

SIFAT STRUKTUR SEMIKONDUKTOR FEROMAGNETIK GaN-Mn YANG DITUMBUHKAN DENGAN METODE PA-MOCVD

Budi Mulyanti^{1,2}, Mujamilah³, A. Subagio^{1,4}, F.S.Arsyad¹, Sukirno¹,
M. Barmawi¹, M. Budiman¹, dan P. Arifin¹

¹ *Kelompok Keahlian Fisika Material Elektronik - ITB
Ganesha 10, Bandung 40132*

² *Jurusan Pendidikan Teknik Elektro - UPI
Jl. Setiabudi 229, Bandung 40154*

³ *Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang*

⁴ *Jurusan Fisika, FMIPA - UNDIP
Jl. Prof. Sudarto SH, Tembalang, Semarang 50275*

ABSTRAK

SIFAT STRUKTUR SEMIKONDUKTOR FEROMAGNETIK GaN-Mn YANG DITUMBUHKAN DENGAN METODE PA-MOCVD. Semikonduktor feromagnetik film tipis GaN-Mn yang ditumbuhkan dengan metode *Plasma-Assited Metalorganic Chemical Vapor Deposition (PA-MOCVD)* di atas substrat safir bidang-c. Efek inkorporasi Mn dalam film tipis GaN-Mn terhadap sifat struktur dan magnetik akan dibahas dalam makalah ini. *Trimethylgallium (TMGa)*, nitrogen (N_2) dan *Cyclopentadienyl Manganese Tricarbonyl (CpMnTc)* masing-masing digunakan sebagai sumber Ga, N dan Mn, dan gas hidrogen digunakan sebagai gas pembawa untuk *TMGa* dan *CpMnTc*. Penumbuhan dilakukan dengan cara memvariasikan suhu penumbuhan, rasio fluks V/III dan fraksi molar Mn/Ga masing-masing dalam selang 625 °C sampai dengan 700 °C, 440 sampai dengan 1080, dan 0,1 sampai dengan 0,6. Pola difraksi sinar-X dari film tipis GaN-Mn yang ditumbuhkan pada suhu 650 °C memperlihatkan satu puncak GaN-Mn (0002) untuk konsentrasi Mn 6,4 % yang mengindikasikan bahwa film ini berorientasi kristal tunggal. Sementara pada suhu yang lebih tinggi ($T_g = 700^\circ\text{C}$) diperoleh fase kristal tunggal untuk film dengan konsentrasi Mn 3,2 %. Harga konstanta kisi dan *FWHM (Full-Width at Half Maximum)* dari film kristal tunggal sangat bergantung pada konsentrasi Mn. Hasil pengukuran magnetisasi film GaN-Mn menunjukkan perilaku histeresis pada suhu kamar. Harga momen magnetik per atom Mn tertinggi diperoleh sampel dengan konsentrasi Mn 2,5 %. Kenaikan konstanta kisi pada konsentrasi Mn di atas 2,5% bersama-sama dengan penurunan momen magnetik mengindikasikan bahwa harga solubilitas Mn maksimum mensubstitusi Ga dalam GaN-Mn adalah sebesar 2,5 %.

Kata kunci : Semikonduktor feromagnetik, GaN-Mn, PA-MOCVD, FWHM, histeresis

ABSTRACT

STRUCTURAL PROPERTIES OF GaN-Mn FERROMAGNETICS SEMIKONDUKTOR STRUCTURE GROWN BY PA-MOCVD METHOD. Ferromagnetic semiconductor GaN-Mn thin films studied in this paper were grown by plasma-assited metalorganic chemical vapor deposition (PA-MOCVD) on c-plane sapphire substrate. The effect of Mn incorporation into GaN-Mn thin films on their structural and magnetic properties are presented. Trimethylgallium (TMGa), nitrogen (N_2) and cyclopentadienyl manganese tricarbonyl (CpMnTc) were used as a source of Ga, N and Mn, respectively, while hydrogen gas was used as a carrier gas for both TMGa and CpMnTc. The effect of Mn incorporation into GaN:Mn thin films on their structural and magnetic properties are presented. The growth of GaN:Mn thin films were conducted at varied growth temperature in range of 625 °C to 700 °C, the V/III flux ratio in the range of 440 to 1080, and the Mn/Ga molar fraction in the range of 0.1-0.5. The XRD pattern of GaN:Mn thin films grown at 650 °C with Mn concentration ≤ 6.4 at.% Mn show only the (0002) reflection, demonstrating this film is highly orientated in a single orientation. While at higher growth temperature ($T_g = 700^\circ\text{C}$) a single phase crystal can be achieved in the sample with Mn concentration 3.2 at.% Mn. The lattice constant and FWHM (full-width at half maximum) of single phase films were found to vary with Mn concentration. The results of magnetization measurement of the grown films show hysteresis behavior at room temperature. The maximum value of magnetic moment per Mn atom was achieved by sample with 2.5 at.% Mn. The increase in lattice constant as the Mn concentration is increased beyond 2.5 at.% Mn accompanied by the decrease in magnetic moment indicating that the maximum solubility for complete Mn substitutionality in GaN:Mn thin film is 2.5 at.%.

Key words : Ferromagnetic semiconductor, GaN:Mn, PA-MOCVD, FWHM, hysteresis

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi yang sangat pesat dalam dekade terakhir ini ditunjang oleh perkembangan industri rangkaian terintegrasi *Integrated Circuit (IC)* dan industri penyimpanan data magnetik. Dalam upaya menggabungkan keunggulan karakteristik elektronik dan magnetik di atas, diperkenalkan suatu divais baru, yaitu divais *spintronik*, yang bekerja dengan cara memanfaatkan muatan dan *spin* elektron yang bergerak dalam induk semikonduktor (*semiconductor host*). Keunggulan divais ini meliputi *non-volatile* [1], laju pemrosesan data yang lebih tinggi dan ukuran divais yang lebih kecil [2]. Keunggulan lainnya adalah diperlukan konsumsi energi yang lebih kecil, karena energi yang diperlukan untuk mengubah arah *spin* lebih kecil dibandingkan dengan energi yang diperlukan untuk menggerakkan elektron di dalam medan listrik [3]. Beberapa struktur divais *spintronik* telah diusulkan oleh beberapa ahli antara lain *spin Light-Emitting-Diode (spin-LED)*, *spin Field Effect Transistor (spin-FET)* dan *spin qubit* untuk komputer kuantum.

Syarat utama untuk realisasi divais *spintronik* adalah material *host* haruslah bersifat feromagnetik pada suhu kamar dan memiliki efisiensi yang cukup tinggi ~ 100% untuk injeksi dan transport *spin* [4]. Dengan demikian diperlukan suatu material baru, yaitu DMS (*diluted magnetic semiconductor*) [5] atau semikonduktor feromagnetik [6] yang bersifat feromagnetik pada suhu kamar. DMS adalah semikonduktor yang didadahkan dengan beberapa persen logam transisi (ion-ion magnetik). Dalam *alloy* tersebut, fraksi stoikiometri (*stoichiometric fraction*) atom-atom sub-kisi golongan II atau III digantikan (disubstitusi) secara acak oleh atom logam transisi [6]. Ion magnetik logam transisi ini menyebabkan adanya momen magnetik *spin* yaitu *spin* elektron yang dimilikinya. Jika material feromagnetik fasa tunggal berhasil ditumbuhkan, maka material tersebut sangatlah potensial digunakan untuk injeksi *spin* pembawa [7].

Suatu terobosan baru dalam pencarian material DMS yang ideal untuk aplikasi divais *spintronik* [8] berdasarkan teori medan rata-rata Zener. Model *Dietl* tersebut memprediksikan bahwa material GaN-Mn dapat memiliki keteraturan feromagnetik pada suhu di atas 300 K jika diberi *doping* dengan 5% atom Mn dan kerapatan *hole* sebesar $3,5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$. Dari fakta eksperimental, material GaMnN ini telah berhasil ditumbuhkan dengan berbagai metode yaitu resublimasi atau sintesis *alloy* Ga/Mn untuk menghasilkan GaN-Mn dalam bentuk *bulk* [9,10]. Selain itu, juga dilaporkan penumbuhan mikrokristal GaN-Mn dengan metode *ammono thermal* [11,12]. Namun demikian semuanya memperlihatkan sifat paramagnetik atau feromagnetik dengan T_c yang jauh lebih rendah dari prediksi *Dietl*. Metode yang lain yaitu metode implantasi ion, dilaporkan material GaN-Mn dengan T_c yang

lebih tinggi namun masih jauh di bawah suhu kamar, yaitu ~ 250K [13].

Material GaN-Mn yang pertama kali dilaporkan memiliki keteraturan feromagnetik di atas suhu kamar adalah film tipis yang ditumbuhkan dengan teknik difusi (*solid state diffusion*) Mn ke dalam GaN [14,15]. Selain itu, juga dilaporkan material GaN-Mn dengan $T_c > 300$ K yang ditumbuhkan metode *Molecular Beam Epitaxy (MBE)* dengan suhu penumbuhan $T_g = 700$ °C sampai dengan 900 °C dengan konsentrasi Mn maksimum 9 % untuk dapat menghasilkan kristal tunggal [16-18].

Metode *Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)* selama ini telah diketahui sebagai metode yang optimal untuk penumbuhan paduan III-nitrida dengan kualitas yang baik. Dengan metode *MOCVD*, telah berhasil ditumbuhkan film tipis GaN-Mn dengan $T_c \sim 228$ K sampai dengan 520 K dengan $T_g = 850$ °C sampai dengan 1100°C dengan konsentrasi Mn maksimum 2,3 % [4] dan 1,5 % [19,20] dan momen magnetik per atom Mn maksimum masing-masing sebesar $3,4 \mu_B$ atom Mn dan 2,9.

Mengingat efek magnetik dalam DMS umumnya bergantung pada solubilitas elemen magnetik ke dalam semikonduktor *host* [6], maka untuk meningkatkan momen magnetik film tipis GaN-Mn diperlukan konsentrasi Mn yang lebih tinggi. Konsentrasi Mn yang lebih tinggi untuk menghasilkan fasa tunggal GaN-Mn ini dapat dicapai dengan suhu penumbuhan yang lebih rendah. Karena pada suhu yang tinggi akan terjadi disosiasi nitrogen sehingga sulit untuk mengontrol atom nitrogen, yang pada akhirnya akan mudah terbentuk fasa kedua selain GaN-Mn. Namun demikian seperti yang telah banyak dilaporkan, untuk menghasilkan film tipis GaN-Mn, *MOCVD* termal memerlukan suhu penumbuhan yang tinggi (850 °C sampai dengan 1100 °C).

Untuk mengatasi masalah tersebut, maka dilakukan penelitian berupa penumbuhan film tipis GaN-Mn dengan menggunakan metode *PA-MOCVD*, yang merupakan pengembangan dari metode *MOCVD* termal. Dengan metode *PA-MOCVD* ini diperlukan suhu penumbuhan yang lebih rendah (yaitu 625 °C sampai dengan 700 °C). Dengan metode *PA-MOCVD*, selain diharapkan dapat menghasilkan solubilitas Mn ke dalam GaN yang cukup tinggi, juga diharapkan dapat menghasilkan film tipis GaN-Mn dengan kualitas film yang baik. Kualitas film yang baik ditunjukkan dengan morfologi permukaan yang homogen, kualitas struktur berupa kristal dengan orientasi tunggal, dan memiliki mobilitas tinggi.

METODE PERCOBAAN

Setelah melakukan beberapa tahap pencucian, substrat safir bidang-c ditempatkan di dalam reaktor *MOCVD* vertikal yang dilengkapi dengan resonator plasma. Sistem pompa yang digunakan dalam reaktor

Tabel 1. Fasa kristal film GaN dan GaN-Mn yang ditumbuhkan.

No.Sampel	Tg (°C)	Rasio fluks V/III	Mn inkorporasi (%)	Struktur kristal
#1.A	700	1100	3,2	GaN:Mn (0002)
#2.A	680	1100	2,0	Mn ₃ GaN _{0,5} (110), GaN:Mn(0002) dan MnO ₂ (210)
#3.A	700	1100	2,5	GaN:Mn (0002)
#2.1	700	1400	1,9	MnO ₂ (211)
#3.1	700	750	6,4	GaN:Mn (0002), GaMn (321)
#7.1	625	1100	0	GaN (0002)
#8.1	650	1100	1,6	GaN:Mn (0002)
#9.1	625	1100	1,2	MnO ₂ (211)
#10.1	650	750	6,4	GaN:Mn (0002)
#11.1	650	580	1,4	GaN:Mn(0002)
#18.1	650	375	2,0	GaN:Mn(0002)
#1.B	650	750	0	GaN(0002)

MOCVD ini adalah kombinasi dari pompa *root blower* dan pompa vakum *rotary*. N- reaktif yang dihasilkan dari gas N₂ dialirkan menuju substrat melalui saluran plasma dengan daya rendah (ASTeX). Plasma tersebut dibangkitkan oleh gelombang mikro 2,45 GHz dengan daya 200 W. Untuk memonitor suhu penumbuhan, digunakan termokopel yang disisipkan di dalam pemanas (*heater*).

Sebelum penumbuhan film GaN-Mn, mula-mula ditumbuhkan lapisan penyangga GaN pada suhu 500 °C selama 10 menit. *Trimethylgallium* (TMGa) dan nitrogen dengan kemurnian yang sangat tinggi (99,99%) digunakan sebagai sumber Ga dan N, dan *cyclopentadienyl manganese tricarbonyl* (Cp₂MnT) digunakan sebagai sumber *doping* Mn. Penumbuhan dilakukan selama 2 (dua) jam dan ketebalan film yang dihasilkan antara 0,4 µm sampai dengan 0,6 µm.

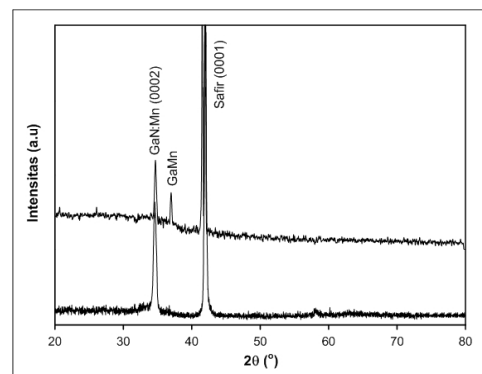
Inkorporasi Mn dalam GaN-Mn yang berbeda-beda diperoleh dengan cara memvariasikan kondisi penumbuhan, menyangkut suhu penumbuhan (625 °C sampai dengan 700 °C), aliran gas sumber TMGa (0,08 sccm sampai dengan 0,16 sccm), aliran gas sumber N (70 sccm sampai dengan 120 sccm) serta fraksi molar uap Mn/Ga (0,2 sampai dengan 0,6) sementara tekanan reaktor dipertahankan pada 0,7 Torr. Komposisi Mn dalam film GaN-Mn ditentukan melalui pengukuran *Energy Dispersive of X-Ray (EDX)*. *X-Ray Diffraction (XRD)* digunakan untuk menentukan kualitas kristal GaN-Mn. Untuk mengukur sifat magnetik bahan, digunakan *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)* dengan medan magnet 0 T sampai dengan 1 T pada suhu kamar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Masalah utama dalam penumbuhan epitaksi GaN-Mn adalah terutama agar terjadi inkorporasi Mn dan dihasilkan kristal *wurtzite* GaN-Mn dengan fasa kristal tunggal. Dari semua film yang berhasil ditumbuhkan dengan inkorporasi Mn tertentu, dari hasil

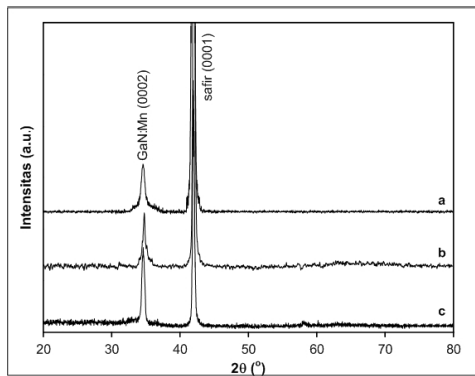
pengukuran XRD hanya beberapa sampel yang memperlihatkan fasa kristal tunggal (Tabel 1).

Dari Tabel 1, nampak bahwa konsentrasi Mn maksimum yang dapat menghasilkan kristal *wurtzite* fasa tunggal GaN-Mn(0002) untuk film yang ditumbuhkan dengan Tg = 650 °C adalah sebesar 6,4%, yaitu (sampel #10.1) dan sebesar 3,2 % pada Tg = 700 °C (sampel #1A). Pada Tg = 700 °C tersebut, dengan menaikkan konsentrasi Mn menjadi 6,4 % (sampel #3.1), nampak terjadi separasi fasa atau teramati fasa kedua selain GaN-Mn(0002). Hal ini kemungkinan besar terjadi karena koefisien penempelan nitrogen (*nitrogen sticking coefficient*) dan kesetimbangan tekanan uap nitrogen yang lebih tinggi untuk suhu yang lebih tinggi, yang menyebabkan penurunan konsentrasi nitrogen yang diperlukan untuk pembentukan GaN-Mn. Pengurangan konsentrasi nitrogen ini menyebabkan terjadinya fasa magnetik kedua berupa GaMn, sebagai tambahan fasa GaN-Mn (0002) [18], seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Harga konsentrasi maksimum untuk dapat menghasilkan kristal tunggal GaN-Mn dalam penelitian ini, jauh lebih tinggi dari pada yang telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya dengan metode MOCVD, yaitu 2,3 % [4], namun masih lebih rendah dibandingkan dengan metode MBE, yaitu sebesar 9% [3].

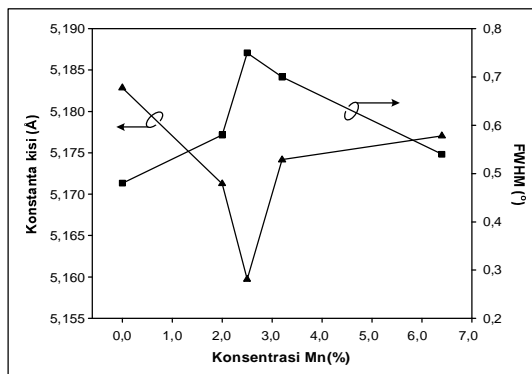


Gambar 1. Pola difraksi XRD(a) sampel #3.1 (Tg = 700 °C dan xMn = 6,4%) dan (b) sampel #10.1 (Tg = 650 °C dan xMn = 6,4%).

Gambar 2 adalah pola difraksi XRD film GaN-Mn dengan fasa tunggal, untuk sampel #1A ($x_{Mn} = 3,2\%$), #3A ($x_{Mn} = 2,5\%$) dan #10.1 ($x_{Mn} = 6,4\%$), yang memperlihatkan adanya pergeseran puncak, masing-masing pada 34,64, 34,73 dan 34,61 yang semuanya mengindikasikan struktur *wurtzite* fasa tunggal GaN-Mn(0002). Dengan analisis hasil pengukuran sampel GaN-Mn fasa tunggal, dapat diperoleh harga konstanta kisi dan harga *FWHM* (*Full-Width at Half Maximum*) film GaN-Mn. Kebergantungan harga konstanta kisi dan *FWHM* dari film GaN-Mn yang ditumbuhkan terhadap konsentrasi Mn dalam GaN-Mn, diperlihatkan pada Gambar 3. Mula-mula harga konstanta turun dengan adanya inkorporasi Mn ke dalam GaN, hingga harga konsentrasi Mn sebesar 2,5 %. Jika konsentrasi Mn terus diperbesar maka dapat terjadi inkorporasi interstisial (*interstitially incorporation*) yang mengakibatkan terjadinya kenaikan harga konstanta kisi. Atau bahkan terjadi separasi fasa atau fasa kedua. Munculnya fasa kedua dalam pola difraksi sinar-X diduga karena adanya kerusakan struktur (*structural faulting*) dalam film GaN-Mn [21].



Gambar 2. Pola difraksi XRD untuk sampel (a) 1A ($x_{Mn} = 3,2\%$), (b) 3A ($x_{Mn} = 2,5\%$), dan (c) 10.1 ($x_{Mn} = 6,4\%$).

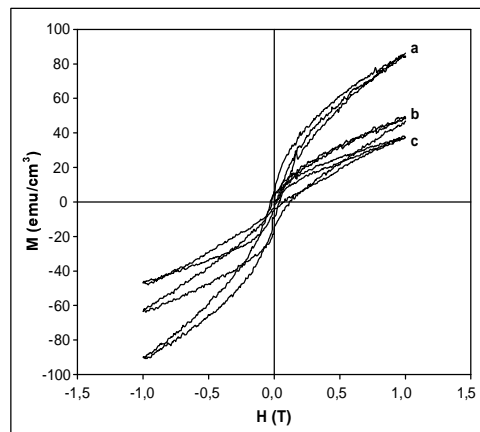


Gambar 3. Konstanta kisi dan *FWHM* sampel GaN:Mn sebagai fungsi konsentrasi Mn.

Sebagai informasi tambahan, nampak harga *FWHM* film yang ditumbuhkan mula-mula melebar dengan adanya inkorporasi Mn ke dalam GaN, dan *FWHM* terbesar terjadi pada sampel #3A dengan konsentrasi Mn sebesar 2,5 %. Untuk harga konsentrasi $> 2,5\%$,

terjadi penurunan *FWHM* mendekati *FWHM* sampel GaN. Data *FWHM* ini dapat memperkuat data konstanta kisi, yaitu penurunan konstanta kisi bersamaan dengan kenaikan *FWHM* mengindikasikan telah terjadi substitusi Mn ke dalam sub-kisi Ga. Dengan demikian solubilitas maksimum untuk substitusi Mn ke dalam sub-kisi Ga, terjadi pada konsentrasi Mn sebesar 2,5 %. Harga limit solubilitas ini di atas harga yang diperoleh peneliti lain dengan metode *MOCVD*, yaitu sebesar 1,5 % [19] dan 1,8 % [4].

Dari hasil pengukuran VSM pada suhu kamar dihasilkan sifat kemagnetan film GaN-Mn, meliputi harga magnetisasi saturasi, coersivitas dan magnetisasi remanen. Pengukuran yang dilakukan terhadap semua sampel GaN-Mn menunjukkan adanya hysteresis pada suhu kamar. Contoh kurva hysteresis untuk beberapa sampel nampak pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva hysteresis hasil pengukuran VSM untuk sampel (a) #3A (b) #10.1 dan (c) #18.1.

Semua sampel GaN-Mn kristal tunggal yang diukur sifat kemagnetannya memperlihatkan kurva hysteresis, maka dapat dikatakan bahwa film GaN-Mn yang ditumbuhkan bersifat feromagnetik dengan suhu *Curie* (T_c) di atas suhu ruang. Adapun harga-harga karakteristik magnetik untuk beberapa sampel dicantumkan di dalam Tabel 2.

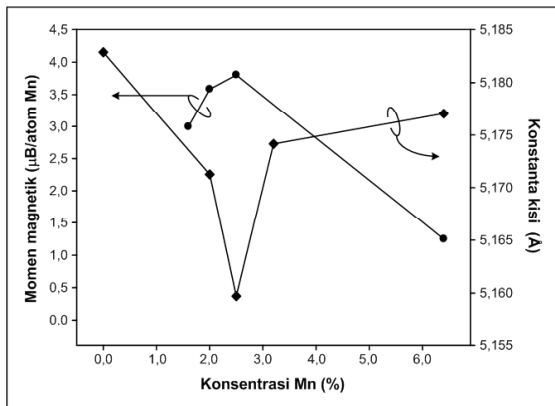
Untuk aplikasi divais, diinginkan suatu material yang memiliki koersivitas magnetik rendah dan magnetisasi remanen yang tinggi. Koersivitas menyatakan seberapa besar medan magnet balik yang diperlukan untuk mengembalikan magnetisasi ke harga nol setelah harga saturasi, sedangkan magnetisasi remanen menyatakan 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-volatility* material yang lebih baik, artinya data yang disimpan tidak mudah menguap/hilang sewaktu divais dimatikan. Harga koersivitas yang diperoleh dalam penelitian ini (300 Oe sampai dengan 780 Oe), sedikit lebih rendah dibandingkan dengan yang dilaporkan oleh peneliti lain

Tabel 2. Harga-harga karakteristik magnetik untuk beberapa sampel.

Sampel #	Konsentrasi Mn (%)	Magnetisasi remanens M_r (Oe/cm ³)	Magnetisasi saturasi M_s (Oe/cm ³)	Coersivitas Magnetik H_c (Oe)
2A	2,0	10,2	32	780
3A	2,5	27,5	40	370
8.1	1,6	11,7	20	300
11.1	1,4	10,4	25	500
10.1	6,4	12,0	35	430

dengan metode MOCVD dan difusi, namun cukup tinggi dibandingkan dengan metode ion implantasi [4]. Sedangkan harga magnetisasi remanens yang dihasilkan dalam penelitian ini (10,2 emu/cm³ sampai dengan 27,5 emu/cm³) hampir sama dengan yang dilaporkan dengan metode MBE [3].

Kebergantungan momen magnetik dari film GaN-Mn fasa tunggal sebagai fungsi konsentrasi Mn, diperlihatkan pada Gambar 5. Kenaikan momen magnetik mengindikasikan terjadinya substitusi Mn ke dalam kisi GaN yang memberikan kontribusi sifat feromagnetik. Kenaikan harga momen magnetik ini diikuti dengan penurunan konstanta kisi. Harga momen magnetik tertinggi (3,8) dicapai oleh sampel dengan dengan konstanta kisi terendah, yaitu sampel #3A dengan konsentrasi Mn sebesar 2,5 %. Dengan demikian hasil ini memperkuat hasil studi sifat struktur GaN-Mn, bahwa batas solubilitas untuk substitusi Mn ke dalam GaN adalah sebesar 2,5 %. Untuk konsentrasi Mn > 2,5 %, momen magnetik cenderung turun dan konstanta kisi cenderung naik, disebabkan adanya adanya inkorporasi Mn interstisial yaitu Mn yang tidak tersubstitusi (*non-substitutional Mn*) ke dalam matriks GaN. Hal ini memberikan kontribusi efek antiferomagnetik yang cukup dominan [3].



Gambar 5. Harga momen magnetik per atom Mn untuk film GaN:Mn fase tunggal sebagai fungsi konsentrasi Mn.

Perhitungan harga momen magnetik per atom Mn untuk masing-masing sampel, dilakukan dengan cara sebagai berikut:

- Harga magnetisasi saturasi (M_s) dari kurva *hysteresis* ditentukan, dalam satuan emu/cm³.
- Satuan emu/cm³ diubah menjadi/cm³, melalui konversi 1 emu = 1,078 x 10²⁰

- Ditentukan jumlah mol Mn dalam 1 cm³ volume sampel dengan mengasumsikan massa jenis dan berat molekul sampel Ga_{1-x}Mn_xN sama dengan massa jenis GaN (karena x sangat kecil)
- Ditentukan jumlah atom Mn dalam 1 cm³ volume sampel
- Dihitung momen magnetik (magnton Bohr) per atom Mn untuk sampel yang bersangkutan, dengan membagi hasil pada poin (ii) dengan poin (iv).

Harga momen magnetik per atom Mn pada suhu kamar untuk sampel GaN-Mn dengan solubilitas maksimum, yaitu sebesar 3,8 ini lebih tinggi dari yang telah dilaporkan oleh peneliti sebelumnya dengan metode MOCVD. Seperti yang dilaporkan bahwa momen magnetik masimum yang dihasilkan adalah sebesar 3,4 [4] sebesar 2,9 [19]. Hal ini disebabkan karena harga solubilitas maksimum Mn ke dalam GaN dalam penelitian ini juga lebih besar yaitu 2,5 %, sedangkan peneliti lain 1,8 % [4] dan 1,5 % [19]. Dan ternyata hasil ini sama dengan harga momen magnetik yang dihasilkan dengan metode MBE, yaitu sebesar 3,8 pada konsentrasi Mn sebesar 3 % [3,13].

KESIMPULAN

Semikonduktor Feromagnetik GaN-Mn telah berhasil ditumbuhkan dengan metode PA-MOCVD. Dibandingkan dengan metode MOCVD konvensional, metode ini memiliki keunggulan yaitu diperlukan suhu penumbuhan yang jauh lebih rendah. Dengan suhu penumbuhan tersebut, dapat dihasilkan film GaN-Mn dengan kualitas kristal tunggal sampai konsentrasi sebesar 6,4 % dan solubilitas maksimum Mn dalam GaN-Mn sebesar 2,5 %, lebih besar dari yang dihasilkan peneliti lain dengan metode MOCVD. Tingginya solubilitas Mn dalam mensubstitusi sub kisi Ga, menyebabkan tingginya momen magnetik per atom Mn dalam film GaN-Mn yaitu 3,8.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *The Asahi Glass Foundation Overseas Research Grant 2005* yang telah membiayai dana penelitian penulis yang berjudul *Study of Mn Incorporation into GaN-Mn Magnetic Semiconductor Thin Film Prepared by Plasma Assisted MOCVD*.

DAFTARACUAN

- [1]. ZORPETTE, G., *The Quest of Spin Transistor*, IEEE Spectrum, USA (2001)
- [2]. AWSCHALOM, D.D., LOSS, D., and SAMARTH, N. (Eds.), *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, Springer-Verlag Berlin, Germany, (2002)
- [3]. THALER, G.T., Growth and Characterization of Room Temperature Ferromagnetic Mn:GaN and Mn:InGaN for Spintronic Application, *Disertasi Program Doktor*, North Carolina State University, (2003) 39-40
- [4]. REED, M.L., Growth and Characterization of Temperature Ferromagnetic Mn:GaN and Mn:InGaN for Spintronic Applications, *Disertasi Program Doktor*, North Carolina State University, (2003) 137
- [5]. OHNO, H., SHEN, A., MATSUKURA, F., OIWA, A., ENDO, A., KATSUMOTO, S., and IYE, Y., *Applied Physics Letters*, **69** (3) (1996) 363-365
- [6]. OHNO, H., *Science*, 281 (1998) 951-956
- [7]. PEARTON, S.J., ABERNATHY, C.R., NORTON, D.P., HEBARD, A.F., PARK, Y.D., BOATNER, L.A., and BUDAI, J.D., *Materials Science and Engineering*, R **40** (2003) 137-168
- [8]. DIETL, T., OHNO, H., MATSUKURA, F., CIBERT, J., and FERRAND, D., *Science*, **287** (2000) 1019-1021
- [9]. GEBICKI, W., STRZESZEWSKI, J., KAMLER, G., SZYSZKO, T., and PODSIADLO, S., *Applied Physics Letters*, **76** (26) (2000) 3870-3872
- [10]. SZYSZKO, T., KAMLER, G., STROJEKA, B., WEISBROD, G., PODSIADLO, S., ADAMOWICZ, L., GEBICKI, W., SZCZYTKO, J., TWARDOWSKI, A., and SIKORSKI, K., *Journal of Crystal Growth*, **233** (2001a) 631-638
- [11]. ZAJAC, M., GOSK, J., KAMINSKA, M., TWARDOWSKI, A., SZYSZKO, T., and PODSIADLO, S., *Applied Physics Letters*, **79** (15) (2001a) 2432-2434
- [12]. ZAJAC, M., DORADZINSKI, R., GOSK, J., SZCZYTKO, J., LEFELD-SOSNOWSKA, M., KAMINSKA, M., TWARDOWSKI, A., PALCZEWSKA, M., GRZANKA, E., and GEBICKI, W. *Applied Physics Letters*, **78** (9) (2001b) 1276-1278
- [13]. THEODOROPOULOU, N. A., HEBARD, A. F., OVERBERG, M. E., ABERNATHY, C. R., PEARTON, S. J., CHU, S. N. G., and WILSON, R. G., *Applied Physics Letters*, **78** (22) (2001) 3475-3477
- [14]. REED, M.L., RITUMS, M.K., STADELMAIER, H.H., REED, M.J., PARKER, C.A., BEDAIR, S.M., and EL-MASRY, N.A., *Materials Letters*, **51** (2001a) 500-503
- [15]. REED, M.L., EL-MASRY, N.A., STADELMAIER, H.H., RITUMS, M.K., REED, M.J., PARKER, C.A., ROBERTS, J.C., and BEDAIR, S.M., *Applied Physics Letter*, **79** (21) (2001b) 3473-3475
- [16]. SONODA, S., SHIMIZU, S., SASAKI, T., YAMAMOTO, Y., and HORI, H., *Journal of Crystal Growth*, **237-239** (2002a) 1358-1362
- [17]. SONODA, S., HORI, H., YAMAMOTO, Y., SASAKI, T., SATO, M., SHIMIZU, S., SUGA, K., and KINDO, K., *IEEE Transaction Magnetics*, **38** (5) (2002b) 2859- 2862
- [18]. OVERBERG, M.E., THALER, G.T., FRAZIER, R.M., GILA, B.P., ABERNATHY, C.R., PEARTON, S.J., THEODOROPOULOU, N.A., ARNASON, S.B., HEBARD, A.F., and PARK, Y.D., *Mat. Res. Soc. Symposium Proceeding*, **690** (2002) F1.5.1-5.6
- [19]. KANE, M.H., ASGHAR, A., VESTAL, C.R., STRASSBURG, M., SENAWIRATNE, J., ZHANG, Z.J., DIETZ, N., SUMMERS, C.J., and FERGUSON, I.T., *SC. Sciences and Technology*, **20** (2005) 1.5-1.9
- [20]. STRASSBURG, M., SENAWIRANTE, J., CHRISTOPH, H., DIETZ, N., KANE, M. H., ASGHAR, A., SUMMERS, C. J., UTHE, H., AXEL, H., AZAMAT, D., WOLFGANG, G., and FERGUSON, I.T., *Matter. Res. Soc. Symp. Proc.*, **831** (2005) E9.5.1-6
- [21]. ZHANG, F., CHEN, N., LIU, X., LIU, Z., YANG, S., and CHAI, C., *Journal of Crystal Growth*, **252** (2003) 202-207
- [22]. 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., and HEBARD, A.F., *Journal of Physics : Condense Matter*, **16** (2004) R209-R245