



**ANALISIS SIFAT LISTRIK PERSAMBUNGAN M-S-M PADA FILM
TIPIS $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ YANG DITUMBUHKAN DI ATAS SUBSTRAT SILIKON
(111) DENGAN METODE *DC MAGNETRON SPUTTERING***

SKRIPSI

**Disusun dalam rangka penyelesaian Studi Strata 1
untuk memperoleh gelar Sarjana Fisika S1**

Oleh:

NUR AMIN

NIM 4250403024

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2007

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi.

Semarang, 3 Oktober 2007

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Sugianto, M.Si
NIP. 132046850

Sunarno, S.Si, M.Si
NIP. 132231404

Mengetahui
Ketua Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Semarang

Drs. M. Sukisno, M.Si
NIP. 130529522

PENGESAHAN KELULUSAN

Skripsi ini telah dipertahankan dalam sidang ujian skripsi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang pada:

Hari : Jum'at

Tanggal : 5 Oktober 2007

Panitia Ujian

Ketua

Drs. Kasmadi Imam S., M.S
NIP. 130781011

Pembimbing I

Dr. Sugianto, M.Si
NIP. 132046850

Pembimbing II

Sunarno, S.Si, M.Si
NIP. 132231404

Sekretaris

Drs. M. Sukisno, M.Si
NIP. 130529522

Penguji I

Dr. Putut Marwoto, M.S
NIP. 131764029

Penguji II

Dr. Sugianto, M.Si
NIP. 132046850

Penguji III

Sunarno, S.Si, M.Si
NIP. 132231404

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa yang saya tulis dalam skripsi ini benar-benar hasil karya saya. Pendapat atau temuan orang lain yang terdapat dalam skripsi ini dikutip atau dirujuk berdasarkan kode etik ilmiah.

Semarang, 1 Oktober 2006

Penulis

Nur Amin

NIM 4250403024

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

"Hidup adalah perjalanan menuju Tuhan", nikmatilah setiap detik itu dengan kebahagiaan sebagai rasa syukur atas nikmat-Nya.

"Jangan kau tempatkan dunia ini di pundak, apalagi di atas kepala karena akan jadi beban yang memberatkan", tapi "jadikan dunia ini di bawah kaki sebagaimana kodrat dunia (bumi) ini, sebagai tempat berpijak untuk melangkah".

"hidup janganlah untuk belajar tapi belajarlah untuk hidup".

Skripsi ini kupersembahkan kepada orang tuaku, guruku, saudaraku, generasi penerusku dan semua orang.

KATA PENGANTAR

A'udhu billahi minasyaithonirrojim, Bismillahirrahmanirrahim,

Alhamdulillah rabbil'alamin, segala puji bagi Allah, Dzat yang menguasai alam semesta. Atas Berkah dan Rahmat Allah Yang Maha Kuasa, yang telah memberikan petunjuk dan ilmu pengetahuan pada mahluk-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ **ANALISIS SITAT LISTRIK PERSAMBUNGAN M-S-M PADA FILM TIPIS $Al_xGa_{1-x}N$ YANG DITUMBUHKAN DI ATAS SUBSTRAT SILIKON (111) DENGAN METODE *DC MAGNETRON SPUTTERING* ”. Shalawat dan salam semoga tercurah kepada Nabi Muhammad SAW sebagai penunjuk jalan yang *haq*. Demikian pula para keluarga, sahabat dan pengikutnya.**

Bukan tanda syukur penulis dan suatu hal yang tidak patut, apabila dalam kesempatan ini, penulis tidak menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan kontribusi dan peluang dalam usaha menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu penulis dengan penuh rasa kebahagiaan dan ketulusan hati menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Sugianto, M.Si, sebagai dosen pembimbing I yang dengan penuh kesabaran memberikan bimbingan dalam penulisan skripsi ini,
2. Sunarno, S.Si, M.Si, sebagai dosen pembimbing II yang dengan senang hati memberikan bimbingan dalam penulisan skripsi ini,
3. Dr. Putut Marwoto, M.S, selaku penguji skripsi sekaligus Kaprodi Fisika yang telah banyak memberikan koreksi terhadap tulisan ini,
4. Drs. Kasmadi Imam S, M.S, selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang,
5. Drs. M. Sukisno, M.Si, Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang,
6. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional melalui Proyek Peningkatan Penelitian Pendidikan Tinggi (hibah bersaing XIV) yang telah membiayai penelitian ini.

7. Dr. Ahmad Sofyan dan Drs. Sunyoto Eko Nugroho, M.Si sebagai dosen wali yang memberikan semangat dan motivasi dalam penulisan skripsi ini.
8. Bapak, Ibu guru/dosen yang telah memberikan bekal ilmu kepada penulis.
9. Drs. Hadi Susanto, M.Si, Kepala Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang
10. Wasi Sakti, S. Pd dan Didik Aryanto yang telah memberikan banyak bantuan dalam penyelesaian skripsi ini,
11. Bapak, Ibu, Embah putri, Mbak Novie, Mbak Niek, Mbak Tatik, Mbak Choik dan Mas Nur Cholis yang telah membantu lahir dan batin selama sekolah, serta Aditya dan Adinda yang lucu-lucu,
12. Maya Anggun Sari yang selalu menyayangi dan mendo'akanku,
13. Teman-teman yang tergabung dalam KBK Fisika Material UNNES (*Material crew's* dan *Magnetik crew's*) angkatan 2003 dan semua pihak yang telah membantu hingga selesainya tugas akhir ini,
14. Teman-teman KKN (Adam, Malik, Dani, Atik, Qiqi', Wina, Debi, Nur, Dewi) sebagai teman kompetisi yang selalu membangkitkan semangat dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari sempurna, namun penulis berharap skripsi ini bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya.

Semarang, 1 Oktober 2007

Penulis

ABSTRAK

Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ditumbuhkan di atas substrat Silikon (111) dengan lapisan penyangga AlN menggunakan metode *DC Magnetron Sputtering*. Preparasi substrat dilakukan dengan pencucian menggunakan aseton dan metanol. Kemudian substrat dicelup dalam larutan HF [$\text{H}_2\text{O} : \text{HF} (49\%) = 10 : 1$] pada temperatur ruang selama 20 detik untuk menghilangkan oksida pada permukaannya. Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang tumbuh memiliki kandungan unsur Al, Ga, dan N berturut adalah 11,77 %; 51,22 % dan 35,25 %. Struktur polikristal dengan puncak dominan $32,75^\circ$ dan arah bidang (10 $\bar{1}$ 0). Memiliki ukuran bulir (*grain size*) yang hampir homogen yaitu $1,161 \times 10^4 \text{ nm}^2$ dengan *mean* diameter $1,216 \times 10^2 \text{ nm}$ serta nilai rata-rata kekasaran permukaan (RMS) 8,859 nm. Hasil karakteristik I-V menunjukkan bahwa persambungan kontak metal Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bersifat Ohmik dan persambungan kontak metal Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bersifat *schottky*. Kenaikan temperatur *annealing* pada kontak metal Al dapat menurunkan nilai resistansi pada persambungan Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Nilai resistansi pada persambungan Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan perlakuan *annealing* 100°C , 200°C , 300°C dan 400°C berturut-turut sebesar 5650 Ω , 5000 Ω , 4450 Ω dan 4250 Ω . Grafik arus-tegangan (I-V) kontak logam Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang tidak linier menunjukkan adanya potensial penghalang (*barrier*) pada pemberian tegangan sekitar 1 volt. Hasil karakteristik I-V pada kontak logam Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang diannealing pada temperatur 150°C masih menunjukkan adanya sifat kontak *schottky*. Perlakuan *annealing* pada persambungan Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pada temperatur 200°C menyebabkan kontak mulai bersifat Ohmik disebabkan karena terjadinya difusi antar lapisan logam Au dengan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dan semakin rendah tinggi potensial *barrier*. Perlakuan *anealing* pada kontak logam Al dapat memperbaiki sifat Ohmik pada persambungan Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, karena nilai resistifitas persambungan akan menurun akibat temperatur *annealing* kontak Al. Kontak logam Au yang dibuat dengan metode *sputtering* mempunyai sifat *schottky* yang baik. Perlakuan *annealing* justru menyebabkan perubahan sifat *schottky* pada persambungan menjadi berkurang, sehingga sifatnya dapat berubah menjadi Ohmik.

Kata kunci: film tipis, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, *dc magnetron spittering*, persambungan Al-film tipis

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, persambungan Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, *annealing*.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1. 1. Latar Belakang	1
1. 2. Rumusan Masalah	4
1. 3. Tujuan Penelitian	5
1. 4. Manfaat Penelitian	5
1. 5. Sistematika Skripsi	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2. 1. Material GaN	7
2. 2. Material AlN	8
2. 3. Material $Al_xGa_{1-x}N$	8
2. 4. Subtrat Silikon.....	10
2. 5. Model Jalur Hubungan (<i>Jungtion</i>) Logam dan Semikonduktor	11
2. 6. Arus yang mengalir melalui barrier schottk.....	13
2. 7. Persambungan M-S-M pada Sekonduktor	15
2. 8. Cacat Kristal.....	16
2. 8.1 Cacat nol Dimensi.....	17
2. 8.2 Cacat Dua Dimensi.....	18
2. 8.3 Cacat Tiga Dimensi	18
2. 9. <i>Sputtering</i>	19

2. 9.1 Fenomena <i>Sputtering</i>	20
2. 9.2 <i>DC Magnetron Spputering</i>	20
BAB III METODE PENELITIAN	
3. 1. Alat dan Bahan Penelitian	26
3. 2.1 Reaktor <i>DC Magnetron Sputtering</i>	26
3. 2.2 Bahan Penumbuhan Film Tipis	27
3. 2. Pelaksanaan Penelitian	28
3. 3.1 Pembuatan Target	28
3. 3.2 preparasi substrat	29
3. 3.3 Penumbuhan Film Tipis $Al_xGa_{1-x}N$	29
3. 3.4 Penumbuhan Lapisan Penyangga AlN	30
3. 3.5 Penumbuhan Film Tipis $Al_xGa_{1-x}N$ diatas Lapisan Penyangga	30
3. 3. Teknik Analisis Data	31
3. 2. 1. Difraksi Sinar-X (XRD)	31
3. 2. 2. EDAX	33
3. 2. 3. <i>Atomic Force Microscopy</i> (AFM)	34
3. 2. 4. Pengujian Menggunakan I-V Meter	34
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4. 1. Hasil Karakterisasi dengan EDAX	36
4. 2. Analisis Struktur dan Orientasi Kristal Film Tipis $Al_xGa_{1-x}N$...	38
4. 3. Analisis Morfologi Permukaan Film Tipis $Al_xGa_{1-x}N$	40
4. 4. Hasil Karakterisasi Arus-tegangan (I-V) Persambungan M-S-M pada Semikonduktor Paduan $Al_xGa_{1-x}N$	42
4. 4.1 Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V) Persambungan M-S-M Film $Al_xGa_{1-x}N$ dengan Logam Aluminium (Al)	42
4. 4.2 Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V) Persambungan M-S-M Film $Al_xGa_{1-x}N$ dengan Logam Emas (Au).....	45

BAB V	PENUTUP	
5.1.	Kesimpulan	49
5.2.	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur kristal <i>wurtzite</i> dari GaN (Green, 2001:19)	7
Gambar 2.2. Hubungan <i>band gap</i> dan konstanta kisi dari campuran <i>binary</i> Semikonduktor	9
Gambar 2.3. Model jalur energi dari logam dan semikonduktor terpisah dalam ruang (R. Rio, S.1999)	11
Gambar 2.4. Model jalur energi dari persambungan logam dan semikonduktor (R. Rio, S.1999)	12
Gambar 2.5. Model jalur yang memperlihatkan karakteristik listrik dari kontak semikonduktor dengan logam tipe-n.....	13
Gambar 2.6. Cacat titik (<i>vacavcy</i> , <i>self interstitial</i> dan <i>interstitial</i>) (singh, 1993)	17
Gambar 2.7. Cacat garis (<i>dislokasi</i>) (Singh, 1993):12.....	17
Gambar 2.8. <i>Grain boundaris</i>	19
Gambar 2.9. Proses <i>sputtering</i> pada permukaan target.....	20
Gambar 2.10. Skema reaksi dalam <i>dc magnetron sputtering</i>	22
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian deposisi fil tipis $Al_xGa_{1-x}N$ di atas substrat silikon (111) dengan metode <i>dc magnetron sputtering</i> ...	19
Gambar 3.2. Sistem Reaktor <i>dc Magnetron Sputtering</i>	28
Gambar 3.3. Hamburan sinar-X pada kristal	32
Gambar 4.1. Hasil karakterisasi EDAX pada film tipis $Al_xGa_{1-x}N$	37
Gambar 4.2. Spektrum XRD film tipis $Al_xGa_{1-x}N$	39
Gambar 4.3. FWHM film tipis $Al_xGa_{1-x}N$ bidang orientasi(1010).....	40
Gambar 4.4. Citra morfologi AFM film tipis $Al_xGa_{1-x}N$	41
Gambar 4.5. Grafik hasil pengukuran I-V kontak metal Al- $Al_xGa_{1-x}N$ dengan variasi temperatur <i>annealing</i> kontak	43
Gambar 4.6. Grafik resistansi persambungan Al- $Al_xGa_{1-x}N$ terhadap variasi temperatur <i>annealing</i>	44
Gambar 4.7. Grafik I-V kontak metal Au- $Al_xGa_{1-x}N$ tanpa perlakuan <i>annealing</i>	46

Gambar 4.8. Grafik I-V kontak metal Au- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan variasi
temperatur *annealing* 47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data JCPDS 1997 (02-1078) dari Gallium Nitride dan Silikon... 54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dunia elektronika mengalami kemajuan yang sangat pesat, terlihat dari ditemukannya komponen semikonduktor yang memiliki sifat listrik dan optik yang unik, hal tersebut dapat menjawab berbagai persoalan elektronika. Seiring dengan kemajuan teknologi dan kebutuhan pasar terhadap piranti elektronik dan optoelektronik, maka penelitian rekayasa bahan untuk pembuatan piranti elektronik mulai dikembangkan. Penelitian yang dilakukan tidak hanya mengacu pada kualitas produk yang dihasilkan, namun juga terhadap nilai ekonomisnya. Salah satu teknologi bahan semikonduktor yang dikembangkan adalah film tipis.

Film tipis terdiri dari bahan organik maupun inorganik, metal atau campuran metal organik yang mempunyai sifat konduktor, semikonduktor maupun isolator (Sudjatmoko, 2003:3). Pembuatan film tipis dapat dilakukan dengan teknik penumbuhan atom atau partikel pada permukaan substrat yang dapat menghasilkan film dengan ketebalan sampai orde mikrometer. Film tipis mempunyai sifat yang berbeda dengan bahan padatan, baik itu geometri (ukuran panjang, tebal dan lebar), komposisi dan strukturnya (Atmono, 2003:2). Sifat film tipis yang ditumbuhkan dapat dimodifikasi sesuai dengan tujuan penerapannya.

Material semikonduktor III-nitrida (AlN, GaN, InN) mempunyai kecepatan saturasi elektron, tegangan *breakdown*, *conduction band-offset* dan stabilitas termal tinggi sehingga sangat berpotensi untuk aplikasi devais elektronik yang

bekerja pada daya dan temperatur tinggi (Ambacher. *et al*, 2000). Untuk memenuhi kebutuhan elektronika saat ini banyak dikembangkan transistor efek medan. Pada saat ini telah dikembangkan transistor efek medan berbasis struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ (HFET) yang sering juga disebut sebagai *high electron mobility transistor* (HEMT) (Eastman, L.F. *et al*, 2001). Struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ dapat menghasilkan gas elektron dua dimensi (2DEG) dengan rapat muatan dan mobilitas yang tinggi pada daerah antarmuka. Sifat dari Struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ tersebut sangat baik untuk pembuatan piranti elektronik.

HFET berbasis struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ secara signifikan berbeda dengan HEMT berbasis struktur-hetero yang lain. Sebelumnya telah dikembangkan HEMT dengan struktur-hetero $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ atau $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$. Struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ mempunyai *conduction band-offset* lebih tinggi sehingga dapat menampung rapat muatan 2DEG dalam jumlah yang lebih tinggi. Ketidaksesuaian konstanta kisi antara lapisan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dan lapisan GaN pada struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ menghasilkan efek piezoelektrik yang tinggi. Material III-nitrida mempunyai konstanta dielektrik yang tinggi sehingga ketika lapisan tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ditumbuhkan di atas lapisan GaN yang tebal maka akan terjadi *strain* yang menimbulkan adanya medan piezoelektrik induksi dalam struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$. Sebagai hasilnya pada daerah antarmuka struktur-hetero tanpa doping dihasilkan 2DEG dengan rapat muatan yang tinggi. Adanya medan polarisasi spontan (polarisasi pada saat *strain* nol) dalam struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ dapat meningkatkan rapat muatan (2DEG)

(Hsu, L. and Walukiewicz, W, 2001). Mobilitas dan rapat muatan 2DEG yang tinggi dalam struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ini sangat berpotensi dalam pembuatan HFET dengan unjuk kerja tinggi untuk aplikasi devais elektronik yang bekerja pada daya dan temperatur tinggi, sebagai contohnya adalah pada *microwave*.

Pada pembuatan devais elektronik khususnya HFET atau HEMT dari bahan semikonduktor golongan III-nitrida (seperti GaN dan paduannya seperti $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) perlu diketahui sifat listrik maupun optik dari bahan semikonduktor yang digunakan. Apabila sifat-sifat dari bahan tersebut telah diketahui maka dapat membantu proses pembuatan devais elektronik yang menghasilkan produk dengan kualitas yang baik. Lapisan tipis dengan struktur-hetero $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ telah ditumbuhkan dengan metode MOCVD (*metalorganic chemical vapor eposition*) (Zhao, G. Y. *et al.*, 2000) dan MBE (*molecular beam epitaxy*) (Elsass, C.R. *et al*, 2001) di atas substrat sapphire atau SiC. Persoalan penting pada HFET adalah penggunaan substrat dan konsumsi daya yang murah dengan menunjukkan arus kebocoran gate yang rendah dan unjuk kerja yang tinggi. Untuk mengetahui sifat listrik dari material semikonduktor golongan III-nitrida (seperti GaN dan paduannya seperti $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) yang saat ini banyak dikembangkan dalam pembuatan HFET maka dalam penelitian ini dilakukan pengujian arus-tegangan (I-V) terhadap persambungan M-S-M pada semikonduktor paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan pada substrat silikon (111) dengan lapisan penyangga AlN dengan metode *dc magnetron sputtering*. Kualitas dari persambungan antara kontak logam-semikonduktor yang dalam hal ini adalah filim tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

perlu diketahui untuk selanjutnya film tersebut diaplikasikan dalam pembuatan divais. Kontak logam-semikonduktor dapat bersifat Ohmik apabila nilai resistansi besarnya tetap. Dengan pemberian variasi tegangan atau bersifat *schottky* bila pada daerah persambungan logam-semikonduktor terdapat adanya potensial penghalang (*barrier*) dengan pemberian tegangan tertentu. Berdasarkan wacana tersebut maka sangat diperlukan investigasi terhadap sifat listrik suatu bahan sebelum membuat aplikasi divais.

Substrat silikon Si (111) merupakan substrat alternatif selain simetri kristalnya serupa dengan GaN juga harganya jauh lebih murah dibandingkan substrat SiC maupun sapphire. Pembuatan HFET di atas silikon mempunyai banyak keunggulan sehingga memungkinkan dibuatnya devais dalam dalam skala besar. Studi penumbuhan film tipis GaN di atas Si(111) telah dilakukan oleh Miyazaki *et al* (2001) dengan metode *rf* magnetron sputtering, juga oleh Randanowicz dan Narayan (2004) dengan metode MBE. *DC magnetron sputtering* sangat berpotensi sebagai salah satu metode penumbuhan lapisan tipis karena operasionalnya mudah dan biayanya relatif murah.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *annealing* kontak logam terhadap karakteristik arus-tegangan (I-V) persambungan M-S-M pada film tipis $Al_xGa_{1-x}N$ yang ditumbuhkan dengan Metode *DC Magnetron Sputtering*.

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *annealing* kontak logam terhadap karakteristik arus-tegangan (I-V) persambungan M-S-M pada film tipis semikonduktor paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, sehingga didapatkan sifat yang sesuai untuk aplikasi divais.

1.4 Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh *annealing* kontak logam terhadap sifat listrik dari persambungan M-S-M pada film tipis semikonduktor paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan dengan metode *DC Magnetron Sputtering*, baik itu menggunakan kontak logam aluminium (Al) maupun emas (Au). Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya untuk pembuatan devais elektronik yang menggunakan material semikonduktor golongan III-nitrida (seperti GaN dan paduannya seperti $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) terlebih pada pembuatan HEMT (*High Electron Mobility Transistor*) atau HFET (*Heterostucture Field Effect Transistor*) serta diharapkan dapat memberi kontribusi yang bermanfaat bagi dunia industri.

1.5 Sistematika Penulisan

Skripsi ini terdiri dari tiga bagian, bagian awal berisi halaman judul, lembar pengesahan, abstrak, kata pengantar, motto dan persembahan, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan daftar lampiran. Bagian isi terdiri dari lima bab meliputi: bab I pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian,

manfaat penelitian, dan sistematika skripsi. Bab II kajian pustaka yang berisi kajian mengenai landasan teori yang mendasari penelitian. Bab III metode penelitian yang menguraikan metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi. Bab IV merupakan hasil penelitian dan pembahasan, yang di dalamnya berisi hasil penelitian serta pembahasannya. Bab V penutup meliputi kesimpulan hasil penelitian dan saran sebagai implikasi dari hasil penelitian. Bagian akhir skripsi berisi daftar pustaka dan lampiran-lampiran.

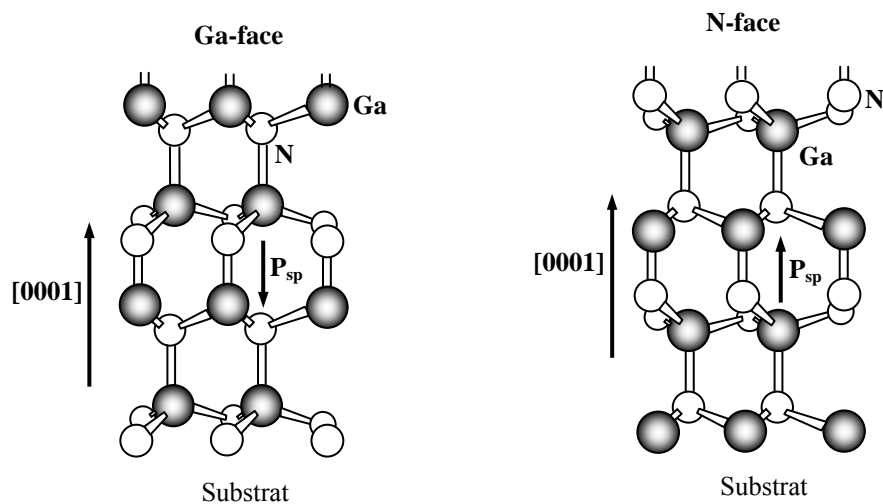
BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Material GaN

GaN (galium nitrida) mempunyai energi *band gap* sebesar 3,4 eV, karena jarak antar atom (atom tetangga terdekat) relatif kecil (Green, 2001:20). Pada temperatur ruang, GaN memiliki konsentrasi elektron sekitar $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Material GaN memiliki sifat stabilitas panas yang tinggi dan stabil secara kimia.

Struktur kristal dasar yang terbentuk oleh golongan III-nitrida, yaitu struktur *wurtzite*, *zinblende* dan *rocksalt*. Struktur GaN *zinblende* dihasilkan dari penumbuhan lapisan tipis secara epitaksi pada substrat kubik dengan bidang kristal (011). Struktur *rocksalt* GaN dihasilkan dengan penumbuhan lapisan tipis pada tekanan tinggi. Struktur kristal *wurtzite* dari GaN ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur kristal *wurtzite* dari GaN (Green, 2001:19)

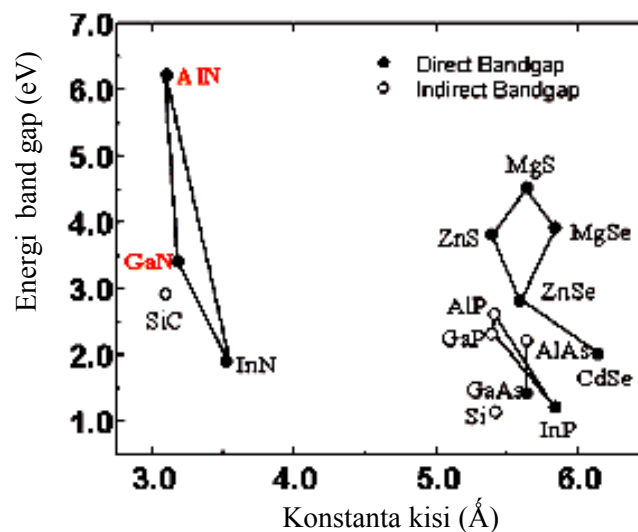
2.2 Material AlN

Secara umum, material AlN memiliki sifat yang keras, konduktivitas termal dan resistivitas yang tinggi (Mahmood *et al*, 2002). AlN merupakan material keramik yang sulit ditumbuhkan serta memiliki kombinasi sifat fisis yang menarik seperti suhu pemuaian rendah, konduktivitas, kekerasan dan titik leleh tinggi. (Pankove & Moustakas, 1998:173). AlN mempunyai struktur kristal *wurtzite* dengan *bandgap* 6,20 eV, konstanta kisi $a = 3,112 \text{ \AA}$, $c = 4,982 \text{ \AA}$, pemuaian suhu $4,2 \times 10^{-6} / K$, konduktivitas termal $3,2 W / cm K$. AlN juga mempunyai struktur *zinblende* pada saat *bandgap*-nya 5,11 eV dan konstanta kisi $a = 4,38 \text{ \AA}$. (Morcoc, 1999:40)

2.3 Material $Al_xGa_{1-x}N$

Material III-V nitrida sangat potensial untuk aplikasi divais semikonduktor pada daerah panjang gelombang cahaya tampak hingga ultraviolet. Khususnya pada bahan paduan $Al_xGa_{1-x}N$. Devais yang telah difabrikasi dengan menggunakan $Al_xGa_{1-x}N$ antara lain *Light Emitting Dioda* (LED), *Laser Dioda* (LD), *Photodetector* UV dan struktur-hetero FET. Pada aplikasi devais, sifat krusial dari bahan paduan $Al_xGa_{1-x}N$ adalah kebergantungan komposisi pada energi *band gap* (E_g) yang digambarkan oleh perilaku linier dari fraksi molar Al (x) dan deviasi non linier dari parameter *bowing* (b). Parameter *bowing* adalah konstanta non universal yang besarnya bergantung kondisi eksperimen seperti metode penumbuhan, parameter penumbuhan dan substrat yang digunakan (Sugianto *dkk*, 2002).

Campuran *ternary* AlGaInN yang terdiri dari GaN, InN dan AlN, memiliki band gap dari 1,9 eV sampai 6,2 eV (Pearton *et al*, 2002). Ketiganya (GaN, InN dan AlN) memiliki konstanta kisi yang lebih kecil daripada silikon. Campuran dari golongan III-V semikonduktor (seperti GaAs, InP dan GaP) dan campuran II-VI semikonduktor memiliki *band gap* yang lebar, dari campuran *binary* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 yang menunjukkan hubungan antara *band gap* dengan konstanta kisi. Campuran $Al_xGa_{1-x}N$ merupakan padatan yang mempunyai rentang komposisi dan memiliki *band gap* dari 3,4 eV sampai 6,2 eV (Ruffenach *et al*, 1997).



Gambar 2.2. Hubungan *band gap* dan konstanta kisi dari campuran *binary* semikonduktor

Campuran dari AlN dan GaN telah digunakan untuk fabrikasi AlGaIn pada piranti optik yang aktif dalam frekuensi cahaya biru sampai ultraviolet (Mahmood *et al*, 2002). Pada struktur-hetero AlGaIn/GaN, *barrier* AlGaIn yang ditumbuhkan pada lapisan GaN keduanya mempunyai struktur *wurtzite* kristal (Hsu *et al*, 2001).

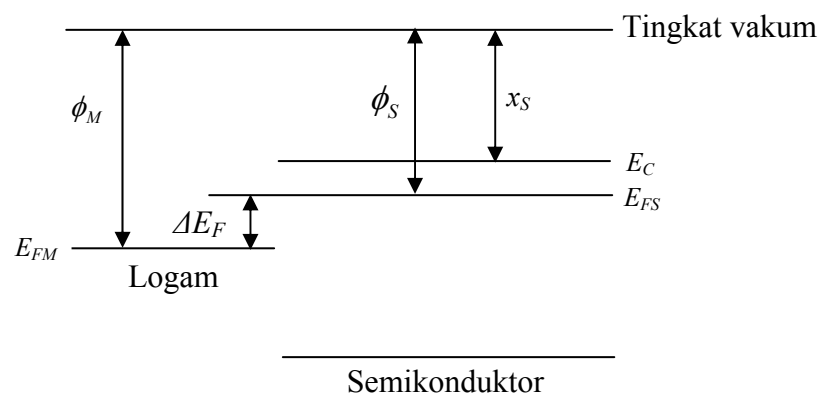
Penambahan fraksi molar yang lebih kecil ke dalam paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ digunakan untuk membentuk heterostruktur *strained* dengan GaN dan InGaN pada *Light Emitting Diodes* (LED), *Laser Diodes* (LD) serta GaN/AlGaN *Field Effect Transistor* (FETs) (Shan *et al*, 1999). *Strain* pada lapisan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ menyebabkan perubahan dalam transisi energi yang diharapkan menjadi lebih kecil (Morkoc, 1999:28).

2.4 Substrat Silikon

Silikon (111) merupakan salah satu substrat yang sangat menarik untuk penumbuhan film tipis GaN. Pada pembuatan atau penumbuhan film tipis dibutuhkan substrat sebagai tempat untuk penumbuhan film tipis. Substrat yang digunakan diharapkan memiliki parameter kisi dan koefisien termal yang hampir sama. Silikon merupakan salah satu semikonduktor elemental group IV yang mempunyai *band gap* 1,1 eV. Substrat Si (111) mempunyai struktur kristal wurtzite sedangkan Si (001) mempunyai struktur kristal kubus nitrides (Ammu&Motamarri, 2006). Substrat silikon (111) mempunyai simetri yang sama dengan *c-plane* GaN *wurtzite* (Stephen, 1997: 244). Selain itu juga silikon (111) mempunyai konduktivitas termal baik, laju *etching* tinggi dan harganya jauh lebih murah dibanding substrat sapphire (Al_2O_3) yang biasa digunakan untuk penumbuhan film tipis GaN (Sutanto, 2002). Parameter kisi untuk silikon pada suhu 295,7K besarnya 0,5431 nm. Silikon mempunyai *melting point* 1685 K (Madelung, 1998). Silikon juga memungkinkan untuk dibuat paduan sebagai dasar elektronik dengan bahan semikonduktor yang memiliki *band gap* lebar.

2.5 Model Jalur Hubungan (*Junction*) Logam dan Semikonduktor

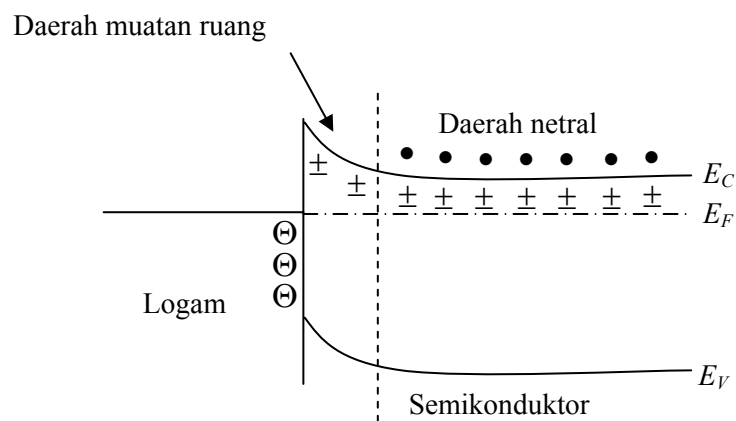
Semua jenis bahan mempunyai tingkatan vakum yang sama. Celah energi antara tingkatan Fermi dari sebuah bahan dan tingkatan vakum disebut fungsi kerja (R. Rio, S.1999). Gambar 2.3 menunjukkan model jalur logam dan sebuah semikonduktor tipe-n relatif terhadap tingkat vakum. ϕ_M dan ϕ_S masing-masing adalah fungsi kerja dari logam dan semikonduktor. Bila pada logam diberikan energi dari luar yang lebih besar dari ϕ_M , elektron-elektron dekat E_F akan dinaikkan ketingkatan vakum dan menjadi elektron bebas. Celah energi dari semikonduktor antara tingkatan vakum dan E_C disebut afinitas elektron (x_s). ΔE_F adalah perbedaan tingkat fermi antara logam dan semikonduktor.



Gambar 2.3 Model jalur energi dari logam dan semikonduktor terpisah dalam ruang (R. Rio, S.1999)

Karena $E_{FS} > E_{FM}$ maka elektron berpindah dari semikonduktor ke logam, sampai perbedaan tingkatan fermi mereka menjadi nol. Hasilnya jumlah elektron dalam semikonduktor menurun. Muatan-muatan positif mengionisasikan donor yang menempati suatu lebar tertentu dari semikonduktor terhadap bidang pertemuan

semikonduktor-logam. Gambar 2.4 menunjukkan model jalur dari kontak semikonduktor-logam setelah kontakannya terbentuk. Apabila tingkatan ferminya telah rata akan terbentuk dua daerah dalam semikonduktor yaitu: daerah muatan-ruang yang berada dekat permukaan semikonduktor dimana hanya terdapat donor yang diionisasikan dan daerah netral dimana terdapat jumlah muatan positif dan negatif yang sama. Muatan positif menyebabkan terjadinya medan listrik yang arahnya dari semikonduktor menuju logam dalam daerah muatan-ruang.

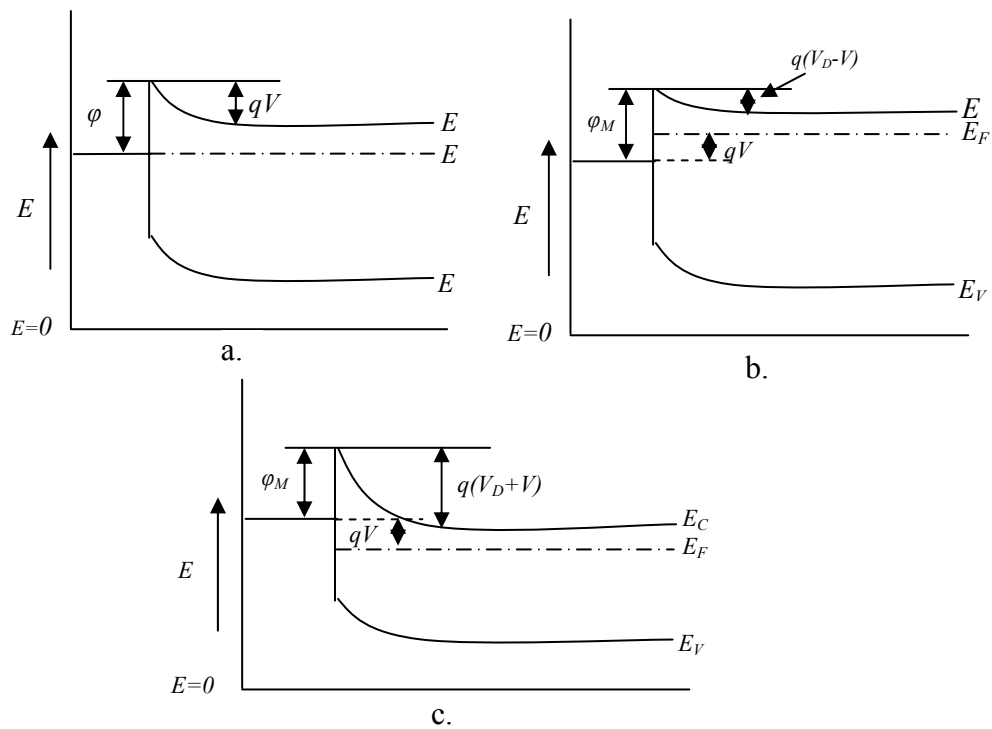


Gambar 2.4 Model jalur energi dari persambungan logam dan semikonduktor (R. Rio, S.1999)

Medan listrik tersebut menghalangi arus elektron yang berasal dari daerah netral ke logam. Seperti terlihat pada Gambar 2.4 medan listrik ini menaikkan tegangan daerah muatan ruang yang disebut dengan tegangan *barrier* atau *barrier schottky*.

2.6 Arus yang Mengalir Melalui *Barrier Schottky*

Pada komponen yang memiliki tegangan barrier, arus mengalir dalam berbagai jalan tergantung pada polaritas yang diberikan (R. Rio, S.1999).



Gambar 2.5 Model jalur yang memperlihatkan karakteristik listrik dari kontak semikonduktor dengan logam tipe-n

Gambar 2.5(a) memperlihatkan saat bias nol, (b) saat semikonduktor diberikan bias maju, (c) saat semikonduktor diberikan bias mundur. Gambar 2.5(a) menunjukkan tidak ada bias dalam semikonduktor logam, maka tidak ada arus yang mengalir. Elektron-elektron yang berada dalam tingkat energi di atas $E_F + \phi_M$ berada di dalam logam, sedangkan elektron dengan tingkat energi di atas $E_C + qV_D$ berada dalam semikonduktor dan dapat bergerak bebas sebab tidak ada barrier yang menghalangi mereka. Kedua tingkatan energi $E_F + \phi_M$ dan $E_C + qV_D$

berada di atas E_F dengan jarak yang sama, yaitu: $\phi_M = E_C + qV_D - E_F$. Hal tersebut menyebabkan konsentrasi elektron pada logam dan semikonduktor adalah sama.

Sesuai dengan statistik fermi elektron-elektron yang mengalir dari logam ke semikonduktor mempunyai konsentrasi yang sama namun dalam arah yang berlawanan, arus saling meniadakan dan menyebabkan arus menjadi nol. Dengan bias yang diberikan seperti pada gambar (b), semikonduktor mempunyai tingkatan energi qV lebih tinggi daripada logam. Akibatnya elektron-elektron pada logam yang dinaikkan dengan ϕ_M di atas E_F dapat melompati *barrier*. Elektron-elektron yang dapat melompati *barrier* terdapat pada tingkatan fermi dengan jarak qV . Konsentrasi elektron yang mampu melewati *barrier* adalah sebanyak n_M .

$$n_M = N_C e^{-(E_{FM} + \phi_M - E_{FM})/kT} = N_C e^{-\phi_M/kT} \quad (2.1)$$

Dengan N_S adalah konsentrasi elektron dalam semikonduktor, dengan persamaan sebagai berikut:

$$n_S = N_C e^{-(E_C + q(V_D - V) - E_{FS})/kT} \quad (2.2)$$

Dari gambar 2.5(b).

$$\phi_M > E_C + q(V_D - V) - E_{FS} \quad (2.3)$$

Maka $n_M < n_S$, konsentrasi elektron yang dapat melompati *barrier* lebih banyak terdapat pada semikonduktor. Hasilnya elektron dengan jumlah $(n_S - n_M)$ mengalir dari semikonduktor ke logam.

$$n_S - n_M = N_C e^{-\phi_M/kT} (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.4)$$

Ketika semikonduktor diberikan bias negatif maka tegangan dalam semikonduktor lebih rendah dengan harga qV , tegangan *barrier* akan meningkat

dari qV_D menjadi $q(V_D+V)$, konsentrasi elektron yang mampu melewati *barrier* diberikan oleh Persamaan 2.1 dengan jalan yang sama saat bias maju, konsentrasi elektron yang berada dalam semikonduktor adalah:

$$n_s = N_C e^{-(E_C + q(V_D + V) - E_{DC}) / kT} \quad (2.5)$$

Hal ini berarti $n_S < n_M$, maka:

$$n_S - n_M = -N_C e^{-\phi_M / kT} (e^{qV / kT} - 1) \quad (2.6)$$

hasilnya elektron dengan jumlah $(n_S - n_M)$ mengalir dari logam ke semikonduktor. Persamaan (2.6) berlaku untuk harga V yang cukup besar, maka $n_S - n_M \approx -n_M$, yang berarti konsentrasi elektron yang melompati *barrier* tidak dipengaruhi oleh tegangan yang diberikan. Karena bagian teratas *barrier* berada di atas E_F maka konsentrasi n_M yang dapat melewati *barrier* sangat rendah.

2.7 Persambungan M-S-M pada Semikonduktor

Persambungan antara kontak logam-semikonduktor dapat bersifat Ohmik apabila nilai resistansi besarnya tetap. Dengan pemberian variasi tegangan atau bersifat *schottky* bila pada persambungan terdapat adanya potensial penghalang (*barrier*) dengan pemberian tegangan tertentu. Salah satu parameter penting yang pada persambungan logam-semikonduktor adalah hambatan jenis kontak (R_C). Nilai ini adalah kebalikan turunan rapat arus terhadap tegangan ketika tegangan mendekati nol.

$$R_C = \left[\frac{\partial J}{\partial V} \right]_{V=0}^{-1} \quad (2.7)$$

Dengan $J =$ rapat arus (A.cm^{-2}) dan $V =$ tegangan (Volt). Pada persambungan metal semikonduktor dengan konsentrasi doping yang lebih rendah, arus termionik dominan pada mekanisme transpor arus dalam bahan yaitu:

$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

$$J_s = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_{Bp}}{kT} \right] \quad (2.9)$$

Dengan $J_s =$ rapat arus saturasi (A.cm^{-2}), $q =$ muatan elektron, $k =$ konstanta Boltzman, $T =$ temperatur, $A^* =$ konstanta Richardson dari bahan semikonduktor dan $\phi_{Bp} =$ potensial penghalang (*barrier*). Dari persamaan (2.7), (2.8), (2.9) maka diperoleh nilai persamaan hambatan jenis kontak (R_c) yaitu:

$$R_c = \frac{k}{qA^*T} \exp \left[\frac{q\phi_{Bp}}{kT} \right] \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) mengindikasikan bahwa diperlukan tinggi *barrier* yang rendah untuk menghasilkan hambatan jenis sambungan (R_c) yang kecil. Bila persambungan metal-semikonduktor bersifat Ohmik, maka dengan mengabaikan tegangan kecil terhadap tinggi *barrier*, akan diperoleh persamaan nilai R_c yaitu:

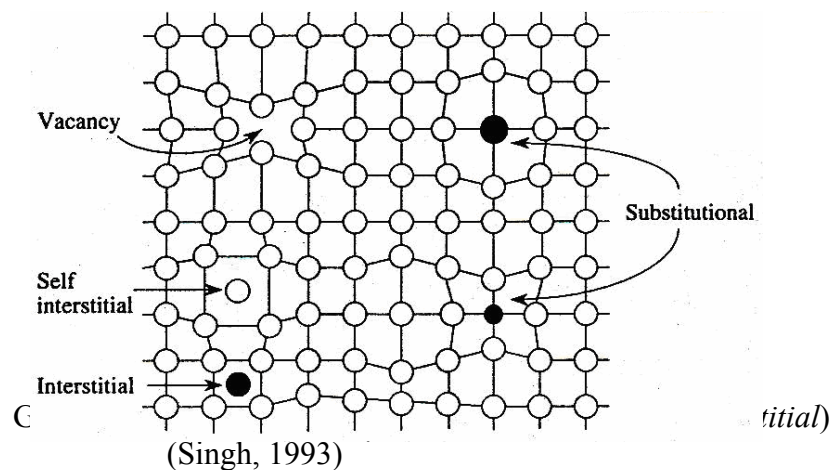
$$R_c = \frac{kT}{qJ_s} \quad (2.11)$$

2.8 Cacat Kristal

Cacat kristal merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas film tipis. Cacat kristal dapat diklasifikasikan menjadi empat yaitu cacat titik (*zero dimension*), cacat garis (*one dimension*), cacat luas (*two dimension*) dan cacat volume (*three dimension*) (Smith, 1998).

2.8.1 Cacat nol Dimensi

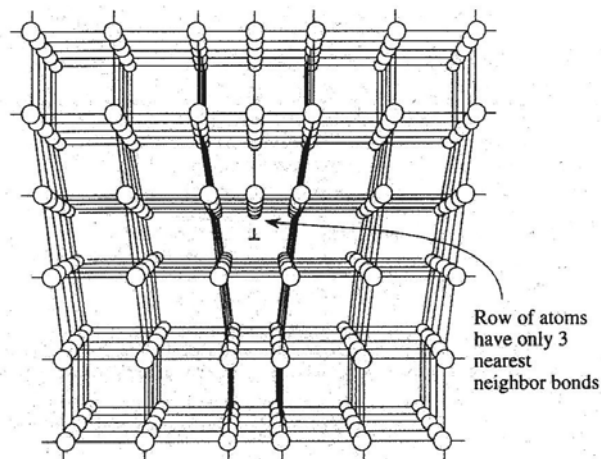
Cacat titik digolongkan menjadi tiga macam yaitu kekosongan (*vacancy*), *interstitial* dan *antisite*. Kekosongan adalah cacat kristal yang terjadi karena atom-atom tidak menempati posisi pada kristal sehingga posisi atom tidak terisi (kosong). Cacat titik yang sederhana adalah kekosongan, lokasi atom dari suatu atom yang hilang dan ini sering dikenal dengan *schottky defect*. Kekosongan disebabkan karena adanya gangguan lokal, susunan atom dalam kristal karena mobilitas atomik, pendinginan sangat cepat dan faktor eksternal. *Interstitial* adalah cacat kristal yang terjadi karena adanya penambahan atom-atom (logam atau nitrogen) yang masuk di antara kekisi kristal yang terjadi karena faktor dari luar seperti radiasi (Smith, 1998). *Antisite* adalah cacat kristal yang terjadi karena kation menempati posisi anion dan sebaliknya anion menempati posisi kation.



Cacat *Frenkel* adalah cacat dimana atom meninggalkan posisi kristal dan berpindah ke posisi *interstitial*.

2.8.2 Cacat Dua Dimensi

Cacat garis (*two dimension*) sering disebut juga dislokasi. Dislokasi terjadi jika ada dua atom yang bertemu tetapi ukurannya berbeda (Smith, 1998). Dislokasi menyebabkan atom-atom terlepas dari ikatan tetangga terdekatnya yang dapat menghasilkan *deep level* pada pita energi. *Deep level* dapat menjadi perangkap elektron dan lubang (hole) saat proses rekombinasi pada pita energi (Singh, 1993). Dislokasi digolongkan menjadi dua macam yaitu *edge* dan *screw*. *Edge* adalah dislokasi yang disebabkan karena pengaruh ukuran sedangkan *screw* dikarenakan pengaruh gaya tekan (Smith, 1998).

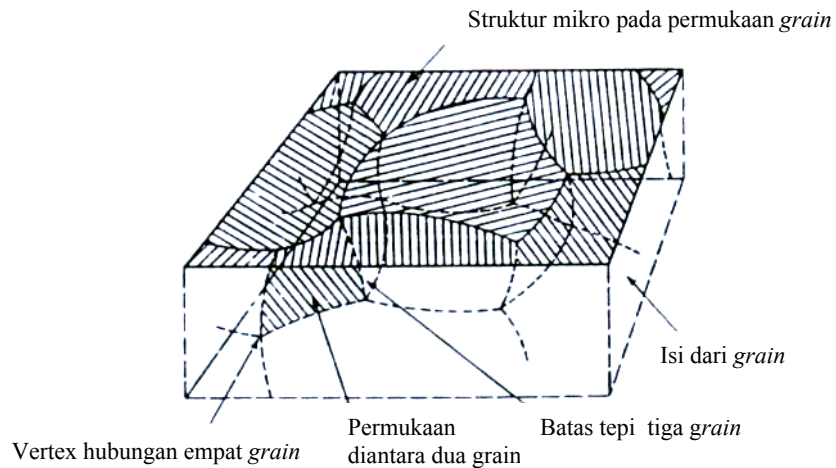


Gambar 2.7 Cacat garis (dislokasi) (Singh, 1993: 12)

2.8.3 Cacat Tiga Dimensi

Grain boundaries adalah cacat permukaan pada material *polykristal* yang memisahkan *grain* dari orientasi yang berbeda. Pada *grain boundaries* logam karena pembekuan, kristal yang terbentuk dari *nukleus* yang berbeda secara

serempak bertemu satu sama lain. Bentuk *grain boundaries* ditentukan oleh *grain* yang berdekatan. Permukaan *grain boundaries* ditunjukkan secara skema pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Grain boundaries*

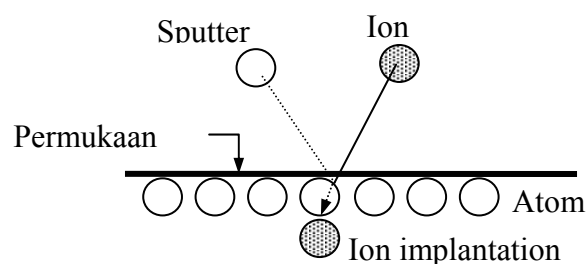
Grain boundaries adalah daerah sempit antara dua *grain* sampai lima lebar diameter atom dan daerah antara atom yang bersebelahan. *Grain boundaries* juga memiliki beberapa atom pada posisi tegang menaikkan energi daerah *grain boundaries*.

2.9 Sputtering

Sputtering adalah proses terhamburnya atom-atom dari permukaan bahan padat karena memperoleh energi yang cukup dari penembakan partikel-partikel berenergi tinggi (Konuma, 1992:111).

2.9.1 Fenomena *Sputtering*

Proses *sputtering* terjadi ketika muncul lucutan listrik (plasma) pada ruang antara katoda dan anoda. Ion-ion yang terbentuk dalam plasma lucutan pijar dipercepat ke arah target (bahan yang akan di-*sputter*). Pada saat ion menumbuk target maka akan terjadi tumbukan beruntun dengan atom-atom target dan selanjutnya akan mengakibatkan salah satu dari atom-atom target terpecik/terhambur keluar dari permukaan target seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.9 (Atmono, 2003).



Gambar 2.9. Proses *sputtering* pada permukaan

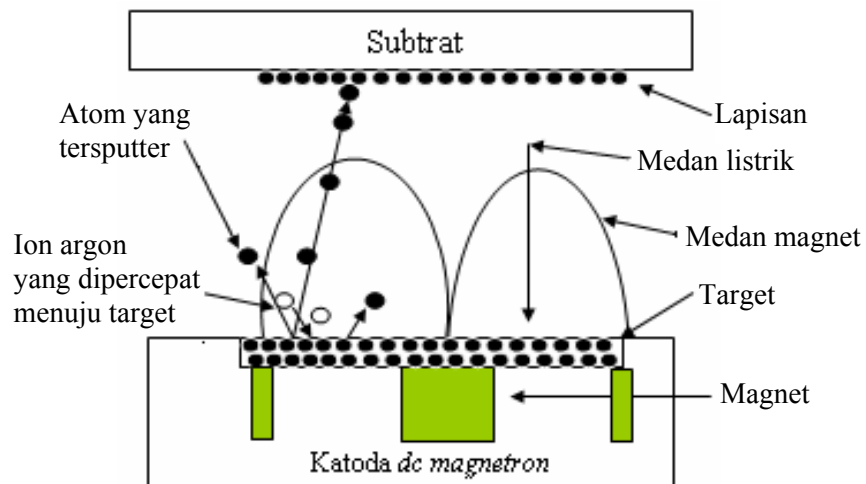
2.9.2 DC Magnetron Spputering

Sistem *dc magnetron sputtering* merupakan modifikasi dari sistem *dc sputtering* dengan menambahkan sistem magnet, sehingga sistem *dc magnetron sputtering* terdiri dari tabung plasma berbentuk silinder, sumber tegangan tinggi, sepasang elektroda, sistem pemanas substrat, sistem pendingin target dan magnet, sistem vakum, sistem masukan gas *sputter* dan sistem magnet. Target dipasang pada katoda dengan sistem magnet dibawahnya serta sistem pendingin target dan magnet (biasanya dengan air), sedangkan substrat dipasang pada anoda. Substrat tersebut dapat dipanaskan menggunakan suatu sistem

pemanas. Apabila tabung *sputter* diisi dengan gas Ar (argon) dan pada elektroda dipasang beda potensial, maka antara elektroda terjadi plasma lucutan pijar (*glow discharge*). Gas argon dan nitrogen yang melalui ruang antara elektroda dipecah oleh medan listrik tinggi menjadi plasma yang mengandung elektron (e^-), ion Ar, ion N dan atom N. Ion-ion positif Ar dan N dipercepat oleh medan listrik menuju elektroda negatif (katoda), sehingga ion-ion positif menumbuk atom-atom permukaan target yang dipasang di atas anoda. Ion-ion penumbuk memiliki energi sangat besar sehingga atom-atom permukaan target terlepas dari permukaan target terhambur ke segala arah. Atom-atom target yang terpental menempel pada permukaan substrat sehingga membentuk film tipis.

Untuk mencegah terjadi *resputtering* dan meningkatkan derajat ionisasi pada film tipis yang terbentuk, maka sistem magnet diletakkan di bawah katoda. Magnet membentuk lingkup medan magnet untuk membelokkan partikel bermuatan. Elektron-elektron dikurung dalam lingkup medan magnet dekat target dan mengakibatkan ionisasi pada gas argon lagi. Jumlah ion-ion yang ditarik ke permukaan target menjadi lebih banyak. Semakin banyak ion-ion yang menumbuk target, hasil *sputtering* semakin meningkat (Joshi, 2003). Sistem *dc magnetron sputtering* ditunjukkan dalam Gambar 2.10. Kekuatan medan magnet ditentukan sesuai dengan jarak antara katoda dan anoda. Jika medan magnet terlalu besar, radius garis gaya magnet mencapai permukaan substrat yang dapat merusak permukaan film yang terbentuk. Jika medan magnet terlalu kecil radius garis gaya magnet hanya melingkupi permukaan target. Kelemahan metode *dc magnetron sputtering* secara umum ialah lapisan film tipis yang dihasilkan

memiliki kualitas kurang baik dari metode lain yang digunakan dalam skala produksi (Sugeng, 2005).



Gambar 2.10. Skema reaksi dalam *dc magnetron sputtering* (Joshi, 2003)

BAB III

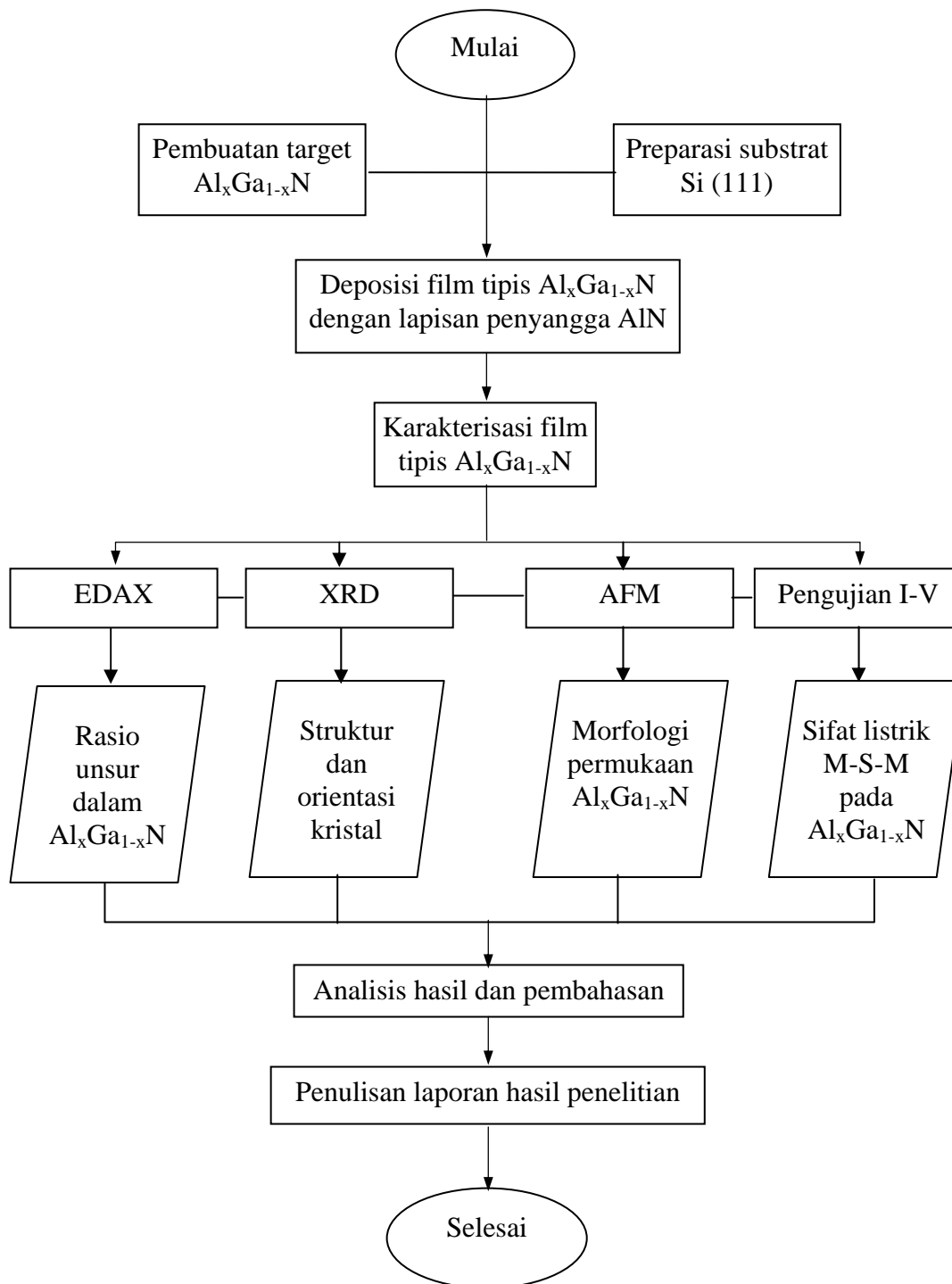
METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan tiga tahap penting, yaitu pembuatan target, deposisi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ menggunakan metode *dc magnetron sputtering* dan dilanjutkan dengan karakterisasi hasil, dideskripsikan dan diinterpretasikan dengan merujuk pada referensi yang ada. Dalam penelitian ini film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ditumbuhkan di atas substrat silikon dengan lapisan penyangga AlN . Lapisan penyangga AlN ditumbuhkan di atas substrat Si (111) pada temperatur 300°C selama 20 menit dengan daya 35 watt. Dimulai dengan preparasi substrat silikon dengan orientasi bidang kristal (111). Kemudian substrat dipasang pada anoda sedangkan target dipasang pada katoda. Deposisi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dilakukan dengan lapisan penyangga AlN dengan parameter fraksi molar Al (x) = 0.1 pada temperatur 650°C selama 40 menit dengan daya plasma 50 watt, penumbuhan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dilakukan pada tekanan tabung reaktor (*chamber*) 600 mTorr dengan komposisi Ar 550 mTorr dan N_2 50 mTorr.

Setelah proses deposisi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ selesai, dilakukan berbagai macam karakterisasi untuk mengetahui kualitas film yang telah dibuat. Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengetahui struktur dan orientasi kristal. Karakterisasi EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-ray*) dilakukan untuk mengetahui rasio dari atom atau unsur dalam film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan.

Pencitraan dengan AFM dilakukan untuk mempelajari morfologi permukaan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Karakterisasi sifat listrik dilakukan dengan pengujian arus-tegangan (I-V) terhadap persambungan M-S-M pada film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Persambungan M-S-M dibentuk dengan dengan membuat kontak aluminium (Al) dan emas (Au) pada film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Kontak Al dibuat dengan sistem evaporasi sedangkan kontak Au dengan sistem *sputtering*. Alur penelitian penumbuhan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pada substrat Si (111) dengan lapisan penyangga AlN dan karakterisasinya ditunjukkan pada Gambar 3.1.

Penelitian ini dilakukan di beberapa tempat yaitu di laboratorium reaktor *sputtering* Fisika FMIPA Unnes untuk fabrikasi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan menggunakan metode *dc magnetron sputtering*, laboratorium Fisika Universitas Sebelas Maret (UNS) untuk analisis struktur kristal dengan menggunakan *XRD*. Karakterisasi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan EDAX dilakukan di laboratorium PPPGL Bandung. AFM (*Atomic Force Microscopy*) dilakukan di *School Microelectronic* KUKUM Perlis Malaysia. Pembuatan persambungan M-S-M pada film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ di laboratorium material elektronik Fisika FMIPA ITB Bandung. Pengujian arus-tegangan (I-V) dilakukan di laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang. Waktu penelitian adalah antara bulan Mei 2007 sampai dengan bulan Juli 2007.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian deposisi film tipis Al_xGa_{1-x}N di atas substrat Si (111) dengan metode *dc magnetron sputtering*

3.1 Alat dan Bahan Penelitian

3.1.1 Reaktor *DC Magnetron Sputtering*

Reaktor *DC Magnetron Sputtering* terdiri dari :

a. Tabung lucutan

Tabung lucutan berdiameter 10 cm dan tinggi 28 cm. Di dalam tabung ini terdapat 2 buah elektroda sejajar, yaitu anoda dan katoda. Substrat ditempatkan pada anoda yang dihubungkan dengan sistem pemanas dan target diletakkan pada katoda yang dilengkapi dengan magnet dan dialiri air pendingin .

b. Pemanas substrat dan alat ukur suhu.

Pemanas substrat dipasang tepat di atas anoda, sedangkan suhu substrat diukur dengan alat ukur suhu digital yang dilengkapi dengan sistem pengontrol suhu yang bekerja secara otomatis.

c. Sistem tegangan tinggi DC

Sistem tegangan tinggi DC digunakan untuk memberikan catu daya pada elektroda di dalam tabung lucutan. Sistem tegangan tinggi DC di laboratorium Fisika FMIPA Unnes dapat menghasilkan tegangan hingga 1000 volt.

d. Sistem vakum

Sistem vakum digunakan untuk menghampakan tabung lucutan, sehingga gas-gas yang tersisa dapat dikeluarkan hingga tekanan sekitar 3.10^{-2} Torr. Sistem vakum ini menggunakan pompa rotari (*Rotary Pump*)

- e. Pendingin target dan magnet (*Chiller*)

Target yang ditempatkan pada katoda dialiri dengan air pendingin untuk menghindari peningkatan suhu yang berlebih selama proses deposisi.

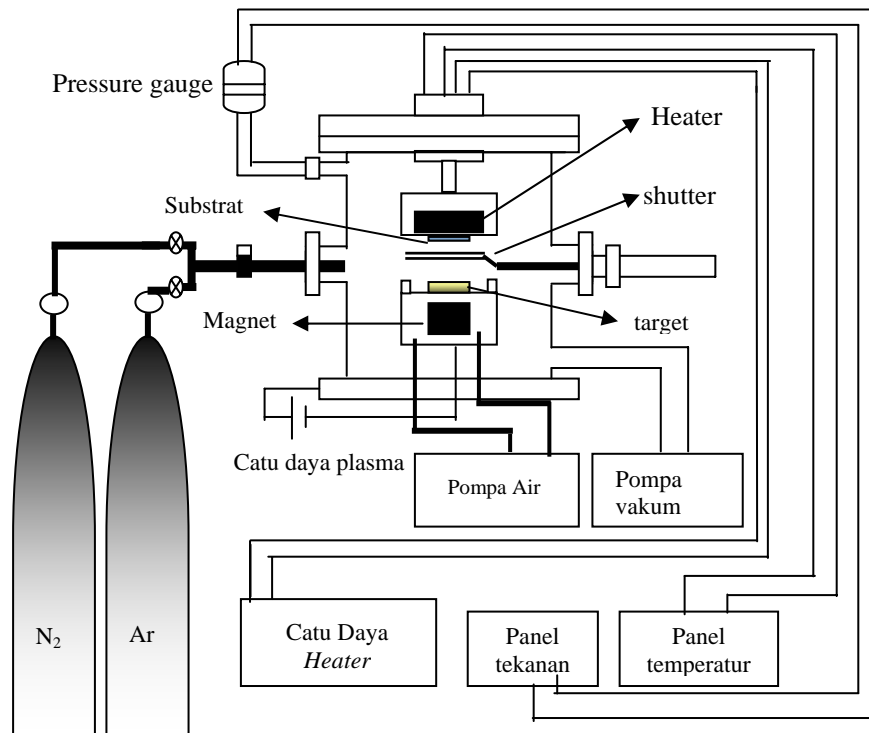
- f. Tabung gas oksigen, argon dan nitrogen.
- g. Alat ukur tekanan gas

Alat ini digunakan untuk mengukur besarnya tekanan gas dan mengatur laju aliran gas argon yang masuk ke dalam tabung lucutan. Nilai tekanan gas yang terukur dapat dibaca secara langsung dalam satuan mTorr.

3.1.2 Bahan Penumbuhan Film Tipis

Bahan yang dipakai untuk penumbuhan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ antara lain :

- a. Serbuk GaN dari AlN dengan kemurnian (99,999%) yang diproduksi Alderich digunakan sebagai bahan dasar target.
- b. Bahan pembersih berupa (DI water, aseton /metanol 99%)
- c. Gas argon (gas *sputter*) dan nitrogen (dalam penelitian ini menggunakan gas argon) sebagai pembentuk plasma
- d. Substrat dari silikon (Si) dengan arah bidang orientasi (111)
- e. Pasta perak sebagai bahan perekat substrat pada anoda



Gambar 3.2 Sistem reaktor *dc magnetron sputtering*

3.2. Pelaksanaan Penelitian

3.2.1 Pembuatan Target

Target dibuat dengan cara atau sistem pengepresan. Pembuatan target berupa *pellet* $Al_xGa_{1-x}N$ dari serbuk GaN dan AlN dengan kemurnian (99,999%) yang diproduksi oleh Alderich. Target $Al_xGa_{1-x}N$ dibuat dengan fraksi molar Al (x)= 0,1. AlN dan GaN masing masing ditimbang sesuai dengan perbandingannya, kemudian dicampurkan dalam sebuah mortar. Campuran dihaluskan kemudian dipress menggunakan press hidrolik yang ada di laboratorium Kemagnetan Bahan Fisika FMIPA Universitas Negeri Semarang. Pelet hasil pengepresan dipanaskan atau disintering pada temperatur 620 °C selama 12 jam dibawah *melting point*

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (2500 °C sampai 3000 °C) serta dialiri gas N_2 (*nitrogen*) dengan tujuan target lebih keras (Vinegoni *et al*, 1999).

3.2.2 Preparasi Substrat

Substrat yang digunakan dalam deposisi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ adalah substrat silikon (Si) dengan orientasi bidang kristal (111). Substrat dipotong dengan ukuran 1 cm x 1 cm. Setelah itu dilakukan pencucian substrat menggunakan aseton untuk menghilangkan kotoran (minyak dan lemak) yang menempel pada permukaan substrat di dalam *ultrasonic bath*. Substrat dibilas dengan air DI (*de ionized*). Substrat dietsa dengan campuran larutan HF dan DI dengan perbandingan 1 : 10 selama 0,5 menit. Tujuan dari etsa dengan HF adalah agar permukaan substrat halus dan menghilangkan oksida serta mencegah terjadinya reoksidasi (Miyazaki *et al*, 2001). Kemudian substrat dibilas lagi dengan air DI dan dikeringkan dengan menyemprotkan gas N_2 secara merata.

3.2.3 Penumbuhan Film Tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dalam penelitian ini ditumbuhkan di atas substrat silikon (111) dengan lapisan penyangga AlN metode *dc magnetron sputtering*. Untuk deposisi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang maksimal maka perlu ditumbuhkan di atas substrat yang memiliki orientasi kristal yang sama. Lapisan penyangga ditumbuhkan didasarkan pada penumbuhan lapisan AlN dengan metode *rf sputtering* yang menghasilkan lapisan polikristal AlN dengan permukaan yang halus dan rata seperti halnya yang dilaporkan oleh Lee *et al* (2002). Lapisan

penyangga ini bersifat fleksibel, sehingga mudah menyesuaikan sifat antara substrat dan film.

3.2.3.1 Penumbuhan Lapisan Penyangga AlN

Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- a. Memasang target AlN pada katoda dan substrat silikon (111) yang telah dibersihkan pada anoda. Memvakumkan tabung reaktor plasma dengan pompa rotari hingga mencapai tekanan 10^{-3} mTorr.
- b. Mendinginkan bahan target dengan menggunakan sistem aliran pendingin air difusi dan memanaskan substrat pada suhu $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan sistem pemanas yang dipasang pada anoda.
- c. Mengalirkan gas Ar dan N_2 ke dalam tabung reaktor plasma hingga mencapai tekanan kerja (operasi) yang diinginkan, yaitu 550 mTorr dan 50 mTorr.
- d. Menghidupkan sistem tegangan tinggi DC, selanjutnya mengatur tegangan pada nilai yang diinginkan.
- e. Melakukan pendeposisian dengan parameter-parameter yang diinginkan, yaitu daya plasma 30 watt dengan waktu deposisi 20 menit.

3.2.3.2 Penumbuhan Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ di atas Lapisan Penyangga

Langkah yang dilakukan untuk deposisi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ adalah sebagai berikut:

- a. Memasang target $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pada katoda dan substrat Silikon (111) yang telah dibersihkan pada anoda. Memvakumkan tabung reaktor plasma dengan

pompa rotari hingga mencapai tekanan 10^{-3} mTorr.

- b. Mendinginkan bahan target dengan menggunakan sistem aliran pendingin air difusi dan memanaskan substrat pada suhu $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan sistem pemanas yang dipasang pada anoda.
- c. Mengalirkan gas argon dan nitrogen kedalam abung reaktor plasma hingga mencapai tekanan kerja (operasi) yang diinginkan, yaitu 550 mTorr dan 50 mTorr.
- d. Menghidupkan sistem tegangan tinggi DC, selanjutnya mengatur tegangan pada nilai yang diinginkan.
- e. Melakukan pendeposisian dengan variasi daya plasma, masing-masing tiga sampel untuk setiap model.

3.3. Teknik Analisis Data

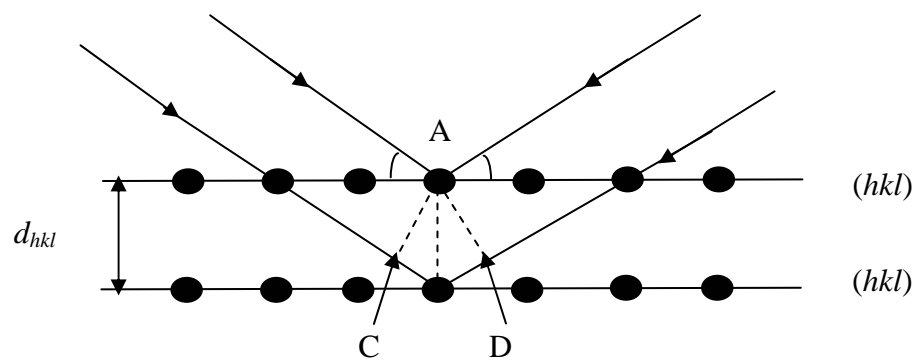
Data yang diperoleh pada penelitian ini berupa data kualitatif dari hasil pengujian struktur mikro dan sifat optik film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Pada penelitian ini digunakan beberapa uji karakteristik sampel, yaitu dengan menggunakan XRD (*X-ray Diffraction*), EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-ray*) dan AFM (*Atomic Force Microscopy*) dan pengujian arus-tegangan (I-V) menggunakan I-V meter.

3.3.1 Difraksi Sinar-X (XRD)

XRD mengidentifikasi adanya fase-fase yang hadir dalam sampel, selain itu dapat pula memberi informasi tentang sifat fisis kristal. Identifikasi fase dapat dikorelasikan dengan data dari kristal tunggal atau serbuk JCPDS. Teknik

XRD diklasifikasikan sebagai kristal tunggal atau polikristal. Informasi yang diperoleh dari hasil pengukuran berkaitan dengan posisi, intensitas dan ketajaman dari puncak spektrum difraksi. Posisi *spasial* dari sinar-X yang terdifraksi oleh sampel mengandung informasi tentang geometri kristal. Intensitas sinar berhubungan dengan jenis atom-atom dalam kristal, sedangkan ketajaman (*sharpness*) dari sinar difraksi digunakan untuk mengukur kesempurnaan kristal. Peralatan XRD yang digunakan untuk uji analisis struktur sampel pada penelitian ini menggunakan sumber radiasi (target) $Cu K_{\alpha}$ dengan panjang gelombang $1,5406 \text{ \AA}$.

Permukaan suatu material yang ditembak oleh sinar-X akan mengakibatkan difraksi gelombang yang memenuhi hukum Bragg.



Gambar 3.3 Hamburan sinar-X pada kristal

Gambar 3.3 adalah model hamburan sinar-X dengan memandang kristal sebagai kumpulan bidang – bidang kristal. Agar terjadi interferensi maksimum maka beda jalan yang harus ditempuh oleh berkas – berkas sinar adalah kelipatan bulat dari panjang gelombangnya, sehingga dirumuskan

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

dengan λ adalah panjang gelombang sinar-X, θ adalah sudut datang (sama dengan sudut hamburan) sinar-X, n adalah bilangan bulat 1,2,3,... d adalah jarak bidang kisi atom (tetapan kisi).

Hasil analisis difraksi sinar-X berupa kurva difraktogram yaitu kurva hubungan antara sudut difraksi (2θ) dengan intensitas (*count per second*). Kurva tersebut menunjukkan puncak-puncak dengan intensitas pada sudut tertentu yang menunjukkan bidang kristal tertentu. Data hasil difraktogram dibandingkan dengan data hasil penelitian sebelumnya JCPDS (*joint committee on powder diffraction standar*) untuk identifikasi struktur dan orientasi kristal film yang tumbuh.

3.3.2 EDAX

Informasi yang diperoleh dari EDAX langsung berupa spektrum energi sinar-X dan intensitasnya. Jenis atom atau unsur-unsur yang terkandung dalam film tipis dapat diketahui juga dari spektrum energi sinar-X. Presentase unsur-unsur yang terkandung dari film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dapat diketahui dari besarnya intensitas. Prinsip dari metode EDAX ini adalah mendeteksi sinar-X yang dipancarkan oleh unsur-unsur yang terdapat dalam film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Interaksi antara berkas elektron berenergi tinggi dengan atom-atom yang terdapat dalam film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ mengakibatkan timbulnya sinar-X, sehingga terjadi eksitasi elektron, yaitu keluarnya atau pindahnya elektron dari kulit yang satu ke kulit yang lain (dari kulit berenergi rendah ke energi lebih tinggi). Karakterisasi dari EDAX ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan jumlah unsur yang

terkandung dalam film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, dalam hal ini unsur aluminium, galium dan nitrogen.

3.3.3 Atomic Force Microscopy (AFM)

AFM (*Atomic Force Microscopy*) digunakan untuk karakterisasi morfologi permukaan film tipis GaN. Karakterisasi AFM dilaksanakan di *School of Microelectronic KUKUM* Perlis Malaysia. Hasil karakterisasi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan AFM berupa citra morfologi permukaan film tipis dalam bentuk dua dimensi dan tiga dimensi. Citra dua dimensi digunakan untuk mengetahui ukuran butir (*grain size*) dan rata-rata diameter (*mean diameter*) dari film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Citra tiga dimensi digunakan untuk mengetahui struktur permukaan film dengan didapatkan RMS (*root mean square*) yang berkaitan dengan kekasaran permukaan.

3.3.4 Pengujian Menggunakan I-V Meter

Hasil dari pengujian dengan I-V meter adalah berupa kurva arus-tegangan dari persambungan M-S-M film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Pengujian dilakukan untuk dua jenis kontak logam yang berbeda yaitu aluminium (Al) dan emas (Au). Dari kurva arus-tegangan diperoleh informasi mengenai karakteristik arus-tegangan (I-V) pada persambungan M-S-M film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ untuk masing-masing kontak Al dan Au, dapat diketahui bagaimana pengaruh perlakuan termal (*annealing*) terhadap sifat listrik persambungan M-S-M film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ telah dideposisikan di atas substrat Si (111) menggunakan sistem *dc magnetron sputtering*. Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dalam penelitian ini ditumbuhkan di atas substrat silikon dengan lapisan penyangga AlN. Lapisan penyangga AlN ditumbuhkan di atas substrat Si (111) pada temperatur 300°C selama 20 menit dengan daya 35 watt pada tekanan tabung reaktor (*chamber*) 600 mTorr dengan komposisi Ar 550 mTorr dan N_2 50 mTorr. Lapisan penyangga ditumbuhkan pada suhu rendah yaitu 300°C didasarkan pada penumbuhan lapisan AlN dengan metode *rf sputtering* pada suhu tersebut menghasilkan lapisan polikristal AlN dengan permukaan yang halus dan rata seperti halnya yang dilaporkan oleh Lee *et al* (2002). Lapisan penyangga ini bersifat fleksibel, sehingga mudah menyesuaikan sifat antara substrat dan film. Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ditumbuhkan di atas AlN dengan fraksi mol Al (x) = 0.1 pada temperatur 650° selama 40 menit dengan daya 50 watt pada tekanan tabung reaktor (*chamber*) 600 mTorr dengan komposisi Ar 550 mTorr dan N_2 50 mTorr.

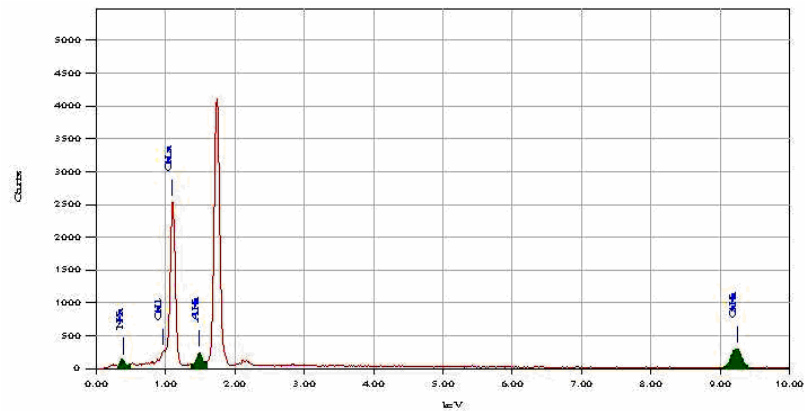
Setelah film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ berhasil ditumbuhkan di atas substrat silikon (111) dengan lapisan penyangga AlN, dilakukan karakterisasi yang meliputi karakterisasi dengan XRD untuk mengetahui struktur dan orientasi kristal film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan membandingkan hasil difraktogram dari XRD dengan data hasil penelitian

sebelumnya JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standar*). Analisis morfologi permukaan dilakukan dengan interpretasi citra hasil karakterisasi AFM yang menunjukkan kekasaran permukaan dan ukuran butir film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Analisis sifat listrik dilakukan dengan melakukan pengujian arus-tegangan (I-V) dengan sebelumnya membuat persambungan M-S-M pada semikonduktor paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ menggunakan logam emas (Au) dan aluminium (Al) dengan teknik evaporasi dan *sputtering*. Perlakuan *annealing* terhadap kontak Al dan Au dimaksudkan untuk memperoleh kualitas kontak yang baik yang dapat diinterpretasikan oleh nilai hambatan jenis kontak (R_C). Berdasarkan kurva arus-tegangan (I-V) dapat ditentukan besarnya nilai resistansi pada persambungan M-S-M $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ serta pengaruh hambatan jenis kontak (R_C) terhadap karakteristik arus-tegangan(I-V).

4.1 Hasil Karakterisasi dengan EDAX

Berdasarkan hasil karakterisasi EDAX dapat diketahui kandungan unsur Al, Ga, dan N ada dalam film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Dalam penelitian ini, hasil karakterisasi EDAX menunjukkan bahwa untuk film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan dengan fraksi molar Al (x)=0.1 pada daya plasma 50 watt menghasilkan kandungan unsur Al, Ga dan N berturut adalah 11,77 %; 51,22 % dan 35,25 %. Hasil karakterisasi EDAX film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pada Gambar 4.3 menunjukkan adanya puncak-puncak energi dari tiap unsur yang terkandung dalam film tipis tersebut. Sampel yang dikarakterisasi menunjukkan adanya puncak-puncak energi pada 9,241 keV yang dimiliki oleh atom

Ga (*galium*), 1,486 keV oleh atom Al (*aluminium*) dan 0,392 keV oleh atom N (*nitrogen*).



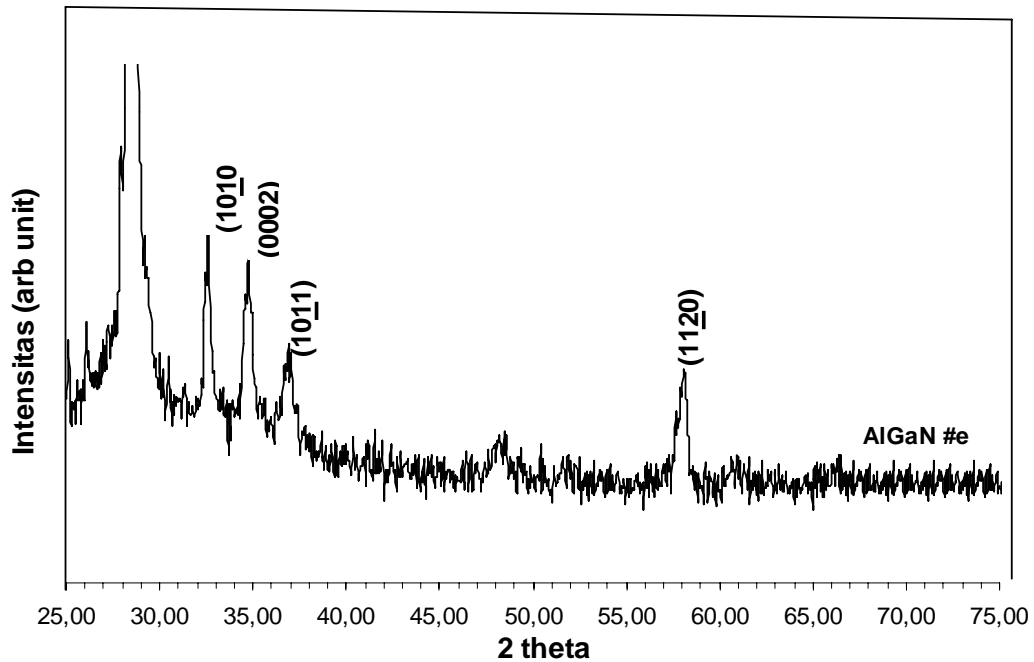
Gambar 4.1 Hasil karakterisasi EDAX pada film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Prosentase kandungan unsur Al, Ga, dan N dalam film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ hasil dari karakterisasi EDAX menunjukkan bahwa film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang terbentuk mempunyai konsentrasi nitrogen (N) yang masih rendah ($< 50\%$), kondisi tersebut mengakibatkan kekosongan nitrogen sebagai pembawa muatan yang mengakibatkan konduksi film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bersifat tipe-n, selanjutnya hal itu akan menyebabkan terjadinya pengerutan konstanta kisi. Masih rendahnya konsentrasi nitrogen yang terjadi pada film tipis diduga karena belum optimalnya parameter penumbuhan yang di gunakan.

4.2 Analisis Struktur dan Orientasi Kristal Film Tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

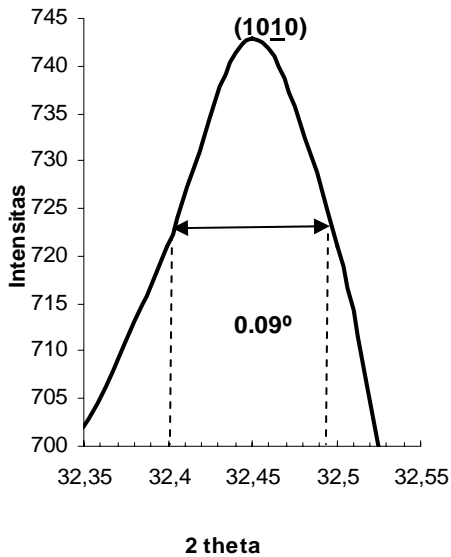
Gambar 4.2 menunjukkan hasil karakterisasi XRD dari film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan fraksi molar $\text{Al}(x) = 0,1$. Hasil karakterisasi XRD berupa difraktogram antara sudut 2θ dengan intensitas. Sudut 2θ yang digunakan dalam rentang 20^0 - 80^0 . Selanjutnya hasil difraktogram dibandingkan dengan data JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standar*) (02-1078) untuk mengidentifikasi struktur kristal yang tumbuh pada substrat. Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan pada substrat Si (111) dengan fraksi molar $\text{Al}(x) = 0,1$ memiliki struktur polikristal dengan puncak-puncak pada sudut $2\theta = 32,75^\circ$; $35,05^\circ$; $37,15^\circ$; dan $58,2^\circ$ dengan arah bidang orientasi $(10\bar{1}0)$, (0002) , $(10\bar{1}1)$ dan $(11\bar{2}0)$ sebagaimana ditunjukkan gambar 4.2.

Hasil pengujian struktur kristal dengan XRD menunjukkan bahwa film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan pada substrat Si (111) dengan lapisan penyangga AlN menggunakan metode *dc magnetron sputtering* mempunyai puncak dominan pada sudut $2\theta = 32,75^\circ$ dengan arah bidang $(10\bar{1}0)$, sedangkan menurut penelitian *GaN* sebelumnya yakni menurut data acuan JCPDS 1997 (02-1078) besarnya sudut 2θ tepat pada bidang orientasi $(10\bar{1}0)$ sebesar $32,41^\circ$. Kondisi ini menunjukkan bahwa adanya pergeseran sudut 2θ sebesar $0,34^\circ$ yang disebabkan oleh *strain*.



Gambar 4.2 Spektrum XRD film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Strain film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ disebabkan karena adanya pergeseran puncak dominan dari film tipis *GaN* pada bidang orientasi $(10\bar{1}0)$ menuju ke puncak dominan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh fraksi molar (x) yang terdapat di film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ sebesar $x = 0,1$. Semakin banyak jumlah bidang difraksi menunjukkan semakin banyak batas butir kristal (*grain boundaries*) yang terdapat pada film sehingga semakin banyak kemungkinan jumlah cacat kristal yang terjadi pada film (Sutanto *et al.*,2005). Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ mempunyai struktur polikristal. Material polikristal terdiri dari beberapa daerah bidang difraksi yang menunjukkan banyaknya *grain boundaries* (Suryanarayana.1998).

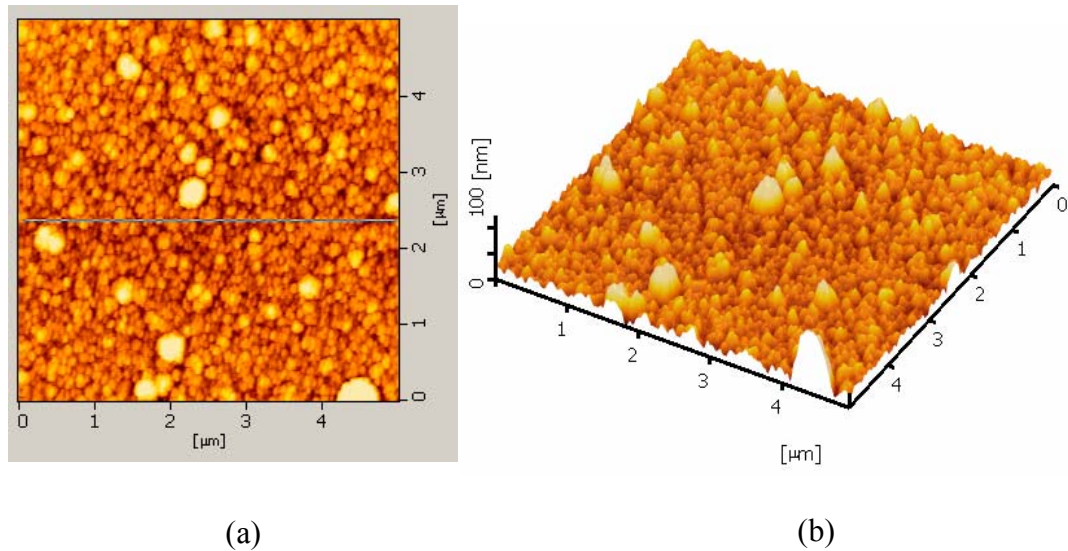


Gambar 4.3 FWHM film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bidang orientasi (1010)

Kualitas kristal dari material dapat juga diketahui melalui nilai FWHM (*Full Width at Half Maximum*) dari puncak bidang difraksi. Gambar 4.3 menunjukkan nilai FWHM dari film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ pada bidang (1010) sebesar 0.09° . Wickenden, A.E., *et al* (1994) menyatakan bahwa film tipis dengan nilai FWHM di bawah 0.5° mempunyai kualitas kristal yang baik.

4.3 Analisis Morfologi Permukaan Film Tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Berdasarkan hasil citra morfologi permukaan (AFM), film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan di atas substrat Si (111) menggunakan lapisan penyangga AlN dan fraksi molar (Al) = 0.1 dalam waktu penumbuhan 40 menit mempunyai ukuran butir $1,161 \times 10^4 \text{nm}^2$ dengan *mean* diameter $1,216 \times 10^2 \text{nm}$.



Gambar 4.4 Citra morfologi AFM film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Gambar 4.4(b) menunjukkan citra morfologi AFM tiga dimensi dari permukaan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ untuk menentukan RMS (*Root Mean Square*). RMS dapat digunakan untuk mengetahui kekasaran permukaan (*surface roughness*). Terlihat bahwa film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang ditumbuhkan mempunyai permukaan yang halus dan rata dengan nilai rata-rata kekasaran permukaan (RMS) 8,859 nm. Permukaan yang homogen dari film tipis semikonduktor akan memberikan kontribusi terhadap mekanisme transpor arus di dalam bahan akan semakin baik bila dibandingkan dengan permukaan yang kasar (tidak homogen). Batas antar bulir yang besar pada film tipis dengan permukaan kasar akan bertindak sebagai resis atau penghalang sehingga mekanisme transpor arus yang melewatinya akan semakin menurun.

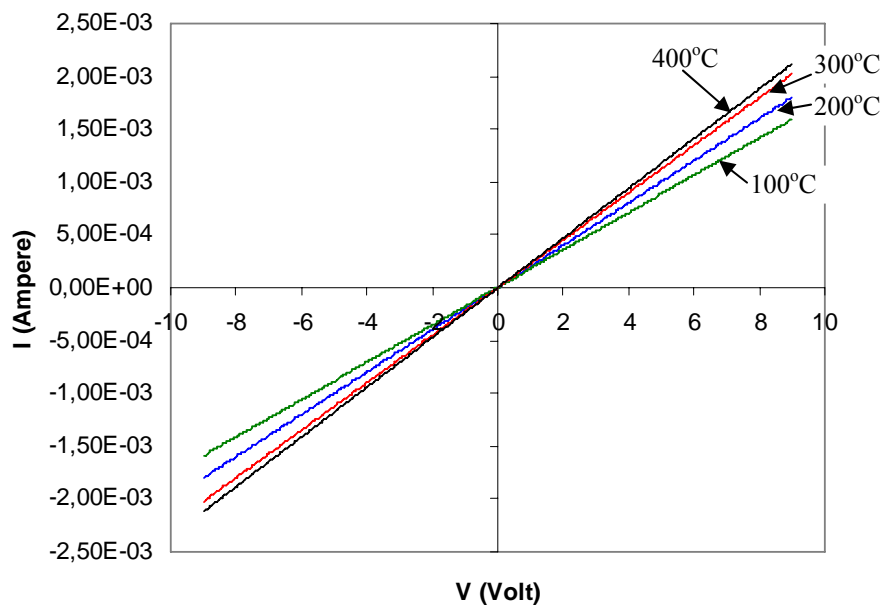
4.4 Hasil Karakterisasi Arus-tegangan (I-V) Persambungan M-S-M pada Semikonduktor Paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Untuk mengetahui kualitas dari film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dilakukan pengujian arus-tegangan (I-V) terhadap persambungan metal-semikonduktor paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (M-S-M) untuk memperoleh informasi mengenai sifat listrik. Persambungan antara kontak logam-semikonduktor dapat bersifat ohmik apabila nilai resistansi besarnya tetap dengan pemberian variasi tegangan atau bersifat *schottky* bila pada persambungan terdapat penghalang (*barrier*) dengan pemberian tegangan tertentu (Sutanto, H. 2007). Salah satu parameter penting yang terdapat pada persambungan logam-semikonduktor adalah hambatan jenis kontak (R_C). Pada penelitian ini diperoleh hasil berupa pengujian arus - tegangan untuk persambungan Al–film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan perlakuan *annealing* 100°C, 200°C, 300°C dan 400°C masing-masing dalam waktu 30 detik dan persambungan Au–film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan perlakuan *annealing* 50°C, 100°C, 150°C dan 250°C masing-masing dalam waktu 30 detik.

4.4.1 Hasil Karakterisasi Arus-Tegangan (I-V) Persambungan M-S-M Film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan Logam Aluminium (Al)

Gambar 4.5 memperlihatkan hasil pengukuran arus-tegangan (I-V) dari kontak logam aluminium (Al) dengan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ terhadap variasi temperatur *annealing* kontak aluminium (Al) dari 100°C sampai 400°C. Hasil pengukuran arus-tegangan dari kontak logam Al-film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ menunjukkan pola

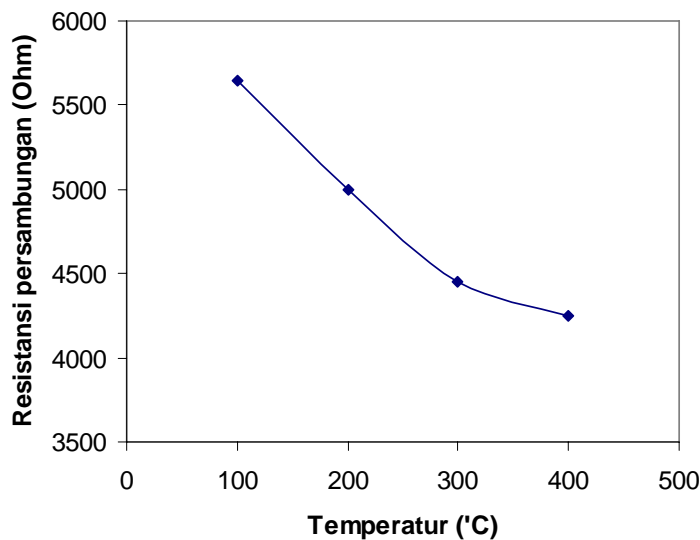
grafik yang linier, hasil yang semacam ini menyatakan bahwa persambungan antara logam Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tidak menimbulkan potensial penghambat atau *barrier*. Dengan tidak adanya penghalang atau *barrier* ini berarti besarnya hambatan atau resistansi pada kontak tidak mengalami perubahan dengan besar pemberian arus. Hasil ini menyatakan bahwa persambungan yang terjadi antara kontak logam aluminium (Al) dengan semikonduktor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ adalah bersifat ohmik.



Gambar 4.5 Grafik hasil pengukuran I-V kontak metal Al– $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan variasi temperatur *annealing* kontak.

Dengan perlakuan termal kontak yaitu *annealing* terhadap kontak aluminium (Al) menyebabkan terjadinya perubahan nilai resistansi antara kontak aluminium dengan film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (ditunjukkan pada Gambar 4.5). Semakin besar temperatur *annealing* pada kontak logam aluminium diperoleh nilai resistansi antara kontak logam Al dengan film semikonduktor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ semakin kecil. Hal ini disebabkan

karena terjadi difusi antara lapisan kontak logam Al dengan film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Selain itu juga disebabkan karena penurunan nilai resistansi kontak Al (R_C) akibat perlakuan termal terhadap kontak Al (perlakuan *annealing*) (Sutanto, H. 2007). Dengan fitting linier hasil pengukuran I-V menggunakan persamaan hukum Ohm ($V=I.R$) diperoleh nilai resistansi pada persambungan Al- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan perlakuan *annealing* 100°C, 200°C, 300°C dan 400°C berturut-turut sebesar 5650 Ω , 5000 Ω , 4450 Ω , 4250 Ω .



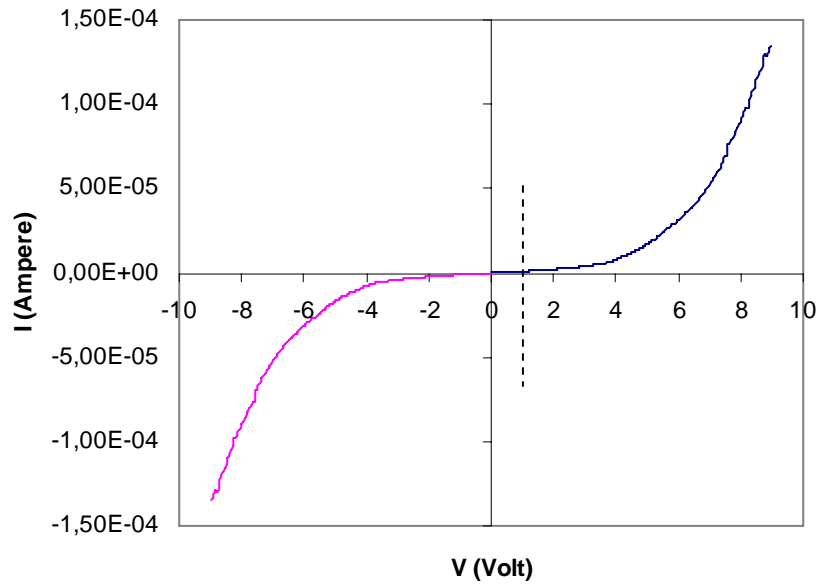
Gambar 4.6 Grafik resistansi persambungan Al- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ terhadap variasi Temperatur *annealing*

Gambar 4.6 menunjukkan hasil fitting linier dari resistansi kontak Al- film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan perlakuan variasi temperatur *annealing* kontak Al. Terlihat bahwa nilai resistansi persambungan kontak Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ menurun sebanding

dengan kenaikan suhu annealing. Kontak yang bersifat Ohmik sangat diperlukan dalam aplikasi divais karena tempat divais lain terhubung.

4.4.2 Hasil Karakterisasi Arus-tegangan (I-V) Persambungan M-S-M Film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan Logam Emas (Au)

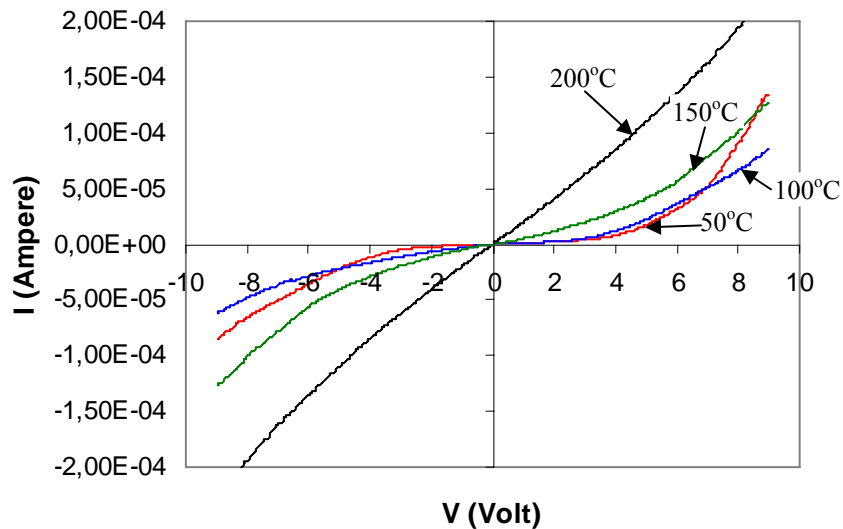
Kurva arus-tegangan (I-V) hasil pengujian terhadap persambungan logam emas (Au) dengan film tipis semikonduktor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.8. gambar 4.7 memperlihatkan hasil pengukuran I-V dari kontak logam emas (Au) dengan film tipis semikonduktor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tanpa perlakuan termal (tanpa annealing). Hasil pengukuran I-V menunjukkan pola grafik yang tidak linier. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi potensial penghalang (*barrier*) pada pemberian tegangan sekitar 1 Volt, hal tersebut menunjukkan bahwa kontak bersifat *schottky*. Pada saat persambungan Au – film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ diberikan bias positif (bias maju) maka film tipis semikonduktor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ mempunyai tingkatan energi qV yang lebih tinggi daripada kontak logam Au. Akibatnya elektron-elektron pada logam Au yang dinaikkan dengan fungsi kerja (ϕ_M) di atas energi fermi (E_F) dapat melompati potensial penghalang (*barrier*).



Gambar 4.7 Grafik I-V kontak metal Au- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Au tanpa perlakuan *annealing*

Konsentrasi elektron pada logam Au (n_M) menjadi lebih kecil daripada konsentrasi elektron pada film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (n_S). Karena konsentrasi elektron pada logam Au lebih kecil dari konsentrasi elektron pada film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($n_M < n_S$) maka konsentrasi elektron yang dapat melompati *barrier* adalah yang berada dalam film semikonduktor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Sebagai hasilnya elektron-elektron dengan konsentrasi ($n_M - n_S$) mengalir dari film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ke kontak logam Au menghasilkan arus dari kontak logam Au menuju film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Besarnya arus yang mengalir sebanding dengan konsentrasi elektron (R.Rio, 1982). Persambungan yang bersifat *Schottky* semacam ini Sangat cocok apabila digunakan untuk pembuatan divais elektronik seperti LED, Transistor efek Medan (FET) yang Sekarang banyak dikembangkan

adalah HEMT (*High Electron Mobility Transistor*) atau HFET (*Heterostucture Field Effect Transistor*) untuk aplikasi elektronik seperti pada *microwave*.



Gambar 4.8 V Grafik I-V kontak metal Au- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Au dengan variasi temperatur *annealing*.

Gambar 4.8 memperlihatkan hasil pengujian I-V dari kontak logam Au –film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ terhadap variasi perlakuan temperatur *annealing*. Terlihat bahwa perlakuan temperatur *annealing* dari 50°C sampai 150°C pola grafik I-V masih menunjukkan pola tidak linier yang mengindikasikan bahwa kontak Au masih bersifat *schottky*. Pada perlakuan *annealing* dengan temperatur 200°C pola grafik I-V mulai membentuk pola grafik yang linier hal ini mengindikasikan bahwa kontak Au mulai bersifat Ohmik. Hal tersebut terjadi karena dengan perlakuan *annealing* pada temperatur 200°C terhadap kontak Au terjadi difusi antara logam Au dengan lapisan film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (Sutanto. H, 2007). Perubahan grafik I-V dari kontak logam Au–film

tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ menuju ke bentuk linier selain disebabkan oleh terjadinya difusi antara logam Au dengan lapisan film $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ juga dikarenakan tinggi potensial penghalang (*barrier*) dapat tereduksi akibat elektron mendapat energi termal. Tinggi *barrier* pada film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tidak hanya terjadi karena fungsi kerja film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tetapi juga disebabkan oleh kondisi permukaan dari film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tersebut. Permukaan yang halus, rata dan homogen akan memiliki transfer elektron yang lebih baik bila dibandingkan dengan permukaan yang kasar. Bila elektron mendapatkan energi termal maka elektron dapat berpindah dari logam dengan konsentrasi yang lebih besar mengakibatkan daerah deplesi juga semakin besar sehingga potensial *barrier* akan semakin kecil (S.M. Sze, 1981).

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yang tumbuh memiliki kandungan unsur Al, Ga, dan N berturut adalah 11,77 %; 51,22 % dan 35,25 %. Struktur polikristal dengan puncak dominan $32,75^\circ$ dan arah bidang (10 $\bar{1}$ 0). Memiliki ukuran bulir (*grain size*) yang hampir homogen yaitu $1,161 \times 10^4 \text{ nm}^2$ dengan *mean* diameter $1,216 \times 10^2 \text{ nm}$ serta nilai rata-rata kekasaran permukaan (RMS) 8,859 nm. Hasil karakteristik I-V menunjukkan bahwa persambungan kontak metal Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bersifat Ohmik dan persambungan kontak metal Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bersifat *schottky*. Kenaikan temperatur *annealing* pada kontak metal Al dapat menurunkan nilai resistansi pada persambungan Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Nilai resistansi pada persambungan Al- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan perlakuan *annealing* 100°C, 200°C, 300°C dan 400°C berturut-turut sebesar 5650 Ω , 5000 Ω , 4450 Ω dan 4250 Ω . Grafik arus-tegangan (I-V) kontak logam Au-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tidak linier menunjukkan adanya potensial penghalang (*barrier*) pada pemberian tegangan sekitar 1 Volt. Dengan perlakuan *annealing* pada temperatur 150°C masih menunjukkan adanya sifat kontak *schottky*. Pada temperatur 200°C kontak mulai bersifat Ohmik disebabkan karena terjadinya difusi antar lapisan logam Au dengan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dan semakin rendah tinggi potensial *barrier*.

Perlakuan *annealing* pada kontak logam Al dapat memperbaiki sifat Ohmik pada persambungan Al-film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, ditandai dengan penurunan nilai resistifitas persambungan akibat temperatur *annealing* kontak Al. Kontak logam Au yang dibuat dengan metode *sputtering* mempunyai sifat *schottky* yang baik. Perlakuan *annealing* justru menyebabkan perubahan sifat *schottky* pada persambungan menjadi berkurang, sehingga sifatnya dapat berubah menjadi Ohmik.

5.2 SARAN

Perlu dikembangkan lagi penelitian lebih lanjut mengenai pembuatan film tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ terutama dengan metode *DC Magnetron Sputtering* untuk mendapatkan film tipis dengan kualitas yang baik untuk aplikasi devais elektronik maupun optoelektronik. Perlakuan *annealing* merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk memperbaiki kualitas struktur kristal. Untuk kontak Al yang dibuat dengan metode evaporasi perlakuan *annealing* dapat dilakukan untuk memperbaiki sifat Ohmik pada daerah persambungan. Kontak logam Au yang dibuat dengan metode *sputtering* mempunyai sifat *schottky* yang baik dan perlakuan *annealing* tidak perlu dilakukan karena justru dapat menyebabkan kontak berubah sifat menjadi Ohmik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambacher, O. 1998, Growth and application of group III-nitride, *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. **31**, p. 2653.
- Ambacher, O., J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W.J. Schaff, and L.F. Eastman, 1999, Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charge in N- and Ga-face AlGa_N/Ga_N heterostructure, *J. Appl. Phys.* vol. **85**, 3222
- Ambacher, O., B. Foutz, J. Smart, J.R. Shealy, N.G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, A.J., Sierakowski, W.J. Schaff and L.F. Eastman, 2000, Two dimensional electron gas induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGa_N/Ga_N heterstructure, *J. Appl. Phys.* vol.**87**, p. 334.
- Atmono, T.M. 2003. *Lapisan Tipis dan Aplikasinya untuk Sensor Magnet dan Sensor Gas Sputtering (Diktat Kuliah: Workshop Sputtering untuk Rekayasa Permukaan Bahan)*. Puslitbang BATAN, Yogyakarta: 1-5
- Eastman, L.F., Tilak, J., Smart, V., Green, B.M., E.M. Chumbes, Dimitrov, R., Kim, H., Ambacher, O.S., Weimann, N., Murphy, W.J., Schaff and Shealy, J.R. 2001. Undoped AlGa_N/Ga_N HEMTs for microwave power amplification. *IEEE Trans. Electron Devices* vol. **48**, p. 479
- Elsass, C.R., Oblenz, C.P., B. Heying, Fini, P., Petroff, P.M., DenBarr, S.P., Mishra, U.K., Speck, J.S., Saxler, A., Elhamrib, S. and Mitchel, C. 2001. Influence of growth temperatur and thickness of AlGa_N caps on electron transport in AlGa_N/Ga_N heterostructures grown by plasma assisted molecular beam epitaxy. *Jpn J. Appl. Phys.* vol. **40**, p. 6235
- Green, B M. 2001. Characteristics, Optimization and Integrated Circuit Application of Alumunium Gallium Nitride / Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor, (*Disertation*). Faculty of the Graduate School of Cornell University. USA: 18-20
- Hsu, L. and Walukiewicz, W. 2001. Effect of polarization fields on transport properties in AlGa_N/Ga_N heterostructure. *J. Appl. Phys.* vol **89** No 3, p. 1783
- Joshi, C. 2003. Charakterization and Corrosion of BCC-Tantalum Coating Deposiited on Alumunium and Steel Substrat by dc Magnetron Sputtering. *Tesis*. New Jersey: New Jersey Institute of Technology Press

- Konuma, M. 1992. *Film Deposition by Plasma Technique*. Springer Verlag, New York: 111-114
- Lee, J. W., Jung, S. H., Shin, H. Y., Lee, I. H., Yang, C. W., Lee, S. H., and Yoo, J. B. 2002. Effect of Buffer Layer on The Growth of GaN on Si Substrate. *Journal of Crystal Growth*. **237-239**, pp. 1094-1098
- Madelung, O. 1996. *Semiconductor Basic Data*. Berlin: Springer-verlag: 69 -91
- Mahmood, A., Rakov, N., Xiao, M.,. 2002. Influence of Deposition condition on optical properties of Alumunium nitride (AlN) thin film prepared by DC-reactive magnetron sputtering. *Materials Letters* **57**, p.1925 – 1933
- Miyazaki, T., Fujimaki T., dan Adachi, S. 2001. Properties of GaN Film Deposid on Si (111) by Radio-Frequency-Magnetron Sputtering. *J. Appl. Phys.* **89**, p. 8316-8319
- Morkoc, H. 1999. *Nitride Semiconductor and Device*. Berlin: Springer Verlag: 28-154
- Pankove, J.I., and Moustakas T D. 1998. *Gallium Nitride (GaN) I Semiconductor and Semimetal*. Academi Press, America: 43-173
- Pearnton, S. J., Ren, F., Zhang, A. P., and Lee, K. P. 2002. Fabrication and Performance of GaN Electronic Device. *Materials Science and Engineering*. **250**, pp. 1-158
- Reka Rio, S., Masamori Iida. 1999. *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Ruffenach-Clur, S., Oliver B., Gil, B., Aulombard, R.L. 1997. MOVPE Growth and Structural Characterization of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *MIJ-Nitride Semicond Res* vol **2** Art 27, p. 1-3
- Singh, J. 1993. *Physics of Semiconductor and Their Heterostructures*. McGraw-Hill Inc, Singapore: 723-729
- Shan, W., Ager, J.W., Yu, K.M., Walukiewicz, Haller, E.E., Martin, M.C., McKinney, Yang, W. 1999. Dependence of The Fundamental Band Gap of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ on Alloy Compton and Pressure. American Insitute of Physics; *J. Appl. Phys* vol **85**, No 12, p. 8505-8507

- Smith, W.F. 1993. *Foundation Of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill Inc, USA: 138
- Sudjatmoko. 2003. *Teknologi Sputtering (Diktat Kuliah: Workshop Sputtering untuk Rekayasa Permukaan Bahan)*. P3TM BATAN, Yogyakarta: 1-16
- Sugeng. 2005. Studi Pengaruh Rasio Laju Alir Gas Argon dan Nitrogen Terhadap Sifat Listrik Film Tipis Gallium Nitrida yang Ditumbuhkan dengan Metode dc Magnetron Sputtering. *Skripsi*. Semarang: FMIPA UNNES.
- Sugianto, Suprianto, E., Sutanto, H., Budiman, M., Arifin, P., Barmawi, M. 2002. Penumbuhan Film Tipis $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ dengan Plasma Assited MOCVD. *Jurnal Fisika HFI* vol **A5**, p. 0586
- Sjahid, N. 2005. Studi Penumbuhan Lapisan Tipis Ga_2O_3 Dengan Metode DC Magnetron Sputtering dan Karakterisasi Sifat Fisisnya. *Skripsi.Fisika FMIPA UNNES*, Semarang
- Suryarayana, C., and G.M. Norton. 1998. *X-Ray Diffraction a Partical Approach*. New York: Plenum Press: 3-10
- Sutanto, H., Subagio, H., Supriyanto, E., Afifin, P., Budiman, M., Sukirno., Barmawi,M. 2007. Infestigasi Sifat Listrik Persambungan M-S-M pada Semikonduktor Paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Kentingan Phisics Forum Proceeding.Solo july 28, 2007
- Wickenden,A. E., D. K and Kisthemnacer,T. J. 1994, The Effect Of Thermal Annealing on GaNNucleation Layers Deposited on (0001) Shapphire by Metalorgic and Chemical Vapour Deposition, *J.Apply. Physc.*75, 5376
- Zhao, G.Y., Ishikawa, H., Egawa, T., Jimbo, T., Umeno, M. 2000. High Mobility AlGa_N/Ga_N heterostructure grown on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition. *J. Appl. Phys*, vol **39**, p. 1035