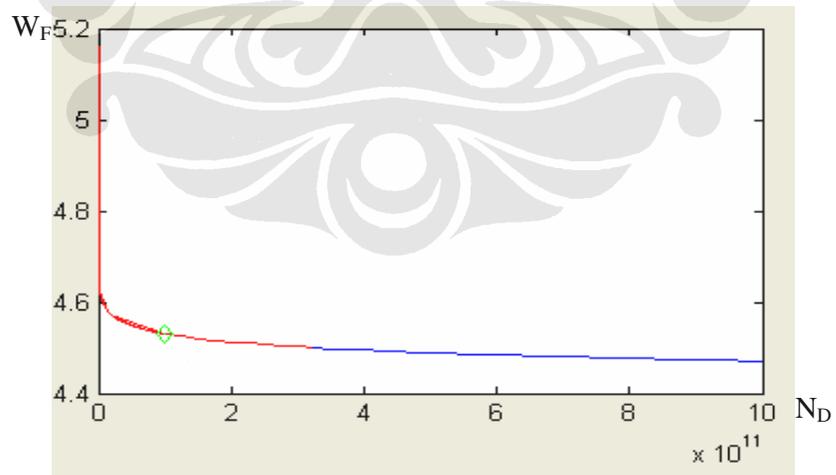
Gambar 3.7 adalah grafik hasil simulasi yang menunjukkan besar konsentrasi *doping* maksimum.



Gambar 3.7 grafik hasil simulasi dengan *doping* konsentrasi maksimum

### 3.3.2 Hasil simulasi dengan konsentrasi lebih rendah dari konsentrasi *doping* maksimum

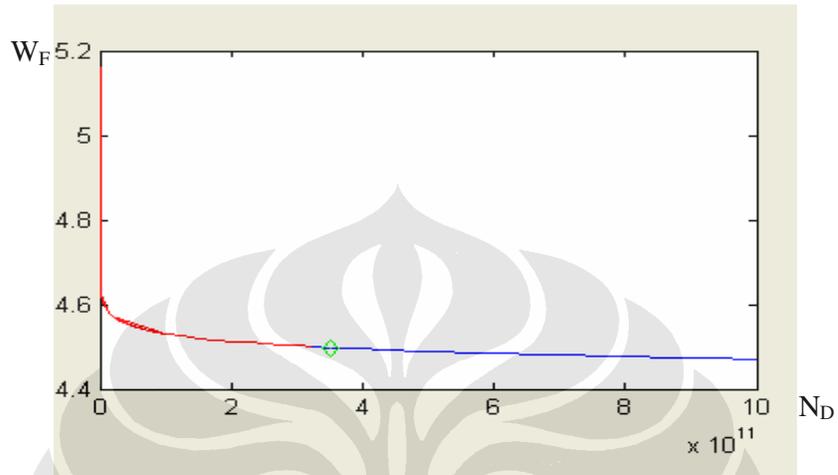
Gambar 3.8 menunjukkan hasil simulasi dengan konsentrasi *doping* lebih rendah dari konsentrasi *doping* maksimum.



Gambar 3.8 grafik dengan konsentrasi *doping* lebih rendah dari konsentrasi maksimum.

### 3.3.3 Hasil simulasi dengan konsentrasi lebih tinggi dari konsentrasi *doping* maksimum

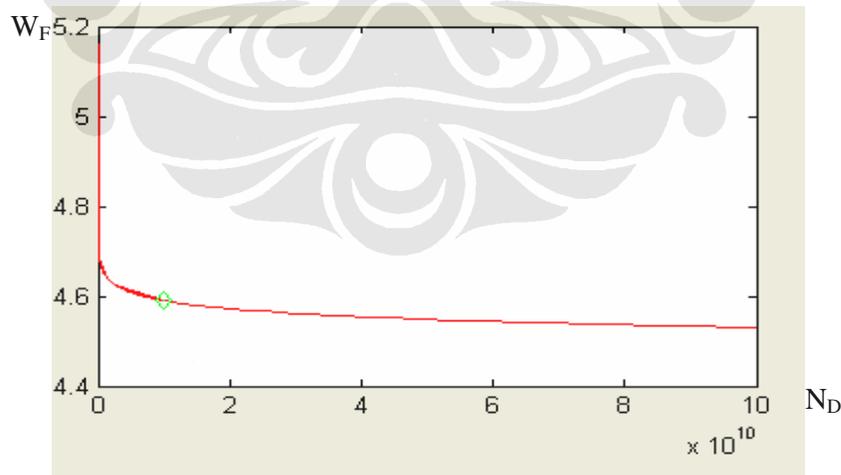
Gambar 3.9 menunjukkan hasil simulasi dengan konsentrasi *doping* lebih tinggi dari konsentrasi maksimum



Gambar 3.9 grafik dengan konsentrasi *doping* lebih tinggi dari konsentrasi maksimum

### 3.3.4 Hasil simulasi dengan tanpa *doping* (semikonduktor *intrinsik*)

Gambar 3.10 menunjukkan hasil simulasi dengan tanpa *doping* (semikonduktor *intrinsik*)



Gambar 3.10 grafik dengan tanpa *doping* (semikonduktor *intrinsik*)

### 3.4 PERHITUNGAN POWER LOSS

*Top contact metal* metal merupakan salah satu komponen utama yang menyusun sebuah divais solar sel. *Top contact metal* terdiri dari dua bagian, yaitu, *finger* dan *busbar*. *Finger* merupakan bagian *top contact metal* yang berfungsi mengumpulkan arus (elektron), secara langsung dari divais solar sel, sedangkan *busbar* adalah bagian *top contact metal* yang berfungsi sebagai penghubung antar *finger* untuk mengumpulkan arus dari *finger* dan kemudian menyalurkannya ke bagian *eksternal* divais. Dalam perhitungan *power loss* ini, diasumsikan semua arus hasil proses *generation* dari divais solar sel hanya dikumpulkan oleh *finger* dan bukan oleh *busbar*.

Dalam riset ini akan dibahas mengenai beberapa mekanisme *power loss* yang sangat berpengaruh, yaitu[14]:

- 1) *Resistive loss* ( $P_r$ ) yaitu *power loss* yang diakibatkan oleh resistensi bahan *top contact metal*.
- 2) *Top layer loss* ( $P_{tl}$ ) yaitu *power loss* yang diakibatkan oleh *sheet resistance* pada *top diffused layer* dan *top contact metal*.
- 3) *Contact loss* ( $P_c$ ) yaitu *power loss* yang diakibatkan oleh hubungan/*contact* antara *top diffused layer* (semikonduktor) dengan *top contact metal*.
- 4) *Shadowing loss* ( $P_s$ ) yaitu *power loss* yang diakibatkan oleh efek bayangan *top contact metal* (*shading/shadowing effect*) pada permukaan divais solar sel.

#### 3.4.1 Resistive loss

Setiap bahan/material memiliki konduktivitas. Konduktivitas suatu material *top contact metal* cukup berpengaruh terhadap resistivitas material tersebut. Suatu material dengan konduktivitas yang tinggi akan memiliki hambatan jenis/resistivitas material ( $\rho$ ) yang rendah, sehingga resistensi maupun *power loss* menjadi semakin rendah.

Memilih bahan yang memiliki konduktivitas yang tinggi sebagai material *top contact metal* adalah hal yang penting dilakukan. Untuk mengetahui besarnya *resistive loss* dari desain *top contact metal* secara *fraksional* divais solar sel dapat dilakukan perhitungan dengan Persamaan:

Fraksional resistive loss pada finger dinyatakan Persamaan (3.6):

$$P_{rf} = \frac{1}{m} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{B^2 \rho_s}{t} \frac{1}{W_F} S \dots\dots\dots (3.6)$$

dengan memasukkan nilai

$$m = 3;$$

$$B = 4 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$S = 0.2 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$W_F = 0.4 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$\rho_s = 1 \times 10^{-6} \text{ ohm.m};$$

$$t = 0.4 \times 10^{-9} \text{ m}; \text{ maka}$$

$$P_{rf} = \frac{2}{3} \times 10^{-14} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

Fraksional resistive loss pada busbar dinyatakan oleh Persamaan (3.7):

$$P_{rb} = \frac{1}{m} A^2 B \frac{\rho_s}{t} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{1}{W_B} \dots\dots\dots (3.7)$$

dengan

$$m = 3;$$

$$A = 8 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$B = 4 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$\rho_s = 1 \times 10^{-6} \text{ ohm.m};$$

$$t = 0.4 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$W_B = 0.4 \times 10^{-9} \text{ m};$$

maka didapatkan

$$P_{rb} = 1.6 \times 10^{-12} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

maka total Resistive loss yaitu:

$$P_r = 6.83 \times 10^{-11} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

### 3.4.2 Top layer loss

*Top layer loss* dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.21), dengan  $\rho_s$  didapatkan dari Persamaan (3.8):

$$\rho_s = \frac{1}{q\mu_e N_D t} \dots\dots\dots (3.8)$$

dan  $\mu_e$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.9):

$$\mu_e = 65 + \frac{1265}{1 + \left(\frac{N_D}{8.5 \times 10^{16}}\right)^{0.72}} \dots\dots\dots (3.9)$$

dengan

$$S = 0.2 \times 10^{-9} \text{ m};$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C};$$

$$N_D = 3.25 \times 10^{11} / \text{cm}^3$$

$$t = \text{tebal layer} = 5 \times 10^{-6} \text{ m} [13]$$

$$\mu_e = 1330 \text{ cm}^2/\text{V-sec}$$

Dari perhitungan didapatkan  $\rho_s = 2.89 \times 10^7 \text{ ohm}$

$$P_{tl} = 9.63 \times 10^{-14} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm m}^2$$

### 3.4.3 Contact loss

Hubungan antara *top contact metal* dengan *top diffused layer* semikonduktor dapat dianalogikan sebagai *metal-semiconductor contact*. Dalam hubungan antara metal dan semikonduktor terdapat resistensi yang disebut dengan *specific contact resistance* ( $\rho_c$ ) [17]. Resistensi yang tercakup di dalamnya tidak hanya *interfacial* antara metal dengan semikonduktor akan tetapi juga sedikit daerah/lapisan yang terdapat di atas dan di bawahnya.

*Specific contact resistance* ( $\rho_c$ ) didefinisikan dengan Persamaan (3.10):

$$\rho_c = \left. \frac{\partial V}{\partial J} \right|_{V=0} \dots\dots\dots (3.10)$$

Dari Persamaan (3.10), *Specific contact resistance* tidak dipengaruhi oleh luas area *top diffused layer* yang tertutup oleh *top contact metal*. Untuk melakukan perhitungan diasumsikan bahwa hubungan antara metal dan semikonduktor adalah hubungan dalam kondisi *ohmic contact*. *Specific contact resistance* sangat

dipengaruhi oleh material metal yang digunakan dan konsentrasi *donor* yang terdapat pada semikonduktor yang bersentuhan secara langsung dengan metal.

Perhitungan *contact loss* dalam riset ini hanya untuk *finger* karena berdasarkan asumsi bahwa semua elektron dari divais hanya mengalir melalui *finger*, sehingga arus yang mengalir melalui *busbar* dapat diabaikan. *contact loss* dapat dihitung dengan Persamaan (3.11):

$$P_{cf} = \rho_c \frac{J_{mp} S}{V_{mp} W F} \dots\dots\dots (3.11)$$

dengan  $\rho_c = \text{specific contact resistance}$  atau secara teori disebut juga *specific interfacial resistance*. Yang besarnya untuk riset ini (dengan *doping* rendah) yaitu  $\rho_c = \rho_i(Te) = \rho_1 e^{q\phi_B/kT}$ , dengan demikian *specific interfacial resistance* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\rho_i(Te) = \frac{k}{qA^{**}T} e^{q\phi_B/kT} ;$$

$$\rho_i(Te) = \frac{k}{q120 \frac{m^*}{m} T} e^{q\phi_B/kT} ;$$

dengan  $m^*/m = 1.18(\text{Si})$ [10];

$T = 300\text{K}$

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ eV/K}$

$\phi_B = \phi_{M-X}$ ;  $\phi_B = 4.5 - 4.03 = 0.47 \text{ eV}$ . maka:

$$\rho_i(Te) = \frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19} \times 120 \times 1.18 \times 300} e^{1.6 \times 10^{-19} \times 0.47 / 0.02585}$$

$$\rho_i(Te) = 2 \times 10^{-9} \text{ ohm.m}^2$$

dengan nilai ini maka *contact loss* dapat dihitung:

$$P_{cf} = 2 \times 10^{-9} \frac{J_{mp} 0.2 \times 10^{-9}}{V_{mp} 0.4 \times 10^{-9}}, P_{cf} = 1 \times 10^{-9} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

### 3.4.4 Shadowing loss

*Shadowing loss* merupakan *power loss* yang diakibatkan oleh tertutupnya permukaan divais solar sel, sehingga mengurangi cahaya matahari yang mengenai

divais, sehingga akan mengurangi besarnya arus yang dibangkitkan oleh divais serta daya total yang dihasilkan.

Untuk menghitung *power loss* yang diakibatkan oleh efek *shading* digunakan Persamaan (3.12)[12]:

$$P_{sf} = (1 - t_f) \frac{W_f}{S} \dots\dots\dots (3.12)$$

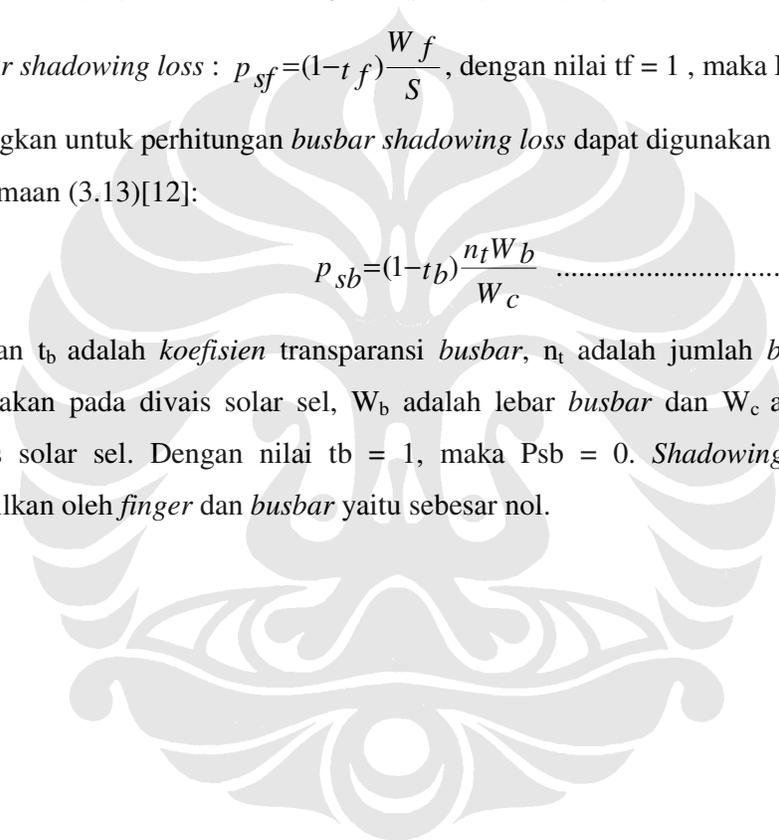
untuk *finger shadowing loss*, dengan  $t_f$  adalah koefisien transparansi *finger*,  $W_f$  adalah lebar *finger*, dan  $S$  adalah jarak *spacing* antar *finger*.

*Finger shadowing loss* :  $P_{sf} = (1 - t_f) \frac{W_f}{S}$ , dengan nilai  $t_f = 1$ , maka  $P_{sf} = 0$ .

sedangkan untuk perhitungan *busbar shadowing loss* dapat digunakan Persamaan (3.13)[12]:

$$P_{sb} = (1 - t_b) \frac{n_t W_b}{W_c} \dots\dots\dots (3.13)$$

Dengan  $t_b$  adalah koefisien transparansi *busbar*,  $n_t$  adalah jumlah *busbar* yang digunakan pada divais solar sel,  $W_b$  adalah lebar *busbar* dan  $W_c$  adalah lebar divais solar sel. Dengan nilai  $t_b = 1$ , maka  $P_{sb} = 0$ . *Shading loss* yang dihasilkan oleh *finger* dan *busbar* yaitu sebesar nol.



## BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI DAN PERHITUNGAN

### 4.1 ANALISIS HASIL PEMILIHAN CNT

CNT yang dapat digunakan sebagai *top contact metal* berdasarkan *work function* yang telah dihitung [9] yaitu *metal CNT* dengan *chirality* (3,3).

Dasar pemilihan CNT ini adalah:

- 1) CNT dengan vektor chiral (3,3) merupakan jenis CNT dari jenis *armchair* yang memiliki karakteristik sebagai metal;
- 2) Dari data yang didapat, nilai *work function* yang dimiliki CNT (3,3) memungkinkan dapat dijadikan *top contact metal* pada permukaan divais solar sel dan menghasilkan tipe hubungan *ohmic-contact*.

CNT (3,3) memiliki karakteristik sebagai berikut:

- 1) Memiliki diameter 0.4 nm;
- 2) *Work function* 4.5 eV[9];
- 3) Resistivitas  $1.10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ [5].

Untuk membentuk *ohmic contact*, maka *work function* CNT yang dipilih harus lebih kecil dibandingkan dengan nilai *work function* semikonduktor.

### 4.2 ANALISIS HASIL SIMULASI

#### 4.2.1 Analisis Simulasi dengan *doping* maksimum

Konsentrasi *doping* pada permukaan divais solar sel akan mempengaruhi besar *work function* permukaan divais tersebut.

Agar CNT (3,3) dapat digunakan sebagai *top contact metal* dengan permukaan divais solar sel, maka permukaan divais tersebut *didoping* dengan besar konsentrasi *doping* maksimum  $3.25 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$ .

Hal ini dapat dilihat dari grafik hasil simulasi yang digambarkan pada Gambar 3.7. Grafik pada Gambar 3.7 memperlihatkan besar konsentrasi *doping* maksimum yang harus diberikan pada semikonduktor tipe-n. Plot dalam grafik terdiri dari tiga warna yaitu warna merah, biru dan hijau. Warna merah menandakan kondisi dimana hubungan yang dibentuk antara CNT (3,3) dengan

semikonduktor tipe-n adalah *ohmic contact*, hal ini karena nilai *work function* semikonduktor tipe-n yang dihasilkan akibat dari besar konsentrasi *doping* yang diberikan lebih besar dari *work function CNT* (3,3). Plot dengan warna biru menandakan kondisi yang dibentuk adalah kondisi *non ohmic contact*, yaitu nilai *work function* semikonduktor tipe-n yang dihasilkan akibat dari besar konsentrasi *doping* yang diberikan lebih kecil daripada *work function CNT* (3,3). Plot dengan warna hijau menunjukkan nilai *work function* semikonduktor tipe-n ketika *input* besar konsentrasi *doping* diberikan. Dari Grafik 3.7 terlihat bahwa plot warna hijau terletak diantara perbatasan plot warna merah dan biru, hal ini karena ketika besar konsentrasi *doping* yang diberikan yaitu sebesar  $3,25 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$ , maka akan dihasilkan *work function* semikonduktor tipe-n bernilai 4,5 eV, nilai ini sama dengan nilai *work function* dari *CNT* (3,3), dalam kondisi ini tidak ada aliran elektron.

#### **4.2.2 Analisis Simulasi dengan *doping* lebih rendah dari *doping* maksimum**

Pada saat *input* konsentrasi *doping* yang diberikan kurang dari batas maksimum konsentrasi *doping*, maka kondisi yang terjadi yaitu *ohmic contact*. Hal ini dapat dilihat pada grafik Gambar 3.8 yang menunjukkan grafik yang dibentuk ketika konsentrasi *doping* yang diberikan sebesar  $1 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$ . Plot warna hijau berada pada plot warna merah, ini berarti dengan konsentrasi *doping* yang diberikan kurang dari batas maksimum akan menghasilkan kondisi *ohmic contact*.

Hal ini karena dengan konsentrasi *doping* yang kurang dari konsentrasi *doping* maksimum, *work function* semikonduktor tipe-n bernilai 4,53, nilai ini lebih dari *work function CNT* yaitu 4,5 eV, sehingga *contact* tetap dalam bentuk *ohmic*.

#### **4.2.3 Analisis Simulasi dengan *doping* lebih tinggi dari *doping* maksimum**

Pada saat *input* besar konsentrasi *doping* yang diberikan melebihi batas maksimum ( $3,25 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$ ) maka nilai *work function* semikonduktor tipe-n akan lebih kecil dari 4,5 eV. Hal ini akan mengakibatkan kondisi yang dibentuk bukan *ohmic contact* akan tetapi berubah menjadi *non ohmic contact*. Gambar 3.9 menunjukkan kondisi ketika besar konsentrasi *doping* melebihi batas maksimum.

Grafik tersebut menunjukkan kondisi dimana *input* konsentrasi *doping* yang diberikan sebesar  $3,5 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$ , dan hasilnya adalah plot warna hijau berada pada plot warna biru, yaitu berada pada kondisi *non ohmic contact*.

Hal ini karena semakin tinggi konsentrasi *doping* yang diberikan pada semikonduktor tipe-n, maka akan berakibat pada semakin mendekatnya *fermi level* dengan pita konduksi sehingga memperkecil *work function* semikonduktor tipe-n.

#### 4.2.4 Analisis Simulasi dengan tanpa *doping* (semikonduktor *intrinsik*)

CNT (3,3) dapat juga membentuk *ohmic contact* dengan semikonduktor *intrinsik* ( $n = p = 1.10^{10}/\text{cm}^3$ ), hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.10.

Dari Gambar 3.10 terlihat bahwa dengan semikonduktor *intrinsik*, CNT (3,3) dapat membentuk *ohmic contact*. Grafik pada Gambar 3.10 adalah grafik yang dihasilkan ketika konsentrasi *doping* yang diberikan  $1.10^{10}/\text{cm}^3$ , hal ini sebagai analogi untuk memperlihatkan semikonduktor *intrinsik*.

### 4.3 ANALISIS HASIL PERHITUNGAN *POWER LOSS*

#### 4.3.1 *Resistive loss*

Dari hasil perhitungan didapatkan besar *resistive loss* untuk *finger* yaitu:

$$P_{rf} = \frac{2}{3} \times 10^{-14} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

Berdasarkan Persamaan (3.5), *finger resistive loss* dipengaruhi oleh lebar fraksional sel (panjang *finger*), tinggi, lebar dan jarak *spacing* antar *finger*.

*Finger resistive loss* akan semakin minimum jika panjang dan *spacing finger* diperkecil. Dalam riset ini panjang *finger* ditentukan sebesar  $4.10^{-9}$  m, dan *spacing finger* yaitu  $0,2.10^{-9}$  m. Selain itu, untuk meminimumkan *finger resistive loss* juga perlu memperbesar tinggi dan lebar *finger*. Dalam riset ini tinggi dan lebar *finger* ditentukan sebesar  $0,4.10^{-9}$  m.

$$\text{Resistive loss yang terjadi pada busbar yaitu } P_{rb} = 1,6 \times 10^{-12} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2.$$

Dari Persamaan (3.6), *busbar resistive loss* dipengaruhi oleh panjang *finger*, panjang *busbar*, tinggi *busbar* dan lebar *busbar*. *Busbar resistive loss* akan semakin minimum jika panjang *finger* dan panjang *busbar* diperkecil. Dalam riset

ini panjang *finger* ditentukan sebesar  $4 \cdot 10^{-9}$  m, dan panjang *finger* sebesar  $8 \cdot 10^{-9}$  m. Selain itu *busbar resistive loss* akan minimum jika tinggi dan lebar *busbar* diperbesar. Tinggi *busbar* dan lebar *busbar* ditentukan sebesar  $0,4 \cdot 10^{-9}$  m.

Jadi dalam riset ini, total *resistive loss* yang dihasilkan adalah

$$P_r = 6,83 \times 10^{-11} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2.$$

#### 4.3.2 Top layer loss

*Top layer loss* yang dihasilkan dari perhitungan yaitu:

$$P_{tl} = 9,63 \times 10^{-14} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm m}^2. \text{ Top layer loss adalah power loss yang}$$

diakibatkan oleh *sheet resistance* pada *top diffused layer* dan *top contact metal*. *Top layer loss* akan minimum jika *sheet resistance* dan *spacing finger* minimum.

Untuk meminimumkan *sheet resistance* maka lapisan atas divais perlu *doping* dengan konsentrasi tinggi. Dalam riset ini, konsentrasi *doping* yang diberikan yaitu  $3,25 \cdot 10^{11} / \text{cm}^3$  dan *spacing finger* sebesar  $0,2 \cdot 10^{-9}$  m. *Spacing finger* dipilih setengah dari diameter *CNT* yang nilainya kurang dari panjang difusi elektron yaitu  $6 \cdot 10^{-3}$  m. Dengan demikian elektron akan mencapai *top contact metal* sebelum terjadi rekombinasi.

#### 4.3.3 Contact loss

Dalam riset ini *contact loss* yang dihasilkan yaitu  $P_{cf} = 1 \times 10^{-9} \frac{J_{mp}}{V_{mp}}$

$\text{ohm.m}^2$ . *Contact loss* merupakan *power loss* yang diakibatkan oleh hubungan / *contact* antara *top diffused layer* (semikonduktor) dengan *top contact metal*. *Contact loss* dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu *specific contact resistance*, *spacing* dan lebar *finger*. Dalam riset ini parameter yang cukup berpengaruh terhadap *contact loss* yaitu *specific contact resistance*. *Specific contact resistance*, merupakan *resistance* yang didapatkan dalam pengukuran, dalam penurunan secara teoritis maka digunakan *specific interfacial resistance*.

Dalam riset ini *specific interfacial resistance* dihitung dalam keadaan *thermionic emission* yaitu kondisi dimana konsentrasi *doping* yang diberikan adalah  $\leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

#### 4.3.4 *Shadowing loss*

*Shadowing loss* yang dihasilkan dari perhitungan untuk *finger* dan *busbar* yaitu nol. *Shadowing loss* pada *finger* dipengaruhi oleh lebar *finger* dan *spacing finger*. Semakin kecil lebar *finger* dan besar *spacing finger* maka *shadowing loss* pada *finger* semakin kecil. Dalam riset ini *spacing finger* yang digunakan yaitu dalam ukuran *nanometer*, sehingga akan mengakibatkan *shadowing loss* pada *finger* semakin besar. Akan tetapi karena koefisien transparansi CNT bernilai 1, maka *shadowing loss* yang dihasilkan nol.

*Shadowing loss* pada *busbar* dipengaruhi oleh lebar *busbar* dan lebar divais solar sel. Semakin lebar ukuran *busbar* dan Semakin kecil lebar divais yang digunakan maka *shadowing loss* pada *busbar* semakin tinggi, akan tetapi koefisien transparansi CNT bernilai 1, sehingga *shadowing loss* yang dihasilkan pada *busbar* yaitu nol.

Dengan demikian, penggunaan CNT (3,3) sebagai bahan dari *top contact metal* menghasilkan *shadowing loss* sebesar 0%, atau mengakibatkan penurunan *shadowing loss* hingga 13,1%, hal ini berarti efisiensi divais solar sel meningkat hingga 13,1%.

## BAB 5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan didapatkan 3 kesimpulan yaitu:

1. CNT (3,3) dapat digunakan sebagai *top contact metal* pada divais solar sel dengan syarat bahwa lapisan atas solar sel (semikonduktor tipe-n) yang akan dilakukan *contact*, *didoping* dengan maksimum konsentrasi ( $N_D$ )  $3,25 \cdot 10^{11}/\text{cm}^3$ .
2. Penggunaan CNT (3,3) sebagai *top contact metal* pada solar sel akan menghasilkan *shadowing loss* sebesar 0%.
3. Penggunaan CNT (3,3) sebagai *top contact metal* pada solar sel akan menghasilkan:

$$1) \text{ Resisitive loss, } P_r = 6,83 \times 10^{-11} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

$$2) \text{ Top layer loss, } P_{tl} = 9,63 \times 10^{-14} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm m}^2$$

$$3) \text{ Contact loss, } P_{cf} = 1 \times 10^{-9} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \text{ ohm.m}^2$$

## DAFTAR ACUAN

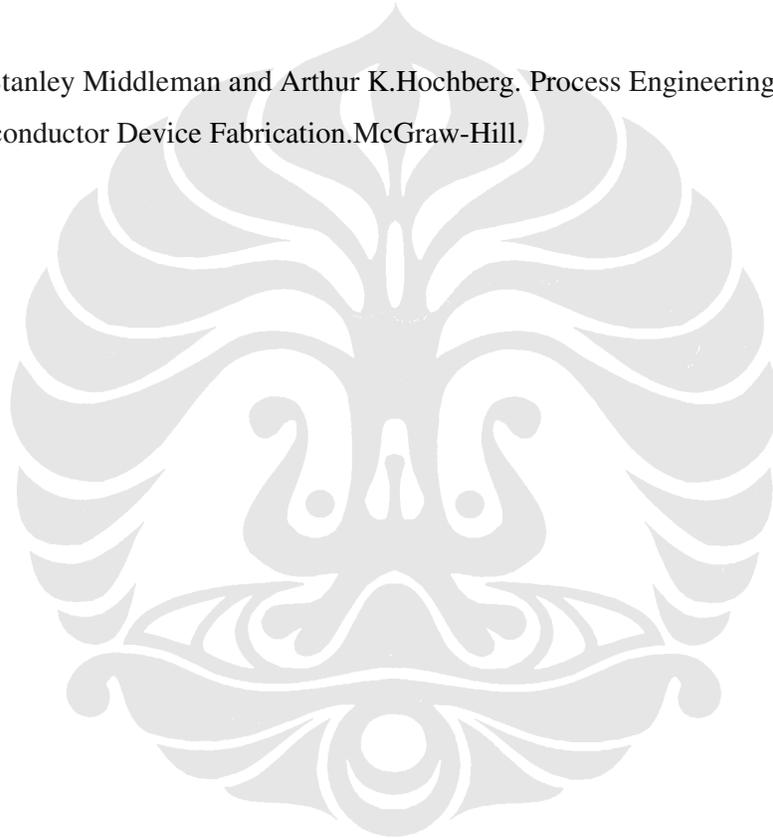
- [1] Daisuke Uchida, Kenji Otani, Kosuke Kurokawa.”*Evaluation of effective shading factor by fitting a clear-day pattern obtained from hourly maximum irradiance data*”, Electrotechnical Laboratory, Tokyo University of Agriculture and technology.
- [2] [http://www.treehugger.com/files/2007/08/428\\_efficiency.php](http://www.treehugger.com/files/2007/08/428_efficiency.php).diakses tanggal 13 Desember 2007.
- [3]<http://energisurya.wordpress.com/2007/04/23/transparan-seperti-gelas-konduktif-layaknya-logam/> diakses Agustus 2007.
- [4] “Carbon *nanotube* Material” EECS174-Lecture Notes9.
- [5] “Basic Properties of Carbon *nanotube*” Applied *Nanotechnologies* inc.
- [6] <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/cntproperties/opticalproperties.html>.
- [7] Muhammad Malik Hakim.”Optimalisasi Top contact metal Divais Solar Sel dengan  $I_{sc}$  -3.256 A dan  $V_{oc}$  0.5671 V untuk Mendapatkan power loss yang Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2004.
- [8] Michael W. Rowel, Mark A. Topinka, Michael D. McGehee (2006).” Organic solar cells with Carbon *nanotube* network electrodes” *Applied physics letters* 88, 233506.  
<http://apl.aip.org/apl/copyright.jsp>.
- [9] Bin Shan, Kyeongjae Cho (2005): “First Principles Study of Work functions of Single Wall Carbon *Nanotubes*”. Stanford University, Stanford CA, USA, 94305-4040.

[10] Robert F.Pierret, semiconductor device fundamentals,( USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1996 ).

[11] Honsberg, Christina and Stuart Bowden, Photovoltaic: Devices, Systems, and Application PVCDROM 1.0.Australia: University of new south Wales 1999.

[12] Burgers, A.R. and J.A Eikelboorn. Optimizing Metalization Patterns for Yearly Yield. Nethjerlands Energy Research Foundation ECN.

[13] Stanley Middleman and Arthur K.Hochberg. Process Engineering Analysis in Semiconductor Device Fabrication.McGraw-Hill.



## DAFTAR PUSTAKA

- Anantram M.P, F. Leonard.”*Physics of CNT electronic devices*”,(USA:Institute of physics publishing, 2006).
- Domenico Rondoni, Jaap Hoekstra,”*Toward models for CNT devices*” Electronics Research Laboratory, Delft University of Technology.
- M.Daenen, et al,”*The Wondrous World of CNTs*”, Eindhoven University of Technology, 27 February 2003.
- Masashi Shiraishi, Masafumi Ata, “*Work function of CNTs*” Material Research. Society, Vol. 633, 200.
- Volker Quaschnig and Rolf Hanitsch, “*Increased energy yield of 50% at flat roof and field installations with optimized module structure*” Berlin University of Technology · Institute of Electrical Power Engineering, Berlin.
- Stuckings M.F. and A.W. Blakers, “*A study of shading and resistive loss from the fingers of encapsulated solar cells*” Department of Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, Australia.
- Kim D. S, et al, “*Low-Cost Contact Formation of High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells by Plating*”, Department of Electronics Engineering, Sejong University, Seoul.
- Stobbe S, P E Lindelof, J Nygard,” *Integration of CNTs with Semiconductor Technology; Fabrication of Hybrid Devices by III-V Molecular Beam Epitaxy*”, Technical University of Denmark
- Chaudhari V. A. and C. S. Solanki, “*Study of different top Top contact metal designs for concentration solar cells*”, Energy Systems Engineering Indian Institute of Technology Bomba, India.
- Subash Mahajan, K.S Sree Harsha, *Principles of Growth and Processing of Semiconductors*, Mc Graw Hill. 1998.
- Serreze,H.B.*Optimizing solar cell performance by simultaneous consideration of Grid Pattern and Interconnect configurations*. Washington DC:Conference Record , 13<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference,1978.
- Voncken,Marten.*The Development of a Mechanically Stacked InGap-Si Tandem Solar cell*.Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) 31<sup>st</sup> August 1999.
- Dieter K.Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley and Sons.

## LAMPIRAN

Program untuk menghitung besar konsentrasi *doping* dan jenis hubungan yang dibentuk oleh semikonduktor tipe-n dengan *carbon nanotube*.

```
input1 = findobj('tag','input1');
input2 = findobj('tag','input2');
input2 = findobj('tag','input2');
output1 = findobj('tag','output1');
output2 = findobj('tag','output2');

nd1 = str2num(get(input1,'string'));
nd2 = str2num(get(input3,'string'));
nd = nd2*(10^nd1);
wf_cn = str2num(get(input2,'string'));

wf_semi = 4.59 - 0.02585*log(nd/(10^10));
if (wf_semi > wf_cn)
    hubungan = 'ohmic contact';
elseif (wf_semi < wf_cn)
    hubungan = 'non ohmic contact';
else
    hubungan = 'tak ada';
end

set(output1,'string',num2str(wf_semi));
set(output2,'string',hubungan);

%grafik
clear nd_graf;
clear wf_semi_graf;
koef = 0.25:0.25:10;
pangkat = 1;
i_max = 40*nd1;
j=0;
for i=1:1:i_max
    j=j+1;
    nd_graf(i) = koef(j)*power(10,pangkat);
    wf_semi_graf(i) = 4.59 - 0.02585*log(nd_graf(i)/(10^10));
    if(j==40)
        j=0;
        pangkat=pangkat+1;
    end
end

tp = 0;
for i=1:1:i_max
    if (wf_semi_graf(i) < wf_cn)
        state(i) = 0;
    else
        state(i) = 1;
    end
end
```

```
if (i>1)
    if (state(i)~=state(i-1))
        tp = i-1;
    end
end
end
if (tp==0)
    plot(nd_graf,wf_semi_graf,'-r');
    hold on;
else
    plot(nd_graf(1:tp),wf_semi_graf(1:tp),'-r');
    hold on;
    plot(nd_graf(tp:i_max),wf_semi_graf(tp:i_max),'-b');
    hold on;
end
plot(nd,wf_semi,'-dg');
hold off;
```

