



**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR OPERASIONAL DALAM
SIMULASI KARAKTERISTIK ARUS-TEGANGAN
PADA DIODA Si MENGGUNAKAN FEMLAB**

SKRIPSI

Oleh
HERI KURNIAWAN
NIM 081810201016

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2013**



**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR OPERASIONAL DALAM
SIMULASI KARAKTERISTIK ARUS-TEGANGAN
PADA DIODA Si MENGGUNAKAN FEMLAB**

SKRIPSI

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

Oleh
HERI KURNIAWAN
NIM 081810201016

JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2013

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Titik Dahliawati serta Ayahanda Mohammad Hafit tercinta yang selalu menghantarkan setiap nafasku dengan hembusan doanya;
2. Ibu Endhah Purwandari, S.Si, M.Si, dan Bapak Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si yang selalu memberikan bimbingan dan arahnya;
3. para pahlawan tanpa tanda jasa sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidiku dengan penuh perhatian dan kesabaran;
4. Adik Muhammad Dwi Hendriyazah, serta sobat-sobat seperjuangan yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam setiap kesulitan;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTO

“Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang”
(Terjemahan Surat Al Fatihah, ayat 1)¹

“Dan orang-orang yang telah diberi ilmu, meyakini bahwasannya Al Qur’an itulah yang hak dari Tuhanmu lalu mereka beriman dan tunduk hati mereka kepada-Nya dan sesungguhnya Allah adalah Pemberi Petunjuk bagi orang-orang yang beriman kepada jalan yang lurus”
(Terjemahan Surat Al Hajj, ayat 54)¹

¹ Departemen Agama Republik Indonesia. 2005. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Bandung: Syaamil

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Heri Kurniawan

NIM : 081810201016

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisa Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Si Menggunakan *FEMLAB*” adalah benar-benar hasil karya tulis sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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,

Yang menyatakan,

Heri Kurniawan

NIM 081810201016

SKRIPSI

**ANALISIS PENGARUH TEMPERATUR OPERASIONAL DALAM
SIMULASI KARAKTERISTIK ARUS-TEGANGAN
PADA DIODA Si MENGGUNAKAN FEMLAB**

Oleh

Heri Kurniawan
NIM 081810201016

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si

PENGESAHAN

Skripsi berjudul "Analisa Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Si Menggunakan *FEMLAB* " telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat :

Tim Penguji:

Ketua,

Sekretaris,

Endhah Purwandari, S.Si, M.Si
NIP 19811111 200501 2 001

Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si
NIP 19671215 199802 1 001

Anggota I,

Anggota II

Drs. Yuda C. Hariadi, M.Sc, Ph.D
NIP 19620311 198702 1 001

Dra. Arry Yuariatun Nurhayati
NIP 19610909 198601 2 001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas MIPA,

Prof. Drs. Kusno, DEA, Ph.D
NIP 19610108 198602 1 001

RINGKASAN

Analisa Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Si Menggunakan *FEMLAB*; Heri Kurniawan, 081810201016; 2012: 77 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Persambungan p-n atau dioda diciptakan dari bahan semikonduktor ekstrinsik tipe-p dan semikonduktor ekstrinsik tipe-n. Mutu pengoperasian dari dioda juga bergantung pada temperatur operasional dari dioda itu sendiri. Dioda dirancang bekerja baik pada temperatur ruang. Perubahan temperatur operasional dari dioda akan mempengaruhi jumlah pembawa muatan, dengan demikian arus yang dihasilkan juga akan berubah terhadap perubahan temperatur. Arus yang dihasilkan merupakan kontribusi dari pembawa muatan mayoritas yang merupakan fungsi tegangan masukan dioda. Keterkaitan antara arus-tegangan pada sambungan p-n dioda dijelaskan oleh kurva karakteristik arus-tegangan. Adanya perubahan temperatur akan menyebabkan adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan. Arus-tegangan memiliki ketergantungan secara implisit terhadap temperatur operasional melalui besaran arus saturasi (I_s). Temperatur operasional ini berkontribusi sangat besar terhadap konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i) serta arus saturasi (I_s) dari dioda. Dalam hal ini, analisis kebergantungan distribusi elektron dan *hole* terhadap parameter temperatur operasional dapat dilakukan melalui kajian teoritik. Untuk itulah, diperlukan sebuah simulasi pemodelan distribusi pembawa

muatan di bawah variasi temperatur operasional tertentu, sehingga dapat dianalisis karakteristik arus-tegangan yang dihasilkan.

Di dalam penelitian ini, dilakukan simulasi karakteristik arus-tegangan yang diperoleh berdasarkan distribusi konsentrasi pembawa muatan. Model distribusi pembawa muatan *hole* dan elektron diperoleh dengan menyelesaikan persamaan dasar divais semikonduktor, yang diaplikasikan untuk dioda berbasis silikon. Pemodelan dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak *FEMLAB* yang memiliki kelebihan selain dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial divais semikonduktor, juga mampu menggambarkan geometri dari divais, sehingga hasil simulasi ini lebih mudah untuk dianalisa. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh kemiripan antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen pembanding yakni Aslizar (1996).

Hasil penelitian yang sudah dilakukan diperoleh bahwa adanya variasi temperatur operasional menyebabkan adanya perubahan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron. Hal ini terlihat bahwa untuk setiap *mesh* yang sama di dalam geometri dioda Si menghasilkan nilai konsentrasi *hole* maupun elektron yang semakin bertambah seiring dengan pertambahan temperatur operasional dioda. Berangkat dari adanya perubahan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron di dalam pengaruh temperatur operasional oleh sebab itu dilakukan pengkajian tentang kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si. Dari hasil diperoleh adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan di bawah pengaruh variasi temperatur operasional. Nilai arus dioda yang dihasilkan semakin bertambah seiring dengan pertambahan temperatur operasional pada tegangan masukan yang sama. Sesuai dengan teori yang ada bahwa parameter temperatur operasional mempengaruhi nilai konsentrasi muatan pembawa muatan intrinsik (n_i), nilai arus saturasi (I_s), dan fungsi eksponensial $e^{qV/kT}$ pada perhitungan arus dioda sehingga temperatur operasional sangatlah penting untuk di pertimbangkan di dalam pengoperasian dioda Si.

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunianya serta sentuhan kasih sayang –Nya yang tersirat dalam ilmu yang terdapat pada setiap jengkal luasnya alam semesta. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Rasul Tercinta Muhammad SAW hingga menembus keterbatasan dimensi ruang-waktu yang hanya akan berakhir pada penghujung usia semesta.

Karya tulis ilmiah (SKRIPSI) yang berjudul berjudul "**Analisa Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Si Menggunakan *FEMLAB***" ini penulis tujukan untuk dapat memahami setetes dari luasnya rahasia keagungan-Nya yang tersimpan dalam disiplin ilmu fisika semikonduktor, serta untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Endhah Purwandari, S.Si, M.Si selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, serta perhatian beliau guna memberikan bimbingan dan arahan demi terselesainya penelitian dan penulisan skripsi ini;

2. Drs. Yuda Cahyoargo Hariadi, M.Sc, Ph.D, selaku Dosen Penguji I dan Dra. Arry Yuariatun Nurhayati selaku Dosen Penguji II, terima kasih atas segala masukan, kritikan dan saran yang telah diberikan bagi kesempurnaan penulisan skripsi ini;
3. Agung Tjahjo Nugroho, S.Si, M.Phil selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing dan memberikan motivasi;
4. Darwoto S.Pd, serta Siti Andayani S.Pd, selaku Guru Fisika yang memberangkatkan penulis untuk terjun di dunia fisika;
5. rekan kerja laboratorium komputasi, Melandi Novianto, Farah Wahidiyah dan Jakfar Helmi, terima kasih atas setiap setiap waktu yang kalian luangkan untuk berdiskusi dan saling mengisi demi selesainya skripsi ini;
6. sobat-sobat Fisika: Sudarmono, Lutfi, Retno, Hera, Ajeng, Prila, serta seluruh angkatan 2008, terima kasih atas setiap waktu yang kalian luangkan untuk berdiskusi dan saling mengisi;
7. Budiyono, Edy Sutrisno, Sunarto, Taufik Usman, Aji Priyono, Ansori, Hadi, serta segenap keluarga besar FMIPA Universitas Jember;
8. semua pihak yang turut membantu demi selesainya tugas akhir ini.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis.

Penulis juga menyadari bahwa penulis adalah insan yang jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis akan selalu mengharapkan munculnya segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan penelitian yang tertulis dalam skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi disiplin ilmu Fisika serta kepada setiap pembacanya.

Jember, Februari 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Material Semikonduktor	6
2.2 Semikonduktor Intrinsik dan Ekstrinsik	9
2.2.1 Semikonduktor Intrinsik	9

2.2.2 Semikonduktor Ekstrinsik	11
2.2.2.1 Semikonduktor Tipe-n	11
2.2.2.2 Semikonduktor Tipe-p	13
2.3 Persamaan Dasar Devais Semikonduktor	14
2.3.1 Persamaan Rapat Arus	14
2.3.2 Persamaan Poisson	16
2.3.3 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan	16
2.4 Dioda Silikon	18
2.4.1 Panjar Maju	21
2.4.2 Panjar Mundur	22
2.4.3 Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Silikon	23
2.5 Analisa Numerik Menggunakan <i>FEMLAB</i>	30
BAB 3. METODE PENELITIAN	33
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	33
3.2 Prosedur Penelitian	33
3.2.1 Diagram Penelitian	34
3.2.2 Instalasi Perangkat Lunak <i>MATLAB</i> 5.3 dan <i>FEMLAB</i> 21	35
3.2.3 Perumusan Persamaan <i>Transport</i> Pembawa Muatan Dioda Si	35
3.2.4 Pemodelan Geometri Pembawa Muatan Dioda Si	36
3.2.5 Penyelesaian Persamaan Diferensial untuk Variasi Temperatur Operasional	39
3.2.6 Penentuan Karakteristik Arus-Tegangan Dioda Si	41
3.2.7 Analisa Data	41
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Pemodelan Distribusi Konsentrasi <i>Hole</i> dan Elektron Terhadap Variasi Temperatur Operasional pada Dioda Si	43
4.2 Kurva Karakteristik Arus-Tegangan Dioda Si Terhadap Variasi Temperatur Operasional	58

BAB 5. PENUTUP	74
5.1 Kesimpulan	74
5.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA	76
LAMPIRAN	78

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Material semikonduktor dan celah energi yang dimiliki	7
3.1 Parameter dioda Si	37
4.1 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 288$ K dengan $V = 0,34$ volt	44
4.2 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 293$ K dengan $V = 0,34$ volt	46
4.3 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 298$ K dengan $V = 0,34$ volt	47
4.4 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 303$ K dengan $V = 0,34$ volt	49
4.5 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 308$ K dengan $V = 0,34$ volt	50
4.6 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 313$ K dengan $V = 0,34$ volt	51
4.7 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 318$ K dengan $V = 0,34$ volt	52
4.8 Perhitungan konsentrasi <i>hole</i> dan elektron pada $T = 323$ K dengan $V = 0,34$ volt	54
4.9 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 288$ K.....	60
4.10 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 293$ K.....	61
4.11 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 298$ K.....	63
4.12 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 303$ K.....	64
4.13 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 308$ K.....	66
4.14 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 313$ K.....	67

4.15	Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 318 \text{ K}$	68
4.16	Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 323 \text{ K}$	70
4.17	Perhitungan Arus Saturasi dioda Si variasi Temperatur Operasional	72

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1	Gambaran ikatan kovalen atom Silikon 8
2.2	Model pita energi material semikonduktor 9
2.3	Kristal Silikon dengan atom pengotor Fosfor 12
2.4	Kristal Silikon dengan atom pengotor Boron 13
2.5	Difusi elektron dan <i>hole</i> 18
2.6	Skema diagram dari dioda pada keadaan terbuka 20
2.7	Dioda berpanjar maju 21
2.8	Dioda Berpanjar mundur 22
2.9	Kurva Karakteristik Arus-Tegangan dioda Silikon 25
2.10	Variasi temperatur operasional terhadap kurva karakteristik arus-tegangan dioda 28
2.11	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si untuk tegangan panjar maju variasi temperatur operasional 29
2.12	Pendefinisian geometri menjadi elemen-elemen kecil dalam <i>FEM</i> pada dioda 31
3.1	Diagram prosedur penelitian 34
3.2	Model dari struktur dioda Si 37
4.1	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 288\text{ K}$ 44
4.2	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 293\text{ K}$ 45
4.3	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 298\text{ K}$ 47
4.4	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 303\text{ K}$ 48
4.5	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 308\text{ K}$ 49

4.6	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 313 \text{ K}$	51
4.7	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 318 \text{ K}$	52
4.8	Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 319 \text{ K}$	53
4.9	Grafik hubungan konsentrasi <i>hole</i> terhadap tegangan masukan pada variasi temperatur operasional yang diambil pada <i>mesh</i> 3202 K	56
4.10	Grafik hubungan konsentrasi elektron terhadap tegangan masukan pada variasi temperatur operasional yang diambil pada <i>mesh</i> 3202K	56
4.11	Grafik hubungan konsentrasi elektron terhadap tegangan masukan variasi temperatur operasional pada <i>mesh</i> 63K	58
4.12	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 288 \text{ K}$	59
4.13	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 293 \text{ K}$	61
4.14	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 298 \text{ K}$	62
4.15	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 303 \text{ K}$	64
4.16	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 308 \text{ K}$	65
4.17	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 313 \text{ K}$	66
4.18	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 318 \text{ K}$	68
4.19	Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 323 \text{ K}$	69

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penelitian bahan semikonduktor berawal dari penelitian tentang *solid-state transistor* pada tahun 1948 oleh William Shockley, John Bardeen, dan Walter Brattain di *Bell Laboratories* Amerika Serikat. Penelitian mereka merupakan cikal bakal penelitian material lanjutan di masa ini. Hal ini dibuktikan dengan pesatnya perkembangan material semikonduktor saat ini. Contoh nyata yakni semakin canggihnya sistem *processor* komputer (Darja, 2003).

Bahan semikonduktor merupakan bahan yang memiliki konduktivitas listrik di antara bahan konduktor dan bahan isolator. Nilai konduktivitas bahan semikonduktor yaitu bervariasi sekitar $(10^4 - 10^{-8}) \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (Goetzberger *et al.*, 1998). Ditinjau dari jenis pembawa muatan yang menghantarkan arus listrik di dalamnya, bahan semikonduktor dapat dibedakan menjadi bahan semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Keunikan bahan semikonduktor dibanding bahan lainnya yaitu nilai konduktivitasnya dapat divariasikan dengan sesuai pembuatnya yakni dengan memasukkan elemen lain ke dalam kristal semikonduktor yang dikenal dengan istilah *doping*.

Dikarenakan adanya variasi nilai konduktivitas dari bahan semikonduktor dengan cara *doping* maka munculah bahan semikonduktor ekstrinsik. Terdapat dua jenis bahan semikonduktor ekstrinsik yaitu bahan semikonduktor tipe-n dan bahan semikonduktor tipe-p. Bahan semikonduktor tipe-n dan tipe-p inilah yang banyak

dimanfaatkan dalam penciptaan piranti elektronika. Sebagai contoh adalah dioda yang terbuat dari persambungan p-n dan transistor yang terbuat dari persambungan p-n-p ataupun n-p-n.

Persambungan p-n atau yang biasa disebut dengan dioda diciptakan dari bahan semikonduktor intrinsik yang sebagian ditambahkan dengan bahan pengotor untuk tipe-p dan sebagian lagi bahan pengotor untuk tipe-n. Mutu pengoperasian dari dioda ini sangat bergantung oleh temperatur operasional dioda itu sendiri. Dioda dirancang bekerja baik pada temperatur ruang, serta belum tentu bekerja lebih baik di atas temperatur ruang. Perubahan temperatur operasional dari dioda akan mempengaruhi jumlah pembawa muatan, dengan demikian arus yang dihasilkan juga akan berubah terhadap perubahan temperatur. Arus yang dihasilkan merupakan kontribusi dari pembawa muatan mayoritas yang merupakan fungsi tegangan masukan dioda dan pembawa muatan minoritas yang merupakan fungsi temperatur (Aslizar, 1996). Menurut Boylestad dan Nashelsky (2009) keterkaitan antara arus-tegangan pada sambungan p-n dioda dijelaskan oleh kurva karakteristik arus-tegangan. Adanya perubahan temperatur akan menyebabkan adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan. Arus-tegangan memiliki ketergantungan secara implisit terhadap temperatur melalui besaran arus saturasi (I_s). Arus saturasi balik juga meningkat dua kali lipat untuk setiap peningkatan temperatur 10°C . Diperkuat juga berdasarkan penelitian Sconza *et. al* (1994) bahwasanya temperatur operasional ini berkontribusi sangat besar terhadap konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i) serta arus saturasi (I_s) dari dioda.

Distribusi pembawa muatan (elektron dan *hole*) yang mengalir di dalam sebuah dioda, akan menentukan besarnya arus yang mengalir dalam divais (Aslizar, 1996). Sedangkan kinerja dari sebuah dioda akan dipengaruhi oleh temperatur operasionalnya. Dalam hal ini, analisis kebergantungan distribusi elektron dan *hole* terhadap parameter temperatur dapat dilakukan melalui kajian teoritik. Untuk itulah, diperlukan sebuah simulasi pemodelan distribusi pembawa muatan di bawah variasi

temperatur operasional tertentu, sehingga dapat dianalisis karakteristik arus-tegangan yang dihasilkan.

Di dalam penelitian ini, dilakukan simulasi karakteristik arus-tegangan yang diperoleh berdasarkan distribusi pembawa muatan. Model distribusi pembawa muatan baik elektron maupun *hole* diperoleh dengan menyelesaikan persamaan dasar divais semikonduktor, yang diaplikasikan untuk dioda berbasis silikon. Pemodelan dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak *FEMLAB* yang memiliki kelebihan selain dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial divais semikonduktor, juga mampu menggambarkan geometri dari divais, sehingga hasil simulasi ini lebih mudah untuk dianalisa. Berdasarkan hasil simulasi, diharapkan diperoleh kesesuaian antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen pembanding.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian dilakukan untuk memperoleh model geometri konsentrasi *hole* dan elektron serta gambaran karakteristik arus-tegangan dioda Si. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *FEMLAB* dalam Sistem Windows 32 Bit. Adapun beberapa rumusan permasalahan yang muncul sebagai berikut :

1. Bagaimana hasil pemodelan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron terhadap variasi temperatur pada dioda Si menggunakan perangkat lunak *FEMLAB*?
2. Bagaimana bentuk kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si terhadap variasi temperatur menggunakan perangkat lunak *FEMLAB* ?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada dua kegiatan yaitu pemodelan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron serta karakterisasi kurva arus-tegangan dioda Si dengan perangkat lunak *FEMLAB*. Adapun batasan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Karakteristik arus-tegangan yang dimodelkan adalah karakteristik bias maju dengan rentang 0 sampai 0,5 volt.
2. Geometri dioda dimodelkan dalam bentuk penampang 2 Dimensi.
3. Metode penyelesaian persamaan diferensial parsial untuk devais semikonduktor dioda Si menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Elemen Method, FEM*)
4. Material semikonduktor penyusun dioda adalah bahan Silikon dalam bentuk kristal.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Mendapatkan hasil pemodelan konsentrasi *hole* dan elektron pada dioda Si di bawah pengaruh variasi temperatur operasional.
2. Menentukan karakteristik arus-tegangan dioda Si di bawah pengaruh variasi temperatur operasional berdasarkan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron yang didapatkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan maksud menggambarkan model konsentrasi *hole* dan elektron dioda Si serta menggambarkan kurva karakteristik arus-tegangan berbasis *FEMLAB*. Adapun beberapa manfaat yang diharapkan dapat dicapai di dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Memberikan sumbangan di bidang ilmu fisika bahan semikonduktor khususnya di bidang pemodelan komputasi berkenaan dengan dioda Si serta karakteristik arus-tegangan terhadap variasi temperatur.

2. Diharapkan juga nantinya dapat diaplikasikan dalam penggunaan dioda Si dengan mempertimbangkan temperatur operasional dimana dioda beroperasi.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Semikonduktor

Berdasarkan sifat kelistrikannya, suatu material dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian (Goetzberger *et al.*, 1998) :

1. Material konduktor yang memiliki harga konduktivitas listrik lebih besar dari $10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
2. Material semikonduktor yang memiliki harga konduktivitas listrik $(10^4 - 10^{-8}) \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$
3. Material isolator yang memiliki harga konduktivitas listrik lebih kecil dari $10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Ketiga jenis material tersebut banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan komponen elektronika, contohnya material isolator banyak digunakan sebagai lapisan dielektrik pada kapasitor, material semikonduktor dimanfaatkan sebagai lapisan aktif pada komponen-komponen elektronika maupun komponen optoelektronik sedangkan material konduktor sering digunakan untuk pembuatan kontak pada komponen elektronik (Setiawan *et al.*, 2007). Menurut Puri dan Babbar (2001), material semikonduktor mempunyai *energy gap* (celah energi) lebih kecil dari 6 eV. Misalnya material silikon pada temperatur 300 K memiliki celah energi sebesar 1,11 eV. Beberapa jenis material semikonduktor dengan celah energi yang dimiliki diberikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Material semikonduktor dan celah energi yang dimiliki.

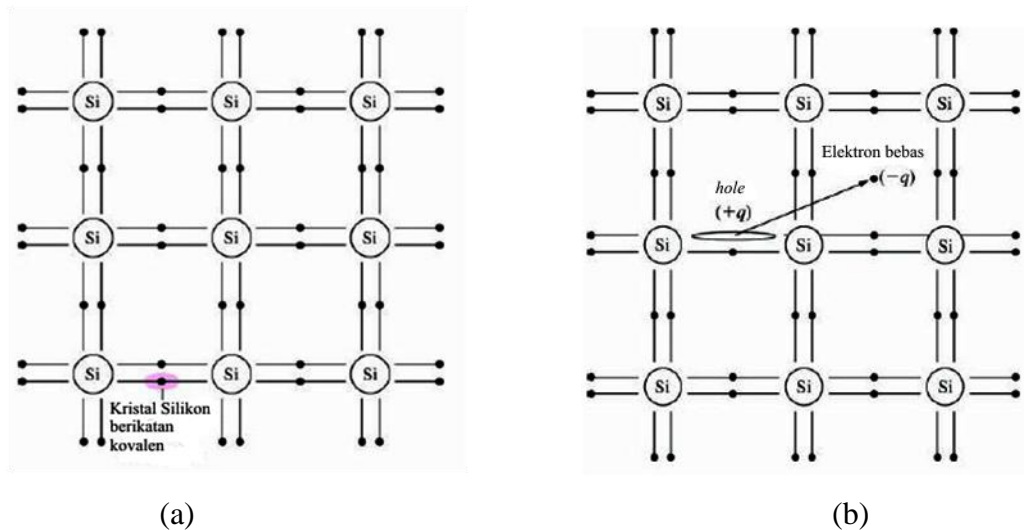
Bahan	Celah Energi (eV)	Bahan	Celah Energi (eV)
Golongan IV		Golongan III-V	
Si	1,11	Ga As	1,40
Ge	0,67	Ga P	2,24
Sn	0,08	Ga Sb	0,77
		In As	0,33
		In P	1,29
		In Sb	1,16
Golongan II-VI		Golongan IV-VI	
Cd S	2,40	Pb S	0,40
Zn Te	2,26		
Zn S	-		
Cd Te	-		
Cd Se	-		

Sumber: Subekti (2003).

Pada awal perkembangannya material semikonduktor yang pertama kali dieksplorasi adalah Germanium (Ge), namun sampai saat ini bahan semikonduktor yang banyak diteliti untuk bahan baku pembuatan divais elektronik maupun optoelektronik adalah Silikon dengan pertimbangan bahan silikon cukup melimpah di alam ini dan harganya relatif murah. Menurut Setiawan *et al.* (2007), selain silikon material lain yang banyak dipelajari dan diteliti adalah material paduan yang berasal dari golongan II-VI atau III-V dalam tabel periodik baik *binary* (paduan 2 unsur) maupun *ternary* (paduan 3 unsur) seperti ZnO, GaN, AlN, InN, GaAs, GaSb, AlGaN, AlGaSb dan GaNAs. Material paduan tersebut masing-masing memiliki ciri khas dan keunikan tersendiri baik ditinjau dari sifat listrik maupun sifat optiknya sehingga dapat diaplikasikan dengan karakteristik fisis yang dimiliki.

Berkenaan dengan model ikatan dari atom-atom material semikonduktor, kristal semikonduktor tersusun dari atom-atom yang letaknya saling berdekatan dan saling berikatan satu sama lain yang membentuk suatu ikatan kovalen. Sebagai ilustrasi dari model ikatan kovalen material semikonduktor ditunjukkan pada Gambar 2.1. Ikatan kovalen dari atom Silikon pada kondisi temperatur nol Kelvin ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a) dimana setiap atom Silikon menyumbangkan satu elektron untuk

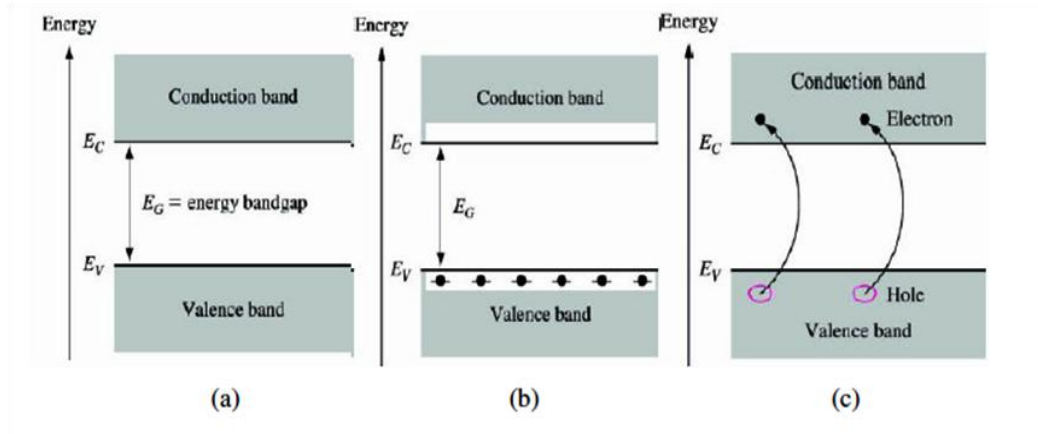
tiap pasangan ikatan kovalen. Apabila kristal semikonduktor tersebut diberi energi termal, maka dapat menyebabkan putusnya ikatan kovalen, sehingga pasangan elektron bebas dan *hole* dapat dibangkitkan seperti yang ditunjukkan Gambar 2.1 (b). Elektron tersebut dapat bebas dari keadaan pita valensi menuju keadaan pita konduksi sedangkan kekosongan yang ditinggalkan elektron akan menjadi *hole*.



Gambar 2.1 Gambaran ikatan kovalen atom silikon pada kondisi (a) temperatur nol Kelvin, (b) pada temperatur di atas nol Kelvin (Sumber: Setiawan *et al.*, 2007)

Setiap atom penyusun kristal semikonduktor memiliki sejumlah elektron valensi pada kulit terluarnya yang menempati keadaan valensi (Gambar 2.2 (a)) dengan tingkat energi yang besarnya E_V . Elektron valensi ini berkontribusi pada pembentukan ikatan kovalen antara atom-atom penyusun kristal semikonduktor. Sedangkan keadaan dimana elektron sudah terbebas dari ikatan kovalen disebut keadaan konduksi dengan tingkat Energi E_C (Gambar 2.2 (b)). Terputusnya elektron dari ikatan kovalen menghasilkan elektron bebas yang sudah berada dalam keadaan pita energi konduksi dengan tingkat energi E_C . Pada Gambar 2.2 (c) diilustrasikan bahwa elektron pada keadaan pita konduksi dimana setelah terjadinya pemutusan ikatan kovalen, elektron valensi pada tingkat energi E_V akan berpindah menuju keadaan pita konduksi dengan tingkat energi E_C . Selisih antara keadaan pita energi

konduksi dengan keadaan pita energi valensi ini dinamakan celah pita energi (*band gap*) yang merupakan energi minimal yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan kovalen pada kristal semikonduktor.



Gambar 2.2 Model keadaan pita energi material semikonduktor, (a) sejumlah elektron valensi pada kulit terluar yang menempati keadaan pita valensi, (b) elektron sudah terlepas dari ikatan kovalen berada dalam keadaan pita konduksi, (c) elektron valensi pada tingkat energi E_V akan berpindah menuju keadaan pita konduksi dengan tingkat energi E_C (Sumber: Setiawan *et al.*, 2007).

2.2 Semikonduktor Intrinsik dan Ekstrinsik

2.2.1 Semikonduktor Intrinsik

Berdasarkan jenis pembawa muatannya, material semikonduktor, dibagi menjadi dua yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik adalah semikonduktor murni yang belum diberikan atom pengotor (impuritas). Pada temperatur 0 K, semua elektron menempati orbital-orbital ikatan dalam keadaan terikat. Susunan ini memberikan keadaan pita valensi terisi penuh elektron dan keadaan pita konduksi kosong, sehingga pada bahan semikonduktor tidak terjadi aliran arus listrik.

Pada suhu ruang (300 K), sebagian elektron pada keadaan pita valensi memiliki energi yang cukup untuk bertransisi menuju keadaan pita konduksi.

Hasilnya, terdapat elektron pada keadaan pita konduksi dan tercipta *hole* pada keadaan pita valensi. Terciptanya *hole* ini karena terbentuk kekosongan muatan sebagai akibat transisi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Baik elektron pada keadaan pita konduksi maupun *hole* pada keadaan pita valensi dapat bergerak bila pada semikonduktor tersebut diberikan medan listrik. Menurut Purri dan Babbar (2001), konsentrasi elektron pada semikonduktor intrinsik sama dengan konsentrasi *hole*. Konsentrasi elektron dan *hole* dapat ditentukan berdasarkan perumusan dasar umum yang merupakan penerapan teori elektron bebas kuantum :

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} D(E)f(E) dE, \quad (2.1)$$

Besaran $f(E)$ merupakan fungsi distribusi Fermi–Dirac yang dapat dirumuskan sebagai berikut

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] + 1} \quad (2.2)$$

dengan E_F adalah energi Fermi dan k adalah tetapan Boltzmann ($8,614 \times 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$) serta $D(E)$ adalah rapat keadaan elektron/*hole*,

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}}, \quad (2.3)$$

dengan m^* adalah massa elektron ($9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) dan h adalah tetapan Plank's ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$). Dengan demikian akan didapatkan konsentrasi elektron (n_n) dan konsentrasi *hole* (n_p) sebagai berikut

$$n_n = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right)\right] \quad (2.4)$$

$$n_p = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[- \left(\frac{E_c - E_F}{kT} \right) \right], \quad (2.5)$$

dengan m_n^* = massa efektif elektron

m_p^* = massa efektif *hole*

E_C = tingkat energi dasar pita konduktif

E_V = tingkat energi puncak pita valensi

E_F = tingkat energi Fermi dalam struktur pita energi.

Selanjutnya, dapat didefinisikan konsentrasi pembawa muatan intrinsik, atau sering disebut konsentrasi intrinsik (n_i) sebagai berikut :

$$n_i^2 = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{4}} \exp \left(- \frac{E_g}{2kT} \right) \quad (2.6)$$

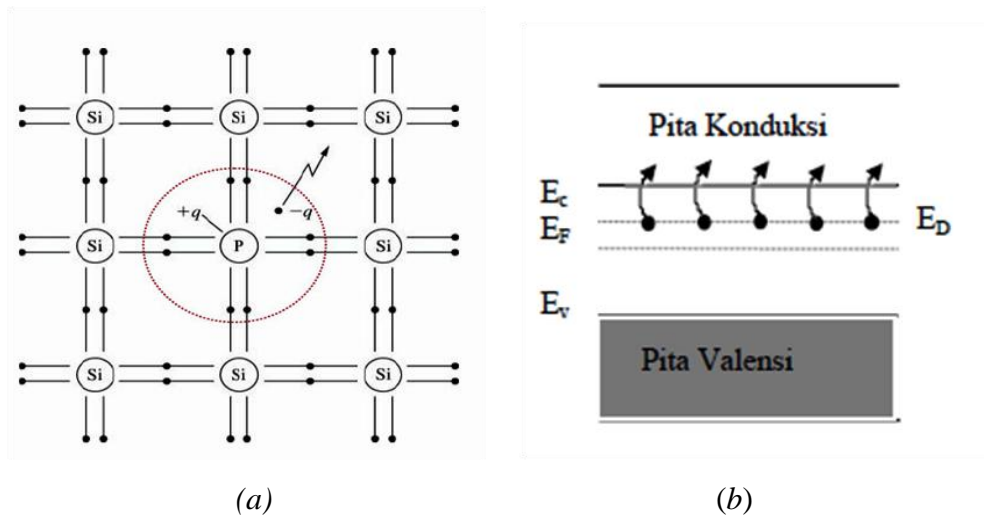
2.2.2 Semikonduktor Ekstrinsik

Adapun material semikonduktor ekstrinsik merupakan material semikonduktor dengan pembawa muatan yang didominasi oleh salah satu jenis saja, elektron atau *hole*. Semikonduktor ekstrinsik dengan pembawa muatan mayoritas elektron disebut semikonduktor tipe-n, sedangkan semikonduktor ekstrinsik dengan pembawa muatan mayoritas *hole* disebut semikonduktor tipe-p.

2.2.2.1 Semikonduktor Tipe-n

Semikonduktor tipe-n misalnya kristal Silikon disisipi dengan atom pengotor yang mempunyai elektron valensi lebih dari empat misalnya bervalensi lima. Hal ini diharapkan dengan ada elektron sisa dalam membentuk ikatan dengan demikian elektron tersebut dapat tercipta elektron bebas. Atom-atom pengotor yang sering dipakai misalnya Fosfor (P) atau Arsen (As) yang bervalensi lima dalam konsentrasi tertentu (Setiawan *et al.*, 2007).

Pada Gambar 2.3 ditunjukkan kristal silikon dengan atom pengotor serta pita energinya. Dalam gambar tersebut tampak bahwa energi Fermi bergeser mendekati pita konduksi oleh karena kehadiran tingkat energi donor (E_D). Sebelum atom-atom donor terionisasi, tingkat energi donor terisi elektron yang merupakan elektron kelima dari setiap atom donor (atom pemberi elektron). Bila atom donor terionisasi (P^+ atau As^+), elektron bertransisi dari tingkat donor ke pita konduksi.



Gambar 2.3 (a) Kristal silikon dengan atom pengotor fosfor, (b) Energi gap
(Sumber: Setiawan *et al.*, 2007)

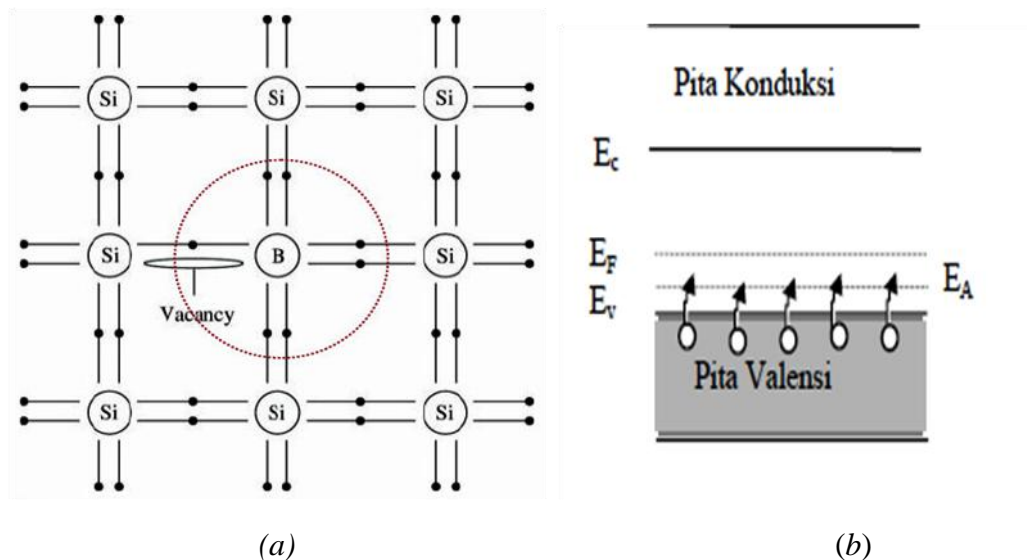
Meskipun jumlahnya lebih sedikit transisi ini menghasilkan *hole* pada pita valensi. Sementara itu, pada pita konduksi terdapat elektron yang jumlahnya jauh lebih banyak. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa dalam semikonduktor tipe-n, elektron sebagai pembawa muatan mayoritas sedangkan *hole* merupakan pembawa muatan minoritas. Pada keadaan dimana atom donor telah terionisasi seluruhnya, besarnya konsentrasi elektron (n_n) menjadi :

$$n_n = N_D \quad (2.7)$$

dengan $N_D =$ konsentrasi atom donor.

2.2.2.2 Semikonduktor Tipe-p

Pada semikonduktor tipe-p dimana atom-atom yang ditambahkan sebagai atom pengotor adalah atom dengan valensi yang lebih kecil dari empat misalnya bervalensi tiga. Pada Gambar 2.4. ditunjukkan kristal silikon yang mengandung atom pengotor bervalensi tiga contohnya Boron (B) atau Galium (Ga), dan struktur pita yang dihasilkannya.



Gambar 2.4 (a) Kristal Silikon dengan atom pengotor boron, (b) Energi gap Kristal Silikon (Sumber: Setiawan *et al.*, 2007)

Menurut Setiawan *et al.* (2007), energi Fermi bergeser mendekati ke pita valensi karena munculnya tingkat energi akseptor (E_A). Tingkat ini muncul oleh karena adanya kekurangan elektron pada atom pengotor. Bila atom pengotor terionisasi, atom ini akan mendapatkan elektron dari elektron-elektron terikat pada pita valensi. Oleh karena itu atom pengotor disebut atom akseptor (atom penerima elektron). Elektron yang bertransisi ke tingkat akseptor meninggalkan *hole* pada pita valensi. Seperti halnya pada semikonduktor tipe-n, elektron juga mungkin bertransisi ke pita konduksi meskipun dengan probabilitas yang lebih kecil. Dengan mekanisme ini dihasilkan elektron bebas pada pita konduksi dalam jumlah yang jauh lebih kecil

dari pada jumlah *hole* pada pita valensi. Jadi, dalam semikonduktor tipe-p, pembawa muatan mayoritas adalah *hole* dan pembawa muatan minoritas adalah elektron. Bila atom-atom akseptor terionisasi, tingkat akseptor terisi elektron. Dan jika ionisasi maksimum, artinya seluruh atom terionisasi maka konsentrasi *hole* (p_p) menjadi :

$$p_p = N_A \quad (2.8)$$

dengan N_A = konsentrasi atom akseptor.

2.3 Persamaan Dasar Divais Semikonduktor

2.3.1 Persamaan Rapat Arus

Keberadaan elektron dan *hole* pada semikonduktor akan mempengaruhi karakteristik listrik pada persambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n (persambungan p-n). Ada dua jenis arus listrik yang terjadi pada persambungan p-n yaitu arus *drift* dan arus difusi. Ketika persambungan p-n diberi medan listrik ξ , maka partikel-partikel bermuatan dalam semikonduktor tersebut akan bergerak (*drift*) dengan laju yang berbanding lurus dengan medan listriknya (Colinge *et al.*, 2002).

$$v_n = -\mu_n \xi \quad (2.9)$$

$$v_p = \mu_p \xi \quad (2.10)$$

dengan v_n = laju *drift* dari elektron (cm/s)

v_p = laju *drift* dari *hole* (cm/s)

μ_n = mobilitas dari elektron (cm²/V.s)

μ_p = mobilitas dari *hole* (cm²/V.s)

Sedangkan untuk rapat arus *drift* elektron dan *hole* dirumuskan sebagai berikut :

$$j_n = q n \mu_n \xi \quad (2.11)$$

$$j_p = q p \mu_p \xi \quad (2.12)$$

Sehingga rapat arus total *drift* (A/cm) pada persambungan p-n adalah penjumlahan dari rapat arus *drift* elektron dengan rapat arus *drift hole* :

$$j_T = j_n + j_p = q(n \mu_n + p \mu_p)\xi \quad (2.13)$$

Jenis arus yang kedua adalah arus difusi yaitu terjadi akibat adanya perbedaan konsentrasi dari pembawa muatan. Arus difusi akan mengalir dari daerah yang berkonsentrasi tinggi ke daerah yang memiliki konsentrasi rendah. Arus difusi akan sebanding dengan gradien konsentrasi yang diformulasikan :

$$j_n^{diff} = + q D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$j_p^{diff} = + q D_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.15)$$

dengan j_n^{diff} = rapat arus difusi elektron (A/cm)

j_p^{diff} = rapat arus difusi *hole* (A/cm)

D_n = konstanta difusivitas dari elektron

D_p = konstanta difusivitas *hole*.

Jadi rapat arus total dalam persambungan p-n adalah sebagai berikut :

$$j_n^T = q n \mu_n \xi + q D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$j_p^T = q p \mu_p \xi + q D_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.17)$$

Dimana j_n^T merupakan rapat arus total untuk elektron (A/cm) dan j_p^T merupakan rapat arus total untuk *hole* (A/cm).

2.3.2 Persamaan Poisson

Persamaan Poisson merupakan persamaan divergensi dari medan listrik (ξ), yang dikaitkan dengan rapat muatan (ρ) (Goetzberger *et al.*,1998), Seperti yang diformulasikan pada persamaan (2.18) :

$$\nabla \cdot \xi = -\nabla^2 \psi = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.18)$$

dengan ϵ = permitivitas material

ψ = potensial elektrostatik

Jika

$$\rho = q (p - n + N_D^+ - N_A^+) \quad (2.19)$$

maka bentuk persamaan Poisson akan menjadi.

$$\nabla \cdot \xi = -\nabla^2 \psi = \frac{q (p - n + N_D^+ - N_A^+)}{\epsilon} \quad (2.20)$$

Rapat muatan (ρ) diartikan sebagai penjumlahan pembawa muatan negatif elektron (n) dan pembawa muatan positif yaitu *hole* (p) serta konsentrasi donor (N_D^+) dan konsentrasi akseptor (N_A^+) yang terionisasi. Adapun nilai permitivitas material (ϵ) ini bergantung pada konstanta dielektrik material misalnya material Silikon dengan konstanta dielektrik dan nilai permitivitas masing-masing sebesar 11,8 serta $1,036 \times 10^{-12}$ F/cm (Colinge *et al.*, 2002).

2.3.3 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan

Di dalam persamaan kontinuitas yang diaplikasikan pada material semikonduktor dikenal istilah proses generasi dan rekombinasi. Proses generasi adalah proses timbulnya pasangan elektron dan *hole* per detik per meter kubik. Sedangkan proses rekombinasi adalah proses bergabungnya pasangan elektron dan

hole per detik per meter kubik. Rapat arus dari pembawa muatan dihitung dari proses generasi (G) dan rekombinasi (R). Dalam keadaan *steady* maka persamaan kontinuitas pembawa muatan untuk rapat arus elektron maupun *hole* dituliskan sebagai berikut (Danielsson, 2000),

$$-\frac{1}{q} \nabla j_n = G - R \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{q} \nabla j_p = G - R \quad (2.22)$$

Berkenaan dengan mekanisme rekombinasi (R) dikenal rekombinasi non-radiatif melalui tingkat ketidakmurnian. Mekanisme rekombinasi ini dikenal juga dengan istilah rekombinasi *Shockley-Read-Hall* (R_{SRH}). Rekombinasi *Shockley-Read-Hall* merupakan proses rekombinasi elektron dan *hole* dengan menggunakan perangkat berupa tingkat ketidakmurnian pada celah pita energi semikonduktor.

Adapun formulasi rekombinasi *Shockley-Read-Hall* (R_{SRH}) sebagai berikut (Danielsson,2000),

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (2.23)$$

dengan n_i = konsentrasi muatan pembawa intrinsik,

τ_n = *lifetime* dari muatan pembawa elektron untuk melakukan rekombinasi

τ_p = *lifetime* dari muatan pembawa *hole* untuk melakukan rekombinasi

n_1 = parameter konsentrasi elektron yang berhubungan dengan tingkat *trap*

p_1 = parameter konsentrasi *hole* yang berhubungan dengan tingkat *trap*

Apabila perangkat tingkat ketidakmurnian ini terdapat di tengah-tengah dari celah pita terlarang maka nilai n_1 dan p_1 sama dengan n_i .

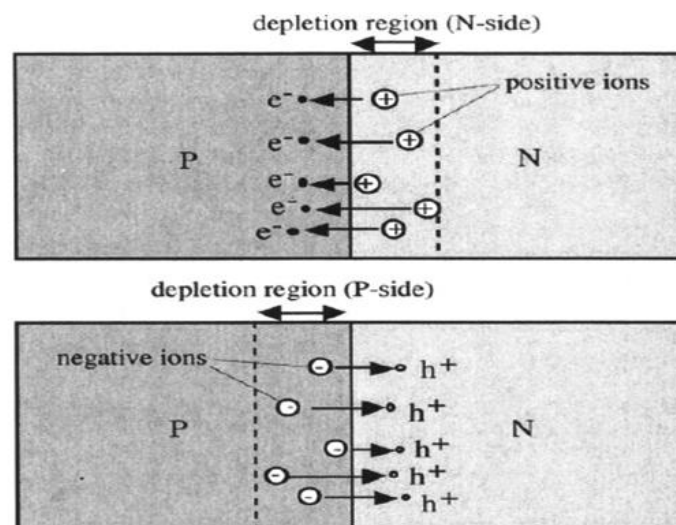
Dengan demikian rapat arus elektron maupun *hole* untuk *divais* semikonduktor misalnya persambungan p-n dapat diformulasikan,

$$\nabla j_n = -qG + q R_{SRH} \quad (2.24)$$

$$\nabla j_p = qG - q R_{SRH} \quad (2.25)$$

2.4 Dioda Silikon

Apabila kedua material tipe-p dan tipe-n dilakukan suatu penyambungan maka akan terbentuk material persambungan p-n yang biasa disebut dengan dioda. Proses penyambungan ini dilakukan pada saat penumbuhan kristal. Menurut Kwok (1995) penemuan persambungan p-n berawal dari penelitian Russel Ohl yang dilakukan pada tahun 1940 ketika melakukan sebuah observasi tentang efek fotovoltaiik pada sebuah batang Silikon. Ohl menggunakan batang silikon yang tidak murni yang dikenal dengan material semikonduktor ekstrinsik. Pada tahun 1941 Ohl menciptakan *Solar Cell* dari material silikon berdasarkan pengamatan tentang efek fotovoltaiik dan kemudian mematenkannya.



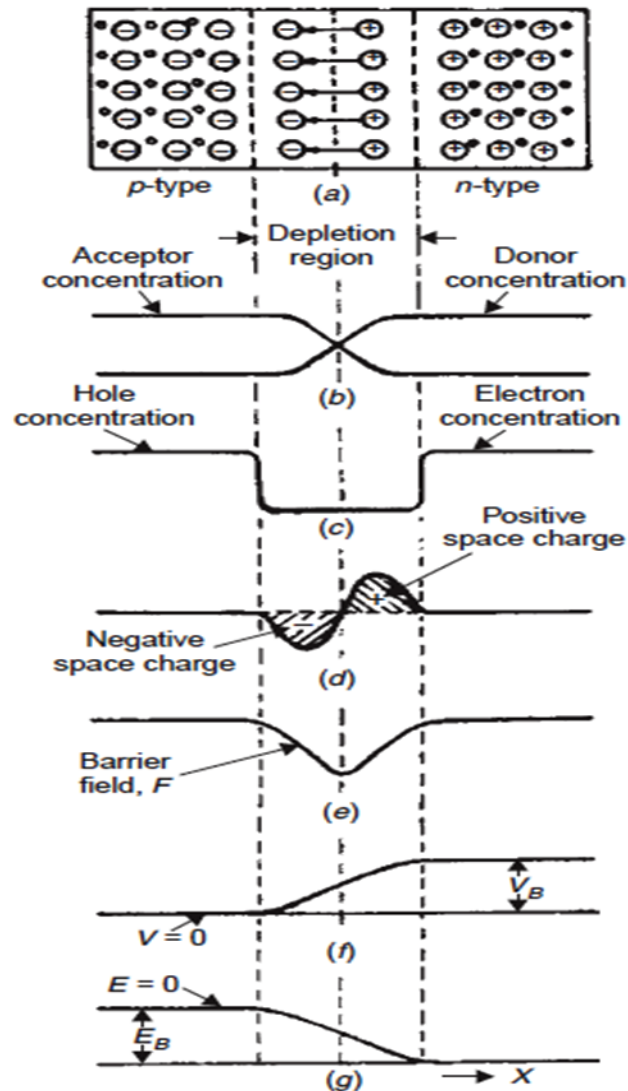
Gambar 2.5 Difusi elektron dan *hole* (Sumber: Colinge *et al*, 2002)

Sesaat setelah terjadi penyambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n, pada daerah sambungan semikonduktor akan terjadi perubahan. Pada daerah material semikonduktor tipe-*n* terdapat sejumlah elektron yang akan dengan mudah terlepas

dari atom induknya. Pada bagian lain (tipe-p), atom aseptor menarik elektron (atau menghasilkan *hole*). Kedua pembawa muatan mayoritas tersebut memiliki cukup energi untuk mencapai material pada sisi lain sambungan. Dalam hal ini terjadi proses difusi elektron dari tipe-*n* ke tipe-*p* dan proses difusi *hole* dari tipe-*p* ke tipe-*n*. Seperti ditunjukkan Gambar 2.5 proses difusi ini tidak berlangsung selamanya karena elektron yang sudah berada di tempatnya akan menolak elektron yang datang kemudian. Proses difusi berakhir saat tidak ada lagi elektron yang memiliki cukup energi untuk mengalir. Akibat proses difusi *hole* dan elektron, tepat pada sambungan p-n terbentuk suatu daerah tanpa muatan bebas yang dikenal dengan daerah pengosongan atau daerah deplesi.

Pada daerah diplesi terjadi pengosongan pembawa muatan mayoritas akibat terjadinya peristiwa difusi ke sisi yang lain. Hilangnya pembawa muatan mayoritas di daerah ini meninggalkan lapisan muatan positif di daerah tipe-*n* dan lapisan muatan negatif di daerah tipe-*p*. Dikarenakan muatan positif terpisah dengan muatan negatif maka didalam daerah deplesi terjadi medan listrik. Dengan adanya medan listrik ini maka terjadi perbedaan potensial antara bagian tipe p dan bagian tipe n yang disebut sebagai “potensial penghalang” (V_o). Keadaan dioda, yang dikondisikan normal yaitu dikondisikan dalam keadaan rangkaian terbuka (Subekti, 2003).

Skema diagram dari dioda pada keadaan terbuka ditunjukkan pada Gambar 2.6.



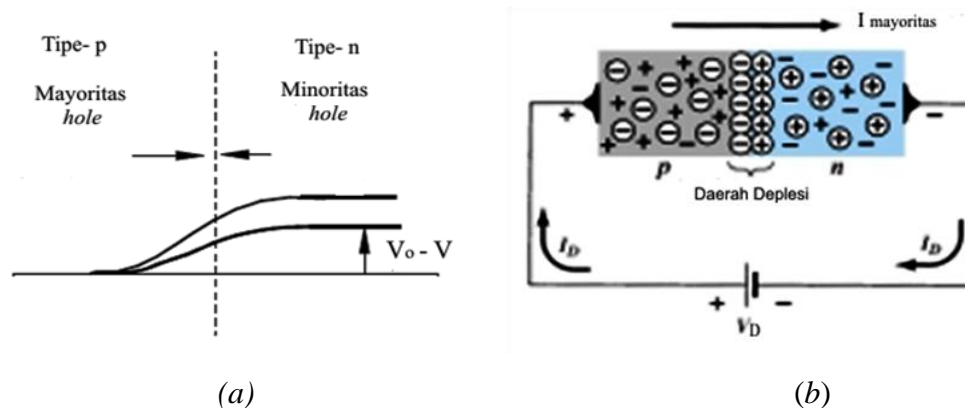
Gambar 2.6 Skema Diagram dari dioda pada keadaan terbuka, (a) pergerakan dari muatan, (b) distribusi konsentrasi dari ion donor dan aseptor, (c) distribusi dari konsentrasi elektron dan *hole*, (d) konsentrasi rapat muatan, (e) medan listrik, (f) distribusi potensial elektrostatis, (g) distribusi energi elektron (Sumber : Grob, 1997)

Dalam keadaan rangkaian terbuka ini hanya pada daerah deplesi yang terjadi penumpukan muatan pada masing-masing sisi sedangkan daerah lainnya dalam keadaan netral. Potensial penghalang (V_0) yang terjadi akan menahan

terjadinya difusi pembawa muatan mayoritas dan memberi kesempatan terjadinya arus *drift* melalui sambungan seperti telah dijelaskan di atas. Besarnya potensial penghalang untuk Si sebesar 0,7 Volt pada suhu kamar. Pada dasarnya dengan adanya pemberian tegangan panjar pada dioda akan meningkatkan atau menurunkan energi potensial dari dioda tersebut, bergantung pada arah tegangan panjar yang diberikan.

2.4.1 Panjar Maju

Besarnya arus difusi sangat bergantung pada besarnya potensial penghalang (V_0). Pembawa muatan mayoritas yang memiliki energi lebih besar dari eV_0 dapat melewati potensial penghalang. Jika keseimbangan potensial terganggu oleh berkurangnya ketinggian potensial penghalang maka harga potensial penghalang menjadi $V_0 - V$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7(a), maka probabilitas pembawa muatan mayoritas mempunyai energi yang cukup untuk melewati sambungan dan probabilitas pembawa muatan mayoritas akan meningkat dengan drastis. Sebagai akibat turunnya potensial penghalang sehingga akan terjadi aliran *hole* dari material tipe-p ke tipe-n, demikian juga sebaliknya untuk elektron (Subekti, 2003). Dengan kata lain menurunnya potensial penghalang memberi kesempatan pada arus listrik (pembawa muatan) untuk mengalir dari daerah mayoritas ke daerah minoritas di dalam dioda seperti di tunjukkan Gambar 2.7(b).

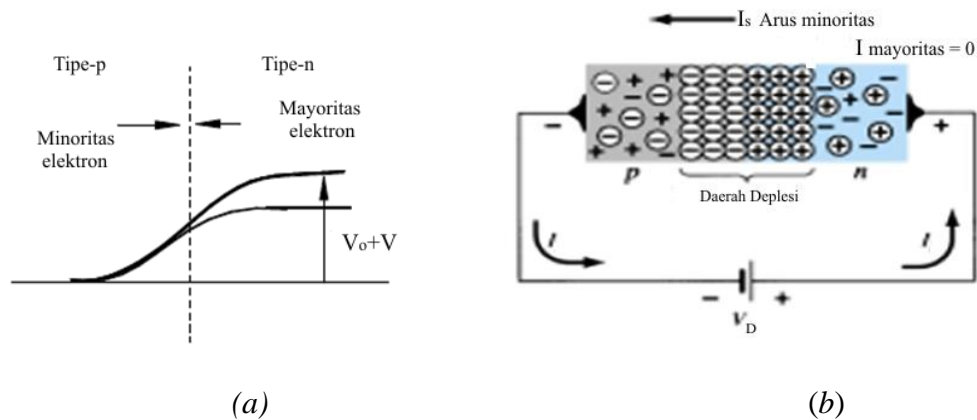


Gambar 2.7 Dioda berpanjar maju (a) penurunan potensial penghalang (V_0)
(b) Pemberian tegangan panjar maju (Sumber : Boylestad *et al.*, 2009)

2.4.2 Panjar Mundur

Pada Gambar 2.8 ditunjukkan keadaan dimana potensial penghalang dinaikkan menjadi $V_0 + V$ dengan memasang tegangan panjar mundur sebesar V maka probabilitas pembawa muatan mayoritas yang memiliki cukup energi untuk melewati potensial penghalang akan turun secara drastis. Kuantitas pembawa muatan mayoritas yang melewati sambungan akan turun ke nol dengan memasang panjar mundur. Pada kondisi panjar mundur, terjadi aliran arus mundur yang sangat kecil dari pembawa muatan minoritas. Pembawa muatan minoritas hasil generasi termal di dekat sambungan akan mengalami “*drift*” searah medan listrik. Arus mundur akan mencapai harga jenuh ($-I_s$) pada harga panjar mundur yang rendah (Subekti, 2003).

Harga arus mundur dalam keadaan normal cukup rendah dan diukur dalam μA (untuk Silikon). Secara ideal, arus mundur seharusnya berharga nol, sehingga harga ($-I_s$) yang sangat rendah pada Silikon merupakan faktor keunggulan Silikon dibandingkan Germanium.



Gambar 2.8 Dioda berpanjar mundur, (a) potensial penghalang (V_0) mengalami kenaikan (b) Pemberian tegangan panjar mundur. (Sumber : Boylestad *et al.*, 2009)

2.4.3 Karakteristik Arus-Tegangan pada Dioda Silikon

Menurut Sutrisno (1986) pada saat dioda diberikan tegangan berpanjar maju, potensial penghalang dioda berkurang sehingga probabilitas dari pembawa muatan mayoritas yang memiliki energi yang cukup untuk menerobos potensial penghalang akan dipengaruhi oleh faktor yang ditunjukkan oleh fungsi eksponensial pada persamaan (2.26) :

$$f = e^{\frac{qV}{\eta kT}} \quad (2.26)$$

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

η = faktor ideal material semikonduktor dimana untuk Si = 1 dan Ge = 2,

V = tegangan panjar yang diberikan,

k = merupakan tetapan Boltzmann ($8,614 \times 10^{-5}$ eV/K),

T = temperatur operasional (K).

Pada saat diberikan tegangan panjar maju pada dioda, *hole* pada material tipe-p akan diinjeksikan ke material tipe-n dan elektron pada tipe-n akan diinjeksikan ke material tipe-p. Pada saat elektron berdifusi menuju material tipe-p, arus listrik yang diinjeksikan ke dalam material tipe-p pada persambungan yakni (I_n) serta dapat dituliskan pada persamaan (2.27) sebagai berikut

$$I_n = \frac{qAD_n}{L_n} \Delta n_p = \frac{qAD_n}{L_n} n_p \left[e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (2.27)$$

dimana D_n merupakan koefisien difusi dari elektron (m^2/s), A merupakan luasan penampang dari persambungan (m^2) dan L_n jarak rata rata elektron berdifusi sebelum rekombinasi berlangsung (m). Pada saat yang bersamaan *hole* juga berdifusi menuju material tipe-n, dan arus listrik yang diinjeksikan ke dalam material tipe-n pada persambungan (I_p) serta dapat dituliskan pada persamaan (2.28) berikut

$$I_p = \frac{qAD_p}{L_p} \Delta p_n = \frac{qAD_p}{L_p} p_n \left[e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (2.28)$$

dengan D_p = koefisien difusi dari *hole* (m^2/s),

A = luasan penampang dari persambungan (m^2)

L_p = jarak rata rata *hole* berdifusi sebelum rekombinasi berlangsung (m).

Total arus yang mengalir pada persambungan yaitu gabungan antara arus yang diinjeksikan ke dalam material tipe-p dan tipe-n pada persambungan.

$$I = I_p + I_n \quad (2.29)$$

$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \left[e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (2.30)$$

dimana arus saturasi (I_S) diformulasikan

$$I_S = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \quad (2.30)$$

maka arus total dioda

$$I = I_S \left[e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right] \quad (2.31)$$

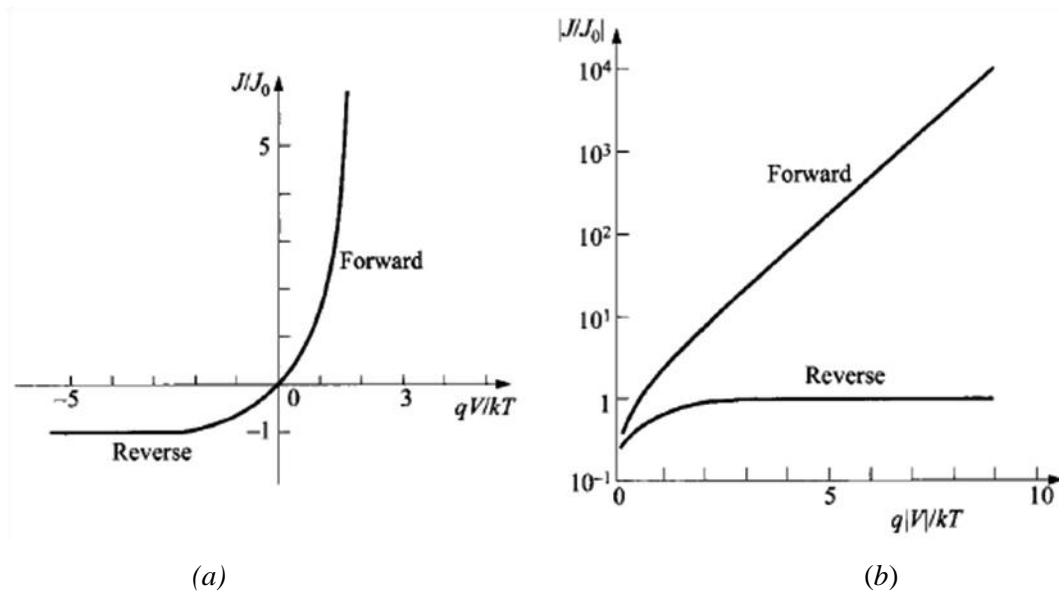
dengan $V_T = kT/q$. V_T merupakan tegangan ekuivalen untuk temperatur. Untuk Silikon harga V_T sebesar 0,025 Volt ini dihitung pada temperatur 300 K. Formulasi arus total pada persamaan (2.31) merupakan persamaan karakteristik arus-tegangan dioda. Jika V bernilai positif dan nilainya sebesar sekitar sepersepuluh volt maka persamaan (2.31) akan menjadi

$$I \approx I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} \right) \quad (2.32)$$

Persamaan (2.31) ini disajikan dalam bentuk linier, selain itu juga dapat diformulasikan dalam bentuk logaritmik seperti berikut

$$\ln I = \frac{V}{\eta V_T} + \ln I_s \quad (2.32)$$

Gambar 2.9 memperlihatkan kurva karakteristik arus-tegangan pada dioda dalam bentuk plot linier (a), dan bentuk plot semilogaritmik (b). Kedua penyajian kurva ini sesuai dengan penyajian formulasi (2.30) dan (2.31).



Gambar 2.9 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Silikon, (a) Bentuk plot linier, (b) Bentuk Plot Semilogaritmik (Sumber: Sze, 1985)

Adanya perubahan temperatur operasional dioda menyebabkan terjadinya perubahan lengkungan karakteristik arus-tegangan dioda. Sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 di bawah. Terlihat jika adanya perubahan temperatur operasional sangat berpengaruh besar terhadap perubahan karakteristik arus-tegangan dioda. Hal ini disebabkan perubahan besaran tegangan potong (V_o) dan arus saturasi (I_s). Apabila temperatur operasional dinaikkan, tegangan potong (*cut-off*) dari dioda berkurang sedangkan arus saturasi bertambah serta kemiringan kelengkungan karakteristik arus-tegangan pada panjar mundur juga bertambah. Pengaruh temperatur operasional oleh faktor eksponensial pada persamaan (2.26) yang berasal dari arus injeksi dioda tidak terlalu signifikan pengaruhnya (Sutrisno, 1986).

Perubahan temperatur operasional juga akan mempengaruhi konsentrasi muatan pembawa elektron intrinsik (n_i). Hal ini dikarenakan aktivitas termal yang membuat eksitasi elektron pada ikatan atomnya. Dengan bertambahnya temperatur operasional juga menambah konsentrasi elektron intrinsik (n_i) (Kasap, 2001). Menurut Sutrisno (1986) dengan adanya prosen rekombinasi elektron dan *hole* maka berlaku sebuah hubungan $pn = n_i^2$ sehingga pada tipe n akan berlaku

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \cong \frac{n_i^2}{N_d} \quad (2.33)$$

sedangkan pada tipe p berlaku

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \cong \frac{n_i^2}{N_a} \quad (2.34)$$

Untuk rumusan rapat arus saturasi diformulasikan sebagai berikut

$$J_s \cong C(p_n + n_p) = Cn_i^2 \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right) \cong C'n_i^2 \quad (2.35)$$

dimana n_i = konsentrasi muatan elektron intrinsik (cm^{-2}),

p_n = konsentrasi *hole* di tipe n (cm^{-2}),

n_p = konsentrasi *elektron* di tipe p (cm^{-2}),

n_n = konsentrasi *elektron* di tipe n (cm^{-2}),

p_p = konsentrasi *hole* di tipe p (cm^{-2}),

N_d = konsentrasi donor (cm^{-2}),

N_a = konsentrasi akseptor (cm^{-2}),

C dan C' = konstanta.

Untuk formulasi konsentrasi muatan elektron intrinsik yang dipengaruhi oleh temperatur operasional dirumuskan berikut (Sutrisno, 1986):

$$n_i \cong B T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_g}{2kT}} \quad (2.36)$$

dengan $B = \text{konstanta}$,

$T = \text{temperatur operasional (K)}$,

$E_g = \text{Energi gap (eV)}$,

$k = \text{Konstanta Boltzmann } (8,614 \times 10^{-5} \text{ eV/K})$.

Laju perubahan rapat arus saturasi (J_s) terhadap temperatur operasional didapatkan dengan cara defferensial $J_s (T)$ terhadap T seperti berikut ini,

$$\frac{dJ_s}{dT} = \frac{d}{dT} \left(C B^2 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \right) \quad (2.37)$$

$$\frac{dJ_s}{dT} = C B^2 \left(\frac{3}{T} + \frac{E_g}{kT^2} \right) T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2.38)$$

jadi perubahan relatif rapat arus saturasi (J_s) terhadap temperatur operasional,

$$\frac{1}{J_s} \frac{dJ_s}{dT} = \frac{3}{T} + \frac{E_g}{kT^2}. \quad (2.39)$$

untuk kristal Germanium pada $T = 300 \text{ K}$, dengan $E_g = 0,68 \text{ eV} = 0,68 (q) \text{ Joule}$ maka

$$\frac{E_g}{kT^2} = \frac{q E_g}{kT T q} = \frac{q E_g (eV)}{kT T} \quad (2.40)$$

$$\frac{E_g}{kT^2} = 39 \frac{E_g (eV)}{T} \quad (2.41)$$

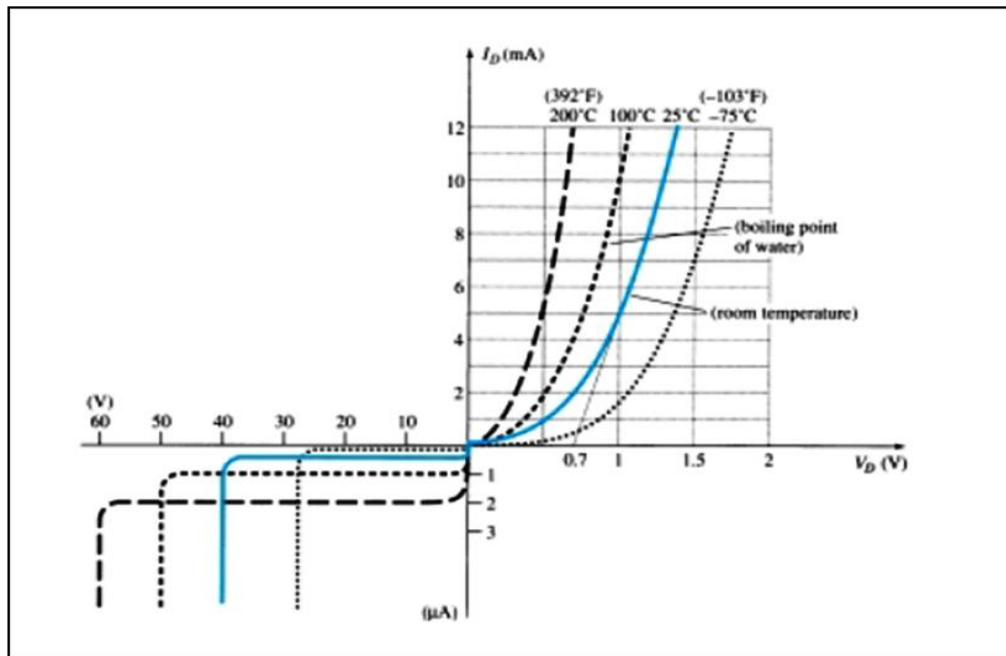
sehingga perubahan relatif arus saturasi pada temperatur 300 K adalah

$$\frac{1}{J_s} \frac{dJ_s}{dT} = \frac{3}{300} + 39 \frac{0,68}{300} \cong 0,1 = 10 \% \quad (2.42)$$

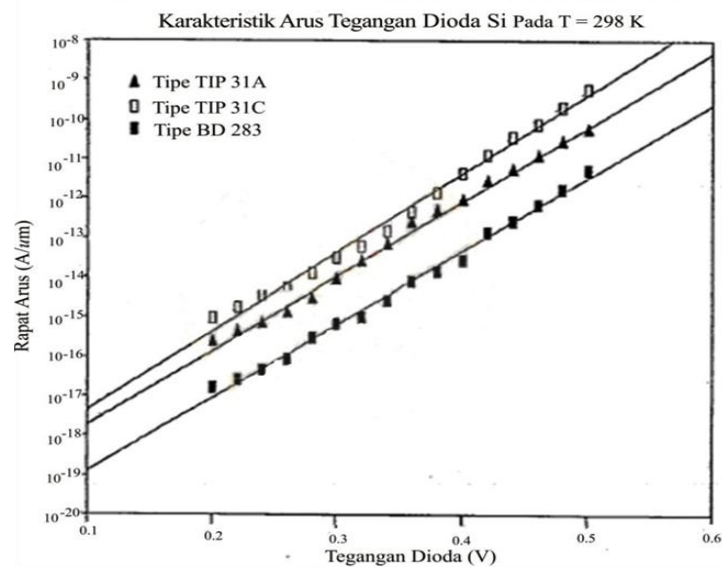
untuk kristal Silikon pada $T = 300 \text{ K}$, dengan $E_g = 1,1 \text{ eV} = 1,1 (q) \text{ Joule}$ maka perubahan relatif arus saturasi pada temperatur 300 K adalah

$$\frac{1}{J_s} \frac{dJ_s}{dT} = \frac{3}{300} + 39 \frac{1,1}{300} \cong 0,16 = 16 \% \quad (2.43)$$

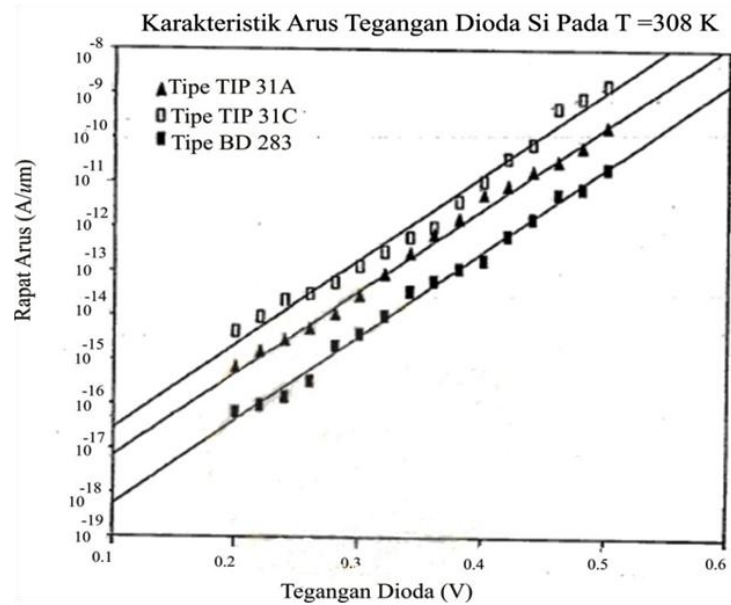
Jadi jelas untuk Germanium setiap kenaikan temperatur 5 °C arus saturasi akan bertambah sebesar 50% dari semula. Sedangkan untuk kristal Silikon setiap kenaikan 5 °C arus saturasi akan bertambah 80% dari semula.



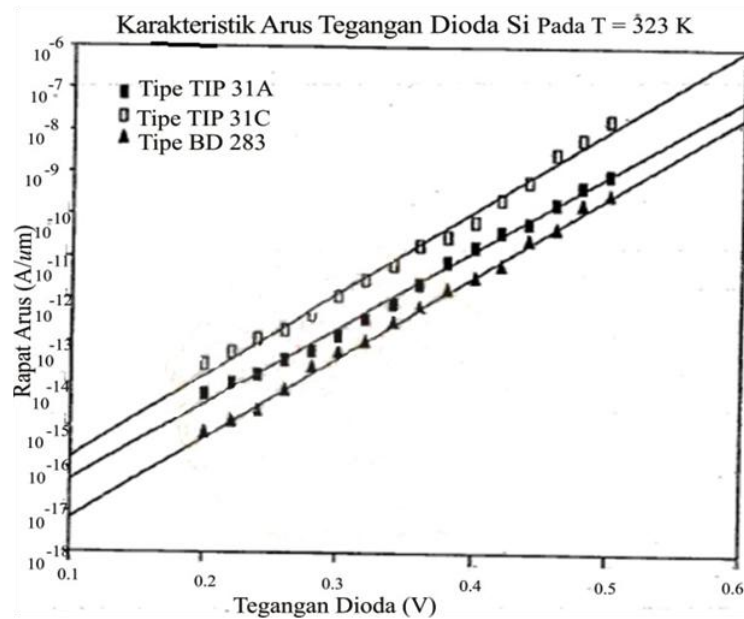
Gambar 2.10 Variasi temperatur operasional terhadap kurva karakteristik arus-tegangan dioda (Sumber : Boylestad *et al.*, 2009)



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.11 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si untuk tegangan panjar maju variasi temperatur operasional (a) 298 K, (b) 308 K, (c) 323 K (Sumber: Aslizar, 1996)

Adanya pengaruh temperatur operasional terhadap kurva karakteristik arus-tegangan pada dioda Silikon juga dijelaskan dalam penelitian Aslizar (1996). Pada penelitian tersebut dilakukan variasi temperatur operasional pada bahan Silikon. Dari penelitian tersebut dihasilkan adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan terhadap temperatur operasional untuk tiga jenis dioda (TIP 31A, TIP 31C, dan BD 283) seperti yang ditunjukkan Gambar 2.11.a dan Gambar 2.11.b diatas.

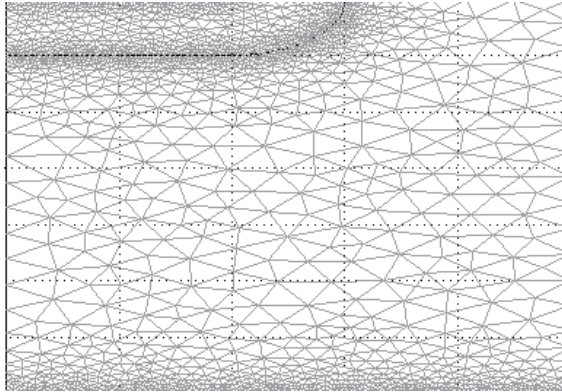
2.5 Analisa Numerik Menggunakan FEMLAB

FEMLAB merupakan sebuah perangkat lunak sangat cocok digunakan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan serta pemodelan dalam bidang sains dan teknik dengan menggunakan persamaan diferensial parsial (PDE). Kelebihan *FEMLAB* yaitu dengan penggunaan metode elemen hingga (*finite element method, FEM*) dalam penyelesaian persamaan-persamaan matematis, sehingga sangat cocok digunakan untuk simulasi 1D, 2D, ataupun 3D untuk divais dengan struktur geometri yang cukup rumit. *FEMLAB* khusus dirancang terintegrasi dengan *MATLAB* sehingga memungkinkan pengguna untuk melakukan modifikasi sesuai dengan struktur geometri yang disimulasikan (Comsol, 2001).

Walaupun ide awal pengembangan *FEMLAB* dilakukan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan ilmiah khususnya fisika yang menggunakan persamaan diferensial parsial yang rumit, penggunaan *FEMLAB* semakin memasyarakat akibat fleksibilitasnya. Contohnya pada bidang *Semiconductor Device Model*. Seperti yang dilakukan oleh Danielsson (2000) menciptakan sebuah semikonduktor dioda model dengan kerjasama dengan perusahaan *FEMLAB* yaitu *COMSOL MULTIPHYSICS* di Stockholm Swedia.

Sebagaimana telah disebutkan di atas bahwa metode pendekatan yang digunakan dalam *FEMLAB* adalah metode elemen hingga, dimana geometri yang akan disimulasikan dibagi menjadi sejumlah elemen-elemen kecil. Semakin kecil elemen yang didefinisikan, hasil yang diperoleh semakin akurat. Pada Gambar 2.12

diperlihatkan contoh pendefinisian geometri menjadi elemen-elemen kecil dalam *FEM*. Elemen-elemen tersebut dapat berupa elemen segitiga, sesuai dengan struktur geometri yang akan disimulasikan .



Gambar 2.12 Pendefinisian geometri menjadi elemen-elemen kecil dalam *FEM* pada dioda (Sumber : Danielson, 2000)

Dasar pendekatan untuk solusi persamaan diferensial dalam *FEM* adalah asumsi bahwa solusi umum persamaan mengikuti fungsi sederhana dari masing-masing elemen. Solusi secara keseluruhan diperoleh dengan mengkombinasikan solusi-solusi tiap elemen. Demikian halnya dengan penggambaran solusi yang diperlukan untuk fungsi-fungsi kontinu diasumsikan memiliki bentuk analitik sederhana yang digunakan oleh tiap-tiap elemen. Oleh karena itu, penggunaan elemen dengan ukuran yang berbeda-beda tidak menambah kesulitan dalam *FEM*. Hal inilah yang menjadi salah satu kelebihan penting *FEM*. *FEM* lebih fleksibel digunakan dalam simulasi divais semikonduktor yang memiliki geometri yang tidak rata ataupun divais dengan distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier.

Paket simulator dari perangkat lunak *FEMLAB* berisi sejumlah mode aplikasi yang dilengkapi dengan *Graphical User Interface (GUI)* yang sudah diatur dengan persamaan dan variabel sesuai dengan bidang fisika. Untuk kasus simulasi *divais* semikonduktor khususnya dioda, dapat diimplementasikan dengan

menggunakan mode aplikasi *PDE General Form Multiphysics* dalam struktur 1D, 2D ataupun 3D (Purwandari, 2012). Parameter dalam semikonduktor diatur dalam perancangan simulasi semikonduktor. Selanjutnya melakukan perancangan geometri *divais* dari semikonduktor yang akan disimulasikan, kondisi batas juga diatur. Persamaan *divais* semikonduktor yang diterapkan kemudian harus didefinisikan pada mode spesifikasi PDE. Terakhir dilakukan solusi serta pemodelan *divais* semikonduktor dioda dan melakukan variasi temperatur operasional serta memunculkan karakteristik arus-tegangan pada dioda.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

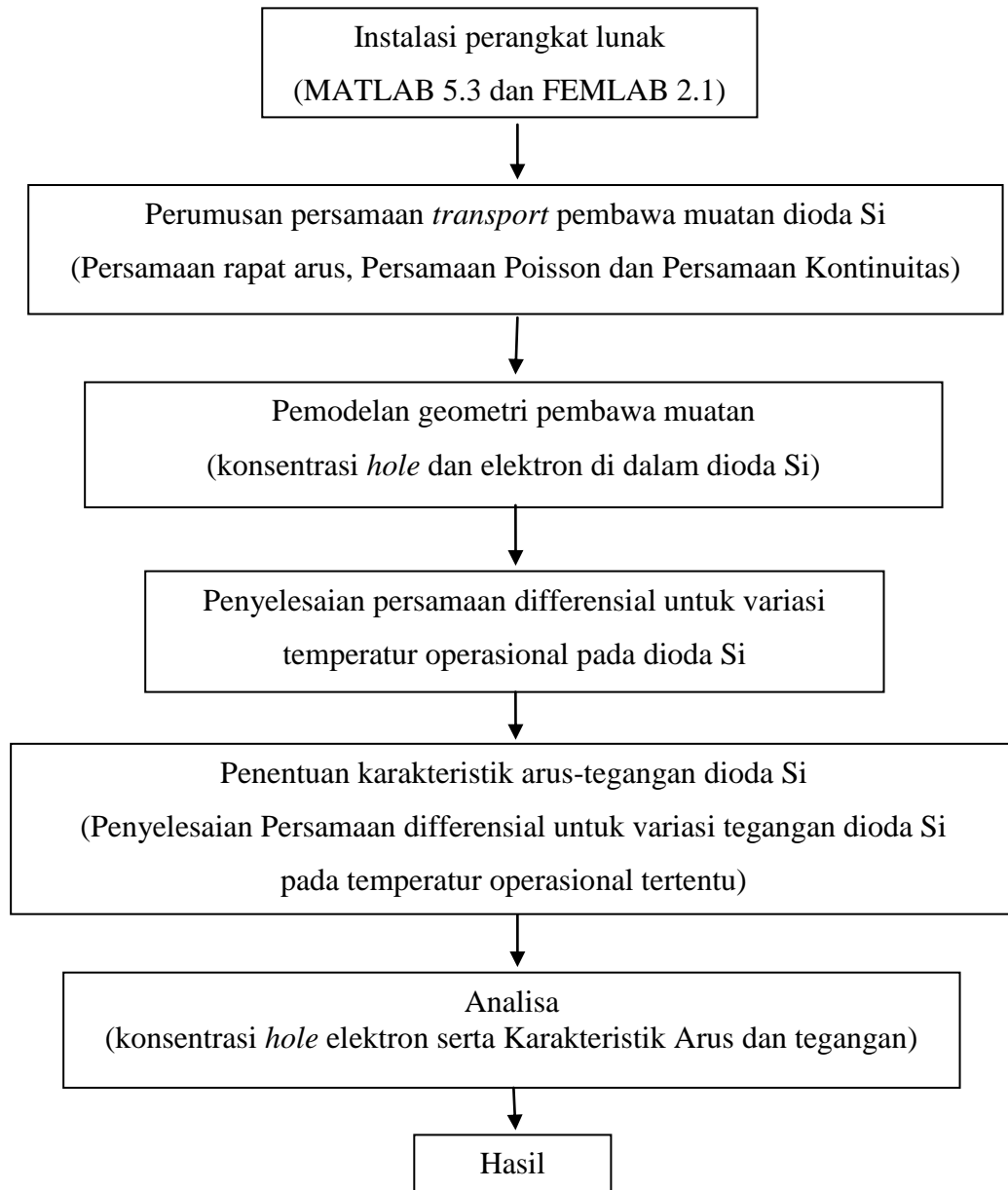
Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember dengan kegiatan yang dilaksanakan mulai dari bulan Agustus 2012 hingga Desember 2012 mencakup proses instalasi sampai analisa data.

3.2 Prosedur Penelitian

FEMLAB merupakan suatu perangkat lunak komputer yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan serta pemodelan ilmiah dan ilmu rekayasa dengan menggunakan persamaan diferensial parsial (*PDE*). Di dalam penelitian ini perangkat lunak *FEMLAB* digunakan untuk menyelesaikan persoalan simulasi divais semikonduktor khususnya dioda yang merupakan divais berbasis persambungan tipe-p dan tipe-n Si dengan menitik beratkan pada pengaruh temperatur operasional terhadap karakteristik arus dan tegangan. Perangkat lunak *FEMLAB* khusus dirancang terintegrasi dengan *MATLAB* untuk melakukan modifikasi sesuai dengan struktur geometri dioda Si terhadap pengaruh temperatur operasionalnya. Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan geometri dioda Si untuk konsentrasi pembawa muatannya dan karakterisasi arus dan tegangan dengan melakukan variasi parameter temperatur operasional. Adapun prosedur penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

3.2.1 Diagram Penelitian

Secara umum, penelitian yang akan dilakukan digambarkan dalam diagram penelitian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram prosedur penelitian

3.2.2 Instalasi Perangkat Lunak *MATLAB* 5.3 dan *FEMLAB* 2.1

Untuk melakukan simulasi model dioda Si dan karakteristik arus-tegangan maka terlebih dahulu dilakukan instalasi perangkat lunak *MATLAB* dan *FEMLAB*. Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MATLAB* Versi 5.3 dan *FEMLAB* Versi 2.1 dengan sistem operasi *Windows*. Adapun spesifikasi perangkat keras komputer yang digunakan dalam proses pemodelan ini adalah sebagai berikut.

1. *Processor* Intel Celeron CPU B815 @ 1.66 GHz (2 CPU)
2. *Memory* RAM 2 GB
3. *VGA* 818 MB
4. *Hard Disk* 320 GB

Proses instalasi perangkat lunak *FEMLAB* 2.1 diawali dengan penginstalan *MATLAB* 5.3 pada sistem operasi *Windows 7 Professional* dan dilanjutkan dengan instalasi perangkat lunak *FEMLAB* 2.1. Tahapan kegiatan instalasi tersebut tidak dapat dipertukarkan oleh karena prosedur instalasi *FEMLAB* 2.1 membutuhkan ketersediaan *MATLAB* 5.3 di dalam sistem operasional yang digunakan. Setelah proses instalasi *MATLAB* 5.3 dan *FEMLAB* 2.1 selesai maka kedua perangkat lunak ini siap untuk digunakan.

3.2.3 Perumusan Persamaan *Transport* Pembawa Muatan Dioda Si

Pada penelitian ini akan digunakan dua persamaan dasar pada divais semikonduktor yaitu persamaan Poisson (3.1) dan persamaan kontinuitas (3.2) dan (3.3) yang merupakan persamaan rapat arus. Perumusan persamaan *transport* pembawa muatan dioda Si yang akan dilakukan pada penelitian ini mengacu pada persamaan (2.20), (2.24) dan (2.25). Selanjutnya Persamaan tersebut akan dimodifikasi menjadi persamaan berikut,

$$\nabla^2 \psi = - \frac{q (p - n + N)}{\epsilon} \quad (3.1)$$

$$\nabla j_n = q R_{SRH} \quad (3.2)$$

$$\nabla j_p = -q R_{SRH} \quad (3.3)$$

Komponen rapat arus elektron (j_n) dan rapat arus *hole* (j_p) yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

$$j_n = q n \mu_n \nabla \psi + q D_n \nabla n \quad (3.4)$$

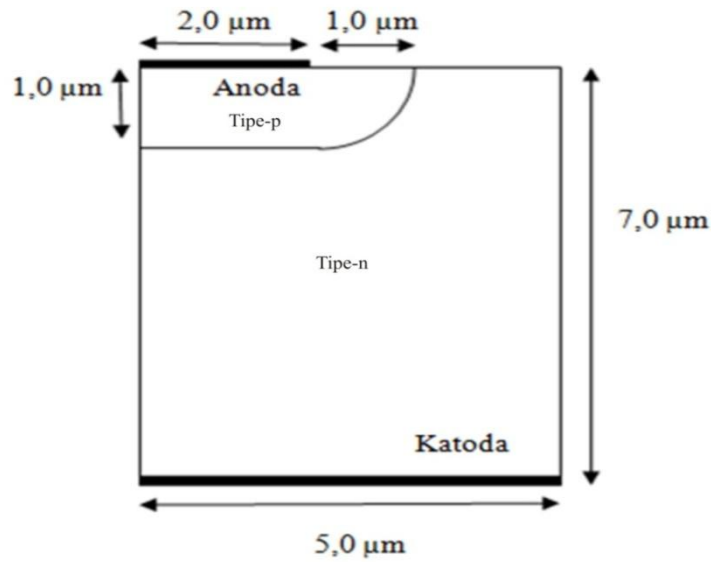
$$j_p = q p \mu_p \nabla \psi + q D_p \nabla p \quad (3.5)$$

Persamaan kontinuitas pada material semikonduktor khususnya dioda dikenal istilah proses generasi dan rekombinasi. Pada penelitian ini dimodelkan dioda yang ideal. Dioda ideal ini tidak terjadi mekanisme generasi (G) sebagaimana yang terjadi pada dioda non-ideal. Akan tetapi pada dioda ideal terjadi mekanisme rekombinasi (R) dikenal rekombinasi tingkat ketidakmurnian yaitu *Shockley-Read-Hall* (R_{SRH}) (Colienge, 2002; dan Goudon, 2007). Untuk Rekombinasi *Shockley-Read-Hall* (R_{SRH}) yang digunakan pada penelitian ini sesuai dengan perumusan pada persamaan (2.23).

3.2.4 Pemodelan Geometri Pembawa Muatan Dioda Si

Pada penelitian ini ingin didapatkan pemodelan geometri pembawa muatan dari dioda Si dengan variasi temperatur operasional tertentu. Pemodelan ini diawali dengan perancangan model geometri dioda Si, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Model tersebut diciptakan dengan memanfaatkan *PDE General Form Multiphysics application* pada *FEMLAB model navigator*. Geometri divais dioda dimodelkan dalam bentuk penampang 2 dimensi. Pemodelan 2 dimensi ini dibuat dari tampak samping dioda Si. Daerah persambungan tipe-p dan daerah persambungan tipe-n ini ditandai dengan adanya garis lengkung model tersebut. Setelah penggambaran model geometri dioda, akan dilakukan pemberian parameter masukan dari material semikonduktor Si penyusun daerah p dan daerah n. Tabel 3.1

menunjukkan parameter masukan yang digunakan dalam simulasi dioda berbasis material Silikon.



Gambar 3.2 Model dari struktur dioda Si
(Sumber: Danielsson, 2000)

Tabel 3.1 Parameter dioda Si

Parameter	Formula	Nilai
Jarak (x, y)	$x_0 = \max(x , y ,)$	10^{-3} cm
Beda potensial (ψ)	$\psi_0 = \frac{kT}{q}$	0,026 V (temperatur ruang)
Konsentrasi pembawa muatan (n, p, N)	$C_0 = \max(N)$	$1,01 \times 10^{17}$ cm ⁻²
Difusivitas pembawa muatan (D_n, D_p)	$D_0 = \max(D_n , D_p)$	20,7 cm ² /s
Mobilitas pembawa muatan (μ_n, μ_p)	$\frac{D_0}{\psi_0}$	800 cm ² /Vs (temperatur ruang)
Konsentrasi intrinsik (n_i)	n_i	$1,46 \times 10^{10}$ cm ⁻² (temperatur ruang)
Waktu paruh muatan pembawa (τ_n, τ_p)	τ_n, τ_p	0,1 μs

(Sumber: Danielsson, 2000)

Tahap selanjutnya adalah memberikan suatu syarat batas berkenaan dengan perancangan geometri divais dioda Si. Menurut Danielsson (2000), untuk kontak batas yang jauh dari daerah divais aktif, maka pengaruh medan listrik (ξ) dan rapat arus pembawa (J_n dan J_p) memiliki komponen normal bernilai nol seperti yang ditunjukkan persamaan berikut ini,

$$\hat{n} \cdot \xi = 0 \quad (3.6)$$

$$\hat{n} \cdot J_n = 0 \quad (3.7)$$

$$\hat{n} \cdot J_p = 0 \quad (3.8)$$

Untuk kontak batas dengan material konduktor (logam), potensial elektrostatik bernilai tetap. Jika diasumsikan kecepatan rekombinasi bernilai tak hingga pada kontak tersebut, maka hukum aksi-massa berlaku sebagai berikut,

$$n_i^2 = n p \quad (3.9)$$

Persamaan (3.9) digunakan untuk menentukan konsentrasi pembawa muatan dengan melibatkan konsentrasi dopan (N). Dengan menggunakan asumsi bahwa tidak ada muatan di dalam kontak. Nilai beda potensial elektrostatiknya adalah sama dengan tegangan eksternal (V_A) yang diberikan ditambah dengan tegangan pada divais yang memiliki hubungan logaritmik dengan konsentrasi pembawa muatan.

$$\psi = V_A + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.10)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.11)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.12)$$

Setelah dilakukannya pembuatan geometri divais dioda maka model geometri ini dapat di konversi dari file *FEMLAB* (.mat) ke *M-File MATLAB* dengan cara melakukan *export to M-file*. Hal ini dimaksudkan agar dapat dengan mudah membuat variasi temperatur operasional pada dioda Si.

3.2.5 Penyelesaian Persamaan Diferensial untuk Variasi Temperatur operasional

Pada penelitian ini terdapat tiga persamaan diferensial yang mendasarinya yaitu kombinasi antara persamaan Poisson, persamaan kontinuitas dengan persamaan rapat arus. Persamaan (3.1), (3.2) dan (3.3) akan mengalami modifikasi dimana persamaan Poisson dikalikan dengan konstanta skala semikonduktor (λ^2) untuk mendapatkan konsentrasi pembawa muatan. Terdapat dua variabel, yaitu u dan v , yang berkaitan dengan tingkat kuasi-Fermi pembawa muatan dimana $u = e^{-V_A}$ serta $v = e^{V_A}$, sehingga memodifikasi bentuk formulasi dari pembawa muatan sebagai berikut,

$$n = n_i e^\psi u \quad (3.13)$$

$$p = p_i e^\psi v \quad (3.14)$$

Dengan adanya variabel terikat tersebut, ketiga persamaan diferensial tersebut akan mengalami transformasi sebagai berikut (Danielsson,2000) :

$$\lambda^2 \nabla^2 \psi = n_i (e^\psi u - e^{-\psi} v) - N \quad (3.15)$$

$$\nabla(D_n n_i e^\psi \nabla u) = \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (e^\psi u + 1) + \tau_n (e^{-\psi} v + 1)} \quad (3.16)$$

$$\nabla(D_p n_i e^{-\psi} \nabla v) = \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (e^\psi u + 1) + \tau_n (e^{-\psi} v + 1)} \quad (3.17)$$

Persamaan (3.15), (3.16) dan (3.17) merupakan persamaan differensial yang digunakan oleh perangkat lunak *FEMLAB* untuk melakukan pemodelan geometri pembawa muatan dioda Si.

Parameter temperatur operasional (T) terletak pada konstanta skala semikonduktor (λ^2) didalam penyelesaian persamaan diferensial. Basarnya (λ^2) ini akan dapat diformulasikan menjadi :

$$\lambda^2 = \frac{k\varepsilon_0\varepsilon}{q^2x_0^2C_0}T. \quad (3.18)$$

Adanya perubahan tempertur operasional (T) akan berpengaruh terhadap persamaan differensial tersebut. Pengaruh temperatur operasional berimbas juga terhadap konsentrasi muatan pembawa muatan intrinsik (n_i). Hal ini diformulasikan seperti berikut (Kasap, 2001),

$$n_i(T) = \frac{T^{3/2}e^{\left(-\frac{1,1}{2kT}\right)}}{300^{3/2}e^{\left(-\frac{1,1}{2k300}\right)}} \times n_i(300) \quad (3.19)$$

dari persamaan (3.19) jelas sekali terlihat jika temperatur operasional sangat berpengaruh terhadap nilai konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i). Dengan $n_i(300)$ merupakan konsentrasi pembawa muatan intrinsik pada temperatur 300 K yang bernilai $1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ dan k adalah tetapan Boltzmann ($8,614 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).

Sebagai mana disebutkan di dalam teori jika perubahan temperatur operasional akan mempengaruhi nilai arus saturasi (I_S) dioda. Kenaikan arus saturasi untuk dioda Silikon setiap 5°C arus saturasi akan bertambah 80% dari semula. Maka formulasi untuk arus yang mengalir pada dioda yaitu (Sutrisno, 1986),

$$I = (I_S + (0,8 \times I_S) \left[e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right]). \quad (3.20)$$

Tiga parameter yang berubah nilainya apabila temperatur operasional dioda berubah yaitu konsentrasi muatan pembawa muatan intrinsik (n_i), harga arus saturasi (I_S) dan fungsi eksponensial $e^{qV/kT}$ pada perhitungan arus dioda. Untuk variasi temperatur operasional yang akan dilakukan yaitu 288 K, 293 K, 298 K, 303 K, 308 K, 313 K, 318 K dan 323 K berdasarkan data eksperimen yang dilakukan oleh Aslizar (1996). Nantinya akan dilakukan perbandingan hasil eksperimen dan simulasi komputasinya.

3.2.6 Penentuan Karakteristik Arus-Tegangan Dioda Si

Penentuan karakteristik arus dan tegangan pada dioda Si dilakukan dengan melakukan variasi tegangan dioda Si pada temperatur operasional tertentu, berdasarkan pemodelan geometri yang dibuat. Pada penelitian ini akan dilakukan pemberian tegangan dioda Si dari 0 sampai 0,5 Volt dengan cacahan tegangan sebesar 0,020 Volt. Nantinya akan didapatkan data arus dan tegangan sebanyak 26 titik pada kurva karakteristik arus dan tegangan. Hasil perhitungan terhadap besarnya arus secara numerik dilakukan dengan menggunakan program *MATLAB*. Data perhitungan arus dan tegangan selanjutnya diplot untuk setiap variasi temperatur operasional.

3.2.7 Analisa Data

Analisa terhadap hasil distribusi konsentrasi pembawa muatan dioda Si dilakukan dengan menghitung konsentrasi pada salah satu daerah cacahan dekat anoda, salah satu daerah cacahan tengah p, salah satu daerah cacahan persambungan tipe-p dan tipe-n, salah satu daerah cacahan tengah n dan salah satu daerah cacahan dekat katoda. Dari kelima pemilihan daerah cacahan ini ditentukan nilai konsentrasi *hole* dan elektron dengan variasi temperatur operasional dioda Si pada salah satu tegangan masukan saja. Pemilihan salah satu tegangan masukan dioda Si ini dimaksudkan untuk mengetahui perbandingan nilai konsentrasi *hole* dan elektron

dengan variasi temperatur operasional. Pemilihan tegangan masukan dioda Si ini dilakukan bebas dan pada penelitian ini dilakukan analisa pada tegangan masukan dioda Si sebesar 0,34 Volt.

Sedangkan untuk analisa karakteristik arus dan tegangan dioda Si dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi kurva karakteristik arus dan tegangan dengan variasi temperatur operasional berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Aslizar (1996). Perbandingan ini dianalisa dengan cara menentukan nilai deskripsinya. Rumusan deskripsi untuk penelitian ini sebagai berikut (Illinoisstate, 2004) :

$$D = \left| \frac{J_{Femlab} - J_{Aslizar}}{J_{Aslizar}} \right| \times 100 \% \quad (3.21)$$

dimana : D = Nilai deskripsi (%)

J_{Femlab} = Nilai rapat arus dari perhitungan Femlab (A/ μ m)

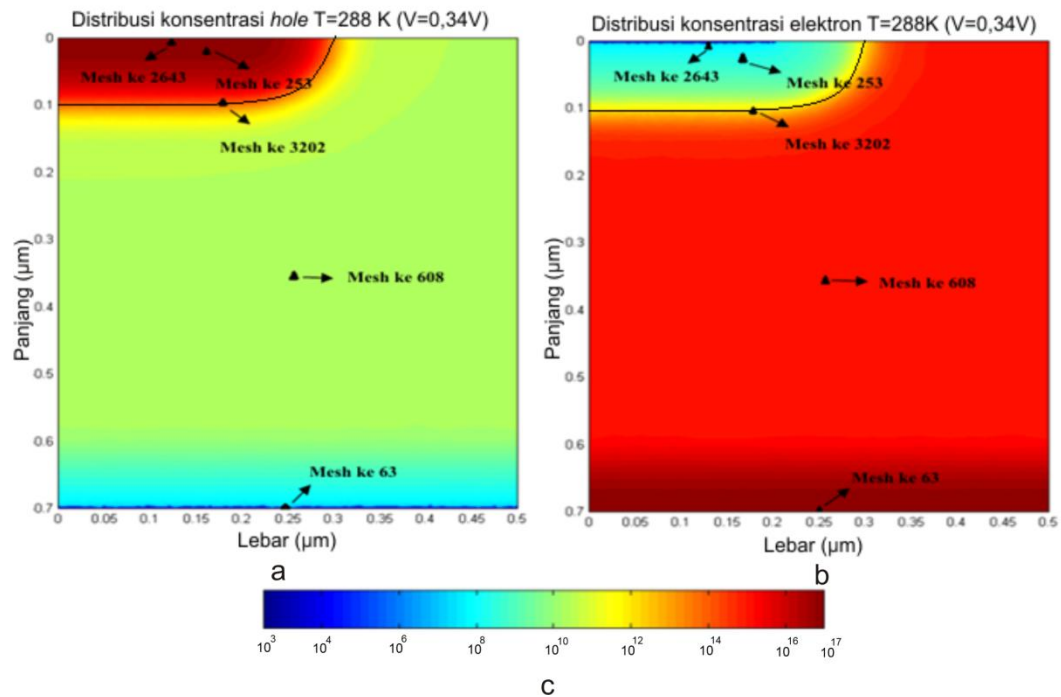
$J_{Aslizar}$ = Nilai rapat arus dari perhitungan Aslizar (A/ μ m)

Analisa data ini bermanfaat nantinya untuk menyelidiki adanya pengaruh temperatur operasional terhadap karakteristik dioda Si didalam penggunaannya.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Distribusi Konsentrasi *Hole* dan Elektron terhadap Variasi Temperatur Operasional pada Dioda Si

Tujuan pertama yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah mendapatkan pemodelan dari distribusi konsentrasi *hole* dan elektron dioda Si pada variasi temperatur operasional tertentu. Dengan demikian dapat diperoleh gambaran yang jelas dari adanya kebergantungan dioda Si pada temperatur operasional berdasarkan model yang dihasilkan. Analisa terhadap perbedaan konsentrasi pembawa muatan dari setiap variasi temperatur operasional, selanjutnya dilakukan pada keadaan tegangan masukan yang sama. Adapun distribusi konsentrasi dari hasil simulasi dioda yang berbentuk persambungan tipe-p dan tipe-n disajikan dalam bentuk distribusi warna yang merepresentasikan besar konsentrasi pembawa muatan. Berikut ini hasil simulasi terhadap distribusi konsentrasi *hole* dan elektron pada dioda Si dengan tegangan masukan dioda Si sebesar 0,34 volt dan temperatur operasional dioda pada 288 K ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada T = 288 K
 a. Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada T = 288 K
 b. Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada T = 288 K
 c. Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

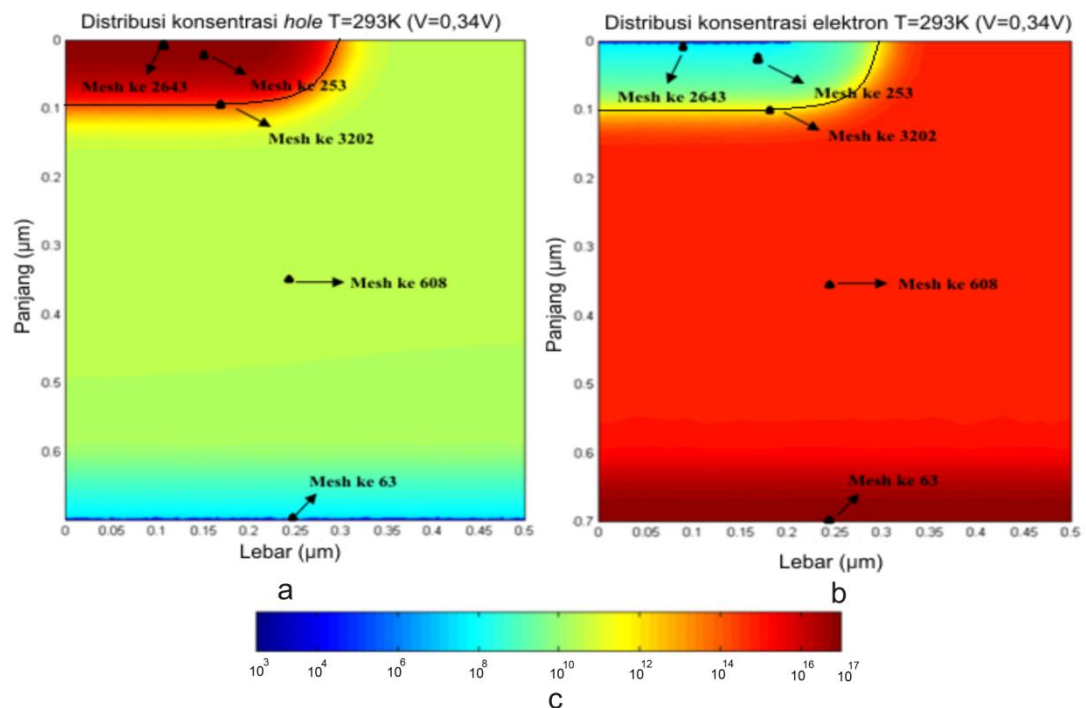
Perhitungan secara numerik terhadap konsentrasi *hole* dan elektron pada beberapa daerah dalam geometri dioda diberikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Konsentrasi *hole* dan elektron pada T=288 K dengan V=0,34 volt

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm^{-2})	Konsentrasi elektron (cm^{-2})
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$1,00243 \times 10^{17}$	$3,19578 \times 10^2$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53881 \times 10^{16}$	$7,10253 \times 10^8$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$1,78077 \times 10^{13}$	$1,61016 \times 10^{12}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$2,34089 \times 10^{10}$	$1,00002 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$3,17184 \times 10^2$	$1,01000 \times 10^{17}$

Berdasarkan Gambar 4.1.a, nampak bahwa konsentrasi *hole* sangat tinggi di daerah dekat anoda dan berkurang pada bagian tengah daerah p. Pada daerah n sampai dengan daerah dekat katoda, konsentrasi *hole* semakin menurun hingga mencapai konsentrasi $3,17184 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}$. Hal ini bertolak belakang dengan distribusi dari konsentrasi elektron, seperti yang tercantum dalam Gambar 4.1.b dimana konsentrasi elektron paling tinggi terletak di daerah dekat katoda sebesar $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Sedangkan konsentrasi elektron menurun dari tengah-tengah daerah n sampai daerah dekat anoda.

Penentuan posisi untuk menunjukkan hasil perhitungan dari konsentrasi *hole* dan elektron ini diambil untuk beberapa bagian yang bisa mewakili tiap daerah dari dioda Si. Posisi lebih detail dari ke lima daerah yang terdapat pada Tabel 4.1 dapat ditunjukkan berdasarkan cacahan elemen dari geometri dioda seperti yang terlampir pada Lampiran A.



Gambar 4.2 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 293 \text{ K}$

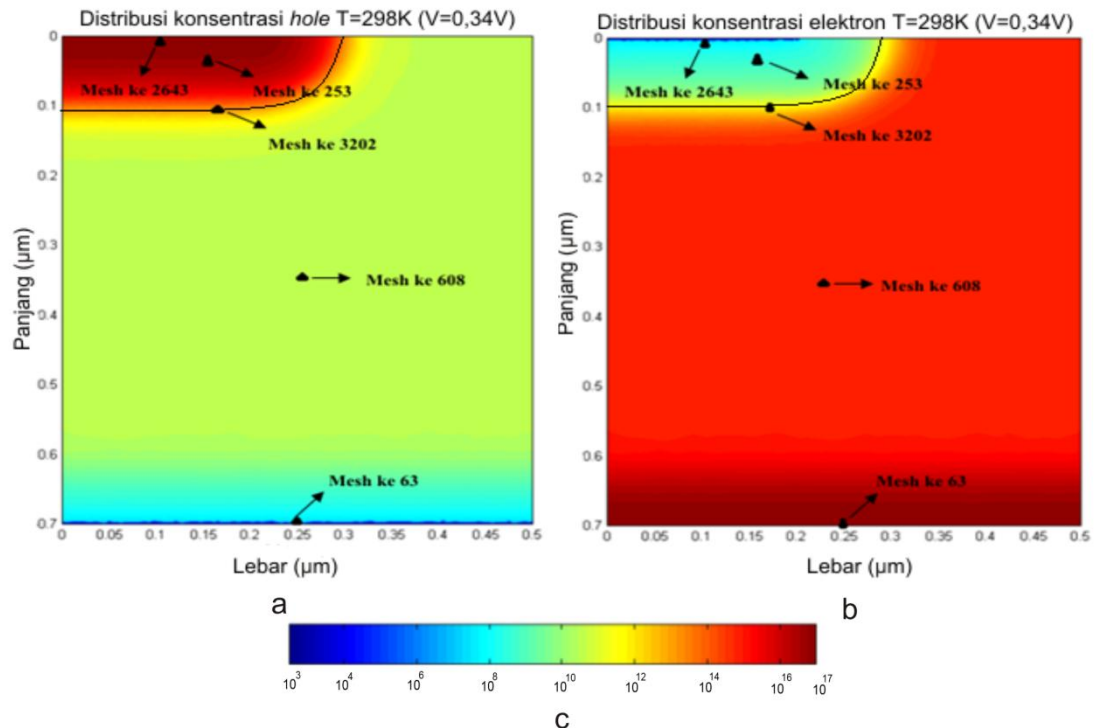
- Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada $T = 293 \text{ K}$
- Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada $T = 293 \text{ K}$
- Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Gambar 4.2 menunjukkan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron dari dioda Si pada temperatur operasional dioda sebesar 293 K dengan tegangan masukan dioda Si sebesar 0,34 volt. Untuk nilai konsentrasi *hole* dan elektron di beberapa sisi dari dioda Si tercantum pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada T=293 K dengan V=0,34 volt

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm ⁻²)	Konsentrasi elektron (cm ⁻²)
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$9,94261 \times 10^{16}$	$7,23254 \times 10^2$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53854 \times 10^{16}$	$1,26149 \times 10^9$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$2,22166 \times 10^{13}$	$2,29290 \times 10^{12}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$4,16379 \times 10^{10}$	$1,00004 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$7,11982 \times 10^2$	$1,01000 \times 10^{17}$

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Tabel 4.2 konsentrasi *hole* tertinggi berada pada daerah dekat anoda. Nilai ini semakin menurun pada bagian pertengahan dari daerah p, hingga melewati persambungan dan terendah pada daerah dekat katoda dengan konsentrasi sebesar $7,11982 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}$. Sebaliknya jika diamati untuk konsentrasi elektron, nilai tertinggi berada di daerah dekat katoda mencapai $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Konsentrasi elektron menurun nilainya dari bagian tengah daerah p sampai daerah dekat anoda dengan konsentrasi sebesar $7,23254 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}$.



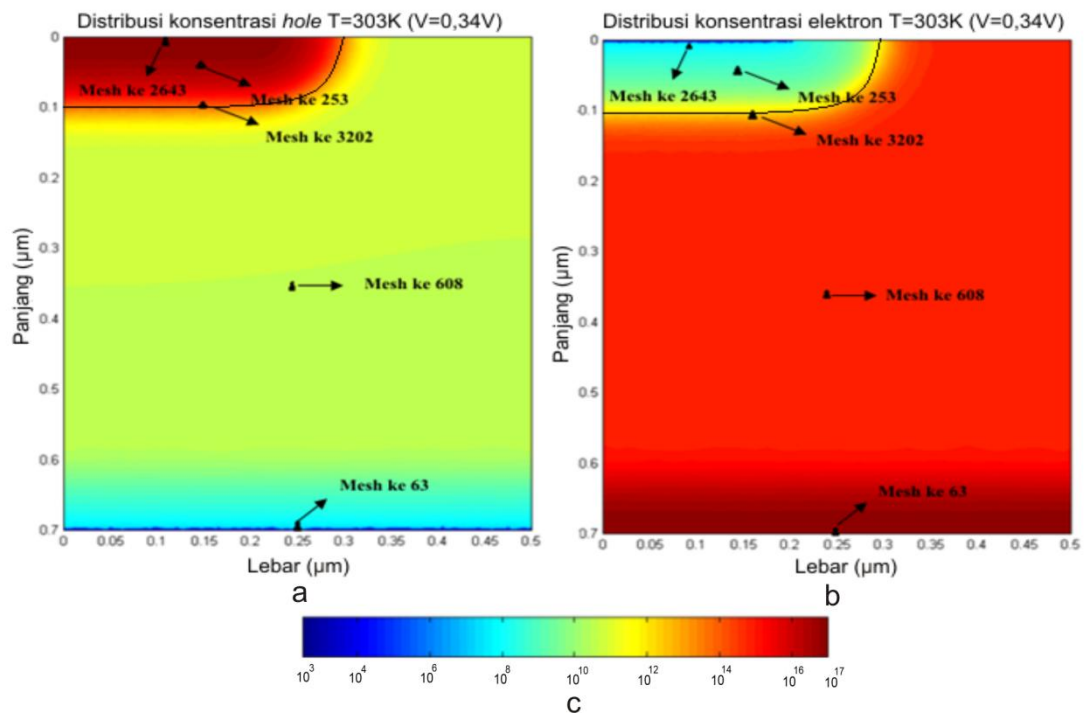
Gambar 4.3 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 298 \text{ K}$
 a. Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada $T = 298 \text{ K}$
 b. Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada $T = 298 \text{ K}$
 c. Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Tabel 4.3 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada $T=298 \text{ K}$ dengan $V=0,34 \text{ volt}$

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm^{-2})	Konsentrasi elektron (cm^{-2})
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$9,91773 \times 10^{16}$	$1,57546 \times 10^3$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53827 \times 10^{16}$	$2,18599 \times 10^9$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$2,74622 \times 10^{13}$	$3,21503 \times 10^{12}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$7,22502 \times 10^{10}$	$1,00007 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$1,54703 \times 10^3$	$1,01000 \times 10^{17}$

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Tabel 4.3, konsentrasi *hole* tertinggi berada pada daerah dekat anoda dan selanjutnya berkurang di bagian tengah dari daerah p dengan

nilai konsentrasi sebesar $3,53827 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Konsentrasi *hole* semakin berkurang pada bagian tengah daerah n sampai dengan daerah disekitar katoda yang memiliki konsentrasi *hole* terendah sebesar $1,54703 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$. Hal sebaliknya menunjukkan kecenderungan naiknya konsentrasi elektron dari nilai terendah pada daerah dekat anoda, kemudian meningkat hingga daerah dekat katoda yang memiliki konsentrasi elektron tertinggi sebesar $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.



Gambar 4.4 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 303 \text{ K}$

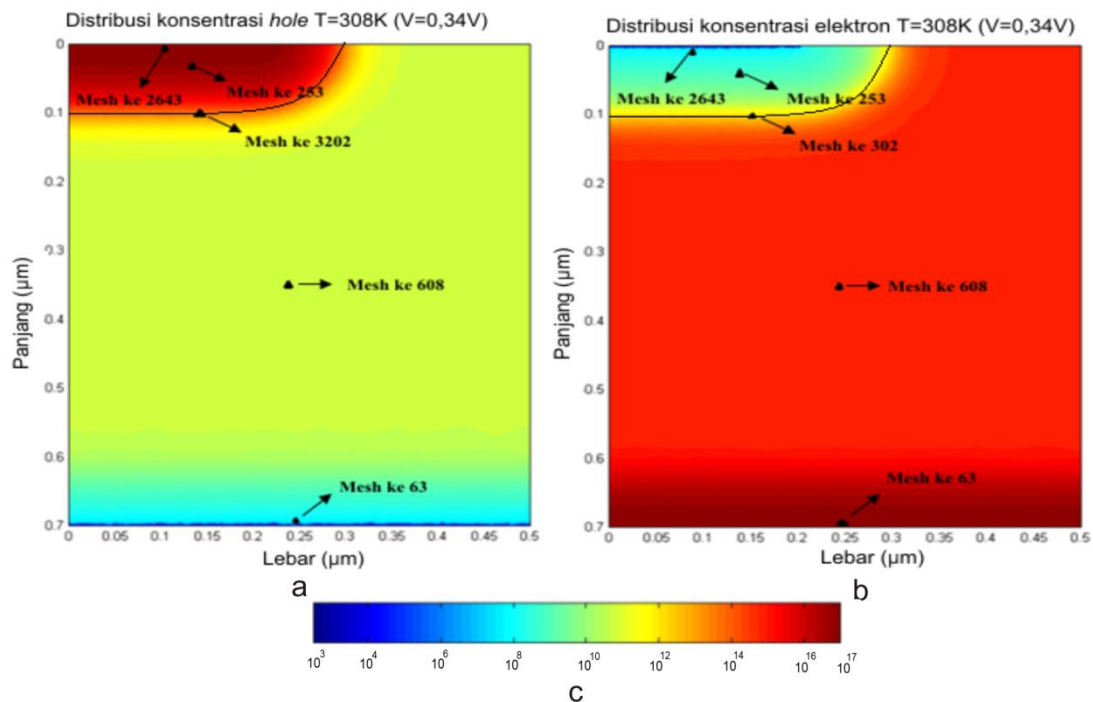
- Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada $T = 303 \text{ K}$
- Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada $T = 303 \text{ K}$
- Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Gambar 4.4 dan Tabel 4.4 menginformasikan bahwa bahwa konsentrasi *hole* yang tinggi terletak di daerah dekat anoda sebesar $9,90565 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ dan cenderung menurun untuk daerah-daerah yang semakin menjauhi bagian anoda. Sedangkan untuk pembawa muatan elektron, konsentrasi tertinggi berada di daerah dekat katoda sebesar $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ dan mengalami penurunan seiring dengan semakin

jauhnya daerah tinjauan terhadap sisi katoda. Konsentrasi elektron yang rendah berada pada daerah dekat anoda dengan nilai sebesar $3,38079 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$.

Tabel 4.4 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada $T=303 \text{ K}$ dengan $V=0,34 \text{ volt}$

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm^{-2})	Konsentrasi elektron (cm^{-2})
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$9,90566 \times 10^{16}$	$3,38079 \times 10^3$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53800 \times 10^{16}$	$3,76445 \times 10^9$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$3,38565 \times 10^{13}$	$4,49184 \times 10^{12}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$1,24572 \times 10^{11}$	$1,00012 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$3,31574 \times 10^3$	$1,01000 \times 10^{17}$



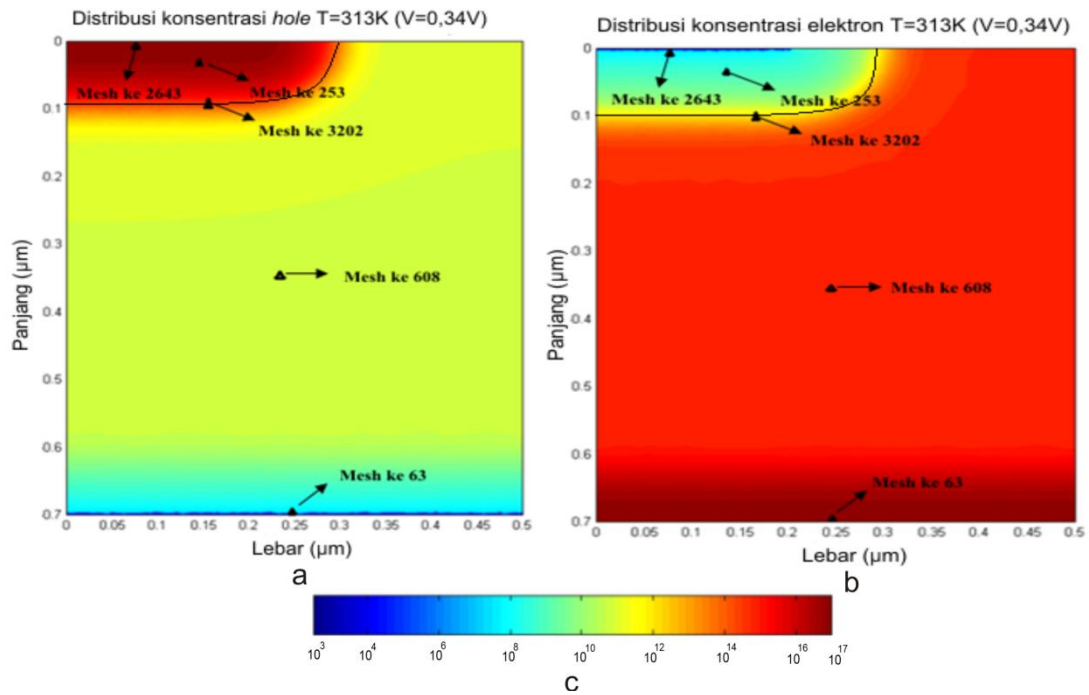
Gambar 4.5 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 308 \text{ K}$

- Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada $T = 308 \text{ K}$
- Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada $T = 308 \text{ K}$
- Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Tabel 4.5 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada T=308 K dengan V=0,34 volt

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm ⁻²)	Konsentrasi elektron (cm ⁻²)
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$9,89729 \times 10^{16}$	$7,04192 \times 10^3$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53773 \times 10^{16}$	$6,33953 \times 10^9$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$4,13915 \times 10^{13}$	$6,18875 \times 10^{12}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$2,10022 \times 10^{11}$	$1,00021 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$6,90059 \times 10^3$	$1,01000 \times 10^{17}$

Mengacu pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.5, didapatkan bahwa konsentrasi *hole* tertinggi terletak di daerah dekat anoda sebesar $9,89729 \times 10^{16}$ cm⁻², kemudian menurun pada bagian tengah daerah p dengan konsentrasi sebesar $3,53773 \times 10^{16}$ cm⁻². Konsentrasi *hole* pada daerah n semakin berkurang sedemikian hingga diperoleh nilai terendah sebesar $6,90059 \times 10^3$ cm⁻² pada daerah dekat katoda. Distribusi konsentrasi elektron, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.5.b menunjukkan konsentrasi tertinggi di daerah dekat katoda, yaitu sebesar $1,01000 \times 10^{17}$ cm⁻² dan semakin menurun sampai pada daerah dekat anoda.



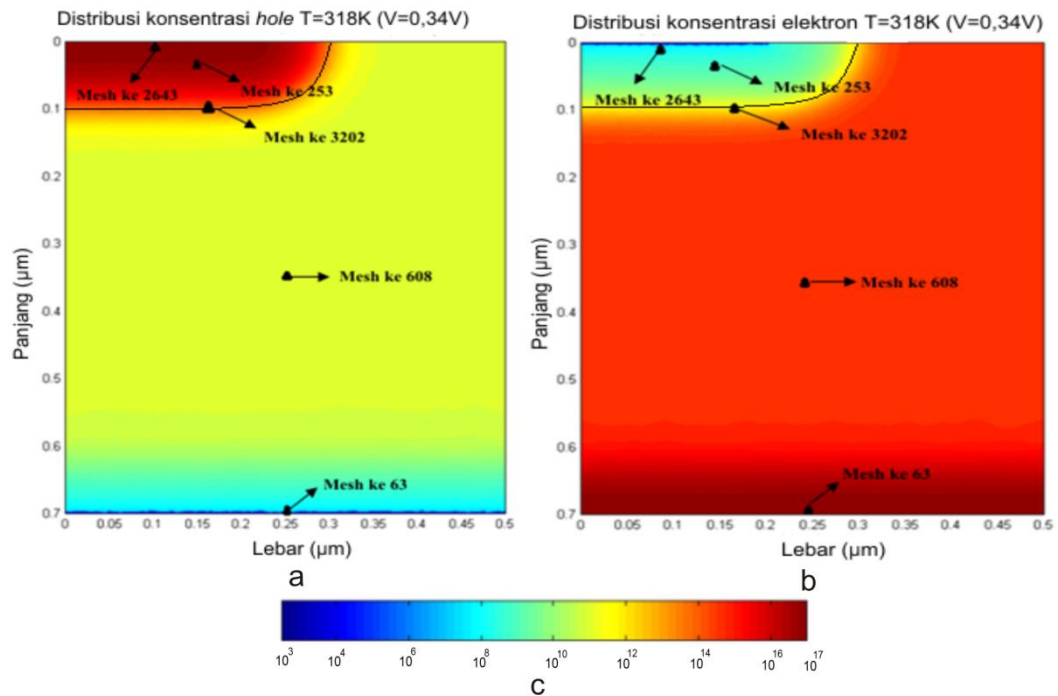
Gambar 4.6 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada T = 313 K
 a. Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada T = 313 K
 b. Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada T = 313 K
 c. Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Tabel 4.6 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada T=313 K dengan V=0,34 volt

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm^{-2})	Konsentrasi elektron (cm^{-2})
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$9,90023 \times 10^{16}$	$1,42861 \times 10^4$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53746 \times 10^{16}$	$1,04762 \times 10^{10}$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$5,02422 \times 10^{13}$	$8,42715 \times 10^{12}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$3,47414 \times 10^{11}$	$1,00034 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$1,39976 \times 10^4$	$1,01000 \times 10^{17}$

Berdasarkan Gambar 4.6 dan Tabel 4.6, konsentrasi *hole* paling tinggi berada di daerah dekat anoda sebesar $9,90022 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ dan di tengah-tengah daerah p dengan nilai konsentrasi sebesar $3,53745 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Tetapi di tengah-tengah daerah n

sampai daerah di sekitar katoda mempunyai konsentrasi *hole* yang menurun hingga $1,39976 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Pada Gambar 4.6.b terlihat jika konsentrasi elektron tertinggi di daerah dekat katoda mencapai $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ serta konsentrasi elektronnya menurun dari tengah-tengah daerah p sampai daerah dekat anoda.



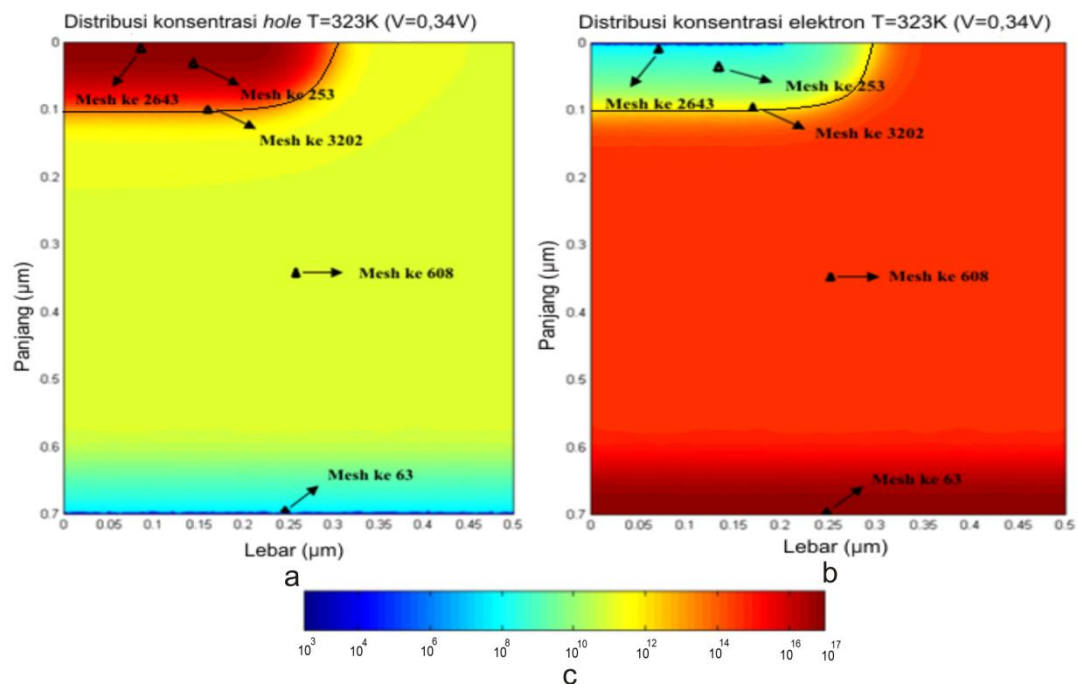
Gambar 4.7 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada T = 318 K

- Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada T = 318 K
- Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada T = 318 K
- Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Tabel 4.7 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada T=318 K dengan V=0,34 volt

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm^{-2})	Konsentrasi elektron (cm^{-2})
Dekat Anoda (Mesh ke 2643)	$9,89974 \times 10^{16}$	$2,84817 \times 10^4$
Tengah daerah p (Mesh ke 253)	$3,53719 \times 10^{16}$	$1,71311 \times 10^{10}$
Tengah persambungan p-n (Mesh ke 3202)	$6,07329 \times 10^{13}$	$1,14022 \times 10^{13}$
Tengah daerah n (Mesh ke 608)	$5,68573 \times 10^{11}$	$1,00067 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (Mesh ke 63)	$2,79169 \times 10^4$	$1,01000 \times 10^{17}$

Pada Gambar 4.7 dan Tabel 4.7 diperoleh nilai konsentrasi *hole* tertinggi di daerah dekat anoda sebesar $9,89974 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ dan di bagian tengah daerah p dengan nilai konsentrasi yaitu $3,53719 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Sedangkan di bagian tengah daerah n sampai daerah disekitar katoda mempunyai konsentrasi *hole* yang menurun hingga $2,79169 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$. Selain itu untuk konsentrasi elektron tertinggi di daerah dekat katoda mencapai $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ serta konsentrasi elektronnya menurun dari tengah-tengah daerah p sampai daerah dekat anoda hingga mencapai $2,84817 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$.



Gambar 4.8 Hasil pemodelan distribusi pembawa muatan pada $T = 323 \text{ K}$

- Hasil pemodelan konsentrasi *hole* pada $T = 323 \text{ K}$
- Hasil pemodelan konsentrasi elektron pada $T = 323 \text{ K}$
- Representasi dari konsentrasi pembawa muatan dalam bentuk distribusi warna

Tabel 4.8 Perhitungan konsentrasi *hole* dan elektron pada T=323 K dengan V=0,34 volt

Posisi	Konsentrasi <i>hole</i> (cm ⁻²)	Konsentrasi elektron (cm ⁻²)
Dekat Anoda (<i>Mesh</i> ke 2643)	$9,90007 \times 10^{16}$	$5,56121 \times 10^4$
Tengah daerah p (<i>Mesh</i> ke 253)	$3,53691 \times 10^{16}$	$2,75945 \times 10^{10}$
Tengah persambungan p-n (<i>Mesh</i> ke 3202)	$7,29911 \times 10^{13}$	$1,52851 \times 10^{13}$
Tengah daerah n (<i>Mesh</i> ke 608)	$9,16428 \times 10^{11}$	$1,00091 \times 10^{15}$
Dekat Katoda (<i>Mesh</i> ke 63)	$5,45113 \times 10^4$	$1,01000 \times 10^{17}$

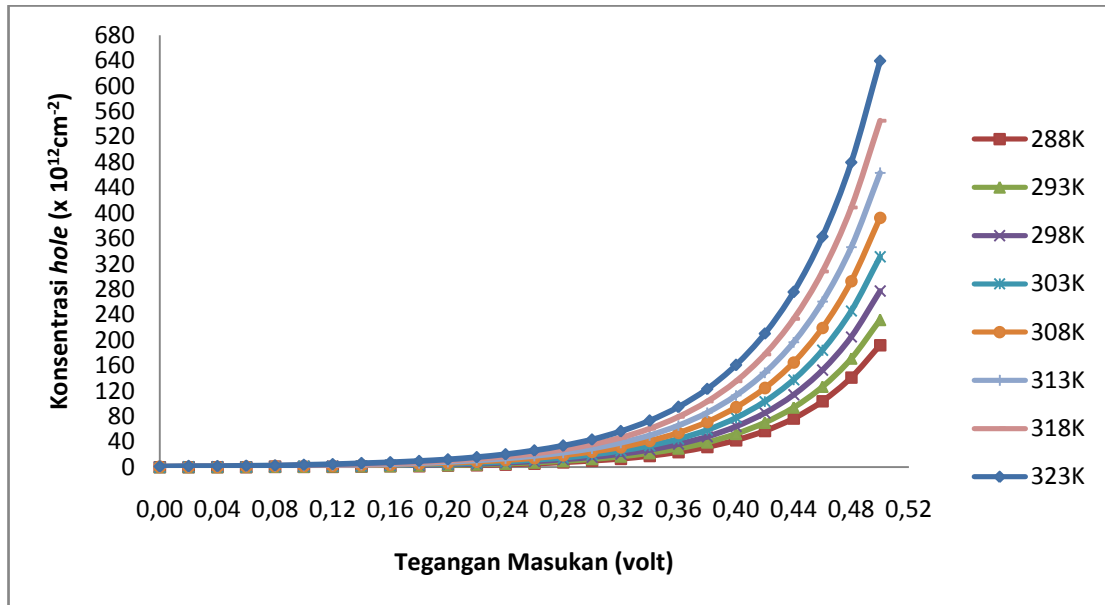
Pada Gambar 4.8 dan Tabel 4.8, nilai konsentrasi *hole* tertinggi berada pada daerah dekat anoda sebesar $9,90007 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, selanjutnya menurun pada bagian tengah daerah p dengan nilai konsentrasi yaitu $3,53691 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Pada bagian pertengahan daerah n, konsentrasi *hole* makin berkurang dan mencapai $5,56121 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ pada daerah dekat anoda. Hal yang berbeda terjadi untuk konsentrasi elektron dimana nilai tertinggi berada pada daerah dekat katoda, yakni sebesar $1,01000 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, selanjutnya makin berkurang pada daerah yang semakin jauh dari katoda. Konsentrasi elektron terendah berada di daerah dekat anoda hingga mencapai $5,56121 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$.

Dari 8 gambar yang dihasilkan pada penelitian ini, didapatkan adanya konsentrasi pembawa muatan *hole* maupun elektron yang berbeda pada saat diberikan variasi terhadap temperatur operasional. Dimulai dari Gambar 4.1 sampai Gambar 4.8, nampak adanya perubahan warna berdasarkan posisi *mesh* yang dijadikan fokus analisa. Perubahan warna menandakan terjadinya perubahan pada distribusi konsentrasi *hole* dan elektron di dalam dioda Si. Dengan memperhatikan sebaran konsentrasi yang ditunjukkan pada data Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.8, nampak bahwa konsentrai *hole* dan elektron ini mengalami perubahan untuk setiap sampel posisi pada pengambilan data tegangan masukan yang sama. Perubahan nilai

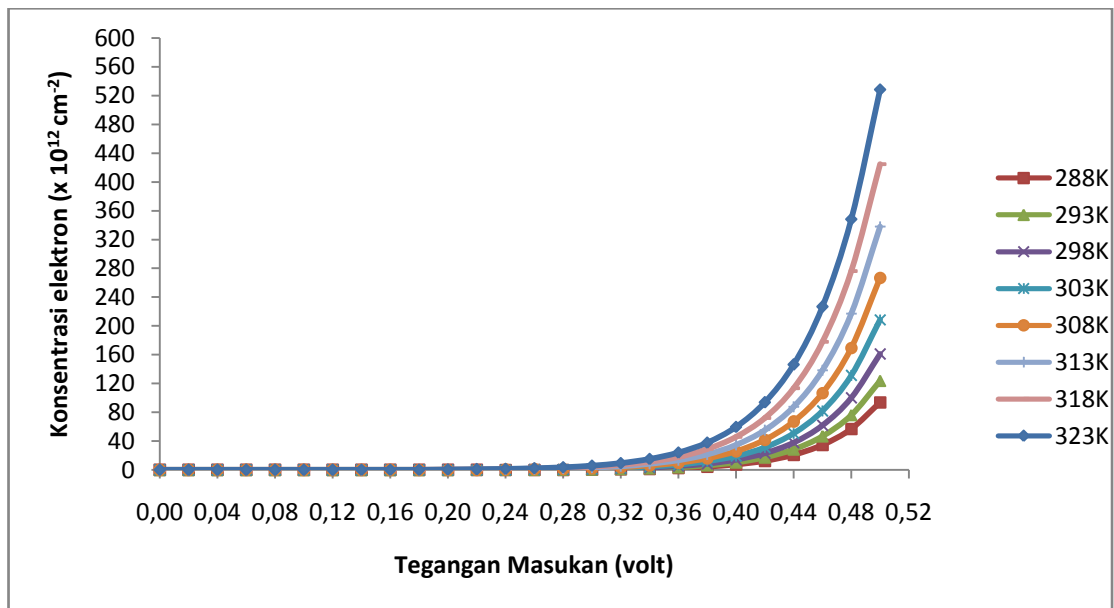
konsentrasi ini menunjukkan adanya kenaikan nilai konsentrasinya seiring dengan pertambahan temperatur operasional dioda yang disimulasikan.

Pada daerah tepat di persambungan tipe-p dan tipe-n (tinjau *mesh* 3202), nampak bahwasanya konsentrasi *hole* dan elektron memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Dalam hal ini, konsentrasi kedua pembawa muatan berada pada kisaran 10^{13} cm^{-2} . Sebagai contoh adalah pada temperatur operasional dioda Si 323K dengan tegangan masukan 0,34 Volt didapatkan nilai konsentrasi *hole* sebesar $7,299112 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ dan konsentrasi elektron sebesar $1,528507 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Hal ini menunjukkan adanya kesesuaian dengan teori bahwasanya daerah dengan jumlah konsentrasi *hole* dan elektron yang hampir sama ini mengindikasikan masih terdapatnya daerah deplesi pada persambungan tersebut. Dalam bentuk satu dimensi, fenomena demikian telah ditunjukkan pada Gambar 2.6.c yang merepresentasikan sebaran daerah deplesi, yang ditunjukkan melalui daerah dengan konsentrasi dari kedua pembawa muatan yang sama (Grob, 1997). Dengan kata lain *Mesh* 3202 atau daerah tepat persambungan tipe-p dan tipe-n berada pada daerah deplesi.

Adanya pertambahan nilai konsentrasi untuk *hole* dan elektron pada penelitian ini menandakan bahwa kedua parameter tersebut berubah seiring dengan kenaikan temperatur operasional dioda. Hasil simulasi telah dapat menggambarkan kebergantungan pembawa muatan mayoritas terhadap faktor temperatur operasional, seperti yang telah disebutkan dalam Sutrisno (1986) pada persamaan (2.26). Karakteristik yang sama juga diperlihatkan pada saat distribusi konsentrasi pembawa muatan dihitung pada variasi tegangan masukan yang lain. Untuk menunjukkan karakteristik tersebut, Gambar 4.9 memberikan hasil simulasi untuk pertambahan konsentrasi *hole* dan Gambar 4.10 untuk konsentrasi elektron, yang dihitung pada variasi tegangan masukan 0 sampai dengan 0,5 V dan variasi temperatur operasional 288 K sampai dengan 323 K. Grafik tersebut diambil untuk bagian diode pada *mesh* 3202, yang berada pada daerah persambungan tipe-p dan tipe-n.



Gambar 4.9 Grafik hubungan konsentrasi *hole* terhadap tegangan masukan pada variasi temperatur operasional yang diambil pada *mesh* 3202



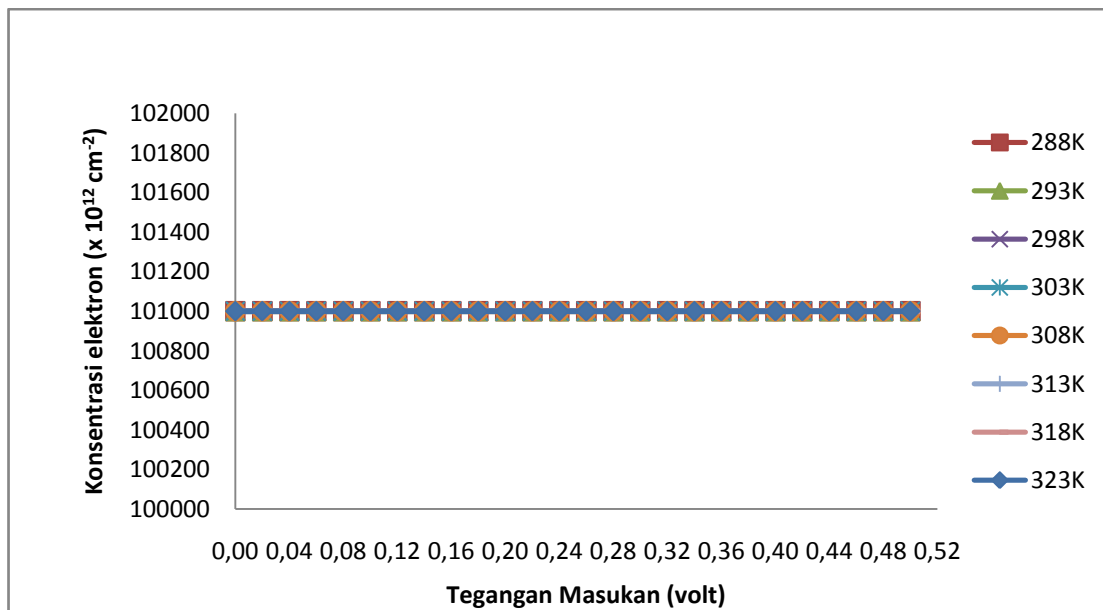
Gambar 4.10 Grafik hubungan konsentrasi elektron terhadap tegangan masukan pada variasi temperatur operasional yang diambil pada *mesh* 3202

Delapan karakteristik konsentrasi *hole* maupun elektron untuk setiap variasi temperatur operasional disajikan dalam bentuk distribusi garis dengan delapan warna yang berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10. Pada setiap data tegangan masukan yang diberikan pada dioda, konsentrasi *hole* maupun elektron bertambah seiring dengan kenaikan temperatur operasional.

Daerah pada *mesh* 3202 merupakan daerah persambungan tipe-p dan tipe-n yang berada pada wilayah deplesi dari diode Si. Adanya kenaikan tegangan masukan menyebabkan konsentrasi *hole* meningkat (Gambar 4.9), baik pada temperatur 288 K maupun pada temperatur lainnya. Hal yang sama juga dijumpai pada karakteristik konsentrasi elektron pada saat tegangan masukan dinaikkan hingga 0,5 V (Gambar 4.10). Adanya peningkatan konsentrasi *hole* dan elektron mengindikasikan bahwa probabilitas pembawa muatan mayoritas mempunyai energi yang cukup untuk melewati daerah persambungan dengan adanya kenaikan tegangan masukan (Boylestad *et al.*, 2009). Dengan demikian, hasil simulasi telah menunjukkan adanya kesesuaian dengan teori berkenaan dengan karakteristik panjar maju. Karakteristik adanya kenaikan distribusi konsentrasi pembawa muatan seiring kenaikan temperatur operasional dioda Si, dihitung pada variasi tegangan masukan untuk daerah/posisi/*mesh* yang lain, diperlihatkan lebih lengkap pada Lampiran B.

Berdasarkan Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.8, konsentrasi elektron pada daerah dekat katoda, yakni *mesh* ke 63, mempunyai nilai konsentrasi yang tetap sebesar $1,010 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Adanya kenaikan temperatur operasional tidak menyebabkan adanya penambahan konsentrasi elektron pada daerah tersebut. Hal ini dapat dijelaskan bahwasanya konsentrasi elektron pada daerah dekat katoda telah mencapai konsentrasi maksimum dari atom donor (N_{Dmax}). Konsentrasi elektron yang dicapai pada daerah tersebut mengindikasikan adanya daerah kuasi netral dengan keadaan atom donor yang sudah terionisasi semua (Schumacher dan Wettling, 2000). Keadaan serupa juga diperoleh pada saat analisis konsentrasi elektron dihitung pada tegangan masukan yang lain. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 4.11, yang

merepresentasikan konsentrasi elektron pada salah satu daerah kuasi netral dekat katoda (*mesh 63*).



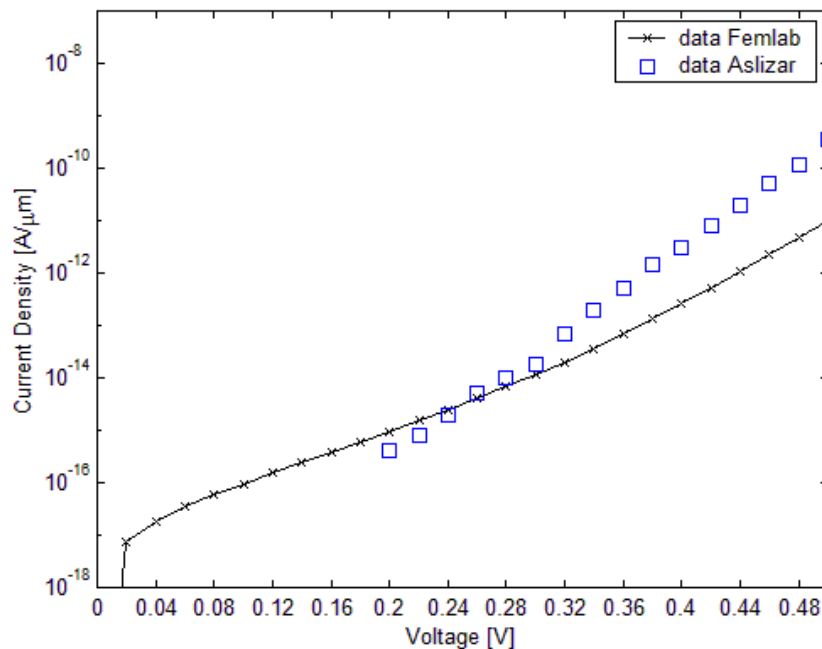
Gambar 4.11 Grafik hubungan konsentrasi elektron terhadap tegangan masukan variasi temperatur operasional pada *mesh 63*

Hasil simulasi, yang dipaparkan dalam grafik hubungan konsentrasi elektron dengan tegangan masukan pada Gambar 4.11, menunjukkan bahwasanya variasi terhadap temperatur operasional tidak menyebabkan adanya perubahan konsentrasi elektron pada daerah dekat katoda (*mesh 63*). Dengan demikian, dapat dikatakan bahwasanya temperatur operasional tidak berpengaruh terhadap daerah kuasi netral bagian n.

4.2 Kurva Karakteristik Arus-Tegangan Dioda Si Terhadap Variasi Temperatur Operasional

Mengacu pada tujuan penelitian yang kedua, maka berdasarkan distribusi konsentrasi pembawa muatan yang telah disimulasikan, didapatkan kurva karakteristik arus-tegangan dari dioda Si untuk setiap variasi dari temperatur

operasional dioda Si. Dari penelitian yang telah dilaksanakan didapatkan nilai perhitungan arus listrik total yang bekerja pada dioda Si dengan memasukkan nilai tegangan masukan dioda sebesar 0 sampai 0,5 volt. Berikut ini hasil kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si dari penelitian ini dibandingkan dengan penelitian Aslizar (1996).



Gambar 4.12 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 288$ K

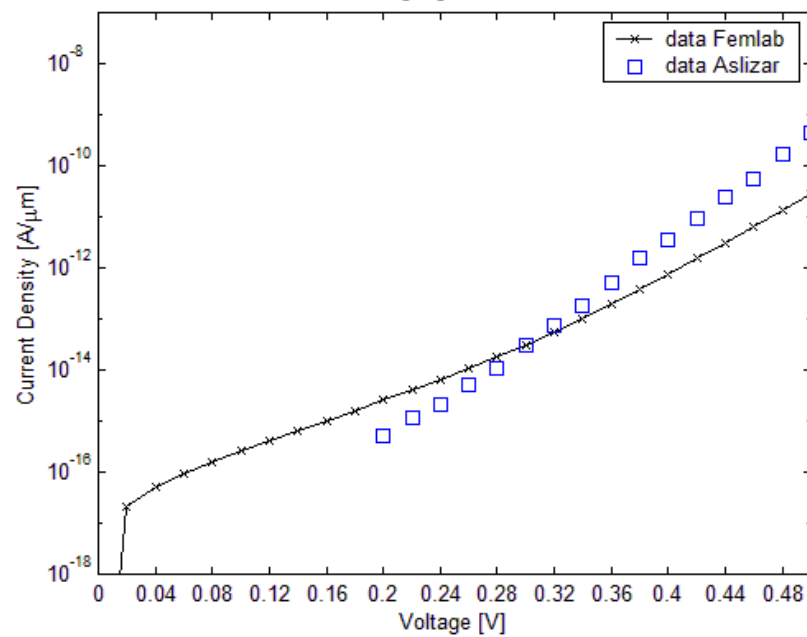
Gambar 4.12 memberikan informasi tentang profil rapat arus pada dioda Si pada saat diberi panjar maju di bawah temperatur operasional dioda Si sebesar 288 K. Karakteristik rapat arus dioda hasil simulasi ditampilkan sebagai titik-titik data yang terhubung oleh garis, sedangkan data pembanding (Aslizar, 1996) disimbolkan oleh profil kotak. Adapun perhitungan deskripsi dari kedua data tersebut disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada T = 288 K

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar (A/ μm)	Nilai Rapat Arus Simulasi (A/ μm)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$4,000 \times 10^{-16}$	$9,604 \times 10^{-16}$	140,100
0,22	$8,000 \times 10^{-16}$	$1,534 \times 10^{-15}$	91,625
0,24	$2,000 \times 10^{-15}$	$2,476 \times 10^{-15}$	23,700
0,26	$5,000 \times 10^{-15}$	$4,055 \times 10^{-15}$	18,980
0,28	$1,000 \times 10^{-14}$	$6,768 \times 10^{-15}$	32,430
0,3	$1,700 \times 10^{-14}$	$1,158 \times 10^{-14}$	32,176
0,32	$7,000 \times 10^{-14}$	$2,023 \times 10^{-14}$	71,143
0,34	$2,000 \times 10^{-13}$	$3,657 \times 10^{-14}$	81,770
0,36	$5,000 \times 10^{-13}$	$6,791 \times 10^{-14}$	86,428
0,38	$1,500 \times 10^{-12}$	$1,309 \times 10^{-13}$	91,320
0,4	$3,000 \times 10^{-12}$	$2,577 \times 10^{-13}$	91,423
0,42	$8,000 \times 10^{-12}$	$5,210 \times 10^{-13}$	93,484
0,44	$2,000 \times 10^{-11}$	$1,082 \times 10^{-12}$	94,610
0,46	$5,000 \times 10^{-11}$	$2,275 \times 10^{-12}$	95,464
0,48	$1,200 \times 10^{-10}$	$4,836 \times 10^{-12}$	95,978
0,5	$3,500 \times 10^{-10}$	$1,031 \times 10^{-11}$	97,051

Berdasarkan Tabel 4.9, nilai deskripsi di bawah 20% terletak pada tegangan masukan antara 0,26 volt. Akan tetapi untuk tegangan masukan lain nilai deskripsinya menjadi sangat besar hingga mencapai 140,1%. Dari Tabel 4.9 ini nilai deskripsi terkecil terdapat pada tegangan masukan 0,26 volt Sebesar 18,980%. Hal ini mengindikasikan bahwa jarak terdekat antar kedua kurva berada pada tegangan masukan 0,26 V.

Karakteristik arus-tegangan dari dioda Si berikutnya diperoleh berdasarkan hasil penjumlahan arus *hole* dan elektron pada temperatur yang lebih tinggi. Profil grafik dan tabel deskripsi dari data hasil simulasi dan data pembanding disampaikan sebagai berikut.



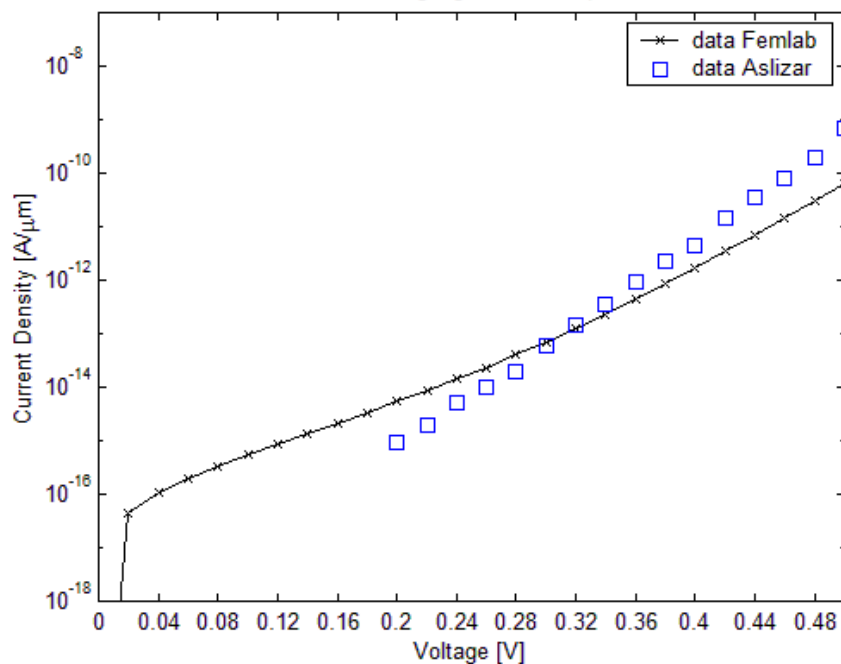
Gambar 4.13 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 293$ K

Tabel 4.10 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 293$ K

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar ($A/\mu m$)	Nilai Rapat Arus Femlab ($A/\mu m$)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$5,000 \times 10^{-16}$	$2,549 \times 10^{-15}$	409,800
0,22	$1,200 \times 10^{-15}$	$4,078 \times 10^{-15}$	239,833
0,24	$2,100 \times 10^{-15}$	$6,067 \times 10^{-15}$	188,905
0,26	$5,000 \times 10^{-15}$	$1,089 \times 10^{-14}$	117,800
0,28	$1,100 \times 10^{-14}$	$1,832 \times 10^{-14}$	66,545
0,3	$3,000 \times 10^{-14}$	$3,160 \times 10^{-14}$	5,333
0,32	$7,500 \times 10^{-14}$	$5,604 \times 10^{-14}$	25,280
0,34	$1,800 \times 10^{-13}$	$1,024 \times 10^{-13}$	43,111
0,36	$5,000 \times 10^{-13}$	$1,927 \times 10^{-13}$	61,460
0,38	$1,600 \times 10^{-12}$	$3,733 \times 10^{-13}$	76,669
0,4	$3,500 \times 10^{-12}$	$7,417 \times 10^{-13}$	78,809
0,42	$9,000 \times 10^{-12}$	$1,506 \times 10^{-12}$	83,267
0,44	$2,500 \times 10^{-11}$	$3,112 \times 10^{-12}$	87,552
0,46	$5,500 \times 10^{-11}$	$6,513 \times 10^{-12}$	88,158
0,48	$1,700 \times 10^{-10}$	$1,374 \times 10^{-11}$	91,918
0,5	$4,500 \times 10^{-10}$	$2,900 \times 10^{-11}$	93,556

Gambar 4.13 merupakan kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si untuk temperatur operasional 293 K. Apabila kedua kurva karakteristik arus tegangan dioda Si diperhatikan lebih teliti keduanya memiliki nilai rapat arus yang cukup berdekatan pada tegangan masukan 0,3 volt. Dimana dari Tabel 4.10 terlihat jika nilai deskripsi sebesar 5,333%. Jadi Jarak terdekat dari dua kurva tersebut terletak pada tegangan masukan sebesar 0,3 volt. Hal ini dilihat dari nilai deskripsi yang sangat kecil dari 15 data nilai rapat arus.

Hasil simulasi berikutnya adalah karakteristik arus-tegangan pada temperatur 298 K yang ditunjukkan pada Gambar 4.14. Diskrepansi dari data simulasi terhadap data pembandingan ditampilkan pada Tabel 4.11.

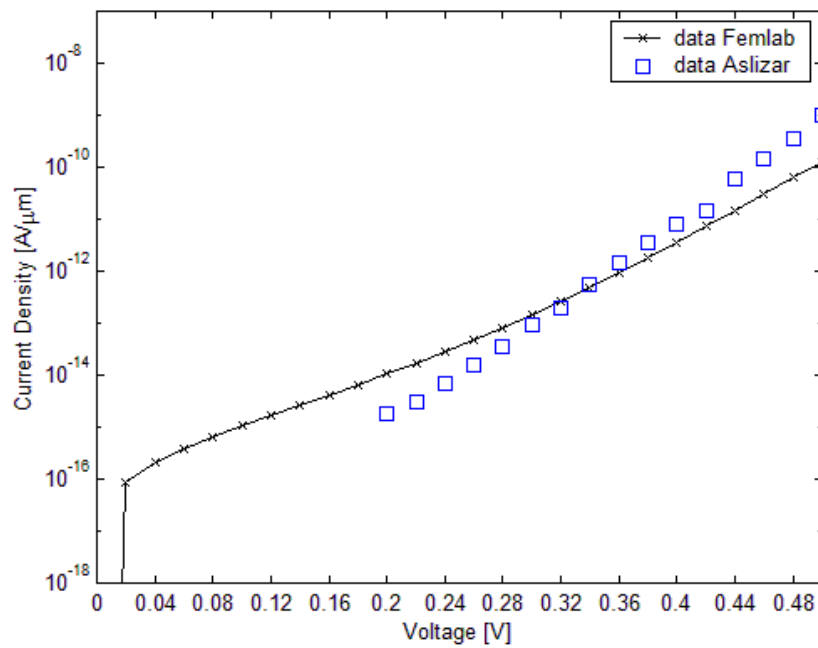


Gambar 4.14 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 298$ K

Tabel 4.11 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 298 \text{ K}$

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar ($\text{A}/\mu\text{m}$)	Nilai Rapat Arus <i>Femlab</i> ($\text{A}/\mu\text{m}$)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$9,000 \times 10^{-16}$	$5,398 \times 10^{-15}$	499,778
0,22	$2,000 \times 10^{-15}$	$8,665 \times 10^{-15}$	333,250
0,24	$5,000 \times 10^{-15}$	$1,412 \times 10^{-14}$	182,400
0,26	$1,000 \times 10^{-14}$	$2,345 \times 10^{-14}$	134,500
0,28	$2,000 \times 10^{-14}$	$3,984 \times 10^{-14}$	99,200
0,3	$6,000 \times 10^{-14}$	$6,949 \times 10^{-14}$	15,817
0,32	$1,500 \times 10^{-13}$	$1,247 \times 10^{-13}$	16,867
0,34	$3,500 \times 10^{-13}$	$2,303 \times 10^{-13}$	34,200
0,36	$9,000 \times 10^{-13}$	$4,375 \times 10^{-13}$	51,389
0,38	$2,200 \times 10^{-12}$	$8,528 \times 10^{-13}$	61,236
0,4	$4,500 \times 10^{-12}$	$1,700 \times 10^{-12}$	62,222
0,42	$1,500 \times 10^{-11}$	$3,450 \times 10^{-12}$	77,000
0,44	$3,500 \times 10^{-11}$	$7,103 \times 10^{-12}$	79,706
0,46	$8,000 \times 10^{-11}$	$1,476 \times 10^{-11}$	81,550
0,48	$2,000 \times 10^{-10}$	$3,080 \times 10^{-11}$	84,600
0,5	$7,000 \times 10^{-10}$	$6,405 \times 10^{-11}$	90,850

Berdasarkan Gambar 4.14, data yang cukup berdekatan terletak pada tegangan masukan 0,3 volt dan 0,32 volt. Berdasarkan perolehan deskripsi nilai rapat arus dioda pada Tabel 4.11, pada keduanya bernilai 15,817% dan 16,867%. Untuk nilai deskripsi terkecil berada pada tegangan masukan dioda 0,3 volt yaitu sebesar 15,817%.

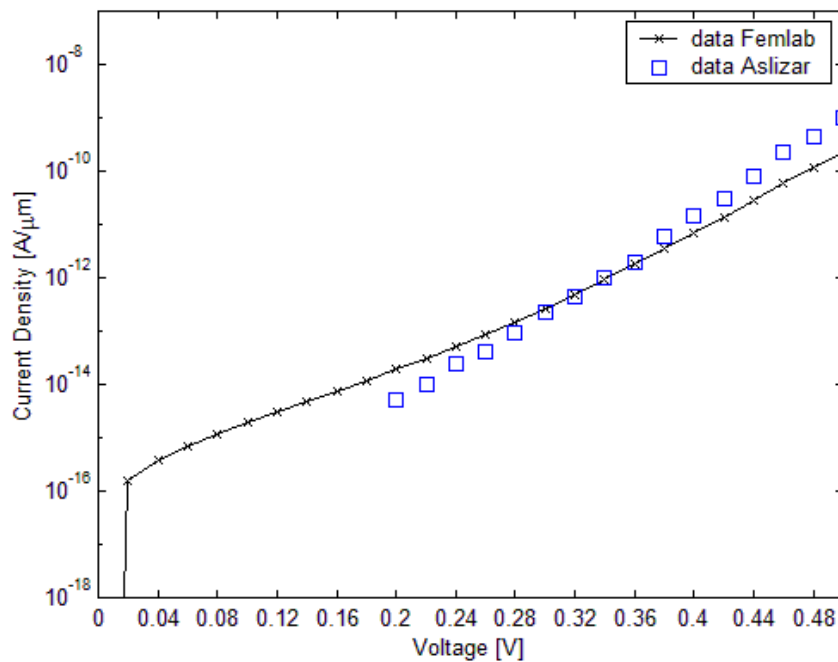


Gambar 4.15 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 303 \text{ K}$

Tabel 4.12 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 303 \text{ K}$

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar ($\text{A}/\mu\text{m}$)	Nilai Rapat Arus Simulasi ($\text{A}/\mu\text{m}$)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$1,800 \times 10^{-15}$	$1,039 \times 10^{-14}$	477,222
0,22	$3,000 \times 10^{-15}$	$1,677 \times 10^{-14}$	459,000
0,24	$7,000 \times 10^{-15}$	$2,752 \times 10^{-14}$	293,143
0,26	$1,600 \times 10^{-14}$	$4,614 \times 10^{-14}$	188,375
0,28	$3,500 \times 10^{-14}$	$7,928 \times 10^{-14}$	126,514
0,3	$9,000 \times 10^{-14}$	$1,399 \times 10^{-13}$	55,444
0,32	$2,000 \times 10^{-13}$	$2,539 \times 10^{-13}$	26,950
0,34	$5,500 \times 10^{-13}$	$4,736 \times 10^{-13}$	13,891
0,36	$1,500 \times 10^{-12}$	$9,602 \times 10^{-13}$	35,987
0,38	$3,500 \times 10^{-12}$	$1,774 \times 10^{-12}$	49,314
0,4	$8,000 \times 10^{-12}$	$3,540 \times 10^{-12}$	55,750
0,42	$1,400 \times 10^{-11}$	$7,170 \times 10^{-12}$	48,786
0,44	$6,000 \times 10^{-11}$	$1,468 \times 10^{-11}$	75,533
0,46	$1,700 \times 10^{-10}$	$3,024 \times 10^{-11}$	82,212
0,48	$3,500 \times 10^{-10}$	$6,023 \times 10^{-11}$	82,791
0,5	$1,000 \times 10^{-09}$	$1,272 \times 10^{-10}$	87,280

Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si untuk temperatur operasional 303 K ditunjukkan pada Gambar 4.15. Berdasarkan kedua kurva karakteristik diperoleh nilai rapat arus dioda yang cukup berdekatan pada tegangan masukan 0,34 volt. Dengan nilai deskripsinya pada tegangan masukan tersebut sebesar 13,891%. Artinya pada kedua kurva tersebut nilai rapat arus dioda yang paling berdekatan yaitu pada tegangan masukan 0,34 volt dilihat dari nilai deskripsi yang terkecil .

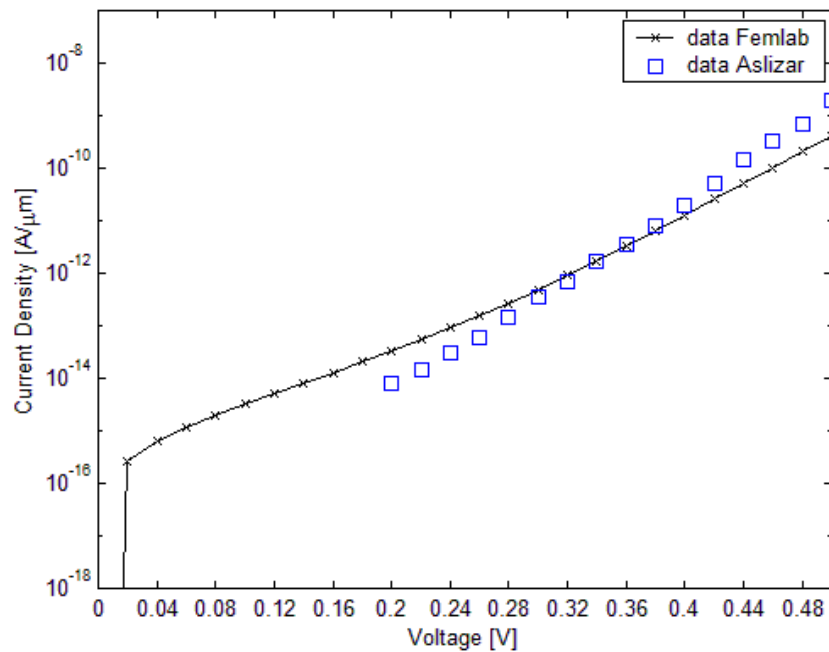


Gambar 4.16 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 308$ K

Gambar 4.16 dan Tabel 4.13 menjelaskan kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada temperatur operasional 308 K. Kedua kurva karakteristik arus-tegangan ini nilai yang cukup berdekatan pada tegangan masukan 0,32 volt sampai dengan 0,36 volt. Berdasarkan nilai deskripsi terlihat apabila pada rentang tegangan tersebut nilai deskripsinya $\leq 12,050\%$. Nilai deskripsi terkecil sebesar 8,111% yakni terletak pada tegangan masukan 0,32 volt.

Tabel 4.13 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada T = 308 K

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar (A/ μm)	Nilai Rapat Arus Simulasi (A/ μm)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$5,000 \times 10^{-15}$	$1,880 \times 10^{-14}$	276,000
0,22	$1,000 \times 10^{-14}$	$3,054 \times 10^{-14}$	205,400
0,24	$2,500 \times 10^{-14}$	$5,057 \times 10^{-14}$	102,280
0,26	$4,000 \times 10^{-14}$	$8,565 \times 10^{-14}$	114,125
0,28	$9,000 \times 10^{-14}$	$1,488 \times 10^{-13}$	65,333
0,3	$2,200 \times 10^{-13}$	$2,654 \times 10^{-13}$	20,636
0,32	$4,500 \times 10^{-13}$	$4,865 \times 10^{-13}$	8,111
0,34	$1,000 \times 10^{-12}$	$9,144 \times 10^{-13}$	8,560
0,36	$2,000 \times 10^{-12}$	$1,759 \times 10^{-12}$	12,050
0,38	$6,000 \times 10^{-12}$	$3,450 \times 10^{-12}$	42,500
0,4	$1,400 \times 10^{-11}$	$6,876 \times 10^{-12}$	50,886
0,42	$3,000 \times 10^{-11}$	$1,387 \times 10^{-11}$	53,767
0,44	$8,000 \times 10^{-11}$	$2,819 \times 10^{-11}$	64,763
0,46	$2,200 \times 10^{-10}$	$5,745 \times 10^{-11}$	73,886
0,48	$4,500 \times 10^{-10}$	$1,166 \times 10^{-10}$	74,089
0,5	$1,000 \times 10^{-09}$	$2,333 \times 10^{-10}$	76,660

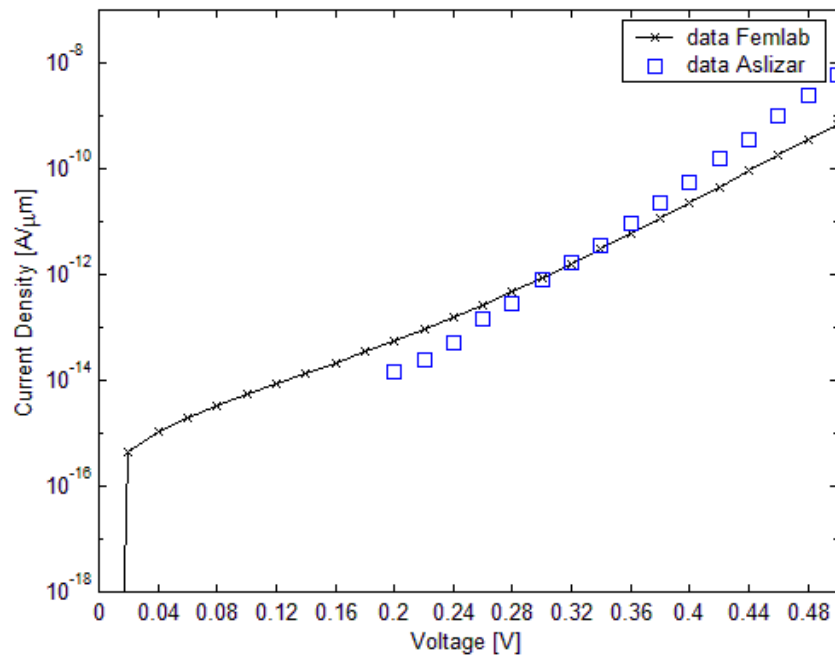


Gambar 4.17 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada T = 313 K

Tabel 4.14 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada T = 313 K

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar (A/ μm)	Nilai Rapat Arus <i>Simulasi</i> (A/ μm)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$8,000 \times 10^{-15}$	$3,272 \times 10^{-14}$	309,000
0,22	$1,400 \times 10^{-14}$	$5,357 \times 10^{-14}$	282,643
0,24	$3,000 \times 10^{-14}$	$8,954 \times 10^{-14}$	198,467
0,26	$6,000 \times 10^{-14}$	$1,532 \times 10^{-13}$	155,333
0,28	$1,400 \times 10^{-13}$	$2,691 \times 10^{-13}$	92,214
0,3	$3,500 \times 10^{-13}$	$4,848 \times 10^{-13}$	38,514
0,32	$7,000 \times 10^{-13}$	$8,954 \times 10^{-13}$	27,914
0,34	$1,700 \times 10^{-12}$	$1,693 \times 10^{-12}$	0,412
0,36	$3,600 \times 10^{-12}$	$3,266 \times 10^{-12}$	9,278
0,38	$8,000 \times 10^{-12}$	$6,405 \times 10^{-12}$	19,938
0,4	$2,000 \times 10^{-11}$	$1,273 \times 10^{-11}$	36,350
0,42	$5,000 \times 10^{-11}$	$2,552 \times 10^{-11}$	48,960
0,44	$1,400 \times 10^{-10}$	$5,141 \times 10^{-11}$	63,279
0,46	$3,400 \times 10^{-10}$	$1,034 \times 10^{-10}$	69,588
0,48	$7,000 \times 10^{-10}$	$2,063 \times 10^{-10}$	70,529
0,5	$2,000 \times 10^{-09}$	$4,410 \times 10^{-10}$	77,950

Gambar 4.17 merupakan kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada temperatur operasional 313 K. Diperoleh dari kedua kurva karakteristik arus-tegangan dan nilai deskripsinya, nilai rapat arus pada tegangan masukan antara 0,34 sampai 0,38 volt mempunyai nilai yang cukup berdekatan. Hal ini terlihat dari nilai deskripsi yang bernilai $\leq 19,938\%$. Nilai deskripsi terkecil sebesar 0,412%. Artinya dari kedua kurva karakteristik arus tegangan dioda berdekatan pada tegangan masukan 0,34 volt terlihat dari nilai deskripsi terkecil pada tegangan tersebut.

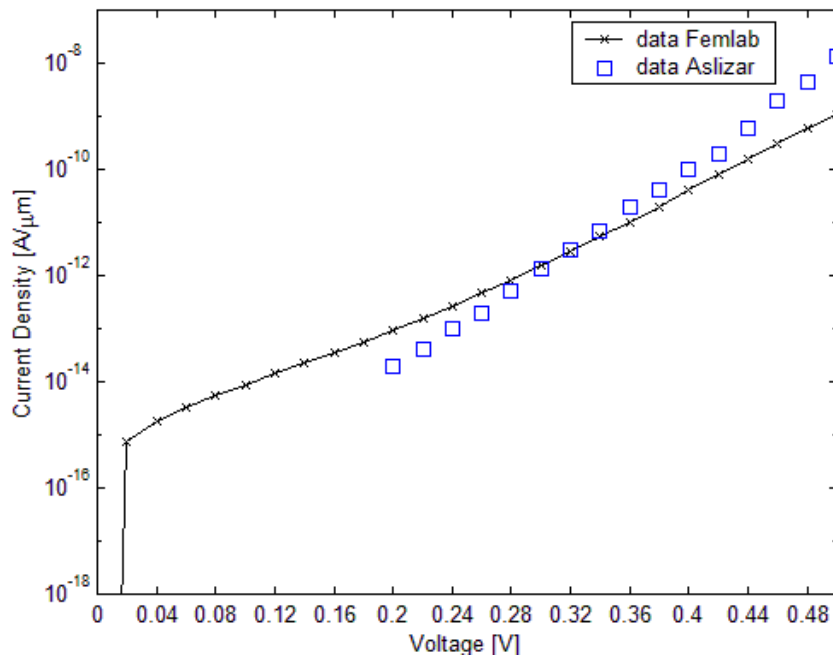


Gambar 4.18 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 318$ K

Tabel 4.15 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 318$ K

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar ($A/\mu m$)	Nilai Rapat Arus Simulasi ($A/\mu m$)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$1,500 \times 10^{-14}$	$5,566 \times 10^{-14}$	271,067
0,22	$2,500 \times 10^{-14}$	$9,197 \times 10^{-14}$	267,880
0,24	$5,000 \times 10^{-14}$	$1,553 \times 10^{-13}$	210,600
0,26	$1,400 \times 10^{-13}$	$2,686 \times 10^{-13}$	91,857
0,28	$2,800 \times 10^{-13}$	$4,763 \times 10^{-13}$	70,107
0,3	$8,000 \times 10^{-13}$	$8,656 \times 10^{-13}$	8,200
0,32	$1,700 \times 10^{-12}$	$1,610 \times 10^{-12}$	5,294
0,34	$3,500 \times 10^{-12}$	$3,054 \times 10^{-12}$	12,743
0,36	$9,000 \times 10^{-12}$	$5,897 \times 10^{-12}$	34,478
0,38	$2,300 \times 10^{-11}$	$1,154 \times 10^{-11}$	49,826
0,4	$5,500 \times 10^{-11}$	$2,283 \times 10^{-11}$	58,491
0,42	$1,600 \times 10^{-10}$	$4,545 \times 10^{-11}$	71,594
0,44	$3,500 \times 10^{-10}$	$9,057 \times 10^{-11}$	74,123
0,46	$1,000 \times 10^{-09}$	$1,795 \times 10^{-10}$	82,050
0,48	$2,500 \times 10^{-09}$	$3,512 \times 10^{-10}$	85,952
0,5	$6,000 \times 10^{-09}$	$6,725 \times 10^{-10}$	88,792

Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada temperatur operasional 318 K ditunjukkan Gambar 4.18. Berdasarkan kurva karakteristik arus-tegangan ini nilai yang cukup berdekatan pada tegangan masukan 0,3 volt sampai dengan 0,34 volt. Nilai deskripsi pada tegangan masukan tersebut menunjukkan nilai $\leq 12,743\%$. Nilai deskripsi terkecil terletak pada tegangan masukan 0,32 volt sebesar 5,294%.



Gambar 4.19 Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada $T = 323$ K

Dari Gambar 4.19 diketahui kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada temperatur operasional 323 K. Dari kedua kurva karakteristik arus tegangan untuk tegangan masukan 0,3 volt dan 0,32 volt memiliki nilai deskripsi 16,462% dan 5,767%. Nilai deskripsi rapat arus dioda terkecil terletak pada tegangan masukan 0,32 Volt yaitu sebesar 5,767%. Pada tegangan 0,32 volt inilah titik terdekat antara kedua kurva. Sedangkan untuk tegangan masukan lainnya nilai deskripsinya sudah sangat besar.

Tabel 4.16 Perhitungan deskripsi nilai rapat arus pada $T = 323 \text{ K}$

Tegangan masukan (V)	Nilai Rapat Arus Aslizar ($\text{A}/\mu\text{m}$)	Nilai Rapat Arus Simulasi ($\text{A}/\mu\text{m}$)	Nilai Deskripsi (%)
0,2	$1,900 \times 10^{-14}$	$9,300 \times 10^{-14}$	389,474
0,22	$4,000 \times 10^{-14}$	$1,551 \times 10^{-13}$	287,750
0,24	$1,000 \times 10^{-13}$	$2,647 \times 10^{-13}$	164,700
0,26	$2,000 \times 10^{-13}$	$4,623 \times 10^{-13}$	131,150
0,28	$5,000 \times 10^{-13}$	$8,271 \times 10^{-13}$	65,420
0,3	$1,300 \times 10^{-12}$	$1,514 \times 10^{-12}$	16,462
0,32	$3,000 \times 10^{-12}$	$2,827 \times 10^{-12}$	5,767
0,34	$7,000 \times 10^{-12}$	$5,375 \times 10^{-12}$	23,214
0,36	$2,000 \times 10^{-11}$	$1,037 \times 10^{-11}$	48,150
0,38	$4,000 \times 10^{-11}$	$2,023 \times 10^{-11}$	49,425
0,4	$1,000 \times 10^{-10}$	$3,976 \times 10^{-11}$	60,240
0,42	$2,000 \times 10^{-10}$	$7,842 \times 10^{-11}$	60,790
0,44	$6,000 \times 10^{-10}$	$1,543 \times 10^{-10}$	74,283
0,46	$2,000 \times 10^{-09}$	$3,008 \times 10^{-10}$	84,960
0,48	$4,500 \times 10^{-09}$	$5,763 \times 10^{-10}$	87,193
0,5	$1,300 \times 10^{-08}$	$1,078 \times 10^{-09}$	91,708

Kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si pada hakikatnya menunjukkan hubungan antara arus listrik yang mengalir melalui divais dioda Si dan beda potensial yang diberlakukan di dalam kedua kutub dioda (anoda dan katoda). Pemberian beda potensial ini mengakibatkan adanya pergerakan pembawa muatan (*hole* dan elektron). Elektron bebas pada daerah n akan bergerak menyeberangi persambungan menuju ke daerah p di dalam dioda Si. Hal yang sama terjadi untuk *hole* dimana akan menyeberangi persambungan menuju ke daerah n. Profil pergerakan pembawa muatan ini dapat diwakili oleh distribusi konsentrasi pembawa muatan yang merupakan fungsi dari tegangan masukan pada dioda, seperti yang telah dipaparkan dalam analisis dari Gambar 4.9 dan Gambar 4.10. Tegangan masukan ini sekaligus mendefinisikan adanya beda potensial pada kedua elektroda.

Di bawah kondisi panjar maju, rapat arus dioda Si semakin meningkat dalam interval 0 sampai dengan 0,5 volt, bersesuaian dengan teori yang disampaikan dalam Boylested *et al.*, (2009). Hal ini dapat dijelaskan bahwasanya kenaikan konsentrasi pembawa muatan di bawah kondisi panjar maju, memberikan kontribusi utama terhadap total arus yang mengalir dalam dioda Si (Sconza *et. al* ,1994).

Delapan kurva karakteristik arus-tegangan yang dihasilkan merupakan gambaran adanya pengaruh variasi temperatur operasional pada dioda Si. Terdapat pula delapan kurva karakteristik arus-tegangan dari penelitian Aslizar (1996) yang digunakan sebagai pembandingan. Berdasarkan uraian yang telah disampaikan sebelumnya, Gambar 4.12 sampai dengan Gambar 4.19 memiliki kemiripan sekaligus perbedaan satu sama lain. Adanya kemiripan terutama ditunjukkan dari adanya pola perilaku antara kurva arus-tegangan dengan temperatur operasional. Hasil simulasi telah menunjukkan adanya kebergantungan kurva terhadap temperatur operasional, sebagaimana hasil penelitian Aslizar (1996). Adapun perbedaan yang muncul, berkenaan dengan kecendrungan bentuk kurva (*trend line curve*) antara penelitian ini dengan penelitian Aslizar (1996) yang berbeda. Namun demikian, pada rentang tegangan tertentu, terdapat beberapa nilai diskrepansi yang masih bisa ditoleransi memiliki kesesuaian dengan hasil eksperimen Aslizar (1996) yakni pada beberapa data dengan diskrepansi kurang dari 20% (Verbert, *et al*, 2011). Pada rentang di atas 0,38 Volt mayoritas sudah terjadi kelokan kurva yang cukup tajam sehingga nilai diskrepansinya membesar.

Secara keseluruhan *trend line* kurva arus-tegangan antara penelitian ini dengan penelitian Aslizar tidak sama. Hal ini disebabkan oleh bahan pengotor yang digunakan dalam dioda yang disimulasikan di dalam penelitian ini tidak sama persis dengan yang dipakai dalam Aslizar (1996). Data simulasi menggunakan pendekatan berkenaan dengan penyisipan semikonduktor ekstrinsik di dalam penelitian ini untuk semikonduktor tipe-p disisipi oleh atom Boron dengan konsentrasi maksimal $1,010 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ sedangkan semikonduktor tipe-n disisipi atom Phospor dengan konsentrasi yang sama. Sehingga didapatkan bentuk kurva karakteristik terdekat

yakni seperti yang dihasilkan pada penelitian ini. Walaupun perbandingan antara penelitian ini tidak sama persis dengan penelitian Aslizar (1996) akan tetapi secara umum adanya variasi temperatur operasional sangatlah mempengaruhi kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si.

Sebagaimana dijelaskan pada teori, nilai arus saturasi (I_S) berubah seiring adanya kenaikan temperatur operasional dari dioda Si. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan nilai arus saturasi (I_S) seperti di tunjukkan Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Perhitungan Arus Saturasi dioda Si variasi Temperatur Operasional

Temperatur Operasional (K)	Arus Saturasi (I_S , Ampere)
288	$3,211 \times 10^{-7}$
293	$5,881 \times 10^{-7}$
298	$8,639 \times 10^{-7}$
303	$1,149 \times 10^{-6}$
308	$1,442 \times 10^{-6}$
313	$1,745 \times 10^{-6}$
318	$2,057 \times 10^{-6}$
323	$2,377 \times 10^{-6}$

Menurut Sutrisno (1986) nilai arus saturasi (I_S) meningkat disebabkan eksitasi termal dari elektron di dalam dioda Si. Eksitasi termal ini menyebabkan pembawa muatan intrinsik (n_i) meningkat. Sesuai dengan persamaan 2.36 dimana n_i sebanding dengan $T^{3/2}$.

Perhitungan rapat arus dioda dilakukan dengan memanfaatkan hasil pemodelan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron. Di dalam perhitungan, konsentrasi *hole* dan elektron dipengaruhi oleh konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i). Selanjutnya untuk arus dioda dikontribusi oleh adanya perubahan konsentrasi *hole* (p) maupun elektron (n) sebagaimana pada persamaan (2.27) dan (2.28). Nilai rapat arus dioda sangat bergantung terhadap temperatur operasional dioda. Parameter

temperatur operasional mempengaruhi nilai konsentrasi muatan pembawa muatan intrinsik (n_i) selanjutnya nilai arus saturasi (I_S) serta fungsi eksponensial $e^{qV/kT}$ pada perhitungan arus dioda. Ketiga parameter ini yang menyebabkan adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa adanya variasi temperatur operasional menyebabkan adanya perubahan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron. Hal ini terlihat bahwa untuk setiap *mesh* yang sama di dalam geometri dioda Si menghasilkan nilai konsentrasi *hole* maupun elektron yang semakin bertambah seiring dengan pertambahan temperatur operasional dioda. Dari hasil juga diperoleh adanya perubahan kurva karakteristik arus-tegangan di bawah pengaruh variasi temperatur operasional. Nilai arus dioda yang dihasilkan semakin bertambah seiring dengan pertambahan temperatur operasional pada tegangan masukan yang sama. Dari pembahasan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron serta kurva karakteristik arus-tegangan menandakan bahwa temperatur operasional berkontribusi terhadap keduanya. Sesuai dengan teori yang ada bahwa parameter temperatur operasional mempengaruhi nilai konsentrasi muatan pembawa muatan intrinsik (n_i), nilai arus saturasi (I_S), dan fungsi eksponensial $e^{qV/kT}$ pada perhitungan arus dioda sehingga temperatur operasional sangatlah penting untuk di pertimbangkan di dalam pengoprasian dioda Si.

5.2 Saran

Pada dasarnya, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Aslizar (1996) berkenaan dengan perubahan kurva karakteristik arus-tegangan dioda Si dengan simulasi berdasarkan pemodelan matematis. Dari hasil yang didapatkan hasilnya kurang sempurna dikarenakan penelitian Aslizar tidak menjelaskan secara rinci karakterisasi bahan semikonduktor yang digunakan. Aslizar menggunakan divais TIP31C yang sudah ada di pasaran. Untuk diperoleh hasil yang lebih sempurna adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian ini ialah:

- a. melakukan sendiri fabrikasi dioda Si yang diinginkan dan mengkarakterisasinya,
- b. untuk pemodelan persambungan dioda Si dapat dikembangkan dalam bentuk geometri 3 D,
- c. untuk material penyusun dioda dapat divariasi dengan bahan semikonduktor lain seperti Ge, GaAs, GaSb dll.

DAFTAR PUSTAKA

Buku

- Boylestad, R. & Nashelsky, L. 2009. *Electronic Devices and Circuit Theory*. New Jersey : Prentice Hall.
- Colinge, J.P & Colinge, C.A. 2002. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: Kluwer Academic Publishers
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library for Semiconductor Device Model*, Stockholm : The Royal Institute of Institute
- Comsol, 2001. *FEMLAB 2.1*. Stockholm: Comsol Inc.
- Goetzberger, A., Knobloch, J., Voß, B. *Crystalline Silicon Solar Cells*. Terjemahan oleh Rachel Waddington. 1998. Chichester : John Wiley and Sons Ltd.
- Grob, H. 1997. *Basic Electronics*. New York: Mc Graw-Hill College
- Kasap, S. 2001. *Design of A p-n Junctions Diode*. Canada: University of Saskatchewan.
- Kwok, K. 1995. *Complete Guide to Semiconductor Devices*. Chicago: Mc Graw-Hill College Publisher.
- Neamen, D.A. 2003. *Semiconductor Physics and Device Basic Principles*. New York: Mc Graw-Hill College.
- Puri, R. K. & Babbar, V.K. 2001. *Solid State Physics & Electronics*. New Delhi : S. Chand & Company LTD.
- Setiawan, Rusdiana, Hamidah & Kaniawati. 2007. *Modul Semikonduktor*. Bandung: FMIPA UPI.
- Sze, S.M. 1985. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York : John Wiley & Sons.

- Subekti, A. 2003. *Diktat Kuliah Semikonduktor*. Jember : FMIPA UNEJ.
- Sutrisno. 1986. *Elektronika 1 Teori dan Penerapannya*. Bandung : ITB.
- Vebert, C., Kita, K., Bruns, N. 2011. *Introductions to Error Analysis*. Basel :
Universitat Basel

Skripsi/Tesis/Disertasi

- Aslizar. 1996. Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik Volt – Ampere Persambungan p-n Silikon pada Bias Maju. Tidak Diterbitkan. Tesis. Semarang: UNDIP.

Jurnal

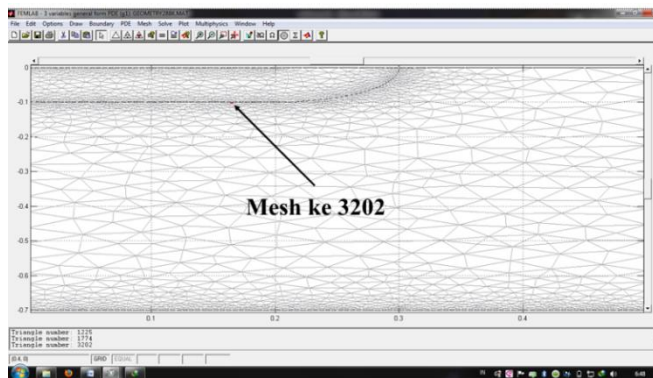
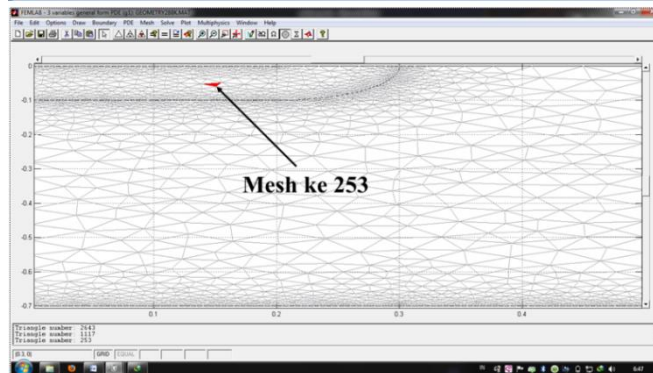
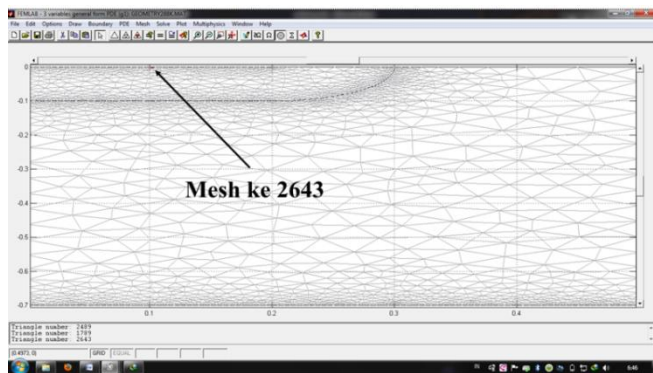
- Goudon, T., Miljanovic, V, Schmieser, C. 2007. On The Shockley-Read-Hall Model : Generation-Recombination in Semiconductors. *AMS*. Vol. **78** A35.
- Schumacher, J.O & Wettling, W. 2000. Device Physics of Silicon. *Imperial College Press*. ISBN 1-860-94161-3. Vol. **3**.
- Sconza, A., Torzo, G., & Viola, G. 1994. An experiment on the physics of the PN Junction. *American Journal of Physics*. Vol. **62**. Issue 1. pp. 66-70.
- Purwandari, E. & Winata, T. 2012. Optimasi Tekanan Deposisi dalam Simulasi Efisiensi Sel Surya Berbasis Material a-Si:H, *Gradien*. Vol. **6** No.1.

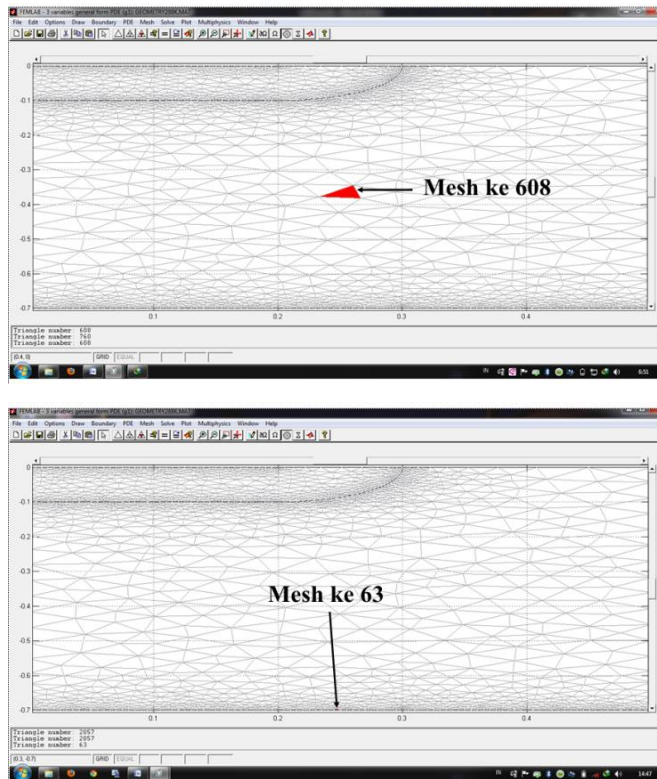
Internet

- Darja, J. 2003. Sejarah Singkat Piranti Semikonduktor. [serial online].
http://www.chem-isry.org/artikel_kimia/berita. [10 Maret 2012].
- Illinoisstate, 2004. Percent Difference-Percent Error. [serial online].
<http://www.phy.ilstu.edu/slh/Percent%20Difference%20Error.pdf>. [22 Januari 2012]

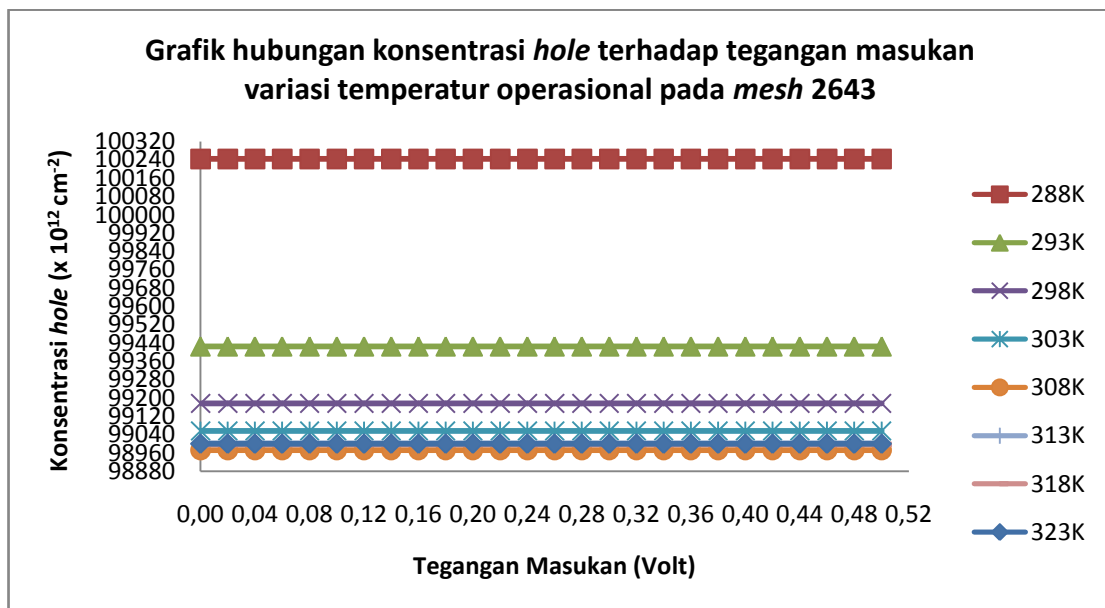
LAMPIRAN

A. Posisi *Mesh* Perhitungan Konsentrasi *hole* dan elektron

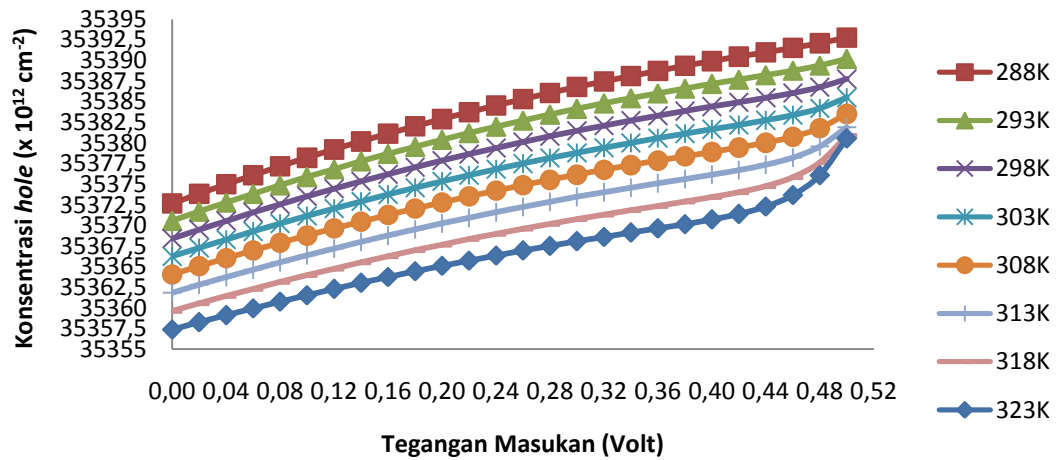




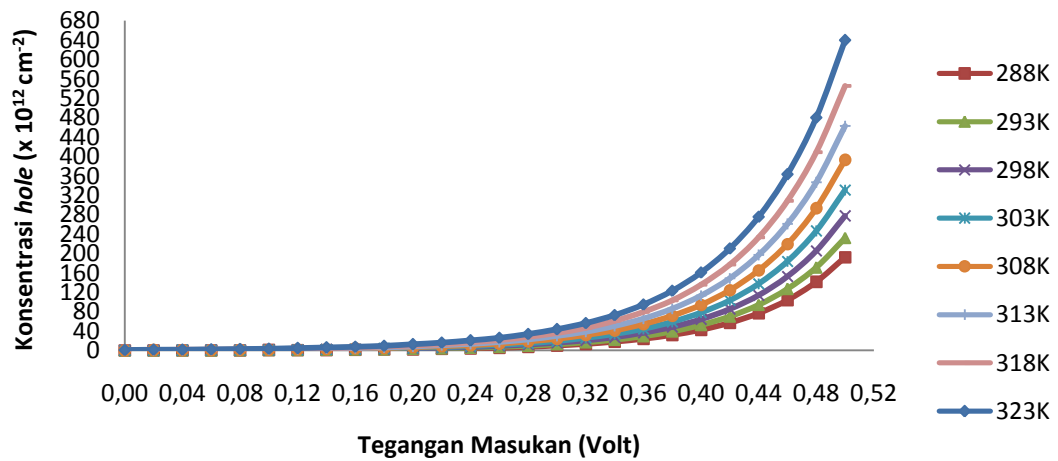
B. Grafik hubungan konsentrasi *hole* terhadap tegangan masukan variasi temperatur operasional

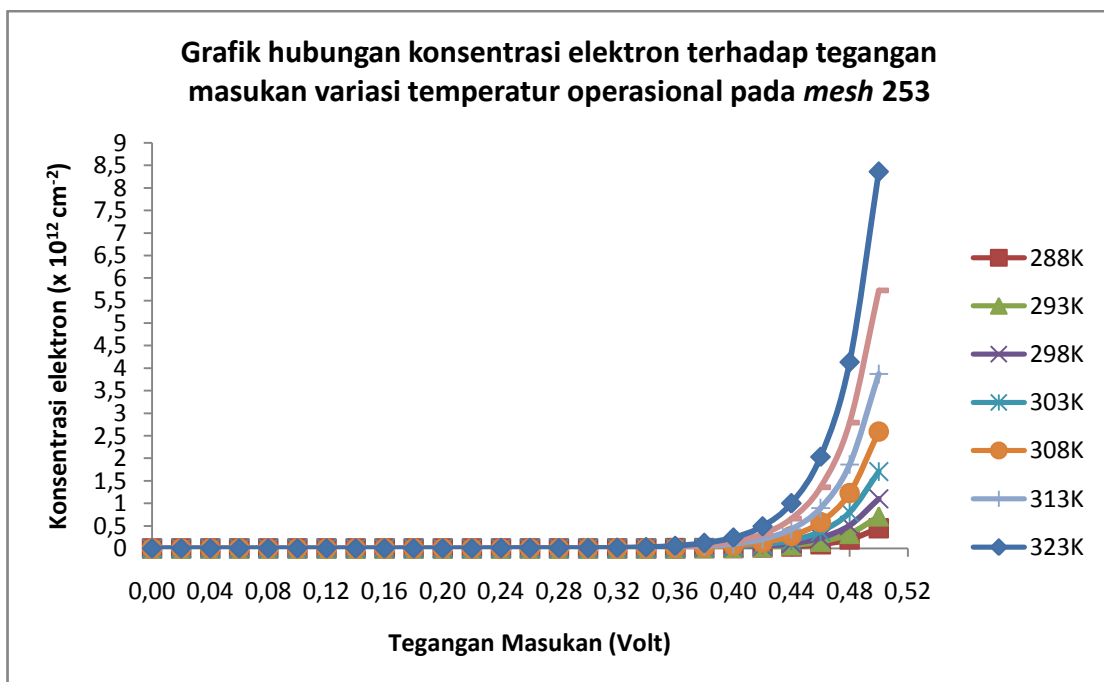
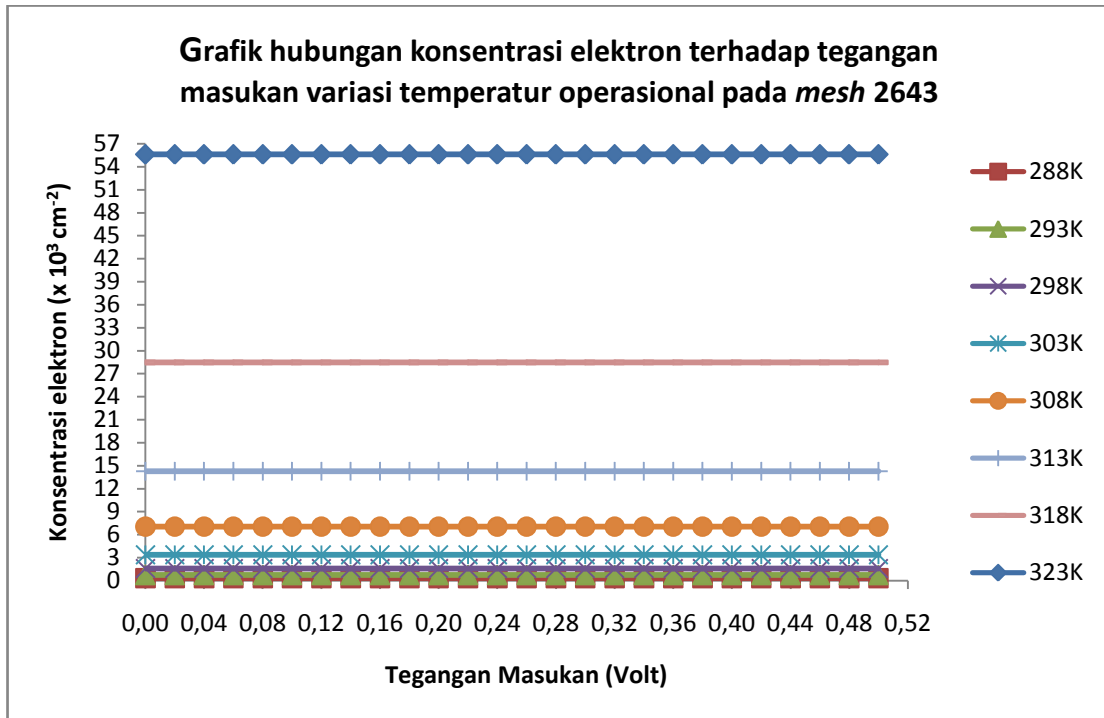


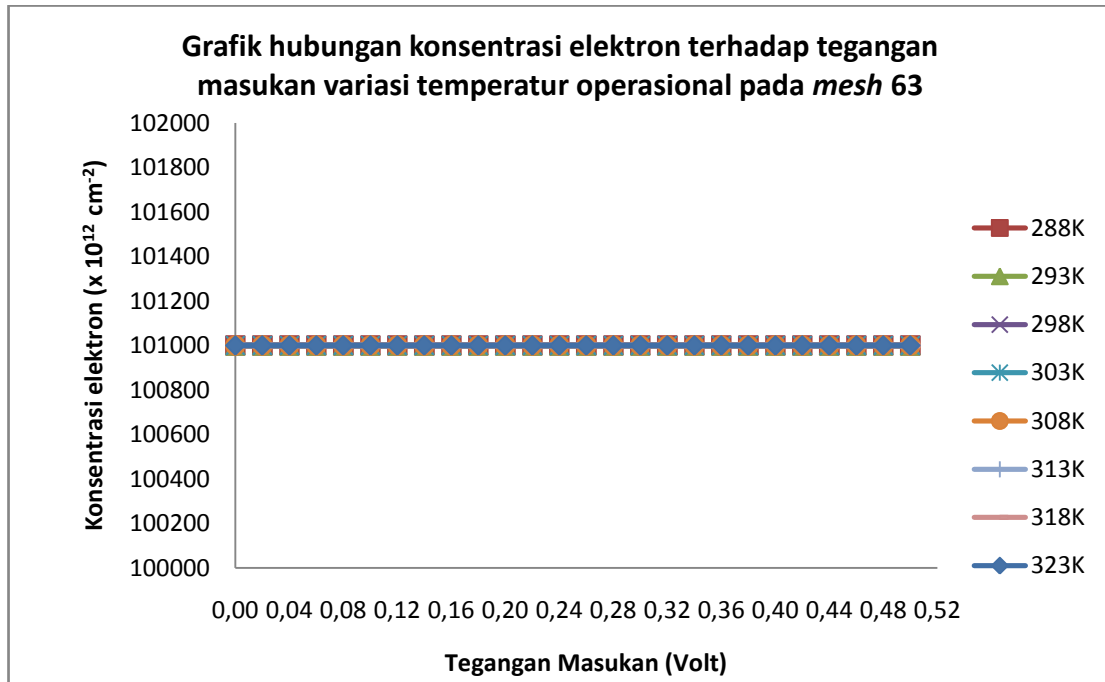
Grafik hubungan konsentrasi *hole* terhadap tegangan masukan variasi temperatur operasional pada *mesh* 253



Grafik hubungan konsentrasi *hole* terhadap tegangan masukan variasi temperatur operasional pada *mesh* 3202







C. Proses Pemodelan distribusi konsentrasi *hole* dan elektron dioda Si

```
% FEMLAB Model M-file
% Generated 16-Oct-2012 11:14:51 by FEMLAB 2.1.0.127.

flclear fem
% FEMLAB Version
clear vrsn;
vrsn.name='FEMLAB 2.1';
vrsn.major=0;
vrsn.build=127;
fem.version=vrsn;

% Space dimensions
fem.sdim={'x','y'};

% Geometry
clear s c p
R1=rect2(0,0.5,-0.69999999999999996,0,0);
p=[0 0 0.20000000000000001 0.29999999999999999 0.29999999999999999;
-0.10000000000000001 0 -0.10000000000000001 -0.10000000000000001 0];
rb={[1 2 3 5],[1 1 2;2 3 5],[3:5]',zeros(4,0)};
wt={zeros(1,0),ones(2,3),[1;0.70710678118654779;1],zeros(4,0)};
lr={[NaN NaN NaN NaN],[0 1 0;1 0 1],[1;0],zeros(2,0)};
```

```

CO1=solid2(p,rb,wt,lr);
objs={R1,CO1};
names={'R1','CO1'};
s.objs=objs;
s.name=names;
objs={};
names={};
c.objs=objs;
c.name=names;
PT1=point2(0.200000000000000001,0);
objs={PT1};
names={'PT1'};
p.objs=objs;
p.name=names;
drawstruct=struct('s',s,'c',c,'p',p);
fem.draw=drawstruct;
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem,...
    'Out',    {'mesh'},...
    'jiggle', 'mean',...
    'Hcurve', 0.299999999999999999,...
    'Hgrad',  1.3,...
    'Hmax',   {[],zeros(1,0),[2 0.00500000000000000001 4
0.00500000000000000001 ...
5 0.00500000000000000001 9 0.0050000000000000001],zeros(1,0)},...
    'Hnum',   {[],zeros(1,0)},...
    'Hpnt',   {10,zeros(1,0)});

% Get initial solution
restart.u=femuget(fem,1,1:3,restart.mesh);

% Dimension
fem.dim={{'Phi'},{'u'},{'v'}};

% Boundary conditions
fem.border=zeros(1,3);

% Usage
fem.usage=ones(3,2);

% Problem form
fem.form='general';

% Differentiation
fem.diff={'ga','g','f','r'};

% Differentiation simplification
fem.simplify='on';
% Differentiation rules
fem.rules={};

```

```

% Define variables
fem.variables={...
    'q',      1.602e-019,...
    'epsilon',8.853999999999994e-014,...
    'T',      288,...
    'k',      1.3800000000000001e-023,...
    'epsilon_r',11.800000000000001,...
    'y1',     0.6999999999999996,...
    'x0',     0.001,...
    'Phi0',   0.024808988764044946,...
    'C0',     1.01e+017,...
    'D0',     19.847191011235957,...
    'ni',     5.6039603960396039e-008,...
    'mun',    1,...
    'mup',    0.25,...
    'Dn',     1,...
    'Dp',     0.25,...
    'taun',   1.9847191011235956,...
    'taup',   1.9847191011235956,...
    'lambda2',1.6019416823641715e-006,...
    'nsa',    3.1641356201816961e-015,...
    'nsc',    1.0000000000000031,...
    'Va',     0};

% Define application mode variables
fem.var={};

% Boundary conditions
clear bnd
bnd.q={{{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},{'0'},{'0'}},{{'0'}
},{'0'}, ...
{'0'};{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},{'0'},{'0'}},{{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},
{'0'}, ...
{'0'};{'0'},{'0'},{'0'}},{{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},
{'0'}, ...
{'0'}}};
bnd.g={{{'0'};{'0'};{'0'}},{{'0'};{'0'};{'0'}},{{'0'};{'0'};{'0'}},{'
{'0'}; ...
{'0'};{'0'}}};
bnd.h={{{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},{'0'},{'0'};{'0'},{'0'},{'0'}},{{'1'
},{'0'}, ...
{'0'};{'0'},{'1'},{'0'};{'0'},{'0'},{'1'}},{{'1'},{'0'},{'0'};{'0'},
{'1'}, ...
{'0'};{'0'},{'0'},{'1'}},{{'1'},{'0'},{'0'};{'0'},{'1'},{'0'};{'0'},
{'0'}, ...
{'1'}}};
bnd.r={{{'0'};{'0'};{'0'}},{'log(nsc/ni)-Phi'};{'1-u'};{'1-
v'}},{{'-Phi'}; ...
{'-u'};{'-v'}},{'log(nsa/ni)-Phi+Va'};{'exp(-Va)-u'};{'exp(Va)-
v'}}};
bnd.var={};
bnd.ind=[1 2 1 3 4 1 1 1 3];

```



```

fem.bnd=bnd;

% PDE coefficients
clear equ
equ.da={{{'1'},{'0'},{'0'};{'0'},{'1'},{'0'};{'0'},{'0'},{'1'}}};
equ.c={{{'-lambda2','0';'0','-
lambda2'},{'0','0';'0','0'},{'0','0';'0','0'}; ...
{'0','0';'0','0'},{'-Dn*ni*exp(Phi)','0';'0','-
Dn*ni*exp(Phi)'}},{'0','0'; ...
'0','0'};{'0','0';'0','0'},{'0','0';'0','0'},{'-Dp*ni*exp(-
Phi)','0';'0', ...
'-Dp*ni*exp(-Phi)'}}}};
equ.al={{{'0';'0'},{'0';'0'},{'0';'0'};{'-Dn*ni.*exp(Phi).*ux'; ...
'-Dn*ni.*exp(Phi).*uy'},{'0';'0'},{'0';'0'};{'Dp*ni.*exp(-Phi).*vx';
...
'Dp*ni.*exp(-Phi).*vy'},{'0';'0'},{'0';'0'}}};
equ.ga={{{'lambda2*Phix';'lambda2*Phiy'};{'Dn*ni*exp(Phi).*ux'; ...
'Dn*ni*exp(Phi).*uy'};{'Dp*ni*exp(-Phi).*vx';'Dp*ni*exp(-
Phi).*vy'}}};
equ.be={{{'0';'0'},{'0';'0'},{'0';'0'};{'0';'0'},{'0';'0'},{'0';'0'}
;{'0'; ...
'0'},{'0';'0'},{'0';'0'}}};
equ.a={{{'-ni.*(exp(Phi).*u+exp(-Phi).*v)'}},{'-ni.*exp(Phi)'}}, ...
{'ni.*exp(-Phi)'}; ...
{'ni*(1-v.*u).*(taun.*exp(-Phi).*v-
taup.*exp(Phi).*u)./(taun*(1+exp(-
Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u).^2'}, ...
{'-(ni.*v./(taun*(1+exp(-Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u))+ni*(1-
v.*u).*taup.*exp(Phi)./(taun*(1+exp(-
Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u).^2)'}, ...
{'-(ni.*u./(taun*(1+exp(-Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u))+ni*(1-
v.*u).*taun.*exp(-Phi)./(taun*(1+exp(-
Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u).^2)'}; ...
{'ni*(1-v.*u).*(taun.*exp(-Phi).*v-
taup.*exp(Phi).*u)./(taun*(1+exp(-
Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u).^2'}, ...
{'-(ni.*v./(taun*(1+exp(-Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u))+ni*(1-
v.*u).*taup.*exp(Phi)./(taun*(1+exp(-
Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u).^2)'}, ...
{'-(ni.*u./(taun*(1+exp(-Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u))+ni*(1-
v.*u).*taun.*exp(-Phi)./(taun*(1+exp(-
Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u).^2)'}}}};
equ.f={{{'ni*(exp(Phi).*u-exp(-Phi).*v)-fldoping(x,y,C0)'}; ...
{'-ni*(1-v.*u)./(taun*(1+exp(-Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u)'}; ...
{'-ni*(1-v.*u)./(taun*(1+exp(-Phi).*v)+taup*(1+exp(Phi).*u)'}}}};
equ.var={'absPhix','sqrt(Phix.^2+Phiy.^2)','absux','sqrt(ux.^2+uy.^2)
'),' ...
'absvx','sqrt(vx.^2+vy.^2)','absgalx_g1','sqrt(galx.^2+galy.^2)',
...
'absga2x_g1','sqrt(ga2x.^2+ga2y.^2)','absga3x_g1','sqrt(ga3x.^2+ga3y
.^2)'};
equ.ind=[1 1];

```

```

fem.equ=equ;

% Evaluate initial condition
fem.init=assemnit(fem,...
    'context','local',...
    'init',    struct('sd',{{'Phi'};{'u'};{'v'}}},'ind',{[1
1]}),...
    'u',      restart.u);

% Solve nonlinear problem
fem.sol=femnlm(fem,...
    'out',    'sol',...
    'stop',   'on',...
    'report', 'on',...
    'context','local',...
    'sd',     'off',...
    'Epoint', 'gauss2',...
    'Nullfun', 'flnullorth',...
    'Tpoint', 'gauss2',...
    'Solcomp',1:3,...
    'bsteps', 0,...
    'ntol',   9.999999999999995e-008,...
    'hnlin',  'off',...
    'jacobian','equ',...
    'maxiter',25,...
    'method', 'eliminate');

% Application mode 1
appl{1}.mode='flpdeg2d(3,'dim',{ 'Phi','u','v','Phi_t','u_
t','v_t'},'sdim',{ 'x','y'},'submode','std','tdiff','
on')';
appl{1}.name='g1';
appl{1}.dim={'Phi','u','v','Phi_t','u_t','v_t'};
appl{1}.border='off';
appl{1}.var={};
appl{1}.form='general';
appl{1}.assign={'absPhix';'absPhix_g1';'absculx';'absculx_g1';'abscu
2x'; ...
'abscu2x_g1';'abscu3x';'abscu3x_g1';'absgalx';'absgalx_g1';'absga2x'
; ...
'absga2x_g1';'absga3x';'absga3x_g1';'absux';'absux_g1';'absvx';'absv
x_g1'};
appl{1}.equ.da={{ '1'},{ '0'},{ '0'};{'0'},{ '1'},{ '0'};{'0'},{ '0'},{ '1
'}};
appl{1}.equ.ga={{ 'lambda2*Phix';'lambda2*Phiy'};{'Dn*ni*exp(Phi).*u
x'; ...
'Dn*ni*exp(Phi).*uy'};{'Dp*ni*exp(-Phi).*vx';'Dp*ni*exp(-
Phi).*vy'}};
appl{1}.equ.f={{ 'ni*(exp(Phi).*u-exp(-Phi).*v)-fldoping(x,y,C0)'};
...
{'ni*(v.*u-1)./(taun*(exp(-Phi).*v+1)+taup*(exp(Phi).*u+1))'}; ...
{'ni*(v.*u-1)./(taun*(exp(-Phi).*v+1)+taup*(exp(Phi).*u+1))'}};

```

```

appl{1}.equ.ind=[1 1];
appl{1}.usage=[1 1];
appl{1}.bnd.g={{'0';'0';'0'}},{'0';'0';'0'}},{'0';'0'};
{'0'}}, ...
{'0';'0';'0'}}};
appl{1}.bnd.r={{'0';'0';'0'}},{'-Phi+log(nsc/ni)'};{'-
u+1';'0';'0'}}, ...
{'-Phi';'0';'0'}},{'-Phi+Va+log(nsa/ni)'};{'-u+exp(-Va)'};
...
{'-v+exp(Va)'}}}};
appl{1}.bnd.type={'dir','dir','dir','dir'};
appl{1}.bnd.ind=[1 2 1 3 4 1 1 1 3];
appl{1}.init.sd={{'log((fldoping(x,y,C0)/2+sqrt(fldoping(x,y,C0).^2
/4+ni^2))/ni)'}; ...
{'1';'1'}}};
appl{1}.init.ind=[1 1];

fem.appl=appl;

```

D. Proses karakterisasi arus -tegangan dioda Si

```

format long
for i=1:26;
    for b=1:9;
        In(i,b) = posteint(fem, '((q*D0*C0*1e-
6).*(Dn*ni*nx.*exp(Phi).*ux))+((q*D0*C0*1e-
6).*(Dn*ni*ny.*exp(Phi).*uy)', 'Bdl', b, 'solnum', i);
        Ip(i,b) = posteint(fem, '((q*D0*C0*1e-6).*(-Dp*ni*nx.*exp(-
Phi).*vx))-((q*D0*C0*1e-6).*(Dp*ni*ny.*exp(-
Phi).*vy)', 'Bdl', b, 'solnum', i);
    end
end
Itotal = abs(In(:, [2,5])+Ip(:, [2,5]));
figure
semilogy(fem.sol.tlist,abs(In(:, [2,5])+Ip(:, [2,5])), '-x');
axis([0 0.5 1e-18 1e-7]);
ylabel('Current Density [A/\mum]');
xlabel('Voltage [V]');
title('IV-characteristics');

```