



**SIMULASI DISTRIBUSI KONSENTRASI ELEKTRON KRISTAL SEMIKONDUKTOR
GaAs PADA PERISTIWA *DEFORMATION POTENTIAL SCATTERING*
BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

**Oleh
Nova Alviati
NIM 111810201027**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2015**



**SIMULASI DISTRIBUSI KONSENTRASI ELEKTRON KRISTAL SEMIKONDUKTOR
GaAs PADA PERISTIWA *DEFORMATION POTENTIAL SCATTERING*
BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

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

Oleh
Nova Alviati
NIM 111810201027

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2015**

PERSEMBAHAN

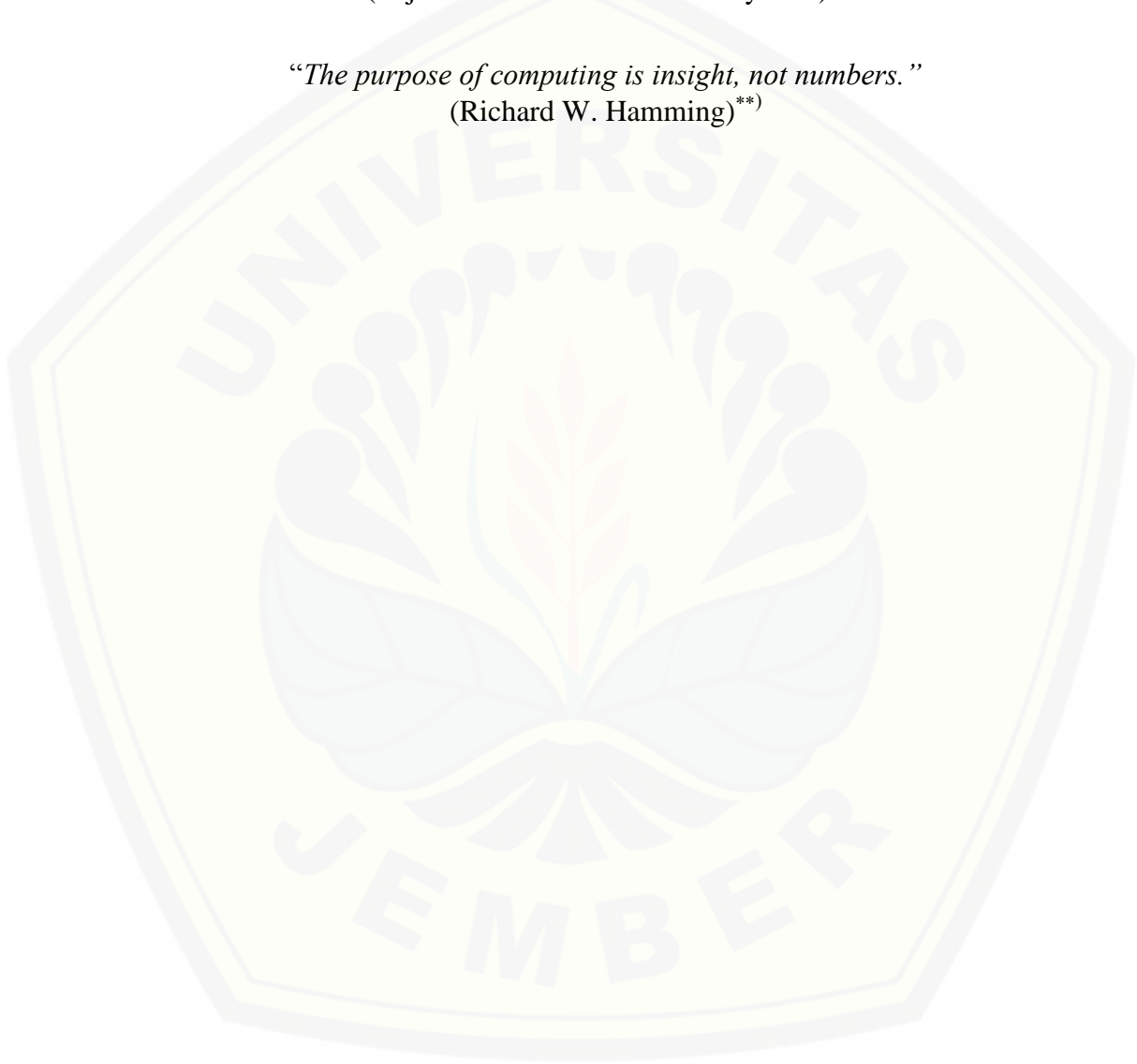
Skripsi ini Saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Sri Hartatik dan Ayahanda Khudori yang selalu menjadi inspirasi, sumber semangat serta muara baktiku dalam menjalani kehidupan;
2. Ibu Endhah Purwandari, S.Si., M.Si. dan Bapak Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si. yang memberikan motivasi, bimbingan, arahan serta perhatiannya;
3. para pahlawan tanpa tanda jasa sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi yang telah mendidikku dengan penuh kesabaran dan keikhlasan;
4. Kakakku Entin Rusmartiningsih, Kakak Iparku Doan Kurnia A.S., Keponakanku Muthia Mayza Mumtaz serta Fathan Mubina Rizqullah dan seluruh keluarga besar yang mengisi kehidupanku dengan penuh warna;
5. teman-teman terbaikku sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi (GP-11) yang telah menemani proses kehidupanku;
6. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTO

“Dan perumpamaan-perumpamaan ini Kami buat untuk manusia; dan tidak ada yang akan memahaminya kecuali mereka yang berilmu.”
(terjemahan Surat *Al-Ankabut* ayat 43)^{*}

“The purpose of computing is insight, not numbers.”
(Richard W. Hamming)^{**}



^{*} Departemen Agama Republik Indonesia. 2002. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Surabaya: Mahkota.

^{**} <http://www.brainyquote.com/quotes/quotes/r/richardham645682.html>.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Nova Alviati

NIM : 111810201027

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs Pada Peristiwa *Deformation Potential Scattering* Berbasis Metode Elemen Hingga” adalah benar-benar hasil karya ilmiah antara dosen pembimbing dan saya selaku mahasiswa, 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, 27 November 2015

Yang menyatakan,

Nova Alviati
NIM 111810201027

SKRIPSI

**SIMULASI DISTRIBUSI KONSENTRASI ELEKTRON KRISTAL SEMIKONDUKTOR
GaAs PADA PERISTIWA *DEFORMATION POTENTIAL SCATTERING*
BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

Oleh
Nova Alviati
NIM 111810201027

Pembimbing

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

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

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs Pada Peristiwa *Deformation Potential Scattering* Berbasis Metode Elemen Hingga” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat :

Tim Penguji:

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

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

Dr. Edy Supriyanto, S.Si., M.Si.
NIP 196712151998021001

Dosen Penguji I,

Dosen Penguji II,

Nurul Priyantari, S.Si., M.Si.
NIP 197003271997022001

Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si.
NIP 196912251999031001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas MIPA,

Prof. Drs. Kusno, DEA, Ph.D
NIP 196101081986021001

RINGKASAN

Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs Pada Peristiwa *Deformation Potential Scattering* Berbasis Metode Elemen Hingga;

Nova Alviati, 111810201027; 2015: 69 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Kristal semikonduktor Gallium Arsenida (GaAs) merupakan salah satu jenis material semikonduktor paduan yang terdiri dari gabungan unsur Gallium (golongan IIIA) dan Arsen (golongan VA). Material ini banyak diaplikasikan dalam pembuatan divais elektronika seperti LED, dioda laser maupun transistor, dimana seluruh divais tersebut didesain untuk beroperasi pada temperatur ruang (300 K). Jika ditinjau secara teoritik, atom-atom dalam kristal semikonduktor akan mengalami vibrasi kisi (gerakan acak dalam kisi-kisi) ketika temperatur pada material tersebut di atas 0 K. Fenomena tersebut dapat mengganggu keleluasaan pergerakan elektron sebagai pembawa muatan pada semikonduktor. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan nilai mobilitas elektron akibat interaksi antara elektron dengan atom-atom kisi yang bervibrasi. Interaksi tersebut dikenal sebagai interaksi elektron-fonon yang menyebabkan terjadinya suatu hamburan pada material tersebut yaitu hamburan fonon.

Hamburan fonon dapat menyebabkan perubahan sifat periodik atom-atom penyusun kristal semikonduktor GaAs, salah satunya yaitu perubahan jarak antar titik kisi yang disebut sebagai peristiwa *deformation potential scattering*. Peristiwa *deformation potential scattering* juga merupakan salah satu mekanisme hamburan pembawa muatan (khususnya elektron) yang dapat mempengaruhi karakteristik kelistrikan dari material tersebut, dimana peristiwa ini ditandai dengan berubahnya nilai mobilitas elektron yang terjadi pada temperatur 30 K sampai dengan 100 K. Perubahan nilai mobilitas elektron berpengaruh terhadap

perubahan distribusi nilai konsentrasi elektron, sehingga hal inilah yang menyebabkan berubahnya karakteristik kelistrikan dari material tersebut.

Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi peristiwa *deformation potential scattering* untuk menggambarkan nilai konsentrasi elektron yang diperoleh akibat fenomena hamburan tersebut pada kristal semikonduktor GaAs menggunakan metode elemen hingga yaitu dengan memodelkan material tersebut ke dalam geometri 2 dimensi ($7 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$). Selanjutnya, model geometri dari material tersebut dibagi menjadi elemen-elemen berbentuk segitiga, sehingga solusi persamaan diferensial parsial dari divais semikonduktor akan dihitung pada setiap elemen yaitu persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan. Solusi umum yang diperoleh merupakan gabungan dari solusi-solusi persamaan di setiap elemen segitiga pada geometri dari material tersebut. Selanjutnya, parameter input yang divariasikan meliputi nilai mobilitas elektron dan temperatur.

Hasil penelitian menggambarkan profil distribusi nilai konsentrasi elektron dalam geometri 2D pada kristal semikonduktor GaAs, dimana semakin mendekati katoda nilai konsentrasi elektron semakin besar yaitu pada anoda sebesar $1,326 \times 10^2$ elektron/ μm hingga menuju ke katoda menjadi sebesar $16,582 \times 10^{16}$ elektron/ μm untuk seluruh variasi temperatur. Perbedaan mendasar dari hasil simulasi terjadi pada daerah bagian tengah (daerah mirip deplesi) bahwa semakin meningkatnya temperatur maka daerah bagian tengah semakin lebar yaitu pada 40 K sebesar $0,44 \mu\text{m}$ sampai dengan pada 100 K sebesar $0,5 \mu\text{m}$. Hal ini terjadi karena semakin intensifnya hamburan yang terjadi pada material tersebut seiring dengan peningkatan temperatur, akibatnya sejumlah elektron telah berpindah dan berkumpul pada daerah bagian tengah dari geometri material tersebut. Fenomena ini didukung dengan kurva karakteristik n-T pada daerah bagian tengah dimana terdapat dua tipe bagian dengan pola (*trend*) naik dan turun ketika temperatur semakin meningkat, sehingga membuktikan terjadinya aliran pergerakan elektron dari katoda menuju ke arah anoda (arus difusi elektron).

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat serta nikmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron Kristal Semikonduktor GaAs Pada Peristiwa *Deformation Potential Scattering* Berbasis Metode Elemen Hingga”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis 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 demi selesainya penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Nurul Priyantari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Dr. Artoto Arkundato, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan, kritikan dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
4. rekan kerjaku Maria Kusniawati dan Moch. Shobirin Kusuma yang telah meluangkan waktu dan pikiran untuk berdiskusi demi selesainya skripsi ini;
5. sahabat-sahabat fisika: Devi Septian Riri Artanti, Ria Fitriani, Alvy Vironica Fitrotin Mustain, Novi Dwi Ariyanti, Miftahul Jannah, Alex Taufiqurrohman Zain, Toto Adi Guna, Kharis Septina Liftyawan, Dera Ratna Kumala, Tri Indah Ratnasari, Vita Puji Lestari, Dewi Azzahra P., Sri Gunartiningsih, Rosaria D. Sukmadewi, Amanda N. Imbani, Desi F. Zahro serta seluruh angkatan 2011 (GP-11) yang telah mengisi hari-hari penulis selama menimba ilmu di Universitas Jember;

6. kawan-kawan: Winda Octaviana, Ida K. Nisa, Erik Sony Sanjaya, Rena Endang S. L., Indah Wahyuningsih, Fiqya K. Putri, Candraningsih, Novi Nurul A., Roikatul Janah, Dian M. Humairoh, Khilma Ilmayatul M., Niken C. Bestari serta seluruh kawan baik yang telah banyak menginspirasi, memotivasi serta memberi dukungan dalam proses kehidupan penulis;
7. Edy Sutrisno, Taufik Usman, Sunarto, Hadi, Ansori, Budiyo, Aji Priyono serta segenap keluarga besar FMIPA Universitas Jember;
8. semua pihak yang turut membantu demi selesainya skripsi ini.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi disiplin ilmu Fisika serta kepada setiap pembacanya.

Jember, 27 November 2015

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	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Material Semikonduktor	5
2.1.1 Semikonduktor Intrinsik	7
2.1.2 Semikonduktor Ekstrinsik	10
2.1.3 Semikonduktor Paduan	13
2.2 Proses Konduksi Dalam Semikonduktor	17
2.2.1 Transportasi Pembawa Muatan	17
2.2.2 Fenomena Hamburan (<i>Scattering</i>)	19

2.2.3 Efek Mobilitas	20
2.3 Kristal Semikonduktor Gallium Arsenida (GaAs).....	22
2.3.1 Struktur Ikatan pada Kristal Semikonduktor GaAs.....	23
2.3.2 Mekanisme Hamburan pada Kristal Semikonduktor GaAs.....	24
2.4 Persamaan Dasar Divais Semikonduktor	30
2.4.1 Persamaan Poisson	30
2.4.2 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan	30
2.5 Analisa Numerik Metode Elemen Hingga.....	31
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	34
3.1 Jenis Penelitian	34
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	34
3.3 Prosedur Penelitian	34
3.3.1 Geometri Kristal Semikonduktor GaAs	38
3.3.2 Parameter Kristal Semikonduktor GaAs	39
3.3.3 Pengaturan Kondisi Batas.....	40
3.3.4 Persamaan Poisson Termodifikasi.....	41
3.3.5 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan Termodifikasi	42
3.3.6 Pembuatan Kurva Karakteristik n-T.....	43
3.4 Analisa Data	45
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Pemodelan Distribusi Konsentrasi Elektron pada Kristal Semikonduktor GaAs dalam Peristiwa <i>Deformation Potential Scattering</i>	47
4.2 Kurva Karakteristik n-T Kristal Semikonduktor GaAs Terhadap Variasi Temperatur	57
BAB 5. PENUTUP.....	65
5.1 Kesimpulan	65

5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN-LAMPIRAN	
A. NILAI KONSENTRASI ELEKTRON PADA DAERAH- DAERAH PENGAMATAN DALAM GEOMETRI KRISTAL SEMIKONDUKTOR GaAs AKIBAT VARIASI TEMPERATUR.....	70
B. LEBAR DAERAH BAGIAN TENGAH GEOMETRI KRISTAL SEMIKONDUKTOR GaAs (DAERAH C SAMPAI DENGAN DAERAH F) ATAU DAERAH MIRIP DEPLESI.....	73

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Nilai parameter dari berbagai macam material semikonduktor dalam divais optoelektronika pada keadaan mendekati temperatur ruang (300K)	6
2.2 Nilai mobilitas pada $T = 300$ K untuk konsentrasi dopan yang rendah	22
3.1 Parameter input beserta nilainya	39
3.2 Faktor skala untuk parameter input	40
4.1 Konsentrasi elektron pada $T=40$ K dengan $\mu_n = (3 \times 10^{14}) \frac{\mu m^2}{V_s}$	48
4.2 Konsentrasi elektron pada $T=60$ K dengan $\mu_n = (1,5 \times 10^{14}) \frac{\mu m^2}{V_s}$...	51
4.3 Konsentrasi elektron pada $T=80$ K dengan $\mu_n = (9 \times 10^{13}) \frac{\mu m^2}{V_s}$	52
4.4 Konsentrasi elektron pada $T=100$ K dengan $\mu_n = (7 \times 10^{13}) \frac{\mu m^2}{V_s}$	53
4.5 Konsentrasi elektron pada $T=300$ K dengan $\mu_n = (8500 \times 10^8) \frac{\mu m^2}{V_s}$	55

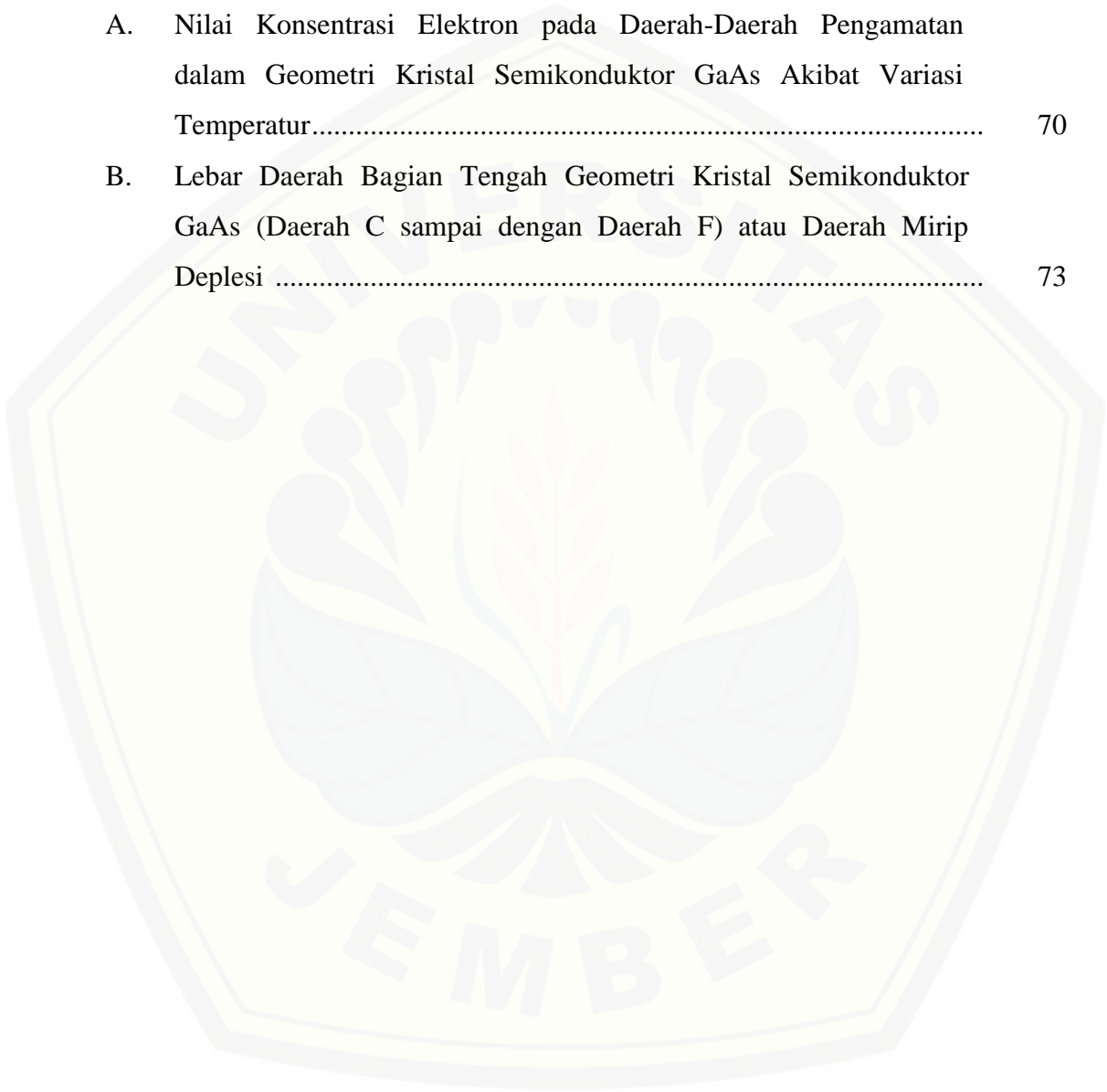
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Ikatan kovalen kristal Silikon	7
2.2 Ilustrasi pergerakan <i>hole</i> pada Silikon.....	8
2.3 Ilustrasi peristiwa generasi dan rekombinasi	9
2.4 Kristal Silikon tipe- <i>n</i>	10
2.5 Diagram pita energi semikonduktor ekstrinsik tipe- <i>n</i>	11
2.6 Kristal Silikon tipe- <i>p</i>	12
2.7 Diagram pita energi semikonduktor ekstrinsik tipe- <i>p</i>	13
2.8 Ilustrasi kisi dua dimensi kristal GaAs: (a) semikonduktor murni dan (b) semikonduktor tipe- <i>n</i>	14
2.9 Diagram skematik struktur kristal: (a) <i>zincblende</i> pada GaAs dan (b) <i>diamond</i> pada Si.....	23
2.10 Grafik eksperimen nilai mobilitas elektron terhadap temperatur pada berbagai mekanisme hamburan dalam material GaAs	24
2.11 Grafik eksperimen nilai mobilitas elektron terhadap temperatur dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i> pada material GaAs	29
2.12 Pemodelan geometri dioda persambungan p-n pada Silikon	32
2.13 Pembagian geometri dioda persambungan p-n pada Silikon menjadi bentuk segitiga-segitiga kecil	32
3.1 Ilustrasi proses penelitian	35
3.2 Diagram alir kegiatan simulasi	37
3.3 Geometri kristal semikonduktor GaAs	38
3.4 Nilai parameter input mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	44
3.5 Sketsa posisi daerah pengamatan pada kristal semikonduktor GaAs ..	45

4.1	Hasil pemodelan distribusi konsentrasi elektron pada $T=40$ K dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	48
4.2	Hasil pemodelan distribusi konsentrasi elektron pada $T=60$ K dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	51
4.3	Hasil pemodelan distribusi konsentrasi elektron pada $T=80$ K dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	52
4.4	Hasil pemodelan distribusi konsentrasi elektron pada $T=100$ K dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	53
4.5	Hasil pemodelan distribusi konsentrasi elektron pada $T=300$ K dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	55
4.6	Kurva karakteristik n-T pada daerah A [koordinat (0,0725;-0.00629)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	58
4.7	Kurva karakteristik n-T pada daerah B [koordinat (0,26;-0,2)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	59
4.8	Kurva karakteristik n-T pada daerah C [koordinat (0,0642;-0,326)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	60
4.9	Kurva karakteristik n-T pada daerah D [koordinat (0,366;-0,345)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	60
4.10	Kurva karakteristik n-T pada daerah E [koordinat (0,155;-0,357)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	61
4.11	Kurva karakteristik n-T pada daerah F [koordinat (0,366;-0,37)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	62
4.12	Kurva karakteristik n-T pada daerah G [koordinat (0,26;-0,502)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	63
4.13	Kurva karakteristik n-T pada daerah H [koordinat (0,366;-0,694)] dalam peristiwa <i>deformation potential scattering</i>	64

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Nilai Konsentrasi Elektron pada Daerah-Daerah Pengamatan dalam Geometri Kristal Semikonduktor GaAs Akibat Variasi Temperatur.....	70
B. Lebar Daerah Bagian Tengah Geometri Kristal Semikonduktor GaAs (Daerah C sampai dengan Daerah F) atau Daerah Mirip Depleksi	73



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan teknologi elektronika, material semikonduktor banyak dikembangkan untuk pembuatan dioda, transistor dan IC (*Integrated Circuit*). Material semikonduktor yang lebih dulu dikembangkan yaitu Germanium (Ge). Namun, dalam perkembangan selanjutnya material Silikon (Si) lebih banyak digunakan karena ketersediaannya yang melimpah di bumi setelah Oksigen (O₂) serta kemudahan cara mengekstrak material ini dari alam. Material Germanium dan Silikon merupakan unsur golongan IVA pada sistem periodik unsur. Material lain yang memiliki sifat seperti unsur golongan IVA yaitu kristal Gallium Arsenida (GaAs), sehingga material ini dapat pula digunakan untuk pembuatan material semikonduktor (Sutrisno, 1986).

Kristal semikonduktor Gallium Arsenida (GaAs) merupakan material semikonduktor paduan yang tersusun dari dua unsur yaitu Gallium (Ga) dan Arsen (As), sehingga biasanya disebut dengan *binary compound semiconductor*. Pada temperatur ruang, kristal semikonduktor GaAs memiliki nilai celah pita energi sebesar 1,43 eV dengan struktur pita energi transisi langsung (*direct bandgap*) (Fuller, 2001). Nilai celah pita energi ini lebih besar dibandingkan dengan Si yang memiliki nilai celah pita energi sebesar 1,12 eV dengan struktur pita energi transisi tidak langsung (*indirect bandgap*) (Fuller, 2001), sehingga kristal semikonduktor GaAs lebih baik untuk digunakan dalam pembuatan divais yang beroperasi hingga daerah frekuensi tinggi (Sutrisno, 1986).

Material kristal semikonduktor GaAs semakin dikembangkan setelah diketahui pemanfaatannya yang banyak digunakan dalam pembuatan divais elektronika seperti LED (*Light Emitting Diode*), dioda laser dan transistor. Jika ditinjau penggunaan material semikonduktor tersebut, semua divais didesain

untuk beroperasi pada temperatur ruang (300 K), sedangkan secara teoritik atom-atom penyusun kristal semikonduktor memiliki energi termal, dimana di atas temperatur nol absolut (0 K) atom-atom tersebut akan bervibrasi di dalam kisi-kisi kristal dan beresilasi di sekitar posisi kesetimbangannya. Vibrasi kisi tersebut mengakibatkan gangguan keleluasaan pembawa muatan (khususnya elektron) untuk bergerak. Interaksi antara elektron atau lubang (*hole*) dengan atom kisi yang bervibrasi menimbulkan peristiwa hamburan pada semikonduktor yang dikenal sebagai hamburan fonon/kisi (Subekti, 2003; Seeger, 1989).

Penelitian secara eksperimen pada semikonduktor GaAs telah dilakukan pada tahun 1988 oleh Manion dengan topik hamburan fonon akustik termodulasi pada *heterojunction* AlGaAs/GaAs. Dalam investigasi tersebut, Manion membahas mengenai mekanisme hamburan yang terjadi dalam semikonduktor GaAs salah satunya hamburan fonon akustik yaitu peristiwa *deformation potential scattering*. Dari peristiwa tersebut diperoleh suatu grafik hubungan kebergantungan antara nilai mobilitas elektron terhadap temperatur yang diperoleh berdasarkan penelitian Stillman *et al.* (1970). Fenomena hamburan tersebut dapat mempengaruhi karakteristik kelistrikan dari suatu material semikonduktor yaitu distribusi nilai konsentrasi pembawa muatan salah satunya adalah distribusi nilai konsentrasi elektron. Oleh sebab itu, perlu dilakukan kajian penelitian untuk melanjutkan hasil penelitian tersebut ke distribusi nilai konsentrasi elektron yaitu dengan menjadikan grafik hubungan nilai mobilitas elektron terhadap temperatur tersebut sebagai parameter input dalam penelitian selanjutnya, sehingga dapat diketahui karakteristik kelistrikan dari material semikonduktor GaAs khususnya akibat terjadinya peristiwa *deformation potential scattering*.

Berdasarkan uraian di atas, maka pada penelitian ini telah dikaji secara teori tentang distribusi nilai konsentrasi elektron pada kristal semikonduktor GaAs dalam peristiwa *deformation potential scattering* yaitu dengan memodelkan material tersebut ke dalam penampang geometri 2 dimensi. Untuk memperoleh

nilai konsentrasi elektron pada material tersebut dapat dilakukan dengan metode elemen hingga (Usman, 2006; Kurniawan, 2013; Fitriana, 2014). Metode ini dipertimbangkan dapat lebih mudah digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang banyak terdapat dalam persamaan dasar divais semikonduktor. Selain itu, kelebihan lain dari pemodelan dengan memanfaatkan metode ini yaitu mampu menggambarkan serta menampilkan geometri dari material tersebut, sehingga akan lebih mudah untuk menganalisis hasil simulasi yang diperlihatkan (Usman, 2006; Kurniawan, 2013; Fitriana, 2014). Metode elemen hingga ini diterapkan dengan membagi geometri kristal semikonduktor GaAs menjadi elemen-elemen kecil, sehingga diharapkan hasil pemodelan dari setiap elemen menjadi sangat teliti dan akurat untuk menampilkan distribusi nilai konsentrasi elektron yang tersebar di seluruh bagian dalam geometri material tersebut. Untuk nilai kontrol dari hasil penelitian dilakukan simulasi kristal semikonduktor GaAs pada temperatur ruang (300 K) karena kebanyakan divais elektronika yang terbuat dari material semikonduktor didesain untuk beroperasi pada temperatur ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang tersebut, rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pemodelan distribusi nilai konsentrasi elektron pada kristal semikonduktor GaAs yang dianalisis dalam peristiwa *deformation potential scattering*?
2. Bagaimana kurva karakteristik distribusi nilai konsentrasi elektron terhadap temperatur pada kristal semikonduktor GaAs yang dianalisis dalam peristiwa *deformation potential scattering*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis material yang disimulasikan adalah kristal semikonduktor Gallium Arsenida (GaAs).
2. Geometri kristal semikonduktor GaAs dimodelkan dalam bentuk penampang 2 dimensi ($7 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$).
3. Metode yang digunakan dalam penelitian menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*).
4. Distribusi nilai konsentrasi elektron diperoleh akibat peristiwa *deformation potential scattering* yaitu pada variasi temperatur di bawah 300 K dengan temperatur 300 K sebagai temperatur kontrol dalam penelitian.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh hasil pemodelan distribusi nilai konsentrasi elektron pada kristal semikonduktor GaAs yang dianalisis dalam peristiwa *deformation potential*.
2. Memperoleh kurva karakteristik distribusi nilai konsentrasi elektron terhadap temperatur pada kristal semikonduktor GaAs yang dianalisis dalam peristiwa *deformation potential scattering*.

1.5 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat yang diharapkan dapat dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dijadikan sumbangan di bidang ilmu fisika material semikonduktor khususnya bidang pemodelan komputasi untuk penelitian lebih lanjut.
2. Diharapkan hasil penelitian dapat memberikan informasi-informasi fisis yang berkaitan dengan divais elektronika yang terbuat dari kristal semikonduktor GaAs.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pokok-pokok pembahasan di dalam bab ini meliputi beberapa hal antara lain material semikonduktor, proses konduksi dalam semikonduktor, kristal semikonduktor GaAs, persamaan dasar divais semikonduktor serta analisa numerik metode elemen hingga.

2.1 Material Semikonduktor

Berdasarkan sifat kelistrikkannya, material diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu konduktor, semikonduktor dan insulator (isolator). Salah satu parameter yang digunakan untuk pengklasifikasian ini adalah nilai konduktivitas listrik dari material. Nilai konduktivitas listrik dari material konduktor lebih besar dari $10^4 \Omega^{-1}cm^{-1}$, material semikonduktor antara $(10^4 - 10^{-8}) \Omega^{-1}cm^{-1}$ dan material insulator lebih kecil dari $10^{-8} \Omega^{-1}cm^{-1}$ (Goetzberger *et al.*, 1997).

Pada sifat kelistrikan dinyatakan bahwa logam merupakan material konduktor yang baik, sedangkan nonlogam merupakan material konduktor yang buruk, sehingga logam terklasifikasi sebagai material konduktor dan nonlogam sebagai material insulator. Beberapa zat padat yang memiliki nilai konduktivitas listrik diantara material konduktor dan insulator terklasifikasi sebagai semikonduktor (Seeger, 1989). Pada temperatur 0 K, material semikonduktor berperilaku sebagai insulator, sedangkan pada temperatur ruang (300 K) material semikonduktor berperilaku sebagai konduktor. Selain nilai konduktivitas listrik, parameter lain yang dapat membedakan jenis material tertentu yaitu nilai celah pita energi (Sutrisno, 1986).

Berdasarkan nilai celah pita energi (*energy gap*), material semikonduktor mempunyai nilai celah pita energi lebih kecil dari 6 eV yaitu dapat berupa material murni maupun paduan (Subekti, 2003). Material murni semikonduktor

berasal dari golongan IVA pada sistem periodik unsur misalnya Silikon (Si) dan Germanium (Ge), sedangkan material paduan berasal dari golongan paduan III-V dan paduan II-VI pada sistem periodik unsur yaitu berupa paduan 2 unsur (*binary compound*), paduan 3 unsur (*ternary compound*) dan paduan 4 unsur (*quaternary compound*). Contoh dari material paduan misalnya GaAs, GaN, GaSb, ZnO, AlGaAs, GaNAs (Kurniawan, 2013). Nilai celah pita energi dari berbagai macam material semikonduktor disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai parameter dari berbagai macam material semikonduktor dalam divais optoelektronika pada keadaan mendekati temperatur ruang (300 K)

Material	Konstanta Kisi (Å)	Struktur Kristal	Struktur Celah Pita Energi	Celah Pita Energi (eV)
<i>Elementer</i>				
Si	5,43	<i>diamond</i>	<i>indirect</i>	1,12 (X)
Ge	5,64	<i>diamond</i>	<i>indirect</i>	0,67 (L)
<i>Paduan III-V</i>				
AlAs	5,66	<i>zincblende</i>	<i>indirect</i>	2,16 (X)
GaN	$a = 3,19$ $c = 5,19$	<i>wurzite</i>	<i>direct</i>	3,39
GaAs	5,65	<i>zincblende</i>	<i>direct</i>	1,42
InN	$a = 3,54$ $c = 5,71$	<i>wurzite</i>	<i>direct</i>	2,4
<i>Paduan II-VI</i>				
CdTe	6,48	<i>zincblende</i>	<i>direct</i>	1,44
HgS: β	5,84	<i>zincblende</i>	<i>direct</i>	2,5
HgSe	6,08	<i>zincblende</i>	<i>direct</i>	2,5
ZnSe	5,65	<i>zincblende</i>	<i>direct</i>	2,67

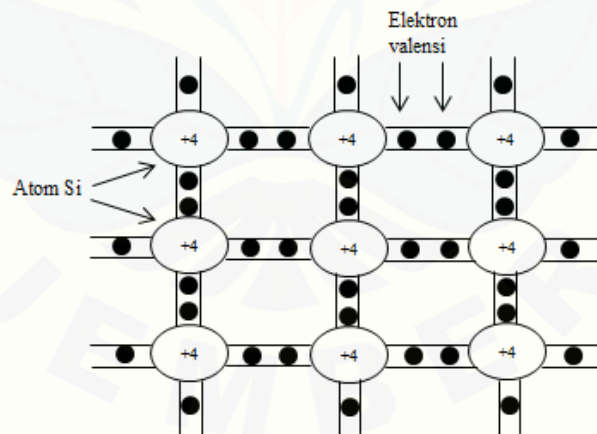
Sumber: Fukuda (1999).

Menurut Purri dan Babbar (2001), ciri khas dari material semikonduktor yaitu konduktivitas listrik dan efektivitas pita energi dari material tersebut dapat

diubah dengan cara memberikan impuritas (ketidakhayalan) yang dapat mempengaruhi sifat listrik dan optiknya. Proses pemberian ketidakhayalan ini dengan cara menambahkan atom-atom pengotor ke dalam material semikonduktor secara terkontrol yang disebut dengan *doping*. Berdasarkan penambahan atom-atom pengotor tersebut, material semikonduktor diklasifikasikan menjadi dua yaitu semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik.

2.1.1 Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik merupakan semikonduktor murni atau tidak *terdoping*, sehingga tidak ada penambahan atom-atom pengotor ke dalam material tersebut (Purri dan Babbar, 2001). Selain itu, semikonduktor disebut intrinsik jika mayoritas pembawa muatan bebas (elektron dan *hole*) berasal dari atom-atom semikonduktor itu sendiri (Colinge dan Colinge, 2005). Contoh dari semikonduktor intrinsik yaitu Silikon (Si) dan Germanium (Ge). Struktur ikatan kristal Silikon disajikan pada Gambar 2.1.

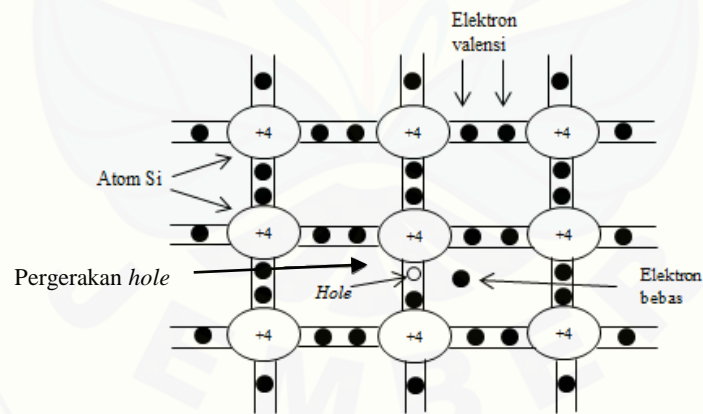


Gambar 2.1 Ikatan kovalen kristal Silikon (Sumber: Purri dan Babbar, 2001)

Pada Gambar 2.1 merepresentasikan keadaan ketika temperatur 0 K yaitu semua elektron valensi dari Silikon terikat erat dalam ikatan kovalen. Pada keadaan tersebut, material semikonduktor bersifat sebagai insulator. Jika

temperatur meningkat di atas 0 K, maka elektron dalam kristal semikonduktor akan menyerap energi termal yang cukup untuk memutuskan ikatan kovalen tersebut (Purri dan Babbar, 2001; Kurniawan, 2013). Energi minimal yang diperlukan sebuah elektron untuk memutuskan ikatan kovalen sebanding dengan nilai celah pita energi (*energy gap*) dari suatu material semikonduktor. Elektron yang berhasil memutuskan ikatan kovalen disebut dengan elektron konduksi atau elektron bebas, sedangkan tempat kosong yang terbentuk akibat terlepasnya elektron dari ikatan kovalen disebut dengan *hole* (lubang) (Subekti, 2003; Purri dan Babbar, 2001).

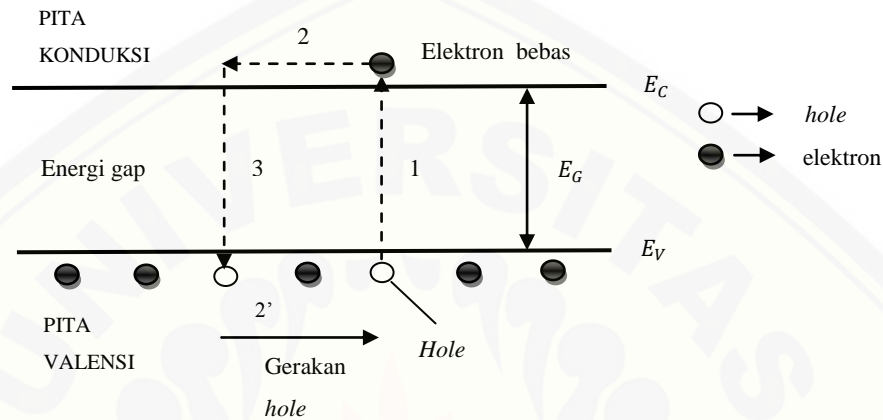
Hole (lubang) menjadi daerah yang bermuatan positif, sedangkan elektron bebas akan bermuatan lebih negatif. Kedua muatan ini berkontribusi dalam munculnya aliran arus listrik pada semikonduktor murni. Jika *hole* terisi oleh elektron valensi dari ikatan kovalen atom tetangganya, maka seolah-olah terjadi pergerakan *hole* yaitu dari tempat kosong lama menuju tempat yang baru. Ilustrasi pergerakan *hole* disajikan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Ilustrasi pergerakan *hole* pada Silikon (Sumber: Purri dan Babbar, 2001)

Proses terjadinya elektron bebas yang menyebabkan terbentuknya *hole* disebut dengan generasi yaitu peristiwa terciptanya pasangan elektron-*hole* dalam semikonduktor. Pada diagram energi, peristiwa generasi sebuah elektron bebas diilustrasikan dengan terjadinya transisi elektron dari pita valensi menuju pita

konduksi yaitu ditunjukkan oleh angka 1 dalam Gambar 2.3. Peristiwa generasi inilah yang menciptakan pembawa muatan bebas, sehingga dalam material semikonduktor intrinsik konsentrasi elektron sama dengan konsentrasi *hole* (Subekti, 2003).



Gambar 2.3 Ilustrasi peristiwa generasi dan rekombinasi (Sumber: Subekti, 2003)

Dari Gambar 2.3, angka 1 menunjukkan proses generasi sedangkan angka 3 menunjukkan proses rekombinasi. Menurut Purri dan Babbar (2001), rekombinasi merupakan suatu proses transisi elektron dari pita konduksi menuju pita valensi dengan melepas sejumlah energi yang nilainya sebesar celah pita energi (*energy gap*) dari material semikonduktor. Pelepasan energi ini dalam bentuk radiasi gelombang elektromagnetik. Pada semikonduktor intrinsik, laju generasi sebanding dengan laju rekombinasi dengan konsentrasi elektron sama dengan konsentrasi hole yaitu:

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

dimana n adalah konsentrasi elektron, p adalah konsentrasi *hole* dan n_i adalah konsentrasi intrinsik pembawa muatan pada semikonduktor. Adapun E_V merupakan tingkat energi pada pita valensi, E_C merupakan tingkat energi pada pita konduksi dan E_G merupakan nilai celah pita energi dari material semikonduktor. Sementara itu, pita valensi merupakan tempat keberadaan *hole*

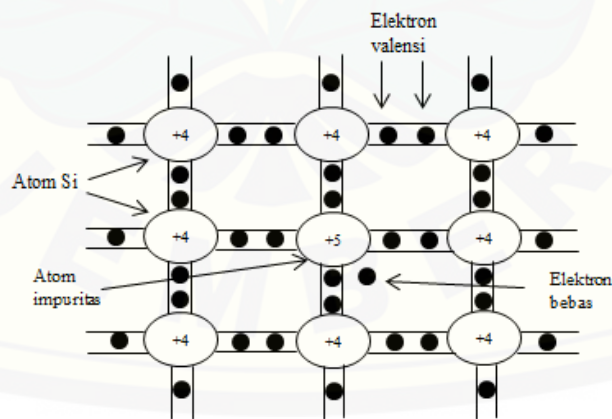
serta elektron yang masih terikat dengan ikatan kovalen dan pita konduksi merupakan tempat keberadaan elektron bebas pada material semikonduktor.

2.1.2 Semikonduktor Ekstrinsik

Pemberian atom impuritas yaitu proses *doping* merupakan metode yang tepat serta efisien untuk meningkatkan konduktivitas dari suatu semikonduktor intrinsik. Peristiwa ini dapat mengubah sifat kelistrikan dari material semikonduktor. Material semikonduktor intrinsik yang ditambahkan atom impuritas dikenal sebagai semikonduktor ekstrinsik. Berdasarkan jenis pemberian atom impuritasnya, semikonduktor ekstrinsik dibedakan menjadi dua jenis yaitu semikonduktor tipe-*n* dan tipe-*p*.

a. Semikonduktor Ekstrinsik Tipe-*n*

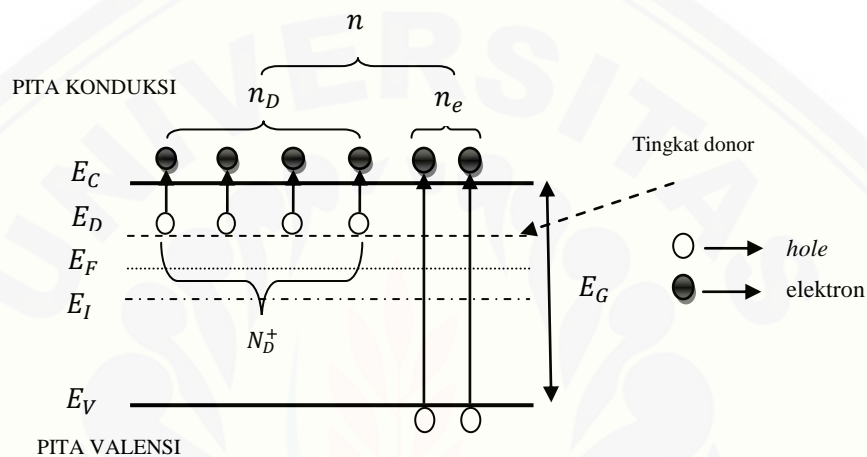
Semikonduktor ekstrinsik tipe-*n* terjadi ketika semikonduktor intrinsik ditambahkan atom impuritas dari golongan VA dalam sistem periodik. Ilustrasi peristiwa terbentuknya semikonduktor ekstrinsik tipe-*n* disajikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Kristal Silikon tipe-*n* (Sumber: Purri dan Babbar, 2001)

Berdasarkan pada Gambar 2.4, kristal Silikon yang memiliki elektron valensi sejumlah empat akan kelebihan satu elektron jika ditambahkan dengan unsur

Fosfor (P) yang memiliki elektron valensi sejumlah lima. Kelebihan satu elektron ini mengakibatkan konsentrasi elektron dalam semikonduktor meningkat. Oleh sebab itu, semikonduktor tipe ini sering disebut dengan tipe donor yaitu material dengan pembawa muatan mayoritas berupa elektron. Selanjutnya, berdasarkan diagram pita energi, semikonduktor ekstrinsik tipe- n dijelaskan seperti Gambar 2.5 berikut ini.



Gambar 2.5 Diagram pita energi semikonduktor ekstrinsik tipe- n (Sumber: Fukuda, 1999)

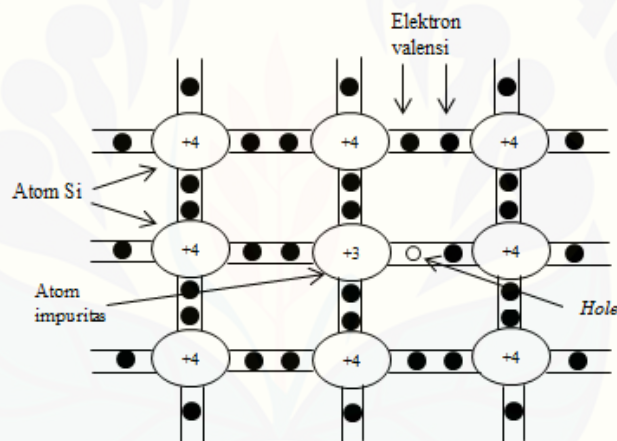
Pada Gambar 2.5, E_G adalah nilai celah pita energi (*energy gap*), E_F adalah energi fermi, E_I adalah energi intrinsik dan E_D adalah tingkat energi donor. Ketika atom-atom dalam material semikonduktor memiliki energi termal akibat peningkatan temperatur dalam material, maka atom donor akan terionisasi sehingga elektron akan bertransisi menuju pita konduksi (Fukuda, 1999; Subekti, 2003). Oleh sebab itu, atom donor menjadi bermuatan positif yaitu N_D^+ , sehingga berlaku persamaan total muatan negatif sama dengan total muatan positif (Fukuda, 1999; Purri dan Babbar, 2001):

$$n = n_D + n_e = N_D^+ + p \quad (2.2)$$

Dimana n_D merupakan konsentrasi elektron dari donor yang terionisasi, n_e merupakan konsentrasi elektron dari pita valensi, p merupakan konsentrasi *hole* dan n merupakan total konsentrasi elektron pada semikonduktor tipe- n .

b. Semikonduktor Ekstrinsik Tipe-p

Semikonduktor ekstrinsik tipe-p terjadi ketika suatu atom impuritas dari unsur golongan IIIA ditambahkan ke dalam semikonduktor intrinsik. Misalnya atom Silikon yang ditambahkan dengan unsur Gallium (Ga) maupun Boron (B). Silikon memiliki elektron valensi sejumlah empat, sedangkan Gallium memiliki elektron valensi sejumlah tiga, sehingga akan terjadi kekurangan satu elektron dalam ikatan atau terjadi kelebihan *hole*. Oleh sebab itu, semikonduktor tipe-p disebut dengan tipe akseptor karena pembawa muatannya didominasi oleh *hole*. Ilustrasi peristiwa terbentuknya semikonduktor tipe-p disajikan dalam Gambar 2.6.



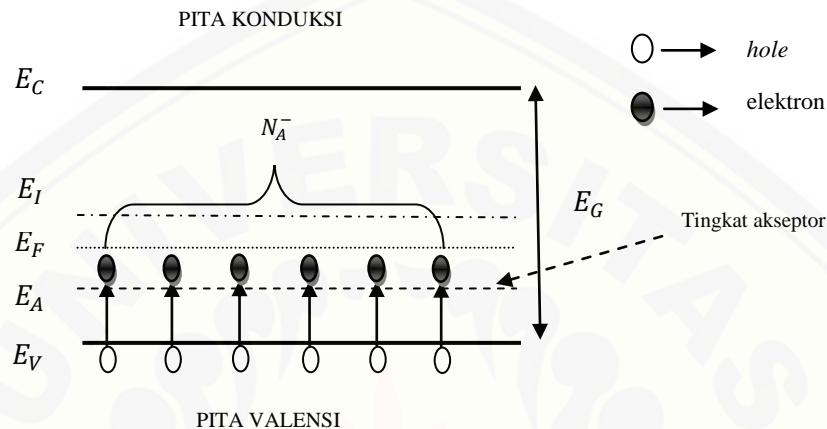
Gambar 2.6 Kristal Silikon tipe-p (Sumber: Purri dan Babbar, 2001)

Sementara itu, Gambar 2.7 di bawah ini menjelaskan diagram pita energi dari semikonduktor tipe-p. Adapun E_A merupakan tingkat energi akseptor. Ketika atom-atom dalam semikonduktor memiliki energi termal, maka elektron pada pita valensi dapat berpindah menuju tingkat energi akseptor, sehingga peristiwa penangkapan elektron tersebut menyebabkan atom akseptor (N_A) menjadi bermuatan negatif yaitu N_A^- (Subekti, 2003; Purri dan Babbar, 2001). Menurut Fukuda (1999); Setiawan *et al.* (dalam Kurniawan, 2013), ketika mendekati temperatur ruang maka atom akseptor akan terionisasi seluruhnya, sehingga

besarnya konsentrasi *hole* (p) sama dengan konsentrasi atom akseptor yang terionisasi (N_A^-) yaitu:

$$p = N_A^- \quad (2.3)$$

Diagram pita energi dari semikonduktor tipe- p dijelaskan pada Gambar 2.7 berikut ini.



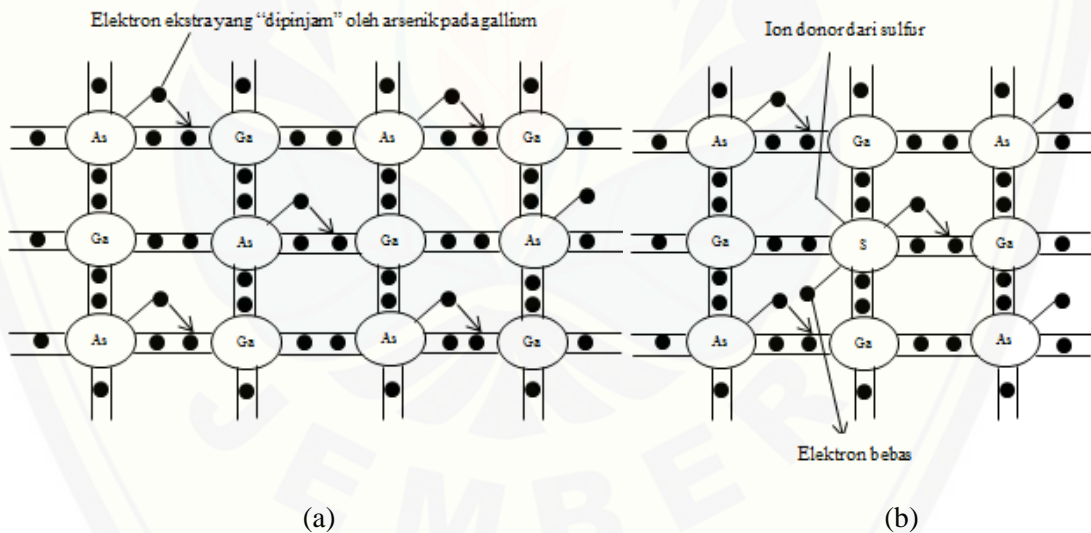
Gambar 2.7 Diagram pita energi semikonduktor ekstrinsik tipe- p (Sumber: Subekti, 2003)

2.1.3 Semikonduktor Paduan

Selain jenis intrinsik dan ekstrinsik, material semikonduktor juga dapat berupa material paduan. Semikonduktor paduan diciptakan dengan menggabungkan unsur golongan IIIA dengan VA maupun golongan IIA dengan VIA, sehingga dibedakan menjadi dua yaitu paduan III-V dan paduan II-VI yang sering disebut dengan *compound semiconductor*. Contoh dari material semikonduktor paduan misalnya GaAs, GaN, ZnS, CdTe dan sebagainya.

Model ikatan kimia dalam semikonduktor paduan terbentuk dengan proses meminjaman elektron. Unsur yang memiliki elektron valensi lebih tinggi akan meminjamkan elektron kepada unsur yang memiliki elektron valensi lebih rendah (Subekti, 2003). Ilustrasi kisi dua dimensi kristal semikonduktor GaAs yang merupakan salah satu contoh dari semikonduktor paduan III-V disajikan dalam Gambar 2.8 di bawah ini. Dari ilustrasi Gambar 2.8 (a) direpresentasikan bahwa kristal semikonduktor GaAs memiliki sifat ikatan kimia yang ekuivalen dengan

semikonduktor intrinsik yaitu Si. Oleh sebab itu, kristal semikonduktor GaAs disebut juga dengan semikonduktor paduan murni meskipun material tersebut tersusun dari penggabungan dua jenis atom yang berbeda yaitu Ga dan As. Selain itu, pada Gambar 2.8 (b) dijelaskan proses penambahan atom impuritas dalam kristal semikonduktor GaAs dengan unsur S yang memiliki elektron valensi sejumlah enam. Dari penambahan atom impuritas tersebut, kristal semikonduktor GaAs menjadi bertipe-*n* dengan kelebihan satu elektron dalam ikatan yang selanjutnya menjadi elektron bebas. Jika ditinjau berdasarkan susunan keperiodikan atomnya, kebanyakan kristal semikonduktor paduan III-V memiliki struktur *zincblende*, kristal semikonduktor paduan II-VI memiliki struktur *wurtzite* sedangkan untuk kristal semikonduktor intrinsik seperti Si dan Ge memiliki struktur *diamond* (Fukuda, 1999).



Gambar 2.8 Ilustrasi kisi dua dimensi kristal semikonduktor GaAs: (a) Semikonduktor murni dan (b) Semikonduktor tipe-*n* (Sumber: Subekti, 2003)

Dalam semikonduktor paduan terkandung dua atom impuritas yaitu tipe-*p* dan tipe-*n*, sehingga netralitas kelistrikan dituliskan sebagai berikut (Purri dan Babbar, 2001):

$$N_D^+ + p = N_A^- + n \quad (2.4)$$

Pada keadaan $N_D^+ = N_A^-$ maka diperoleh:

$$p = n = n_i \quad (2.5)$$

Untuk keadaan konsentrasi donor sama dengan konsentrasi akseptor, maka semikonduktor berperilaku sebagai semikonduktor intrinsik. (Purri dan Babbar, 2001).

Pada semikonduktor paduan intrinsik (murni) seperti kristal semikonduktor GaAs, konsentrasi pembawa muatan (elektron dan *hole*) diperoleh berdasarkan kemungkinan rapat keadaan di dalam pita valensi dan pita konduksi sebagai fungsi distribusi Fermi-Dirac. Berdasarkan fungsi distribusi Fermi-Dirac, jumlah elektron tiap volume dalam suatu rentang energi (E sampai $(E + dE)$) memenuhi persamaan (Purri dan Babbar, 2001):

$$dn = D(E)f(E)dE \quad (2.6)$$

adapun

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \quad (2.7)$$

dan

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Dimana $D(E)$ merupakan rapat keadaan yang mendefinisikan jumlah total elektron tiap volume dalam semikonduktor, sedangkan $f(E)$ merupakan fungsi distribusi Fermi yang mendefinisikan peluang keberadaan elektron dalam tingkat energi E . Kemudian m^* merupakan massa elektron yaitu sebesar $9,1 \times 10^{-31}$ kg, k merupakan konstanta Boltzmann yaitu sebesar $8,614 \times 10^{-5}$ eV/K dan h merupakan tetapan Plank's yaitu sebesar $4,136 \times 10^{-15}$ eV s. Selanjutnya dengan mensubstitusikan persamaan (2.7) dan (2.8) ke dalam persamaan (2.6), maka diperoleh (Purri dan Babbar, 2001):

$$dn = \frac{4\pi}{h^3} (2m_n^*)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} dE \quad (2.9)$$

kemudian dengan mengintegrasikan persamaan (2.9) maka diperoleh konsentrasi elektron di dalam pita konduksi yaitu (Purri dan Babbar, 2001):

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[- \left(\frac{E_C - E_F}{kT} \right) \right] \quad (2.10)$$

dengan m_n^* merupakan massa efektif elektron di dalam pita konduksi.

Pada *hole*, berdasarkan fungsi distribusi Fermi-Dirac, jumlah *hole* tiap volume dalam suatu rentang energi (E sampai $(E + dE)$) memenuhi persamaan (Purri dan Babbar, 2001):

$$dp = D(E)[1 - f(E)]dE \quad (2.11)$$

dimana

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_p^*)^{\frac{3}{2}} (E_V - E)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Nilai $f(E)$ sesuai dengan persamaan (2.8) dan m_p^* merupakan massa efektif *hole* di dalam pita valensi, maka nilai konsentrasi *hole* diperoleh (Purri dan Babbar, 2001):

$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left[- \left(\frac{E_F - E_V}{kT} \right) \right] \quad (2.13)$$

Pada penjelasan sebelumnya yaitu persamaan (2.1) dinyatakan bahwa semikonduktor intrinsik memiliki jumlah konsentrasi elektron sama dengan konsentrasi *hole*. Untuk itu, dalam semikonduktor paduan murni juga berlaku demikian. Menurut Purri dan Babbar (2001) dalam hukum aksi-massa, untuk semua semikonduktor berlaku bahwa hasil perkalian antara konsentrasi elektron (n) dan konsentrasi *hole* (p) adalah konstan dan sama dengan konsentrasi pembawa muatan intrinsik kuadrat (n_i^2).

$$np = n_i^2 \quad (2.14)$$

Selanjutnya, dengan mensubstitusikan persamaan (2.10) dan (2.13) ke dalam persamaan (2.14), maka diperoleh konsentrasi pembawa muatan intrinsik (n_i) dinyatakan dengan (Purri dan Babbar, 2001):

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.15)$$

Dimana E_F merupakan tingkat energi Fermi dalam struktur pita energi, E_V merupakan tingkat energi pada puncak pita valensi dan E_C merupakan tingkat energi dasar pada pita konduksi. Untuk material kristal semikonduktor GaAs, ketika mendekati temperatur ruang (300 K) nilai celah pita energi (E_g) sebesar 1.43 eV (Singh, 2003; Fuller, 2001).

2.2 Proses Konduksi pada Semikonduktor

Pergerakan dari pembawa muatan (elektron dan *hole*) pada material semikonduktor menghasilkan konduksi listrik. Jika tidak ada pembawa muatan khususnya elektron yang tereksitasi (bertransisi ke pita energi konduksi), maka keadaan pada pita valensi dan pita konduksi berturut-turut yaitu terisi dan kosong yang mengakibatkan tidak terjadinya konduksi listrik. Proses konduksi listrik akibat pergerakan elektron dan *hole* menyebabkan terjadinya transportasi pembawa muatan dan fenomena hamburan dalam semikonduktor. Selanjutnya, fenomena hamburan akan memberi efek perubahan mobilitas pembawa muatan yang turut berpengaruh terhadap distribusi pembawa muatan serta sifat kelistrikan dalam material semikonduktor (Fukuda, 1999).

2.2.1 Transportasi Pembawa Muatan

Sifat kelistrikan dari suatu material semikonduktor dapat ditinjau berdasarkan distribusi pembawa muatan dalam material tersebut. Pada material semikonduktor, peristiwa pergerakan partikel pembawa muatan yaitu elektron dan *hole* disebut transportasi. Mekanisme transportasi (aliran muatan) oleh partikel pembawa muatan dibedakan menjadi dua jenis yaitu difusi (*diffusion*) dan *drift* (Subekti, 2003).

a. Arus Difusi (*Diffusion*)

Arus difusi muncul akibat terjadinya proses difusi dalam semikonduktor yaitu peristiwa pergerakan aliran partikel pembawa muatan (elektron dan *hole*) dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah. Proses difusi tersebut akan menyebabkan konsentrasi elektron dan *hole* terdistribusi secara merata dalam material semikonduktor. Kerapatan arus difusi ditentukan oleh besarnya gradien konsentrasi pembawa muatan yang disebut dengan koefisien difusi (Subekti, 2003).

Koefisien difusi dalam semikonduktor dibedakan menjadi dua jenis yaitu koefisien difusi elektron (D_n) dan koefisien difusi *hole* (D_p). Pada proses difusi elektron akan menghasilkan *flux* elektron yaitu aliran elektron per satuan waktu per satuan luas pada daerah di dalam material semikonduktor. Selanjutnya, arus difusi elektron dituliskan ke dalam persamaan:

$$\bar{J}_{n-diff} = qD_n \left(\frac{\partial n}{\partial x} \right) \quad (2.16)$$

Untuk proses difusi *hole* akan menghasilkan *flux hole* yaitu aliran *hole* per satuan waktu per satuan luas. Selanjutnya, arus difusi *hole* yaitu:

$$\bar{J}_{p-diff} = -qD_p \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

Dimana q merupakan muatan elektron sebesar ($1,602 \times 10^{-19}$) C, \bar{J}_{n-diff} merupakan arus difusi elektron dan \bar{J}_{p-diff} merupakan arus difusi *hole* (Fukuda, 1999).

b. Arus *Drift*

Ketika suatu medan listrik diterapkan dalam kristal semikonduktor maka gaya listrik akan mempengaruhi pembawa muatan (elektron dan *hole*). Selanjutnya, pembawa muatan tersebut mengalami percepatan dan akan bergerak dalam material dimana gerakan itu dikenal sebagai *drift*. Rata-rata kecepatan *drift* dari pembawa muatan dinyatakan dengan parameter yaitu mobilitas (Subekti,

2003). Kecepatan *drift* pembawa muatan akibat medan listrik dinyatakan dengan persamaan (Purri dan Babbar, 2001):

$$\bar{v}_{dr} = \mu \bar{\xi} \quad (2.18)$$

dimana μ merupakan mobilitas pembawa muatan, \bar{v}_{dr} merupakan kecepatan *drift* dan $\bar{\xi}$ merupakan medan listrik yang diterapkan ke dalam material semikonduktor. Untuk pembawa muatan yaitu elektron, maka berlaku kecepatan *drift* elektron (\bar{v}_{n-dr}) dan mobilitas elektron μ_n , sedangkan untuk *hole* berlaku kecepatan *drift* *hole* (\bar{v}_{p-dr}) dan mobilitas *hole* (μ_p).

Gerakan pembawa muatan dalam semikonduktor dipengaruhi oleh adanya hamburan terhadap atom-atom impuritas terionisasi dan terhadap atom-atom penyusun kisi kristal. Gerakan tersebut menghasilkan arus *drift* dengan rapat arus *drift* elektron sebesar:

$$\bar{J}_{n-dr} = qn\mu_n\bar{\xi} \quad (2.19)$$

rapat arus *drift* elektron searah dengan medan listrik, meskipun arah gerakan elektron berlawanan dengan medan listrik (Subekti, 2003). Selanjutnya, rapat arus *drift* *hole* sebesar:

$$\bar{J}_{p-dr} = qp\mu_p\bar{\xi} \quad (2.20)$$

Dimana \bar{J}_{n-dr} merupakan rapat arus *drift* elektron, \bar{J}_{p-dr} merupakan rapat arus *drift* *hole* (Fukuda, 1999).

2.2.2 Fenomena Hamburan (*Scattering*)

Ketika temperatur pada material semikonduktor meningkat maka elektron akan bertransisi dari pita valensi menuju pita konduksi, sehingga menciptakan *hole* pada pita valensi. Saat elektron dan *hole* sebagai pembawa muatan dalam semikonduktor bergerak, maka akan memungkinkan terjadinya tumbukan/hamburan dengan sesama pembawa muatan maupun atom-atom impuritas. Arah dari pergerakan pembawa muatan berubah selama terjadi hamburan antara pembawa muatan dengan atom-atom impuritas, dimana hamburan tersebut menghasilkan interaksi elektrostatik yang mengakibatkan

ketidakteraturan dalam kisi-kisi kristal yang periodik dan rapat. Ketidakteraturan akibat impuritas tersebut disebut sebagai fenomena hamburan impuritas. Arah dari pergerakan pembawa muatan juga dapat berubah akibat terjadinya vibrasi kisi, sehingga terjadi interaksi antara pembawa muatan dengan atom kisi yang bervibrasi (Fukuda, 1999). Interaksi tersebut akan mengganggu keleluasaan pembawa muatan (elektron dan *hole*) dalam bergerak yang disebut sebagai fenomena hamburan kisi/fonon (Subekti, 2003).

Fenomena hamburan fonon yang terjadi dalam semikonduktor intrinsik yaitu hamburan fonon akustik. Di sisi lain, dalam semikonduktor paduan 2 unsur seperti GaAs yaitu terjadi hamburan fonon akustik dan fonon optik dimana kedua jenis fenomena hamburan tersebut dibedakan berdasarkan frekuensi osilasinya. Sementara itu, untuk kristal semikonduktor paduan 3 unsur dan 4 unsur seperti InGaAs, tidak hanya terjadi fenomena hamburan fonon akustik dan fonon optik, tetapi juga terjadi fenomena hamburan *alloy* karena susunan atom yang acak dalam kristal semikonduktor (Fukuda, 1999).

Fenomena hamburan dalam semikonduktor tersebut akan mengakibatkan pembawa muatan (elektron dan *hole*) kehilangan sebagian besar atau keseluruhan energinya (Subekti, 2003). Hal ini akan mempengaruhi rata-rata kecepatan *drift* dari pembawa muatan yang terukur dengan parameter yaitu mobilitas. Akibatnya, nilai mobilitas pembawa muatan dapat berubah karena fenomena hamburan dalam semikonduktor tersebut. Perubahan nilai mobilitas akan turut mempengaruhi perubahan distribusi pembawa muatan yang mengarah ke perubahan sifat kelistrikan pada material semikonduktor.

2.2.3 Efek Mobilitas

Mobilitas merupakan suatu parameter yang menyatakan seberapa baik suatu pembawa muatan (elektron dan *hole*) dapat bergerak ketika diterapkan medan listrik ke dalam material semikonduktor. Nilai dari mobilitas pembawa muatan dapat berubah akibat terjadinya fenomena hamburan. Dalam semikonduktor,

fenomena hamburan yang mendominasi material dibedakan menjadi dua yaitu hamburan impuritas dan hamburan fonon/kisi (Subekti, 2003).

Ketika temperatur dalam kristal semikonduktor meningkat, maka vibrasi kisi akan semakin intensif akibatnya hamburan fonon akan meningkat (Fukuda, 1999). Hal ini dikarenakan terjadinya interaksi antara pembawa muatan (elektron dan *hole*) dengan atom kisi yang bervibrasi, sehingga gerakan pembawa muatan dalam material menjadi terganggu dan tidak leluasa lagi. Gangguan ini menyebabkan nilai mobilitas menjadi menurun ketika temperatur semakin meningkat. Teori hamburan menyatakan bahwa nilai mobilitas akibat fenomena hamburan fonon memenuhi persamaan yaitu (Subekti, 2003; Cardona dan Yu, 2001):

$$\mu_p \propto T^{-3/2} \quad (2.21)$$

dimana μ_p merupakan nilai mobilitas akibat fenomena hamburan fonon dengan tingkat kejadian hamburan merupakan fungsi temperatur.

Ketika jumlah atom impuritas semakin banyak, maka kemungkinan terjadinya hamburan antara pembawa muatan dengan atom impuritas semakin meningkat. Pada temperatur ruang (300 K), maka atom impuritas akan terionisasi, sehingga terjadi interaksi antara elektron dan *hole* dengan atom impuritas. Interaksi tersebut menghasilkan fenomena hamburan impuritas yang nilainya sebanding dengan peningkatan temperatur yaitu (Subekti, 2003; Cardona dan Yu, 2001):

$$\mu_I \propto T^{3/2} \quad (2.22)$$

dimana μ_I merupakan nilai mobilitas akibat fenomena hamburan impuritas. Selanjutnya, mobilitas total (μ) dalam semikonduktor dinyatakan dengan (Fukuda, 1999; Subekti, 2003):

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_I} + \frac{1}{\mu_p} \quad (2.23)$$

Dari persamaan (2.23) tersebut dapat dianalisa bahwa semakin banyak mekanisme hamburan yang terjadi dalam material semikonduktor, maka nilai mobilitas

totalnya akan semakin menurun. Nilai mobilitas dapat berubah bergantung pada temperatur serta konsentrasi dopan (atom impuritas) pada material semikonduktor. Nilai mobilitas pembawa muatan dari beberapa jenis material semikonduktor disajikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai mobilitas pada $T = 300$ K untuk konsentrasi dopan yang rendah

Material	μ_n ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	μ_p ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)
Si	1350	480
GaAs	8500	400
Ge	3900	1900

Sumber: Subekti (2003).

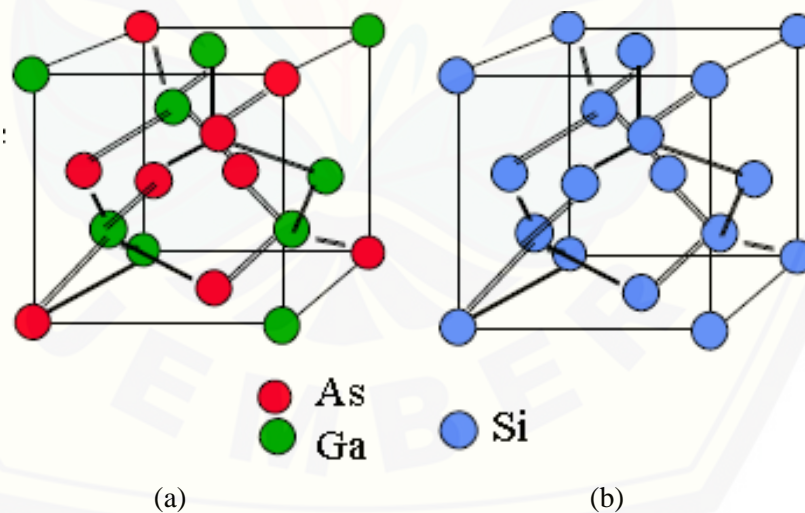
2.3 Kristal Semikonduktor Gallium Arsenida (GaAs)

Pada semikonduktor intrinsik seperti kristal Silikon, konfigurasi atom dan susunan ikatan atomnya tersusun dari ikatan kovalen. Ikatan kovalen tersebut muncul dari sifat bahwa atom memelihara bentuk subkulit luar tertutup yang terkarakterisasi dari proses berbagi elektron antara atom-atom yang berdekatan. Atom Si memiliki elektron valensi berjumlah empat pada subkulit terluar karena unsur tersebut termasuk ke dalam golongan IVA pada sistem periodik serta setiap atom diikat oleh dua elektron dengan atom terdekatnya. Elektron tersebut terdistribusi secara merata di seluruh kisi-kisi atom karena kristal Si hanya terdiri dari satu jenis atom saja. Keadaan ikatan tersebut ekuivalen dengan semikonduktor paduan yang berstruktur kristal *zincblende* seperti GaAs dimana kisi-kisi atomnya tersusun dari unsur Ga dan As. Struktur *zincblende* memiliki kesamaan dengan struktur *diamond* (pada Si) yaitu memiliki jumlah dua atom dalam setiap sel primitifnya. (Fukuda, 1999; Cardona dan Yu, 2001).

2.3.1 Struktur Ikatan pada Kristal Semikonduktor GaAs

Gallium Arsenida (GaAs) merupakan salah satu contoh material kristal semikonduktor paduan III-V yang memiliki struktur *zincblende*. Keadaan ikatan dalam semikonduktor paduan ini sedikit berbeda dengan Silikon karena material semikonduktor paduan terdiri dari atom-atom yang berasal dari golongan berbeda di dalam sistem periodik. Pada kristal semikonduktor GaAs, atom-atom kisi Ga berikatan dengan atom-atom kisi As. Atom Ga memiliki tiga elektron valensi sedangkan atom As memiliki lima elektron valensi. Ikatan antara atom kisi Ga dan atom kisi As dihasilkan oleh dua elektron yang saling mengikat dengan cara yang serupa dengan Si. Akan tetapi, elektron dalam kristal semikonduktor GaAs tidak terbagi seragam melainkan cenderung bergeser ke arah atom kisi As (Fukuda, 1999).

Struktur kristal dalam semikonduktor GaAs dan Si diilustrasikan berdasarkan Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram skematik struktur kristal: (a) *zincblende* pada semikonduktor GaAs dan (b) *diamond* pada semikonduktor Si (Sumber: Fuller, 2001)

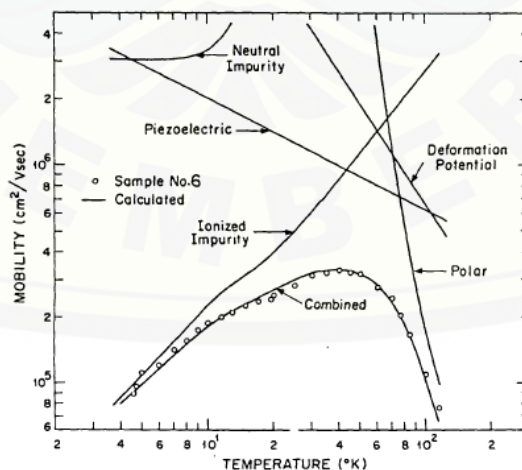
Ditinjau berdasarkan ikatan elektron dalam kristal semikonduktor GaAs maka elektron tidak terdistribusi merata di seluruh kisi-kisi atom, hal ini disebut sebagai

karakter ikatan ionik dimana terjadi ikatan kimia oleh gaya elektrostatik antara atom-atom positif dan negatif. Oleh sebab itu, ikatan dalam kristal semikonduktor GaAs terdiri dari sebagian besar kovalen dan sebagian kecil ionik.

2.3.2 Mekanisme Hamburan pada Kristal Semikonduktor GaAs

Menurut Manion (1988), fenomena hamburan yang terjadi di dalam material semikonduktor paduan seperti GaAs antara lain hamburan impuritas terionisasi, impuritas netral, *deformation potential*, piezoelektrik dan polar. Manion menginvestigasi material persambungan AlGaAs/GaAs secara eksperimen. Pada investigasi tersebut tercantum berbagai macam mekanisme hamburan yang terjadi dalam material semikonduktor GaAs dengan data berupa grafik hubungan antara mobilitas elektron terhadap temperatur yang diperoleh dari Stillman *et al.* (1970). Dari grafik tersebut, diperlihatkan bahwa setiap mekanisme hamburan memberikan efek yang berbeda terhadap nilai mobilitas elektron akibat peningkatan temperatur. Grafik eksperimen nilai mobilitas elektron terhadap temperatur disajikan pada Gambar 2.10.

Pada Gambar 2.10 diperlihatkan jenis-jenis mekanisme hamburan dalam material semikonduktor GaAs.



Gambar 2.10 Grafik eksperimen nilai mobilitas elektron terhadap temperatur pada berbagai mekanisme hamburan dalam material semikonduktor GaAs (Sumber: Stillman *et al.* dalam Manion, 1988)

Setiap hamburan memiliki pengaruh yang berbeda terhadap nilai mobilitas elektron ketika temperatur ditingkatkan. Kemudian, semua jenis mekanisme hamburan tersebut berpotensi dalam menentukan total mobilitas dalam material semikonduktor GaAs yang pada gambar dinyatakan dengan *combined*. Pada subbab 2.2.3 tentang efek mobilitas dijelaskan bahwa semakin banyak mekanisme hamburan yang terjadi dalam material semikonduktor, maka nilai total mobilitas akan semakin menurun. Untuk setiap mekanisme hamburan akan dijelaskan sebagai berikut.

a. Hamburan Impuritas Terionisasi

Jika suatu semikonduktor ditambahkan atom impuritas, maka kemungkinan akan terjadi peristiwa hamburan antara pembawa muatan (elektron dan *hole*) dengan atom impuritas. Hamburan tersebut dikenal sebagai hamburan impuritas terionisasi. Peristiwa hamburan tersebut mempengaruhi nilai mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur dengan memenuhi persamaan sebagai berikut (Seeger, 1989):

$$\mu = \frac{7}{2^{\frac{7}{2}}(4\pi\kappa\kappa_0)^2(kT)^{\frac{3}{2}}} \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}}Z^2e^3m_n^{*\frac{1}{2}}N_i[\ln(1 + \beta_{BH}^2) - \beta_{BH}^2/(1 + \beta_{BH}^2)]} \quad (2.24)$$

Dimana β_{BH} merupakan konstanta *Brooks-Herring* yang dinyatakan dalam persamaan:

$$\beta_{BH} = \left(\frac{\kappa}{16}\right)^{1/2} \frac{T}{100K} \left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)^{1/2} \left(\frac{2,08 \times 10^{18} cm^{-3}}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

Keterangan:

μ = mobilitas elektron (cm^2/Vs)

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

T = temperatur (K)

m_n^* = massa efektif elektron pada GaAs ($0,068m_0$)

m_0 = massa elektron ($9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

κ = permitivitas relatif material semikonduktor GaAs (13,1)

κ_0 = permitivitas vakum ($8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

N_i = total konsentrasi atom impuritas terionisasi dalam kristal (cm^{-3})

Ze = muatan atom impuritas yang terionisasi

n = konsentrasi elektron (cm^{-3}).

b. Hamburan Impuritas Netral

Hamburan impuritas netral terjadi antara elektron bebas dengan atom impuritas netral di dalam kisi-kisi kristal. Peristiwa hamburan ini serupa dengan hamburan dari elektron yang berenergi rendah di dalam gas. Hamburan ini tidak bergantung terhadap temperatur material semikonduktor, karena peristiwa hamburan bisa terjadi pada temperatur rendah mendekati 0 K. Peristiwa hamburan tersebut berpotensi menyebabkan perubahan nilai mobilitas material yang dinyatakan dalam persamaan (Seeger, 1989):

$$\mu = \frac{q}{20a_B \hbar} \frac{m_n^*}{m_0} \kappa N^x \quad (2.26)$$

Keterangan:

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

N^x = konsentrasi atom impuritas netral (cm^{-3})

a_B = radius Bohr ($0,053 \text{ nm}$)

\hbar = konstanta Plank's ($0,658 \times 10^{-15} \text{ eVs}$).

c. Hamburan Optik (Fonon Optik)

Pada temperatur di atas 100 K, semikonduktor diidentifikasi mengalami hamburan fonon (Adachi, 1992). Salah satu jenis hamburan fonon tersebut adalah hamburan fonon optik yang kebanyakan terjadi dalam semikonduktor polar. Semikonduktor polar merupakan material yang memiliki interaksi elektron-fonon

sangat kuat (Cardona dan Yu, 2001). Menurut Singhal *et al.* (2007), hamburan fonon optik sering disebut dengan fonon polar karena merupakan karakteristik vibrasi fonon yang terjadi pada material semikonduktor polar. Hamburan fonon optik mempengaruhi nilai mobilitas elektron dengan persamaan (Fortini dalam Karthik *et al.* 2011):

$$\mu = 25,4 \frac{T^{\frac{1}{2}}}{T_D} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{\varepsilon_s} \right)^{-1} \left(\frac{m_0}{m_n^*} \right)^{\frac{3}{2}} (e^Z - 1) G(Z) \quad (2.27)$$

Adapun Z merupakan perbandingan temperatur Debye dengan temperatur material yang dituliskan dengan:

$$Z = \left(\frac{T_D}{T} \right) \quad (2.28)$$

Dimana T_D merupakan temperatur fonon polar Debye GaAs (416 K), $G(Z)$ merupakan konstanta Howarth-Soundheimer, ε_s merupakan konstanta dielektrik statis (12,91 F/cm) dan ε merupakan konstanta dielektrik frekuensi tinggi (10,92 F/cm).

d. Hamburan Piezoelektrik

Suatu kristal semikonduktor yang terdiri dari atom-atom yang tidak sejenis cenderung bersifat semikonduktor polar misalnya pada semikonduktor paduan III-V. Struktur ikatan dalam semikonduktor polar sebagian kecil berupa ikatan ionik. Ketika terjadi peningkatan temperatur dalam material, maka akan terjadi suatu hamburan fonon akustik yaitu peristiwa hamburan piezoelektrik. Hamburan ini terjadi akibat osilasi ion pada ikatan yang menghasilkan gelombang longitudinal akustik. Peristiwa ini dapat mengganggu pergerakan elektron dalam material semikonduktor, sehingga berpengaruh terhadap mobilitasnya. Menurut Seeger (1989), hubungan pengaruh mobilitas elektron secara teoritik memenuhi persamaan:

$$\mu = \frac{16\sqrt{2}\pi}{3} \frac{\hbar^2 \kappa \kappa_0}{m_n^{*\frac{3}{2}} q K^2 (kT)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.29)$$

Sehingga hubungan mobilitas terhadap temperatur yaitu:

$$\mu \propto T^{-\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

Dimana K^2 merupakan perbandingan kerja mekanik dengan kerja total yaitu:

$$K^2 = \frac{e_{pz}^2/c_l}{\kappa\kappa_0 + e_{pz}^2/c_l} \quad (2.31)$$

Dimana e_{pz} merupakan konstanta piezoelektrik material dan c_l merupakan tekanan mekanik (N/cm^2).

e. *Deformation Potential Scattering*

Kristal semikonduktor memiliki susunan atom periodik dan rapat dengan posisi setimbang. Posisi kesetimbangan tersebut sering dinyatakan sebagai fungsi periodik potensial sempurna dalam zat padat. Fungsi periodik potensial sempurna dalam kristal semikonduktor akan memberikan pengaruh terhadap keleluasaan elektron untuk bergerak pada material semikonduktor (Subekti, 2003). Ketika kristal semikonduktor ditingkatkan temperaturnya, maka atom-atom dalam material tersebut akan bervibrasi disekitar posisi kesetimbangan dalam kristal yang menyebabkan terjadinya hamburan fonon/kisi. Peristiwa vibrasi kisi yang terjadi akibat adanya osilasi gelombang akustik menyebabkan hamburan fonon yang umumnya disebut sebagai hamburan fonon akustik (Seeger, 1989).

Peristiwa hamburan fonon akustik dapat menyebabkan perubahan posisi periodik atom dalam kristal. Proses perubahan posisi periodik tersebut ditandai dengan perubahan jarak antar titik kisi di dalam kristal (Rusdiana *et al.*, 2010). Menurut Singhal *et al.* (2007), perubahan jarak antar titik kisi terhadap posisi kesetimbangan akibat terjadinya vibrasi kisi disebut sebagai *deformation potential scattering*. *Deformation potential scattering* terjadi akibat hamburan fonon dalam kristal semikonduktor yang dapat mengganggu pergerakan elektron. Oleh sebab itu, *deformation potential scattering* dalam semikonduktor dinyatakan sebagai interaksi elektron-fonon (Cardona dan Yu, 2001). Gangguan pergerakan elektron

tersebut menyebabkan perubahan nilai mobilitas elektron yang dinyatakan dengan persamaan (Rusdiana *et al.*, 2010):

$$\mu = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3E_1^2} \frac{q\hbar^4 \rho s^2}{m_n^{*5/2} (kT)^{3/2}} \quad (2.32)$$

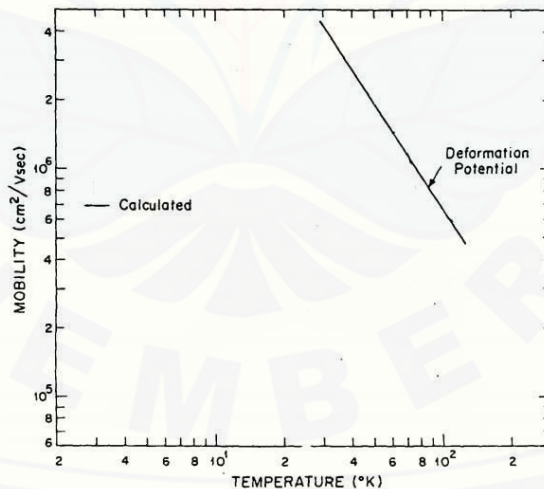
sehingga, hubungan mobilitas terhadap temperatur yaitu:

$$\mu \propto T^{-3/2} \quad (2.33)$$

Selanjutnya, nilai mobilitas elektron mempengaruhi waktu relaksasi (*lifetime*) dengan persamaan (Karthik *et al.*, 2011; Subekti, 2003; Seeger, 1989):

$$\tau = \frac{\mu m_n^*}{q} \quad (2.34)$$

Dimana ρ merupakan kerapatan ($5,32 \text{ g/cc}$), E_1 merupakan konstanta deformasi potensial material GaAs ($8,5 \text{ eV}$), s merupakan kecepatan suara ($5,24 \times 10^5 \text{ cm/s}$) dan τ merupakan waktu relaksasi/*lifetime* (s). Kemudian, grafik peristiwa *deformation potential scattering* akibat hamburan fonon disajikan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik eksperimen nilai mobilitas elektron terhadap temperatur dalam peristiwa *deformation potential scattering* pada material GaAs (Sumber: Stillman *et al.* dalam Manion, 1988)

2.4 Persamaan Dasar Divais Semikonduktor

Persamaan dasar dari material semikonduktor meliputi persamaan Poisson dan Kontinuitas Pembawa Muatan. Setiap persamaan tersebut berkontribusi menentukan karakteristik kelistrikan dalam semikonduktor. Berikut ini akan dibahas persamaan-persamaan tersebut dengan lebih jelas.

2.4.2 Persamaan Poisson

Pada material semikonduktor tidak semua muatan bersifat netral, sehingga menyebabkan munculnya medan listrik. Hubungan antara muatan listrik dengan medan listrik dijelaskan oleh persamaan Poisson, dimana mengikuti persamaan umum Maxwell. Persamaan Poisson dinyatakan sebagai berikut (Goetzberger *et al.*, 1997):

$$\nabla \cdot \bar{\xi} = \frac{q}{\varepsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.35)$$

Adapun q merupakan muatan elektron, ε merupakan permitivitas relatif material, N_D^+ merupakan konsentrasi atom donor yang telah terionisasi sehingga bermuatan positif setelah memberikan elektron dan N_A^- merupakan konsentrasi atom akseptor yang telah terionisasi sehingga bermuatan negatif setelah menciptakan *hole*.

2.4.3 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan

Hubungan antara rapat arus dengan ukuran proses generasi dan rekombinasi dalam material semikonduktor dijelaskan berdasarkan persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan. Hal ini mempengaruhi sifat kelistrikan dari divais semikonduktor karena berhubungan dengan aliran partikel pembawa muatan. Jika tidak terjadi perubahan volume yaitu semikonduktor berada pada keadaan *steady* (konstan), maka aliran partikel pembawa muatan tiap area tiap detik adalah sama. Aliran partikel tersebut dibedakan menjadi proses generasi (terbentuknya pasangan elektron-*hole*) dan proses rekombinasi (penggabungan pasangan

elektron-*hole*). Selanjutnya, persamaan Kontinuitas pembawa muatan dituliskan sebagai berikut (Goetzberger *et al.*, 1997):

$$\frac{1}{q}\nabla J_n = R - G \quad (2.36)$$

dan

$$\frac{1}{q}\nabla J_p = G - R \quad (2.37)$$

Persamaan (2.36) untuk aliran elektron, sedangkan persamaan (2.37) untuk aliran *hole* dalam semikonduktor. Dimana R merupakan laju rekombinasi dan G merupakan laju generasi (Purri dan Babbar, 2001).

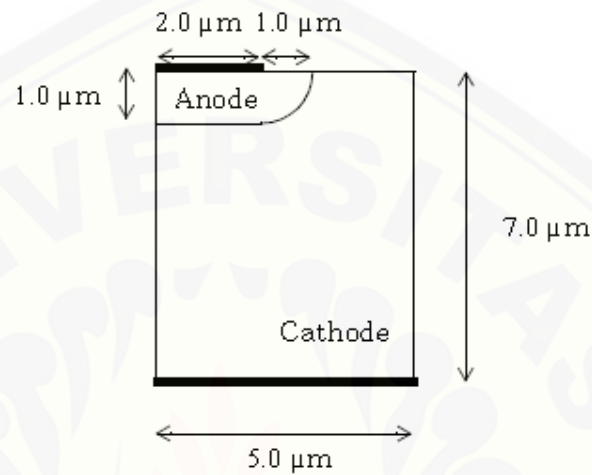
2.5 Analisa Numerik Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga diperkenalkan pada akhir tahun 1970. Metode ini merupakan suatu metode yang dilakukan dengan membagi geometri material menjadi bagian-bagian kecil dalam kondisi batas tertentu serta menggunakan pendekatan berupa persamaan diferensial parsial (PDE). Dasar pendekatan persamaan diferensial parsial tersebut dengan mengasumsikan bahwa setiap bagian memiliki solusi berupa fungsi sederhana tertentu. Selanjutnya, solusi umum dari material yaitu dengan menggabungkan solusi-solusi dari setiap bagian geometri material tersebut.

Pembuatan bagian-bagian kecil dalam geometri material bertujuan agar hasil yang diperoleh pada pemodelan menjadi lebih akurat. Bentuk pembagian geometri material tersebut dengan mengubah seluruh bagian material menjadi bentuk segitiga atau segiempat bergantung terhadap tingkat kesulitan dari material yang dimodelkan. Menurut Usman (2006), untuk struktur geometri yang rumit biasanya digunakan pembagian menjadi bentuk segitiga.

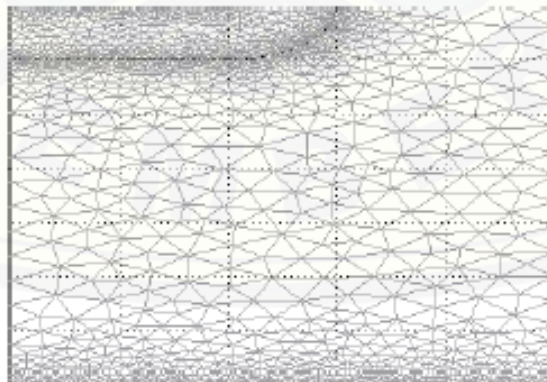
Metode elemen hingga memiliki kelebihan yaitu dapat digunakan untuk memodelkan material semikonduktor yang memiliki struktur geometri tidak rata maupun distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier dalam

setiap bagiannya (Usman, 2006). Pada tahun 2000, Danielsson memodelkan semikonduktor dalam dioda persambungan p-n yaitu menggunakan material kristal Silikon. Berikut ini gambar geometri dioda yang dimodelkan oleh Danielsson yaitu:



Gambar 2.12 Pemodelan geometri dioda persambungan p-n pada Silikon (Sumber: Danielsson, 2000)

Selanjutnya, pembagian geometri dioda persambungan p-n dalam Gambar 2.13 tersebut dibagi menjadi bagian-bagian kecil dalam bentuk segitiga seperti gambar berikut.



Gambar 2.13 Pembagian geometri dioda persambungan p-n pada Silikon menjadi bentuk segitiga-segitiga kecil (Sumber: Danielsson, 2000)

Pada analisis domain tersebut, terdapat bagian geometri yang saling berikatan (*mesh*) dengan titik-titik simpul (*node*) sebagai irisan dari *mesh*. Kemudian variabel yang digunakan dalam divais semikonduktor yaitu p , n dan ψ yaitu berturut-turut konsentrasi *hole*, konsentrasi elektron dan potensial elektrostatik. Setiap variabel tersebut memenuhi solusi umum yang diselesaikan dengan metode elemen hingga dengan persamaan (Usman, 2006; Fitriana, 2014):

$$p = \sum_j^a p_j \quad (2.38)$$

$$n = \sum_j^a n_j \quad (2.39)$$

$$\psi = \sum_j^a \psi_j \quad (2.40)$$

Menurut Usman (2006), a merupakan jumlah bagian dalam geometri (jumlah subdomain berbentuk segitiga). Ketiga variabel tersebut berhubungan dengan tingkat kuasi-Fermi pembawa muatan dalam semikonduktor dengan persamaan (Danielsson, 2000):

$$p = p_i e^{-\psi v} \quad (2.41)$$

$$n = n_i e^{\psi u} \quad (2.42)$$

Keterangan:

p = konsentrasi *hole* (cm^{-3})

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

ψ = potensial elektrostatik (volt)

p_i = konsentrasi intrinsik *hole* (cm^{-3})

n_i = konsentrasi intrinsik elektron (cm^{-3})

v = variabel bebas *hole*

u = variabel bebas elektron.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan berupa simulasi yaitu bertujuan untuk mengetahui distribusi nilai konsentrasi elektron pada kristal semikonduktor GaAs dalam peristiwa *deformation potential scattering*. Hasil penelitian berupa profil distribusi nilai konsentrasi elektron serta kurva karakteristik antara nilai konsentrasi elektron terhadap temperatur yaitu n - T . Hasil penelitian tersebut diperoleh berdasarkan perhitungan numerik sehingga penelitian ini termasuk dalam penelitian kuantitatif.

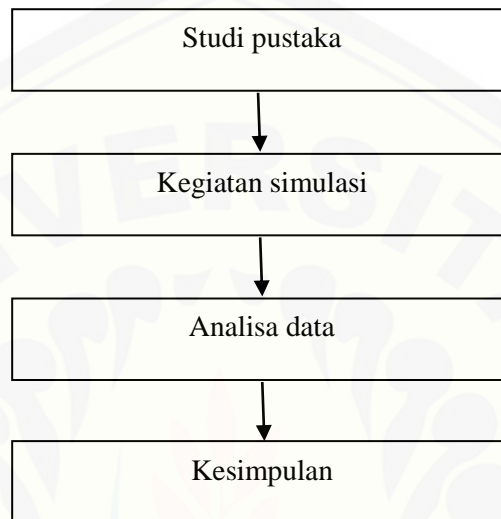
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Kegiatan penelitian dilaksanakan pada bulan Februari 2015 sampai dengan November 2015.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menerapkan metode elemen hingga untuk mencari solusi numerik dari persamaan diferensial parsial (PDE) yang menggambarkan model material semikonduktor. Persamaan diferensial parsial yang merupakan persamaan dasar pada divais semikonduktor meliputi persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan. Model material pada penelitian ini berupa kristal semikonduktor paduan III-V GaAs yaitu semikonduktor paduan murni. Tahap awal yang dilakukan meliputi studi pustaka sebagai dasar untuk kajian dalam penelitian. Selanjutnya dilakukan kegiatan simulasi dengan hasil simulasi berupa profil distribusi nilai konsentrasi elektron

serta kurva karakteristik n-T pada kristal semikonduktor GaAs. Dari hasil simulasi tersebut dilakukan analisa data, sehingga diperoleh kesimpulan. Untuk lebih jelasnya, proses penelitian yang telah diuraikan di atas diilustrasikan ke dalam Gambar 3.1.



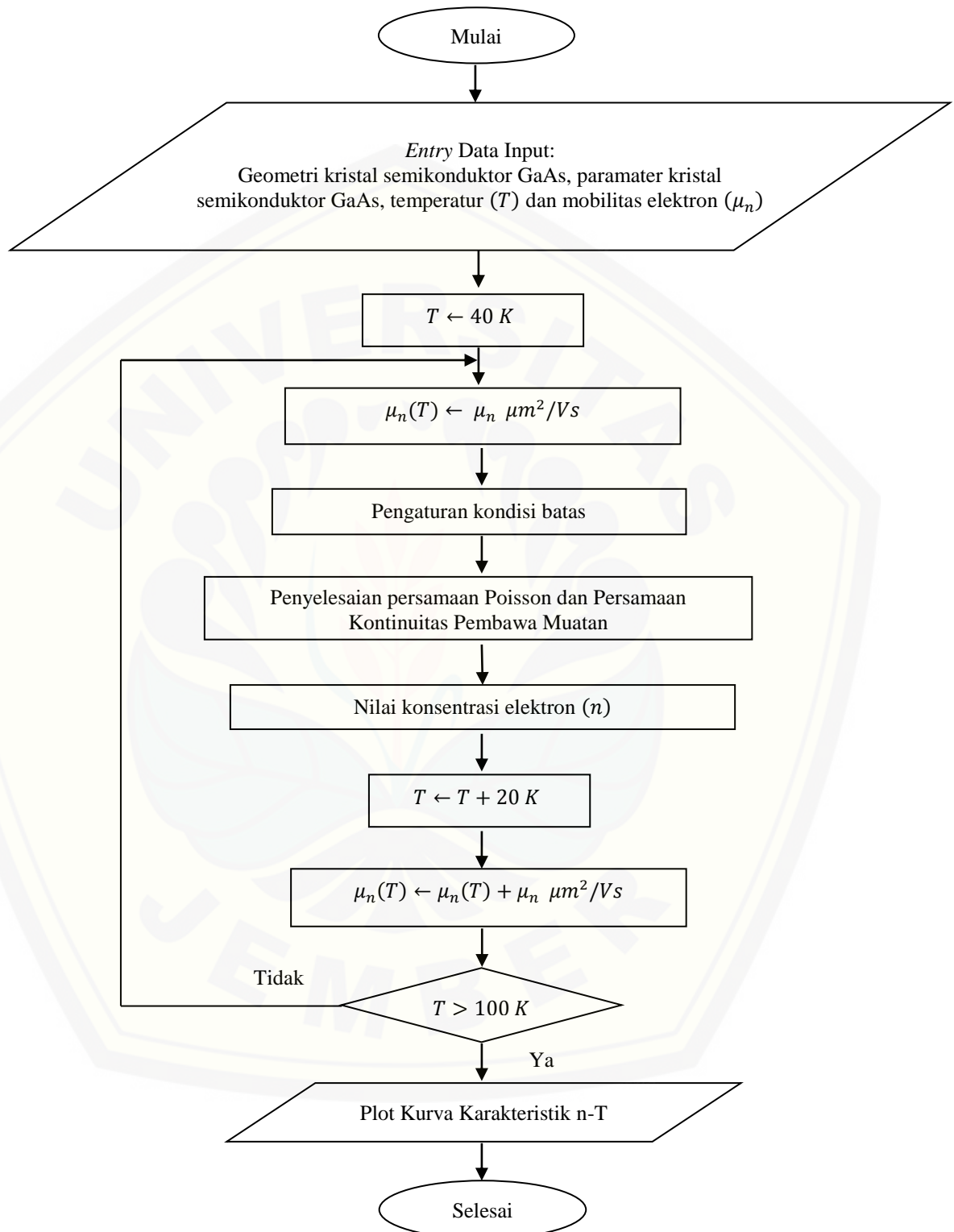
Gambar 3.1 Ilustrasi proses penelitian

Kegiatan simulasi dilakukan dengan memodelkan kristal semikonduktor GaAs pada penampang 2 dimensi. Proses simulasi tersebut antara lain pembuatan geometri kristal semikonduktor GaAs, penentuan parameter kristal semikonduktor GaAs, pengaturan kondisi batas, perumusan persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan serta pembuatan kurva karakteristik n-T. Pembuatan geometri kristal semikonduktor GaAs dilakukan berdasarkan pada ukuran geometri dioda Silikon (Danielsson, 2000). Kemudian, parameter kristal semikonduktor GaAs diperoleh berdasarkan hasil studi pustaka dengan memasukkan nilai mobilitas elektron dan temperatur berdasarkan grafik mekanisme hamburan pada material GaAs (Stillman *et al.* dalam Manion, 1988). Selanjutnya, pengaturan kondisi batas didasarkan pada geometri kristal semikonduktor GaAs yang dibuat dengan mengadopsi pemodelan dioda Silikon (Danielsson, 2000) dengan perbedaan bahwa dalam pemodelan kristal semikonduktor GaAs bukan jenis dioda persambungan p-n sehingga tidak ada

bagian tipe-*p* dan tipe-*n* tetapi hanya terdiri dari satu bagian/domain saja. Pada geometri kristal semikonduktor GaAs, pemodelan dititikberatkan untuk kondisi batas daerah anoda dan daerah katoda yang berturut-turut merupakan kutub positif dan kutub negatif dari kristal semikonduktor GaAs. Hal ini dikarenakan anoda dan katoda merupakan daerah yang mengalami kontak langsung dengan logam.

Untuk perumusan persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan yang dimasukkan ke dalam simulasi merupakan hasil persamaan modifikasi yang disesuaikan dengan material kristal semikonduktor GaAs. Kedua persamaan tersebut menjadi solusi dasar dalam pemodelan kristal semikonduktor GaAs pada setiap elemen dari geometri. Elemen-elemen dari geometri tersebut berbentuk segitiga dengan persebaran medan listrik serta pembawa muatan yang tidak linier.

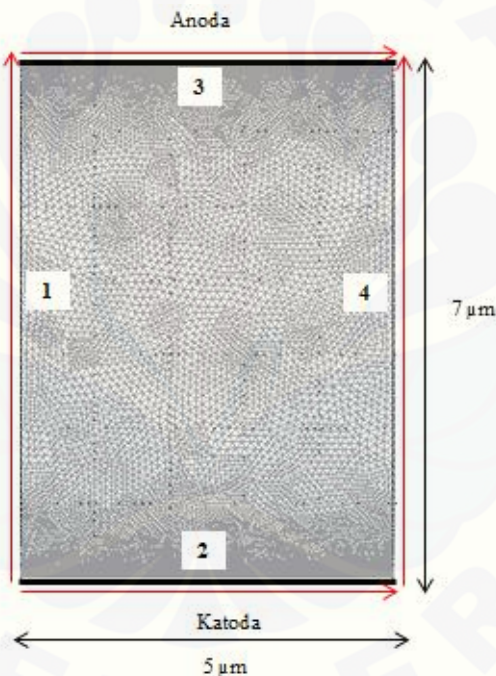
Setelah semua parameter kristal semikonduktor GaAs dimasukkan, maka akan diperoleh profil distribusi nilai konsentrasi elektron di setiap elemen pada geometri kristal semikonduktor GaAs. Parameter yang divariasikan dalam simulasi yaitu temperatur. Ketika temperatur berubah, mobilitas elektron turut mengalami perubahan, sehingga mobilitas elektron tersebut merupakan fungsi dari temperatur pada kristal semikonduktor GaAs. Oleh sebab itu, pada setiap nilai dari temperatur dan nilai dari mobilitas elektron diperoleh distribusi nilai konsentrasi elektron pada daerah dekat anoda, katoda serta daerah antara anoda dan katoda. Selanjutnya, distribusi nilai konsentrasi elektron di setiap daerah geometri tersebut didata serta dicatat pada variasi nilai temperatur yang diberikan ke dalam material kristal semikonduktor GaAs. Akhirnya, distribusi nilai konsentrasi elektron pada setiap variasi temperatur dan daerah geometri semikonduktor digabungkan, sehingga terbentuk kurva karakteristik n-T. Gambar 3.2 merupakan diagram alir yang menjelaskan proses kegiatan simulasi. Selanjutnya, untuk nilai kontrol dari hasil penelitian dilakukan dengan mensimulasikan material kristal semikonduktor GaAs pada temperatur ruang (300 K) dengan nilai mobilitas elektron sebesar ($8500 \times 10^8 \mu m^2/Vs$).



Gambar 3.2 Diagram alir kegiatan simulasi

3.3.1 Geometri Kristal Semikonduktor GaAs

Geometri kristal semikonduktor GaAs dimodelkan dalam bentuk penampang 2 dimensi ($7 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$) yang terdiri dari 1 domain. Domain tersebut memiliki 4 jenis batas yang ditandai dengan tanda panah warna merah dalam Gambar 3.3. Untuk garis tebal yang berada pada lebar geometri yaitu batas 2 dan 3 berturut-turut sebagai katoda dan anoda yang digunakan sebagai batas kontak semikonduktor dengan logam. Sementara itu, untuk batas 1 dan 4 merupakan batas panjang dari geometri. Gambar 3.3 merupakan geometri kristal semikonduktor GaAs yang dimodelkan.



Gambar 3.3 Geometri kristal semikonduktor GaAs

Selanjutnya, penerapan metode elemen hingga dilakukan dengan membagi geometri kristal semikonduktor GaAs menjadi elemen-elemen berbentuk segitiga yang disebut dengan *mesh* dengan titik simpul yaitu *node* yaitu dapat dilihat pada Gambar 3.3. Pembagian bentuk tersebut bertujuan agar nilai konsentrasi elektron dalam setiap elemen dari geometri kristal semikonduktor GaAs lebih akurat, sehingga dirancang dengan ukuran segitiga yang kecil dan rapat.

3.3.2 Parameter Kristal Semikonduktor GaAs

Parameter input kristal semikonduktor GaAs diperoleh berdasarkan studi pustaka yang dilakukan. Berikut ini nilai-nilai parameter input dari kristal semikonduktor GaAs disajikan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter input beserta nilainya

Parameter	Keterangan	Nilai
q	muatan elektron	1.602e-19
epsilon	permitivitas vakum	8.854e-14
T	Temperatur	T
k	konstanta Boltzmann	1.38e-23
epsilon _r	permitivitas material	13.1
y ₁	panjang geometri material	0.7
x ₀	faktor skala	1e-3
Phi ₀	faktor skala	$k \cdot T / q$
C ₀	faktor skala	$\max(\text{abs}(\text{fldoping}(0,0,1)), \text{abs}(\text{fldoping}(0,-y_1,1)))$
D ₀	faktor skala	$\max(k \cdot T / q \cdot \mu_n, k \cdot T / q \cdot \mu_p)$
n _i	konsentrasi intrinsik	$9e8 / C_0$
μ _n	mobilitas elektron	$\mu_n \cdot \text{Phi}_0 / D_0$
μ _p	mobilitas <i>hole</i>	$\mu_p \cdot \text{Phi}_0 / D_0$
m ₀	massa elektron	9.1e-31
m	massa efektif elektron	0.068 * m ₀
D _n	koefisien difusi elektron	$k \cdot T / q \cdot \mu_n / D_0$
D _p	koefisien difusi <i>hole</i>	$k \cdot T / q \cdot \mu_p / D_0$
taun	<i>lifetime</i> elektron	$\mu_n \cdot m / q \cdot D_0 / x_0^2$
taup	<i>lifetime</i> <i>hole</i>	$\mu_p \cdot m / q \cdot D_0 / x_0^2$
lambda ₂	konstanta skala semikonduktor	$\text{Phi}_0 \cdot \text{epsilon} \cdot \text{epsilon}_r / (x_0^2 \cdot q \cdot C_0)$
N _{sa}	skala kondisi batas	$(\text{fldoping}(0,0,C_0)) / 2 + \sqrt{(\text{fldoping}(0,0,C_0))^2 / 4 + n_i^2}$
N _{sc}	skala kondisi batas	$(\text{fldoping}(0,-y_1,C_0)) / 2 + \sqrt{(\text{fldoping}(0,-y_1,C_0))^2 / 4 + n_i^2}$
V _a	tegangan luar	0

Sumber: Danielsson (2000).

Pada kegiatan simulasi, parameter input yang digunakan diubah menjadi bentuk tanpa satuan, sehingga dibutuhkan faktor skala agar nilai parameter tersebut ekuivalen. Parameter input tersebut meliputi jarak (x,y), potensial listrik (ψ), konsentrasi pembawa muatan (n,p), koefisien difusi pembawa muatan (D_n,D_p) dan mobilitas pembawa muatan (μ_n,μ_p). Berikut ini faktor skala dari parameter input ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Faktor skala untuk parameter input

Parameter	Faktor Skala	Parameter Ekuivalen
Jarak (x,y)	$x_0 = 10^{-3}cm$	x_1x_0, y_1x_0
Potensial (ψ)	$\psi_0 = \frac{kT}{q}$	$\frac{\psi}{\psi_0}$
Konsentrasi pembawa muatan (n,p)	$C_0 = \max(N)$	$\frac{n}{C_0}, \frac{p}{C_0}$
Koefisien difusi (D_n,D_p)	$D_0 = \max(D_n , D_p)$	$\frac{D_n}{D_0}, \frac{D_p}{D_0}$
Mobilitas pembawa muatan (μ_n,μ_p)	$\frac{D_0}{\psi_0}$	$\frac{\mu_n\psi_0}{D_0}, \frac{\mu_p\psi_0}{D_0}$

Sumber: Danielsson (2000).

3.3.3 Pengaturan Kondisi Batas

Menurut Usman (2006), terdapat dua jenis syarat batas yaitu Dirichlet dan Neumann. Syarat batas Dirichlet digunakan untuk menjelaskan potensial dan konsentrasi pembawa muatan dalam kontak logam (anoda dan katoda), sedangkan syarat batas Neumann menjelaskan permukaan yang tidak berkontak dengan logam. Untuk syarat batas Neumann berlaku pada batas 1 dan 4 dari geometri kristal semikonduktor GaAs didefinisikan menjadi:

$$\hat{n} \cdot \bar{\xi} = 0; \quad \hat{n} \cdot \bar{J}_n = 0; \quad \hat{n} \cdot \bar{J}_p = 0 \quad (3.1)$$

Adapun \hat{n} merupakan satuan normal permukaan. Selanjutnya, untuk permukaan yang berhubungan dengan kontak logam, potensial elektrostatik diasumsikan konstan dan laju rekombinasi dalam kontak logam bernilai tidak berhingga, sehingga berlaku hukum aksi-massa pada persamaan (2.14) yaitu:

$$np = n_i^2 \quad (3.2)$$

Jika melibatkan konsentrasi dopan (N) dan tegangan luar yang diberikan (V_a), maka syarat batas Dirichlet ditentukan dengan persamaan (3.3), (3.4) dan (3.5) untuk batas 2 (katoda) dan 3 (anoda) yaitu:

$$\psi = \frac{N}{2} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.3)$$

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.4)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \quad (3.5)$$

3.3.4 Persamaan Poisson Termodifikasi

Jika N merupakan konsentrasi dopan, maka persamaan Poisson (2.35) menjadi:

$$\nabla \cdot \bar{\xi} = \frac{q}{\varepsilon} (p - n + N) \quad (3.6)$$

Selanjutnya, jika $\nabla \cdot \bar{\xi} = -\nabla^2 \psi$ dengan ψ merupakan potensial elektrostatik, maka persamaan (3.6) menjadi:

$$-\nabla^2 \psi = \frac{q}{\varepsilon} (p - n + N) \quad (3.7)$$

atau dapat dituliskan

$$\nabla^2 \psi = \frac{q}{\varepsilon} (n - p - N) \quad (3.8)$$

Karena $\nabla^2 = \Delta$, maka dengan mensubstitusikan persamaan (2.41) dan (2.42) ke dalam persamaan (3.8) diperoleh:

$$\Delta \psi = \frac{q}{\varepsilon} (n_i e^{\psi u} - n_i e^{-\psi v} - N) \quad (3.9)$$

Agar tidak bersatuan maka persamaan (3.9) harus dikalikan dengan faktor skala λ^2 , sehingga menjadi:

$$\lambda^2 \Delta \psi = n_i (e^{\psi u} - e^{-\psi v}) - N \quad (3.10)$$

Persamaan (3.10) merupakan persamaan Poisson termodifikasi yang digunakan dalam kegiatan simulasi. Persamaan Poisson ini menjelaskan hubungan antara muatan listrik dengan medan listrik dalam semikonduktor khususnya diaplikasikan dalam kristal semikonduktor GaAs. Menurut Danielsson (2000), (λ^2) merupakan faktor skala semikonduktor yang memiliki nilai:

$$\lambda^2 = \frac{\psi_0 \varepsilon}{x_0^2 q C_0} \quad (3.11)$$

Adapun variabel u dan v berhubungan dengan tingkat kuasi-Fermi dimana V_a merupakan tegangan luar yang diberikan pada kristal semikonduktor GaAs, berlaku persamaan:

$$u = e^{-V_a} \quad (3.12)$$

$$v = e^{V_a} \quad (3.13)$$

Selanjutnya, faktor skala semikonduktor berhubungan dengan temperatur, hubungan ini dapat dituliskan dengan mengubah persamaan (3.11) menjadi:

$$\lambda^2 = \frac{k \varepsilon_r \varepsilon_0}{x_0^2 q^2 C_0} T \quad (3.14)$$

Sehingga, dari persamaan (3.14) diketahui bahwa perubahan temperatur akan mempengaruhi faktor skala semikonduktor.

3.3.5 Persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan Termodifikasi

Menurut Danielsson (2000), terdapat mekanisme rekombinasi melalui tingkat ketidakmurnian yaitu disebut rekombinasi *Shockley-Read-Hall* (R_{SRH}). Proses rekombinasi tersebut menggunakan perangkat berupa tingkat ketidakmurnian pada celah pita energi semikonduktor dengan persamaan:

$$R_{SRH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (3.15)$$

Adapun n_1 merupakan parameter konsentrasi elektron yang berhubungan dengan tingkat energi *trap* dan p_1 merupakan parameter konsentrasi *hole* yang berhubungan dengan tingkat energi *trap*, sehingga persamaan (2.36) dan (2.37) menjadi:

$$\nabla J_n = -qG + qR_{SRH} \quad (3.16)$$

$$\nabla J_p = qG - qR_{SRH} \quad (3.17)$$

Penelitian ini dikhususkan untuk pemodelan semikonduktor dimana tidak terjadi mekanisme generasi (G), tetapi hanya terjadi mekanisme rekombinasi tingkat ketidakmurnian saja, sehingga persamaan (3.16) dan (3.17) menjadi:

$$\nabla J_n = qR_{SRH} \quad (3.18)$$

$$\nabla J_p = -qR_{SRH} \quad (3.19)$$

Persamaan (3.18) dan (3.19) selanjutnya dimodifikasi untuk dimasukkan ke dalam simulasi, sehingga disebut sebagai persamaan Kontinuitas Pembawa Muatan termodifikasi (Danielsson, 2000):

$$\nabla(D_n n_i e^{\psi} \nabla u) = \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(u + 1) + \tau_n(v + 1)} \quad (3.20)$$

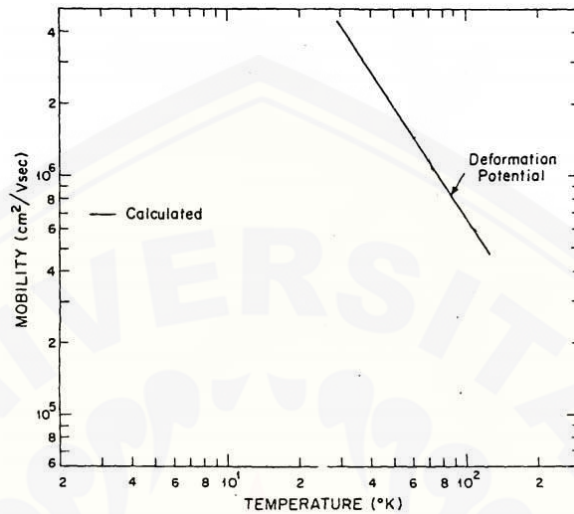
$$\nabla(D_p n_i e^{-\psi} \nabla v) = \frac{n_i(uv - 1)}{\tau_p(u + 1) + \tau_n(v + 1)} \quad (3.21)$$

3.3.6 Pembuatan Kurva Karakteristik n-T

Penggunaan metode elemen hingga yang membagi geometri kristal semikonduktor GaAs menjadi elemen-elemen kecil memungkinkan bahwa setiap elemen dalam geometri mengandung pembawa muatan dengan konsentrasi yang berbeda-beda. Hal ini menjadi kelebihan dari metode elemen hingga karena dapat menampilkan konsentrasi pembawa muatan dalam setiap bagian melalui perbedaan warna pada geometri semikonduktor. Adapun pembawa muatan yang akan dianalisis disini adalah elektron.

Ketika temperatur meningkat yaitu di atas nol absolut, maka secara teoritik atom-atom dalam kristal semikonduktor mengalami vibrasi kisi yang menimbulkan hamburan fonon. Hamburan fonon tersebut menyebabkan pergerakan (mobilitas) elektron berubah seiring dengan peningkatan temperatur akibatnya terjadi peristiwa *deformation potential scattering*. Perubahan mobilitas elektron dalam peristiwa *deformation potential scattering* dijelaskan melalui

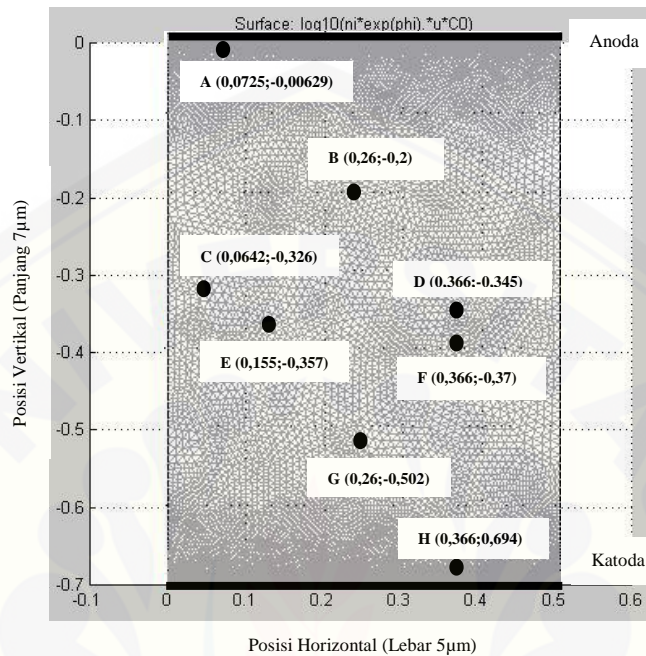
Gambar 3.4 yang selanjutnya nilai mobilitas elektron tersebut dijadikan sebagai parameter input dalam kegiatan simulasi.



Gambar 3.4 Nilai parameter input mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur dalam peristiwa *deformation potential scattering* (Sumber: Stillman *et al.* dalam Manion, 1988)

Selanjutnya, setelah nilai mobilitas elektron serta temperatur diinputkan, maka akan diperoleh profil distribusi nilai konsentrasi elektron. Penelitian dilakukan untuk setiap variasi mobilitas elektron pada temperatur 40 K, 60 K, 80 K dan 100 K. Dari setiap variasi temperatur dan mobilitas elektron tersebut, ditinjau koordinat-koordinat tertentu antara lain: daerah A (anoda [koordinat (0,0725;-0,00629)]), daerah B (dekat anoda [koordinat (0,26;-0,2)]), daerah C (bagian tengah geometri [koordinat (0,0642;-0,326)]), daerah D (bagian tengah geometri [koordinat (0,366;-0,345)]), daerah E (bagian tengah geometri [koordinat (0,155;-0,357)]), daerah F (bagian tengah geometri [koordinat (0,366;-0,37)]), daerah G (dekat katoda [koordinat (0,26;-0,502)]) dan daerah H (katoda [koordinat (0,366;0,694)]) yaitu posisinya ditunjukkan pada Gambar 3.5. Peninjauan pada daerah-daerah pengamatan dalam geometri kristal semikonduktor GaAs tersebut bertujuan untuk memudahkan pengamatan nilai konsentrasi elektron. Selanjutnya, hasil nilai konsentrasi elektron pada setiap daerah

pengamatan tersebut dikombinasikan untuk semua variasi temperatur dan diplot menjadi kurva karakteristik n-T.



Gambar 3.5 Sketsa posisi daerah pengamatan pada kristal semikonduktor GaAs

3.4 Analisa Data

Pada kegiatan simulasi dilakukan variasi nilai temperatur serta mobilitas elektron pada kristal semikonduktor GaAs, sehingga diperoleh profil distribusi nilai konsentrasi elektron yang selanjutnya dihasilkan kurva karakteristik n-T. Temperatur yang disimulasikan yaitu 40 K, 60 K, 80 K dan 100 K, dengan nilai mobilitas elektron berturut-turut pada temperatur tersebut sebesar $(3 \times 10^{14} \mu\text{m}^2/\text{Vs})$, $(1,5 \times 10^{14} \mu\text{m}^2/\text{Vs})$, $(9 \times 10^{13} \mu\text{m}^2/\text{Vs})$ dan $(7 \times 10^{13} \mu\text{m}^2/\text{Vs})$. Selanjutnya, pada setiap variasi temperatur tersebut dilakukan pendataan distribusi nilai konsentrasi elektron pada daerah geometri kristal semikonduktor GaAs yaitu daerah A (anoda [koordinat (0,0725;-0,00629)]), daerah B (dekat anoda [koordinat (0,26;-0,2)]), daerah C (bagian tengah geometri [koordinat (0,0642;-0,326)]), daerah D (bagian tengah geometri [koordinat (0,366;-0,345)]), daerah E (bagian tengah geometri [koordinat (0,155;-0,357)]), daerah F (bagian tengah