

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam dasa warsa terakhir ini, telah dikembangkan suatu divais yang bekerja dengan cara memanfaatkan spin elektron untuk mengontrol pergerakan pembawa muatan, yaitu divais spintronik (*spintronics* atau *spin transport electronics* atau *spin based electronics*). Hal ini telah memicu perkembangan divais semikonduktor memori dan pemrosesan sinyal yaitu dengan bertambahnya fungsi divais tersebut. Keunggulan divais ini dibandingkan divais semikonduktor konvensional adalah bersifat *non-volatility*, laju pemrosesan data yang lebih tinggi, konsumsi energi yang lebih kecil, dan ukuran divais yang lebih kecil. Keunggulan-keunggulan divais spintronik tersebut telah mendorong banyaknya penelitian, baik secara teori maupun eksperimen, oleh berbagai kelompok peneliti di seluruh dunia, terutama di Jepang, Amerika Serikat dan Eropa (Awschalom, *et al*, 2002 dan Pearton, *et al*, 2003).

Divais spintronik yang paling dasar dan penting adalah *magnetik tunnel junction* (MTJ). Divais ini terdiri dari dua lapisan material ferromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan bukan ferromagnetik yang sangat tipis. Jika spin-spin elektron pada kedua sisi material ferromagnetik memiliki orientasi yang sama, maka tegangan yang diberikan akan menyebabkan elektron-elektron menerobos (*tunnel*) melalui lapisan batas sehingga mengalir arus yang tinggi. Namun jika spin-spin elektron pada kedua sisi lapisan ferromagnetik memiliki orientasi yang berbeda, maka akan menghalangi arus untuk mengalir. MTJ adalah basis MRAM yang dikembangkan oleh Motorola, *Inc.* dan IBM, *Corp.*, satu per sel memori (Zorpette, 2001).

Syarat utama agar suatu material dapat direalisasikan untuk divais spintronik adalah material tersebut bersifat ferromagnetik pada temperatur kamar dan memiliki efisiensi yang cukup tinggi ~ 100% untuk injeksi dan transport spin (Reed, 2003). Salah satu cara untuk terjadinya injeksi spin ke dalam material semikonduktor adalah dengan membuat logam ferromagnetik sebagai kontak.

Namun efisiensi yang dilaporkan masih sangat rendah (Schmidt, *et al*, 2002) karena pembentukan lapisan antar muka dan kontak yang tidak sepenuhnya ohmik (Pearson, *et al*, 2003). Dengan demikian diperlukan suatu material baru, yaitu *diluted magnetic semiconductor* (DMS) (Ohno, *et al*, 1996) atau semikonduktor ferromagnetik (Ohno, *et al*, 1998) yang bersifat ferromagnetik pada temperatur kamar.

Material baru yang kini banyak dikembangkan oleh para peneliti adalah material GaN:Mn, karena memiliki keunggulan dibandingkan dengan material DMS lain yaitu temperatur Curie ( $T_C$ ) di atas temperatur kamar, ideal untuk injeksi spin dan cocok dengan perkembangan teknologi semikonduktor yang telah mapan (*established*).

Beberapa peneliti telah berhasil melakukan penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan metode *Metalorganic Chemical Vapor Deposition* (MOCVD) yang memungkinkan untuk aplikasi komersial dengan biaya yang relatif lebih murah. Metode MOCVD termal ini memiliki keunggulan yaitu tingkat kemurnian film yang dapat dikontrol melalui masukan sumber metal-organik dan dopan, kesederhanaan dalam disain reaktor dan kemudahan dalam pengaturan temperatur penumbuhan. Namun demikian, metode MOCVD termal ini memiliki kelemahan yaitu diperlukan temperatur tinggi (850-1100°C) pada proses penumbuhannya. Temperatur penumbuhan yang tinggi tersebut menyebabkan kesulitan dalam mengontrol atom-atom nitrogen selama penumbuhan, sehingga menyebabkan kekosongan nitrogen yang pada akhirnya dapat menghasilkan fase magnetik kedua, selain fase GaN:Mn. Untuk mengatasi hal tersebut, dalam penelitian ini, digunakan metode *Plasma-Assisted Metal Organic Chemical Vapor Deposition* (PA-MOCVD), yang merupakan pengembangan dari metode MOCVD termal.

Reaktor PA-MOCVD adalah reaktor MOCVD yang dilengkapi dengan resonator gelombang mikro sebagai penghasil plasma nitrogen yang bersifat reaktif, sehingga memungkinkan penumbuhan film tipis pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan temperatur penumbuhan MOCVD. Dengan temperatur penumbuhan yang lebih rendah, diharapkan dapat dihasilkan inkorporasi Mn ke dalam GaN yang lebih tinggi, sehingga dihasilkan fase tunggal

GaN:Mn dengan konsentrasi Mn yang cukup tinggi. Konsentrasi Mn dan konsentrasi pembawa cukup yang tinggi diharapkan akan dapat meningkatkan sifat magnetik film GaN:Mn yang ditumbuhkan. Selain sifat magnetik, film tipis GaN:Mn yang ditumbuhkan dengan metode PA-MOCVD ini juga diharapkan memiliki sifat semikonduktor yang baik, sehingga cocok dengan teknologi GaN yang telah maju (*established*).

Pencarian paten untuk GaN:Mn yang ditumbuhkan dengan metoda PA-MOCVD, telah dilakukan dengan keyword GaNMn PLASMA MOCVD di US *Patent and Trademark Office* (<http://www.uspto.gov>). Dari pencarian tersebut, ternyata metode yang paling banyak digunakan untuk penumbuhan GaN:Mn adalah metode MBE dan MOCVD termal. Demikian juga melalui studi pustaka dari jurnal-jurnal internasional, sejauh ini belum ditemukan adanya penumbuhan film tipis GaN:Mn dan struktur-hetero GaN/GaN:Mn dengan metode PA-MOCVD. Dengan demikian, usulan proyek penelitian ini memiliki potensi untuk dipatenkan dan dipublikasikan (nasional/internasional).

## **1.2 Tujuan Khusus Penelitian**

Kendala utama dalam pembuatan material DMS adalah rendahnya inkorporasi elemen magnet (dalam hal ini Mn) ke dalam induk semikonduktor (GaN). Sedangkan untuk memperoleh divais *magnetic tunnel junction* berbasis GaN:Mn dengan karakteristik unjuk kerja yang baik, diperlukan konsentrasi Mn yang cukup tinggi agar film GaN:Mn yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik pada temperatur kamar. Film tipis GaN:Mn yang ditumbuhkan selain bersifat ferromagnetik, juga diharapkan memiliki sifat semikonduktor yang baik, sehingga cocok untuk aplikasi divais. Dengan demikian dapat dijabarkan tujuan khusus dari penelitian ini, yaitu:

1. Memperoleh parameter penumbuhan film tipis GaN:Mn yang tepat untuk pengembangan struktur-hetero GaN/GaN:Mn.
2. Memperoleh data laju penumbuhan GaN:Mn dan kaitan antara inkorporasi Mn dengan sifat ferromagnetik dan semikonduktor GaN:Mn

3. Menghasilkan film tipis GaN:Mn dengan karakteristik ferromagnetik dan semikonduktor yang baik sehingga dapat dikembangkan untuk penumbuhan struktur-hetero GaN/GaN:Mn.
4. Menghasilkan parameter penumbuhan struktur-hetero GaN/GaN:Mn yang tepat untuk aplikasi divais MTJ berbasis GaN:Mn.
5. Memperoleh data laju penumbuhan struktur-hetero GaN/GaN:Mn dan kaitan antara inkorporasi Mn dengan sifat ferromagnetik dan semikonduktor GaN/GaN:Mn
6. Menghasilkan struktur-hetero GaN/GaN:Mn dengan karakteristik ferromagnetik dan semikonduktor yang baik agar dapat diaplikasikan untuk divais MTJ berbasis GaN:Mn.

### 1.3 Keutamaan Penelitian

Material *Gallium-Nitride Manganese* (GaN:Mn) merupakan material semikonduktor ferromagnetik atau *diluted magnetic semiconductor* (DMS) berbasis semikonduktor paduan golongan III-V, yaitu GaN. Dibandingkan dengan DMS berbasis semikonduktor golongan III-V lainnya, GaN:Mn memiliki banyak keunggulan, yaitu temperatur Curie ( $T_C$ ) yang tinggi, memiliki kestabilan ferromagnetik dan memiliki struktur pita yang ideal untuk injeksi spin elektron sehingga sangat potensial untuk aplikasi divais spintronik. Penumbuhan GaN:Mn dan struktur-hetero GaN/GaN:Mn di atas substrat silikon (Si) ini memiliki keutamaan karena dapat digunakan untuk aplikasi divais *magnetic tunnel junction* (MTJ) yaitu basis *magnetic random access memory* (MRAM) yang kini dikembangkan oleh Motorola, Inc. dan IBM, Corp, satu per sel memori.

Metode PA-MOCVD ini memiliki keutamaan dibandingkan dengan metode MOCVD termal. Pada MOCVD termal, diperlukan temperatur yang sangat tinggi untuk penumbuhan GaN:Mn, yaitu dalam rentang 850 ~ 1100 °C (Reed, 2003 dan Kane, *et al*, 2005). Namun dengan bantuan plasma pada metode PA-MOCVD, penumbuhan GaN:Mn diyakini dapat dilakukan pada temperatur yang lebih rendah, yaitu sekitar 700 °C.

Penumbuhan film tipis GaN:Mn pada temperatur yang rendah ini akan memiliki beberapa keunggulan. Pertama, dari segi pengoperasian peralatan reaktor yang menjadi lebih mudah dan murah. Kedua dapat dihasilkan fase kristal tunggal GaN:Mn dengan konsentrasi Mn maksimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang dihasilkan melalui metode MOCVD termal. Konsentrasi Mn maksimum yang lebih tinggi untuk menghasilkan fase tunggal GaN:Mn ini mengakibatkan solubilitas Mn yang lebih tinggi ke dalam sub-kisi Ga, yang pada akhirnya akan dapat meningkatkan sifat magnetik film tipis GaN:Mn (Ohno, *et al*, 1999).

Prekursor *Cyclopentadienyl manganese tricarbonyl* (CpMnT) yang akan digunakan sebagai sumber dopan Mn juga memiliki keutamaan dibandingkan dengan sumber-sumber dopan Mn yang lain, seperti *Ethyl-cyclopentadienyl manganese* (EtCp<sub>2</sub>Mn), *Bis-cyclopentadienyl manganese* (Cp<sub>2</sub>Mn) atau *Tricarbonyl methylcyclopentadienyl manganese* (TCM). Pada umumnya prekursor-prekursor tersebut diuapkan pada temperatur *bubbler* di bawah temperatur kamar, sedangkan CpMnT dapat diuapkan pada temperatur *bubbler* sedikit lebih besar dari pada temperatur kamar atau bahkan pada temperatur kamar. Keunggulan lain dari prekursor CpMnT ini adalah tekanan uap yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan prekursor yang lain, sehingga penggunaan prekursor ini menjadi lebih efisien.

Penggunaan substrat silikon untuk penumbuhan material GaN:Mn dan struktur-hetero GaN/GaN:Mn ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu telah tersedia kristal tunggal silikon dengan ukuran besar, konduktivitas termal yang baik, dan harga substrat silikon yang jauh lebih murah dibandingkan dengan substrat safir dan SiC yang lazim digunakan untuk penumbuhan GaN dan paduannya.

## BAB II STUDI PUSTAKA

### 2.1 DIVAIS *MAGNETIC TUNNEL JUNCTION*

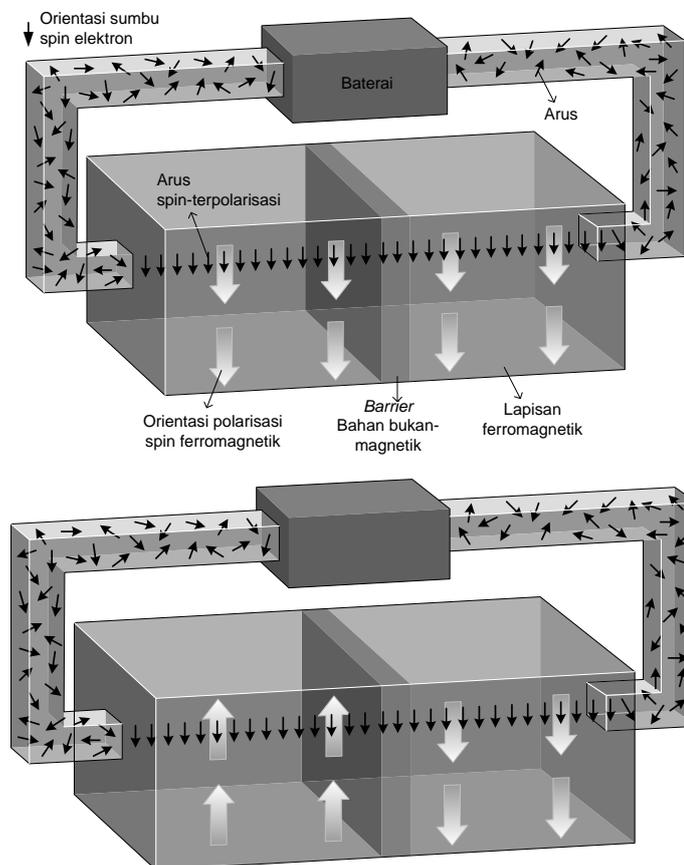
Divais spintronik merupakan pengembangan dari divais semikonduktor dan divais magnetik. Bahan ferromagnetik adalah hal yang terpenting dalam divais spintronik. Selain berperan untuk mendorong arus elektron, tegangan juga berperan sebagai sumber polarisasi spin (*spin polarizer*), yaitu mensejajarkan sumbu spin elektron menjadi "up" atau "down".

Divais spintronik yang paling dasar dan penting adalah *magnetik tunnel junction* (MTJ). Divais ini terdiri dari dua lapisan material ferromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan bukan ferromagnetik yang sangat tipis. Adapun cara kerja divais ini diperlihatkan pada **Gambar 2.1**.

Mula-mula jika spin-spin elektron pada kedua sisi material ferromagnetik memiliki orientasi yang sama, maka tegangan yang diberikan akan menyebabkan elektron-elektron menerobos (*tunnel*) melalui lapisan batas, sehingga mengalir arus yang tinggi. Namun jika spin-spin elektron pada kedua sisi lapisan ferromagnetik memiliki orientasi yang berbeda, maka akan menghalangi arus untuk mengalir. MTJ adalah basis MRAM yang dikembangkan oleh Motorola, Inc. dan IBM, Corp, satu per sel memori (Zorpette, 2001). Prinsip *magnetik tunnel junction* ini juga dikembangkan oleh Reed, *et al* (2005).

Divais spintronik lain yang terus dikembangkan oleh para peneliti adalah Spin-FET (*Spin field effect memory*). Dalam divais FET biasa, logam *gate* berperan untuk mengontrol *source* dan *drain*. Tegangan yang diberikan kepada *gate* mengatur medan listrik, dan medan tersebut mengubah-ubah jumlah arus yang mengalir antara *source* dan *drain*. Dalam Spin-FET, tegangan bias yang diberikan pada *gate*, akan menyebabkan medan listrik yang juga berperan sebagai medan magnet, sehingga menyebabkan pergerakan arus spin terpolarisasi dari *source* ke *drain* dan dapat mengubah orientasi spin tersebut. Dengan demikian spin elektron akan terpolarisasi dalam arah berlawanan dengan *drain*, dan tidak dapat memasuki *drain* dengan mudah atau tidak ada arus yang mengalir. Dapat

disimpulkan bahwa tegangan dalam Spin-FET untuk menghasilkan arus mengalir (*on*) atau tidak mengalir (*off*) hanya diperlukan energi yang kecil karena hanya perlu mengubah orientasi spin. Polarisasi spin pada *source* dan *drain* dapat berubah (*flip*) secara independen, misalnya dengan menggunakan rangkaian luar untuk mengubah (*flip*) polarisasi *drain*. Keunggulan lain dari divais tersebut adalah dapat diintegrasikan dengan teknologi semikonduktor yang telah tersedia (Zorpette, 2001).



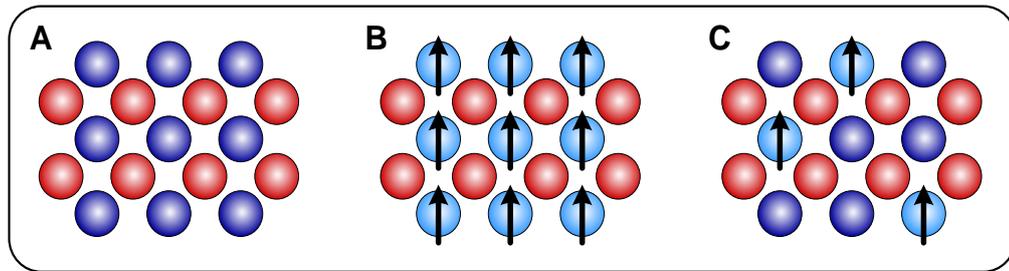
**Gambar 2.1** Prinsip kerja *magnetik tunnel junction* (MTJ). Jika kedua lapisan ferromagnetik memiliki orientasi spin sama, maka akan mengalir arus spin terpolarisasi (atas). Jika kedua lapisan ferromagnetik memiliki orientasi yang berbeda, maka tidak ada arus spin terpolarisasi (bawah) (Zorpette, 2001).

## 2.2 MATERIAL DILUTED MAGNETIC SEMICONDUCTOR

Pada awal perkembangannya, yaitu pada akhir tahun 1960 dan awal 1970, kedua sifat semikonduktor dan sifat ferromagnetik mula-mula ditemukan dalam satu material semikonduktor magnetik, misalnya dalam *Europium chalcogenides* (contoh: EuO) dan *Spinel semiconductor* (contoh: CdCr<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>) yang memiliki elemen magnetik yang tersusun secara periodik (gambar II.2 B). Dalam semikonduktor magnetik tersebut, interaksi pertukaran (*exchange interaction*) antara elektron dalam pita semikonduktor dan elektron yang terlokalisasi pada ion magnet, dapat menghasilkan sifat-sifat penting seperti pergeseran celah pita energi ketika ferromagnetisme timbul. Namun penumbuhan kristal tersebut terkenal sulit karena diperlukan waktu berminggu-minggu untuk preparasi dan penumbuhan kristal tunggal. Kesulitan lain yang menghambat penelitian tersebut adalah belum tersedianya semikonduktor yang memiliki kesesuaian kisi (misalkan silikon atau GaAs) untuk digunakan sebagai substrat atau dengan kata lain tidak cocok dengan teknologi semikonduktor yang telah ada (Ohno, 1998).

Generasi kedua semikonduktor ferromagnetik adalah semikonduktor non magnetik yang didadahkan dengan elemen magnetik (pada umumnya logam transisi). Ion magnetik yang berperan sebagai dopan ini memberikan momen magnetik spin dari elektron yang dimilikinya. Alloy antara semikonduktor nonmagnetik sebagai induk (*host*) dengan elemen magnet ini dikenal dengan *diluted magnetic semiconductor* (DMS) atau semikonduktor ferromagnetik dengan komposisi elemen magnetik yang sangat kecil, yaitu  $< 2\%$  (gambar II.2 C). Istilah "diluted" digunakan dalam material tersebut, karena konsentrasi elemen magnetik relatif kecil. Pada umumnya semikonduktor akan berubah sifat setelah didadahkan dengan impuritas yaitu menjadi tipe-*n* atau tipe-*p*, oleh sebab itu pendadahan elemen magnetik ke dalam semikonduktor bukan-magnetik diharapkan dapat mengubah semikonduktor tersebut menjadi bersifat magnetik. Alloy tersebut adalah semikonduktor, namun dapat pula memiliki sifat magnetik (seperti paramagnetik, antiferromagnetik, ferromagnetik) yang tidak dimiliki oleh material semikonduktor konvensional (Pearson, *et al*, 2003). Dengan menggunakan material DMS diharapkan terjadi injeksi spin dengan efisiensi yang tinggi dari

lapisan DMS ke dalam lapisan semikonduktor bukan-magnetik. Efisiensi yang tinggi disebabkan karena kedua lapisan memiliki kualitas antarmuka (*interfacial quality*) dan penyejajaran pita energi (*band alignment*) yang relatif sama.



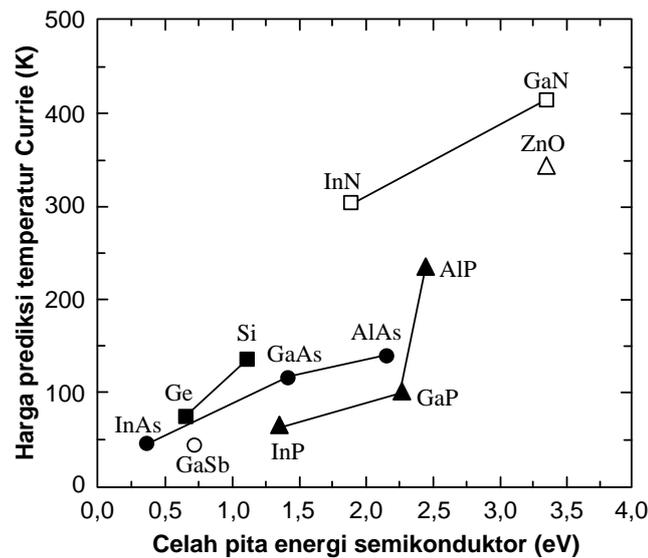
Gambar II.2. Klasifikasi material semikonduktor, yaitu (A) semikonduktor konvensional (B) semikonduktor magnetik dan (C) DMS (Ohno,1998).

### 2.3 PENINJAUAN TENTANG PENUMBUHAN GaN:Mn

Didorong oleh kenyataan bahwa semikonduktor yang banyak digunakan dalam elektronika sekarang ini adalah paduan golongan III-V, maka beberapa ahli telah mencoba untuk mengubah sifat non magnetik paduan golongan III-V menjadi magnetik atau bahkan ferromagnetik, dengan cara memasukkan ion magnetik dengan konsentrasi tinggi. Material DMS berbasis paduan golongan III-V yang mula-mula ditumbuhkan adalah InAs:Mn dengan menggunakan metode MBE pada temperatur rendah ( $< 300^{\circ}\text{C}$ ), yang kemudian diikuti dengan penumbuhan GaAs:Mn dengan metode yang sama. Temperatur rendah ini diperlukan agar Mn dapat diinkorporasikan sampai konsentrasi tinggi ( $\sim 5\%$  atom) sehingga dapat menghasilkan material ferromagnetik. Namun demikian kedua material DMS memiliki kendala untuk aplikasi divais spintronik karena memiliki temperatur Curie jauh di bawah temperatur kamar, yaitu  $T_C \sim 180\text{ K}$  (Ohno, *et al*, 1999).

Perkembangan yang pesat dalam penumbuhan DMS berbasis semikonduktor paduan III-V terutama dipicu oleh model yang dikemukakan oleh Dietl (2000). Model Dietl tersebut berhasil memprediksikan temperatur Curie untuk beberapa semikonduktor paduan golongan III-V yang didadah dengan logam transisi Mn, dan menyatakan bahwa GaN:Mn tipe-*p* akan memiliki

temperatur Curie di atas temperatur kamar, seperti diperlihatkan **Gambar 2.3**. Teori ini telah memicu penelitian lebih lanjut tentang GaN:Mn, terutama dari segi sintesis material.



**Gambar 2.3** Harga prediksi temperatur Curie untuk material semikonduktor paduan golongan III-V dengan doping Mn (Dietl, *et al*, 2000).

Dari fakta eksperimen, mula-mula dilaporkan material GaN:Mn dalam bentuk kristal *bulk* yang ditumbuhkan dengan metode resublimasi (Gebicki, *et al*, 2000 dan Szyszko, *et al*, 2001). Hasil yang menggembirakan telah pula dilaporkan untuk film GaN:Mn yang ditumbuhkan dengan metode MBE menggunakan sumber gas dengan temperatur substrat berkisar antara 700 – 750 °C dan konsentrasi Mn dari 3 - 12 % (Thaler, *et al*, 2002 dan Thaler, 2004).

Beberapa kelompok peneliti telah pula berhasil menumbuhkan GaN:Mn dengan metode MOCVD, mengingat MOCVD selama ini telah dikenal sebagai metode yang optimal untuk penumbuhan film tipis semikonduktor golongan III-Nitrida kualitas tinggi. Penumbuhan GaN:Mn ini dilakukan pada temperatur 1060°C dan menggunakan *Tricarbonyl (methylcyclopentadienyl) manganese* (TCM) sebagai sumber Mn (Korotkov, *et al*, 2002 dan Polyakov, *et al*, 2002).

Selanjutnya dengan menggunakan *Ethyl-cyclopentadienyl manganese* (EtCp)<sub>2</sub>Mn sebagai sumber Mn, berhasil pula ditumbuhkan film tipis GaN:Mn

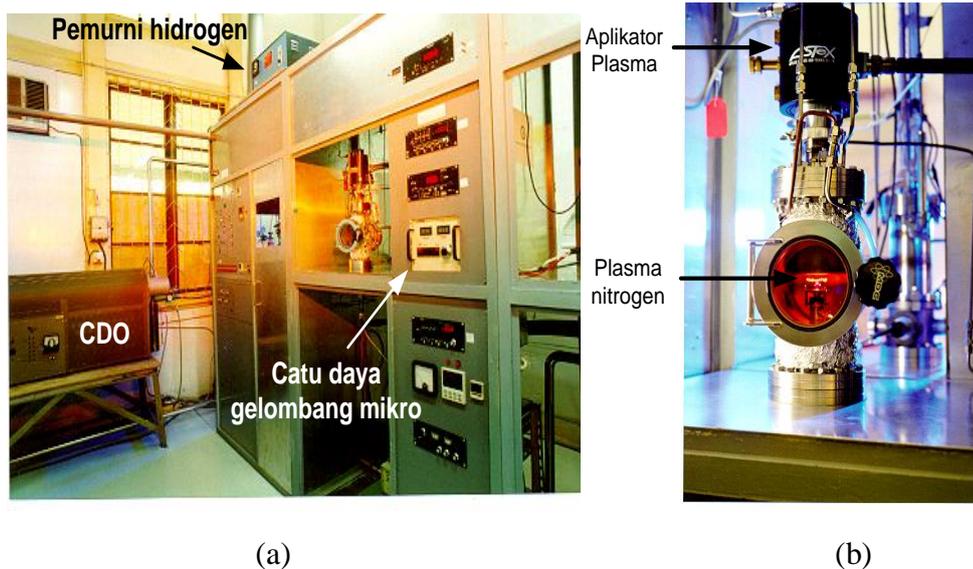
dengan metode MOCVD di atas substrat safir (0006). Temperatur penumbuhan yang dilaporkan, lebih rendah yaitu antara 850°C - 1040°C. Temperatur Curie film GaN:Mn yang ditumbuhkan berbeda-beda, yaitu  $T_C = 228 - 520$  K tergantung kondisi penumbuhan yang digunakan (Reed, 2003). Dengan menggunakan metode yang sama dan sumber Mn yang berbeda, yaitu *bis-cyclopentadienyl manganese* ( $Cp_2Mn$ ) pada temperatur penumbuhan 900°C - 1050°C telah pula dilaporkan film tipis GaN:Mn dengan berbagai konsentrasi Mn, dari 1,0 -1,5 % (Kane, *et al*, 2005).

## 2.4 METODE PA-MOCVD

MOCVD adalah suatu proses deposisi film tipis di atas substrat sebagai hasil reaksi kimia spesies gas dan sumber metal-organik. Reaksi ini umumnya dipicu oleh pemanasan substrat pada temperatur yang sesuai dan bergantung pada sifat kimia gas prekursor. Untuk kasus GaN, diperlukan pemanasan substrat sampai 1000°C dan paduan metal-organik sebagai sumber golongan III yang bereaksi dengan nitrogen sebagai sumber golongan V agar terbentuk film tipis GaN. Pada temperatur tinggi tersebut, atom nitrogen akan mudah menguap (*volatile*) yang menyebabkan terjadinya disosiasi nitrogen dan kemudian berikatan dengan atom nitrogen lainnya membentuk  $N_2$ . Dengan demikian dapat dikatakan pada temperatur penumbuhan yang tinggi, sangat sulit untuk mengontrol atom nitrogen.

Hal tersebut di atas, mendorong upaya pengembangan reaktor PA-MOCVD yang memungkinkan penumbuhan film GaN dilakukan pada temperatur yang relatif lebih rendah. Sistem PA-MOCVD, seperti diperlihatkan pada gambar II.4 (a) terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: bagian reaktor, kabinet gas dan sistem pembuangan (*exhaust*). Pada bagian reaktor terdapat pompa vakum ganda yaitu *rotary vane vacuum pump* (Balzers, DUO 030A) dan *roots vacuum pump* (Balzers, WKP 250A) dengan daya pemvakuman hingga  $10^{-5}$  Torr. Selain itu juga terdapat *chamber* reaktor yang dilengkapi dengan tabung resonator (ASTeX, AX.7300), seperti diperlihatkan pada gambar II.4 (b). Sedangkan pada kabinet gas terdapat sumber metal-organik, *pneumatic valve* dan *mass flow controller*

(MFC) yang dikontrol secara elektronik untuk mengatur laju gas yang mengalir. Dan terakhir adalah sistem pembuangan yang digunakan sebagai alat pemecah sisa gas pembuangan dengan CDO (*combustion, decomposition and oxydation*) yang dilengkapi dengan kipas penghisap.

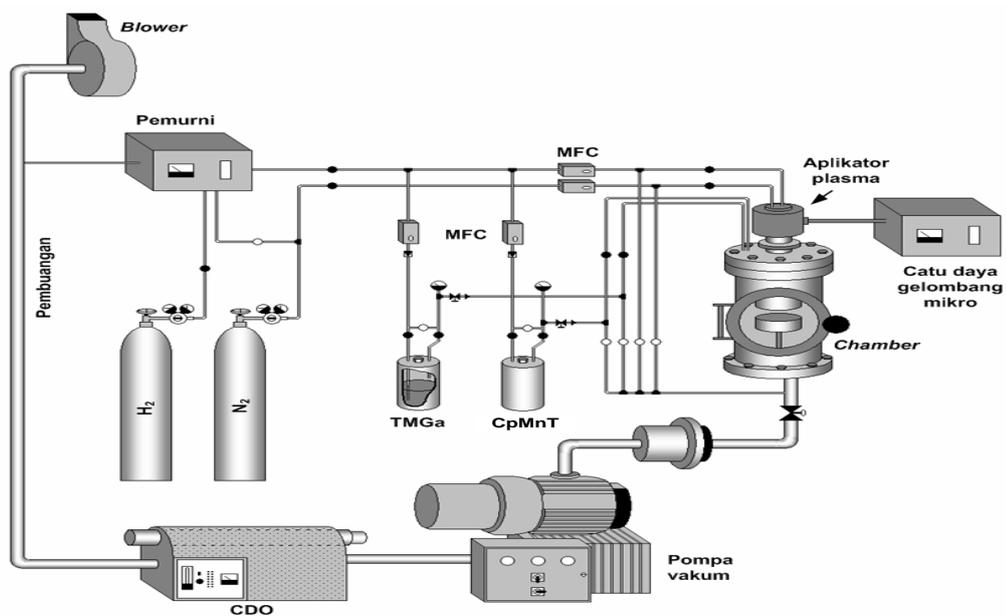


**Gambar 2.4** (a) Sistem reaktor PA-MOCVD yang telah dikembangkan oleh KK Fismatel, FMIPA-ITB dan (b) *Chamber* reaktor yang telah dilengkapi dengan resonator sebagai pembangkit plasma nitrogen.

Pada sistem PA-MOCVD ini, sumber gas nitrogen terlebih dahulu dilewatkan pada rongga resonator gelombang mikro (*microwave resonator cavity*) yang dioperasikan pada frekuensi 2,45 GHz oleh pembangkit gelombang mikro dengan daya maksimum 250 W. Gas nitrogen yang melalui rongga resonator gelombang mikro ini mengalami eksitasi atau ionisasi sehingga menghasilkan plasma nitrogen yang mengandung nitrogen reaktif. Selanjutnya uap dari prekursor TMGa dan nitrogen reaktif dialirkan ke dalam reaktor yang dilengkapi dengan pemanas (*heater*) sehingga terjadi reaksi kimia di atas substrat.

Gambar II.5 adalah skema sistem PA-MOCVD yang memperlihatkan *bubbler* TMGa dan *bubbler* CpMnT, serta aplikator plasma yang berguna untuk membangkitkan nitrogen reaktif. Material metal-organik yang pada umumnya berupa cairan/padatan dimasukkan ke dalam tabung baja anti karat (*bubbler*).

Untuk menjaga agar tekanan parsial prekursor konstan, temperatur *bubbler* dijaga konstan pada temperatur tertentu dengan cara dimasukkan ke dalam *temperature bath*. Pada penelitian ini, digunakan gas hidrogen sebagai gas pembawa yang telah dimurnikan melalui pemurni (*purifier*) dari sel paladium yang dipanaskan pada temperatur 400°C. Gas hidrogen dialirkan menuju *bubbler* melalui MFC untuk mengakumulasi molekul-molekul prekursor dan mengangkutnya menuju ke reaktor. Sebagai sumber dopan Mn, dalam penelitian ini digunakan *Cyclopentadienyl manganese tricarbonyl* (CpMnT). Dibandingkan sumber Mn yang telah digunakan oleh para peneliti lain, CpMnT memiliki tekanan uap yang lebih tinggi dan harga yang jauh lebih murah.



**Gambar 2.5** Skema sistem PA-MOCVD untuk penumbuhan film tipis GaN:Mn dan struktur-hetero GaN/GaN:Mn.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen yang meliputi dua tahap. Tahap pertama adalah tahap penumbuhan dan karakterisasi film tipis GaN:Mn. Sedangkan tahap kedua adalah penumbuhan dan karakterisasi struktur-hetero GaN/GaN:Mn untuk aplikasi divais MTJ.

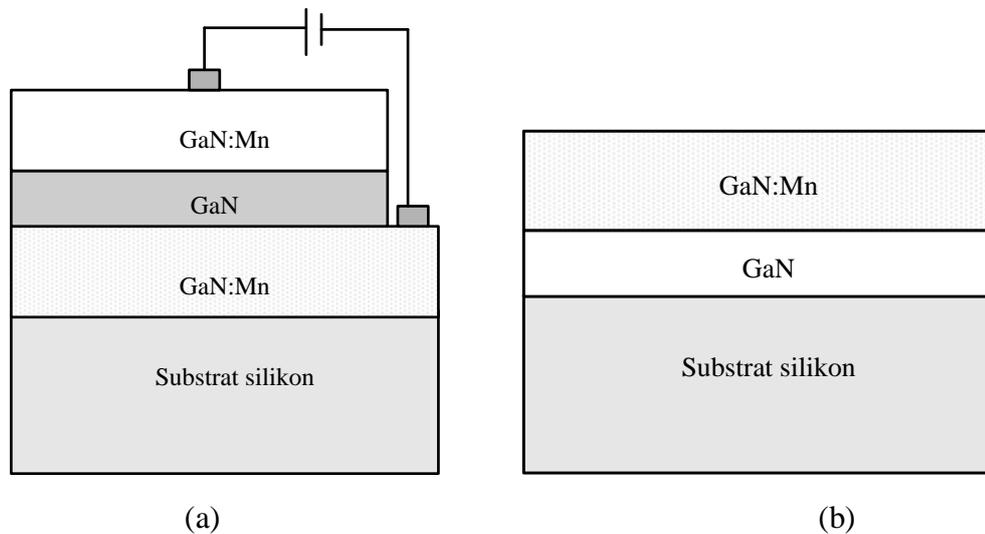
#### **3.1 Penumbuhan dan Karakterisasi Film Tipis GaN:Mn**

Penumbuhan film tipis GaN:Mn akan dilakukan dengan metode PA-MOCVD, yang merupakan pengembangan dari metode MOCVD termal. Film tipis GaN:Mn akan ditumbuhkan di atas substrat silikon, dengan mengacu pada parameter penumbuhan GaN:Mn di atas substrat safir yang telah dilakukan oleh peneliti pertama. Penumbuhan film tipis GaN:Mn dilakukan dengan cara memvariasikan parameter penumbuhan, meliputi temperatur penumbuhan (625 – 700 °C), rasio fluks V/III (480-1100) dan fraksi molar sumber Mn/Ga (0,2 – 0,5).

Setelah tahap penumbuhan, dilakukan karakterisasi struktur dan orientasi film tipis GaN:Mn dengan metode XRD dan diperkuat dengan metode HR-XRD atau metode XRD dengan resolusi tinggi. Selanjutnya dilakukan pengamatan morfologi permukaan film GaN:Mn dengan analisis SEM. Komposisi atom dalam GaN:Mn ditentukan dengan analisa EDX. Adapun sifat magnet, listrik, dan optik film tipis GaN:Mn ditentukan dengan analisa pengukuran melalui metode VSM, Hall-van der Pauw, dan UV-Vis spektrofotometri. Hasil karakterisasi tersebut selanjutnya dianalisis dengan merujuk pada referensi yang terkait dan dibuat sebagai data untuk penumbuhan struktur-hetero GaN/GaN:Mn.

#### **3.2 Penumbuhan dan Karakterisasi Struktur-hetero GaN/GaN:Mn**

Untuk pembuatan divais *Magnetic Tunnel Junction* (MTJ) berbasis GaN:Mn seperti nampak pada **Gambar 3.1(a)** diperlukan studi penumbuhan dan karakterisasi struktur-hetero GaN/GaN:Mn seperti pada **Gambar 3.1(b)**.

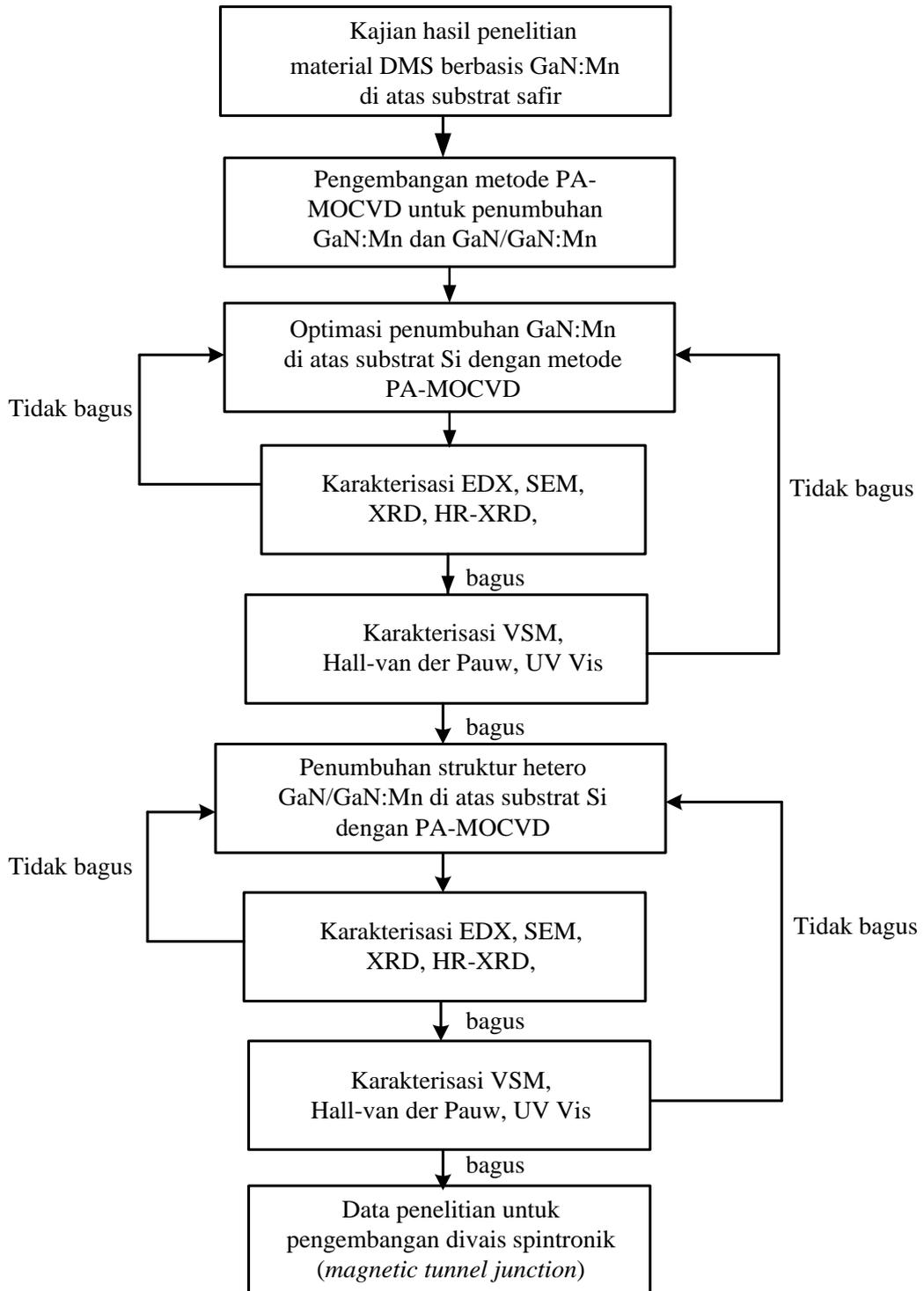


**Gambar 3.1** (a) Struktur divais MTJ berbasis GaN:Mn dan (b) Struktur-hetero GaN/GaN:Mn di atas substrat silikon.

Penumbuhan struktur-hetero GaN/GaN:Mn juga akan dilakukan dengan metode PA-MOCVD. Mula-mula akan ditumbuhkan film tipis GaN di atas substrat silikon, dengan mengacu pada parameter penumbuhan GaN di atas substrat silikon yang telah dilakukan oleh peneliti pertama. Setelah dilakukan penumbuhan lapisan GaN (30-60 menit), kemudian dimasukkan sumber Mn, sehingga terbentuk struktur hetero GaN/GaN:Mn. Penumbuhan film tipis GaN:Mn dilakukan dengan cara memvariasikan parameter penumbuhan, meliputi temperatur penumbuhan ( $625 - 700$  °C), rasio fluks V/III (480-1100) dan fraksi molar sumber Mn/Ga (0,2 – 0,5), disamping optimasi ketebalan lapisan GaN.

Setelah tahap penumbuhan, dilakukan karakterisasi struktur dan orientasi film tipis GaN/GaN:Mn dengan metode XRD dan HR-XRD. Selanjutnya dilakukan pengamatan morfologi permukaan dan komposisi atom dengan analisis SEM dan analisa EDX. Adapun sifat magnet, listrik, dan optik pada struktur-hetero GaN/GaN:Mn ditentukan dengan analisa pengukuran melalui metode VSM, Hall-van der Pauw, dan UV-Vis spektrofotometri.

Secara garis besar dapat dibuat diagram alir penelitian seperti pada **Gambar 3.2**.

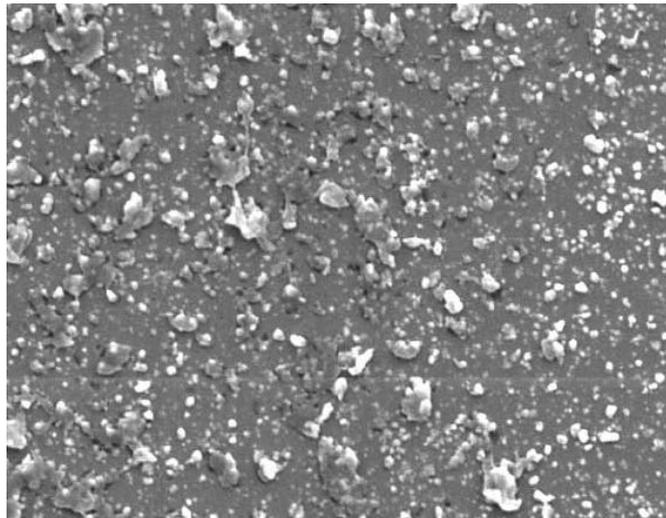


**Gambar 3.2** Diagram alir penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

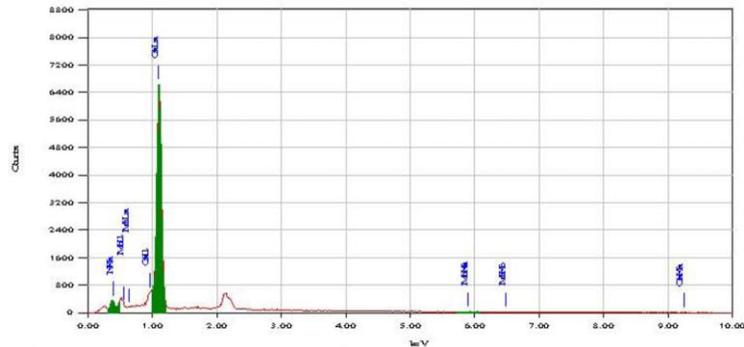
### 4.1 Penumbuhan Film Tipis GaN di atas Substrat Silikon

Penumbuhan film tipis GaN di atas substrat silikon dilakukan menggunakan metode PA-MOCVD (*Plasma Assisted Metal Organic Chemical Vapor Deposition*). Temperatur penumbuhan antara 650°C dan 700°C. Untuk melihat berhasil atau tidaknya penumbuhan film ini, SEM dan karakterisasi EDX dilakukan. Foto SEM film salah satu sampel GaN diperlihatkan pada **Gambar 4.1**.



**Gambar 4.1** Hasil SEM film tipis GaN

Selanjutnya, hasil EDX diperlihatkan pada **Gambar 4.2**. Puncak yang terjadi pada sekitar 0,4 keV adalah N dan pada sekitar 1 keV adalah Ga. Hal ini menunjukkan bahwa film GaN berhasil ditumbuhkan.



**Gambar 4.2** Hasil EDX film tipis GaN

#### 4.2 Pengukuran Sifat Listrik, Ketebalan, dan Tipe Film GaN

Sifat listrik Film GaN meliputi resistivitas, *sheet*, dan *slice*, dan ketebalan film diukur menggunakan *FPP 500 Four Point Probe*. Ada tiga sampel film GaN yang diukur. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.1 di bawah ini.

**Tabel 4.1**

Hasil Pengukuran Sifat Listrik dan Ketebalan Film GaN

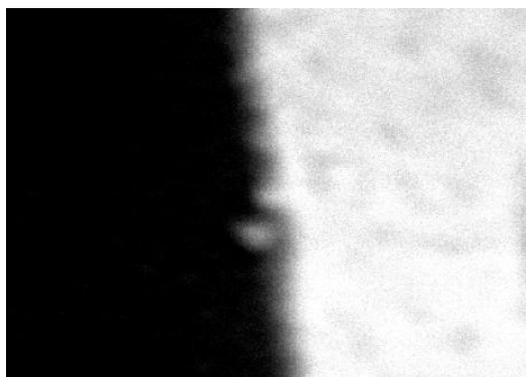
No. Sampel	Type	Resistansi (ohm)	<i>Sheet</i> (ohm/square)	<i>Slice</i> (ohm.cm)	Ketebalan (angstrom)
1	P	283	1282	0.326	$7,80 \times 10^5$
2	P	436	1978	5,02	$5,05 \times 10^4$
3	P	0,394	1,785	$4,53 \times 10^{-3}$	$5,60 \times 10^7$

Pada tabel 4.1 di atas terlihat bahwa ketiga sampel GaN memiliki tipe-p. Resistansi terkecil adalah 0,394 ohm (sampel no. 3), sedangkan terbesar adalah 436 ohm (sampel no. 2). Sementara itu, ketebalan film bervariasi dari  $5,05 \times 10^4$  angstrom hingga  $5,60 \times 10^7$  angstrom. Perbedaan ketebalan ini dapat terjadi karena tidak seragamnya distribusi GaN pada saat ditumbuhkan di atas substrat silikon menggunakan metode PA-MOCVD.

### 4.3 Pembentukan Film GaN:Mn

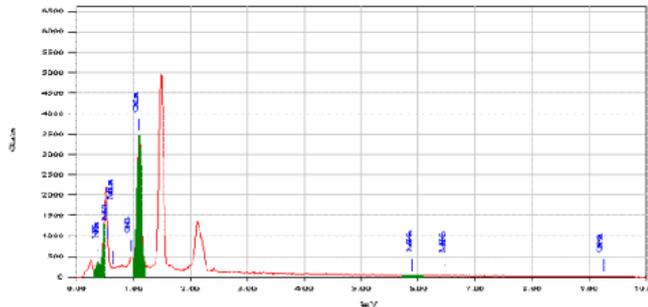
Semula, film GaN:Mn akan ditumbuhkan menggunakan metode PA-MOCVD. Akan tetapi, pada saat proses penumbuhan dilakukan, terjadi kerusakan pada salah satu komponen PA-MOCVD, yakni *mass flow controller* (MFC) sehingga proses terhenti. Karena komponen tersebut harus dipesan dari luar negeri (sudah dilakukan dan dalam proses) dan sampai saat ini belum diperoleh, kami mengganti metodenya dengan teknik implantasi ion.

Dengan teknik implantasi ion, berkas ion Mn ditembakkan pada film GaN (yang telah ditumbuhkan menggunakan metode PA-MOCVD). Ketebalan lapisan GaN yang didadah dengan ion Mn diatur sedemikian rupa sehingga hanya sebagian lapisan atas GaN yang terkotori Mn. Hasil SEM salah satu sampel film GaN:Mn diperlihatkan pada **Gambar 4.3**.



**Gambar 4.3** Hasil SEM film GaN:Mn

**Gambar 4.4** menunjukkan hasil karakterisasi EDX salah satu sampel film GaN:Mn. Di sini terlihat bahwa puncak-puncak energinya adalah 0,302 keV, 1,098 keV, dan 5,894 keV berturut-turut untuk N, Ga, dan Mn. Hasil EDX juga menunjukkan bahwa prosentasenya masing-masing sebagai berikut: Ga = 27,25%, N = 72,13%, dan Mn = 0,57%. Hasil ini menunjukkan bahwa ion Mn berhasil diinkorporasikan ke dalam film GaN sehingga terbentuklah film GaN:Mn.



**Gambar 4.4** Hasil EDX film GaN:Mn

#### 4.4 Pengukuran Sifat Listrik, Ketebalan, dan Tipe GaN:Mn

Sifat listrik, ketebalan, dan Tipe GaN:Mn diukur menggunakan *FPP 500 Four Point Probe*. Hasilnya seperti diperlihatkan pada **Tabel 4.2** di bawah ini.

**Tabel 4.2**

Hasil Pengukuran Sifat Listrik dan Ketebalan Film GaN:Mn

No. Sampel	Tipe	Resistansi (ohm)	Sheet (ohm/square)	Slice (ohm.cm)	Ketebalan (angstrom)
1	P	251	1139	2,89	$8,78 \times 10^4$
2	P	320	2100	61,3	$4,15 \times 10^3$
3	P	0,492	2,23	$5,67 \times 10^{-3}$	$4,48 \times 10^6$

Jika dibandingkan dengan Tabel 4.1, terdapat perbedaan hasil pengukuran resistansi, *sheet*, dan ketebalan film. Resistansi, *sheet*, dan ketebalan film Film GaN:Mn untuk setiap sampel lebih kecil dibandingkan dengan film GaN. Ini menunjukkan bahwa kehadiran ion Mn mengubah konduktivitas dari film, tetapi tidak terlalu besar. Secara fisis, kehadiran ion Mn sebagai pengotor tidak mengubah sifat semikonduktor dari GaN sebagai induk. Ion Mn hanya akan

mengubah sifat magnetik film, dari semula nonmagnetik menjadi ferromagnetik. Karena itulah film GaN:Mn disebut semikonduktor ferromagnetik.

Ketebalan film GaN:Mn untuk setiap sampel juga lebih kecil daripada film GaN. Hal ini menunjukkan bahwa hanya lapisan bagian atas dari film GaN yang terkotori ion Mn melalui teknik implantasi. Fakta ini memang yang diharapkan karena kami ingin membentuk lapisan film GaN:Mn di atas film GaN. Dengan demikian, tujuan untuk membuat struktur berlapis (hetero) GaN:Mn/GaN telah berhasil dicapai.

## **BAB V**

### **SIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Simpulan**

Struktur hetero (berlapis) GaN:Mn/GaN telah berhasil dibuat dengan mengombinasikan metode PA-MOCVD dan teknik implantasi ion. Metode PA-MOCVD untuk menumbuhkan film GaN, sedangkan teknik implantasi ion untuk membentuk film GaN:Mn di atas film GaN.

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini baru sampai pada penumbuhan struktur hetero GaN:Mn/GaN. Mengacu pada hasil ini, adalah sangat memungkinkan untuk membuat divais MTJ (*magnetic tunnel junction*) berstruktur GaN:Mn/GaN/GaN:Mn. Akan tetapi, sebelum sampai ke aplikasi divais MTJ, masih perlu dilakukan penyelidikan mengenai injeksi spin dari GaN:Mn ke GaN dan pengukuran transpor spin dalam GaN. Penelitian ini masih perlu dilanjutkan sehingga pada akhirnya dapat diperoleh divais MTJ yang benar-benar siap untuk dimanfaatkan dan berkontribusi pada perkembangan teknologi maju.

## DAFTAR PUSTAKA

- Awschalom, D.D., Loss, D., dan Samarth, N. (Eds.) (2002): *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, Springer-Verlag Berlin, Germany, vi
- Filip, A.T., Hoving, B.H., Jedema, F.J., van Wees, B.J., Dutta, B., dan Borghs, S. (2000) : Electrical spin injection and detection in a semiconductor. Is it feasible?, cond-mat/0007307v1
- Kane, M.H., Asghar, A., Vestal, C.R., Strassburg, M., Senawiratne, J., Zhang, Z.J., Dietz, N., Summers, C.J., dan Ferguson, I.T. (2005): Magnetic and Optical Properties of GaMnN Grown by Metalorganic Chemical Vapour Deposition, *Semiconductor Sciences and Technology*, **20**, 1.5-1.9
- Korotkov, R.Y., Reshchikov, M.A., dan Wessels, B.W. (2003): Acceptors in Undoped GaN Studied by Transient Photoluminescence, *Physica B*, **325**, 1–7
- Ohno, H. (1999): Properties of Ferromagnetic III-V Semiconductors, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **200**, 110-129
- Pearton, S.J., Abernathy, C.R., Norton, D.P., Hebard, A.F., Park, Y.D., Boatner, L.A., dan Budai, J.D. (2003): Advances in Wide Bandgap Materials for Semiconductor Spintronics, *Materials Science and Engineering*, R **40**, 137–168
- Pearton, S.J., Abernathy, C.R., Thaler, G.T., Frazier, R.M., Norton, D.P., Ren, F., Park, Y.D., Zavada, J.M., Buyanova, I.A., Chen, W.M., dan Hebard, A.F. (2004): Wide bandgap GaN-Based Semiconductors for Spintronics, *Journal of Physics : Condense Matter*, **16**, R209–R245
- Polyakov, A.Y., Govorkov, A.V., Smirnov, N.B., Pashkova, N.Y., Thaler, G.T., Overberg, M.E., Frazier, R., Abernathy, C.R., Pearton, S.J., Kim, J., and Ren, F. (2002): Optical and Electrical Properties of GaMnN Films Grown by Molecular-Beam Epitaxy, *Journal of Applied Physics*, **92**, 9, 313-316
- Ramsteiner, M., Hao, H.Y., Kawaharazuka, A., Zhu, H.J., Kastner, M., Hey, R., Daweritz, L., Grahn, H.T., dan Ploog, K.H. (2002): Electrical Spin Injection from Ferromagnetic MnAs Metal Layers into GaAs, *Physical Review B*, **66**, 0813041-0813044
- Reed, M.L. (2003): *Growth and characterization of Room Temperature Ferromagnetic Mn:GaN and Mn:InGaN for Spintronic Applications*, Disertasi Doktor, North Carolina State University, 37-40, 148

- Sofer, Z., Sedmidubsky, D., Stejskal, J., Hejtmanek, J., Marysko, M., Jurek, K., Vaclavu, M., Havranek, V., dan mackova, A. (2008): Growth and characterization of GaN:Mn layers by MOVPE, *Journal of Crystal Growth*, 310, 5025-5027
- Sujitno, Tjipto (2003): Aplikasi Implantor Ion Untuk Nonsemikonduktor dan Semikonduktor, *Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju*, Batan, Yogyakarta.
- Supriyanto, Edy (2008): *Penumbuhan Film Tipis Semikonduktor Ferromagnetik TiO<sub>2</sub>:Co/TiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>:Co dan TiO<sub>2</sub>:Co/Si(100) Dengan MOCVD dan Penerapannya Dalam Injeksi Spin Elektron*, Disertasi Program Doktor, ITB.
- Zhao, J.H., Matsukura, F., Abe, E., Chiba, D., Ohno, Y., Takamura, K., dan Ohno, H (2002): Growth and Properties of (Ga,Mn)As on Si (1 0 0) Substrate, *Journal of Crystal Growth*, **237–239**, 1349–1352
- Zorpette, G. (2001), *The Quest of Spin Transistor*, IEEE Spectrum, USA
- Zutic, I., Fabian, J., dan Das Sarma, S., (2004): Spintronics: Fundamentals and applications, *Review of Modern Physics*, Vol 76, 2004, 323-410