

ABSTRAK

PENUMBUHAN FILM TIPIS SEMIKONDUKTOR FERROMAGNETIK GaN:Mn MENGGUNAKAN METODE *PLASMA ASSISTED METALORGANIC CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (PA-MOCVD)* DAN KARAKTERISASINYA

Oleh
Budi Mulyanti
NIM : 30201015

Subyek dari disertasi ini adalah penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan metode *plasma assisted metalorganic chemical vapor deposition (PA-MOCVD)*. Material *Gallium-Nitride Manganese (GaN:Mn)* adalah material semikonduktor ferromagnetik atau *diluted magnetic semiconductor (DMS)* yang sangat potensial untuk aplikasi divais spintronik. Divais spintronik ini memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan divais konvensional, yaitu laju pemrosesan data yang lebih tinggi, ukuran divais yang lebih kecil (*compact*), dan diperlukan konsumsi energi yang lebih kecil. Agar material DMS dapat diaplikasikan dalam divais spintronik, material tersebut harus memiliki temperatur Curie (T_C) lebih besar dari temperatur kamar, memiliki efisiensi injeksi spin yang tinggi ($\sim 100\%$) dan cocok dengan teknologi semikonduktor yang telah ada.

Dibandingkan dengan material DMS berbasis semikonduktor paduan III-V yang lain, secara teoretik material GaN:Mn ini memiliki keunggulan, yaitu T_C di atas temperatur kamar dan ideal untuk injeksi spin. Dari segi eksperimental, beberapa kelompok peneliti telah pula melaporkan penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan metode MOCVD, disamping metode-metode yang lain. Film tipis GaN:Mn yang dihasilkan dengan metode MOCVD, terbukti memiliki temperatur Curie di atas temperatur kamar.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah memahami proses fisika yang terjadi pada penumbuhan film tipis GaN:Mn dengan metode PA-MOCVD, memahami mekanisme inkorporasi Mn dalam GaN:Mn yang ditumbuhkan dengan PA-MOCVD, dan memperoleh prosedur yang tepat untuk memperoleh GaN:Mn dengan kualitas yang cocok untuk aplikasi divais spintronik.

Sebelum dilakukan penumbuhan, terlebih dahulu dilakukan simulasi numerik dengan bantuan perangkat lunak FEMLAB Ver.2.1 (2000) untuk memperoleh spesifikasi proses penumbuhan GaN:Mn dengan metode MOCVD, yang dapat digunakan sebagai acuan dalam penumbuhan film tipis GaN:Mn. Dalam simulasi ini digunakan *Trimethyl gallium (TMGa)*, *Cyclopentadienyl manganese tricarbonyl (CpMnT)* dan gas amonia masing-masing sebagai sumber Ga, Mn dan N. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa penumbuhan GaN:Mn dengan metode MOCVD thermal diperlukan temperatur penumbuhan yang tinggi, yaitu ≥ 900 °C. Film yang ditumbuhkan memiliki tingkat uniformitas yang lebih baik, jika substrat ditempatkan pada jarak radial antara 3,5 cm dan 4,5 cm dari pusat reaktor. Dari hasil simulasi juga diperoleh harga laju aliran sumber

yang dapat digunakan sebagai acuan untuk penumbuhan GaN:Mn dengan metode PA-MOCVD, yaitu 0,08 sccm, 70 sccm, dan 0,01 sccm masing-masing untuk sumber TMGa, NH₃ dan CpMnT.

Temperatur yang tinggi dalam penumbuhan GaN:Mn pada metode MOCVD tersebut sangat tidak menguntungkan, karena dapat menimbulkan disosiasi nitrogen yang pada akhirnya sangat sulit diperoleh film GaN:Mn fase tunggal dengan konsentrasi Mn yang tinggi. Sedangkan konsentrasi Mn yang tinggi dalam GaN:Mn fase tunggal sangat diperlukan untuk meningkatkan sifat magnetik film GaN:Mn. Untuk mengatasi hal tersebut, dalam penelitian ini digunakan metode PA-MOCVD, yang merupakan pengembangan metode MOCVD thermal. Di dalam sistem PA-MOCVD ini, sebagai sumber N digunakan radikal nitrogen yang dihasilkan oleh rongga gelombang mikro sebagai sel pemecah nitrogen (*cracking cell*), sehingga penumbuhan film tipis GaN:Mn dapat dilakukan pada temperatur yang jauh lebih rendah. Dengan temperatur penumbuhan yang lebih rendah ini, diharapkan film tipis GaN:Mn yang ditumbuhkan akan memiliki sifat magnetik yang lebih baik. Sifat magnetik tersebut ditunjukkan dengan T_C yang tinggi (di atas temperatur kamar) dan harga momen magnetik yang tinggi pula.

Serangkaian penumbuhan dan karakterisasi film tipis GaN:Mn telah dilakukan. Penumbuhan dilakukan di atas substrat Al₂O₃ (0001) dengan menggunakan TMGa, gas nitrogen UHP dan CpMnT masing-masing sebagai sumber Ga, N dan Mn. Inkorporasi Mn ke dalam GaN dikontrol dengan mengatur fraksi molar sumber Mn/Ga. Di samping itu, juga dikaji pengaruh rasio fluks V/III dan temperatur penumbuhan terhadap inkorporasi Mn, serta pengaruh inkorporasi Mn terhadap sifat magnetik, listrik dan optik film tipis GaN:Mn. Analisis film yang dilakukan meliputi karakterisasi sifat kekristalan dengan metode SEM, AFM, XRD/HR-XRD, karakterisasi magnetik dengan analisa VSM, dan karakterisasi listrik dengan metode Hall-van der Pauw serta sifat optik dengan analisis UV-Vis spektrofotometer.

Dari hasil penumbuhan sampel GaN:Mn dengan temperatur penumbuhan yang berbeda, laju penumbuhan tertinggi dicapai pada temperatur penumbuhan, $T_g = 680$ °C, sedangkan inkorporasi Mn tertinggi dicapai pada temperatur penumbuhan $T_g = 700$ °C. Rasio fluks V/III juga berpengaruh terhadap laju penumbuhan dan inkorporasi Mn. Pada rasio fluks V/III sebesar 600, terjadi laju penumbuhan tertinggi dan inkorporasi Mn terendah. Dengan demikian laju penumbuhan yang tinggi tidak diikuti dengan inkorporasi Mn yang tinggi. Inkorporasi Mn ke dalam GaN:Mn berbanding lurus dengan fraksi molar Mn/Ga, namun fraksi molar Mn/Ga ini tidak berpengaruh langsung terhadap laju penumbuhan.

Dari analisis XRD, film yang ditumbuhkan pada $T_g = 700$ °C memperlihatkan fase tunggal GaN:Mn (0002) bila konsentrasi Mn $\leq 3,2$ %. Sedangkan pada $T_g = 650$ °C fase tunggal teramati untuk film dengan konsentrasi Mn $\leq 6,4$ %. Hasil pengukuran XRD ini diperkuat oleh pengukuran *high resolution*-XRD. Kenaikan konsentrasi Mn dalam film GaN:Mn menyebabkan harga konstanta kisi turun dan kenaikan harga FWHM sampai harga konsentrasi sebesar 2,0 % pada $T_g = 650$ °C dan 2,5 % pada $T_g = 700$ °C. Penurunan konstanta kisi dan kenaikan FWHM ini memastikan terjadinya *solid solution*, dimana atom Mn mensubstitusi atom Ga dalam matriks GaN.

Kekasaran film yang diperlihatkan dari hasil citra SEM and AFM menunjukkan bahwa derajat kekasaran film bertambah dengan kenaikan inkorporasi Mn dan berhubungan langsung dengan laju deposisi. Laju deposisi yang tinggi menghasilkan ukuran butiran yang lebih kasar.

Analisis hasil pengukuran dengan VSM memberikan informasi bahwa semua sampel yang ditumbuhkan bersifat ferromagnetik pada temperatur kamar. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa film GaN:Mn yang ditumbuhkan memiliki temperatur Curie di atas temperatur kamar. Jangkauan harga koersivitas magnetik, magnetisasi remanen dan magnetisasi saturasi masing-masing adalah 300 - 800 Oe, 10,2 - 34,4 emu/cm³, dan 20 - 39 emu/cm³ bergantung pada konsentrasi Mn dan temperatur penumbuhan. Harga magneton Bohr tertinggi diperoleh oleh sampel dengan konsentrasi Mn sebesar 2,5 % yaitu 3,7 μ_B /atom Mn, pada $T_g = 700$ °C dan konsentrasi Mn sebesar 2,0 %, yaitu 3,1 μ_B /atom Mn, pada $T_g = 650$ °C. Data momen magnetik ini memperkuat hasil yang diperoleh dari perhitungan konstanta kisi dan FWHM, yaitu terjadi *solid solution* untuk konsentrasi Mn $\leq 2,5$ % pada $T_g = 700$ °C dan konsentrasi Mn $\leq 2,0$ % pada $T_g = 650$ °C. Diatas harga tersebut, penambahan konsentrasi Mn tidak menyebabkan kenaikan harga momen magnetik karena adanya kontribusi antiferromagnetik yang cukup dominan. Hal ini kemungkinan dapat disebabkan oleh *nanocluster*, presipitat atau interstisial Mn dalam film.

Dari pengukuran sifat listrik dengan metode Hall-van der Pauw diperoleh bahwa semua sampel GaN:Mn adalah tipe-*n* dengan konsentrasi pembawa muatan tertinggi $\sim 1,8 \times 10^{19}$ /cm³. Diperoleh pula, bahwa makin tinggi konsentrasi Mn dalam GaN:Mn, maka konsentrasi pembawa muatan makin rendah. Hal ini terjadi karena Mn berperan sebagai akseptor dan cenderung untuk mengkompensasi pembawa muatan (elektron). Penurunan konsentrasi ini diikuti oleh kenaikan mobilitas pembawa muatan dalam film dan kenaikan harga resistivitas. Dari analisis hasil UV-Vis diperoleh bahwa celah pita energi film GaN:Mn cenderung bertambah dengan bertambahnya konsentrasi Mn. Hal ini sesuai dengan pengukuran sifat listrik, yang menyatakan bahwa film bersifat lebih resistif dengan bertambahnya konsentrasi Mn.

Kata kunci: GaN:Mn, PA-MOCVD, divais spintronik, temperatur Curie (T_C), DMS, SEM, AFM, EDX, XRD, HR-XRD, konstanta kisi, FWHM, Hall-van der Pauw, UV-Vis, *solid solution*, VSM, kristal fase tunggal, kurva histeresis, magneton Bohr, momen magnetik.

