



**STUDI PENGARUH HAMBURAN FONON PIEZOELEKTRIK AKIBAT
PERUBAHAN TEMPERATUR TERHADAP DISTRIBUSI KONSENTRASI
ELEKTRON PADA SEMIKONDUKTOR GALLIUM ARSENIDA**

SKRIPSI

Oleh

MOCHAMAD SHOBIRIN KUSUMA

NIM 111810201059

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2015



**STUDI PENGARUH HAMBURAN FONON PIEZOELEKTRIK AKIBAT
PERUBAHAN TEMPERATUR TERHADAP DISTRIBUSI KONSENTRASI
ELEKTRON PADA SEMIKONDUKTOR GALLIUM ARSENIDA**

SKRIPSI

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

Oleh

MOCHAMAD SHOBIRIN KUSUMA

NIM 111810201059

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2015

PERSEMBAHAN

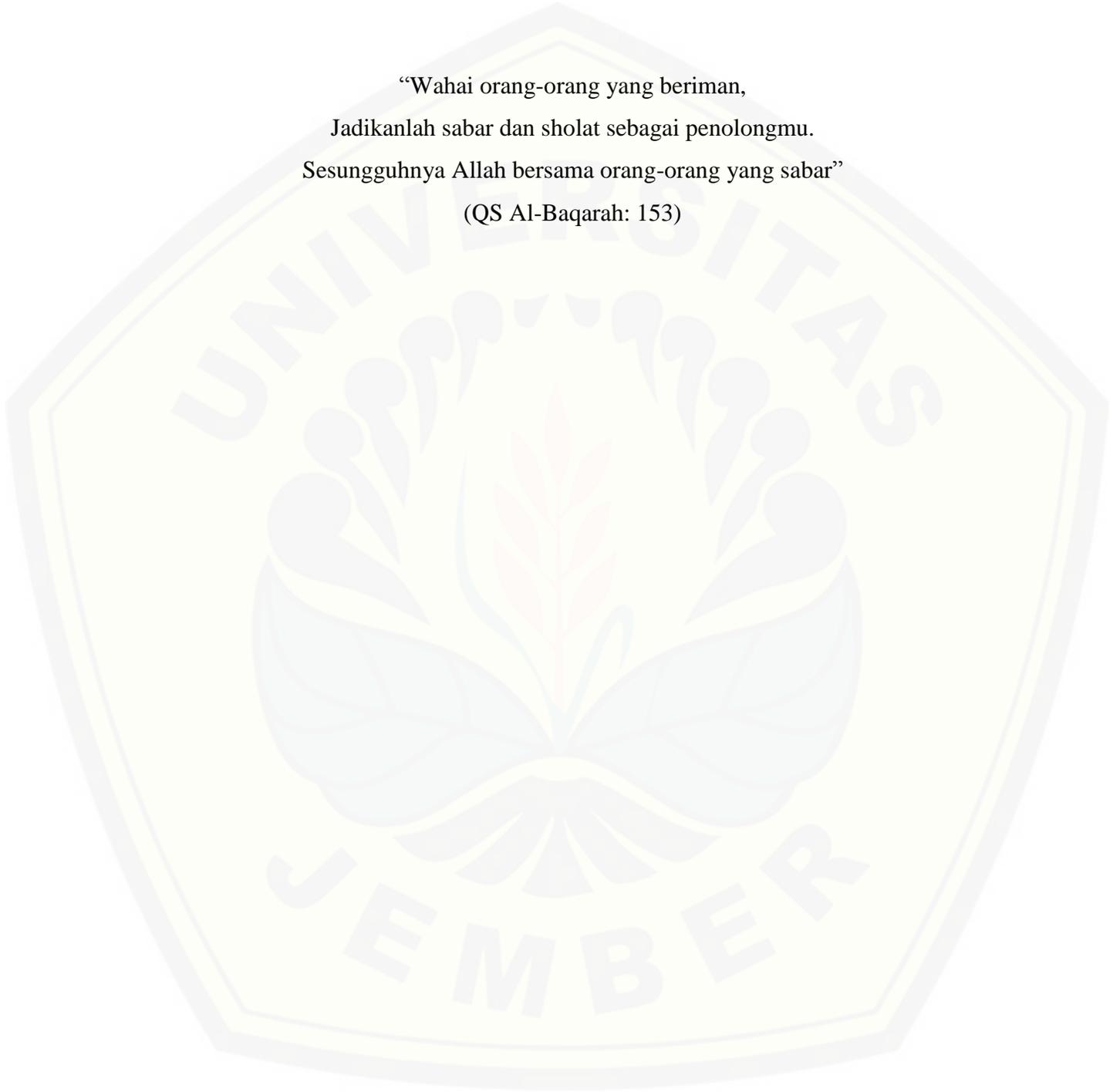
Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa cinta, syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya untuk:

1. Ayahanda Muryatin tercinta dan ibunda Wasini terkasih, yang selalu menyayangiku, mendukungku, dan memberiku semangat;
2. Para pahlawan tanpa tanda jasa sejak taman kanak-kanak hingga perguruan tinggi telah mendidikku dengan penuh perhatian dan kesabaran;
3. Seluruh keluarga besar yang telah memberikan dukungan, motivasi dan nasehat yang sangat berguna;
4. Sahabat-sahabatku dari Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Jember angkatan 2011 yang telah memberikan keceriaan, semangat, dan do'a selama ini;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember

MOTTO

“Wahai orang-orang yang beriman,
Jadikanlah sabar dan sholat sebagai penolongmu.
Sesungguhnya Allah bersama orang-orang yang sabar”

(QS Al-Baqarah: 153)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Mochamad Shobirin Kusuma

NIM : 111810201059

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul: “Studi Pengaruh Hamburan Fonon Piezoelektrik Akibat Perubahan Temperatur Terhadap Distribusi Konsentrasi Elektron Pada Semikonduktor Galium Arsenida” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Oktober 2015

Yang menyatakan,

Mochamad Shobirin Kusuma

NIM 111810201059

SKRIPSI

**STUDI PENGARUH HAMBURAN FONON PIEZOELEKTRIK AKIBAT
PERUBAHAN TEMPERATUR TERHADAP DISTRIBUSI KONSENTRASI
ELEKTRON PADA SEMIKONDUKTOR GALIUM ARSENIDA**

Oleh

Mochamad Shobirin Kusuma

NIM 111810201059

Pembimbing:

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

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

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Studi Pengaruh Hamburan Fonon Piezoelektrik Akibat Perubahan Temperatur Terhadap Distribusi Konsentrasi Elektron Pada Semikonduktor Galium Arsenida” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat :

Tim Penguji:

Ketua,

Sekretaris,

Endhah Purwandari, S.Si, M.S.

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

NIP 19811111 200501 2 001

NIP 19671215 199802 1 001

Anggota 1,

Anggota 2,

Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si.

Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si.

19720820 199802 1 001

NIP 19741215 200212 1 001

Mengesahkan,
Dekan Fakultas MIPA,

Prof. Drs. Kusno, DEA., PhD.

NIP 19610108 198602 1 001

RINGKASAN

Studi Pengaruh Hamburan Fonon Piezoelektrik Akibat Perubahan Temperatur Terhadap Distribusi Konsentrasi Elektron Pada Semikonduktor Gallium Arsenida; Mochamad Shobirin Kusuma, 111810201059; 2011; 72 halaman; Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Semikonduktor merupakan bahan yang memiliki nilai konduktivitas listrik di antara isolator dan konduktor. Berdasarkan kemurniannya bahan semikonduktor dibagi menjadi 2 yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Secara umum semikonduktor ekstrinsik dibagi menjadi tiga tipe yaitu tipe-n, tipe-p dan paduan. Semikonduktor paduan merupakan penggabungan unsur golongan II dan VI atau unsur golongan III dan V. Gallium Arsenid (GaAs) merupakan salah satu bahan semikonduktor paduan. Dalam proses menghantarkan arus, pada bahan semikonduktor terdapat sebuah mekanisme yang disebut mobilitas pembawa muatan. Laju mobilitas pembawa muatan pada bahan dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain temperatur. Meningkatnya temperatur dalam bahan juga dapat menimbulkan terjadinya mekanisme hamburan (*scattering*). Pada umumnya terdapat dua mekanisme hamburan pada bahan semikonduktor, yaitu hamburan impuritas terionisasi dan hamburan kisi (fonon). Hamburan kisi dibagi menjadi dua yaitu hamburan deformasi potensial dan hamburan fonon piezoelektrik. Hamburan fonon piezoelektrik merupakan hamburan pada semikonduktor paduan yang masih terdapat ikatan ionik. Ikatan ion akan terpolarisasi sehingga akan menimbulkan beda potensial yang dapat mengganggu mobilitas pembawa muatan pada bahan. Hamburan yang terjadi mempengaruhi konsentrasi pembawa muatan. Sehingga penelitian ini mengkaji pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat perubahan temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron pada bahan Gallium Arsenida.

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap simulasi. Tahap pertama dilakukan *entry* data berupa geometri bahan GaAs dalam bentuk 2D dengan panjang $7.0 \mu\text{m}$ dan

lebar 5.0 μm , parameter bahan GaAs, temperatur dan mobilitas elektron. Kemudian dilakukan pengaturan kondisi batas dan penyelesaian persamaan Poisson dan Kontinuitas menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH). Tahap selanjutnya memasukkan parameter input dengan memvariasikan mobilitas elektron yang diperoleh dari hasil eksperimen Manion (1988) dan memvariasikan temperatur pada 40K, 60K, 80K, 100K, dan 300K. Selanjutnya dilakukan *running* simulasi dan diamati distribusi konsentrasi elektron pada 6 daerah koordinat yang berbeda yaitu pada daerah katoda (0,198;-0,696), daerah dekat katoda (0,198;-0,5), daerah tengah 1 (0,198;-0,365), daerah tengah 2 (0,198;-0,343), daerah dekat anoda (0,198;-0,2) dan daerah anoda (0,198;-0,00313).

Hasil simulasi menunjukkan pada bahan GaAs memiliki perbedaan dalam distribusi konsentrasi elektronnya ketika dilakukan perubahan temperatur. Pada daerah katoda dan daerah dekat katoda konsentrasi elektronnya cenderung tetap. Hal tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi elektron untuk daerah tersebut telah mencapai nilai yang maksimum. Sementara itu, pada daerah tengah 1 distribusi konsentrasi elektron menurun terhadap perubahan temperatur. Hal tersebut disebabkan karena peningkatan temperatur akan mengakibatkan konsentrasi elektron pada daerah mirip tipe-n meningkat, sehingga terjadi difusi elektron dari daerah mirip tipe-n ke daerah tipe-p akibat adanya perbedaan konsentrasi. Elektron yang berpindah akan meninggalkan *hole* pada daerah mirip tipe-n dan akhirnya akan berkumpul pada daerah tengah 1 sebagai pembawa muatan minoritas yang menyebabkan konsentrasi elektron turun. Pada daerah tengah 2 sesuai dengan teori, peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan pada konsentrasi elektron. Hal tersebut terjadi karena peningkatan temperatur dapat meningkatkan energi termal pada bahan. Sehingga elektron akan mudah tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi. Untuk daerah dekat anoda dan anoda menunjukkan konsentrasi elektron yang relatif sama. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai V_a digunakan konstan. Sehingga konsentrasi elektron yang dihasilkan dijaga agar tetap konstan atau relatif sama.

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga sampai saat ini masih diberi sehat walafiat. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah kepada Rasul kita Muhammad SAW yang telah menuntun ke jalan yang penuh dengan ilmu pengetahuan sehingga penulis bisa menyelesaikan karya tulis ilmiah (skripsi) yang berjudul "Studi Pengaruh Hamburan Fonon Piezoelektrik Akibat Perubahan Temperatur Terhadap Distribusi Konsentrasi Elektron Pada Semikonduktor Galium Arsenida". Karya tulis ilmiah (skripsi) ini disusun guna 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 serta Dosen Pembimbing Akademik dan Dr. Edy Supriyanto, S.Si, M.Si selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, serta perhatiannya guna memberikan bimbingan, arahan dan memberikan motivasi demi terselesainya penelitian dan penulisan skripsi ini;
2. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji I dan Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji II, terima kasih atas segala masukan, kritik dan saran yang telah diberikan bagi kesempurnaan penulisan skripsi ini;
3. Yuliani Tri Wijayanti, S.Pd., M.Pd. selaku Guru SMA N 1 Jepon, terima kasih telah banyak membantu dalam memberikan bimbingan, arahan, materi serta memberikan kritik, saran dan motivasi sehingga penulis dapat mengenyam pendidikan perguruan tinggi;
4. Rekan kerja laboratorium komputasi, Nova Alviati dan Maria Kusniawati, terima kasih atas setiap setiap waktu yang kalian luangkan untuk berdiskusi dan saling

mengisi demi selesainya skripsi ini;

5. Sahabat-sahabat saya Toto, Awan, Asih, Devi, Ifa, Anam, Adhe, Aci, Vina, Nurul, Mbak Ika, Ery, Novia, Fathol, Yonika, Aida, dan Dwi serta seluruh angkatan 2011 dan anggota UKM Pramuka Universitas Jember, terima kasih atas setiap waktu yang kalian luangkan untuk berdiskusi dan saling mengisi;
6. 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, Oktober 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Semikonduktor	5
2.1.1 Semikonduktor Intrinsik	6
2.1.2 Semikonduktor Ekstrinsik	7
a. Semikonduktor tipe-n	8
b. Semikonduktor tipe-p	9
c. Semikonduktor Paduan	10
2.2 Transportasi Pembawa Muatan	11
2.2.1 Arus Drift dan Arus Difusi	12

2.2.2 Mobilitas Elektron	14
2.2.3 Hubungan Pembawa Muatan dengan Temperatur	15
2.2.4 Rekombinasi	16
2.3 Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas	17
2.4 Mekanisme Hamburan Pembawa Muatan	18
2.4.1 Hamburan Impuritas Terionisasi	19
2.4.2 Hamburan Kisi (Fonon)	20
a. Hamburan Deformasi Potensial Akustik	21
b. Hamburan Potensial Piezoelektrik	22
2.5 Metode Elemen Hingga	24
BAB 3 METODE PENELITIAN	26
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	26
3.2 Metode Penelitian	26
3.2.1 Geometri Bahan Gallium Arsenid (GaAs)	28
3.2.2 Parameter Bahan Gallium Arsenid (GaAs)	28
3.2.3 Pengaturan Kondisi Batas	30
3.2.4 Persamaan Poisson dan Kontinuitas	31
3.3 Analisis Data	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	34
BAB 5 PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	55

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Material Semikonduktor	8
3.1 Parameter- Parameter Input	29
3.2 Parameter Input dengan Faktor Skala	30
4.1 Distribusi Konsentrasi Elektron pada Temperatur 40K	39
4.2 Distribusi Konsentrasi Elektron pada Temperatur 300K	40
4.3 Konsentrasi Elektron Daerah Katoda dengan Variasi Temperatur	41
4.4 Konsentrasi Elektron Daerah Dekat Katoda dengan Variasi Temperatur	42
4.5 Konsentrasi Elektron Daerah Tengah 1 dengan Variasi Temperatur ...	44
4.6 Konsentrasi Elektron Daerah Tengah 2 dengan Variasi Temperatur ...	46
4.7 Konsentrasi Elektron Daerah Dekat Anoda dan Daerah Anoda dengan Variasi Temperatur	48
4.8 Konsentrasi Elektron Untuk Setiap Koordinat pada Temperatur 300K	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Struktur Kristal dan ikatan kovalen Silikon	7
2.2 Semikonduktor tipe-n	9
2.3 Semikonduktor tipe-p	10
2.4 Kristal Semikonduktor paduan GaAs dalam 2D	11
2.5 Distribusi muatan pada logam	14
2.6 Konsentrasi elektron terhadap temperatur untuk Silikon <i>doping</i> Fosfor	15
2.7 Grafik perhitungan mobilitas elektron pada GaAs untuk setiap hamburan yang mungkin terjadi pada semikonduktor	19
2.8 Plot mobilitas elektron dan lubang terhadap konsentrasi impuritas untuk Ge, Si dan GaAs pada $T = 300\text{K}$	20
2.9 Profil mobilitas elektron terhadap temperatur akibat mekanisme hamburan deformasi potensial pada bahan GaAs	21
2.10. Efek piezoelektrik	22
2.11 Profil Mobilitas elektron terhadap temperatur akibat mekanisme hamburan potensial piezoelektrik pada bahan GaAs	23
3.1 Diagram Alir Proses Simulasi	27
3.2 Geometri Bahan Gallium Arsenid (GaAs)	28
4.1 Distribusi Konsentrasi Elektron pada Hamburan fonon piezoelektrik untuk Temperatur 40K	35
4.2 Distribusi Konsentrasi Elektron Untuk Beberapa Temperatur (a) $T = 60\text{K}$ (b) $T = 80\text{K}$ (c) $T = 100\text{K}$	39
4.3 Distribusi Konsentrasi Elektron pada Hamburan fonon piezoelektrik untuk Temperatur 300K	40
4.4 Grafik Hasil Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron pada Daerah Katoda	43

4.5	Grafik Hasil Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron pada Daerah Dekat Katoda	43
4.6	Grafik Hasil Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron pada Daerah Tengah 1	45
4.7	Grafik Hasil Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron pada Daerah Tengah 2	48
4.8	Grafik Hasil Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron pada Daerah Dekat Anoda	49
4.9	Grafik Hasil Simulasi Distribusi Konsentrasi Elektron pada Daerah Anoda	49

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semikonduktor merupakan bahan yang memiliki nilai konduktivitas listrik yang berada di antara isolator dan konduktor. Pada awalnya, semikonduktor hanya terbuat dari bahan-bahan seperti Silikon (Si) atau Germanium (Ge), atau yang dikenal sebagai semikonduktor intrinsik. Namun, seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan, nilai konduktivitas sebuah bahan semikonduktor dapat diatur sesuai dengan kebutuhan melalui mekanisme *doping*. Dengan metode ini, bahan semikonduktor (ekstrinsik) yang diperoleh terbagi atas tiga tipe bahan, yaitu tipe-n, tipe-p dan paduan (Sutrisno, 1986).

Seperti halnya pada tipe-n dan tipe-p, semikonduktor paduan (*compound semiconductor*) juga diperoleh dari penggabungan unsur dari dua golongan yang berbeda. Akan tetapi, jenis ikatan ionik yang mendasari interaksi antar atom penyusun menjadikannya berbeda dengan kedua tipe lainnya (Subekti, 2003). Salah satu contohnya adalah Gallium Arsenid (GaAs), yang diperoleh dengan memadukan unsur dari golongan III (Galium) dan V (Arsenid). Dalam ikatannya, Arsenid merupakan unsur dengan 5 elektron valensi, sedangkan unsur Gallium memiliki 3 elektron valensi. Keduanya membentuk ikatan ionik yang umum terjadi saat bahan logam (Ga) berikatan dengan non logam (As) membentuk ikatan kimia GaAs (Sridianti, 2015). Dalam aplikasinya, bahan ini banyak digunakan sebagai komponen penyusun dioda maupun transistor (Subekti, 2003).

Sebagai bahan semikonduktor, yang memiliki karakteristik kelistrikan berdasarkan keadaan temperatur bahan, kinerja transistor ataupun dioda berbasis GaAs akan dipengaruhi pula oleh temperatur. Dalam skala mikroskopik, perubahan temperatur ini memberikan kontribusi utama pada mekanisme terjadinya hamburan ionik ataupun hamburan fonon dalam bahan semikonduktor (Dadi, 2010). Khusus pada bahan yang bersifat polar, seperti pada bahan GaAs, mekanisme hamburan

fonon piezoelektrik menjadi menarik untuk dianalisis mengingat fenomena ini hanya diamati pada kondisi temperatur rendah (Manion, 1988).

Mekanisme hamburan fonon piezoelektrik muncul di dalam bahan semikonduktor polar akibat perubahan temperatur ataupun sentuhan yang dapat menghasilkan tekanan pada bahan (Dadi, 2010). Hamburan yang dihasilkan sebenarnya berbentuk getaran kisi (fonon) yang merambat secara longitudinal, sehingga dikenal sebagai gelombang longitudinal akustik fonon (Subekti, 2003). Adanya gangguan temperatur terhadap pola getaran kisi inilah yang menggambarkan adanya fenomena perubahan tekanan dalam bahan. Untuk bahan semikonduktor yang bersifat polar (seperti GaAs), perubahan tekanan ini dapat menghasilkan potensial listrik yang terjadi antar kutub polarisasi dari ion-ion dalam bahan (Singhal, 2007). Hal ini menjadi salah satu penyebab dari ketidakaturan transport pembawa elektron. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan temperatur bahan dapat menyebabkan perubahan pada dimensi kisi kristal dan mengakibatkan terjadinya peningkatan potensial piezoelektrik (Manion, 1988). Dalam penelitian tersebut, dijelaskan bahwasanya efek dari peningkatan temperatur ternyata dapat menyebabkan terjadinya penurunan mobilitas elektron, dan pada akhirnya mempengaruhi mekanisme transport dari pembawa muatan. Fenomena demikian menjadi menarik untuk dikaji kembali dan di dalam penelitian ini, akan disimulasikan bagaimana hamburan fonon piezoelektrik dapat mempengaruhi distribusi pembawa muatan, khususnya elektron, di dalam semikonduktor GaAs.

Karakteristik pembawa muatan yang menunjukkan kemampuan berpindah/bergerak dari satu tempat ke tempat lain diukur melalui besaran mobilitasnya. Perubahan terhadap parameter ini, akan berpengaruh pada mekanisme transport dari pembawa muatan. Secara teoritis, berkurangnya mobilitas pembawa muatan akan meningkatkan jumlah pembawa muatan yang mengalir dalam satuan waktu tertentu (Subekti, 2003). Usman (2006) menunjukkan bahwa terjadi penurunan konsentrasi elektron pada dioda p-i-n pada saat mobilitas elektron mengalami peningkatan, sehingga menurunkan kuat arus yang mengalir dalam bahan. Oleh

karenanya, profil distribusi dari pembawa muatan perlu diperhitungkan secara simulasi untuk mendapatkan gambaran kuantitatif dari karakteristik transport pembawa muatan dalam bahan.

Distribusi pembawa muatan sebuah bahan semikonduktor diperoleh berdasarkan solusi dari dua persamaan dasar semikonduktor, yakni Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas (Danielson, 2000). Persamaan tersebut berbentuk persamaan diferensial orde 2 yang solusinya bergantung pada variabel posisi. Oleh karenanya dibutuhkan metode berbasis geometri, dan bahan yang dimodelkan, untuk memperoleh solusi dari persamaan tersebut. Salah satu metode yang dapat diaplikasikan adalah Metode Elemen Hingga (MEH). Metode ini dikenal mampu mendeskripsikan solusi yang diinginkan menurut geometri divais yang tidak merata ataupun memiliki distribusi medan listrik dan pembawa muatan yang tidak linier (Usman, 2006).

Dari uraian di atas maka dalam penelitian ini akan diamati pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat variasi temperatur terhadap distribusi pembawa muatan pada semikonduktor GaAs, khususnya pada profil distribusi konsentrasi elektron. Hal ini didasarkan pada massa efektif dari pembawa muatan di dalam GaAs, dimana massa efektif elektron lebih kecil daripada massa efektif *hole* sehingga mobilitas yang dihasilkannya akan lebih cepat daripada mobilitas *hole* (Mustofa, 2014). Distribusi konsentrasi elektron diperoleh dari solusi persamaan semikonduktor yang berbentuk persamaan diferensial orde 2. Dalam hal ini solusi diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga dengan geometri bahan semikonduktor dibuat dalam bentuk 2D. Dari hasil simulasi dapat dianalisis pengaruh temperatur terhadap mobilitas yang berdampak pada perubahan distribusi konsentrasi elektron. Sehingga dapat ditarik hipotesa jika mobilitas elektron berubah maka distribusi konsentrasi elektron akan berubah dan berbanding terbalik dengan perubahan mobilitas elektron yang terjadi dan hasilnya akan sebanding dengan peningkatan temperatur pada bahan tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini rumusan masalah yang akan diamati adalah bagaimana pengaruh hamburan fonon piezoelektrik yang terjadi akibat perubahan temperatur, terhadap distribusi konsentrasi elektron pada semikonduktor GaAs?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui simulasi distribusi konsentrasi elektron pada semikonduktor GaAs. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Geometri bahan dimodelkan dalam bentuk penampang 2 Dimensi.
2. Metode penyelesaian persamaan diferensial parsial berbahan dasar semikonduktor GaAs (kristal) menggunakan Metode Elemen Hingga.
3. Pemodelan dilakukan dalam variasi temperatur di bawah 300K.

1.4 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah diatas, tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat perubahan temperatur, terhadap distribusi konsentrasi elektron pada semikonduktor GaAs.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini antara lain :

1. Dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu fisika bahan khususnya dalam bidang pemodelan yang berkaitan dengan semikonduktor GaAs yang dapat diaplikasikan sebagai dioda.
2. Diharapkan kegiatan pemodelan yang dilakukan dapat digunakan untuk memprediksi karakteristik suatu bahan sebelum diaplikasikan dalam rangkaian elektronik.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Semikonduktor

Beberapa material yang ada di alam, baik secara alami maupun hasil sintesis, dapat dikelompokkan berdasarkan sifat-sifatnya. Jika ditinjau menurut sifat kelistrikannya, material dikelompokkan menjadi tiga (Goetzberger *et al.*, 1998), menjadi:

1. Bahan konduktor

Konduktor atau penghantar adalah zat atau bahan yang bersifat dapat menghantarkan energi, baik energi listrik maupun energi kalor. Selain itu material konduktor memiliki konduktivitas listrik lebih besar dari $(10^4) \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (Yunita, 2013; Kittel, 1976).

2. Bahan semikonduktor

Semikonduktor adalah sebuah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara isolator dan konduktor. Semikonduktor memiliki harga konduktivitas listrik antara $(10^4 - 10^{-8}) \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (Yunita, 2013; Sutrisno, 1986).

3. Bahan isolator

Bahan isolator memiliki konduktivitas listrik lebih kecil dari $(10^{-8}) \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Sehingga bahan ini merupakan bahan yang sulit menghantarkan arus listrik (Yunita, 2013; Puri 2001).

Semikonduktor merupakan bahan dengan konduktivitas listrik yang berada diantara isolator dan konduktor. Disebut semi atau setengah konduktor, karena bahan ini memang bukan konduktor murni. Sebuah semikonduktor akan bersifat sebagai isolator pada temperatur yang sangat rendah, namun pada temperatur ruang akan bersifat sebagai konduktor (Kittel, 1976).

Pada awalnya, bahan semikonduktor banyak dimanfaatkan sebagai transistor (*solid state transistor*), dengan unsur penyusun utamanya adalah silikon. Shockley, Bardeen dan Brettain merupakan tiga ilmuwan dari Bell-Laboratoties Amerika Serikat

yang telah menemukan bahan elektronik tersebut pada tahun 1948. Selain berasal dari unsur tunggal, piranti elektronika berbahan dasar semikonduktor dapat pula berasal dari jenis persenyawaan antara golongan IIIA dan IVA. Bahan paduan ini banyak dimanfaatkan sebagai laser dan LED (Darja, 2003).

Di kehidupan sehari-hari semikonduktor yang paling banyak digunakan adalah kristal Silikon (Si). Dahulu orang juga menggunakan unsur Germanium (Ge) tetapi Silikon menjadi populer setelah ditemukan cara mengekstrak bahan ini dari alam. Silikon merupakan bahan terbanyak ke-dua yang ada di bumi setelah oksigen (O_2). Pasir, kaca dan batu-batuan lain adalah bahan alam yang banyak mengandung unsur Silikon. Selain itu bahan semikonduktor yang sering digunakan adalah kristal Gallium Arsenida (GaAs) yang terbentuk dari unsur Gallium dan Arsen yang mempunyai sifat golongan IVA (Sutrisno, 1986).

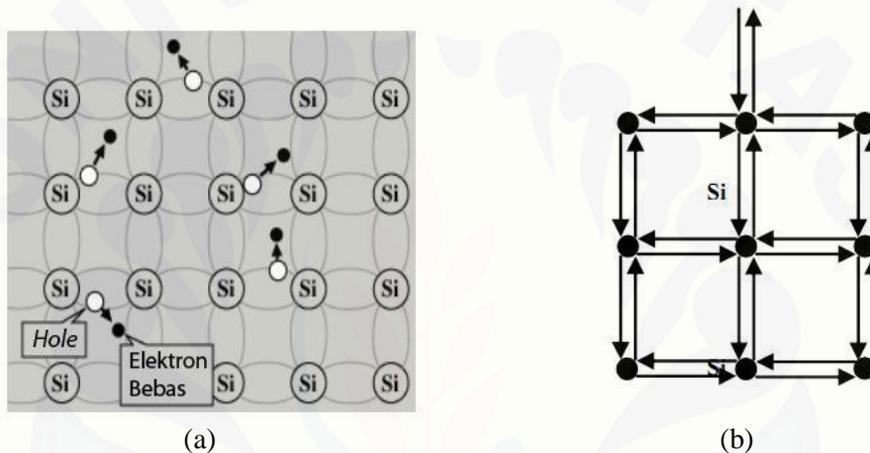
Berdasarkan kemurnian bahan semikonduktor dibedakan menjadi dua jenis yaitu bahan semikonduktor murni yaitu yang terdiri dari unsur Silikon (Si) atau Germanium (Ge) disebut semikonduktor intrinsik. Sedangkan bahan semikonduktor yang merupakan campuran bahan semikonduktor intrinsik dengan unsur golongan VA atau golongan IIIA disebut semikonduktor ekstrinsik (Sutrisno, 1986).

2.1.1 Semikonduktor Intrinsik

Silikon dan Germanium merupakan dua jenis semikonduktor yang sangat penting dalam elektronika. Keduanya terletak pada golongan IVA dalam tabel periodik dan mempunyai 4 elektron valensi. Struktur kristal Silikon dan Germanium berbentuk tetrahedral dengan setiap atom memakai bersama sebuah elektron valensi dengan atom-atom tetangganya. Gambar 2.1 a dan 2.1 b memperlihatkan bentuk ikatan kovalen dalam dua dimensi.

Pada gambar 2.1 menunjukkan bahwa tiap atom Si terikat dengan empat buah atom Silikon lain, sehingga membuat ikatan kovalen. Pada temperatur mendekati harga nol mutlak walaupun di dalam kristal diberi medan listrik, elektron tetap terikat dalam ikatan kovalen, sehingga tidak ada muatan yang bergerak. Ini berarti tidak ada

arus walaupun di beri beda potensial atau bahan bersifat sebagai isolator. Pada temperatur ruang banyak elektron valensi yang terlepas dari ikatan kovalen karena vibrasi termal. Elektron valensi ini merupakan elektron bebas yang tereksitasi secara termal. Makin tinggi temperatur makin banyak memberikan beda potensial antar dua ujung kristal. Jika di dalam bahan diberi medan listrik, yaitu dengan memberikan beda potensial pada kedua ujung kristal, elektron bebas akan bergerak menjadi aliran elektron atau arus listrik. Sehingga dapat dikatakan Silikon mempunyai sifat konduktor (Subekti, 2003).



Gambar 2.1 a) Struktur Kristal Si dan b) ikatan kovalen yang terjadi pada Si
(Sumber : Parno, 2002)

2.1.2 Semikonduktor Ekstrinsik

Bahan semikonduktor ekstrinsik adalah bahan semikonduktor yang telah dicampuri dengan atom lain atau bahan semikonduktor intrinsik dikotori atau ditambah dengan atom lain. Proses penambahan atom pengotor pada bahan semikonduktor murni disebut *doping*.

Proses *doping* dilakukan untuk mengatur jenis pembawa muatan yang diinginkan dari bahan semikonduktor. Oleh karena itu, semikonduktor ekstrinsik dapat diklasifikasikan berdasarkan sifat/jenis pembawa muatan yang dihasilkan, yakni semikonduktor tipe-n, semikonduktor tipe-p dan semikonduktor paduan (Setiawan *et al.*, 2007). Elemen semikonduktor beserta atom pengotor yang biasa digunakan diperlihatkan pada tabel 2.1:

Tabel 2.1 Material Semikonduktor

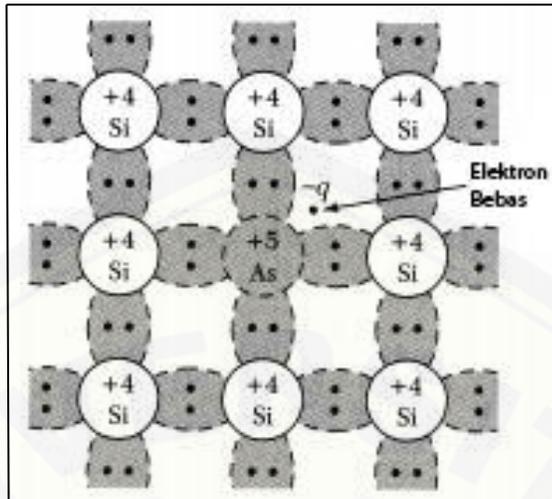
KOLOM III		KOLOM IV		KOLOM V	
5	B BORON 10,82	6	C CARBON 12,01	7	N NITROGEN 14,008
13	Al ALUMINUM 26,97	14	Si SILICON 28,09	15	P PHOSPHORUS 31.02
31	Ga GALLIUM 69,72	32	Ge GERMANIUM 72,60	33	As ARSENIC 74,91
49	In INDIUM 114,8	50	Sn TIN 118,7	51	Sb ANTIMONY 121,8

(Setiawan *et al.*, 2007)

a. Semikonduktor tipe-n

Semikonduktor ekstrinsik tipe-n adalah semikonduktor dengan konsentrasi elektron lebih besar dibandingkan konsentrasi *hole*. Semikonduktor tipe-n menggunakan semikonduktor intrinsik dengan menambahkan atom donor yang berasal dari golongan VA pada susunan berkala, misalnya As (Arsenid), Sb (Antimony), Phosphorus (P). Atom-atom pengotor (dopan) ini mempunyai lima elektron valensi sehingga secara efektif memiliki muatan sebesar $+5q$. Saat sebuah atom pentavalen menempati posisi atom Silikon dalam kisi kristal, hanya empat elektron valensi yang dapat membentuk ikatan kovalen lengkap, dan tersisa sebuah elektron yang tidak berpasangan (lihat gambar 2.2) (Puri, 2001).

Jika semikonduktor tipe-n diberi energi termal yang kecil saja, sisa elektron ini akan menjadi elektron bebas dan siap menjadi pembawa muatan dalam proses hantaran listrik. Karena menghasilkan pembawa muatan negatif dari kristal yang netral maka atom pengotor yang memberikan elektron, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom donor (Ardiansyah, 2012).



Gambar 2.2 Semikonduktor tipe-n dimana Silikon didoping unsur Arsenid
(Sumber : Puri, 2001)

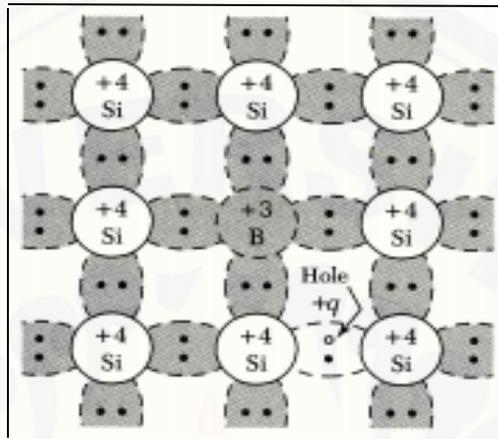
Pada temperatur ruang sebagian besar atom donor terionisasi dan elektronnya tereksitasi ke pita konduksi. Sehingga jumlah elektron bebas pada semikonduktor tipe- n jauh lebih besar dari pada jumlah *hole*. Oleh sebab itu, elektron di dalam semikonduktor tipe-n disebut pembawa muatan mayoritas, dan *hole* disebut sebagai pembawa muatan minoritas (Sutrisno, 1986).

b. Semikonduktor tipe-p

Semikonduktor tipe-p adalah jenis semikonduktor dimana konsentrasi *hole* lebih besar daripada elektron, hal ini disebabkan karena penambahan atom dari golongan IIIA sebagai atom akseptor. Karena *doping* dari golongan IIIA maka mempunyai tiga elektron valensi sehingga secara efektif hanya dapat membentuk tiga ikatan kovalen. Contoh saat sebuah atom trivalen menempati posisi atom Silikon dalam kisi kristal, terbentuk tiga ikatan kovalen lengkap, dan tersisa sebuah muatan positif dari atom Silikon yang tidak berpasangan (lihat gambar 2.3) yang disebut lubang (*hole*).

Akibatnya, dalam berikatan dengan atom Silikon di dalam kristal, atom golongan IIIA memerlukan satu elektron lagi untuk berpasangan dengan atom Si. Oleh sebab itu atom-atom golongan IIIA mudah menangkap elektron, sehingga disebut akseptor. Jika ini terjadi atom akseptor menjadi kelebihan elektron sehingga

menjadi bermuatan negatif. Dalam hal ini dikatakan atom akseptor terionkan mempunyai muatan tak bebas, karena tak bergerak dibawah medan listrik luar. Ion Si yang elektronnya ditangkap oleh atom akseptor terbentuk menjadi lubang (*hole*) (Puri, 2001).

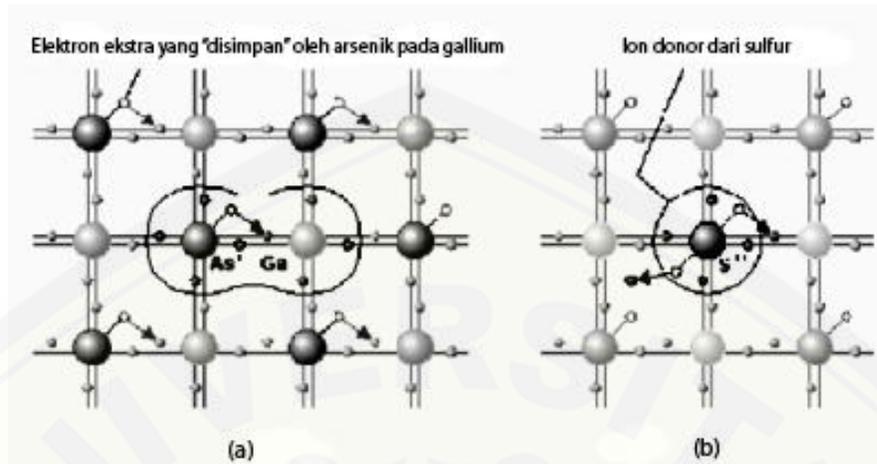


Gambar 2.3 Semikonduktor tipe-p dimana Silikon didoping Boron
(Sumber : Puri, 2001)

Sehingga semikonduktor tipe-p, lubang merupakan pembawa muatan yang utama, sehingga disebut pembawa muatan mayoritas. Disini elektron bebas merupakan pembawa muatan minoritas (Sutrisno, 1986).

c. Semikonduktor Paduan

Semikonduktor paduan (*compound semiconductor*) dapat diperoleh dari unsur valensi tiga dan valensi lima (paduan IIIA-VA, misalnya GaAs atau GaSb) atau dari unsur valensi dua dan valensi enam (paduan IIA-VIA, misalnya ZnS). Ikatan kimia terbentuk dengan peminjaman elektron oleh unsur dengan valensi lebih tinggi kepada unsur dengan valensi lebih rendah (lihat gambar 2.4). Atom donor pada semikonduktor paduan adalah unsur dengan valensi lebih tinggi dibandingkan dengan unsur yang diganti. Atom akseptor adalah unsur dengan valensi lebih rendah dibandingkan dengan unsur yang diganti (ditempati).



Gambar 2.4 a) Kristal Semikonduktor paduan GaAs dalam dua dimensi dan
 b) Kristal semikonduktor paduan GaAs tipe-n dua dimensi
 (Sumber : Subekti, 2003)

Subekti (2003) menyatakan pada semikonduktor GaAs yang berperan sebagai atom donor adalah Arsenid (As) dan berperan sebagai atom akseptor adalah Gallium (Ga). Hal ini terjadi karena atom Arsenid (As) lebih negatif daripada Gallium (Ga) sehingga menjadi atom donor dan atom akseptor adalah Gallium (Ga) karena lebih positif daripada Arsenid (As). Jika dilihat dari atom valensinya Ga memiliki 3 elektron valensi karena termasuk golongan IIIA dan As mempunyai atom valensi 5 karena termasuk golongan VA. Semikonduktor paduan biasa digunakan pada LED pada bidang elektronika.

2.2 Transportasi Pembawa Muatan

Distribusi pembawa muatan pada semikonduktor baik elektron ataupun *hole* akan menghasilkan arus. Terjadinya ini disebabkan oleh dua faktor yaitu karena adanya medan listrik dan adanya perbedaan (*gradien*) konsentrasi pembawa muatan (*carrier*). Arus yang timbul akibat adanya medan magnet disebut juga arus drift dan arus yang timbul karena pergerakan ini disebut juga arus difusi. Perbedaan (*gradien*) konsentrasi ini dapat diakibatkan oleh penyebaran dadahan (*doping*) yang tidak homogen, atau dapat juga dihasilkan dengan menginjeksikan sejumlah elektron atau

hole ke suatu daerah (*region*) substrat tertentu pada semikonduktor (Neaman, 2007).

2.2.1 Arus Drift dan Arus Difusi

Arus drift adalah peristiwa hantaran listrik pada semikonduktor akibat adanya dua partikel yang bermuatan positif dan negatif yang bergerak dengan arah yang berlawanan akibat adanya pengaruh medan listrik. Medan listrik ini akan menghasilkan gaya yang bekerja baik pada elektron bebas ataupun *hole*, lalu akan mengalami pergerakan dan kecepatan drift. Pada semikonduktor tipe-n medan listrik E diberikan pada arah tertentu sehingga menghasilkan gaya pada elektron karena bermuatan negatif dalam arah yang berlawanan. Elektron tersebut akan memperoleh kecepatan drift vd_n (dalam cm/s) yang besarnya (Naeman, 2007).

$$vd_n = -\mu_n \cdot E \quad (2.1)$$

dimana μ_n adalah mobilitas elektron dan diukur dalam $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Tanda negatif pada persamaan menandakan bahwa kecepatan drift elektron berlawanan arah dengan medan listrik yang diberikan.

Sedangkan pada semikonduktor tipe-p memiliki jumlah *hole* yang lebih banyak. Medan listrik E lalu diberikan pada suatu arah tertentu sehingga menghasilkan gaya pada *hole-hole* tersebut. *Hole* tersebut akan memperoleh kecepatan drift vd_p (dalam cm/s), yang besarnya adalah (Dwi, 2012).

$$vd_p = \mu_p \cdot E \quad (2.2)$$

dimana μ_p adalah mobilitas *hole* dan diukur dalam satuan $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Tanda positif pada persamaan menandakan bahwa kecepatan drift *hole* searah dengan medan listrik yang diberikan. Karena pada material semikonduktor selalu mengandung elektron maupun *hole*, kerapatan arus drift total ditentukan sebagai jumlah dari kedua komponen arus tersebut, sehingga

$$J = en\mu_n E + ep\mu_p E$$

$$J = \sigma E$$

$$J = \frac{1}{\rho} E \quad (2.3)$$

dimana

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu \quad (2.4)$$

dengan σ sebagai konduktifitas dari semikonduktor dan $\rho = 1/\sigma$ sebagai resistifitas dari semikonduktor (Neaman, 2007).

Pada proses difusi, partikel akan bergerak dari daerah dengan konsentrasi yang tinggi menuju daerah dengan konsentrasi yang rendah. Difusi elektron dari daerah dengan konsentrasi tinggi menuju daerah dengan konsentrasi yang lebih rendah menghasilkan aliran elektron dalam arah x negatif. Karena elektron bermuatan negatif, maka arah arus konvensional akan menjadi x positif. Kerapatan arus difusi dipandang sebagai difusi elektron dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Dwi, 2012).

$$J_n = eD_n \frac{dn}{dx} \quad (2.5)$$

dimana e adalah besar muatan elektron, (dn/dx) sebagai gradien konsentrasi elektron, dan D_n adalah koefisien difusi elektron.

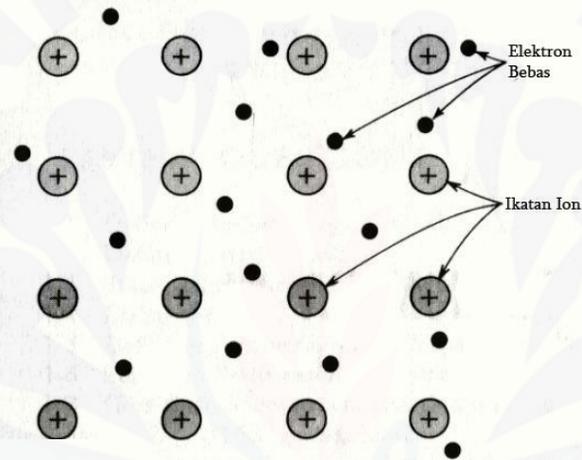
Difusi *hole* terjadi dari daerah dengan koefisien tinggi ke daerah dengan koefisien yang lebih rendah sehingga menghasilkan aliran *hole* dalam arah x negatif. Kerapatan arus difusi dipandang sebagai difusi *hole* yang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut

$$J_p = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad (2.6)$$

dimana e adalah besar dari muatan *hole*, (dp/dx) sebagai gradien konsentrasi *hole*, dan D_p adalah koefisien difusi *hole*. Perlu dicatat bahwa terjadi perubahan tanda pada kedua persamaan arus difusi ini. Hal ini dikarenakan perbedaan dalam penandaan muatan listrik antara muatan negatif elektron dengan muatan positif *hole* (Neaman, 2007).

2.2.2 Mobilitas Elektron

Mobilitas elektron-elektron dalam suatu bahan disebut dengan konduktivitas listrik. Bahan dengan mobilitas elektron yang tinggi (banyak elektron bebas) disebut konduktor, sedangkan bahan dengan mobilitas elektron bebas yang rendah (sedikit atau tidak ada elektron bebas) disebut isolator. Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi dua dimensi dari distribusi muatan di dalam logam. Lingkaran abu-abu menunjukkan muatan positif yang terdiri atas inti atom dan elektron-elektron dalam. Titik hitam menunjukkan *elektron bebas* (kadang-kadang disebut *gas elektron*).



Gambar 2.5 Distribusi muatan pada logam (Sumber : Arifin, 2004)

Jika pada bahan diberi medan listrik (E), elektron akan mendapatkan percepatan ($a = qE/m$) dan kecepatannya akan terus meningkat selama belum bertumbukan dengan ion. Jika elektron menumbuk ion, elektron akan kehilangan energinya, dan masuk ke dalam kondisi *steady state* dan mendapatkan kecepatan tertentu yang disebut *kecepatan drift*, yang arahnya berlawanan dengan arah medan listrik. Kecepatan rata-rata elektron dalam keadaan ini :

$$v = \mu E \quad (2.7)$$

μ disebut mobilitas pembawa muatan, dengan satuan $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (Arifin, 2004).

Konduktivitas (σ) dan tahanan (ρ) dari suatu bahan tergantung pada distribusi pembawa muatan, besar muatan dan mobilitas sesuai persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = nq\mu \quad (2.8)$$

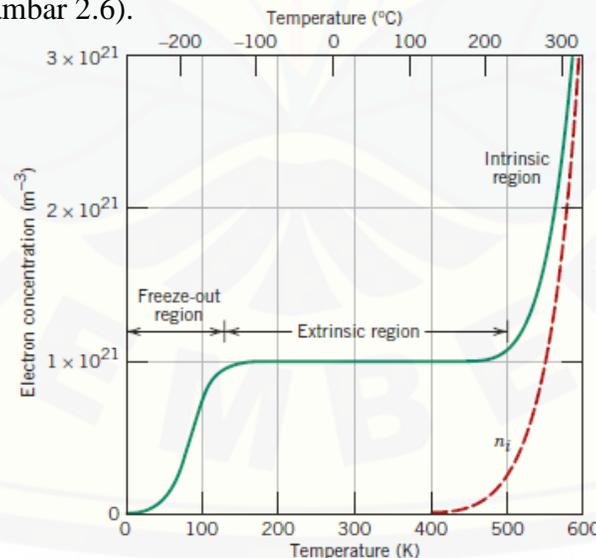
dimana nilai mobilitas elektron adalah

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (2.9)$$

Dari rumusan diatas v adalah kecepatan, suatu mobilitas pembawa muatan dapat dihitung sesuai dengan persamaan diatas. Kecepatan gerak ini sebanding dengan besarnya medan listrik E atau volt/m. Jadi tanpa gradien voltage, tak ada kecepatan gerak. Hal ini tidak berarti bahwa pembawa muatan tidak bergerak, sebaliknya pergerakannya adalah secara acak (Lama, 2013).

2.2.3 Hubungan Pembawa Muatan dengan Temperatur

Konsentrasi elektron dan *hole* meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur karena jika temperatur meningkat maka energi termal suatu bahan akan lebih besar dan mempermudah elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Di sisi lain, distribusi konsentrasi pembawa terhadap temperatur untuk semikonduktor ekstrinsik sangat berbeda. Sebagai contoh, distribusi konsentrasi elektron terhadap temperatur untuk Silikon yang telah *didoping* dengan 10^{21} m^{-3} atom fosfor (P) (lihat gambar 2.6).



Gambar 2.6 Konsentrasi elektron pada bahan Silikon (tipe-n) terhadap variasi temperatur yang di *doping* dengan atom fosfor 10^{21} m^{-3} (Sumber : Callister, 1940)

Berdasarkan gambar diatas, kurva ekstrinsik yang ditunjukkan warna hijau terbagi ke dalam tiga daerah, sedangkan kurva berwarna merah adalah distribusi konsentrasi elektron bahan intrinsik. Daerah pertama berada pada temperatur menengah (di antara sekitar 150 K dan 475 K) dengan keadaan konsentrasi elektron yang relatif konstan, daerah ini disebut sebagai "daerah temperatur ekstrinsik". Elektron pada pita konduksi tereksitasi dari keadaan donor fosfor, sehingga dikatakan bahwa semua atom fosfor terionisasi.

Pada daerah temperatur rendah, di bawah sekitar 100 K, konsentrasi elektron turun secara drastis dengan adanya penurunan temperatur dan mendekati nol pada 0 K. Selama temperatur ini, energi panas tidak cukup untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Pada skala temperatur paling tinggi, konsentrasi elektron meningkat di atas kandungan P (fosfor) dan secara asimtotik mendekati kurva intrinsik dengan meningkatnya temperatur. Ini disebut daerah bertemperatur intrinsik karena pada temperatur tinggi ini semikonduktor menjadi intrinsik, yaitu konsentrasi pembawa muatan yang dihasilkan dari eksitasi elektron mendekati celah pita instrinsik (Callister, 1940).

2.2.4 Rekombinasi

Subekti (2003) menyebutkan bahwa pada bahan semikonduktor, elektron atau *hole* yang bergerak cenderung mengadakan rekombinasi dan menghilang. Laju rekombinasi (R), dalam pasangan elektron dan *hole* per detik per meter kubik, tergantung pada jumlah muatan yang ada. Jika hanya ada sedikit elektron dan *hole* maka R akan berharga rendah; sebaliknya R akan berharga tinggi jika tersedia elektron dan lubang dalam jumlah yang banyak. Sebagai contoh misalnya pada semikonduktor tipe-n, di dalamnya hanya tersedia sedikit *hole* tapi terdapat jumlah elektron yang sangat besar sehingga R akan berharga sangat tinggi. Secara umum dapat dituliskan:

$$R = rnp \quad (2.10)$$

dimana R adalah laju rekombinasi yang terjadi dan r menyatakan konstanta proporsionalitas bahan. Dalam kondisi setimbang, besarnya laju generasi adalah sama dengan besarnya laju rekombinasi. Pada semikonduktor murni berlaku :

$$R_i = rn_i p_i = rn_i^2 \text{ atau } np = n_i^2 \quad (2.11)$$

atau dengan kata lain perkalian konsentrasi elektron dan *hole* menghasilkan suatu konstanta, jika salah satu dinaikkan (melalui proses *doping*), yang lain harus berkurang. Jika kita menambahkan atom pengotor pada semikonduktor murni, praktis semua atom donor atau aseptor terionisasi pada temperatur ruang.

2.3 Persamaan Poisson dan Persamaan Kontinuitas

Pada bahan semikonduktor, karena adanya muatan listrik yang terjadi akan menimbulkan medan listrik. Hubungan antara muatan listrik dan medan listrik pada bahan tersebut dapat digambarkan melalui persamaan Poisson berikut ini :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{q}{\epsilon} (-p + n - N_D^+ + N_A^-) = \frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.12)$$

Keterangan: ϵ = permitivitas bahan (F/cm)

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

p = konsentrasi *hole* (cm⁻³)

n = konsentrasi elektron (cm⁻³)

N_D^+ = konsentrasi atom donor (cm⁻³)

N_A^- = konsentrasi atom akseptor (cm⁻³)

Persamaan Poisson di atas menunjukkan bahwa divergensi dari medan listrik sebanding dengan total muatan dibagi dengan permitivitas bahan. Dalam keadaan *steady* maka persamaan kontinuitas pembawa muatan untuk rapat arus elektron maupun *hole* dituliskan sebagai berikut (Daniellsson, 2000).

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n = R - G \quad (2.13)$$

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

Keterangan : q = besar muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$) C
 \vec{j}_n = rapat arus *hole* (A/cm²)
 \vec{j}_p = rapat arus elektron (A/cm²)
 G = Laju generasi (cm⁻³s⁻¹)
 R = Laju rekombinasi (cm⁻³s⁻¹)

Sedangkan rumusan untuk rapat arus elektron dan *hole* untuk *divais* semikonduktor misalnya persambungan p-n adalah

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n = -qG + qR_{SRH} \quad (2.15)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j}_p = qG - qR_{SRH} \quad (2.16)$$

Dari rumus rapat arus elektron dan *hole* diatas dapat ditentukan dengan rekombinasi Shockley-Read-Hall (R_{SRH}) (Danielsson, 2000):

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

Keterangan :

n_i = konsentrasi pembawa muatan intrinsik

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

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

n_1 = parameter konsentrasi elektron yang berhubungan dengan tingkat trap

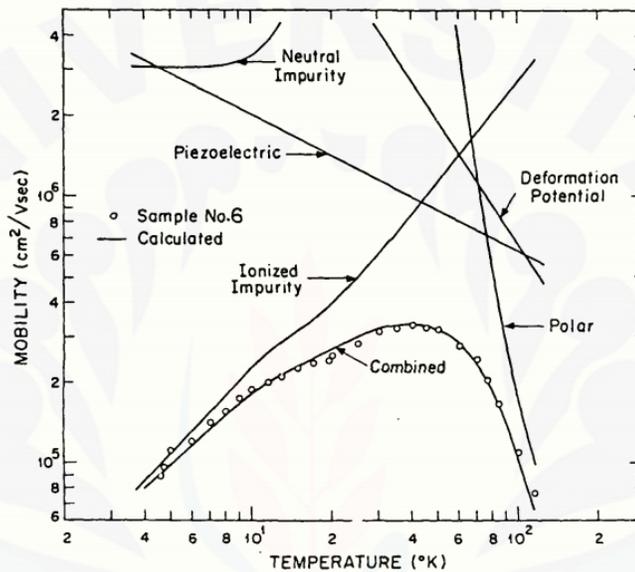
p_1 = parameter konsentrasi *hole* yang berhubungan dengan tingkat trap

(Goetzberger et al., 1998).

2.4 Mekanisme Hamburan Pembawa Muatan

Pada umumnya terdapat dua mekanisme tumbukan atau hamburan yang mendominasi dalam proses transport pembawa muatan pada semikonduktor, yaitu tumbukan kisi (fonon) dan tumbukan impuritas terionisasi. Selain itu ada banyak mekanisme hamburan minoritas yang terdapat pada bahan semikonduktor jika mengalami tumbukan. Karakteristik transport listrik pada bahan dipengaruhi secara

langsung oleh mekanisme perturbasi (gangguan) terhadap pergerakan pembawa muatan dalam bahan. Perturbasi (gangguan) biasanya terjadi akibat adanya berbagai jenis mekanisme hamburan (*scattering*). Mekanisme hamburan pada bahan sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti temperatur lingkungan (Subekti, 2003). Dalam penelitiannya Manion (1988) menunjukkan bahwa mobilitas elektron dipengaruhi oleh temperatur untuk berbagai macam hamburan (lihat gambar 2.7).



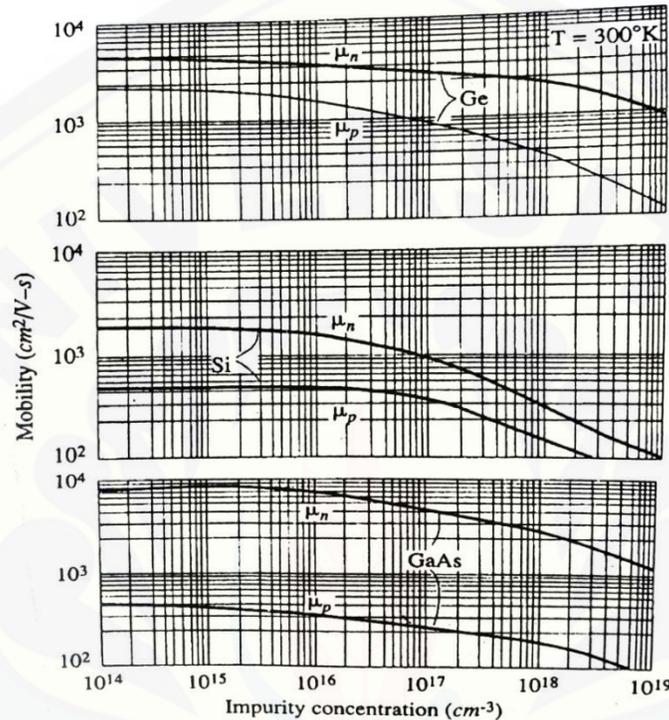
Gambar 2.7 Grafik experiment perhitungan mobilitas elektron pada GaAs untuk setiap hamburan yang mungkin terjadi pada bahan semikonduktor (Sumber : Manion, 1988)

2.4.1 Hamburan Impuritas Terionisasi

Abudukelimu (2012) menyatakan bahwa atom impuritas yang ditambahkan akan mempengaruhi karakteristik semikonduktor. Atom impuritas tersebut akan terionisasi pada temperatur ruang. Interaksi tersebut menghasilkan hamburan dan mempengaruhi karakteristik kecepatan pembawa muatan. Jika terjadi kenaikan temperatur, kecepatan termal acak pembawa muatan akan mengalami kenaikan, mengurangi waktu yang dihabiskan pembawa muatan di sekitar impuritas yang terionisasi. Berkurangnya waktu yang digunakan akan mengakibatkan kenaikan μ_i . Jika jumlah impuritas meningkat maka probabilitas akan meningkat sehingga akan menurunkan harga dari μ_i , dimana besar nilai dari μ_i (mobilitas) adalah

$$\mu_l = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{N_1} \quad (2.18)$$

dimana $N_1 = N_D^+ + N_A^-$ merupakan konsentrasi total impuritas yang terionisasi.



Gambar 2.8 Plot mobilitas elektron dan lubang terhadap konsentrasi impuritas untuk Ge, Si dan GaAs pada $T = 300\text{K}$ (Sumber : Subekti, 2003; Sze, 2007)

Gambar 2.8 menunjukkan jika N_1 naik, jumlah kejadian hamburan impuritas juga mengalami kenaikan sehingga mengalami penurunan mobilitas. Pada temperatur 300K konsentrasi impuritas elektron tertinggi pada bahan Gallium Arsenida. Sedangkan konsentrasi impuritas hole tertinggi pada bahan Germanium (Subekti, 2003).

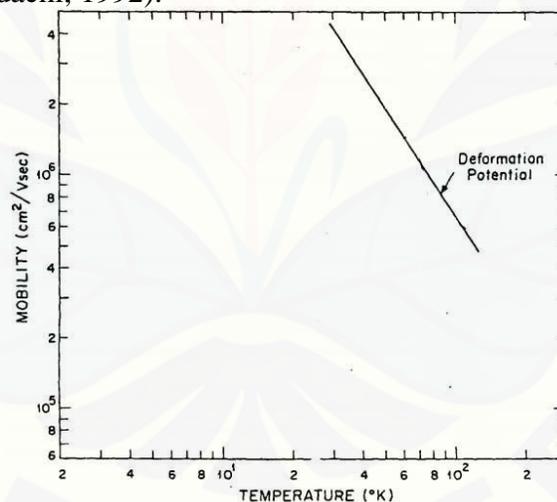
2.4.2 Hamburan Kisi (Fonon)

Hamburan kisi ini terjadi karena adanya vibrasi termal yang menyebabkan gangguan fungsi potensial sehingga menghasilkan interaksi antar elektron dan *hole*. Vibrasi termal terjadi karena energi termal pada semikonduktor berada diatas temperatur nol sehingga atom-atom bergetar secara acak. Getaran tersebut

mengakibatkan kebebasan elektron untuk bergerak terganggu sehingga elektron atau *hole* berinteraksi dengan kisi kristal. Pada dasarnya hamburan fonon dibagi menjadi dua yaitu hamburan potensial deformasi akustik dan hamburan fonon piezoelektrik. Kedua hamburan ini terjadi karena interaksi antara elektron dan *hole* dengan kisi kristal sehingga elektron-elektron yang semula simetris menjadi tidak simetris dan terjadi tumbukan satu sama lain (Heyn, 2011).

a. Hamburan Deformasi Potensial Akustik

Hamburan deformasi potensial akustik termasuk dalam hamburan elektron-fonon. Karena dalam hamburannya yang bertumbukan adalah elektron dan fonon yang diberikan pada suatu bahan. Ketika semikonduktor diberi tegangan maka temperatur meningkat, akibatnya mobilitas pembawa muatan berubah. Karena temperatur meningkat maka atom-atom dalam kisi akan bergetar dan berubah posisinya menjadi tidak periodik lagi (Adachi, 1992).



Gambar 2.9 Profil mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan potensial deformasi akustik pada bahan GaAs (Sumber : Manion, 1988)

Gambar 2.9 menunjukkan bahwa mobilitas elektron mengalami hamburan potensial deformasi akustik dalam kristal dan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan temperatur lingkungan, hal ini disebabkan temperatur lingkungan

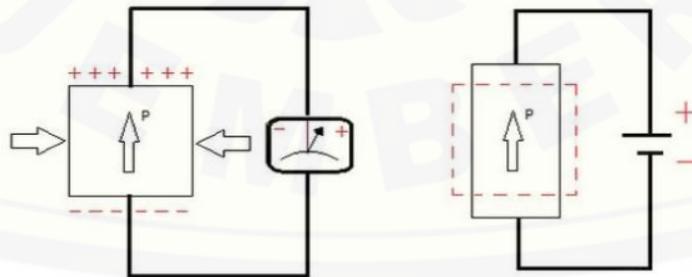
berpengaruh terhadap frekuensi osilasi dari vibrasi kisi kristal sehingga apabila temperatur ditingkatkan maka mekanisme terbentuknya potensial deformasi akustik semakin besar sehingga akan mengganggu transport listrik elektron dalam bahan (Manion, 1988).

b. Hamburan fonon piezoelektrik

Piezoelektrik didefinisikan sebagai suatu kemampuan yang dimiliki sebagian kristal maupun bahan-bahan tertentu lainnya yang dapat menghasilkan tegangan listrik jika mendapatkan perlakuan tekanan atau regangan (Triwahyuni, 2010).

Bahan Piezoelektrik terbentuk oleh keramik yang terpolarisasi sehingga beberapa bagian molekul bermuatan positif dan sebagian yang lain bermuatan negative membentuk elektroda - elektroda yang menempel pada dua sisi yang berlawanan dan menghasilkan medan listrik material yang dapat berubah akibat gaya mekanik (tekanan). Sebaliknya jika ada medan listrik melewati material piezoelektrik, molekul yang terpolarisasi akan menyesuaikan dengan medan listrik, dihasilkan dipole yang terinduksi dengan molekul atau struktur Kristal bahan tersebut. Penyesuaian molekul akan mengakibatkan material berubah dimensi. Fenomena ini disebut efek piezoelektrik (Indrawan, 2012).

Efek piezoelektrik dapat digambarkan pada gambar 2.10 Jika material piezoelektrik diberi aliran listrik maka material tersebut akan bergetar, dan sebaliknya bila diberi tekanan akan menghasilkan listrik (Benfano, 2014).



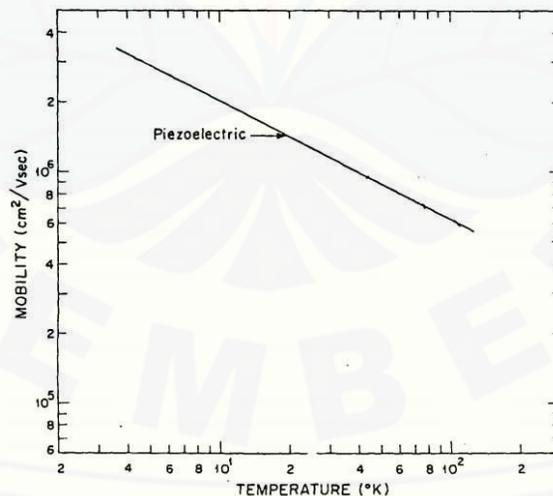
Gambar 2.10. Efek piezoelektrik: Jika material piezoelektrik diberi aliran listrik akan bergetar, bila ditekan akan menghasilkan listrik (Sumber : Indrawan, 2012)

“Adapun karakteristik dari bahan piezoelektrik adalah bisa mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan sebaliknya” (Indrawan, 2012).

Sementara itu, hamburan fonon piezoelektrik adalah hamburan yang terjadi pada bahan semikonduktor paduan yang masih terdapat ikatan ionik. Ikatan ion di dalam bahan semikonduktor beresilasi sehingga menghasilkan momen dipol perunit volum yang disebut polarisasi. Pada peristiwa hamburan fonon piezoelektrik jarak spasial antar muatan diabaikan sehingga jarak antar muatan juga diabaikan sehingga yang diperhatikan hanya ikatan ionnya (Seeger, 1989). Sehingga mobilitas elektron yang berhubungan dengan hamburan fonon piezoelektrik dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut (Dadi, 2010)

$$\mu_{pe} = \frac{16\sqrt{2}\pi^{\frac{1}{2}}6\hbar^2}{3\epsilon P^2 m^{-\frac{3}{2}}(kT)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.19)$$

Dari hasil simulasi yang dilakukan Dadi (2010) pada bahan GaN persamaan elektron sebagai fungsi dari temperatur lingkungan untuk tipe hamburan fonon piezoelektrik, dimana mobilitas elektron dalam bahan padat akan mengalami penurunan dimensi kisi kristal sehingga akibatnya dapat meningkatkan potensial piezoelektrik.



Gambar 2.11 Profil Mobilitas elektron sebagai fungsi temperatur lingkungan akibat mekanisme hamburan fonon piezoelektrik pada bahan GaAs (Sumber : Manion, 1988)

Sedangkan Manion (1988) dalam eksperimennya di dapatkan hasil bahwa nilai mobilitas elektron akan menurun jika temperatur meningkat hal ini berarti bahwa nilai mobilitas elektron untuk hamburan fonon piezoelektrik dipengaruhi oleh variasi temperatur (lihat gambar 2.11).

2.6 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode dimana geometri yang akan disimulasikan dibagi menjadi sejumlah elemen-elemen kecil. Semakin kecil elemen yang didefinisikan, hasil yang diperoleh semakin akurat. Elemen-elemen tersebut dapat berupa elemen segitiga ataupun segiempat, sesuai dengan struktur geometri yang akan disimulasikan. Untuk struktur geometri yang rumit biasanya menggunakan elemen segitiga (Usman, 2006).

FEM pertama kali diperkenalkan pada akhir tahun 1970, berbeda dengan metode beda hingga (*finite different method*, FDM) yang diperkenalkan lebih awal. 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 kontinyu 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 dibanding FDM. FEM lebih fleksibel digunakan dalam simulasi divais semikonduktor yang memiliki geometri yang tidak rata ataupun divais yang distribusi medan listrik dan pembawa muatannya sangat tidak linier (Handyanu, 2015).

Sebagaimana halnya dalam FDM, FEM juga memerlukan transformasi fungsi- fungsi kontinyu ke dalam bentuk diskrit. Namun demikian, FEM memerlukan definisi kondisi awal dalam pengimplementasiannya. Selain itu, stabilitas maupun kriteria konvergensi tidak dapat dipahami dengan baik dalam FEM. Hal inilah yang

menjadi kelemahan FEM dibanding FDM. Oleh karena itu, FEM dalam aplikasinya selalu menggunakan metode Galerkin. Untuk analisis domain, FEM membagi geometri menjadi bagian-bagian yang saling berikatan (*mesh*) dengan sejumlah titik simpul (*node*) sebagai irisan *mesh* (Usman, 2006).



BAB 3. METODE PENELITIAN

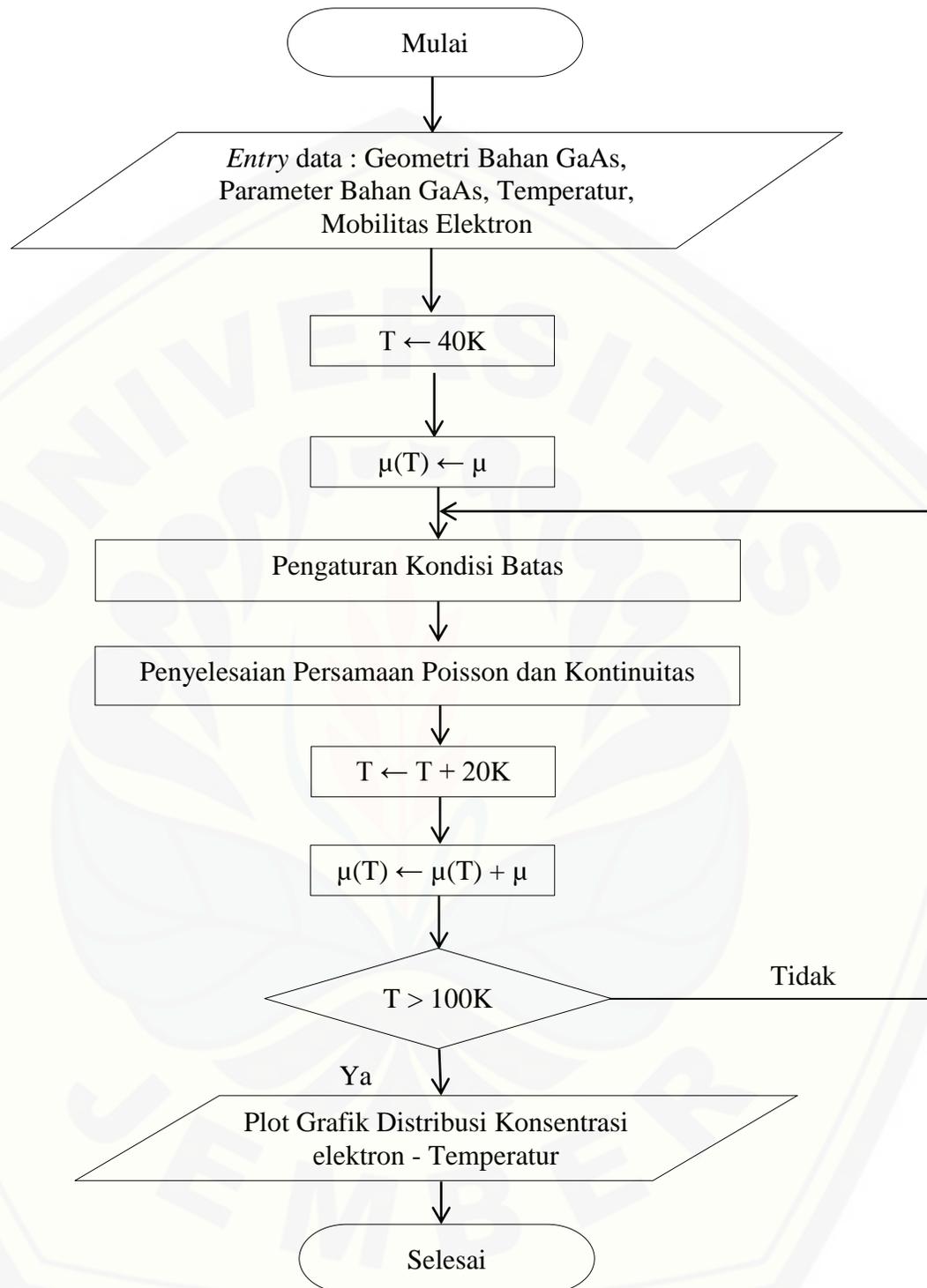
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Di dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat variasi temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron pada bahan GaAs. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Komputasi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember. Pelaksanaan penelitian dimulai dari Juni 2015 sampai selesai.

3.2 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengamati pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat variasi temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron pada bahan GaAs. Distribusi pembawa muatan yang disimulasikan adalah elektron. Persamaan dasar yang digunakan adalah persamaan Poisson dan Kontinuitas menggunakan metode elemen hingga yang solusinya dapat diselesaikan dengan simulasi. Kegiatan dimulai dengan pembuatan geometri dari bahan dalam bentuk 2D dan identifikasi parameter input yang digunakan.

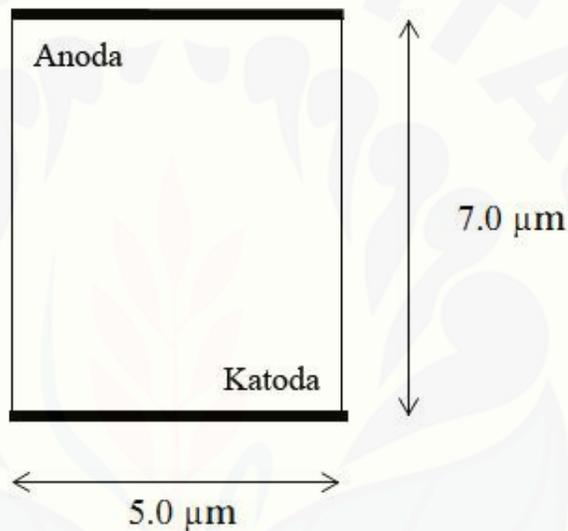
Tahap berikutnya melakukan pengaturan kondisi batas dan dilanjutkan menentukan solusi dari persamaan Poisson dan persamaan Kontinuitas. Solusi yang diperoleh adalah profil distribusi konsentrasi elektron dibawah kondisi temperatur. Dengan melakukan variasi terhadap temperatur akan diperoleh beberapa hasil distribusi konsentrasi elektron, sehingga dapat dianalisis bagaimana efek parameter tersebut terhadap jumlah elektron yang dihasilkan. Untuk lebih jelasnya kegiatan simulasi diuraikan atau ditampilkan dalam bentuk diagram alir sebagai yang ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut :



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Simulasi

3.2.1 Geometri Bahan Gallium Arsenid (GaAs)

Langkah pertama yang dilakukan adalah pembuatan geometri bahan dalam bentuk 2D. Geometri yang dibuat memiliki panjang $7.0 \mu\text{m}$ dan lebar $5.0 \mu\text{m}$. Terdapat 4 batas dengan kondisi yang berbeda yang ditetapkan pada bahan. Dimana sumbu x yaitu batas 2 dan 3 berturut-turut adalah anoda dan katoda yang merupakan batas kontak bahan dan sumbu y yaitu batas 1 dan 4 merupakan batas yang tidak berhubungan dengan bahan. Untuk lebih jelasnya lihat gambar 3.2 sebagai berikut:



Gambar 3.2 Geometri Bahan GaAs

3.2.2 Parameter Bahan Gallium Arsenida (GaAs)

Parameter-parameter yang akan digunakan dalam melakukan simulasi pengaruh variasi temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron dari semikonduktor GaAs dengan pendekatan hamburan fonon piezoelektrik seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Parameter- Parameter Input

Parameter Input	Nilai
Q	1.602e-19
Epsilon	8.854e-14
T	300
K	1.38e-23
Epsilonr	11.8
y1	0.7
x0	1e-3
Phi0	$k \cdot T / q$
C0	$\max(\text{abs}(\text{fldoping}(0,0,1)), \text{abs}(\text{fldoping}(0,-y1,1)))$
D0	$\max(k \cdot T / q \cdot 8500, k \cdot T / q \cdot 400)$
Ni	$9.00e8 / C0$
Mun	$8500 \cdot \text{Phi}0 / D0$
Mup	$400 \cdot \text{Phi}0 / D0$
M0	$9.1e-31$
Taun	$\text{mun} \cdot 0.068 \cdot m0 \cdot D0 / x0^2 \cdot 1.602e-19$
Taup	$\text{mup} \cdot 0.5 \cdot m0 \cdot D0 / x0^2 \cdot 1.602e-19$
Lambda2	$\text{Phi}0 \cdot \text{epsilon} \cdot \text{epsilon}r / (x0^2 \cdot q \cdot C0)$
Nsa	$(\text{fldoping}(0,0,C0)) / 2 + \sqrt{(\text{fldoping}(0,0,C0))^2 / 4 + ni^2}$
Nsc	$(\text{fldoping}(0,-y1,C0)) / 2 + \sqrt{(\text{fldoping}(0,-y1,C0))^2 / 4 + ni^2}$
Va	0

(Danielsson, 2000).

Simulasi akan dilakukan tanpa satuan, sehingga digunakan faktor skala yang menyebabkan beberapa ekspresi dari parameter tersebut menjadi setara. Parameter tersebut meliputi jarak (x, y, λ), tegangan listrik (ψ, V), konsentrasi pembawa muatan (n, p, N), koefisien pembawa muatan difusivitas (D_n, D_p), dan mobilitas pembawa muatan (μ_n, μ_p). dan untuk menunjukkan bentuk skala dari parameter-parameter tersebut sesuai dengan tabel 3.2 berikut ini:

Tabel 3.2 Faktor Skala

Parameter	Formula
Jarak (x, y)	$x_0 = \max(x , y ,)$
Beda potensial (ψ)	$\psi_0 = \frac{kT}{q}$
Konsentrasi pembawa muatan (n, p, N)	$C_0 = \max(N)$
Difusivitas pembawa muatan (D_n, D_p)	$D_0 = \max(D_n , D_p)$
Mobilitas pembawa muatan (μ_n, μ_p)	$\frac{D_0}{\psi_0}$
Konsentrasi intrinsik (n_i)	n_i
Waktu paruh muatan pembawa (τ_n, τ_p)	τ_n, τ_p

(Daniellson, 2000).

Dalam melakukan variasi temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron nilai mobilitas elektron didapat dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Manion tahun 1988. Di dalam penelitiannya Manion melakukan variasi temperatur untuk hamburan yang mungkin terjadi pada bahan GaAs. Untuk grafik hubungan mobilitas elektron dan variasi temperatur dapat dilihat pada gambar 2.7.

3.2.3 Pengaturan Kondisi Batas

Dalam mengatur kondisi batas pada suatu bahan digunakan kondisi batas Neumann dan kondisi batas Dirichlet. Dalam penggunaannya kondisi batas Dirichlet

digunakan untuk batas kontak konduktor dan bahan. Sedangkan batas Neumann digunakan untuk kondisi batas yang lainnya. Seperti yang ditunjukkan pada geometri bahan untuk daerah 2 dan 3 digunakan batas Dirichlet karena daerah 2 dan 3 merupakan daerah batas antara bahan dan konduktor sehingga memenuhi persamaan-persamaan berikut :

$$\Psi = V + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}}{n_i} \right) \quad (3.1)$$

Dimana N adalah fungsi konsentrasi dopan.

(Daniellson, 2000).

Sementara untuk batas daerah yang tidak berhubungan dengan konduktor menggunakan kondisi batas Neumann. Bentuk kondisi batas Neumann adalah sebagai berikut :

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.2)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{J}_n = 0 \quad (3.3)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{J}_p = 0 \quad (3.4)$$

Kondisi batas Neumann digunakan untuk daerah 1 dan 4 yang tidak berhubungan dengan konduktor. Sehingga karena kondisi batas Neumann sama dengan nol maka daerah yang menggunakan kondisi batas Neumann juga akan nol (Daniellson, 2000).

3.2.4 Persamaan Poisson dan Kontinuitas

Pada bahan semikonduktor GaAs, karena adanya muatan listrik yang terjadi akan menimbulkan medan listrik. Hubungan antara muatan listrik dan medan listrik pada bahan tersebut dapat digambarkan melalui persamaan Poisson berikut ini :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{q}{\epsilon} (-p + n - N_D^+ + N_A^-) = \frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (3.5)$$

Keterangan: ϵ = permitivitas bahan (F/cm)

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \text{medan listrik (volt/cm)} \\ p &= \text{konsentrasi hole (cm}^{-3}\text{)} \\ n &= \text{konsentrasi elektron (cm}^{-3}\text{)} \\ N_D^+ &= \text{konsentrasi atom donor (cm}^{-3}\text{)} \\ N_A^- &= \text{konsentrasi atom akseptor (cm}^{-3}\text{)} \end{aligned}$$

Sedangkan persamaan Kontinuitas yang digunakan sama dengan persamaan 2.11 dan 2.12. Karena simulasi ini tidak memperhitungkan faktor generasi maka persamaan 2.11 dan 2.12 menjadi:

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_n = R \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{j}_p = -R \quad (3.7)$$

Dalam persamaan diatas, R merupakan laju rekombinasi Shockley-Read-Hall, dimana nilainya adalah

$$R_{RSH} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (3.8)$$

Keterangan:

n_i = konsentrasi muatan pembawa intrinsik

τ_p = *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

(Goetzberger et al., 1998).

Sedangkan J_n dan J_p merupakan komponen arus difusi dengan formula seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$J_n = eD_n \frac{dn}{dx} \quad (3.9)$$

$$J_p = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad (3.10)$$

Untuk mendapatkan konsentrasi elektron maka persamaan Poisson dikalikan dengan konstanta skala semikonduktor (λ^2). Terdapat dua variable yaitu u dan v , dimana $u = e^{-V_A}$ dan $v = e^{V_A}$. Sehingga modifikasi formula pembawa muatan menjadi:

$$n = n_i e^{\psi} u \quad (3.11)$$

$$p = p_i e^{-\psi} v \quad (3.12)$$

Dengan adanya variable terikat tersebut, persamaan Poisson dan Kontinuitas termodifikasi menjadi berikut (Danielsson, 2000):

$$\lambda^2 \nabla^2 \psi = n_i (e^{\psi} u - e^{-\psi} v) - N \quad (3.13)$$

$$\bar{\nabla} (D_n n_i e^{\psi} \nabla u) = \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (ue^{\psi} + 1) + \tau_n (ue^{-\psi} + 1)} \quad (3.14)$$

$$\bar{\nabla} (D_p n_i e^{-\psi} \nabla v) = - \frac{n_i (uv - 1)}{\tau_p (ue^{\psi} + 1) + \tau_n (ue^{-\psi} + 1)} \quad (3.15)$$

(Daniellson, 2000).

3.3 Analisis Data

Simulasi pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat variasi temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron pada bahan semikonduktor GaAs dihitung pada variasi temperatur 40K, 60K, 80K dan 100K. Sementara untuk nilai variasi mobilitas elektron yang akan mempengaruhi distribusi konsentrasi pembawa muatan didapatkan dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh Manion tahun 1988. Dari grafik yang dihasilkan dianalisa bagaimana pengaruh variasi temperatur pada distribusi konsentrasi elektron. Setelah mendapatkan grafik distribusi konsentrasi pembawa muatan kemudian dibandingkan dengan parameter kontrol. Parameter kontrol yang digunakan diperoleh dari parameter input saat temperatur konstan di 300K. Parameter kontrol dipilih pada saat temperatur pada 300K karena bahan semikonduktor akan bekerja secara optimal pada sekitar temperatur ruang atau sekitar 300K. Setelah dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan parameter kontrol, akan dilakukan analisis terhadap kajian teoritis yang terkandung di dalamnya.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

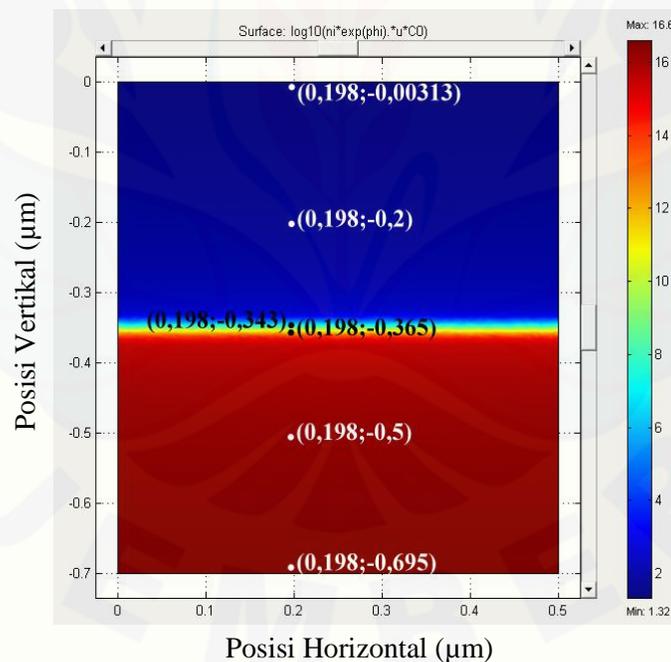
Hasil simulasi yang diperoleh memberikan informasi tentang profil distribusi konsentrasi elektron pada fenomena hamburan fonon piezoelektrik, yang terjadi akibat perubahan temperatur pada bahan semikonduktor GaAs. Pada bagian ini, analisis akan diberikan terhadap perubahan distribusi konsentrasi elektron hasil perhitungan, yang diperoleh pada setiap variasi temperatur yang diberikan.

Distribusi konsentrasi elektron yang disimulasikan meliputi empat buah keadaan temperatur dengan nilai mobilitas elektron sebesar: $1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, dan $8 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, berturut-turut berada pada temperatur 40K, 60K, 80K, dan 100K. Nilai-nilai distribusi konsentrasi elektron yang diamati berada pada 6 daerah (koordinat) yaitu pada daerah katoda (0,198;-0,696), daerah dekat katoda (0,198;-0,5), daerah tengah 1 (0,198;-0,365), daerah tengah 2 (0,198;-0,343), daerah dekat anoda (0,198;-0,2) dan daerah anoda (0,198;-0,00313) (lihat Gambar 4.1). Koordinat-koordinat tersebut dipilih berdasarkan daerah warna yang dibentuk, sehingga dari titik-titik tersebut juga dapat diketahui bagaimana distribusi konsentrasi elektron dengan warna yang berbeda.

Titik-titik yang diamati berada pada garis vertikal (titik-titik koordinat di sepanjang garis $x=0,198$). Hal tersebut dikarenakan bahan yang digunakan berbentuk kristal. Kristal memiliki susunan atom yang periodik (sumbu vertikal dan sumbu horizontal sama) sehingga mempunyai nilai distribusi konsentrasi elektron yang sama. Tetapi pada penelitian ini pada geometri yang digunakan yaitu batas 2 dan batas 3 secara vertikal atau berturut-turut kutub anoda dan kutub katoda diberikan perilaku yang berbeda karena batas-batas tersebut merupakan batas yang berhubungan langsung dengan logam. Kontak logam yang terjadi dapat mengakibatkan sifat keperiodikan bahan berubah pada sumbu vertikal sehingga mengakibatkan nilai distribusi konsentrasi elektron yang berbeda pada sumbu vertikal. Sedangkan untuk batas 1 dan batas 4 (horizontal) tidak diberi kontak logam

sehingga susunan atom secara horizontal tetap periodik. Jika dilakukan pengamatan pada sumbu horizontal (Gambar 4.1) misalnya pada koordinat (0,198;0,5), (0,251;0,5) dan (0,398;0,5) didapatkan nilai konsentrasi elektron pada ketiga titik horizontal tersebut memiliki nilai yang sama yaitu sebesar $16,26100 \times 10^{16} \mu\text{m}^{-1}$. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi elektron pada sumbu horizontal sama sehingga pengamatan yang dilakukan hanya dalam bidang vertikal. Setelah didapatkan hasil simulasi selanjutnya dibandingkan dengan parameter kontrol. Parameter kontrol yang digunakan adalah hasil distribusi konsentrasi elektron saat mobilitasnya $8500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ pada temperatur 300K. Hal ini disebabkan pada temperatur 300K bahan semikonduktor bekerja secara optimal dalam mengantarkan arus listrik.

Percobaan dimulai dengan mensimulasikan bahan GaAs pada saat temperatur 40K, dimana pada temperatur ini mempunyai nilai mobilitas elektron sebesar $1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada hamburan fonon piezoelektrik untuk temperatur 40K dengan distribusi warna menunjukkan data perhitungan dalam skala logaritmik

Distribusi konsentrasi elektron pada bahan GaAs ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada bagian atas geometri terdapat persamaan $surface : \log_{10}(ni * \exp(phi) * u * C0)$. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa permukaan (*surface*) yang ditampilkan merupakan distribusi konsentrasi elektron saja. Sedangkan pada bagian samping geometri menunjukkan indeks warna yang terbentuk. Masing-masing warna memiliki nilai distribusi konsentrasi elektron yang berbeda. Nilai distribusi konsentrasi elektron yang dihasilkan bervariasi. Pada penelitian ini skala minimum dari konsentrasi elektron yang dapat dibaca sebesar $1 \times 10^{1,32} \mu\text{m}^{-1}$ atau sebesar 21 elektron/ μm . Sedangkan untuk skala maksimum yang dapat dibaca sebesar $1 \times 10^{16,6} \mu\text{m}^{-1}$ atau sekitar $39,8 \times 10^{16}$ elektron/ μm .

Hasil tersebut diperoleh dengan penyelesaian persamaan Poisson dan Kontinuitas dengan menggunakan metode elemen hingga. Sedangkan persamaan untuk konsentrasi elektron bahan GaAs yang digunakan adalah sebagai berikut

$$N = N_{DN} \max .e^{-(y+y1)^2} - N_{AP} \max .e^{(-y^2)} \quad (4.1)$$

Dengan menggunakan persamaan 4.1 diperoleh hasil yang sesuai dengan teori dimana konsentrasi elektron akan lebih besar pada kutub katoda (merah tua) dan konsentrasi elektron akan kecil pada daerah anoda (biru tua). Hal ini terjadi karena katoda merupakan kutub negatif sehingga nilai konsentrasi elektron lebih besar dari pada anoda yang merupakan kutub positif. Tetapi untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan teori maka nilai y yang dimasukkan harus bernilai negatif. Nilai y negatif yang dimasukkan pada persamaan 4.1 menunjukkan semakin nilai y negatif maka peningkatan elektron dari daerah anoda ke daerah katoda akan semakin besar.

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan (Gambar 4.1) secara keseluruhan hasil simulasi membentuk dua warna yang dominan (biru tua dan merah tua). Warna merah tua (katoda) mengindikasikan bahwa pada daerah tersebut konsentrasi elektronnya tinggi (*hole* rendah) sedangkan warna biru tua (anoda) mengindikasikan bahwa konsentrasi elektronnya rendah (*hole* tinggi). Jika diamati lebih lanjut, hasil simulasi membentuk struktur yang mirip dengan persambungan p-n pada dioda. Dimana

daerah dengan warna merah tua mirip dengan semikonduktor tipe-n karena memiliki konsentrasi elektron besar. Sedangkan daerah dengan warna biru tua mirip dengan semikonduktor tipe-p karena memiliki konsentrasi elektron yang rendah. Selain itu pada bagian tengah geometri terdapat sebuah daerah yang mirip dengan daerah deplesi. Daerah mirip deplesi ini terbentuk karena bahan yang digunakan (GaAs) memiliki ikatan ionik. Ikatan ionik di dalam bahan semikonduktor beresilasi sehingga menghasilkan momen dipol yang kemudian disebut dengan polarisasi (Seeger, 1989). Polarisasi yang terjadi dapat menyebabkan distribusi konsentrasi elektron tidak merata. Daerah anoda memiliki konsentrasi elektron lebih rendah yang merupakan kutub positif, sedangkan katoda yang merupakan kutub negatif memiliki konsentrasi elektron lebih besar. Pengaruh perbedaan konsentrasi yang besar antara katoda (merah tua) dan anoda (biru tua) menyebabkan daerah deplesi yang membagi atau membatasi kedua daerah dengan konsentrasi yang berbeda. Menurut Fukuda (1998) jika ditinjau berdasarkan distribusi pembawa muatannya, daerah deplesi merupakan daerah batas antara ion negatif dan ion positif pada suatu bahan yang masih memiliki ikatan ionik.

Dari hasil simulasi yang sudah diperoleh kemudian dilakukan pengamatan pada daerah-daerah koordinat yang sudah ditentukan. Hasil distribusi konsentrasi elektron yang diperoleh untuk setiap variasi temperatur kemudian dibandingkan dengan teori yang ada. Hasil pengamatan saat temperatur 40K dapat dilihat pada Tabel 4.1 untuk setiap daerah koordinat.

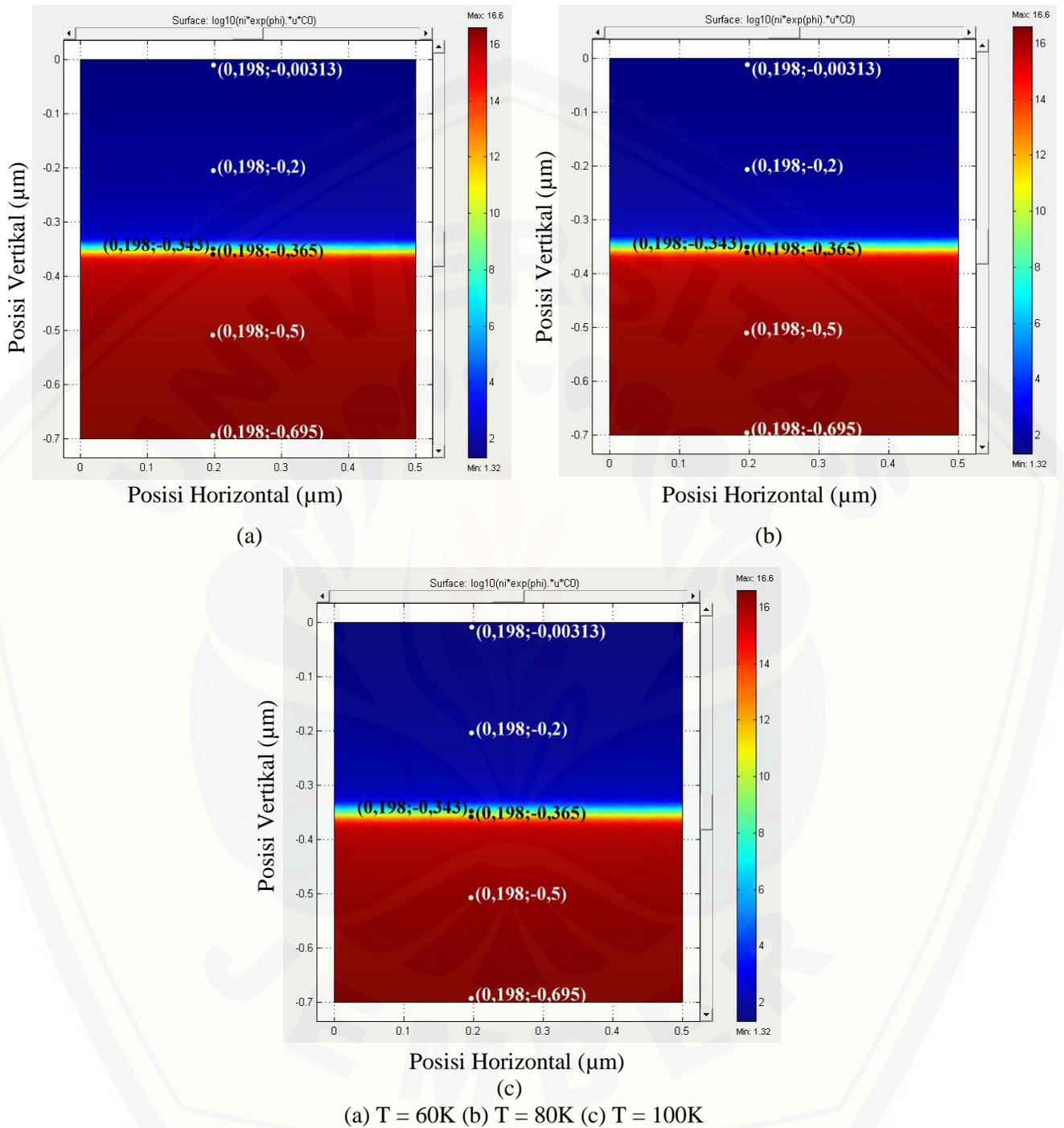
Dari hasil pengamatan, sesuai dengan Tabel 4.1 didapatkan hasil bahwa daerah katoda memiliki nilai konsentrasi elektron yang lebih besar dari pada daerah lainnya dan daerah anoda memiliki nilai konsentrasi elektron yang lebih kecil dari pada daerah lainnya. Hal ini menunjukkan hasil yang sesuai dengan teori yang ada dimana daerah katoda adalah kutub negatif memiliki konsentrasi elektron lebih tinggi dan daerah anoda adalah kutub positif memiliki konsentrasi *hole* yang lebih besar dari pada konsentrasi elektronnya (Giancoli, 2001).

Tabel 4.1 Distribusi Konsentrasi Elektron pada Temperatur 40K

T (K)	Koordinat	Konsentrasi Elektron (μm^{-1})
40	Daerah Katoda (0,198;-0,696)	$16,58370 \times 10^{16}$
	Daerah Dekat Katoda (0,198;-0,5)	$16,26100 \times 10^{16}$
	Daerah Tengah 1 (0,198;-0,365)	$14,53100 \times 10^{11}$
	Daerah Tengah 2 (0,198;-0,343)	$6,10084 \times 10^8$
	Daerah Dekat Anoda (0,198;-0,2)	$1,64700 \times 10^2$
	Daerah Anoda (0,198;-0,00313)	$1,32300 \times 10^2$

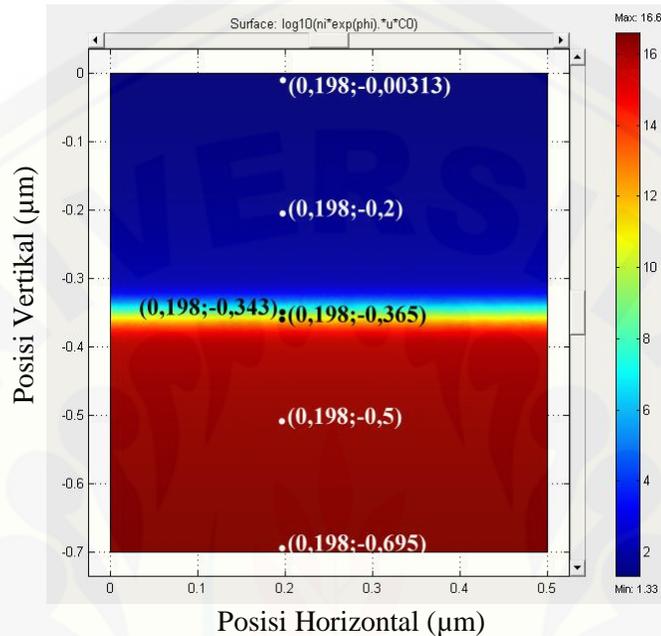
Selanjutnya percobaan yang dilakukan dengan memvariasikan temperatur dan mobilitas elektron yang diperoleh dari eksperimen Manion (1988) pada proses hamburan fonon piezoelektrik. Percobaan dilakukan pada temperatur 60K, 80K, 100K dengan nilai mobilitas elektronnya berturut-turut sebesar $8 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Dari hasil *running* simulasi diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Sama halnya dengan percobaan pertama pada Gambar 4.2 dilakukan pengamatan pada setiap koordinat daerah yang akan diamati dan dicatat distribusi konsentrasi elektron yang diperoleh. Hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron untuk perubahan temperatur 60K, 80K, 100K dapat dilihat pada lampiran A. Dapat dilihat pada lampiran A.1, A.2 dan A.3 konsentrasi elektron untuk setiap koordinat daerah yang telah diamati menghasilkan nilai yang berbeda. Pada daerah katoda nilai konsentrasi elektronnya lebih besar dan cenderung menurun ketika menuju daerah tengah dan konsentrasi elektron terkecil pada daerah anoda. Hal tersebut dibuktikan dengan perubahan warna yang terjadi, mulai dari merah pada katoda menuju daerah tengah dengan warna kuning atau biru muda dan berakhir pada daerah dengan konsentrasi elektron paling kecil yaitu anoda dengan warna biru tua.



Gambar 4.2 Distribusi konsentrasi elektron untuk beberapa temperatur (T) dengan distribusi warna menunjukkan data perhitungan dalam skala logaritmik

Sementara itu untuk parameter kontrol yang disimulasikan digunakan temperatur 300K dengan mobilitas elektron 8500 cm²/Vs. Dari hasil simulasi didapatkan hasil seperti Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada hamburan fonon piezoelektrik untuk temperatur 300K dengan distribusi warna menunjukkan data perhitungan dalam skala logaritmik

Tabel 4.2 Konsentrasi Elektron Untuk Setiap Koordinat pada Temperatur 300K

T (K)	Koordinat	Konsentrasi Elektron (µm ⁻¹)
300K	Daerah Katoda (0,198;-0,696)	16,58370 x 10 ¹⁶
	Daerah Dekat Katoda (0,198;-0,5)	16,26100 x 10 ¹⁶
	Daerah tengah 1 (0,198;-0,365)	12,48220 x 10 ¹¹
	Daerah Tengah 2 (0,198;-0,343)	7,37276 x 10 ⁸
	Daerah Dekat Anoda (0,198;-0,2)	1,64700 x 10 ²
	Dekat Anoda (0,198;-0,00313)	1,32300 x 10 ²

Jika diamati Gambar 4.3 menunjukkan adanya perbedaan dengan hasil simulasi sebelumnya, jika dilihat dengan kasat mata yaitu daerah tengah (daerah mirip deplesi) pada temperatur 300K lebih lebar ($0,48 \mu\text{m}$) dari pada daerah tengah (daerah mirip deplesi) simulasi temperatur di bawah 300K (lebar antara $0,11 \mu\text{m} - 0,20 \mu\text{m}$). Hal tersebut terjadi karena meningkatnya temperatur akan meningkatkan vibrasi termal atom yang berarti akan meningkatkan peluang tumbukan antar partikel intrinsik dengan atom. Sehingga memperkecil peluang partikel intrinsik untuk menembus *junction* dan akhirnya daerah mirip deplesinya semakin lebar (Arifin, 2004). Jika warna kuning dan biru muda pada daerah mirip deplesi tersebut lebih lebar maka daerah dengan nilai konsentrasi elektron sekitar $12,4 \times 10^{11} \mu\text{m}^{-1}$ (untuk daerah kuning) dan $7,36 \times 10^8 \mu\text{m}^{-1}$ (untuk daerah biru muda) akan lebih banyak. Hal tersebut mengakibatkan proses difusi elektron dari katoda ke anoda akan lebih sukar dari pada difusi elektron pada temperatur di bawah 300K yang cenderung menurun lebih cepat khususnya pada hamburan fonon piezoelektrik.

Berdasarkan hasil simulasi yang sudah dilakukan dengan memvariasikan temperatur, mobilitas elektron dan jika dibandingkan dengan parameter kontrol. Maka dapat dilihat bagaimana pengaruh perubahan temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron pada bahan GaAs berdasarkan koordinat daerah-daerah yang sudah diamati yaitu daerah katoda, daerah dekat katoda, daerah tengah 1, daerah tengah 2, daerah dekat anoda dan daerah anoda. Pada daerah katoda didapatkan hasil konsentrasi elektron seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Konsentrasi Elektron Daerah Katoda dengan Variasi Temperatur

Koordinat Daerah	Temperatur (K)	Konsentrasi Elektron (μm^{-1}) ($\times 10^{16}$)
Daerah Katoda (0,198;-0,696)	40	16,58370
	60	16,58370
	80	16,58370
	100	16,58370

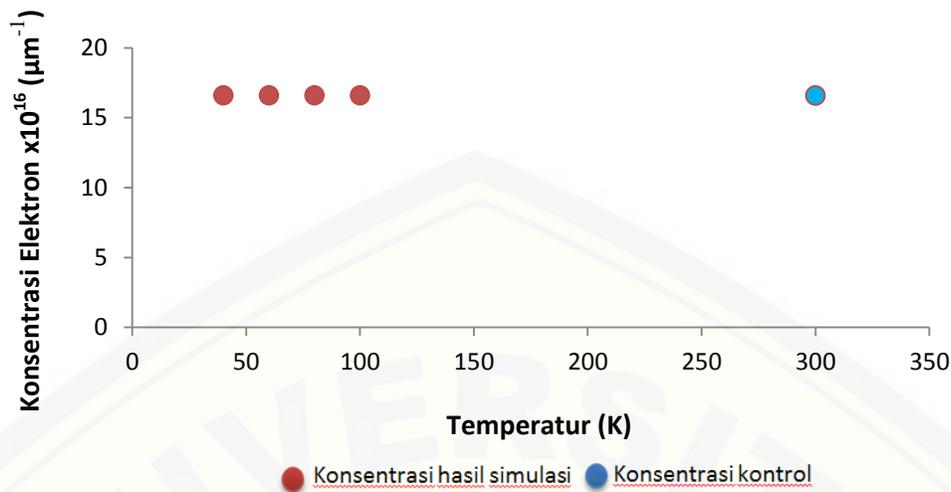
Tabel 4.4 Konsentrasi Elektron Daerah Dekat Katoda dengan Variasi Temperatur

Koordinat Daerah	Temperatur (K)	Konsentrasi Elektron (μm^{-1}) ($\times 10^{16}$)
Daerah Dekat Katoda(0,198;-0,5)	40	16,26100
	60	16,26100
	80	16,26100
	100	16,26100

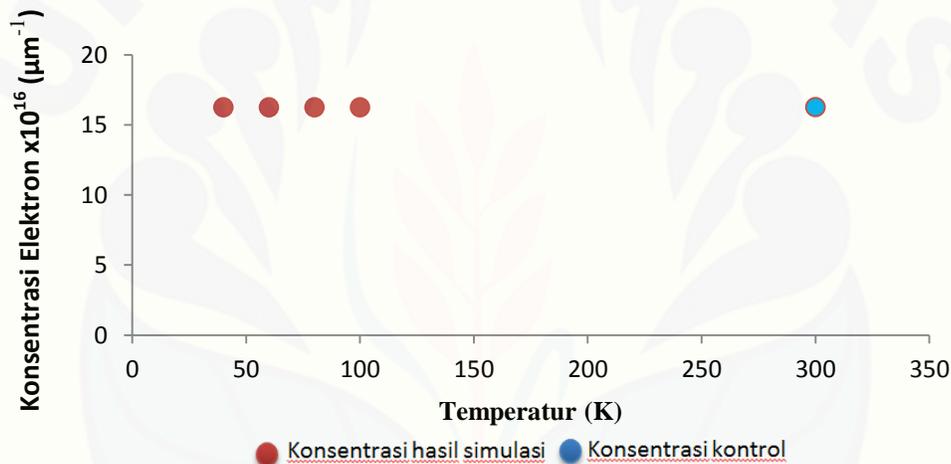
Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, distribusi konsentrasi elektron pada daerah katoda dan daerah dekat katoda untuk perubahan temperatur menghasilkan nilai yang sama. Untuk daerah dekat katoda konsentrasi elektron yang dihasilkan lebih kecil dari pada daerah katoda. Tetapi konsentrasi elektron yang dihasilkan tidak berubah (konstan). Hal ini dapat dijelaskan bahwasanya untuk daerah dekat katoda (sumbu horizontal $y = 0,5$) konsentrasi elektron maksimum yang dapat dihasilkan adalah $16,26100 \times 10^{16} \mu\text{m}^{-1}$. Sehingga perubahan temperatur yang dilakukan tidak mempengaruhi konsentrasi elektron yang dihasilkan khususnya untuk fenomena hamburan fonon piezoelektrik.

Sementara itu, untuk konsentrasi elektron pada daerah katoda juga memiliki nilai yang sama yaitu $16,58370 \times 10^{16} \mu\text{m}^{-1}$. Hal ini menunjukkan bahwa pada daerah katoda (koordinat 0,198;-0,696) distribusi konsentrasi elektronnya telah mencapai keadaan maksimum, sehingga distribusi konsentrasi elektronnya konstan. Konsentrasi elektron yang telah dicapai mengindikasikan adanya daerah kuasa netral dengan keadaan atom donor yang telah terionisasi secara keseluruhan (Schumacher dan Wettling, 2000). Sehingga perubahan temperatur yang dilakukan tidak berpengaruh terhadap distribusi konsentrasi elektron yang dihasilkan pada daerah katoda dan dekat katoda.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan kemudian dibandingkan dengan parameter kontrol. Untuk mempermudah pengamatan dibuat grafik hubungan antara konsentrasi elektron dan perubahan temperatur untuk daerah katoda dan dekat katoda seperti Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Grafik hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada daerah katoda



Gambar 4.5 Grafik hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada daerah dekat katoda

Grafik diatas menunjukkan jika dibandingkan dengan parameter kontrol pada daerah katoda memiliki nilai konsentrasi elektron yang tetap. Hal yang serupa juga ditunjukkan pada daerah dekat katoda (Gambar 4.5) yang memiliki nilai konsentrasi elektron yang tidak berubah. Sehingga perubahan temperatur tidak mempengaruhi distribusi konsentrasi elektron pada daerah katoda dan dekat katoda.

Untuk daerah pengamatan yang ketiga adalah daerah tengah 1. Daerah tengah 1 adalah daerah yang memiliki warna kuning. Daerah ini memiliki nilai konsentrasi elektron yang lebih rendah daripada daerah katoda tetapi memiliki nilai konsentrasi elektron yang lebih tinggi daripada daerah anoda. Hal tersebut dapat dilihat dengan

hanya mengamati perbedaan warna yang terjadi. Warna merah tua menunjukkan nilai konsentrasi yang paling tinggi dan akan terus menurun sampai daerah dengan warna biru tua (daerah anoda). Dari hasil simulasi dengan melakukan perubahan temperatur didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Konsentrasi Elektron Daerah Tengah 1 dengan Variasi Temperatur

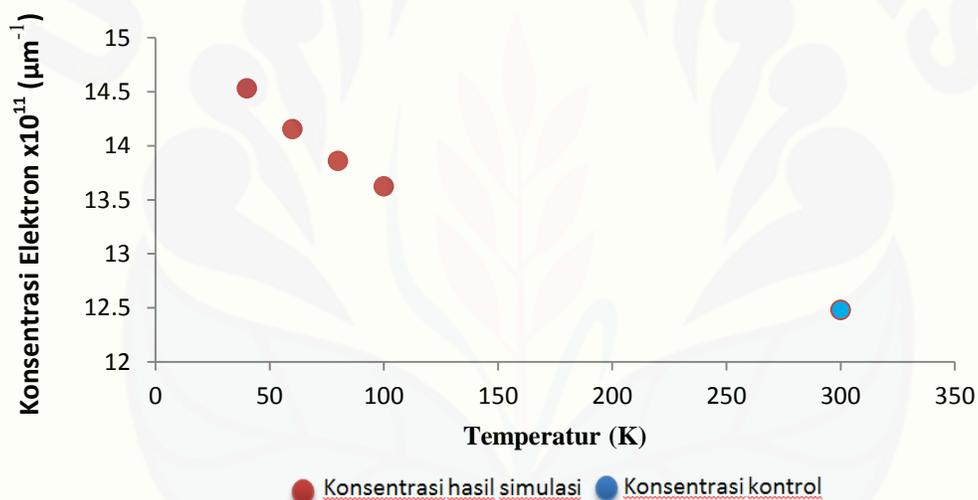
Koordinat Daerah	Temperatur (K)	Konsentrasi Elektron (μm^{-1}) ($\times 10^{11}$)
Daerah Tengah 1 (0,198;-0,365)	40	14,53100
	60	14,15330
	80	13,85930
	100	13,62330

Pada Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa distribusi konsentrasi elektron berubah terhadap perubahan temperatur yang terjadi pada bahan tersebut. Semakin besar nilai temperatur maka konsentrasi elektronnya akan semakin menurun. Hal ini dipengaruhi oleh proses yang terjadi di daerah mirip deplesi. Daerah mirip deplesi dibentuk karena perbedaan muatan antara daerah mirip semikonduktor tipe-p yang mayoritas pembawa muatannya adalah *hole* (ion positif) dan minoritas pembawa muatannya adalah elektron (ion negatif) yang disambungkan dengan daerah mirip semikonduktor tipe-n yang mayoritas pembawa muatannya adalah elektron (ion negatif) dan minoritas pembawa muatannya adalah *hole* (ion positif). Ketika kedua daerah disambungkan maka adanya kelebihan *hole* (ion positif) pada daerah mirip tipe-p dan elektron pada daerah mirip tipe-n (ion negatif) akan mengakibatkan terjadinya arus difusi, yakni arus difusi *hole* dari daerah mirip tipe-p menuju daerah mirip tipe-n dan arus difusi elektron dari daerah mirip tipe-n menuju daerah mirip tipe-p.

Proses difusi yang terjadi mengakibatkan pada daerah mirip deplesi ini akan terjadi penumpukan pembawa muatan minoritas *hole* (ion positif) di sekitar daerah batas tipe-n dan penumpukan pembawa muatan minoritas elektron (ion negatif) pada batas tipe-p (Subekti, 2003). Pada daerah tengah 1 jika temperatur yang diberikan pada bahan ditingkatkan maka akan mengakibatkan peningkatan konsentrasi elektron

pada bahan. Sehingga menyebabkan konsentrasi pada bahan tidak seimbang karena elektron yang dihasilkan akan berkumpul pada daerah katoda (kutub negatif). Peningkatan pembawa muatan mayoritas yaitu elektron (ion negatif) maka pembawa muatan minoritas atau *hole* (ion positif) juga meningkat dan berkumpul pada daerah mirip deplesi karena peningkatan temperatur yang terjadi. Hal tersebut terjadi akibat difusi elektron dari daerah mirip tipe-n menuju daerah mirip tipe-p. Sehingga pada daerah tengah 1 konsentrasi elektron menurun akibat perubahan temperatur.

Selanjutnya dari hasil yang telah diperoleh kemudian dibandingkan dengan parameter kontrol dan dibuat grafik hubungan antara konsentrasi elektron dan perubahan temperatur seperti ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada daerah tengah 1

Dari Gambar 4.6 diketahui bahwa pada saat temperatur 300K konsentrasi elektron yang dihasilkan lebih kecil dari pada variasi temperatur yang dilakukan. Hal tersebut terjadi karena difusi elektron dari daerah mirip tipe-n menuju daerah mirip tipe-p yang meninggalkan *hole* pada daerah tersebut. Sehingga semakin tinggi temperatur yang diberikan pada bahan maka akan semakin kecil pula konsentrasi elektron yang dihasilkan pada daerah tengah 1.

Daerah yang diamati selanjutnya adalah daerah tengah 2. Daerah tengah 2 ditunjukkan dengan warna biru muda. Hasil dari pengamatan konsentrasi elektron yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Konsentrasi Elektron Daerah Tengah 2 dengan Variasi Temperatur

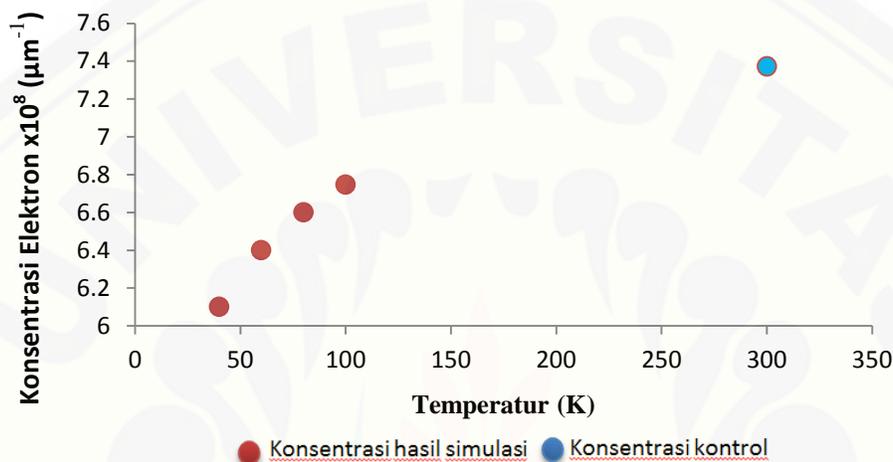
Koordinat Daerah	Temperatur (K)	Konsentrasi Elektron (μm^{-1}) ($\times 10^8$)
Daerah Tengah 2 (0,198;-0,343)	40	6,10084
	60	6,39966
	80	6,59970
	100	6,74764

Dari hasil simulasi untuk perubahan temperatur yang dilakukan pada daerah tengah 2 diketahui bahwa semakin tinggi temperatur yang diberikan pada bahan maka konsentrasi elektron yang dihasilkan juga semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan teori yang ada dimana jika temperatur meningkat maka energi termal yang dihasilkan pada bahan tersebut juga akan meningkat. Sehingga energi termal yang dihasilkan oleh bahan akan lebih besar dari pada energi gapnya. Jika energi termal lebih besar dari energi gap, maka elektron akan mudah meloncat dari pita valensi ke pita konduksi dan menyebabkan terjadinya hantaran arus listrik (Callister, 1940). Oleh karena itu, semakin tinggi nilai temperatur maka distribusi konsentrasi elektron yang dihasilkan akan semakin besar.

Selain itu jika ditinjau dari proses yang terjadi pada daerah deplesi sesuai yang sudah dipaparkan sebelumnya, pada daerah tengah 2 akan mengalami peningkatan konsentrasi elektron (ion negatif) karena perubahan temperatur. Hal tersebut terjadi karena saat konsentrasi elektron (ion negatif) meningkat akibat perubahan temperatur maka elektron (ion negatif) tersebut akan berdifusi dari daerah mirip tipe-n ke daerah mirip tipe-p. Tetapi jika elektron (ion negatif) berdifusi ke daerah mirip tipe-p dan ternyata elektron (ion negatif) tersebut tidak mendapatkan pasangan (*hole*) (ion positif) setelah berdifusi maka elektron (ion negatif) tersebut akan menjadi pembawa muatan minoritas untuk daerah mirip tipe-p (Subekti, 2003). Sehingga daerah tengah 2

mengalami peningkatan distribusi konsentrasi elektron karena peningkatan temperatur pada bahan tersebut.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, jika dibandingkan dengan parameter kontrol, kemudian dapat di plot dalam bentuk grafik hubungan antara konsentrasi elektron dan perubahan temperatur seperti Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada daerah tengah 2

Setelah dibandingkan dengan parameter kontrol diperoleh hasil yang sesuai dengan teori dimana konsentrasi elektron pada temperatur 300K lebih besar dari konsentrasi elektron pada variasi temperatur yang sudah dilakukan. Hal tersebut sesuai dengan teori yang ada dimana jika temperatur meningkat maka akan membuat energi termal bahan lebih tinggi dari energi gap sehingga elektron sehingga lebih mudah berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Daerah pengamatan yang selanjutnya adalah daerah di dekat anoda dan daerah anoda. Daerah-daerah ini ditunjukkan dengan warna biru tua. Dari hasil simulasi untuk kedua daerah ini menunjukkan konsentrasi elektron yang relatif sama. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai V_a yang diinputkan dalam simulasi. Besar kecilnya nilai V_a mempengaruhi distribusi konsentrasi elektron yang dihasilkan. Pada penelitian ini tidak melakukan variasi pada tegangan input (V_a) atau V_a yang digunakan konstan. Sehingga konsentrasi elektron yang dihasilkan dijaga agar tetap

konstan atau relatif sama. Fitriana (2014) mengatakan bahwa nilai tegangan yang diberikan mempengaruhi konsentrasi elektron yang dihasilkan pada bahan semikonduktor. Semakin besar nilai tegangan maka nilai konsentrasi elektron anoda maupun katoda juga akan berubah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8.

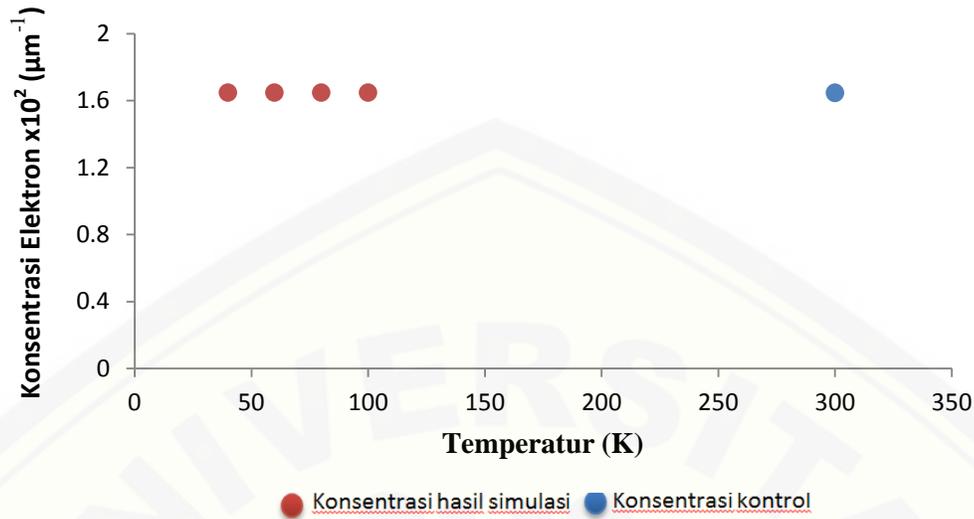
Tabel 4.7 Konsentrasi Elektron Daerah Dekat Anoda dengan Variasi Temperatur

Koordinat Daerah	Temperatur (K)	Konsentrasi Elektron (μm^{-1}) (x 10^2)
Daerah Dekat Anoda (0,198;-0,2)	40	1,64700
	60	1,64700
	80	1,64700
	100	1,64700

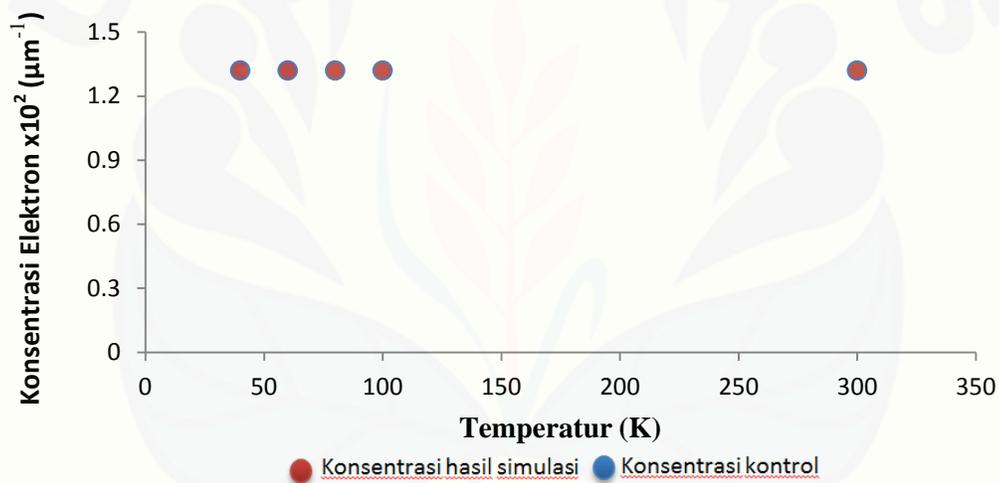
Tabel 4.8 Konsentrasi Elektron Daerah Anoda dengan Variasi Temperatur

Koordinat Daerah	Temperatur (K)	Konsentrasi Elektron (μm^{-1}) (x 10^2)
Daerah Anoda (0,198;-0,00313)	40	1,32300
	60	1,32300
	80	1,32300
	100	1,32300

Selain itu dilakukan pula perbandingan hasil simulasi dengan parameter kontrol pada daerah dekat anoda dan anoda, dengan memplot grafik antara konsentrasi elektron dan perubahan temperatur pada daerah tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.dan 4.9.



Gambar 4.8 Grafik hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada daerah dekat anoda



Gambar 4.9 Grafik hasil simulasi distribusi konsentrasi elektron pada daerah anoda

Jika dilakukan perbandingan dengan parameter kontrol untuk daerah dekat anoda dan daerah anoda menunjukkan bahwa konsentrasi yang dihasilkan dari hasil perbandingan memiliki nilai relatif sama. Tegangan yang diberikan pada proses simulasi mempengaruhi konsentrasi elektron yang dihasilkan pada bahan semikonduktor. Semakin besar nilai tegangan maka nilai konsentrasi elektron anoda maupun katoda juga akan berubah (Fitriana, 2014).

Dari semua hasil yang sudah diperoleh dan hasil perbandingan dengan parameter kontrol yang dilihat dari grafik yang terbentuk (Gambar 4.4 sampai Gambar 4.9) didapatkan hasil pada daerah katoda, daerah dekat katoda memiliki nilai distribusi konsentrasi elektron yang sama karena sudah mencapai konsentrasi elektron maksimum (terionisasi keseluruhan), sedangkan daerah tengah 1 nilai konsentrasi elektron yang dihasilkan lebih kecil daripada temperatur di bawah 300K. Sedangkan untuk titik pengamatan pada daerah tengah 2, konsentrasi elektron pada temperatur 300K lebih tinggi daripada konsentrasi elektron pada temperatur di bawah 300K. Kondisi ini sudah bersesuaian dengan teori yang ada, dimana konsentrasi elektron akan meningkat dengan meningkatnya temperatur yang ada pada bahan tersebut. Sementara untuk daerah dekat katoda dan daerah katoda, konsentrasi elektron yang dihasilkan pada temperatur 300K relatif sama dengan konsentrasi elektron dari hasil variasi temperatur dibawah 300K. Hal tersebut terjadi karena tegangan yang diberikan pada proses simulasi mempengaruhi konsentrasi elektron yang dihasilkan pada bahan semikonduktor.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi pengaruh hamburan fonon piezoelektrik akibat perubahan temperatur terhadap distribusi konsentrasi elektron pada semikonduktor Galium Arsenida, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil simulasi menunjukkan terdapat perbedaan dalam distribusi konsentrasi elektronnya, dimana konsentrasi elektron yang dihasilkan mengalami penurunan dari daerah katoda menuju daerah anoda.
2. Konsentrasi elektron mengalami perubahan akibat peningkatan temperatur kecuali pada daerah katoda dan anoda.

5.2 Saran

Ada beberapa masukan atau saran yang diharapkan bisa digunakan sebagai acuan dalam penelitian selanjutnya, yaitu

1. Pada penelitian ini, belum dilakukan pengamatan terhadap distribusi konsentrasi *hole* yang dihasilkan sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat mengkaji bagaimana distribusi konsentrasi *hole* yang dihasilkan.
2. Penelitian ini dilakukan dengan model 2 Dimensi untuk menampilkan distribusi konsentrasi elektronnya. Sehingga untuk penelitian yang selanjutnya diharapkan bisa dikembangkan dalam model 3 Dimensi.

DAFTAR PUSTAKA

BUKU

- Adachi, S. 1992. *Physical Properties of III-V Semikonductor Coumponds (InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, In GaAsP)*. Canada : John Wiley & Sons.
- Ardriansyah, A. 2012. *Dasar Elektronika : Modul 2 Teori Semikonduktor*. Jakarta : UMB.
- Arifin, I. 2004. *Elektronika 1*. Depok: Universitas Gunadarma.
- Callister, W. D. 1940. *Materials Science and Engineering An Introduction*. United States of America.
- Danielsson, E. 2000. *FEMLAB Model Library for Semiconductor Device Model*, Stockholm : The Royal Institute of Institute.
- Fukuda, M. 1998. *Optical Semikonductor Device*. Canada: John Wiley and Sons Inc.
- Giancoli, D. C. 2001. *Fisika Edisi Kelima Jilid 2*. Jakatra: Erlangga.
- Goetzberger, A. & Knobloch, J., VoP, B. *Crystalline Silicon Solar Cells*. Terjemahan oleh Rachel Waddington. 1998. Chichester : John Wiley and Sons Ltd.
- Kittel, C. 1976. *Introduction to Solid State Physics*. USA: John wiley & Sons.
- Seeger, K. 1989. *Semikonductor Physics*. USA: Springer –Verleg.
- Lama, M. 2013. *Bahan Listrik*. Jakarta.
- Neaman, D. A. 2007. *Microelectronics : Circuit Analysis dan Design. 3rd edition*. NY : McGraw-Hill.
- Parno. 2002. *Pendahuluan Fisika Zat Padat*. Malang: FMIPA Universitas Negeri Malang.
- 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.
- Subekti, A. 2003. *Diktat Kuliah Semikonduktor*. Jember : FMIPA UNEJ.
- Sutrisno. 1986. *Elektronika : Teori Dasar dan Penerapannya Jilid 1*. Bandung : ITB.

Sze, S. M. & Kwok K. NG. 2007. *Physics of Semikonduktor Devices Third Edition*. Canada: John Wiley & Sons Inc.

JURNAL/SKRIPSI

Abudukelimu, A. 2012. *Hot Electron Transport and Performance of Semikonduktor Devices*. Jepang: Tokyo Institute of Technology.

Dwi, R. Y. 2012. *Arus pada Semikonduktor*. Yogyakarta: UNY.

Fitriana. 2014. *Simulasi Pengaruh Panjang Gelombang Foton Datang Terhadap Karakteristik I-V Dioda Sel Surya Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Jember: Universitas Jember.

Handayani. 2015. *Metode Elemen Hingga*. Surabaya : ITS.

Heyn, C. 2011. *Thermopower of a 2D Electron Gas in Suspended AlGaAs/GaAs Heterostructures*. Belanda: University of Hamburg.

Indrawan, R & Riyan. 2012. *Instrumentasi Pengukuran Piezoelektrik*. Jakarta: Politeknik Negeri Jakarta.

Manion, S. J. 1988. *Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign*.

Mustofa, I. 2014. *Terstruktur Semikonduktor*. Purwokerto: Universitas Jendral Soedirman.

Dadi, R. 2010. *Mekanisme Hamburan Defek Statis dan Vibrasi Termal terhadap Mobilitas Elektron pada Film Tipis GaN*. Bandung: UPI.

Schumacher, J.O & Wettling, W. 2000. *Device Physics of Silicon*. London: Imperial College Press.

Singhal, S. 2007. *Estimation of Various Scattering Parameters and 2-DEG Mobilities From Elektron Mobility Calculations In the Three Conduction Bands Γ , L, X of Gallium Arsenide*. India: Pramana.

Triwahyuni, D. 2011. *Sintesis dan Karakterisasi Baha Piezoelektrik $\text{Bi}_{0,5}\text{Na}_{0,5}\text{TiO}_3$ (BNT) dengan Metoda Molten Salt*.

Usman, I. 2006. *Penumbuhan Lapisan Tipis Silikon Amorf Terhidrogenasi dengan Teknik HWC-VHF-PECVD dan Aplikasinya Pada Divais Sel Surya*. Bandung: ITB.

INTERNET

Darja, J. 2003. *Sejarah Singkat Piranti Semikonduktor*.

http://www.chem-isry.org/artikel_kimia/berita. [3 Maret 2015].

Benfano, S.2014. *Designing Quartz Crystal Oscillator*.

Link: <http://mti.binus.ac.id/2014/02/27/designing-quartz>.

Sridianti. 2015. *Pengertian Ikatan Ion dan Ciri-Cirinya*.

<http://www.sridianti.com/pengertian-ikatan-ion-dan-ciri-cirinya.html>

[25 Mei 2015]

Yunita, E. 2013. *Material Konduktor, Semikonduktor, dan Isolator*.

<http://erma-yunita--fst10.web.unair.ac.id/artikeldetail-71399-kuliah>

[MATERIAL%20KONDUKTOR,%20SEMIKONDUKTOR%20dan%20ISOLATOR.html](http://erma-yunita--fst10.web.unair.ac.id/artikeldetail-71399-kuliah) [12 Maret 2015].