

RINGKASAN HIBAH BERSAING



**PENUMBUHAN MATERIAL DMS GaN:Mn DAN STRUKTUR
GaN/GaN:Mn DI ATAS SUBSTRAT SILIKON DENGAN METODE
PA-MOCVD UNTUK APLIKASI DIVAIS MTJ**

Peneliti:

Dr. Budi Mulyanti, MSi (Ketua)

Dr. Dadi Rusdiana, MSi (Anggota)

Pepen Arifin, Ph.D (Anggota)

Dibiayai oleh:

**Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional,
sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian
Nomor: 014/SP2H/PP/DP2M/III/2008 Tgl. 6 Maret 2008**

**JURUSAN PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNOLOGI DAN KEJURUAN
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

2008

ABSTRAK

Masalah yang menjadi topik utama penelitian ini adalah penumbuhan film tipis GaN:Mn dan struktur-hetero GaN/GaN:Mn di atas substrat silikon dengan metode PA-MOCVD (*Plasma-Assisted Metalorganic Chemical Vapor Deposition*). Kegiatan penelitian ini akan dilakukan dalam 2 (dua) tahun. Tahap pertama meliputi penumbuhan GaN:Mn di atas substrat silikon dengan metode PA-MOCVD menggunakan sumber TMGa (*trimethyl gallium*), gas nitrogen UHP (*ultra high purity*) dan CpMnT (*cyclopentadienyl manganese tricarbonyl*)

Semikonduktor ferromagnetik atau DMS (*diluted magnetic semiconductor*) diperoleh dengan cara inkorporasi elemen magnetik dari logam transisi ke dalam semikonduktor non magnetik, seperti halnya proses pendadahan. Dalam kasus GaN:Mn, konsentrasi maksimum yang masih menghasilkan fase kristal tunggal naik jika temperatur penumbuhan turun. Namun demikian dalam metode MOCVD termal diperlukan temperatur penumbuhan yang tinggi agar terjadi inkorporasi Mn ke dalam GaN sehingga film yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik. Dalam penelitian ini digunakan metode PA-MOCVD yang merupakan pengembangan metode MOCVD termal, yaitu dengan menambahkan *microwave cavity* sebagai sel pemecah untuk menghasilkan nitrogen radikal, yang dapat menurunkan temperatur penumbuhan. Penumbuhan film GaN:Mn dilakukan di atas substrat silikon (111) dengan cara memvariasikan temperatur penumbuhan, rasio V/III dan fraksi molar Mn/Ga masing-masing dalam rentang 625 °C -700 °C, 575-1100 dan 0,3 – 0,5. Setelah proses penumbuhan, kemudian dilakukan serangkaian karakterisasi film GaN:Mn yang dihasilkan, meliputi komposisi atomik, morfologi permukaan, sifat struktur, sifat magnet, dan sifat listrik masing-masing menggunakan metode EDX (*energy dispersive X-ray*), SEM (*scanning electronic microscopy*), XRD (*X-ray diffraction*), VSM (*vibrating sample magnetometer*), dan Hall van-der Pauw.

Dari hasil analisis EDX, dihasilkan bahwa inkorporasi Mn ke dalam GaN bergantung pada parameter penumbuhan yang digunakan. Adapun citra SEM memperlihatkan bahwa film yang ditumbuhkan pada temperatur penumbuhan yang lebih tinggi menghasilkan morfologi permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan film yang ditumbuhkan pada temperatur penumbuhan yang lebih rendah. Makin tinggi konsentrasi Mn makin baik pula morfologi permukaan film. Dari analisis XRD diperoleh sampel # 8.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,28 % memperlihatkan puncak difraksi pada $2\theta = 32.4^\circ$ yang mengindikasikan orientasi fase tunggal GaN:Mn (100). Hasil dari pengukuran magnetisasi menggunakan metode VSM pada temperatur kamar, memperlihatkan kurva histeresis yang mengindikasikan bahwa semua film yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik. Sampel # 2.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,63% memperlihatkan magnetisasi remanen yang paling tinggi (330 Oe/cm³) dan koersivitas magnetik yang paling rendah (180 Oe) sehingga cocok untuk aplikasi divais. Terakhir dari hasil karakterisasi sifat listrik, secara keseluruhan, film GaN:Mn yang dihasilkan dalam penelitian ini, memiliki resistivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang diperoleh peneliti lain yaitu antara 1,08 -1,45 x 10⁻³ Ω cm. Hal ini menguntungkan untuk meningkatkan sifat magnetik bahan.

Pendahuluan

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 $\sim 100\%$ 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 (Pearton, *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 Metalorganic 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).

Tujuan penelitian

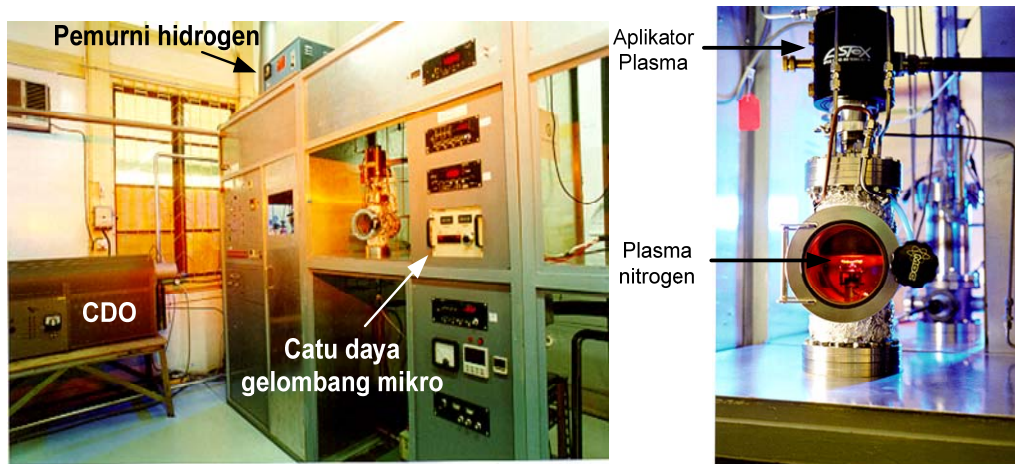
1. Memperoleh parameter penumbuhan film tipis GaN:Mn yang tepat untuk pengembangan struktur-hetero GaN/GaN:Mn.
2. Memperoleh kaitan antara inkorporasi Mn dengan sifat ferromagnetik dan semikonduktor GaN:Mn
3. Menghasilkan film tipis GaN:Mn dengan karakteristik ferromagnetik dan semikonduktor yang baik sehingga dapat dikembangkan untuk penumbuhan struktur-hetero GaN/GaN:Mn.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini secara keseluruhan merupakan serangkaian kegiatan eksperimen laboratorium. Kegiatan penelitian tahun pertama ini dilakukan dalam 2 (dua) tahap. Tahap pertama meliputi penumbuhan GaN:Mn di atas substrat silikon dengan metode PA-MOCVD (*Plasma-Assisted Metalorganic Chemical Vapor Deposition*) menggunakan sumber TMGa (*trimethyl gallium*), gas nitrogen UHP (*ultra high purity*) dan CpMnT (*Cyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl*). 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).

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 N₂. Dengan demikian 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, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 (a) Sistem reaktor PA-MOCVD 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.

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.

Penumbuhan Film Tipis GaN:Mn

Penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan metode PA-MOCVD ini dapat dibagi ke dalam beberapa tahapan. Setelah melalui tahap pencucian, substrat silikon (111) segera dimasukkan ke dalam reaktor untuk dilakukan proses *thermal cleaning* dengan aliran gas hidrogen tetap sebesar 48 sccm pada temperatur 650°C selama 10 menit. *Thermal cleaning* bertujuan untuk mengurangi ikatan oksigen-karbon pada permukaan substrat. Sedangkan untuk mengatasi ketaksesuaian kisi antara substrat dengan film yang ditumbuhkan, terlebih dahulu ditumbuhkan lapisan penyangga (*buffer layer*) GaN pada temperatur 500°C selama 10 menit. Setelah penumbuhan lapisan penyangga, kemudian dilakukan *thermal cleaning* pada temperatur yang lebih tinggi, yaitu 650°C, yang bertujuan agar terjadi kristalisasi pada lapisan penyangga.

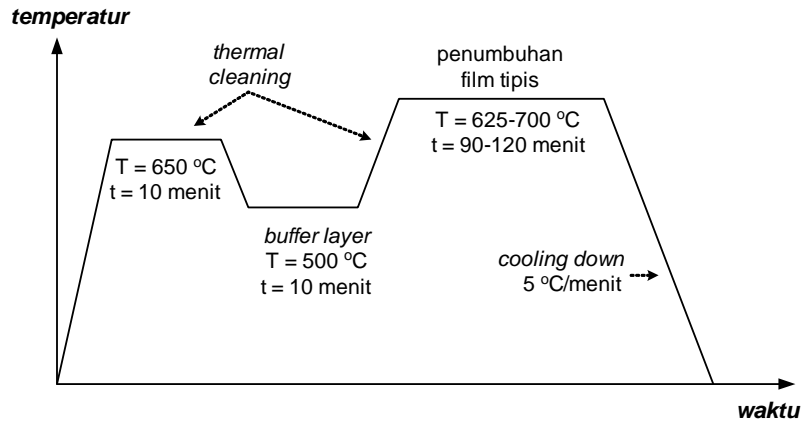
Penumbuhan film tipis GaN:Mn kemudian dilakukan dengan sumber TMGa, CpMnT dan gas nitrogen dengan kemurnian yang sangat tinggi (*ultra-high purity nitrogen gas*) dan gas hidrogen sebagai gas pembawa, dengan parameter penumbuhan tercantum pada Tabel 1. Nilai-nilai parameter penumbuhan diatur (*set*) terlebih dahulu untuk mengurangi fluktuasi. Adapun temperatur *bubbler* TMGa dan CpMnT masing-masing diatur pada -11 °C dan 27 – 50 °C, dengan tekanan *bubbler* masing-masing 11 Psi dan 10 Psi.

Tabel 1. Parameter Penumbuhan GaN:Mn

Parameter Penumbuhan	Harga
Temperatur penumbuhan	625 -700 °C
Tekanan reaktor	0,3 – 0,5 Torr
Laju alir gas H ₂ pembawa (TMGa)	0,8 - 2,1 sccm
Tekanan bubbler TMGa	11 Psi
Temperatur bubbler TMGa	- 11 – (-10) °C
Laju alir N ₂ (plasma)	70 – 120 sccm
Laju alir gas H ₂ pembawa (CpMnT)	5 - 40 sccm
Temperatur bubler CpMnT	27 – 50 °C
Daya plasma	150 – 200 W
Waktu penumbuhan	90 – 120 menit

Proses penumbuhan diakhiri dengan tahap pendinginan (*cooling down*) menuju temperatur ruang dengan laju 5 °C / menit selama 30 menit. Selama proses pendinginan berlangsung, plasma nitrogen tetap dialirkan sampai temperatur sekitar 500 °C untuk mencegah adanya penguapan atom nitrogen dari film GaN:Mn yang

ditumbuhkan. Selanjutnya pembangkit plasma dikecilkan dan kemudian dimatikan sementara gas nitrogen tetap mengalir hingga temperatur ruang. Secara skematik proses penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan metode PA-MOCVD, diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema proses penumbuhan film tipis GaN:Mn

Kesulitan utama dalam penumbuhan film tipis GaN:Mn adalah bagaimana agar terjadi inkorporasi Mn ke dalam film GaN:Mn. Tabel 2 menyatakan inkorporasi Mn ke dalam GaN berdasarkan analisis pengukuran *energy dispersive spectroscopy* (EDS).

Tabel 2. Inkorporasi Mn dalam film GaN:Mn di atas substrat silikon

No. Sampel	Tg (°C)	Rasio V/III	Fraksi molar Mn/Ga	Mn inkorporasi (%)
#2.A	680	1100	0,4	1,60
#2.2	700	1400	0,3	1,63
#6.2	650	450	0,4	0,20
#8.2	650	1100	0,4	1,28
#9.2	625	1100	0,4	0
#10.2	650	750	0,5	1,76
#11.2	650	575	0,4	1,20

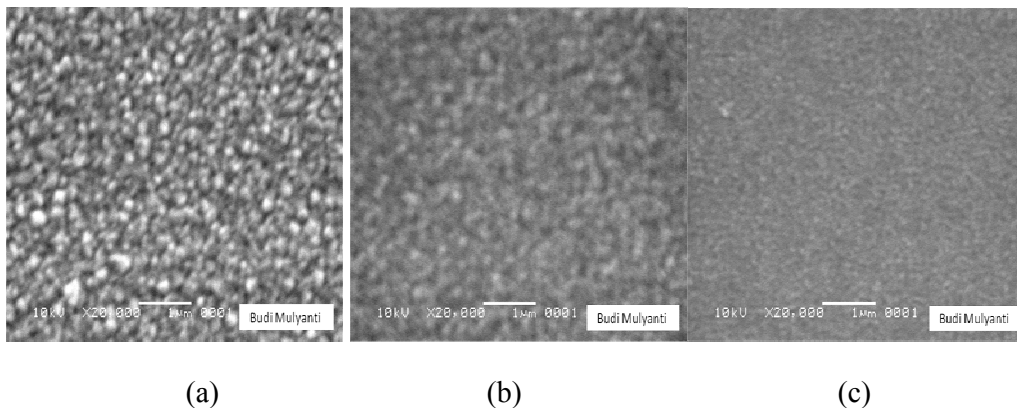
Dari Tabel 2 nampak adanya kebergantungan inkorporasi Mn terhadap temperatur penumbuhan, misalnya pada sampel 2.A dan 8.2 yang ditumbuhkan dengan temperatur yang berbeda, namun dengan rasio V/III dan rasio molar Mn/Ga yang sama, terjadi inkorporasi yang lebih baik untuk sampel 2.A (yaitu yang ditumbuhkan pada Tg = 680 °C) Dengan demikian dapat diharapkan makin tinggi temperatur, makin tinggi pula inkorporasi Mn. Sampel 9.2 yang ditumbuhkan pada

temperatur 625°C, tidak terjadi inkorporasi Mn ke dalam GaN:Mn. Pada kasus ini untuk temperatur yang lebih tinggi, terjadi dekomposisi sumber CpMnT yang lebih baik, yang pada akhirnya menyebabkan inkorporasi Mn yang lebih baik.

Selain kebergantungan terhadap temperatur, inkorporasi Mn juga tergantung pada rasio V/III, seperti terjadi pada sampel 8.2 dan 11.2. Pada temperatur penumbuhan dan fraksi molar Mn/Ga yang sama, sampel 11.2 memiliki konsentrasi Mn yang lebih besar dibandingkan sampel 8.2. Dalam hal ini makin besar rasio V/III, makin besar pula inkorporasi Mn yang terjadi. Kebergantungan inkorporasi Mn terhadap fraksi molar Mn/Ga tidak diteliti di sini, karena sudah dapat dipastikan makin besar Mn yang mengalir akan makin besar pula inkorporasi Mn ke dalam GaN.

Morfologi Permukaan

Morfologi permukaan beberapa sampel film tipis GaN:Mn yang dihasilkan dari karakterisasi *scanning electronic microscopy* (SEM) dengan perbesaran 20.000 kali diperlihatkan pada Gambar 3.



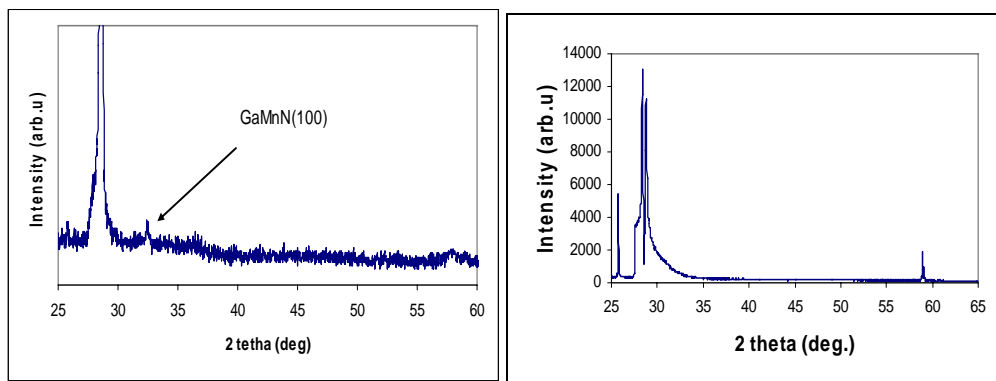
Gambar 3. Morfologi permukaan sampel (a) 2A, (b) 2.2 dan (c) 10.2

Dari Gambar 3 (a) dan (b) yaitu sampel 2.A dan 2.2 yang memiliki konsentrasi Mn yang hampir sama (1,60% dan 1,63%) namun ditumbuhkan dengan temperatur yang berbeda masing-masing pada 680 °C dan 700 °C, nampak sampel 2.2 memiliki tingkat kekasaran yang lebih rendah. Hal ini kemungkinan karena temperatur penumbuhan yang lebih tinggi menyebabkan mobilitas N reaktif menjadi lebih tinggi sehingga pada akhirnya menyebabkan kristalinitas dan morfologi permukaan yang lebih baik.

Adapun kaitan antara konsentrasi Mn dengan morfologi permukaan dapat dilihat pada Gambar 5 (a), (b), dan (c). Sampel 10.2 dengan konsentrasi Mn paling tinggi yaitu 1,76 % memperlihatkan tingkat kekasaran permukaan yang paling baik. Dengan demikian dapat dikatakan inkorporasi Mn tidak merusak kristalinitas film tipis GaN:Mn di atas substrat silikon.

Karakterisasi Kualitas Struktur Film Tipis GaN:Mn

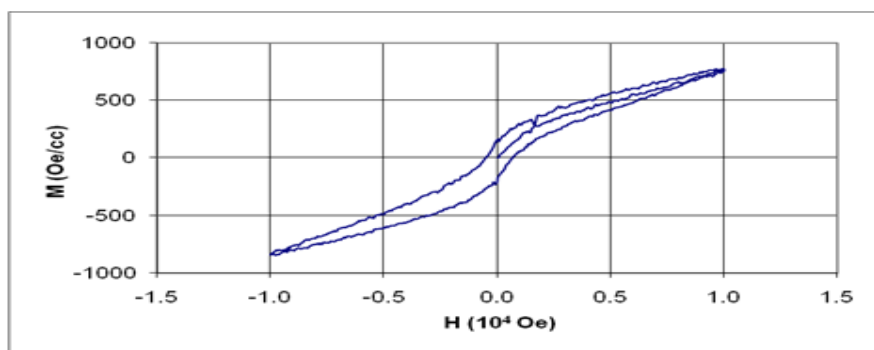
Gambar 4 (a) adalah spektrum XRD untuk sampel 8.2 yang memperlihatkan puncak difraksi pada sudut 2θ sebesar $32,4^\circ$ yang mengindikasikan adanya fase tunggal film GaN:Mn dengan orientasi (100). Adapun Gambar 4 (b) adalah spektrum XRD untuk sampel 10.2 yang memperlihatkan puncak difraksi pada sudut 2θ sebesar $57,6^\circ$ yang mengindikasikan adanya fase tunggal film GaN:Mn dengan orientasi (110). Dengan demikian kedua sampel memperlihatkan orientasi kristal tunggal, namun dengan orientasi yang berbeda. Sampel #8.2 memiliki orientasi kristal tunggal GaN:Mn (002) sejajar bidang substrat Si (111).



Gambar 4. Spektrum XRD untuk sampel (a) 8.2 dan (b) 10.2

Karakterisasi Sifat Magnetik Film GaN:Mn

Dalam penelitian ini digunakan pengukuran VSM pada temperatur kamar untuk mengukur sifat kemagnetan film GaN:Mn, meliputi harga magnetisasi saturasi, koersivitas magnetik dan magnetisasi remanen. Pengukuran yang dilakukan terhadap semua sampel GaN:Mn menunjukkan adanya histeresis pada temperatur kamar. Contoh kurva histeresis untuk sampel 2.A nampak pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva histeresis untuk sampel 2A.

Dari semua sampel GaN:Mn yang diukur sifat kemagnetannya memperlihatkan kurva histeresis, maka dapat dikatakan bahwa film GaN:Mn yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik dengan temperatur Curie (T_C) sama atau di atas temperatur ruang. Adapun harga-harga karakteristik magnetik untuk beberapa sampel dicantumkan di dalam Tabel 3.

Tabel 3. Harga karakteristik magnetik untuk beberapa sampel GaN:Mn

Sampel #	Konsentrasi Mn (%)	Magnetisasi remanen M_r (Oe/cm ³)	Magnetisasi saturasi M_s (Oe/cm ³)	Koersivitas magnetik H_c (Oe/)
2A	1,60	210	740	300
2.2	1,63	330	720	180
6.2	0,20	90	790	700
8.2	1,28	135	840	610

Untuk aplikasi divais, diinginkan suatu material yang memiliki koersivitas magnetik rendah dan magnetisasi remanen yang tinggi. Koersivitas menyatakan seberapa besar medan magnet balik yang diperlukan untuk mengembalikan magnetisasi ke harga nol setelah harga saturasi, sedangkan magnetisasi remanen menyatakan magnetisasi yang tersimpan dalam material jika medan magnet luar diturunkan menjadi nol. Harga coersivitas yang rendah menuntut penggunaan catu daya yang rendah pula dan harga magnetisasi remanen yang tinggi mencerminkan sifat *non-volatile* material yang lebih baik, artinya data yang disimpan tidak mudah menguap/hilang sewaktu divais dimatikan. Dengan demikian sampel 2.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,63 % memiliki sifat magnetik yang paling baik, yaitu 330

Oe/cm³ untuk magnetisasi remanens dan 180 Oe untuk koersivitas magnetik sehingga paling cocok untuk aplikasi divais.

Karakterisasi Sifat Listrik Film Tipis GaN:Mn

Pengukuran sifat listrik pada temperatur kamar dilakukan dengan metode Hall-van der Pauw. Semua sampel GaN:Mn yang diukur menunjukkan konduktivitas tipe-*n*, seperti halnya GaN, yang disebabkan karena pembentukan N-*vacancy* selama penumbuhan. Tipe konduktivitas ini dapat dikatakan bukan berasal dari lapisan penyangga GaN, karena lapisan penyangga GaN yang digunakan memiliki ketebalan yang jauh lebih rendah, yaitu 1/12 kali ketebalan film GaN:Mn.

Sifat ferromagnetik dalam film GaN:Mn yang dihasilkan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bukan berasal dari interaksi pertukaran (*exchange interaction*) yang dimediasi oleh *hole*, seperti yang diusulkan oleh Dietl (2001), tapi dimediasi oleh elektron. Dari segi teknologi GaN:Mn tipe-*n* ini sangat menarik karena pada umumnya untuk aplikasi divais diperlukan material tipe-*n* (misalkan dalam FET) atau kedua tipe-*n* dan tipe-*p* (misalkan dalam *bipolar transistors* dan *optical emitters*) (Albrecht, dkk., 2005).

Sifat ferromagnetisme dalam GaN:Mn tipe-*n* ini tidak sesuai dengan model medan rata-rata yang dikemukakan oleh Dietl, yang menyatakan bahwa ferromagnetisme hanya terjadi untuk GaN:Mn tipe-*p*. Namun demikian, ferromagnetisme yang muncul dalam GaN:Mn tipe-*n* ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Reed (2003) berdasarkan struktur pita yang diusulkan oleh Kronik, *et al* (2002). Menurut pengukuran, valensi yang efektif untuk Mn dalam sistem material GaN:Mn adalah Mn²⁺ (Soo, *et al*, 2001) sehingga Mn berperan sebagai akseptor dengan energi aktivasi akseptor Mn sebesar 1,4 eV (Korotkov, *et al.*, 2001). Untuk GaN:Mn tipe-*n* elektron dari pita konduksi akan mudah jatuh mengisi keadaan akseptor Mn tersebut. Pengisian tingkatan akseptor ini diperlukan agar terjadi pasangan (*coupling*) antara elektron dengan ion Mn, yang dapat mencegah terjadinya pasangan antiferromagnetik antara ion-ion Mn yang berdekatan. Sedangkan untuk material tipe-*p* (misalkan dengan doping Mg), diperlukan dua lompatan. Mula-mula akseptor Mg membangkitkan elektron dari pita valensi, kemudian elektron tersebut dilontarkan ke keadaan akseptor Mn, sehingga proses ionisasi menjadi tidak efisien. Tabel 4 memperlihatkan harga-harga parameter listrik beberapa sampel GaN:Mn dengan konsentrasi Mn dan temperatur penumbuhan yang berbeda.

Tabel 4. Parameter listrik untuk beberapa sampel GaN:Mn

T_g (°C)	Sampel#, [Mn] (%)	Resistivitas (Ω cm) x 10^{-3}	Konsentrasi elektron (cm^{-3})	Mobilitas elektron (cm^2/Vs)
680	#2A 1,60% Mn	1,45	$1,03 \times 10^{20}$	41,7
700	#2.2 1,63% Mn	1,23	$4,87 \times 10^{20}$	10,4
650	#8.2 1,28% Mn	1,08	$1,01 \times 10^{20}$	57,1
650	#10.2 1,76% Mn	1,15	$5,88 \times 10^{19}$	92,3

Hasil pengukuran resistivitas listrik menunjukkan adanya kenaikan resistivitas jika konsentrasi Mn bertambah, pada temperatur penumbuhan yang sama seperti diperlihatkan pada Tabel V.9 (sampel 8.2 dan sampel 10.2). Kenaikan resistivitas ini disebabkan karena ion-ion Mn cenderung mengkompensasi pembawa muatan dalam film, sehingga pembawa muatan yang berkontribusi terhadap konduktivitas menjadi berkurang (Reed, 2003).

Selain kenaikan resistivitas jika konsentrasi Mn bertambah, pada temperatur penumbuhan yang sama, terjadi juga penurunan rapat pembawa muatan dan kenaikan mobilitas Hall untuk konsentrasi Mn yang lebih tinggi. Penurunan rapat pembawa muatan terhadap konsentrasi Mn, seperti telah dijelaskan, terjadi karena dengan bertambahnya atom Mn maka makin besar pula kemungkinan atom Mn yang mengkompensasi pembawa muatan.

Selain bergantung pada konsentrasi Mn, rapat pembawa muatan juga bergantung pada temperatur penumbuhan. Rapat pembawa bertambah besar jika temperatur dinaikkan (lihat Tabel 4 untuk sampel 2A dan 2.2), karena pada temperatur penumbuhan yang lebih tinggi cenderung lebih banyak atom nitrogen yang terdesorpsi dari permukaan GaN:Mn (Overberg, dkk., 2001).

Perbandingan harga resistivitas, ρ yang dihasilkan dalam penelitian ini dengan peneliti sebelumnya ditunjukkan dalam table 5. Secara keseluruhan, film GaN:Mn yang dihasilkan dalam penelitian ini, memiliki resistivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang diperoleh peneliti lain.

Tabel 5. Harga resistivitas GaN:Mn untuk bernagai metode penumbuhan

[Mn] (%)	T _g (°C)	Metode Penumbuhan	Resistivitas ρ (Ω .cm)	Peneliti, tahun
1,28-1,76	650	PA-MOCVD di atas Si	$1,08 \times 10^{-3}$ - $1,15 \times 10^{-3}$	Mulyanti, 2008
1,4 – 6,4	650	PA-MOCVD	0,16 – 1,18	Mulyanti, 2006
7,0	550-700	MBE	9,5	Lee, <i>et al</i> , 2004
3-10	700-750	MBE	2 - 105	Polyakov, <i>et al</i> , 2002
0,18 – 0,60	850-1040	MOCVD	0,073-0,107	Reed, 2003
1,2 -1,5	900-1050	MOCVD	> 100	Kane, dkk, 2005a

Harga resistivitas yang cukup tinggi yang pada film GaN:Mn sangat tidak menguntungkan untuk meningkatkan sifat ferromagnetik material GaN:Mn. Untuk material yang bersifat sangat resistif, energi Fermi diprediksikan berada di antara tingkatan energi Mn dan pita valensi (dengan kedudukan lebih dekat ke tingkatan energi Mn) dan dalam keadaan pita konduksi kosong, sehingga tidak ada elektron yang berkontribusi dalam mekanisme pertukaran ganda (*double exchange*). Hal ini disebabkan karena sifat magnetik GaN:Mn sangat dipengaruhi oleh interaksi pertukaran *s-d* antara Mn kulit *3d* dan elektron *s* dalam pita konduksi GaN. Untuk material yang lebih konduktif, energi Fermi akan naik mendekati pita konduksi yang terisi penuh, sehingga kemungkinan makin banyak elektron yang berinteraksi dengan ion-ion Mn yang pada akhirnya dapat meningkatkan sifat magnetik bahan GaN:Mn.

Kesimpulan

Semikonduktor ferromagnetik GaN:Mn di atas substrat silikon telah berhasil ditumbuhkan dengan metode PA-MOCVD dengan temperatur penumbuhan antara 650°C -700 °C, rasio V/III antara 575-1100 dan fraksi molar Mn/Ga antara 0,3 – 0,5. Dari pengukuran EDX, dihasilkan inkorporasi Mn ke dalam GaN:Mn sampai sebesar 1,76 % bergantung pada parameter penumbuhan yang digunakan, meliputi temperatur penumbuhan, rasio V/III dan fraksi molar Mn/Ga.

Dari hasil analisis SEM dapat disimpulkan sampel yang ditumbuhkan dengan temperatur yang lebih tinggi cenderung memiliki morfologi permukaan yang lebih baik. Temperatur penumbuhan yang tinggi menyebabkan N reaktif yang lebih baik yang pada akhirnya menyebabkan kristalinitas dan morfologi permukaan yang lebih baik. Demikian juga untuk film dengan konsentrasi Mn yang lebih tinggi

menghasilkan morfologi permukaan yang lebih baik, sehingga dapat dikatakan inkorporasi Mn tidak merusak kristalinitas film.

Dari analisis XRD, sampel #8.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,28 % memperlihatkan adanya puncak difraksi pada sudut 2θ sebesar $32,4^\circ$ yang mengindikasikan adanya fase tunggal GaN:Mn dengan orientasi (100).

Kurva histeresis yang diperlihatkan semua sampel melalui pengukuran VSM, mengindikasikan sifat ferromagnetik semua sampel pada temperatur kamar. Sampel #2.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,63% memperlihatkan harga magnetisasi remanen yang paling tinggi (330 Oe/cm^3) dan koersivitas magnetik yang paling rendah (180 Oe) dibandingkan dengan sampel GaN:Mn lainnya, sehingga cocok untuk aplikasi divais.

Terakhir dari hasil karakterisasi sifat listrik, diperoleh kebergantungan resistivitas, rapat pembawa muatan dan mobilitas elektron terhadap temperatur penumbuhan dan konsentrasi Mn. Secara keseluruhan, film GaN:Mn yang dihasilkan dalam penelitian ini, memiliki resistivitas yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang diperoleh peneliti lain yaitu antara $1,08 - 1,45 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$. Hal ini menguntungkan untuk meningkatkan sifat magnetik bahan.

Saran

Berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, dapat direkomendasikan beberapa saran yang bermanfaat untuk penelitian lebih lanjut, yaitu:

1. Perlu dilakukan penumbuhan dengan memvariasikan parameter penumbuhan yang lebih banyak, sehingga inkorporasi Mn ke dalam Mn lebih mudah dikontrol dan pada akhirnya dapat meningkatkan sifat magnetik film GaN:Mn.
2. Agar diperoleh sifat optik film GaN:Mn yang ditumbuhkan perlu dilakukan pengukuran sifat optik dengan metode UV Vis. Pada penelitian tahap I ini tidak dapat dilakukan, karena peralatan yang dimiliki Prodi Kimia ITB saat ini dalam keadaan rusak.