



**DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN PADA SEL SURYA  
STRUKTUR *MULTI-JUNCTION* DAN  
*SINGLE-JUNCTION***

**SKRIPSI**

Oleh

**Dwi Indah Prabandari  
NIM 131810201042**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**



**DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN PADA SEL SURYA  
STRUKTUR *MULTI-JUNCTION* DAN  
*SINGLE-JUNCTION***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Ilmu Fisika (S1)  
dan mencapai gelar sarjana Sains

Oleh

**Dwi Indah Prabandari**  
**NIM 131810201042**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER  
2018**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa syukur dan terima kasih untuk:

1. Kedua orang tuaku H. Abdus Syarif dan Suyekti, yang selalu memberikan dukungan, semangat serta do'a;
2. saudara-saudaraku Angga Budi Prayoga, Elsa Tri Putri Mustika dan Librania Bilqis Octavira yang selalu memberi keceriaan dan motivasi;
3. para pahlawan tanpa tanda jasa yang telah mendidik dan membimbing saya dengan penuh perhatian dan kesabaran;
4. Lailiatul Muawanah dan Fitri Wahyu Islamy yang sudah saya anggap seperti saudara sendiri dan selalu memberikan semangat dari MABA hingga saat ini;
5. sahabat-sahabat physicopat 13 Hz Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Jember yang selalu memberikan motivasi, semangat dan selalu menemani saya disetiap prosesnya selama ini;

## MOTTO

وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا

“Dan katakanlah: Ya Tuhanku, tambahkanlah kepadaku ilmu pengetahuan”

(QS. Thaha: 114)<sup>1</sup>

Tindakan utama yang harus kita kerjakan bukanlah melihat apa yang terletak samar-samar di kejauhan sana, melainkan melaksanakan apa yang kelihatan dengan jelas di depan mata.

(William Osler)<sup>2</sup>

If there is no struggle, there is no progress

“Jika tidak ada perjuangan, tidak ada kemajuan”

(Frederick Douglass)<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Departemen Agama Republik Indonesia. 2012. *Alquran dan Terjemahannya*. Surabaya: Mahkota.

<sup>2</sup> Sigit Riset. 2015. *Jiwa Bahagia “cara menentramkan dan membahagiakan jiwa”*. Jakarta : Transmedia.

<sup>3</sup> <http://www.blackpast.org>.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dwi Indah Prabandari

NIM : 131810201042

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Distribusi Pembawa Muatan Pada Sel Surya Struktur *Multi-junction* dan *Single-junction*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Januari 2018

Yang menyatakan,

Dwi Indah Prabandari

NIM 131810201042

**SKRIPSI**

**DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN PADA SEL SURYA  
STRUKTUR *MULTI-JUNCTION* DAN  
*SINGLE-JUNCTION***

Oleh

Dwi Indah Prabandari  
NIM 131810201042

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Endhah Purwandari, S.Si., M.Si

Dosen Pembimbing Anggota : Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Distribusi Pembawa Muatan pada Sel Surya Struktur *Multi-junction* dan *Single-junction*” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat :

Tim Penguji:

Ketua

Anggota I

Endhah Purwandari, S.Si., M.Si  
NIP. 198111112005012001

Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phill., Ph.D  
NIP. 196812191994021001

Anggota II

Anggota III

Supriyadi, S.Si., M.Si  
NIP. 198204242006041002

Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D  
NIP. 196203111987021001

Mengesahkan  
Dekan

Drs. Sujito, Ph.D  
NIP. 196102041987111001



## RINGKASAN

**Distribusi Pembawa Muatan pada Sel Surya Struktur *Multi-junction* dan *Single-junction***; Dwi Indah Prabandari, 131810201042; 2017: 85 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Sel surya merupakan bahan semikonduktor yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaik. Pada dasarnya sel surya adalah dioda yang tersusun dari bahan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang dapat menghasilkan arus listrik ketika diberi cahaya. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja sel surya secara optimal, diantaranya yaitu dengan mendesain sel surya yang mencakup struktur lapisan, karakteristik lapisan misal ketebalan lapisan bahan dan konsentrasi pengotor (*doping*), serta mempertimbangkan parameter-parameter divais. Salah satu upaya yang dikembangkan dalam rangka pengembangan struktur lapisan dari sel surya adalah melalui aplikasi struktur *multi-junction* dengan mengubah divais *single-junction* (*p-n junction*) menjadi *p-n multi-junction*. Oleh karena itu, pada penelitian ini struktur lapisan antara *multi-junction* dan *single-junction* menjadi obyek dalam penelitian. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa distribusi pembawa muatan pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* dengan variasi tegangan *input*. Berdasarkan hasil yang diperoleh, dianalisa pengaruh tegangan *input* terhadap distribusi pembawa muatan. Distribusi pembawa muatan tersebut merepresentasikan konsentrasi pembawa muatan (elektron dan *hole*) di dalam bahan.

Distribusi pembawa muatan dari sel surya dengan struktur *multi-junction* dan *single-junction* diperoleh melalui kegiatan simulasi. Persamaan model yang digunakan adalah persamaan Poisson dan kontinuitas, yang merupakan persamaan diferensial parsial orde dua. Solusi dari kedua persamaan tersebut diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga. Metode elemen hingga membagi geometri divais menjadi elemen-elemen lebih kecil yang disebut *mesh*. Geometri struktur *multi-junction* dan *single-junction* pada dasarnya sama, yakni berbentuk persegi panjang dengan panjang 1,41  $\mu\text{m}$  dan lebar 0,5  $\mu\text{m}$  untuk struktur *multi-junction*, sedangkan untuk struktur *single-junction* memiliki panjang 0,7  $\mu\text{m}$  dan lebar 0,5  $\mu\text{m}$ . Penyelesaian persamaan Poisson dan kontinuitas serta pengaturan kondisi batas dilakukan dengan menerapkan parameter-parameter dari bahan GaAs dan Si. Pada tahapan ini dihasilkan distribusi pembawa muatan dengan warna yang berbeda untuk setiap lapisan pada masing-masing fungsi elektron dan *hole*. Tahap kedua adalah memvariasikan tegangan dari 0 volt sampai 0,4 volt dengan rentang 0,025 volt. Berdasarkan data konsentrasi pembawa muatan yang diperoleh pada tiga titik yaitu di titik ujung lapisan-p, di titik persambungan p-n dan di titik ujung lapisan-n untuk setiap struktur. Tahapan ini menghasilkan data konsentrasi pembawa muatan pada tiga titik yang telah ditentukan dengan beberapa variasi tegangan.



Hasil yang diperoleh berupa distribusi konsentrasi elektron dan *hole*, untuk bahan GaAs dan Si, baik dengan struktur *multi-junction* maupun *single-junction*. Distribusi pembawa muatan untuk kedua bahan menunjukkan karakteristik yang semakin meningkat untuk konsentrasi elektron dan semakin menurun untuk konsentrasi *hole*, saat diamati dari ujung lapisan-p hingga lapisan-n baik pada bahan GaAs maupun Si untuk semua struktur. Konsentrasi elektron dalam hal ini semakin meningkat, sedangkan konsentrasi *hole* mengalami penurunan. Khusus untuk struktur *multi-junction*, tidak terjadi peningkatan konsentrasi elektron dari lapisan-n *junction* pertama menuju ke lapisan-p *junction* kedua. Baik bahan GaAs maupun Si, keduanya memiliki konsentrasi pembawa muatan lebih tinggi saat direkonstruksi menggunakan struktur *multi-junction*. Dalam hal ini dapat diasumsikan bahwa penambahan persambungan GaAs pada Si memberikan kontribusi terhadap laju perubahan fotogenerasi yang dihasilkan, sehingga jumlah pembawa muatan berubah lebih cepat di daerah lapisan-p dari divais Si.

Variasi tegangan *input* yang diterapkan pada kedua bahan menunjukkan bahwa baik pada struktur *multi-junction* maupun *single-junction*, secara umum terjadi penurunan terhadap konsentrasi pembawa muatan. Konsentrasi pembawa muatan tertinggi didapatkan ketika tegangan 0 volt untuk bahan GaAs dan Si pada struktur *multi-junction* maupun *single-junction*. Konsentrasi pembawa muatan tersebut terus mengalami penurunan ketika tegangan yang diberikan semakin besar hingga didapatkan konsentrasi pembawa muatan terendah ketika tegangan 0,4 volt. Begitupun dengan potensial elektrostatik yang diperoleh sebanding dengan konsentrasi pembawa muatan. Hal ini menunjukkan bahwa ketika tegangan 0 volt daerah deplesi yang muncul akibat pergerakan pembawa muatan sangat kecil, sehingga elektron dan *hole* di dalam bahan mudah mengalir. Ketika tegangan semakin diperbesar hingga 0,4 volt mengakibatkan daerah deplesi juga semakin lebar dan menghambat aliran elektron dan *hole*, sehingga pembawa muatan yang dihasilkan akan berkurang.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Perbandingan Distribusi Pembawa Muatan pada Sel Surya Struktur *Multi-junction* dan *Single-junction*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan dan bimbingan, serta do'a dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Agung Tjahjo Nugroho, S.Si., M.Phil., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Utama dan Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan, kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing dan memberikan motivasi;
4. rekan seperjuangan simulasi, Lailiatul Muawanah, Fitri Wahyu Islamy, Aprizal Faruchi, Imroatus Solihah, Gutaminingsih, Siti Mutma'inah;
5. semua pihak yang turut membantu demi selesainya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membaca.

Jember, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

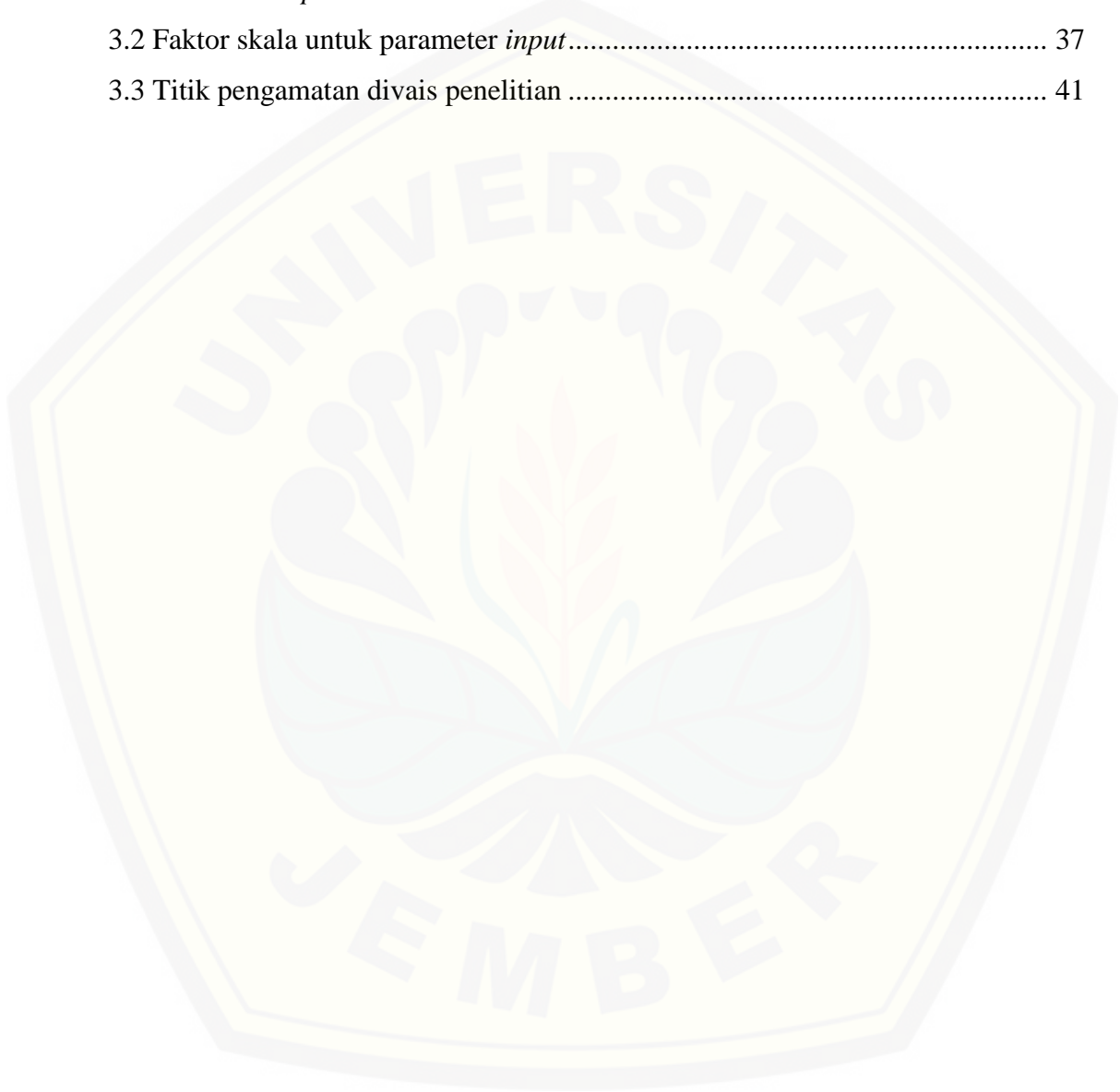
	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PEMBIBINGAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xviii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	6
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	6
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	6
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	6
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
<b>2.1 Sel Surya</b> .....	7
<b>2.2 Bahan Semikonduktor</b> .....	8
2.2.1 Silikon (Si) .....	10
2.2.2 Galium Arsenida (GaAs).....	12
<b>2.3 Struktur Tandem (<i>Multi-junction</i>)</b> .....	13
<b>2.4 Tandem Galium Arsenida/Silikon (GaAs/Si)</b> .....	18
<b>2.5 Transport Muatan Semikonduktor</b> .....	20
2.5.1 Rapat Arus Difusi.....	20

2.5.2 Rapat Arus <i>Drift</i> .....	20
2.5.3 Relasi Einstein.....	21
<b>2.6 Persamaan Matematis Sel Surya</b> .....	<b>22</b>
2.6.1 Persamaan Poisson .....	22
2.6.2 Persamaan Kontinuitas .....	23
2.6.3 Syarat Batas Neumann dan Dirichlet.....	24
<b>2.7 Metode Elemen Hingga</b> .....	<b>25</b>
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1 Rancangan Penelitian</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian</b> .....	<b>29</b>
3.2.1 Jenis Penelitian .....	29
3.2.2 Sumber Data Penelitian .....	29
<b>3.3 Definisi Operasional Variabel dan Skala Pengukuran</b> .....	<b>30</b>
3.3.1 Variabel Penelitian .....	30
3.3.2 Skala Pengukuran .....	30
<b>3.4 Kerangka Pemecahan Masalah</b> .....	<b>31</b>
3.4.1 Kajian Pustaka.....	31
3.4.2 Mekanisme Simulasi .....	31
a. Geometri Sel Surya Struktur <i>Multi-junction</i> dan <i>Single-junction</i> .....	33
b. Parameter <i>Input</i> Galium Arsenida dan Silikon .....	35
c. Pengaturan Kondisi Batas .....	37
d. Persamaan Poisson dan Kontinuitas .....	38
e. Distribusi Pembawa Muatan .....	39
3.4.3 Metode Analisis Data .....	40
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1 Hasil</b> .....	<b>42</b>
4.1.1 Distribusi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur <i>Multi-junction</i> GaAs/Si .....	42
4.1.2 Distribusi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur <i>Single-junction</i> GaAs .....	44

4.1.3 Distribusi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur <i>Single-junction</i> Si.....	46
4.1.4 Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya Struktur <i>Multi-junction</i> GaAs/Si pada Berbagai Nilai Tegangan .....	48
a. Konsentrasi Elektron Struktur <i>Multi-junction</i> GaAs/Si.....	48
b. Konsentrasi <i>Hole</i> Struktur <i>Multi-junction</i> GaAs/Si.....	51
4.1.5 Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya Struktur <i>Single-junction</i> GaAs pada Berbagai Nilai Tegangan.....	53
a. Konsentrasi Elektron Struktur <i>Single-junction</i> GaAs .....	53
b. Konsentrasi <i>Hole</i> Struktur <i>Single-junction</i> GaAs.....	53
4.1.6 Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya Struktur <i>Single-junction</i> Si pada Berbagai Nilai Tegangan.....	56
a. Konsentrasi Elektron Struktur <i>Single-junction</i> Si.....	56
b. Konsentrasi <i>Hole</i> Struktur <i>Single-junction</i> Si.....	56
<b>4.2 Pembahasan .....</b>	<b>59</b>
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 Kesimpulan.....</b>	<b>65</b>
<b>5.2 Saran .....</b>	<b>65</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN-LAMPIRAN .....</b>	<b>71</b>

**DAFTAR TABEL**

	Halaman
3.1 Parameter <i>input</i> .....	35
3.2 Faktor skala untuk parameter <i>input</i> .....	37
3.3 Titik pengamatan divais penelitian .....	41





DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Efisiensi dan biaya pembuatan sel fotovoltaik generasi ke-: I, II dan III .....	8
2.2 Kisaran nilai konduktivitas untuk isolator, semikonduktor dan konduktor ....	9
2.3 Proses rekombinasi pada semikonduktor <i>indirect</i> Silikon .....	11
2.4 Kristal Silikon intrinsik .....	12
2.5 Proses rekombinasi pada semikonduktor <i>direct</i> Galium Arsenida .....	12
2.6 Semikonduktor paduan Galium Arsenida .....	13
2.7 Ilustrasi konsep <i>multi-junction</i> .....	15
2.8 Prinsip persambungan sel surya tandem menurut pita energi bahan .....	16
2.9 Struktur sel surya tandem .....	16
2.10 Struktur tandem mekanik GaAs/CuInSe <sub>2</sub> .....	17
2.11 Struktur tandem monolitik GaInP <sub>2</sub> /GaAs .....	18
2.12 Struktur kristal GaAs dan Si .....	19
2.13 Struktur lapisan sel surya tandem GaAs/Si .....	19
2.14 Geometri dioda persambungan p-n 2D .....	26
3.1 Alur Kegiatan penelitian .....	28
3.2 Diagram alir kegiatan simulasi .....	32
3.3 Geometri dioda sel surya struktur <i>multi-junction</i> .....	34
3.4 Geometri dioda sel surya struktur <i>single-junction</i> GaAs dan Si .....	35
4.1 Distribusi elektron struktur <i>multi-junction</i> GaAs/Si untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan skala nilai konsentrasi elektron yaitu sebesar 10 pangkat angka disetiap indeks warna .....	42
4.2 Distribusi <i>hole</i> struktur <i>multi-junction</i> GaAs/Si untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan skala nilai konsentrasi <i>hole</i> yaitu sebesar 10 pangkat angka disetiap indeks warna .....	43

4.3 Distribusi potensial elektrostatik struktur <i>multi-junction</i> GaAs/Si untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan nilai potensial elektrostatik yaitu sebesar angka disetiap indeks warna.....	43
4.4 Distribusi elektron struktur <i>single-junction</i> GaAs untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan skala nilai konsentrasi elektron yaitu sebesar 10 pangkat angka disetiap indeks warna.....	44
4.5 Distribusi <i>hole</i> struktur <i>single-junction</i> GaAs untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan skala nilai konsentrasi <i>hole</i> yaitu sebesar 10 pangkat angka disetiap indeks warna.....	45
4.6 Distribusi potensial elektrostatik struktur <i>single-junction</i> GaAs untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan nilai potensial elektrostatik yaitu sebesar angka disetiap indeks warna.....	45
4.7 Distribusi elektron struktur <i>single-junction</i> Si untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan skala nilai konsentrasi elektron yaitu sebesar 10 pangkat angka disetiap indeks warna.....	46
4.8 Distribusi <i>hole</i> struktur <i>single-junction</i> Si untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan skala nilai konsentrasi <i>hole</i> yaitu sebesar 10 pangkat angka disetiap indeks warna.....	47
4.9 Distribusi potensial elektrostatik struktur <i>single-junction</i> Si untuk tegangan <i>input</i> 0 volt dengan setiap warna disisi kanan mempresentasikan nilai potensial elektrostatik yaitu sebesar angka disetiap indeks warna.....	47
4.10 Grafik konsentrasi elektron struktur <i>multi-juncton</i> GaAs terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt (a) Pada koordinat (0;0,2) di titik dekat anoda	

(b) Pada koordinat (0,1;0,2) di titik persambungan p-n	
(c) Pada koordinat (0,7;0,2) di titik dekat katoda .....	49
4.11 Grafik konsentrasi elektron struktur <i>multi-juncton</i> Si terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt	
(a) Pada koordinat (0,71;0,2) di titik dekat anoda	
(b) Pada koordinat (0,81;0,2) di titik persambungan p-n	
(c) Pada koordinat (1,41;0,2) di titik dekat katoda .....	50
4.12 Grafik konsentrasi <i>hole</i> struktur <i>multi-juncton</i> GaAs terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt	
(a) Pada koordinat (0;0,2) di titik dekat anoda	
(b) Pada koordinat (0,1;0,2) di titik persambungan p-n	
(c) Pada koordinat (0,7;0,2) di titik dekat katoda .....	51
4.13 Grafik konsentrasi <i>hole</i> struktur <i>multi-juncton</i> Si terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt	
(a) Pada koordinat (0,71;0,2) di titik dekat anoda	
(b) Pada koordinat (0,81;0,2) di titik persambungan p-n	
(c) Pada koordinat (1,41;0,2) di titik dekat katoda .....	52
4.14 Grafik konsentrasi elektron struktur <i>single-juncton</i> GaAs terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt	
(a) Pada koordinat (0;0,2) di titik dekat anoda	
(b) Pada koordinat (0,1;0,2) di titik persambungan p-n	
(c) Pada koordinat (0,7;0,2) di titik dekat katoda .....	54
4.15 Grafik konsentrasi <i>hole</i> struktur <i>single-juncton</i> GaAs terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt	
(a) Pada koordinat (0;0,2) di titik dekat anoda	
(b) Pada koordinat (0,1;0,2) di titik persambungan p-n	
(c) Pada koordinat (0,7;0,2) di titik dekat katoda .....	55
4.16 Grafik konsentrasi elektron struktur <i>single-juncton</i> Si terhadap nilai tegangan <i>input</i> ( $V_A$ ) 0-0,4 volt	
(a) Pada koordinat (0;0,2) di titik dekat anoda	
(b) Pada koordinat (0,1;0,2) di titik persambungan p-n	

- (c) Pada koordinat (0,7;0,2) di titik dekat katoda ..... 57
- 4.17 Grafik konsentrasi *hole* struktur *single-juncton* Si terhadap nilai tegangan *input* ( $V_A$ ) 0-0,4 volt
- (a) Pada koordinat (0;0,2) di titik dekat anoda
  - (b) Pada koordinat (0,1;0,2) di titik persambungan p-n
  - (c) Pada koordinat (0,7;0,2) di titik dekat katoda ..... 58



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>A. DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN UNTUK VARIASI TEGANGAN <i>INPUT</i> (<math>V_A</math>)</b> .....	71
<b>A.1 Distribusi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur         <i>Multi-junction</i> GaAs/Si untuk Tegangan <i>Input</i> 0-0,4 V</b> .....	71
<b>A.2 Distribusi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur         <i>Single-junction</i> GaAs untuk Tegangan <i>Input</i> 0-0,4 V</b> .....	73
<b>A.3 Distribusi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur         <i>Single-junction</i> Si untuk Tegangan <i>Input</i> 0-0,4 V</b> .....	75
<b>B. KONSENTRASI PEMBAWA MUATAN UNTUK VARIASI TEGANGAN <i>INPUT</i> (<math>V_A</math>)</b> .....	77
<b>B.1 Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur         <i>Multi-junction</i> GaAs/Si untuk Tegangan <i>Input</i> 0-0,4 V</b> .....	77
<b>B.2 Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur         <i>Single-junction</i> GaAs untuk Tegangan <i>Input</i> 0-0,4 V</b> .....	81
<b>B.3 Konsentrasi Elektron dan <i>Hole</i> Sel Surya dengan Struktur         <i>Single-junction</i> Si untuk Tegangan <i>Input</i> 0-0,4 V</b> .....	83



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sel surya merupakan bahan semikonduktor yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaik tanpa menghasilkan limbah (Rusdiana *et al.*, 2004). Selain sel surya, bahan semikonduktor banyak pula digunakan dalam pembuatan dioda, transistor dan IC (*Integrated Circuit*). Pada dasarnya sel surya adalah dioda yang tersusun dari bahan semikonduktor tipe-p sebagai anoda dan tipe-n sebagai katoda yang dapat menghantarkan arus listrik ketika diberi cahaya atau panas. Bahan semikonduktor yang sering digunakan yaitu unsur golongan IVA seperti Germanium (Ge) dan Silikon (Si). Bahan lain yang memiliki sifat seperti unsur golongan IVA yaitu kristal Galium Arsenida (GaAs), sehingga bahan ini juga dapat digunakan untuk pembuatan bahan semikonduktor. Nilai celah pita energi GaAs yaitu 1,43 eV lebih besar dibandingkan Si yaitu 1,12 eV, maka dari itu kristal semikonduktor GaAs baik digunakan dalam pembuatan divais yang beroperasi hingga daerah frekuensi tinggi (Sutrisno, 1986).

Bahan semikonduktor terbagi menjadi beberapa jenis diantaranya, semikonduktor intrinsik, semikonduktor ekstrinsik dan semikonduktor paduan. Semikonduktor intrinsik merupakan bahan semikonduktor murni tanpa disisipi unsur lain dan berasal dari unsur golongan IVA seperti Silikon (Si). Adapun semikonduktor ekstrinsik merupakan bahan semikonduktor yang telah disisipi unsur lain dan terbagi menjadi semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n. Semikonduktor tipe-p merupakan bahan semikonduktor dari unsur golongan IVA yang disisipi dengan unsur golongan IIIA seperti Silikon Boron (SiB), sehingga semikonduktor tipe-p memiliki *hole* sebagai pembawa muatan mayoritas. Adapun semikonduktor tipe-n merupakan bahan semikonduktor dari unsur golongan IVA yang disisipi dengan unsur golongan VA seperti Silikon Fosfor (SiP), sehingga pada tipe-n pembawa muatannya mayoritas adalah elektron (Fukuda, 1999). Disamping dua jenis diatas terdapat pula bahan semikonduktor yang dibuat



dengan menggabungkan unsur golongan IIIA dengan VA seperti Galium Arsenida (GaAs) yang dikenal sebagai semikonduktor paduan (Connolly *et al.*, 2013).

Adanya perkembangan zaman yang semakin modern memicu meningkatnya kebutuhan energi listrik dalam kehidupan, sehingga dibutuhkan sumber-sumber energi alternatif yang salah satunya dapat diperoleh melalui pemanfaatan teknologi sel surya. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja sel surya secara optimal. Optimalisasi kinerja sel surya dapat dilakukan dengan mendesain sel surya yang mencakup struktur lapisan, karakteristik lapisan misal ketebalan lapisan bahan semikonduktor dan konsentrasi pengotor, serta mempertimbangkan parameter-parameter divais (Karim *et al.*, 2004). Salah satu upaya yang dikembangkan dalam rangka pengembangan struktur lapisan dari sel surya adalah melalui aplikasi struktur *multi-junction* dengan mengubah divais *p-n junction* menjadi *p-n multi-junction*. Hal ini dilakukan untuk mengatasi terjadinya kehilangan energi yang tidak dapat diserap dan dikonversi menjadi listrik ketika energi foton kurang dari celah pita energi bahan pada struktur sel surya *p-n junction* (Spitzer dan Fan, 1990).

Setiap bahan semikonduktor memiliki energi *gap* yang berbeda untuk membentuk struktur *multi-junction*, dimana dalam penyusunannya bahan semikonduktor yang memiliki energi *gap* lebih besar ditempatkan pada lapisan pertama dan bahan semikonduktor yang memiliki energi *gap* paling kecil ditempatkan pada lapisan terakhir (Wahyuni, 2014). Bahan semikonduktor memiliki tingkat serapan radiasi matahari yang berbeda terkait dengan energi *gap* yang dimiliki juga berbeda, sehingga melalui struktur *multi-junction* energi matahari yang mengenai sel surya sebagian besar dapat diserap secara optimal. Pada struktur sel surya *multi-junction* foton yang lolos dan tidak dapat diserap oleh lapisan pertama akan diserap oleh lapisan kedua, begitupun seterusnya (Yastrebova, 2007).

Penelitian secara simulasi mengenai struktur *multi-junction* telah dilakukan oleh Karim *et al.* (2004) yaitu tentang optimasi efisiensi sel surya GaAs dan GaSb persambungan *p/n* untuk komponen sel surya tandem GaAs/GaSb. Hasil simulasi pada penelitian ini menunjukkan bahwa dengan memvariasi

konsentrasi akseptor ( $N_A$ ) dan konsentrasi donor ( $N_D$ ) konstan diperoleh nilai efisiensi konversi dengan susunan tandem mekanik sebesar 26,73 %, sedangkan untuk susunan monolitik sebesar 25,55%. Berdasarkan penyusunannya struktur sel surya *multi-junction* dibagi menjadi dua yaitu tandem mekanik dan tandem monolitik. Pada penyusunan sel surya secara tandem mekanik, masing-masing komponen sel surya dibuat secara terpisah kemudian digabung secara optik dengan suatu lapisan adhesif yang transparan. Susunan ini didesain untuk beroperasi dengan empat persambungan. Adapun pada sistem tandem monolitik, komponen sel surya digabungkan secara permanen melalui sebuah proses penumbuhan secara epitaksi, susunan ini didesain untuk beroperasi dengan dua persambungan (Spitzer dan Fan, 1990).

Penelitian selanjutnya mengenai struktur *multi-junction* juga dilakukan oleh Vijayakumar dan Birnie (2013) dengan melakukan simulasi optik dan elektronik menggunakan *software* AMPS 1-D dengan penyusunan empat persambungan (tandem mekanik) untuk meningkatkan efisiensi kinerja sel surya menggunakan bahan Galium Arsenida (GaAs)/Silikon (Si), dengan menganalisa nilai efisiensi dari kinerja sel surya struktur *single-junction* dan sel surya struktur *multi-junction*. Berdasarkan penelitian tersebut, tercatat bahwa sel surya struktur *multi-junction* GaAs/Si dapat menghasilkan nilai efisiensi sebesar 28,5%. Peningkatan efisiensi ini disebabkan oleh karena meningkatnya serapan pada panjang gelombang inframerah dari 870 nm sampai 1200 nm. Tingkat serapan tersebut berkaitan dengan perbedaan energi *gap* yang dimiliki oleh setiap bahan. Oleh karena itu, setiap bahan dengan energi *gap* tertentu hanya dapat menyerap energi foton dengan panjang gelombang yang sesuai.

Selain itu bahan Silikon telah diteliti oleh Fitriana (2014) dan Galium Arsenida oleh Alviati (2015) dan Hoiriyah (2016). Penelitian untuk bahan semikonduktor Silikon (Si) telah disimulasikan oleh Fitriana (2014) yaitu mengamati pengaruh panjang gelombang foton datang terhadap karakteristik I-V dioda sel surya 2D dengan metode elemen hingga menggunakan *software* FEMLAB. Hasil penelitian yang telah dilakukan Fitriana (2014) yaitu berupa distribusi pembawa muatan dan kurva karakteristik I-V. Selanjutnya, Alviati

(2015) melakukan penelitian mengenai bahan semikonduktor Galium Arsenida (GaAs) tentang simulasi distribusi konsentrasi elektron kristal semikonduktor GaAs pada peristiwa *deformation potential scattering* berbasis metode elemen hingga dengan bentuk geometri 2D menggunakan *software* FEMLAB. Penelitian pada bahan yang serupa juga dilakukan oleh Hoiriyah (2016) tentang simulasi pengaruh temperatur terhadap distribusi konsentrasi *hole* kristal Galium Arsenida pada peristiwa *deformation potential scattering*. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Alviati (2015) menunjukkan bahwa distribusi nilai konsentrasi elektron semakin mendekati katoda akan semakin besar, sedangkan pada hasil penelitian Hoiriyah (2016) menunjukkan sebaliknya ketika semakin mendekati katoda distribusi nilai konsentrasi *hole* akan semakin kecil.

Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, pada penelitian ini akan dilakukan simulasi perbandingan distribusi pembawa muatan sel surya struktur *multi-junction* GaAs/Si dan struktur sel surya *single-junction* GaAs dan Si dalam bentuk pemodelan 2D. Sel surya struktur *multi-junction* GaAs/Si pada penelitian ini menggunakan struktur tandem mekanik dengan lapisan adhesif yang transparan bersifat isolator, sehingga pada lapisan tersebut tidak dapat menghantarkan arus listrik tetapi dapat meloloskan foton. Bahan semikonduktor Galium Arsenida disusun secara tandem dengan bahan semikonduktor Silikon yang akan membentuk struktur persambungan GaAs/Si, karena bahan semikonduktor Galium Arsenida tidak dapat menyerap dan mengkonversi spektrum inframerah menjadi listrik. Oleh karena itu, dibutuhkan bahan semikonduktor yang peka terhadap spektrum inframerah yaitu Silikon (Karim *et al.*, 2004). Selain itu bahan semikonduktor Galium Arsenida memiliki ikatan antara atom kisi yang saling mengikat dengan cara yang serupa dengan bahan semikonduktor Silikon, dimana konstanta kisi dari setiap bahan melalui ikatan antara atom kisi yang sama dapat meningkatkan nilai efisiensi, sehingga kedua bahan semikonduktor Galium Arsenida dan Silikon disusun secara *multi-junction* untuk optimalisasi unjuk kerja sel surya (Spitzer dan Fan, 1990; Kurtz dan Geisz, 2010).

Distribusi pembawa muatan pada divais sel surya sangat penting dipelajari karena ini menggambarkan aliran pembawa muatan elektron dan *hole* di dalam bahan. Berdasarkan bahan penyusun divais sel surya pada umumnya berupa bahan semikonduktor persambungan p-n, dimana pada tipe-p pembawa muatan mayoritas *hole* dan tipe-n pembawa muatan mayoritas elektron. Ketika divais dikenai energi dari luar misal foton, maka akan terjadi aliran pembawa muatan elektron dan *hole*. Aliran pembawa muatan tersebut dapat ditunjukkan melalui nilai konsentrasi elektron dan *hole* yang berperan penting dalam terbentuknya arus listrik. Oleh sebab itu, pada penelitian ini akan dilakukan simulasi perbandingan distribusi pembawa muatan pada sel surya dengan dua struktur yang berbeda yaitu struktur *multi-junction* secara mekanik dan struktur *single-junction*.

Mekanisme munculnya distribusi pembawa muatan sebagai hasil yang akan diperoleh dari penelitian ini yaitu dengan menerapkan parameter-parameter *input* yang dibutuhkan dalam persamaan matematis sel surya, dimana distribusi pembawa muatan yang diperoleh berupa distribusi pembawa muatan pada struktur *multi-junction* dan *single-junction*. Setelah hasil diperoleh, kemudian dianalisa melalui nilai konsentrasi pada titik yang ditentukan di setiap lapisan dengan menerapkan variasi nilai tegangan *input*. Dengan kata lain hasil distribusi pembawa muatan yang peroleh pada struktur *multi-junction* GaAs/Si dianalisa dan dibandingkan dengan bahan GaAs dan Si ketika dipisah atau menjadi struktur *single-junction*. Metode yang digunakan yaitu metode elemen hingga dengan pemodelan geometri 2D berbentuk persegi panjang menggunakan *software* FEMLAB. Metode elemen hingga digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial bahan semikonduktor yang memiliki struktur tidak teratur, sehingga distribusi pembawa muatannya tidak linier. Maka dari itu, metode elemen hingga membagi geometri bahan semikonduktor menjadi elemen-elemen segitiga kecil, agar hasil dari setiap elemen yang diperoleh lebih teliti dan akurat. Melalui *software* FEMLAB dapat digambarkan bentuk geometri dari divais, sehingga hasil simulasi yang diperoleh dapat lebih mudah untuk dianalisa.



## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana distribusi pembawa muatan pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* melalui pemodelan 2D dengan variasi tegangan *input* 0 volt-0,4 volt dengan rentang 0,025 volt ?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil dari penelitian berupa distribusi pembawa muatan (elektron dan *hole*).
2. Bahan yang digunakan adalah kristal Galium Arsenida (GaAs) dan kristal Silikon (Si) yang disusun secara *multi-junction* berupa *double-junction* dan *single-junction*.
3. Iluminasi cahaya dianggap konstan.
4. Geometri bahan dimodelkan dalam bentuk 2D.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah mengetahui distribusi pembawa muatan pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* melalui pemodelan 2D dengan variasi tegangan *input* 0 volt-0,4 volt dengan rentang 0,025 volt.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai distribusi pembawa muatan pada sel surya dengan struktur *multi-junction* GaAs/Si dan struktur *single-junction* GaAs dan Si.
2. Melalui hasil penelitian dapat dikembangkan untuk meningkatkan kegiatan penelitian sel surya struktur *multi-junction* ketahap menentukan karakteristik arus dan tegangan (I-V).

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

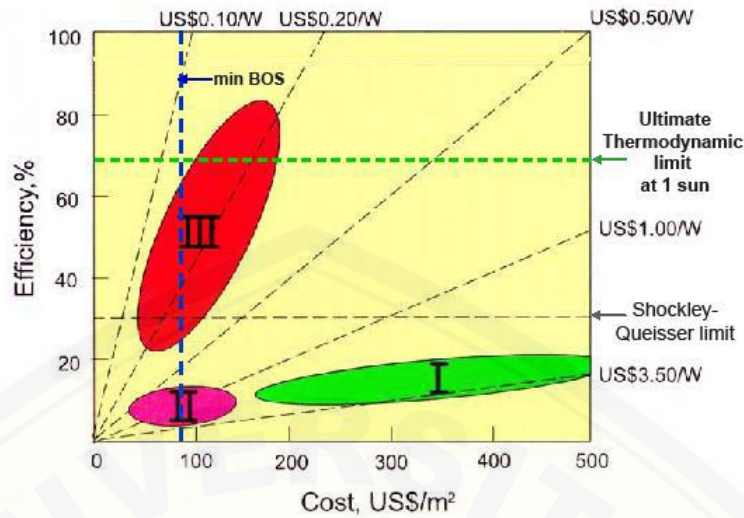
### 2.1 Sel Surya

Penelitian sel surya diawali dengan penelitian efek fotovoltaik pada tahun 1839 yang dilakukan pertama kali oleh Becquerel dengan mendeteksi adanya tegangan foton ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit. Pada tahun 1954 dilakukan pengembangan efek fotovoltaik oleh para peneliti dari *Bell Laboratories* menjadi divais sel surya dengan bahan semikonduktor (Sze dan Lee, 2012). Menurut Green (2003) terdapat tiga tipe atau generasi sel fotovoltaik:

1. Generasi ke-I (*silicon wafer-based photovoltaic cells*) yang terdiri semikonduktor monogap dari kristal tunggal silikon (Si) atau *poly-grain* Si.
2. Generasi ke-II (*thin film photovoltaic cells*) yang merupakan suatu sel fotovoltaik dengan teknologi lapisan tipis, terdiri dari bahan lapisan film tipis: silikon amorf, polikristalin silikon, CuInSe<sub>2</sub>, CuInGaS, CdTe, sel fotovoltaik berbasis pewarna (*Dye Sensitized Solar Cells/DSSC*) dan sel fotovoltaik organik.
3. Generasi ke-III (*advanced thin film photovoltaic cells*) merupakan sel fotovoltaik lapisan tipis yang lebih maju, terdiri dari: sel tandem multi celah (*multi-gap tandem cells*), sel surya pembawa elektron panas (*hot electron converters* atau *hot carrier converter cells*), sel surya pembentukan multi eksitasi (*multiple exciton generation solar cells*), sel fotovoltaik pita intermediat (*Intermediate band photovoltaics*), sel surya quantum dot (*quatum-dot solar cells*) dan sel termofotovoltaik (*thermophotovoltaic cells*).

Melalui tipe atau generasi sel fotovoltaik tersebut, pengembangan sel fotovoltaik generasi ke-III menjadi prioritas untuk visi 2020 dari para saintis, dikarenakan sel fotovoltaik ini melewati batas perhitungan teoritik efisiensi energi Shockley-Queisser (efisiensi = 45-60 %), dengan biaya pembuatan yang murah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Sutrisno, 2010).

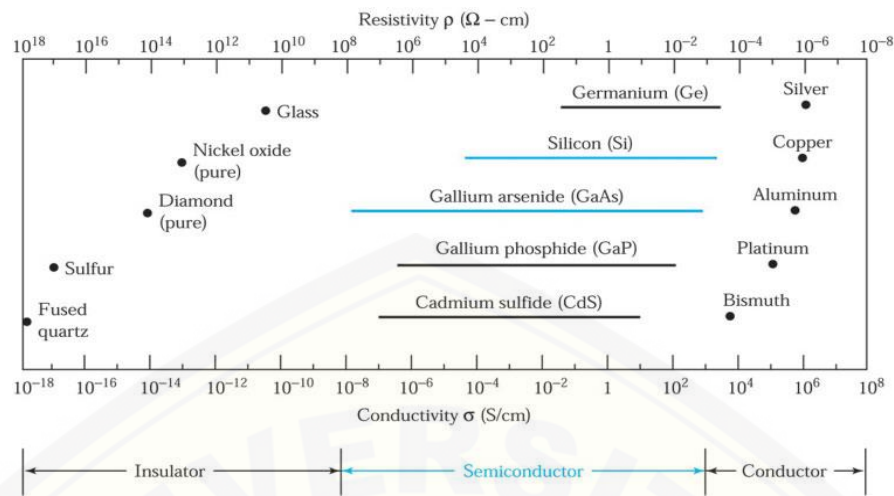




Gambar 2.1 Efisiensi dan biaya pembuatan sel fotovoltaik generasi ke-: I, II dan III (Sumber: Sutrisno, 2010)

## 2.2 Bahan Semikonduktor

Bahan *solid-state* dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu isolator, semikonduktor dan konduktor. Masing-masing dari tiga jenis bahan tersebut memiliki nilai konduktivitas listrik  $\sigma$  (resistivitas berhubungan dengan  $\rho = 1/\sigma$ ) yang berbeda, dimana bahan isolator memiliki nilai konduktivitas yang paling rendah berkisar diantara  $10^{-18} - 10^{-8} S/cm$  dan bahan konduktor memiliki nilai konduktivitas paling tinggi berkisar diantara  $10^4 - 10^6 S/cm$ . Bahan semikonduktor memiliki nilai konduktivitas yang berkisar diantara isolator dan konduktor yaitu antara  $10^{-8} - 10^4 S/cm$  dan umumnya sensitif terhadap suhu, pencahayaan, medan magnet, dan jumlah atom pengotor (biasanya, sekitar 1 *mg* untuk 1 *g* pengotor atom dalam 1 *kg* bahan semikonduktor). Sensitivitas konduktivitas ini membuat bahan semikonduktor menjadi salah satu bahan yang paling penting untuk aplikasi elektronik (Sze dan Lee, 2012). Nilai konduktivitas yang dimiliki bahan isolator, semikonduktor dan konduktor ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kisaran nilai konduktivitas untuk isolator, semikonduktor dan konduktor (Sumber: Sze dan Lee, 2012)

Bahan semikonduktor dimanfaatkan sebagai bahan penyusun sel surya. Pembawa muatan semikonduktor terdiri dari elektron dan *hole*, dimana elektron merupakan pembawa muatan negatif dan *hole* merupakan tempat yang ditinggalkan oleh elektron sehingga bermuatan positif karena kehilangan elektron (Sze dan Kwok, 2007). Pada bahan semikonduktor terdapat tingkat-tingkat energi yang dibagi kedalam pita-pita energi yaitu pita valensi dan pita konduksi. Pita valensi menggambarkan daerah energi yang diambil oleh elektron-elektron valensi, sedangkan pita konduksi menggambarkan daerah energi yang diambil untuk elektron bebas. Selisih antara pita konduksi dan pita valensi disebut energi *gap*, dimana lebar daerah ini sebanding dengan energi yang diperlukan untuk melepas elektron dari ikatan (Aslizar, 1996). Masing-masing bahan semikonduktor memiliki energi *gap* yang berbeda, dimana energi *gap* yang dimiliki bahan semikonduktor lebih kecil dari 6 eV (Puri dan Babbar, 2001).

Bahan semikonduktor dengan energi *gap* lebih besar dapat menyerap energi foton lebih tinggi dan mengurangi terjadinya kerugian kehilangan energi, selain itu, energi *gap* yang lebih besar memungkinkan tegangan hubung terbuka ( $V_{oc}$ ) lebih tinggi (Spitzer dan Fan, 1990). Energi *gap* ini mempengaruhi daya serap bahan semikonduktor terhadap energi matahari yang diterima. Oleh karena itu,

sehingga setiap persambungan bahan semikonduktor pada sel surya menyerap energi pada spektrum cahaya yang berbeda. Spektrum cahaya matahari memiliki warna berdasarkan karakteristik panjang gelombang. Bahan semikonduktor mengkonversi foton bergantung pada energi *gap* yang dimiliki, dimana foton yang memiliki energi lebih kecil dari energi *gap* tidak dapat diserap dan energi foton tinggi akan direduksi menjadi panas melalui *photogenerated carriers* (Yastrebova, 2007).

Sinar matahari yang terdiri atas foton, ketika mengenai permukaan sel surya akan diserap, dipantulkan atau dilewatkan dan hanya foton dengan level energi lebih besar dari energi *gap* yang dapat membebaskan elektron dari ikatan atomnya. Jika foton terlalu besar dari energi *gap*, maka energi yang lebih tersebut akan dirubah menjadi panas pada sel surya (Lolo, 2011). Ketika foton kurang dari energi *gap* akan terjadi kehilangan energi yang tidak dapat diserap dan dikonversi menjadi listrik (Spitzer dan Fan, 1990). Sehingga dibutuhkan sel surya yang dapat mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik secara optimal dengan mempertimbangkan parameter-parameter penyusun sel surya misal mengatur bahan yang digunakan dan memodifikasi struktur bahan semikonduktornya. Pada awalnya struktur sel surya berbasis *single-junction* dan selanjutnya dikembangkan berbasis tandem *multi-junction* untuk optimalisasi penyerapan energi dan meningkatkan efisiensi sel surya.

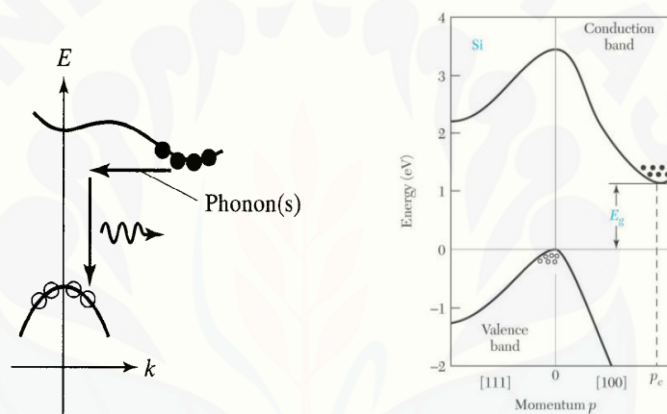
### 2.2.1 Silikon (Si)

Bahan semikonduktor yang banyak digunakan dalam pembuatan dioda sel surya yaitu Silikon (Si). Pada awalnya bahan semikonduktor yang lebih dulu dikembangkan adalah Germanium (Ge), akan tetapi dalam perkembangan selanjutnya Silikon (Si) lebih banyak digunakan dari pada Germanium (Ge) karena bahan Silikon (Si) tersedia melimpah di bumi dan kemudahan cara mengekstrak bahan ini dari alam. Bahan semikonduktor Silikon merupakan unsur golongan IVA pada tabel periodik yang memiliki empat elektron valensi dan celah pita energi sebesar 1,12 eV dengan struktur pita energi transisi tidak

langsung (*indirect bandgap*) yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3 (Sutrisno, 1986; Fuller, 2001).

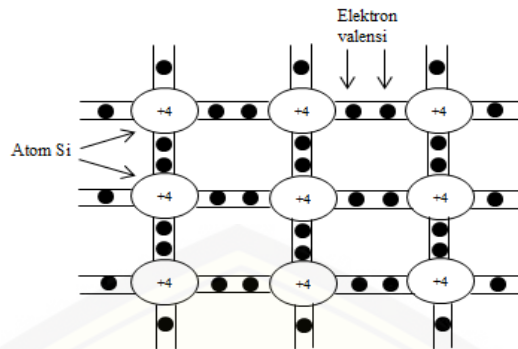
Bahan Silikon merupakan jenis semikonduktor intrinsik, dimana bahan tersebut adalah bahan semikonduktor murni tanpa disisipi (*doping*) oleh bahan lain. Pada semikonduktor instrinsik pembawa muatan elektron dan *hole* berasal dari bahan semikonduktor itu sendiri, sehingga konsentrasi elektron sama dengan konsentrasi *hole*.

$$n_i = n = p \quad (2.1)$$



Gambar 2.3 Proses rekombinasi pada semikonduktor *indirect* Silikon (Sumber: Pierret, 2002; Sze dan Lee, 2012)

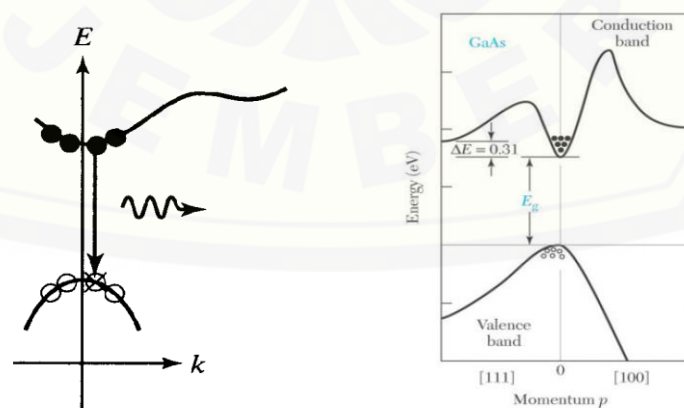
Karakteristik utama dari Silikon yaitu susunan atom-atomnya teratur dan atom satu dengan atom lainnya diikat dengan dua elektron disebut ikatan kovalen, karena atom Silikon memakai secara bersama-sama empat elektron valensi yang dimiliki satu unsur Silikon dengan unsur Silikon lainnya (Gambar 2.4) (Fukuda, 1999). Pada temperatur 0 K bahan Silikon bersifat sebagai insulator dan tidak ada muatan yang bergerak, ketika temperatur meningkat diatas 0 K atau sebesar temperatur ruang elektron valensi akan terlepas dari ikatan kovalen akibat vibrasi termal. Elektron yang berhasil memutuskan ikatan kovalen disebut elektron bebas, sedangkan tempat kosong yang ditinggalkan oleh elektron disebut *hole* (lubang) (Subekti, 2003).



Gambar 2.4 Kristal Silikon intrinsik (Sumber: Puri dan Babbar, 2001)

### 2.2.2 Galium Arsenida (GaAs)

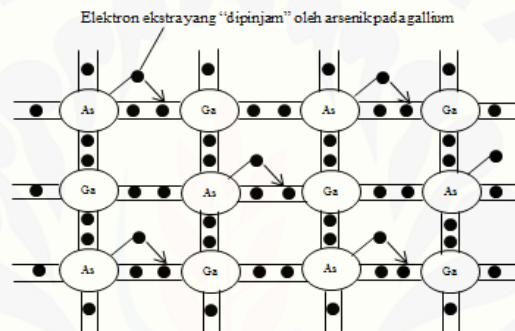
Selain Silikon yang dapat dimanfaatkan sebagai pembuatan dioda sel surya, bahan semikonduktor Galium Arsenida (GaAs) juga memiliki sifat yang mirip seperti unsur golongan IVA sehingga dapat digunakan untuk bahan pembuatan dioda sel surya. Galium Arsenida (GaAs) merupakan jenis semikonduktor paduan yaitu menggabungkan unsur golongan IIIA Galium (Ga) dengan VA Arsen (As) yang umumnya disebut *binary compound semiconductor*. Bahan semikonduktor paduan GaAs memiliki nilai celah pita energi sebesar 1,43 eV dengan struktur pita energi transisi langsung (*direct bandgap*) yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5 (Sutrisno, 1986; Fuller, 2001).



Gambar 2.5 Proses rekombinasi pada semikonduktor *direct* Galium Arsenida (Sumber: Pierret, 2002; Sze dan Lee, 2012)



Semikonduktor paduan GaAs memiliki sifat ikatan kimia yang ekuivalen dengan semikonduktor intrinsik Si. Sehingga semikonduktor GaAs disebut juga dengan semikonduktor paduan murni yang tersusun dari dua jenis unsur yang berbeda. Ikatan kimia dalam semikonduktor paduan terbentuk dengan proses meminjamkan elektron, dimana unsur yang memiliki elektron valensi lebih tinggi akan meminjamkan elektron kepada unsur yang memiliki elektron valensi lebih rendah. Pada semikonduktor paduan GaAs, Galium (Ga) berperan sebagai atom akseptor dan Arsen (As) sebagai donor (Subekti, 2003). Struktur penyusun atom kristal Galium Arsenida ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Semikonduktor paduan Galium Arsenida (Sumber: Subekti, 2003)

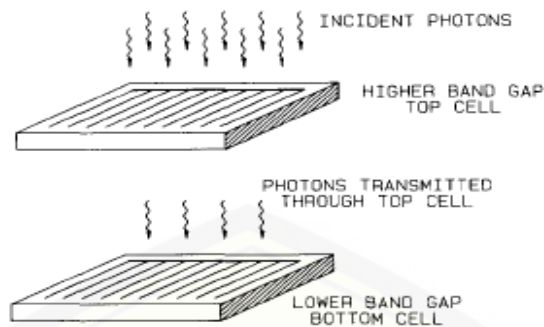
### 2.3 Struktur Tandem (*Multi-junction*)

Perkembangan sel surya telah banyak dikembangkan salah satunya dengan memodifikasi struktur penyusunnya. Sel surya struktur tandem *multi-junction* berarti tersusun dari dua atau lebih *single-junction* (*p-n junction*). Perkembangan sel surya tandem *multi-junction* didasarkan pada kinerja sel surya *single-junction* (*p-n junction*) yang kurang optimal dalam menyerap energi foton (Spitzer dan Fan, 1990). Dengan adanya struktur tandem *multi-junction* diperoleh efisiensi yang lebih tinggi, karena energi foton dapat diserap lebih optimal (Philipps *et al.*, 2009). Bahan yang sangat cocok digunakan untuk membuat struktur sel surya tandem *multi-junction* yaitu berasal dari golongan IIIA-VA dikombinasi dengan bahan Silikon (Connolly *et al.*, 2013).

Prinsip kerja struktur tandem *multi-junction* yaitu berdasarkan energi *gap* yang dimiliki masing-masing bahan. Paduan bahan IIIA dan VA adalah yang terbaik, karena paduan bahan tersebut memiliki energi *gap* yang berbeda-beda untuk menjangkau spektrum cahaya matahari. Sel surya harus dapat menyerap spektrum sebanyak mungkin secara optimal dengan mempertimbangkan energi *gap* dari lapisan untuk memperoleh efisiensi yang tinggi, karena kelebihan energi dari foton yang diubah menjadi panas sama dengan perbedaan antara energi foton dan energi *gap* dari bahan yang menyerap (Yastrebova, 2007). Efisiensi tinggi struktur sel surya tandem *multi-junction* ditunjukkan lebih dari 40% sejak tahun 2006. Dalam merancang sel surya tandem *multi-junction* harus mempertimbangkan pertumbuhan *epitaxial* struktur, sehingga parameter kisi antara sistem bahan kompatibel untuk meningkatkan kinerja sel surya (Cotal, 2008).

Selain itu koefisien serapan yang dimiliki bahan harus relatif besar, karena koefisien penyerapan bahan menentukan sulit atau mudahnya cahaya menembus kedalam bahan. Koefisien penyerapan akan berkurang karena meningkatnya panjang gelombang mempengaruhi frekuensi menjadi berkurang. Hal ini menyebabkan energi berkurang, sehingga memiliki sedikit energi untuk menembus bahan (Yastrebova, 2007). Membuat struktur sel surya tandem *multi-junction* perlu ditinjau konstanta kisi dari setiap bahan melalui struktur ikatan kisi yang sama. Jika terjadi perbedaan struktur akan menyebabkan pengurangan efisiensi (Kurtz dan Geisz, 2010).

Struktur tandem *multi-junction* dengan susunan *p-n junction* pada setiap persambungannya memiliki *energy gap* berbeda-beda untuk menyerap energi spektrum matahari, dimana foton banyak terserap ketika melewati bahan dengan energi *gap* lebih besar pada lapisan pertama dan transmisi foton akan diserap oleh bahan dengan energi *gap* lebih kecil pada lapisan selanjutnya. Susunan lapisan struktur tandem *multi-junction* ditunjukkan pada Gambar 2.7.

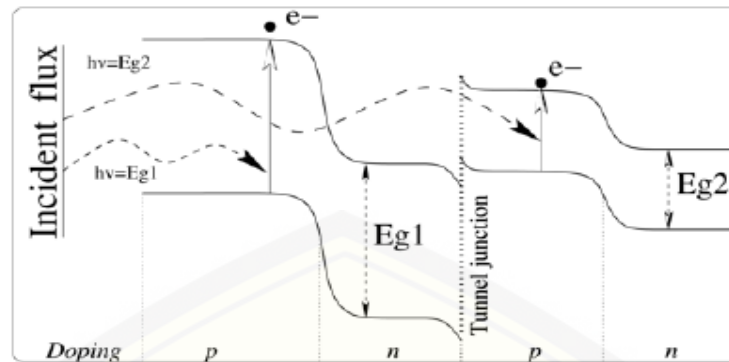


Gambar 2.7 Ilustrasi konsep *multi-junction* (Spitzer dan Fan, 1990)

Energi *gap* yang dimiliki setiap bahan semikonduktor mempengaruhi besar intensitas cahaya matahari yang ditransmisikan oleh lapisan paling pertama untuk dimanfaatkan oleh lapisan selanjutnya. Besar intensitas tersebut dapat ditulis dalam bentuk persamaan:

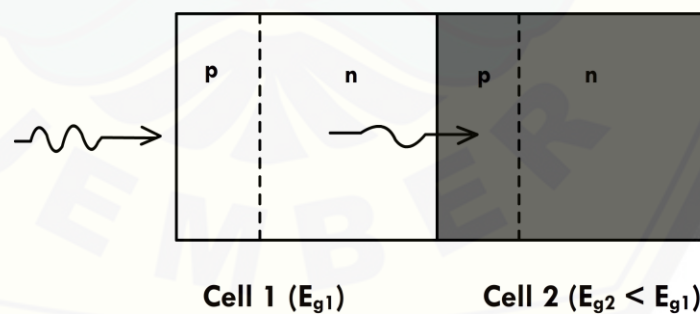
$$I_t = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2.2)$$

Intensitas transmisi ( $I_t$ ) dipengaruhi oleh koefisien absorpsi ( $\alpha$ ) dan ketebalan ( $x$ ) lapisan bahan.  $I_0$  merupakan intensitas yang datang pada setiap lapisan (Wahyuni, 2014). Foton terdiri dari banyak nilai panjang gelombang, dimana ketika foton dengan panjang gelombang tertentu mengenai lapisan pertama yang memiliki energi *gap* yang lebih besar akan diserap. Tetapi untuk foton dengan panjang gelombang yang tidak dapat diserap oleh lapisan pertama akan diserap langsung menuju lapisan kedua yang memiliki energi *gap* lebih kecil dari lapisan pertama seperti pada Gambar 2.8 (Spitzer dan Fan, 1990).



Gambar 2.8 Prinsip persambungan sel surya tandem menurut pita energi bahan (Sumber: Connolly *et al.*, 2013)

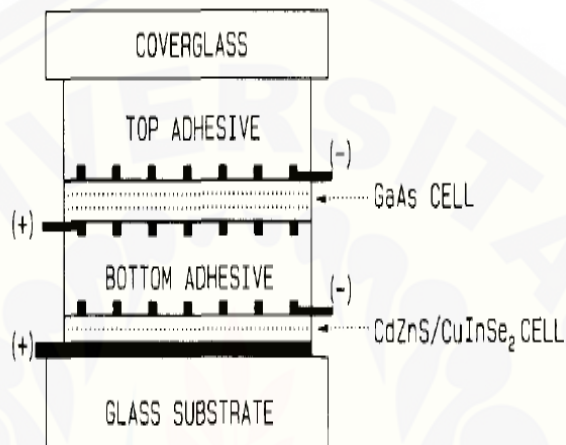
Struktur sel surya *multi-junction* membagi spektrum matahari menjadi dua atau lebih partisi. Foton disetiap partisi yang diserap oleh bahan semikonduktor dipilih sesuai dengan energi *gap*. Semikonduktor yang memiliki energi *gap* terbesar ditempatkan pada lapisan atas/pertama dan yang memiliki energi *gap* rendah berada pada lapisan bawah/kedua, dalam artian energi *gap* bahan semikonduktor pertama lebih besar dari energi *gap* bahan semikonduktor kedua yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 (Kasap, 2006).



Gambar 2.9 Struktur sel surya tandem (Kasap, 2006)

Terdapat dua pendekatan untuk menyusun sel surya struktur tandem, yaitu secara mekanik dan monolitik. Untuk struktur tandem secara mekanik yaitu masing-masing komponen sel surya dibuat secara terpisah, kemudian

digabungkan secara optik dengan suatu lapisan adhesif yang transparan. Sel surya dengan struktur mekanik didesain untuk beroperasi pada empat terminal (Gambar 2.10). Bahan semikonduktor yang baik digunakan pada struktur tandem secara mekanik diantaranya GaAs/Si, AlGaAs/Si, GaAs/CuInSe<sub>2</sub>, GaAs/Ge, GaAsP/GaAsSb (Spitzer dan Fan, 1990; Karim *et al.*, 2004; Aberle *et al.*, 2014).



Gambar 2.10 Struktur tandem mekanik GaAs/CuInSe<sub>2</sub> (Sumber: Spitzer dan Fan, 1990)

Berbeda dengan struktur sebelumnya, sel surya yang disusun tandem secara monolitik, dibentuk melalui proses penumbuhan secara epitaksi komponen sel surya bagian/lapisan pertama sebelum komponen sel surya lapisan kedua pada suatu substrat. Sel surya dengan struktur monolitik didesain untuk beroperasi pada dua terminal (Gambar 2.11). Bahan semikonduktor yang digunakan pada struktur tandem secara monolitik diantaranya AlGaAs/GaAs, GaInP<sub>2</sub>/GaAs, AlGaAs/Ge (Spitzer dan Fan, 1990; Karim *et al.*, 2004; Aberle *et al.*, 2014).

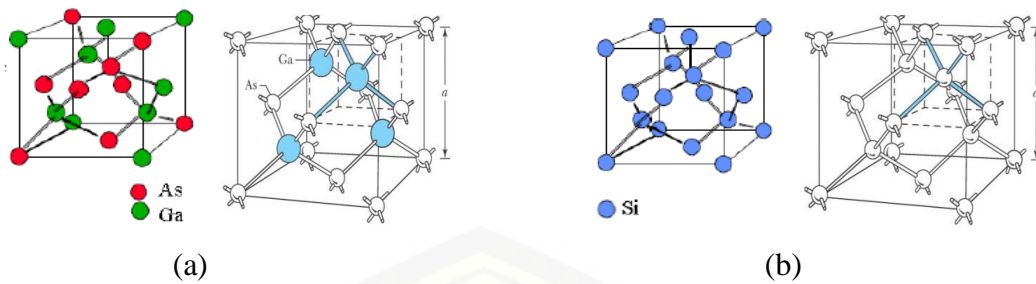


	t ( $\mu\text{m}$ )	
n-AlInP <sub>2</sub>	0.04	Top cell
n-GaInP <sub>2</sub>	0.1	
p-GaInP <sub>2</sub>	2.5	
p <sup>+</sup> -GaAs	0.02	Tunnel diode
n <sup>+</sup> -GaAs	0.02	
n-AlGaAs	0.2	Bottom Cell
n-GaAs	0.1	
p-GaAs	3.5	
p <sup>+</sup> -GaAs	substrate	

Gambar 2.11 Struktur tandem monolitik GaInP<sub>2</sub>/GaAs (Sumber: Spitzer dan Fan, 1990)

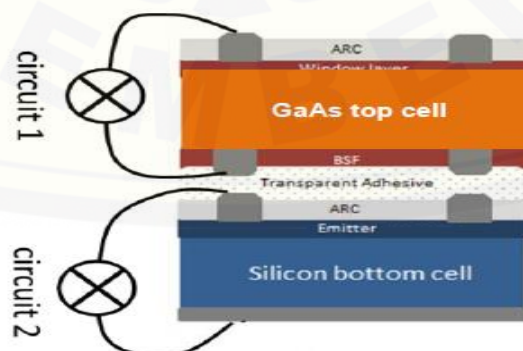
#### 2.4 Tandem Galium Arsenida/Silikon (GaAs/Si)

Penelitian pertama mengenai struktur tandem GaAs/Si dilakukan pada tahun 1984 (Spitzer dan Fan, 1990). Sesuai dengan teori Kurtz dan Geisz (2010) dan Connolly *et al.* (2013) bahwa bahan semikonduktor yang baik untuk dibuat struktur sel surya tandem *multi-junction* yaitu berasal dari unsur golongan IIIA dan VA digabungkan dengan Silikon dari unsur golongan IVA. Akan lebih baik pula jika bahan semikonduktor struktur tandem memiliki struktur kristal yang sama agar efisiensi yang dihasilkan maksimal. Pada penelitian Vijayakumar dan Birnie (2013) mengenai simulasi sel surya struktur tandem dengan menggabungkan bahan semikonduktor Galium Arsenida (GaAs) dengan Silikon (Si) yang dibuat secara mekanik, dimana bahan GaAs dan Si memiliki struktur kristal yang hampir sama seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Struktur kristal (a) GaAs dan (b) Si (Sumber: Fuller, 2001; Sze dan Lee, 2012; Alviati, 2015)

Sel surya struktur tandem secara mekanik dievaluasi untuk meningkatkan kinerja sel surya melalui nilai efisiensi yang tinggi. Pada penelitian Vijayakumar dan Birnie (2013), bahan semikonduktor Galium Arsenida (GaAs) diletakkan pada lapisan atas dengan celah pita energi sebesar 1,43 eV dan bahan semikonduktor Silikon (Si) diletakkan pada lapisan dibawah GaAs dengan celah pita energi sebesar 1,12 eV. Susunan letak bahan semikonduktor pada penelitian tersebut telah sesuai dengan teori bahwa bahan yang memiliki energi *gap* lebih besar diletakkan pada lapisan pertama. Bahan GaAs tidak dapat menyerap dan mengkonversi spektrum inframerah menjadi listrik, oleh karena itu bahan GaAs disusun secara tandem dengan bahan Silikon yang peka terhadap spektrum inframerah (Karim *et al.*, 2004). Struktur lapisan sel surya tandem GaAs/Si ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Struktur lapisan sel surya tandem GaAs/Si (Sumber: Aberle *et al.*, 2014)

## 2.5 Transport Muatan Semikonduktor

Pada bahan semikonduktor terjadi aliran muatan *hole* dan elektron yang menghasilkan rapat arus difusi dan rapat arus *drift*. Transport pembawa muatan merupakan dasar untuk menentukan karakteristik I-V semikonduktor.

### 2.5.1 Rapat Arus Difusi

Adanya perbedaan konsentrasi *hole* dan elektron dalam bahan semikonduktor menyebabkan timbulnya rapat arus difusi. Pada rapat arus difusi, *hole* dan elektron bergerak dari daerah konsentrasi tinggi ke rendah. Rapat arus difusi untuk *hole* dan elektron dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Gray, 2003):

$$\vec{J}_p = -qD_p \nabla p \quad (2.3)$$

$$\vec{J}_n = qD_n \nabla n \quad (2.4)$$

keterangan:

$\vec{J}_p$  = rapat arus *hole* (A/cm<sup>2</sup>)

$\vec{J}_n$  = rapat arus elektron (A/cm<sup>2</sup>)

$q$  = 1,602 x 10<sup>-19</sup> (C)

$D_p$  = konstanta difusi *hole* (cm<sup>2</sup>/s)

$D_n$  = konstanta difusi elektron (cm<sup>2</sup>/s)

$p$  = konsentrasi *hole* (cm<sup>-3</sup>)

$n$  = konsentrasi elektron (cm<sup>-3</sup>)

### 2.5.2 Rapat Arus *Drift*

Setelah terjadinya rapat arus difusi yang menyebabkan terbentuknya daerah deplesi, maka muncul medan listrik yang memicu terbentuknya rapat arus *drift*. Rapat arus *drift* untuk *hole* dan elektron dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Puri dan Babbar, 2001):

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} \quad (2.6)$$

keterangan:

$\mu_p$  = mobilitas *hole* (cm<sup>2</sup>/Vs)

$\mu_n$  = mobilitas elektron (cm<sup>2</sup>/Vs)

$\vec{E}$  = medan listrik (V/cm)

Rapat arus total pada bahan semikonduktor  $\vec{J}_T$  (A/cm<sup>2</sup>) yang merupakan jumlah rapat arus difusi dan rapat arus *drift* dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Puri dan Babbar, 2001):

$$\vec{J}_T = \vec{J}_p + \vec{J}_n \quad (2.7)$$

dimana,

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p\nabla p \quad (2.8)$$

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n\nabla n \quad (2.9)$$

### 2.5.3 Relasi Einstein

Mobilitas dan konstanta difusi bukan parameter yang saling *independent* (berdiri sendiri), keduanya saling berhubungan sesuai relasi Einstein yang dituliskan pada persamaan berikut (Jaeger dan Blalock, 2011):

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (2.10)$$

Persamaan  $kT/q$  merupakan tegangan termal. Pada temperatur ruang, nilai  $kT/q$  adalah 25,9 volt sehingga berdasarkan persamaan (2.10) jika mobilitas diketahui maka konstanta difusi dapat ditentukan.

## 2.6 Persamaan Matematis Sel Surya

Persamaan yang digunakan dalam mekanisme transport pembawa muatan sel surya yaitu persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas pembawa muatan. Kedua persamaan tersebut digunakan untuk memahami mekanisme fisis pada sel surya.

### 2.6.1 Persamaan Poisson

Besar medan listrik ( $\vec{E}$ ) yang dipengaruhi oleh rapat muatan ( $\rho$ ) ditunjukkan oleh persamaan Poisson, dimana bahan memiliki beda potensial ( $\Psi$ ) yang dipengaruhi oleh rapat muatan dari bahan tersebut. Pembawa muatan bahan terdiri atas elektron (atom donor) dan *hole* (atom akseptor). Sehingga persamaan Poisson dapat dituliskan seperti persamaan berikut (Griffiths, 1999):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \nabla(-\nabla\Psi) = -\nabla^2\Psi = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.11)$$

$$\rho = q(p - n + N) \quad (2.12)$$

$$N = N_D^+ - N_A^- \quad (2.13)$$

keterangan:

$$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ (C)}$$

$$\varepsilon = \text{permitivitas bahan (F/cm)}$$

$$p = \text{konsentrasi hole (cm}^{-3}\text{)}$$

$$n = \text{konsentrasi elektron (cm}^{-3}\text{)}$$

$$N = \text{konsentrasi atom (cm}^{-3}\text{)}$$

$$N_D^+ = \text{konsentrasi atom donor (cm}^{-3}\text{)}$$

$$N_A^- = \text{konsentrasi atom akseptor (cm}^{-3}\text{)}$$

maka dapat dinyatakan bahwa persamaan Poisson merupakan divergensi dari medan listrik yang sebanding dengan total muatan dibagi permitivitas bahan.



### 2.6.2 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan

Hubungan antara proses generasi, rekombinasi dan rapat arus listrik akibat aliran *hole* dan elektron ditunjukkan oleh persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas untuk aliran *hole* dan elektron dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Goetzberger, 1998):

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p = G - R \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n = R - G \quad (2.15)$$

keterangan:

$G$  = laju generasi ( $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )

$R$  = laju rekombinasi ( $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )

Ketika foton mengenai permukaan bahan semikonduktor akan membentuk pasangan elektron-*hole* akibat eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga pada pita valensi terbentuk *hole* yang disebut laju generasi. Laju generasi dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut (Usman, 2006):

$$G = \frac{F\alpha}{1-P} (e^{-\alpha x} + P e^{\alpha x}) \quad (2.16)$$

keterangan:

$F$  = rapat fluks foton ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

$\alpha$  = koefisien absorpsi ( $\text{cm}^{-1}$ )

$P$  = koefisien transmisi cahaya

$x$  = posisi sel surya dari tepi teratas lapisan-p

Selain mengalami laju generasi, pasangan elektron-*hole* juga mengalami laju rekombinasi yang diakibatkan elektron bergerak dari pita konduksi ke pita valensi dengan melepas sejumlah energi sebesar celah pita energi dari bahan. Proses penghilangan pasangan elektron-*hole* terjadi karena elektron dari pita

konduksi bergerak ke pita valensi menyebabkan hilangnya *hole* pada pita valensi dan elektron pada pita konduksi (Puri dan Babbar, 2001). Laju rekombinasi dipengaruhi oleh jumlah pembawa muatan pada bahan, misal bahan sel surya yang terbuat dari semikonduktor dengan transisi tidak langsung (*indirect transition*) seperti Silikon dan Germanium. Maka laju rekombinasi dapat ditentukan dengan *Shockley Read Hall Recombination* sebagai berikut (Seet, 1998):

$$R = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.17)$$

Sedangkan pada bahan sel surya yang terbuat dari semikonduktor dengan transisi langsung (*direct transition*), maka laju rekombinasi dapat dituliskan sebagai berikut (Sze dan Lee, 2012):

$$R = \text{cdir}(pn - n_i^2) \quad (2.18)$$

keterangan:

$n_i$  = konsentrasi intrinsik ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\tau_p$  = waktu hidup rekombinasi *hole* ( $\mu\text{s}$ )

$\tau_n$  = waktu hidup rekombinasi elektron ( $\mu\text{s}$ )

$p_1$  = konsentrasi *hole* yang bergantung pada lokasi tingkat *trap* pada celah pita energi ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_1$  = konsentrasi elektron yang bergantung pada lokasi tingkat *trap* pada celah pita energi ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\text{cdir}$  = konstanta rekombinasi *direct* ( $1,0 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$ )

### 2.6.3 Syarat Batas Neumann dan Dirichlet

Kondisi batas berkaitan dengan perancangan geometri dioda sel surya untuk kontak batas yang jauh dari daerah divais aktif digunakan kondisi batas Neumann, dimana pengaruh medan listrik ( $\vec{E}$ ) dan rapat arus elektron-*hole* ( $J_n$ )

dan  $J_p$ ) memiliki komponen normal bernilai nol seperti persamaan berikut (Danielsson, 2000):

$$\hat{n}.E = 0 \quad (2.19)$$

$$\hat{n}.J_n = 0 \quad (2.20)$$

$$\hat{n}.J_p = 0 \quad (2.21)$$

Untuk kontak batas dioda yang dekat dengan konduktor atau logam digunakan kondisi batas Dirichlet, dimana potensial elektrostatik ( $\Psi$ ) dianggap tetap, dengan asumsi bahwa laju rekombinasi dalam kontak logam bernilai tak hingga (Usman, 2006). Persamaan batas Dirichlet ditunjukkan oleh persamaan berikut (Danielsson, 2000):

$$\Psi = V_A + \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (2.22)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (2.23)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (2.24)$$

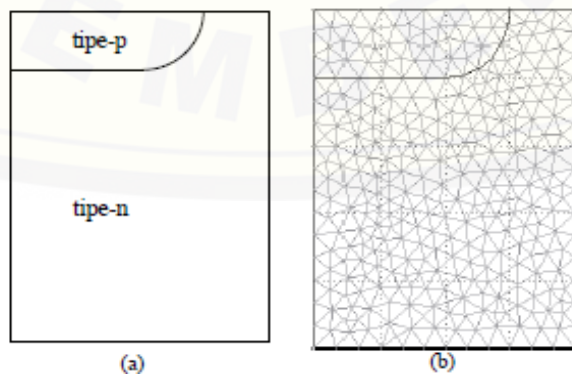
Dengan demikian dapat ditentukan syarat batas pada kontak logam dengan melibatkan konsentrasi dopan, jika pada kontak logam diberi tegangan eksternal maka nilai beda potensial elektrostatik adalah sama dengan tegangan eksternal ( $V_A$ ) ditambah dengan tegangan divais yang memiliki hubungan logaritmik dengan konsentrasi pembawa muatan ( $N$ ).

## 2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang diperkenalkan pada akhir tahun 1970 dan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan nilai

batas dengan membagi geometri material menjadi elemen-elemen kecil menggunakan pendekatan persamaan differensial. Dasar pendekatan persamaan differensial yaitu dengan mengasumsikan bahwa setiap elemen memiliki solusi berupa fungsi sederhana tertentu, dimana fungsi kontinu akan diubah menjadi fungsi diskrit. Sehingga solusi umum dari bahan merupakan penggabungan dari solusi masing-masing elemen. Solusi akan semakin akurat jika ukuran elemen semakin kecil. Selain itu, metode elemen hingga dapat digunakan untuk menggambarkan sifat-sifat kelistrikan divais sel surya (Polycarpou, 2006; Usman, 2006).

Divais semikonduktor memiliki distribusi muatan yang tidak linier sehingga dengan menerapkan metode elemen hingga dapat membagi geometri menjadi elemen-elemen dengan bentuk segitiga kecil yang saling berikatan (*mesh*) dan cocok digunakan untuk simulasi. Karena metode elemen hingga dapat digunakan untuk memodelkan material semikonduktor dengan struktur geometri tidak rata maupun distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier dalam setiap bagiannya (Larson dan Bengzon, 2010). Geometri pada simulasi divais semikonduktor berupa dioda p-n *junction* akan dibagi menjadi elemen segitiga-segitiga kecil atau segiempat bergantung terhadap tingkat kesulitan dari material yang dimodelkan dengan menggunakan beberapa variabel tertentu. Untuk struktur geometri yang rumit, biasanya digunakan pembagian menjadi bentuk segitiga (Gambar 2.14) (Danielsson, 2000).



Gambar 2.14 Geometri dioda persambungan p-n 2D (Danielsson, 2000)

Variabel yang digunakan pada simulasi divais semikonduktor yaitu  $\Psi$ ,  $p$  dan  $n$ . Solusi umum masing-masing variabel tersebut jika diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut:

$$\Psi = \sum_{j=1}^a \Psi_j \quad (2.25)$$

$$p = \sum_{j=1}^a p_j \quad (2.26)$$

$$n = \sum_{j=1}^a n_j \quad (2.27)$$

Variabel  $\Psi$ ,  $p$  dan  $n$  berhubungan dengan tingkat quasi-Fermi pembawa muatan yang dituliskan dalam persamaan berikut (Danielsson, 2000):

$$p = p_i e^{-\Psi} v \quad (2.28)$$

$$n = n_i e^{\Psi} u \quad (2.29)$$

keterangan:

$\Psi$  = potensial elektrostatik (volt)

$a$  = jumlah elemen

$j$  = elemen batas

$v$  = variabel bebas *hole*

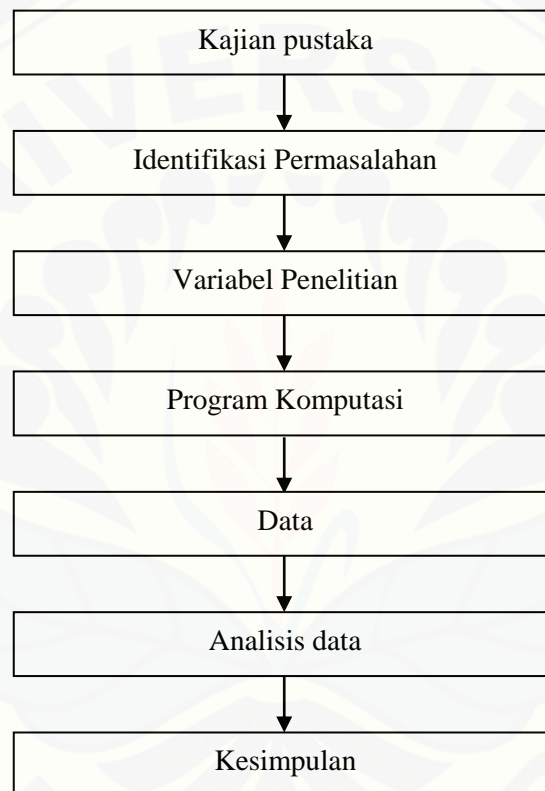
$u$  = variabel bebas elektron



### BAB 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan kegiatan penelitian yang akan dilakukan ditunjukkan melalui alur kegiatan penelitian, seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Alur kegiatan penelitian

Proses kegiatan penelitian diawali dengan kajian pustaka, yaitu mencari dan mengumpulkan informasi terkait dengan penelitian mengenai kegiatan simulasi dari berbagai referensi. Setelah diperoleh informasi melalui kajian pustaka, dilakukan identifikasi permasalahan yang akan diselesaikan yaitu bagaimana distribusi pembawa muatan pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction*. Permasalahan tersebut didasarkan pada kajian pustaka yang

menjelaskan bahwa pada struktur *single-junction* terdapat foton yang tidak dapat diserap dan berubah menjadi panas, sehingga dengan struktur *multi-junction* foton dapat diserap lebih banyak karena struktur *multi-junction* memiliki dua atau lebih persambungan p-n, maka foton yang tidak dapat diserap bahan pertama akan diserap oleh bahan selanjutnya. Banyak atau sedikitnya foton yang dapat diserap oleh bahan akan mempengaruhi konsentrasi pembawa muatan pada bahan, dimana konsentrasi pembawa muatan sangat berkaitan dengan potensial elektrostatik pada bahan. Beberapa variabel diidentifikasi untuk kegiatan simulasi menggunakan program komputer. Dalam kegiatan simulasi ini digunakan *software* MATLAB 5.3 dan FEMLAB 2.1 pada *hardware* laptop acer dengan spesifikasi prosesor intel (R) core (TM) i3-380M CPU 2.53GHz sistem 32-bit. Setelah data diperoleh, selanjutnya dilakukan analisis data untuk dianalisa sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan. Hasil analisis data tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk membuat kesimpulan.

### **3.2 Jenis dan Sumber Data Penelitian**

#### **3.2.1 Jenis Penelitian**

Penelitian yang dilakukan merupakan kegiatan simulasi untuk menganalisa distribusi pembawa muatan terkait dengan potensial elektrostatik pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction*. Konsentrasi pembawa muatan sel surya struktur *multi-junction* maupun *single-junction* tersebut diperoleh melalui pengolahan parameter fisis yang telah diketahui. Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif karena data yang diperoleh melalui perhitungan secara numerik.

#### **3.2.2 Sumber Data Penelitian**

Data yang digunakan untuk menentukan distribusi pembawa muatan sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* yaitu data sekunder. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil dari penelitian Vijayakumar dan Birnie (2013), Fitriana (2014) dan Alviati (2015), serta referensi yang diperoleh dari buku dan internet. Data tersebut secara rinci ditunjukkan pada Tabel 3.1. Data

selanjutnya yaitu geometri struktur *multi-junction* berbentuk persegi panjang sesuai dengan referensi pada Kasap (2006) dan ukuran lapisan sesuai referensi pada Danielsson (2000).

### 3.3 Variabel Penelitian dan Skala Pengukuran

#### 3.3.1 Variabel Penelitian

Terdapat tiga macam variabel yang digunakan dalam kegiatan penelitian ini yaitu variabel bebas, variabel kontrol dan variabel terikat. Variabel bebas pada penelitian berupa struktur persambungan divais sel surya yaitu struktur *multi-junction* dan *single-junction*, serta variasi tegangan *input*. Beberapa data yang menjadi kendali dalam simulasi menjadi variabel kontrol dalam penelitian yang nilainya konstan ditunjukkan pada Tabel 3.1. Hasil dari kegiatan simulasi yang dilakukan yaitu distribusi pembawa muatan (elektron dan *hole*) dari divais sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction*, yang dalam hal ini menjadi variabel terikat dari kegiatan penelitian. Variabel terikat merupakan komponen parameter dalam penelitian yang menjadi tujuan akhir dari hasil simulasi, yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas dan variabel kontrol. Distribusi pembawa muatan (elektron dan *hole*) merupakan visualisasi konsentrasi pembawa muatan dari variabel terikat yang akan dianalisa nilainya pada struktur divais yang disimulasikan.

#### 3.3.2 Skala Pengukuran

Skala pengukuran yang digunakan dalam penelitian ini merupakan skala *ratio* dengan membandingkan dua obyek yang diteliti. Obyek yang diteliti pada penelitian ini yaitu distribusi pembawa muatan pada divais sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* saat divariasi tegangan *input* sebesar 0 volt-0,4 volt dengan rentang 0,025 volt. Hasil yang diperoleh berupa data tabel konsentrasi pembawa muatan yang dihasilkan.

### 3.4 Kerangka Pemecahan Masalah

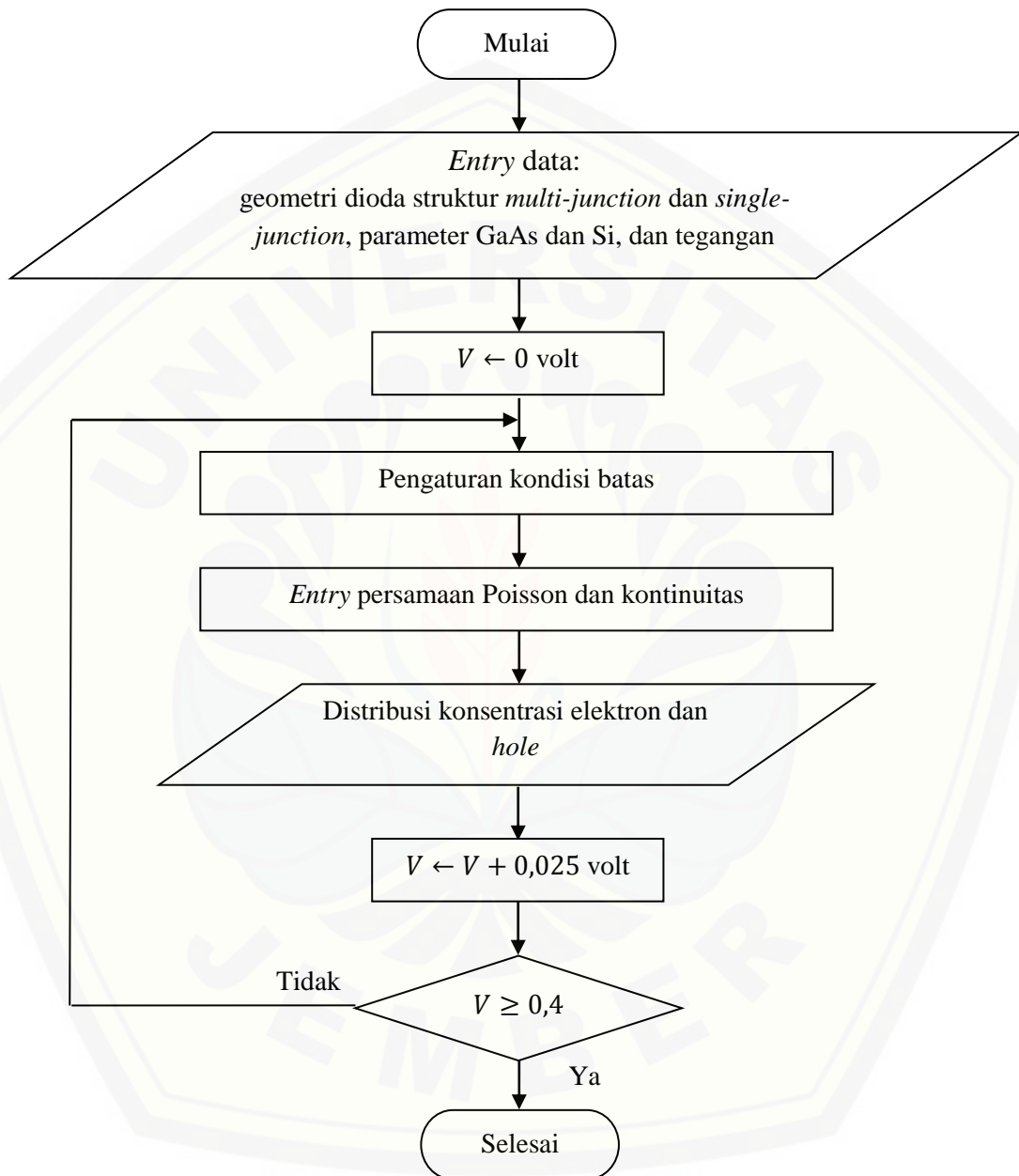
#### 3.4.1 Kajian Pustaka

Kegiatan simulasi diawali dengan mengidentifikasi permasalahan yang akan diselesaikan yaitu bagaimana distribusi pembawa muatan pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction*. Permasalahan tersebut diidentifikasi melalui referensi dari berbagai literatur sebagai kajian pustaka terkait dengan penelitian yang akan dilakukan. Referensi yang digunakan dapat diperoleh dari buku, skripsi, tesis, desertasi, jurnal dan link yang memiliki akurasi informasi. Melalui berbagai referensi yang diperoleh digunakan sebagai landasan atau acuan untuk mendukung penelitian yang akan dilakukan. Referensi yang digunakan dalam penelitian ini berupa informasi mengenai bahan semikonduktor dan fenomena fisis pada perkembangan sel surya ditinjau dari struktur persambungan lapisan bahan, dimana struktur yang digunakan yaitu *multi-junction* dan *single-junction*. Selain itu, referensi tersebut digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter dan persamaan-persamaan yang dibutuhkan sebagai *input* penelitian. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan semikonduktor Galium Arsenida dan Silikon yang diaplikasikan untuk divais sel surya dengan struktur *multi-junction* dan *single-junction*. Hasil dari kegiatan simulasi yang akan dilakukan yaitu distribusi pembawa muatan pada masing-masing struktur dengan menerapkan nilai tegangan *input* sebesar 0 volt-0,4 volt dengan rentang 0,025 volt.

#### 3.4.2 Mekanisme Simulasi

Tahapan kegiatan simulasi untuk memperoleh hasil distribusi pembawa muatan sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* ditunjukkan pada Gambar 3.2. Kegiatan awal simulasi dilakukan dengan membuat geometri bahan sel surya untuk struktur *multi-junction* GaAs/Si dan struktur *single-junction* untuk GaAs dan Si. Pembuatan geometri bahan struktur *multi-junction* sesuai dengan referensi pada Kasap (2006), dimana susunan antar lapisan yang dibuat berbentuk persegi panjang persambungan p-n-p-n seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Ukuran geometri bahan pada kegiatan simulasi ini menggunakan ukuran yang

sama sesuai referensi pada Danielsson (2000) yaitu dengan panjang bahan sebesar  $0,7 \mu\text{m}$  pada sumbu x dan lebar bahan sebesar  $0,5 \mu\text{m}$  pada sumbu y.



Gambar 3.2 Diagram alir kegiatan simulasi

Setelah pembuatan geometri bahan selesai, dimasukkan parameter-parameter *input* yang dibutuhkan dalam simulasi. Parameter-parameter tersebut

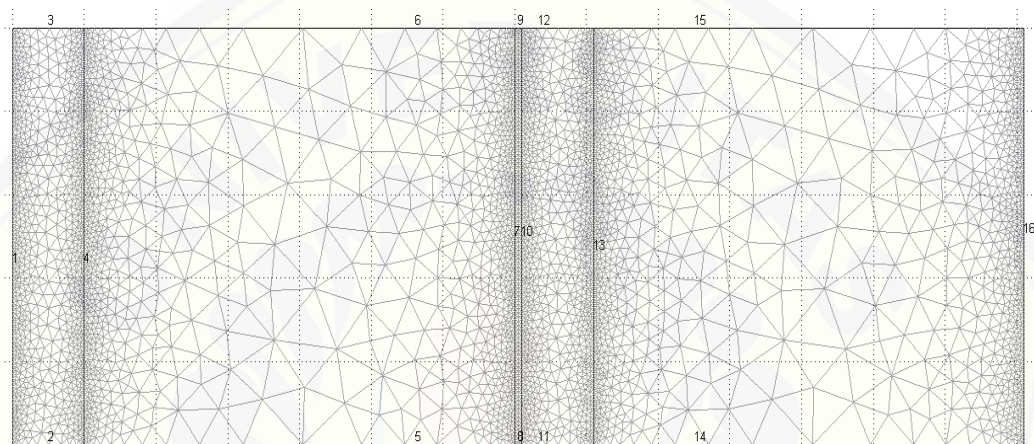


ditunjukkan pada Tabel 3.1. Kemudian dilakukan pengaturan kondisi batas pada geometri, kondisi batas yang digunakan yaitu kondisi batas Neumann yang diterapkan pada batas yang jauh dari kontak logam dan kondisi batas Dirichlet yang diterapkan pada batas yang dekat dengan kontak logam (anoda dan katoda). Selanjutnya menampilkan distribusi pembawa muatan dengan menerapkan nilai tegangan *input* sebesar 0 volt-0,4 volt dengan rentang 0,025 volt. Setelah distribusi pembawa muatan diperoleh pada masing-masing struktur, selanjutnya dianalisa nilai konsentrasi pembawa muatan pada tiap lapisan untuk tiga titik yang ditentukan yaitu titik dekat anoda, titik persambungan p-n dan titik dekat katoda.

a. Geometri Sel Surya Struktur *Multi-Junction* dan *Single-junction*

Bentuk geometri sel surya struktur *multi-junction* GaAs/Si dibuat dalam bentuk 2D berupa gabungan p-n *junction* Galium Arsenida (GaAs) dan p-n *junction* Silikon (Si) yang tersusun horizontal seperti Gambar 3.3. Struktur *multi-junction* yang digunakan pada penelitian ini yaitu tandem mekanik yang pada persambungan antara dua bahan (GaAs dan Silikon) terdapat suatu lapisan adhesif, dimana lapisan adhesif tersebut bersifat isolator dan transparan, sehingga pada lapisan tersebut tidak dapat menghantarkan arus listrik tetapi dapat meloloskan foton. Geometri bahan dibuat satu persatu dengan ukuran yang sama, karena pada struktur sel surya *multi-junction* terdapat dua bahan semikonduktor yang berbeda digabungkan. Ukuran pada setiap lapisan bahan lapisan-p dibuat lebih tipis dibandingkan lapisan-n. Sel surya struktur *multi-junction* GaAs/Si terdiri dari 4 buah subdomain yaitu 2 buah subdomain tipe-n GaAs-n/Si-n dan 2 buah subdomain tipe-p GaAs-p/Si-p. Pada 2 buah subdomain tipe-n masing-masing bahan didoping oleh konsentrasi donor, sedangkan pada 2 buah subdomain tipe-p masing-masing bahan didoping oleh konsentrasi akseptor. Panjang struktur tipe-p dan tipe-n berturut-turut sebesar 0,1  $\mu\text{m}$  dan 0,6  $\mu\text{m}$  ditambah dengan lapisan adhesif sebesar 0,01  $\mu\text{m}$ . Total batas dari geometri dioda sel surya *multi-junction* terdiri dari 16 batas. Batas 1 (anoda) pada bahan GaAs dan 7 (katoda) pada bahan GaAs yang merupakan batas kontak dioda dengan logam pada persambungan p-n pertama dan batas 10 (anoda) pada bahan Si dan

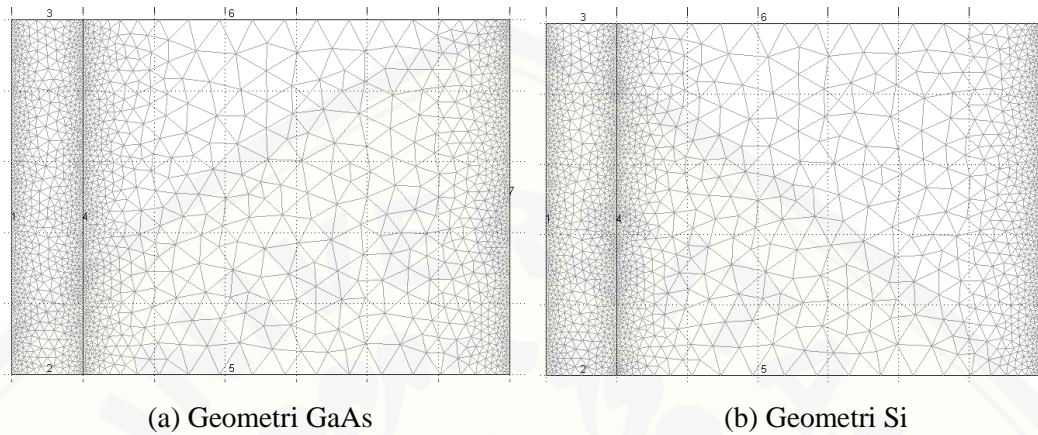
16 (katoda) pada bahan Si yang merupakan batas kontak dioda dengan logam pada persambungan p-n kedua. Sedangkan batas 4 merupakan daerah persambungan tipe-p dan tipe-n bahan semikonduktor GaAs dan batas 13 merupakan daerah persambungan tipe-p dan tipe-n bahan semikonduktor Si. Pada geometri sel surya *multi-junction* semua daerah batas tersebut dibuat lebih rapat ukuran *mesh*-nya yaitu sebesar 0,005 agar hasil yang didapatkan lebih akurat.



Gambar 3.3 Geometri sel surya struktur *multi-junction*

Bentuk geometri selanjutnya yaitu sel surya struktur *single-junction* GaAs dan Si yang merupakan pecahan struktur *multi-junction* GaAs/Si seperti pada Gambar 3.4. Geometri sel surya struktur *single-junction* juga didesain dalam bentuk 2D berupa geometri p-n *junction* Galium Arsenida (GaAs) dan p-n *junction* Silikon (Si) berbentuk persegi horizontal. Sel surya struktur *single-junction* GaAs terdiri dari 2 buah subdomain yaitu 1 buah subdomain tipe-n GaAs-n dan 1 buah subdomain tipe-p GaAs-p. Pada Sel surya struktur *single-junction* Si juga terdiri dari 2 buah subdomain yaitu 1 buah subdomain tipe-n Si-n dan 1 buah subdomain tipe-p Si-p. Panjang struktur tipe-p dan tipe-n pada setiap geometri bahan GaAs dan Si berturut-turut sebesar 0,1  $\mu\text{m}$  dan 0,6  $\mu\text{m}$ . Total batas dari geometri pada masing-masing dioda sel surya *single-junction* terdiri dari 7 batas. Batas 7 (katoda) dan 1 (anoda) yang merupakan batas kontak dioda dengan logam sedangkan batas 4 merupakan daerah persambungan tipe-p dan

tipe-n bahan semikonduktor GaAs dan Si. Sama halnya dengan geometri sel surya *multi-junction* semua daerah batas tersebut dibuat lebih rapat ukuran *mesh*-nya yaitu sebesar 0,005 agar hasil yang didapatkan lebih akurat.



Gambar 3.4 Geometri dioda sel surya struktur *single-junction*

#### b. Parameter *Input* Galium Arsenida dan Silikon

Parameter-parameter *input* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan karakteristik dari bahan semikonduktor Galium Arsenida dan Silikon. Parameter-parameter tersebut diperoleh dari berbagai referensi pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Parameter *input* yang berupa besaran fisika ditunjukkan pada Tabel 3.1. Parameter-parameter tersebut merupakan *input* pada setiap lapisan bahan, kecuali pada lapisan adhesif tidak ada parameter yang di terapkan. Parameter pada Tabel 3.1 merupakan parameter yang di terapkan pada bahan Galium Arsenida dan Silikon baik pada geometri struktur *multi-junction* dan *single-junction*.

Tabel 3.1 Parameter *input*

Parameter	Nilai
Muatan elektron ( $q$ )	$1,602 \times 10^{-19}$ C (Danielsson, 2000)
Permitivitas vakum ( $\epsilon_0$ )	$8,85 \times 10^{-14}$ F/cm (Danielsson, 2000)
Temperatur ( $T$ )	300 K (Danielsson, 2000)
Konstanta Boltzman ( $K$ )	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K (Danielsson, 2000)



Parameter	Nilai
Permittivitas bahan GaAs ( $\epsilon_{rGaAs}$ )	13,1 F/cm (Slimane <i>et al.</i> , 2013)
permittivitas bahan Si ( $\epsilon_{rSi}$ )	11,8 F/cm (Danielsson, 2000)
Panjang geometri bahan ( $x$ )	0,7 $\mu\text{m}$ (Danielsson, 2000)
Koefisien rekombinasi GaAs ( $C_{dir}$ )	$10^{-10} \text{ cm}^{-3}$ (Palankovski, 2000)
Konsentrasi intrinsik GaAs ( $n_{iGaAs}$ )	$9,00 \times 10^8 / \text{C0}$ (Pierret, 2002)
Konsentrasi intrinsik Si ( $n_{iSi}$ )	$1,45 \times 10^{10} / \text{C0}$ (Danielsson, 2000)
Mobilitas elektron GaAs ( $\mu_{nGaAs}$ )	$8500 \text{ cm}^{-2} / \text{V.s}$ (Slimane <i>et al.</i> , 2013)
Mobilitas <i>hole</i> GaAs ( $\mu_{pGaAs}$ )	$400 \text{ cm}^{-2} / \text{V.s}$ (Slimane <i>et al.</i> , 2013)
Mobilitas elektron Si ( $\mu_{nSi}$ )	$800 \text{ cm}^{-2} / \text{V.s}$ (Danielsson, 2000)
Mobilitas <i>hole</i> Si ( $\mu_{pSi}$ )	$200 \text{ cm}^{-2} / \text{V.s}$ (Danielsson, 2000)
Koefisien difusi elektron GaAs ( $D_{nGaAs}$ )	$40 \text{ cm}^{-2} / \text{s}$ (Slimane <i>et al.</i> , 2013)
Koefisien difusi <i>hole</i> GaAs ( $D_{pGaAs}$ )	$10 \text{ cm}^{-2} / \text{s}$ (Slimane <i>et al.</i> , 2013)
Koefisien difusi elektron Si ( $D_{nSi}$ )	$21 \text{ cm}^{-2} / \text{s}$ (Danielsson, 2000)
Koefisien difusi <i>hole</i> Si ( $D_{pSi}$ )	$6 \text{ cm}^{-2} / \text{s}$ (Danielsson, 2000)
<i>Life time</i> elektron Si ( $\tau_n$ )	350 $\mu\text{s}$ (Gray, 2003)
<i>Life time hole</i> Si ( $\tau_p$ )	1 $\mu\text{s}$ (Gray, 2003)
Tegangan keluaran ( $V_a$ )	0 Volt (Danielsson, 2000)
Panjang gelombang GaAs ( $\lambda_{GaAs}$ )	0,8 $\mu\text{m}$ (Liou dan Wong, 1992)
Panjang gelombang Si ( $\lambda_{Si}$ )	0,5 $\mu\text{m}$ (Green dan Keevers, 1995)
Koefisien absorpsi GaAs ( $\alpha_{GaAs}$ )	$1,5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ (Liou dan Wong, 1992)
Koefisien absorpsi Si ( $\alpha_{Si}$ )	$1,1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ (Green dan Keevers, 1995)
Koefisien transmisi cahaya GaAs ( $P_{GaAs}$ )	0,000058 (Jellison, 1992)
Koefisien transmisi cahaya Si ( $P_{Si}$ )	0,00026 (Jellison, 1992)
Konsentrasi fluks sinar matahari (C)	1 (Karim <i>et al.</i> , 2004)
Rapat fluks foton (F)	$C^*(-2,5 * \lambda + 5,7) * 10^{15}$ (Karim <i>et al.</i> , 2004)

Beberapa parameter *input* yang dibutuhkan pada kegiatan simulasi untuk bahan Galium Arsenida (GaAs) dan Silikon (Si), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1 digunakan dalam bentuk tanpa satuan. Hal ini dikarenakan perangkat lunak yang digunakan untuk mensimulasikan pemodelan yang dilakukan tidak membutuhkan satuan atau tidak berdimensi. Oleh karena itu, digunakan faktor skala yang menyebabkan beberapa ekspresi dari parameter *input* menjadi setara (ekivalen). Parameter tersebut meliputi jarak ( $x, y,$ ), potensial listrik ( $\Psi$ ), konsentrasi pembawa muatan ( $n, p$ ), konstanta difusi pembawa muatan ( $D_n, D_p$ ) dan mobilitas pembawa muatan ( $\mu_n, \mu_p$ ). Bentuk faktor skala beserta parameter setelah penyeteraan ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Faktor skala untuk parameter *input*

Parameter	Faktor skala	Parameter ekivalen
$(x, y)$	$x_0 = 10^{-3} \text{ cm}$	$x_1 x_0, y_1 y_0$
$(\Psi)$	$\Psi_0 = \frac{kT}{q}$	$\frac{\Psi}{\Psi_0}$
$(n, p)$	$C_0 = \max( n ,  p )$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}$
$(D_n, D_p)$	$D_0 = \max( D_n ,  D_p )$	$\frac{D_n}{D_0}, \frac{D_p}{D_0}$
$(\mu_n, \mu_p)$	$\frac{D_0}{\Psi_0}$	$\frac{\mu_n \Psi_0}{D_0}, \frac{\mu_p \Psi_0}{D_0}$

Sumber: Danielsson (2000)

### c. Pengaturan Kondisi Batas

Terdapat dua syarat batas yang digunakan dalam mekanisme simulasi untuk menggambarkan mekanisme transport pembawa muatan yaitu syarat batas Neumann dan syarat batas Dirichlet. Pada penelitian ini kedua syarat batas tersebut diterapkan pada batas-batas dari geometri divais. Syarat batas Neumann ditunjukkan pada persamaan (2.19), (2.20) dan (2.21), dimana nilai pada batas adalah 0 (nol). Pada struktur *multi-junction*, syarat batas Neumann diterapkan pada batas 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 14 dan 15. Sedangkan, pada struktur *single-junction* diterapkan pada batas 2, 3, 4, 5 dan 6.

Syarat batas Dirichlet ditunjukkan pada persamaan (2.22), (2.23) dan (2.24), yang diterapkan pada batas 1, 7, 10 dan 16 untuk struktur *multi-junction*. Sedangkan, untuk *single-junction* diterapkan pada batas 1 dan 7. Pada persamaan (2.22), (2.23) dan (2.24) terdapat parameter konsentrasi pembawa muatan ( $N$ ) sebagai fungsi konsentrasi impuritas, yang mendefinisikan bahwasanya konsentrasi elektron dan *hole* tertinggi masing-masing berada pada lapisan-n dan p. Formulasi digunakan adalah sebagai berikut (Danielsson, 2000):

$$N = \left( ND_n + ND_{nmax} e^{-\left(\frac{x_1 x_2 - x}{ch}\right)^2} - NA_{pmax} e^{-\left(\frac{x}{ch}\right)^2} \right) \quad (3.7)$$



dimana  $ch$  merupakan fungsi konsentrasi ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ch = \frac{ju}{\sqrt{\log(N_{A_{pmax}}/ND_n)}} \quad (3.8)$$

keterangan:

$ND_n$  = konsentrasi donor pada daerah tipe-n ( $1 \times 10^{15}/cm^2$ )

$ND_{nmax}$  = konsentrasi donor tertinggi pada daerah tipe-n  
(GaAs =  $1 \times 10^{16}/cm^2$ , Si =  $1 \times 10^{17}/cm^2$ )

$NA_{pmax}$  = konsentrasi akseptor tertinggi pada daerah tipe-p  
(GaAs =  $1 \times 10^{16}/cm^2$ , Si =  $1 \times 10^{17}/cm^2$ )

$ac$  = panjang batas anoda pada geometri dioda ( $0,5 \mu m$ )

$ju$  = panjang batas 2 pada geometri dioda ( $0,1 \mu m$ )

$x1, x2$  = panjang geometri dioda ( $0,7 \mu m$ )

#### d. Persamaan Poisson dan Kontinuitas

Penyelesaian persamaan differensial bahan semikonduktor menggunakan persamaan Poisson dan persamaan kontinuitas. Persamaan Poisson ditunjukkan pada persamaan (2.11), dimana diketahui persamaan pembawa muatan elektron dan *hole* ditunjukkan pada persamaan (2.28) dan (2.29). Persamaan pembawa muatan elektron dan *hole* tersebut disubstitusikan kedalam persamaan Poisson, sehingga diperoleh persamaan berikut (Danielsson, 2000):

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon} (n_i(e^{\psi} u - e^{-\psi} v) - N_D^+ + N_A^-) \quad (3.9)$$

Selanjutnya persamaan kontinuitas digunakan untuk menjelaskan secara matematis proses generasi dan rekombinasi pada sel surya. Persamaan kontinuitas untuk elektron dan *hole* pada transisi *indirect* untuk bahan Silikon ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{F * \alpha * (e^{-\alpha * x} + P * e^{\alpha * x})}{1 - P} - \frac{n_i * (v * u - 1)}{\tau_n(e^{-\psi} * v + 1) + \tau_p(e^{\psi} * u + 1)} \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = \frac{n_i * (v * u - 1)}{\tau_n(e^{-\psi} * v + 1) + \tau_p(e^{\psi} * u + 1)} - \frac{F * \alpha * (e^{-\alpha * x} + P * e^{\alpha * x})}{1 - P} \quad (3.11)$$

Adapun persamaan kontinuitas untuk elektron dan *hole* pada transisi *direct* untuk bahan Galium Arsenida ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = \frac{F * \alpha * (e^{-\alpha * x} + P * e^{\alpha * x})}{1 - P} - \text{cdir} * (n_i * (v * u - 1)) \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = \text{cdir} * (n_i * (v * u - 1)) - \frac{F * \alpha * (e^{-\alpha * x} + P * e^{\alpha * x})}{1 - P} \quad (3.13)$$

Persamaan Poisson dan kontinuitas saling berhubungan untuk menganalisa peristiwa fisis pada dioda sel surya.

#### e. Distribusi Pembawa Muatan

Tahapan terakhir dalam kegiatan simulasi untuk penelitian ini yaitu memasukkan perumusan yang merupakan fungsi dari konsentrasi intrinsik ( $n_i$ ) dan fungsi dari konsentrasi dopan ( $C_0$ ) untuk masing-masing bahan. Oleh karena itu, perumusan yang dimasukkan untuk struktur *multi-junction* dan *single-junction* berbeda. Perumusan untuk struktur *multi-junction* dituliskan sebagai berikut:

$$\log_{10} \left( (n_{i_1} + n_{i_2}) * e^{\psi} * u * (C_{0_1} + C_{0_2}) \right) \quad (3.14)$$

$$\log_{10} \left( (n_{i_1} + n_{i_2}) * e^{-\psi} * v * (C_{0_1} + C_{0_2}) \right) \quad (3.15)$$

Adapun perumusan untuk struktur *single-junction* adalah sebagai berikut:

$$\log_{10}(n_i * e^{\psi} * u * C_0) \quad (3.16)$$

$$\log_{10}(n_i * e^{-\psi} * v * C_0) \quad (3.17)$$

keterangan:

$n_{i_1}$  = konsentrasi intrinsik bahan pertama ( $\text{cm}^{-3}$ )

$n_{i_2}$  = konsentrasi intrinsik bahan kedua ( $\text{cm}^{-3}$ )

### 3.4.3 Metode Analisis Data

Pada kegiatan simulasi akan dihasilkan distribusi pembawa muatan dari struktur divais p-n *multi-junction* GaAs/Si dan p-n *single-junction* GaAs dan Si dalam bentuk geometri 2D. Analisa yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Distribusi pembawa muatan diamati melalui besarnya konsentrasi elektron dan *hole* yang dikaitkan dengan nilai potensial elektrostatik, pada posisi tertentu di dalam bahan untuk struktur *multi-junction* maupun *single-junction* divais sel surya. Adapun posisi pengamatan ditetapkan pada tiga (3) titik utama, yaitu daerah dekat anoda (ujung lapisan-p), titik selanjutnya yaitu tepat pada daerah persambungan p-n, dan dekat katoda (ujung lapisan-n).
2. Konsentrasi pembawa muatan baik pada struktur *multi-junction* maupun *single-junction* diamati untuk setiap titik pengamatan pada berbagai variasi nilai tegangan *input*. Tegangan *input* yang diberikan sebesar 0 volt-0,4 volt dengan rentang 0,025 volt.

Berikut adalah posisi atau titik pengamatan divais sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Titik pengamatan divais penelitian

Struktur divais sel surya	Galium Arsenida			Silikon		
	Dekat anoda	Persambungan p-n	Dekat katoda	Dekat anoda	Persambungan p-n	Dekat katoda
<i>multi-junction</i>	Batas 1	Batas 4	Batas 7	Batas 10	Batas 13	Batas 16
<i>Single-junction</i>	Batas 1	Batas 4	Batas 7	Batas 1	Batas 4	Batas 7

Setelah diperoleh nilai konsentrasi pembawa muatan di setiap titik pengamatan pada Tabel 3.3, selanjutnya data nilai konsentrasi yang dihasilkan disajikan dalam bentuk tabel yang berisi nilai konsentrasi pembawa muatan pada tiga titik utama yang ditentukan baik *multi-junction* maupun *single-junction* saat diberi variasi tegangan *input*. Dari tiga titik tersebut akan diperoleh nilai konsentrasi yang berbeda, sehingga terdapat perubahan nilai konsentrasi disetiap titik. Melalui perubahan nilai konsentrasi tersebut digunakan sebagai acuan untuk menganalisa distribusi pembawa muatan elektron dan *hole* antara struktur *multi-junction* dan *single-junction*. Hasil distribusi pembawa muatan yang akan diperoleh pada penelitian ini akan dikonfirmasi dengan hasil kurva rapat arus-tegangan (J-V) pada penelitian yang telah dilakukan oleh Vijayakumar dan Birnie (2013).

Konfirmasi yang dilakukan yaitu dengan menjelaskan keterkaitan nilai konsentrasi pembawa muatan elektron dan *hole* dengan kurva rapat arus-tegangan (J-V), dimana pada hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Vijayakumar dan Birnie (2013) menyatakan bahwa sel surya struktur *multi-junction* dapat menghasilkan rapat arus dan tegangan yang lebih besar dari sel surya struktur *single-junction*. Selain itu, hubungan konsentrasi pembawa muatan dengan rapat arus secara matematis dituliskan pada persamaan (2.8) dan (2.9). Melalui persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa konsentrasi pembawa muatan berbanding lurus dengan rapat arus, ketika konsentrasi pembawa muatan di dalam bahan besar maka rapat arus yang dihasilkan juga besar.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi distribusi pembawa muatan pada sel surya struktur *multi-junction* dan *single-junction* berbasis Galium Arsenida dan Silikon dengan variasi tegangan *input* menggunakan metode elemen hingga. Distribusi merepresentasikan karakteristik dari konsentrasi pembawa muatan, dimana ketika nilai tegangan *input* yang diberikan berbeda-beda, pola distribusi elektron dan *hole* untuk bahan GaAs dan Si pada setiap struktur menunjukkan bahwa konsentrasi elektron semakin meningkat dan konsentrasi *hole* semakin menurun, saat diamati dari ujung lapisan-p hingga lapisan-n. Distribusi untuk elektron semakin naik dari ujung lapisan-p hingga ujung lapisan-n dan distribusi untuk *hole* akan semakin turun dari ujung lapisan-p sampai ujung lapisan-n.

Nilai konsentrasi elektron dan *hole* pada struktur *multi-junction* yang lebih besar dibandingkan dengan struktur *single-junction*. Diasumsikan bahwa penambahan persambungan GaAs pada Si memberikan kontribusi terhadap laju perubahan fotogenerasi yang dihasilkan, sehingga jumlah pembawa muatan berubah lebih cepat di daerah lapisan-p dari divais Si pada struktur *multi-junction*. Nilai tegangan *input* yang diterapkan pada kedua bahan GaAs dan Si baik struktur *multi-junction* dan *single-junction*, menunjukkan bahwa secara umum terjadi penurunan terhadap konsentrasi pembawa muatan.

### 5.2 Saran

Beberapa saran yang direkomendasikan oleh peneliti untuk penelitian lebih lanjut, yaitu:

1. Titik pengamatan pada penelitian ini hanya terbatas pada tiga titik di dekat anoda, persambungan p-n dan dekat katoda, sehingga pada penelitian lebih lanjut yang sejenis dengan penelitian ini dapat melakukan pengamatan pada titik yang lain.



2. Penelitian ini hanya menghasilkan distribusi pembawa muatan pada sel surya, sehingga untuk penelitian lebih lanjut dapat menyempurnakan penelitian ini dengan menghasilkan karakteristik rapat arus-tegangan (J-V) dan efisiensi sel surya tersebut.
3. Penelitian ini menampilkan distribusi pembawa muatan dalam bentuk 2D, sehingga untuk penelitian selanjutnya masih dapat dikembangkan dalam bentuk 3D.
4. Nilai tegangan *input* yang diberikan pada penelitian hanya terbatas pada 0,4 volt, sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan nilai tegangan yang lebih besar dari penelitian ini.
5. Pada batasan masalah tertera bahwa struktur *multi-junction* yang diterapkan pada penelitian ini yaitu berupa *double-junction* antara bahan Galium Arsenida dan Silikon, sehingga dapat dikembangkan untuk struktur *multi-junction* berupa *3-junction*, *4-junction* dengan bahan yang berbeda.
6. Optimalisasi kinerja sel surya secara simulasi dapat pula dikembangkan untuk parameter divais yang lain, seperti konsentrasi impuritas, jenis impuritas dan parameter penumbuhan bahan yang lain.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Aberle, A.G., H. Liu, A.M. Nobre, Z. Ren, T. Buonassisi, dan I.M. Peters. 2014. Design Criteria of GaAs on Silicon Tandem Solar Cells for Terrestrial Applications. *Light, Energy and The Environment*.
- Alviati, N. 2015. Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs pada Peristiwa Deformation Potential Scattering Berbasis Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Aslizar. 1996. Pengaruh Suhu terhadap Karakteristik Volt – Ampere Persambungan p-n Silikon pada Bias Maju. Tidak Diterbitkan. *Tesis*. Semarang: UNDIP.
- Connolly, J.P., D. Mecaraglia., C. Renard, dan D. Bouchier. 2013. Designing III-V Multijunction Solar Cells on Silicon. *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*.
- Cotal, H., C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon, dan N. Karam. 2008. III-V Multijunction Solar Cell for Concentrating Photovoltaics. *Energy and Environment Science*, 2: 174-192.
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library For Semiconductor Device Model*. Stockholom: The Royal Institute Of Institute.
- Fitriana, 2014. Simulasi Pengaruh Panjang Gelombang Foton Datang terhadap Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.
- Fukuda, M. 1999. *Optical Semiconductor Devices*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Fuller, L. 2001. Gallium Arsenide Device, Technologies & Integrated circuits. <http://people.rit.edu/lfjee/gaas.pdf>. [Diakses pada 28 Maret 2017].

Goetzberger, A. 1998. *Crystalline Silicon Solar Cell*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.

Gray, J.L. 2003. *The Physics of the Solar Cell*. USA: Purdue University.

Green, M.A., dan M. Keevers. 1995. *Optical Properties of Intrinsic Silicon at 300 K*. Sidney: University of New South Wales

Green, M.A. 2003. *Third Generation Photovoltaics*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.

Griffiths, D.J. 1999. *Introduction to Electrodynamics*. New Jersey: Prentice Hall.

Hoiriyah, S. 2016. Simulasi Pengaruh Temperatur terhadap Distribusi Konsentrasi Hole Kristal Galium Arsenida pada Peristiwa Deformation Potential Scattering. *Skripsi*. Jember: Universitas Jember.

Jaeger, R.C., dan T.N. Blalock. 2011. *Microelectronic Circuit Design Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill.

Jellison Jr, G.E. 1992. Optical Functions of GaAs, Ge, and Si Determined by Two-Channel Polarization Modulation Ellipsometry. *Optical Materials 1 (1992)*, 151-160.

Karim, S., D. Rusdiana., A. Suhandi, dan P. Arifin. 2004. *Optimasi Efisiensi Sel Surya GaAs dan GaSb Persambungan p/n untuk Komponen Sel Surya Tandem GaAs/GaSb*. Bandung: UPI.

Kasap, S.O. 2006. *Principles of Electronic Materials and Devices*. New York: McGraw-Hill.

Kurtz, S., dan J. Geisz. 2010. Multijunction Solar Cells for Conversion of Concentrated Sunlight to Electricity. *National Center for Photovoltaics, National Renewable Energy Laboratory*. 18(S1).

- Larson, M.G dan Bengzon, F. 2010. *The Finite Element Methode: Theory, Implementation, and Practice*. Springer.
- Liou, J.J., dan W.W. Wong. 1992. Comparison and Optimization of The Perfomance of Si and GaAs Solar Cells. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 28: 9-28.
- Lolo, M.A. 2011. *Proses Konversi Solar Sel*. Makassar: Universitas Hasanudin.
- Mitchell, F. H. 1959. *Fundamentals of Electronics*. London: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Palankovski, V. 2000. Simulation of Heterojunction Bipolar Junction. *Disertasi*. Jerman: [Technische Universität Wien](#).
- Philipps, S.P., W. Guter, M. Steiner, E. Olivia, G. Siefer, E. Welsler. B.M. George, M. Hermle, F. Dimroth, dan A.W. Belt. 2009. III-V Multijunction Solar Cells-Simulation and Experimental Realization. *Informacije MIDEM 39(2009)4, Ljubljana*.
- Pierret, R.F. 2002. *Advanced Semiconductor Fundamentals*. New Jersey: Prentice Hall.
- Polycarpou, A.C. 2006. *Introduction to The Finite Element Method in Electromagnetics*. USA: Morgan & Claypool Publishers.
- Puri, R.K., dan V.K. Babbar. 2001. *Solid State Physics & Electronics*. New Delhi: S. Chand & Company LTD.
- Rusdiana, D., S. Karim, dan S. Feranie. 2004. *Simulasi untuk Optimalisasi Unjuk Kerja Divais-Divais Optoelektronik Berbasis Bahan Film Tipis Semikonduktor*. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Seet, A. 1998. *Semiconductor Devices Modelling Using Numerical Partial Differential Equation Solver-Simulation and Parameter Extraction of The Haynes-Shockley Experiment*. Queensland: University of Queensland.

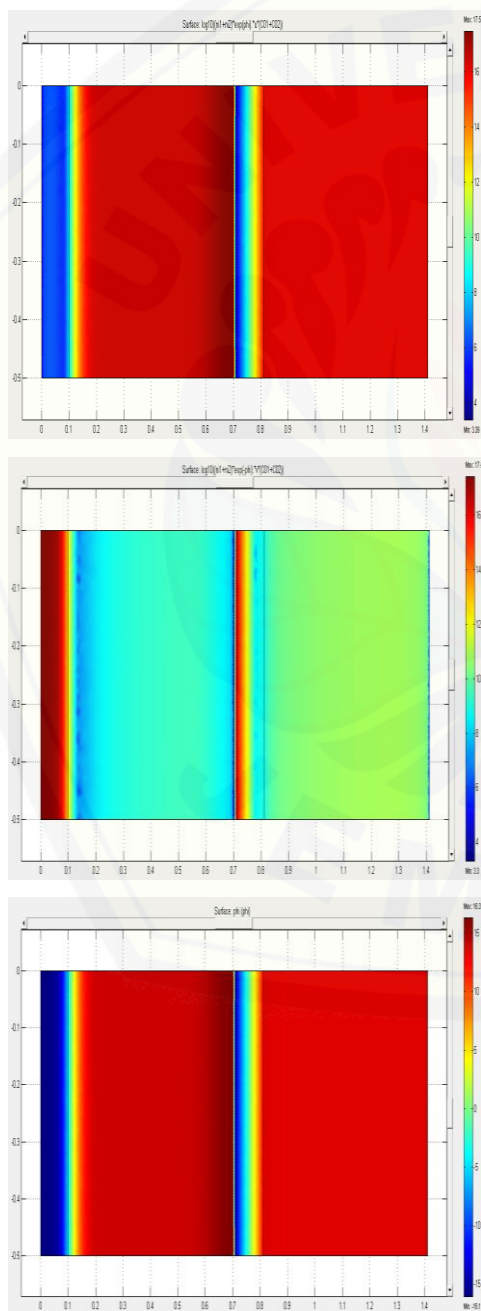
- Slimane, H. B., B. Dennai, A. Helmaoui. 2013. Numerical Simulation of Graded Band Gap GaAs/AlGaAs Heterojunction Solar Cell By AMPS-1D. *Advances in Physics Theories and Applications*, (22), 2013.
- Spitzer, M.B., dan C.C. Fan. 1990. Multijunctions Cells for Space Applications. *Solar Cells* 29: 183-203.
- Subekti, A. 2003. *Diktat Kuliah Semikonduktor*. Jember : FMIPA UNEJ.
- Sutrisno, H. 2010. Sel Fotovoltaik Generasi Ke-III: Pengembangan Sel Fotovoltaik Berbasis Titanium Dioksida. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta*, 15 Mei 2010.
- Sutrisno. 1986. *Elektronika: Teori dan Penerapannya Jilid 1*. Bandung: ITB.
- Sze, S.M dan Kwok, K.NG. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Sze, S.M dan Lee, M.K. 2012. *Semiconductor Devices Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Usman, I. 2006. Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya pada Sel Surya. *Disertasi*. Bandung: ITB.
- Vijayakumar, V., dan D.P. Birnie. 2013. Optical and Electronic Simulation of Gallium Arsenide/Silicon Tandem Four Terminal Solar Cells. *Solar Energy*, 97: 85-92.
- Wahyuni, E.S. 2014. Simulasi Kinerja Sel Surya 4-Junction  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Inp}/\text{Ge}$  dengan Pembatasan Daerah Serapan Radiasi Matahari. *Skripsi*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Yastrebova, N.V. 2007. High-efficiency Multi-junction Solar Cells. *Centre for Research in Photonics, University of Ottawa*.



**LAMPIRAN A. DISTRIBUSI PEMBAWA MUATAN UNTUK VARIASI TEGANGAN INPUT ( $V_A$ )**

**A.1 Distribusi Elektron dan Hole Sel Surya dengan Struktur *Multi-junction* GaAs/Si untuk Tegangan Input 0-04 V**

Tegangan 0,1 volt



Tegangan 0,2 volt

