

**ARTIKEL ILMIAH  
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**

# STUDI PENUMBUHAN GaN:Mn DI ATAS SUBSTRAT SILIKON DENGAN METODE PA-MOCVD

Budi Mulyanti<sup>1</sup>, Dadi Rusdiana<sup>2</sup>, dan Pepen Arifin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Pendidikan Teknik Elektro  
Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Setiabudhi 207, Bandung  
E-mail: [b\\_mulyanti@yahoo.com](mailto:b_mulyanti@yahoo.com)

<sup>2</sup>Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung

<sup>3</sup>Kelompok Keahlian Fisika Material Elektronik,  
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung

## Abstract

### **Study of GaN:Mn Growth on Silicon Substrate Using PA-MOCVD Method**

*In this paper the growth and characterizations of semiconductor ferromagnetic GaN:Mn thin films on silicon substrate using PA-MOCVD method are reported. Semiconductor ferromagnetic or DMS (diluted magnetic semiconductor) is synthesized by incorporating a magnetic element (impurity) into a non magnetic semiconductors, in a similar way to doping process. In the case of GaN:Mn, the maximum Mn concentration that would still produce single crystal phase increases with decreasing growth temperature. However, in a thermal MOCVD growth of GaN:Mn, high growth temperature is required to incorporate Mn into GaN in order to achieve ferromagnetism characteristic of the grown films. The PA-MOCVD used in this research, utilizes a microwave cavity as a cracking cell to produce nitrogen radicals, which in turn reduce the growth temperature. TMGa (trimethyl gallium), Cp<sub>2</sub>MnT (cyclopentadienyl manganese tricarbonyl) and ultra-high purity nitrogen gas were used as Ga, Mn and N sources, respectively, while hydrogen gas was used as carrier gas. The GaN:Mn films were grown on silicon substrates (111) at varied growth temperature in the range of 625 °C -700 °C.. The investigation were emphasized to the Mn incorporation mechanism related to the growth parameters and to study the surface morphology, structural and magnetic characteristics of GaN:Mn thin films.*

*The results of EDX analysis reveal that Mn incorporation into GaN depends on growth parameters. While SEM images show that the film grown at higher temperature has a better surface morphology than that of film grown at lower growth temperature. The higher Mn concentration also shows the better surface morphology of the film. A systematic XRD analysis reveal that sample # 8.2 with 1.28 % of Mn concentration shows a peak diffraction at  $2\theta = 32.4^\circ$  which indicates single phase orientation of GaN:Mn (100). The results of magnetization measurements using VSM method show hysteresis behavior at room temperature indicating that all of the grown films are ferromagnetic. Sample #2.2 with 1.63% of Mn concentration shows the highest remanense magnetization (330 Oe/cm<sup>3</sup>) and lowest magnetic coercivity (180 Oe) which is suitable for device's application.*

**Keywords:** GaN:Mn, silicon substrate, PA-MOCVD method, Mn incorporation, surface morphology, structural and magnetic characteristics

## Abstrak

### **Studi Penumbuhan GaN:Mn Di atas Substrat silikon Dengan Metode PA-MOCVD**

*Dalam paper ini dilaporkan penumbuhan dan karakterisasi film tipis semikonduktor ferromagnetik GaN:Mn di atas substrat silikon dengan menggunakan metode Plasma Assisted MOCVD. 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 suhu penumbuhan turun. Namun demikian metode MOCVD termal memerlukan suhu penumbuhan yang tinggi agar terjadi inkorporasi Mn ke dalam GaN dan film yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik. Metode PA-MOCVD yang digunakan dalam penelitian ini, menggunakan microwave cavity sebagai sel pemecah untuk menghasilkan nitrogen radikal, yang dapat menurunkan suhu penumbuhan. TMGa (trimethyl gallium), Cp<sub>2</sub>MnT (cyclopentadienyl manganese tricarbonyl) dan gas nitrogen ultra-high purity digunakan berturut-turut sebagai sumber Ga, Mn and N, sementara gas hidrogen digunakan sebagai gas pembawa. Penumbuhan film GaN:Mn dilakukan di atas substrat silikon (111) pada suhu penumbuhan yang bervariasi antara 625 °C -700 °C. Riset ini menekankan pada inkorporasi Mn terhadap parameter penumbuhan dan studi mengenai morfologi permukaan, sifat struktur dan sifat magnetik film GaN:Mn yang ditumbuhkan.

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 suhu penumbuhan yang lebih tinggi menghasilkan morfologi permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan film yang ditumbuhkan pada suhu 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 suhu 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/cm<sup>3</sup>) dan koersivitas magnetik yang paling rendah (180 Oe) sehingga cocok untuk aplikasi divais.

**Kata Kunci:** GaN:Mn, substrat silikon, metode PA-MOCVD, inkorporasi Mn morfologi permukaan, sifat struktur dan sifat magnetik

## Pendahuluan

Dalam dasa wara 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-volatile*, 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 *magnetic 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 suhu 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 suhu kamar.

Material baru yang kini banyak dikembangkan oleh para peneliti adalah material GaN:Mn, karena memiliki keunggulan dibandingkan dengan material

DMS lain yaitu suhu 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 suhu penumbuhan. Namun demikian, metode MOCVD termal ini memiliki kelemahan yaitu diperlukan suhu tinggi (850-1100°C) pada proses penumbuhannya. Suhu 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 dilakukan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan suhu penumbuhan MOCVD thermal. Dengan suhu 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 yang cukup 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*).

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. Dalam paper ini akan dibahas seberapa besar konsentrasi Mn dalam GaN:Mn pada parameter penumbuhan yang berbeda dengan metode PA-MOCVD di atas substrat silikon, serta morfologi permukaan, sifat struktur dan sifat magnetik film tipis yang ditumbuhkan tersebut.

## **Eksperimen**

Sistem MOCVD terdiri dari reaktor vertikal dari bahan *water-cooled stainless-steel* yang dilengkapi sel pemecah plasma. Kombinasi pompa *root blower* dan pompa *rotary vacuum* digunakan sebagai sistem pompa. Dengan menggunakan saluran plasma berdaya rendah (ASTeX), N- reaktif yang dihasilkan dari gas N<sub>2</sub> dialirkan menuju substrat. Plasma tersebut dibangkitkan oleh gelombang mikro 2,45 GHz pada daya 200 W. Suhu penumbuhan dimonitor menggunakan termokopel yang disisipkan di dalam pemanas (*heater*).

Proses penumbuhan film GaN:Mn di atas substrat silikon dimulai dengan penumbuhan lapisan penyangga GaN pada suhu 500 °C selama 10 menit. *Trimethylgallium* (TMGa) dan nitrogen UHP (99.99%) dan *cyclopentadienyl manganese tricarbonyl* (Cp<sub>2</sub>MnT) digunakan masing-masing sebagai sumber Ga dan N, dan Mn. Adapun gas hidrogen digunakan sebagai gas pembawa. Gas-gas sumber dimasukkan ke dalam *chamber* dari *inlet* yang terletak di atas reaktor. *Pneumatic valves* digunakan sebagai pengontrol gas yang mengalir melalui *vent*. Adapun *mass flow controller* (MFC) digunakan untuk menentukan jumlah mol TMGa, CpMnT dan N<sub>2</sub> yang masuk ke dalam *chamber*.

Penumbuhan film tipis GaN:Mn dilakukan selama 2 (dua) jam dengan melakukan variasi parameter penumbuhan, menyangkut suhu penumbuhan (625 – 700°C), aliran gas sumber TMGa ( 0,08 – 0,16 sccm), aliran gas sumber N (70 - 120 sccm) serta fraksi molar uap Mn/Ga (0,2 – 0,6) sementara tekanan reaktor dipertahankan pada 0,7 torr.

Komposisi atomik film yang telah ditumbuhkan dikarakterisasi dengan menggunakan *energy dispersive of X-ray* (EDX). Metode *X-ray diffraction* (XRD) menggunakan radiasi CuK<sub>α</sub> dan *scanning electron microscopy* (SEM) digunakan berturut-turut untuk menganalisis struktur kristal dan morfologi permukaan film. Adapun sifat magnetik pada suhu kamar diukur dengan menggunakan *vibrating sample magnetometer* (VSM) pada medan magnet dari 0-1 tesla.

## **Hasil dan Pembahasan**

Untuk memperoleh film tipis GaN:Mn dengan kualitas yang baik, dilakukan penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan cara memvariasikan parameter penumbuhan, meliputi suhu penumbuhan, rasio fluks V/III, dan fraksi molar Mn/Ga, seperti yang tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Film GaN:Mn yang telah ditumbuhkan dan harga parameter yang digunakan

No. Sampel	T <sub>g</sub> (°C)	Laju alir TMGa (sccm)	N <sub>2</sub> (sccm)	Temperatur Bubble CpMnT (°C)	Laju alir gas H <sub>2</sub> pembawa CpMnT (sccm)
#1.A	700	0,084	90	27	33,0
#2.A	680	0,084	90	40	20,0
#3.A	700	0,084	90	40	17,0
#5.A	680	0,084	90	40	6,5
#1.2	700	0,084	90	40	6,5
#2.2	700	0,080	120	40	13,0
#4.2	700	0,160	120	50	40,0
#5.2	680	0,160	120	50	40,0
#6.2	650	0,160	70	50	10,5
#7.2	625	0,080	70	50	5,5
#8.2	650	0,060	70	50	10,5
#9.2	625	0,060	70	50	10,5
#10.2	650	0,090	70	50	20,0
#11.2	650	0,120	70	50	24,0

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 EDS.

Tabel 2. Inkorporasi Mn dalam film GaN:Mn

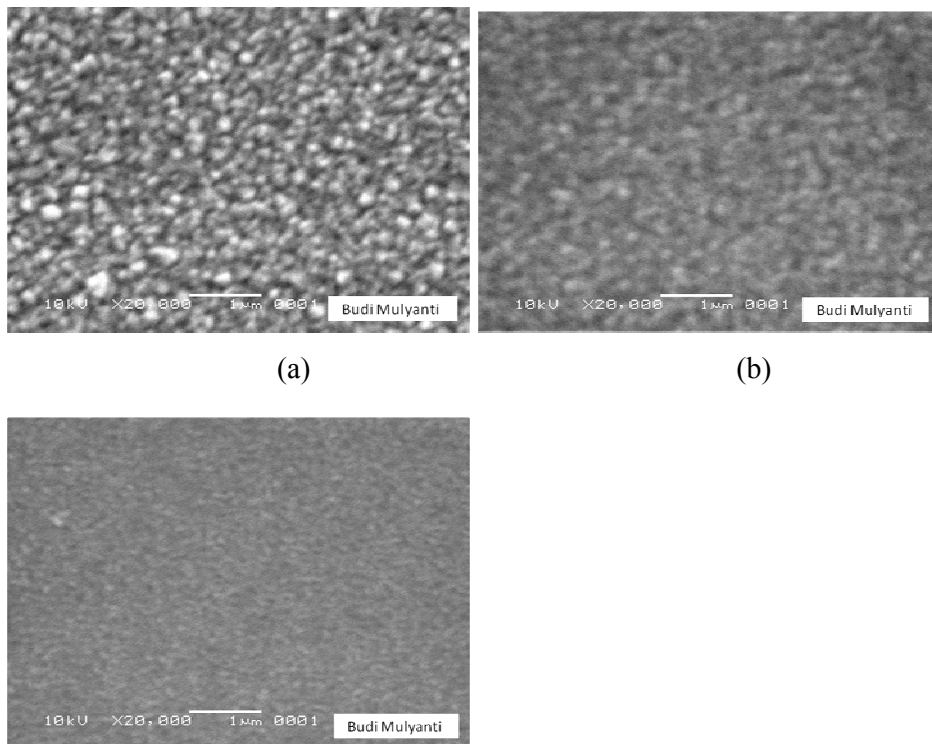
No. Sampel	T <sub>g</sub> (°C)	Rasio V/III	Fraksi molar Mn/Ga	Mn inkorporasi (%)
#2.A	680	1100	0,4	1,60
#2.2	700	1400	0,3	1,63
#6.2	650	450	0,4	0,20



#8.2	650	1100	0,4	1,28
#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 suhu penumbuhan, misalnya pada sampel #2.A dan #8.2 yang ditumbuhkan dengan suhu 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  $T_g = 680$  °C). Dengan demikian dapat diharapkan makin tinggi suhu, makin tinggi pula inkorporasi Mn. Sampel #9.2 yang ditumbuhkan pada  $T_g = 625$ °C, tidak terjadi inkorporasi Mn ke dalam GaN:Mn. Pada kasus ini untuk suhu yang lebih tinggi, terjadi dekomposisi sumber CpMnT yang lebih baik, yang pada akhirnya menyebabkan inkorporasi Mn yang lebih baik.

Adapun morfologi permukaan film tipis GaN:Mn yang dihasilkan dari karakterisasi SEM dengan perbesaran 20.000 x diperlihatkan pada Gambar 1.



(c)

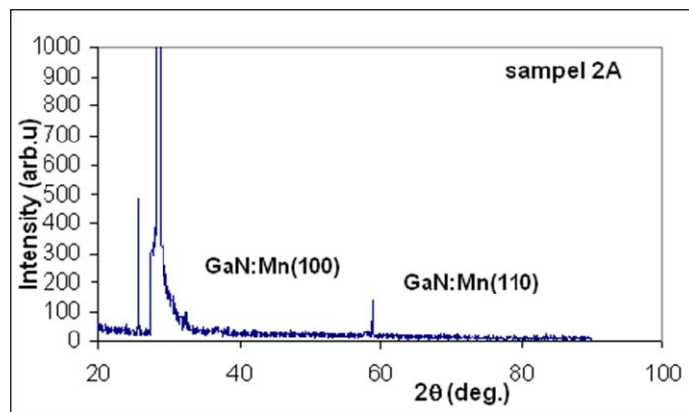
Gambar 1. Morfologi permukaan sampel (a) #2.A, (b) #2.2 dan (c) #10.2

Dari Gambar 1 (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 suhu yang berbeda yaitu masing-masing pada 680 °C dan 700 °C, nampak sampel #2.2 memiliki tingkat kekasaran yang lebih rendah. Hal ini kemungkinan karena suhu penumbuhan yang lebih tinggi menyebabkan mobilitas N reaktif menjadi lebih tinggi sehingga pada akhirnya menyebabkan kristalinitas dan morfologi permukaan yang lebih baik.

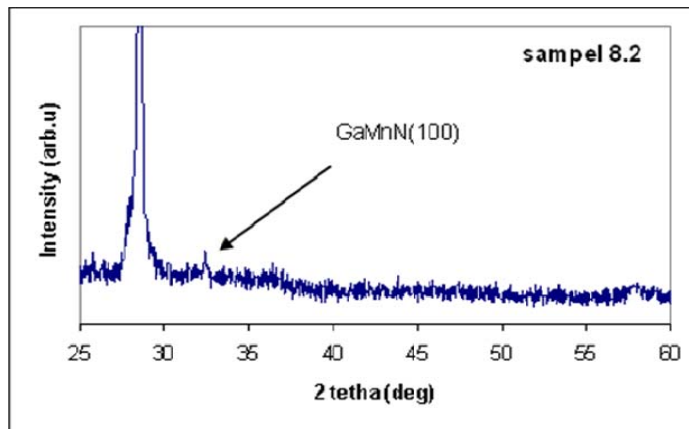
Adapun kaitan antara konsentrasi Mn dengan morfologi permukaan dapat dilihat pada Gambar 1 (a), (b), dan (c). Sampel #10.2 dengan konsentrasi Mn paling tinggi yaitu 1,76 % memperlihatkan tingkat kekasaran permukaan yang paling baik. Dengan demikian dapat dikatakan inkorporasi Mn tidak merusak kristalinitas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

Analisis XRD telah digunakan untuk karakterisasi struktur dan orientasi kristal sampel GaN:Mn. Kesulitan dalam penumbuhan epitaksi GaN:Mn terutama agar dihasilkan kristal *wurtzite* GaN:Mn dengan fase kristal tunggal. Gambar 2 adalah spektrum XRD untuk sampel #2.A yang ditumbuhkan pada suhu 700 °C dan konsentrasi Mn sebesar 1,63%, memperlihatkan adanya puncak-puncak difraksi pada sudut  $2\theta$  sebesar  $32,4^\circ$  dan  $57,6^\circ$  yang mengindikasikan adanya fase film GaN:Mn dengan orientasi (100) dan (110) atau polikristal GaN:Mn. Jika suhu penumbuhan diturunkan menjadi 650 °C akan muncul puncak difraksi tunggal seperti nampak pada sampel #8.2 (Gambar 3) dan #10.2 (Gambar 4). Sampel #8.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,28 % memperlihatkan puncak

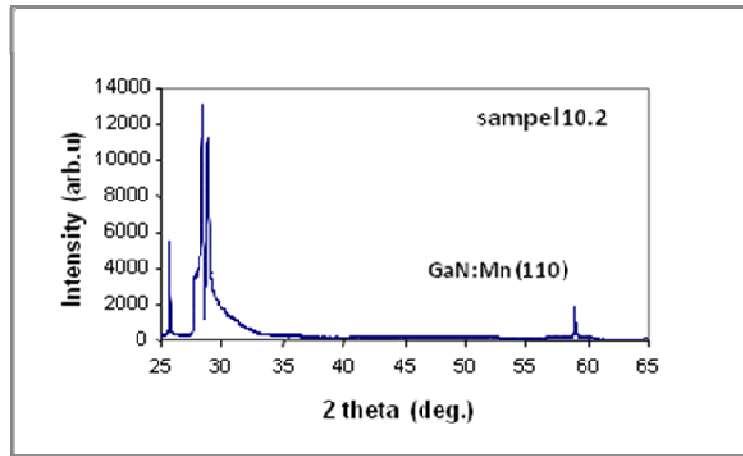
difraksi pada sudut  $2\theta$  sebesar  $32,4^\circ$  yang mengindikasikan adanya fase tunggal film GaN:Mn dengan orientasi (100). Sedangkan sampel #10.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,67% memperlihatkan puncak difraksi pada sudut  $2\theta$  sebesar  $57,6^\circ$  yang mengindikasikan adanya fase tunggal film GaN:Mn dengan orientasi (110). Dengan demikian kedua sampel yang ditumbuhkan dengan suhu  $650^\circ\text{C}$  memperlihatkan orientasi kristal tunggal, namun dengan orientasi yang berbeda. Sampel #8.2 dengan konsentrasi Mn yang lebih rendah memiliki orientasi kristal tunggal GaN:Mn (002) sejajar bidang substrat Si (111).



Gambar 2. Spektrum XRD untuk sampel #2A

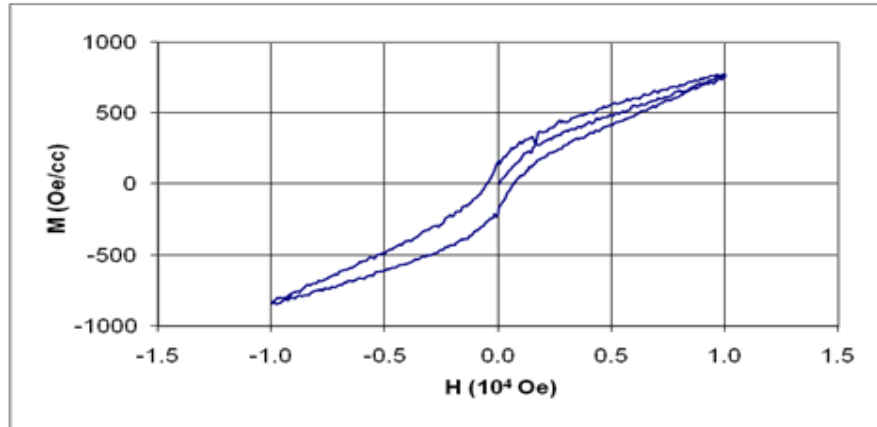


Gambar 3. Spektrum XRD untuk sampel #8.2



Gambar 4. Spektrum XRD untuk sampel #10.2

Untuk mengukur sifat kemagnetan film tipis yang ditumbuhkan, telah dilakukan pengukuran VSM pada suhu kamar untuk mendapatkan harga magnetisasi saturasi, koersivitas magnetik dan magnetisasi remanen. Pengukuran yang dilakukan terhadap semua sampel GaN:Mn menunjukkan adanya histeresis pada suhu kamar. Contoh kurva histeresis untuk sampel #2.A nampak pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva histeresis untuk sampel #2.A.

Dari semua sampel GaN:Mn yang diukur sifat kemagnetannya memperlihatkan kurva histeresis, yang menunjukkan bahwa film GaN:Mn yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik dengan suhu Curie ( $T_C$ ) sama atau di atas suhu 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 <sup>3</sup> )	Magnetisasi saturasi $M_s$ (Oe/cm <sup>3</sup> )	Koersivitas magnetik $H_c$ (Oe)
2.A	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 koersivitas 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 memiliki sifat magnetik yang paling baik

### **Kesimpulan**

Semikonduktor ferromagnetik GaN:Mn di atas substrat silikon telah berhasil ditumbuhkan dengan metode PA-MOCVD dengan suhu penumbuhan 625°C sampai dengan 700 °C. Dari pengukuran EDX, dihasilkan inkorporasi Mn ke dalam GaN:Mn sampai sebesar 1,76 % bergantung pada parameter penumbuhan yang digunakan, meliputi suhu penumbuhan, rasio V/III dan fraksi molar Mn/Ga. Dari hasil analisis SEM dapat disimpulkan sampel yang ditumbuhkan dengan suhu yang lebih tinggi cenderung memiliki morfologi permukaan yang lebih baik. Suhu 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. Dan dari analisis XRD, sampel #8.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,28 % memperlihatkan adanya puncak difraksi pada sudut  $2\theta$  sebesar  $32,4^\circ$  yang mengindikasikan adanya fase tunggal GaN:Mn dengan orientasi (100). Dan dari hasil pengukuran VSM, semua sampel GaN:Mn memperlihatkan adanya kurva histeresis, sehingga dapat dikatakan bersifat ferromagnetik pada temperatur

kamar. Sampel #2.2 dengan konsentrasi Mn sebesar 1,63% memperlihatkan harga magnetisasi remanen yang paling tinggi ( $330 \text{ Oe/cm}^3$ ) dan koersivitas magnetik yang paling rendah (180 Oe) dibandingkan dengan sampel GaN:Mn lainnya, sehingga cocok untuk aplikasi divais.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat (DP2M) - Depdiknas yang telah membiayai dana penelitian penulis yang berjudul “Penumbuhan Material DMS GaN:Mn dan Struktur-hetero GaN/GaN:Mn di Atas Substrat Silikon Dengan Metode PA-MOCVD untuk Aplikasi Divais MTJ” melalui Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Nomor: 014/SP2H/PP/DP2M/III/2008 Tgl. 6 Maret 2008

#### Daftar Pustaka

- AWSCHALOM, D.D., LOSS, D., dan SAMARTH, N. (Eds.) (2002): *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, Springer-Verlag Berlin, Germany
- DIETL, T., OHNO, H., MATSUKURA, F., CIBERT, J., dan FERRAND, D. (2000): Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors, *Science*, 287, 1019–1021
- OHNO, H., SHEN, A., MATSUKURA, F., OIWA, A., ENDO, A., KATSUMOTO, S., dan IYE, Y. (1996): (Ga,Mn)As: A New Diluted Magnetic Semiconductor Based on GaAs, *Applied Physics Letters*, 69, 3, 363-365
- OHNO, H. (1998): Making Nonmagnetic Semiconductors Ferromagnetic, *Science*, 281, 951-956
- 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
- SCHMIDT, G., GOULD, C., GRABS, P., LUNDE, A.M., RICHTER, G., SLOBODSKY, A. dan MOLEMKAMP, L.W. (2002): Spin Injection in The Non-Linear Regime: Band Bending Effects, *Condense Matter/0206347*, v1, 1-12
- ZORPETTE, G. (2001), *The Quest of Spin Transistor*, IEEE Spectrum, USA

