

FABRIKASI FILM TIPIS SEMIKONDUKTOR FEROMAGNETIK $\text{TiO}_2\text{-Co}$ DENGAN TEKNIK MOCVD DAN PENGAMATAN MAGNETORESISTANSI

Edy Supriyanto^{1,2}, Horasdia Saragih³, Agus Subagio^{1,4}, Maman Budiman¹,
Pepen Arifin¹, Moehammad Barmawi¹ dan Sukirno¹

¹Fisika Material Elektronika, Program Studi Fisika - ITB
Jl. Ganesha No. 10, Bandung

²Jurusan Fisika, F-MIPA, Universitas Negeri Jember
Kampus Tegalboto, Jl. Kalimantan III, Jember 68121

³Jurusan Fisika, F-MIPA - Universitas Pattimura
Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon

⁴Jurusan Fisika, FMIPA - UNDIP
Prof. Dr. Sudarto SH, Semarang 50239

ABSTRAK

FABRIKASI FILM TIPIS SEMIKONDUKTOR FEROMAGNETIK $\text{TiO}_2\text{-Co}$ DENGAN TEKNIK MOCVD DAN PENGAMATAN MAGNETORESISTANSI. Film tipis $\text{TiO}_2\text{-Co}$ telah berhasil ditumbuhkan di atas substrat Si dengan teknik MOCVD. Film tipis $\text{TiO}_2\text{-Co}$ bersifat feromagnetik pada suhu ruang, dan memiliki respon magnetik lunak (*soft magnetic*). Penggunaannya sebagai material injektor pada divais spintronika berstruktur $\text{TiO}_2\text{-Co/Si/TiO}_2\text{-Co}$, diinvestigasi. Karakteristik arus-tegangannya, tanpa dan dengan medan magnetik luar, dianalisa. Teramati adanya pengaruh magnetik terhadap resistansi divais yang disebut sebagai magnetoresistansi. Magnetoresistansi diperoleh bergantung pada besarnya tegangan bias yang diberikan pada divais. Penambahan tegangan ke suatu nilai tertentu dapat menghilangkan efek magnetoresistansi.

Kata kunci : Magnetoresistansi, spintronika, semikonduktor feromagnetik, $\text{TiO}_2\text{-Co}$

ABSTRACT

FABRICATION OF $\text{TiO}_2\text{-Co}$ FERROMAGNETIC SEMICONDUCTOR THIN FILMS BY MOCVD TECHNIQUE AND INVESTIGATION OF MAGNETORESISTANCE. $\text{TiO}_2\text{-Co}$ thin films have been deposited on Si substrates by MOCVD technique. The thin films are ferromagnetic at room temperature and have soft magnetic properties. The spintronics devices based on $\text{TiO}_2\text{-Co}$ with $\text{TiO}_2\text{-Co/Si/TiO}_2\text{-Co}$ structure were fabricated. Its current-voltage characteristics were investigated. It is found that the resistance of devices was influenced by external magnetic field. Resistance of devices was increased when the external magnetic field applied on devices (this resistance-magnetic dependence is called as magnetoresistance). On the other hand, the magnetoresistance of devices is depending on applied voltage. Magnetoresistance was decrease with increasing of applied voltage.

Key words : Magnetoresistance, spintronics, ferromagnetic semiconductors, $\text{TiO}_2\text{-Co}$

PENDAHULUAN

Pengembangan divais *spin* elektronika (*spintronika*) akhir-akhir ini mendapat banyak perhatian. Usaha untuk membuat divais yang hemat energi dan memiliki responsitas yang tinggi adalah tujuan yang ingin dicapai. Penggunaan bahan semikonduktor feromagnetik merupakan suatu solusi untuk meningkatkan efisiensi. Dan suatu teknik penumbuhan dipilih untuk menghasilkan divais berkualitas baik.

Proses kerja divais *spintronika* adalah memanfaatkan sifat magnetoresistansi yang disebabkan oleh polarisasi *spin* dari suatu elektron atau lubang (*hole*). Beberapa hal yang terlibat di dalamnya, meliputi:

proses injeksi *spin* ke suatu bahan semikonduktor, proses manipulasi dan atau penyimpanan *spin*, dan proses deteksi *spin* setelah keluar dari bahan semikonduktor [1]. Berbagai kajian teori dan eksperimen dilakukan terhadap salah satu atau lebih dari ketiga hal tersebut.

Penggunaan bahan logam feromagnetik sebagai injektor pada divais *spintronika* semikonduktor menghasilkan tingkat efisiensi yang sangat rendah [2]. Hal ini disebabkan karena perbedaan nilai konduktivitas yang sangat besar antara logam dengan semikonduktor, sehingga menurunkan tingkat polarisasi *spin* muatan

pembawa pada logam feromagnetik [3]. Bahan semikonduktor feromagnetik diusulkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, dan struktur hetero (Zn,Mn,Be)Se/(Zn,Be)Se/(Zn,Mn,Be)Se dibuat untuk pertama kali [4]. Resistansi antar-muka (*interface*) yang bergantung pada medan magnetik divais, diinvestigasi [5]. Didapatkan suatu peningkatan polarisasi *spin* muatan pembawa pada bahan (Zn,Mn,Be)Se yang mencapai hampir 90% [3].

Bahan semikonduktor (Zn,Mn,Be)Se bersifat feromagnetik di bawah suhu 30K [4]. Suhu operasi ini sangat jauh di bawah suhu ruang sehingga belum memenuhi kebutuhan praktis. Oleh karena itu, pencarian terhadap material baru terus dilakukan. Pada tahun 2001, ditemukan bahwa semikonduktor TiO₂ yang didadah dengan elemen Co, TiO₂-Co, menunjukkan sifat feromagnetik di atas suhu ruang [6]. Penemuan ini memposisikan material TiO₂-Co menjadi kandidat yang potensial untuk diaplikasikan. Penggunaan bahan TiO₂-Co dalam pembuatan divais *spintronika* menjadi suatu langkah yang harus dilakukan selanjutnya.

Film tipis TiO₂-Co telah ditumbuhkan dengan menggunakan teknik MOCVD. Respon feromagnetiknya telah diamati pada suhu ruang. Parameter optimum penumbuhan telah dilaporkan [7-9]. Dalam makalah ini, sebagai tindak lanjutnya, pengamatan awal magnetoresistansi sebagai efek injeksi *spin* dari divais yang dibangun dari film tipis TiO₂-Co dengan struktur TiO₂-Co/Si/ TiO₂-Co, dilaporkan.

METODE PERCOBAAN

Film tipis TiO₂-Co ditumbuhkan di atas substrat Si dengan menggunakan prekursor metalorganik titanium (IV) isopropoxide [Ti(OCH(CH₃))₂]₄] 99,99% yang berbentuk cair pada suhu ruang dengan titik leleh 20°C (Sigma Aldrich Chemical Co., Inc.) dan tris (2,2,6,6-tetramethyl-3, 5-heptanedionato) cobalt (III), 99%, Co(TMHD)₃ (Strem Chemical, Inc.) serta gas oksigen sebagai sumber O. Co(TMHD)₃ berbentuk serbuk. Bahan ini dilarutkan ke dalam pelarut tetrahydrofuran (THF, C₄H₈O) untuk memperoleh prekursor dalam bentuk cair dengan konsentrasi 0,1 mol per liter. Penumbuhan film dilakukan dengan teknik MOCVD [7-9]. Parameter penumbuhan yang digunakan dirangkumkan pada Tabel 1. Langkah-l langkah penumbuhan diterangkan pada laporan yang lain [7-9].

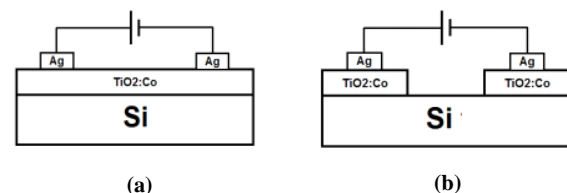
Film tipis TiO₂-Co yang ditumbuhkan diterapkan guna membangun divais sederhana berstruktur TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co. TiO₂-Co, yang adalah semikonduktor feromagnetik, berperan sebagai injektor dan detektor *spin*. Si yang adalah semikonduktor non-magnetik, berperan sebagai jalur konduksi (*conduction channel*), dimana *spin* akan dilintaskan. Logam Ag digunakan sebagai kontak ohmik yang ditumbuhkan dengan teknik evaporasi di atas

film tipis TiO₂-Co. Skema divais yang dibangun selengkapnya ditunjukkan pada Gambar 1. Ketebalan logam Ag sekitar 1 μm dengan luas (300x300) μm². Jarak antara injektor dan detektor TiO₂-Co adalah 500 μm yang lebih besar dari jarak pembalikan *spin* (*spin flip*) pada semikonduktor Si yang diperkirakan sekitar beberapa ratus nanometer [3].

Tabel 1. Parameter penumbuhan film tipis TiO₂-Co.

Parameter Penumbuhan	Nilai Besaran
Suhu <i>bubbler</i> prekursor TTIP (T _{b(Ti)})	50°C
Suhu substrat Si (T _s)	450°C
Tekanan uap TTIP (P _{b(Ti)})	260 Torr
Laju aliran gas Ar yang membawa uap TTIP (Ar _(Ti))	100 sccm
Tekanan uap Co(C ₁₁ H ₁₉ O ₂) ₃ (P _{b(Co)})	260 Torr
Laju aliran gas Ar yang membawa uap Co(C ₁₁ H ₁₉ O ₂) ₃ (Ar _(Co))	30 sccm
Laju aliran gas O ₂	60 sccm
Tekanan total penumbuhan (P _{total})	2,3x10 ⁻³ Torr

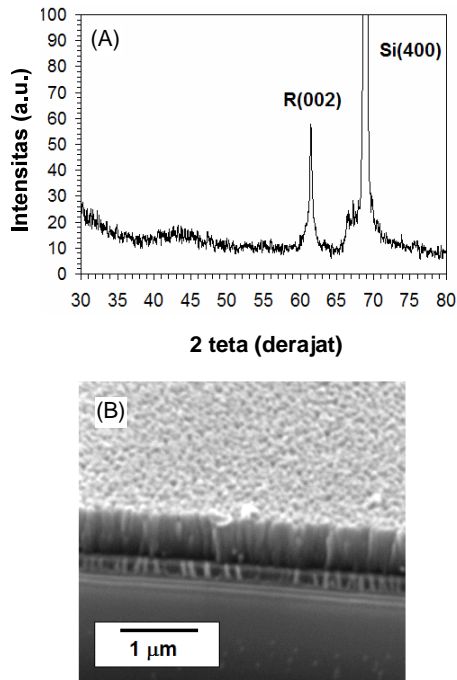
Persentase konsentrasi atom penyusun film diukur dengan *Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)* (Jeol JSM 6360LA). Struktur kristalnya diinvestigasi dengan *X-Ray Diffractometer (XRD)* dengan menggunakan radiasi Cu K_α (λ=1,54056Å) (Philips PW3710). Ketebalan dan morfologi butiran penyusun film diamati dari hasil potret *Scanning Electron Microscope (SEM)* (Jeol JSM 6360LA). Sifat magnetik film diuji dengan suatu sistem *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)* (Oxford). Dan karakteristik transport listrik film dan divais ditentukan dari hasil pengukuran *Hall* dengan metode empat titik *van der Pauw*.



Gambar 1. Skema divais spintronika sederhana berstruktur TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co yang dibangun pada penelitian ini. (a) struktur divais yang digunakan untuk menguji kontak ohmik logam Ag terhadap TiO₂-Co dan (b) struktur divais yang digunakan untuk mengamati fenomena magnetoresistansi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

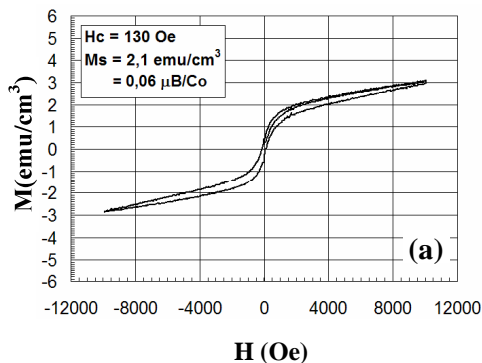
Pola XRD dan potret SEM film tipis TiO₂-Co yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 2. Film tumbuh membentuk susunan butiran yang memiliki bidang kristal rutil (002) (R(002)). Butiran-butiran berbentuk kolumnar yang tegak lurus terhadap permukaan substrat Si(100). Butiran dan batas-batasnya terlihat sangat jelas, yang secara tidak langsung menyatakan bahwa hubungan antar butir sangat kuat. Atom-atom yang terdapat pada batas antar butir telah dengan baik memposisikan diri



Gambar 2. Pola XRD (a) dan Potret SEM penampang lintang (b) film tipis TiO₂-Co yang ditumbuhkan pada suhu 450 °C.

sesuai dengan susunan atom butiran induknya. Butiran memiliki bentuk yang relatif seragam dan tidak ditemukan adanya penumbuhan butir yang abnormal. Kolumnar butir memanjang dari permukaan substrat sampai ke permukaan film. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi suatu proses gangguan, seperti hadirnya fasa-fasa pengotor, pada saat penumbuhan berlangsung. Film tumbuh dengan suatu kerapatan butir yang sangat tinggi sehingga permukaan film relatif sangat halus dengan tanpa adanya penumbuhan *kluster-kluster* tambahan di permukaan film.

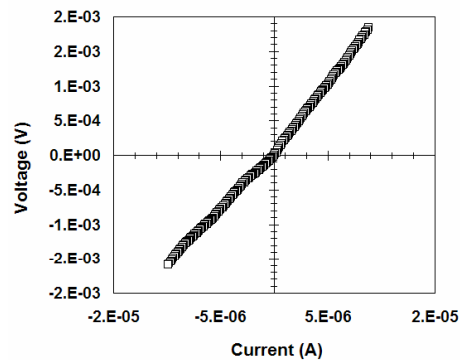
Untuk menginvestigasi besar kandungan Co di dalam film, pengukuran EDS kemudian dilakukan. Dari hasil pencacahan sinar-X yang diemisi oleh atom-atom Co yang terdapat di dalam film, diperoleh bahwa atom Co yang terdapat ke dalam material induk TiO₂ adalah 1,83%.



Gambar 3. Kurva histeresis magnetisasi film tipis TiO₂:Co dengan kandungan Co = 1,83% yang diukur pada suhu 300 K.

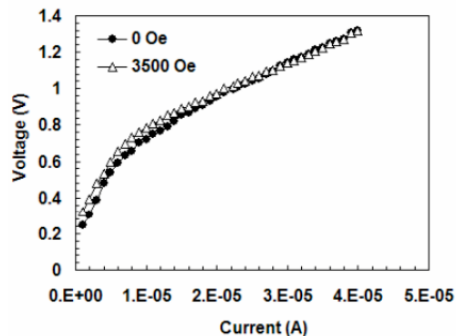
Selanjutnya, respon magnetik film diamati pada suhu ruang. Kurva histeresisnya ditunjukkan pada Gambar 3. Sifat feromagnetik teramati, dengan suatu nilai magnetik koersif (H_c) dan magnetisasi saturasi (M_s) masing-masing 130 Oe dan 2,1 emu/cm³. Sifat anisotropi magnetik film, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai H_c , tergolong relatif kecil (<10000 Oe) sehingga film tipis TiO₂-Co yang dihasilkan pada penelitian ini dikategorikan sebagai magnetik lunak (*soft magnetic*), yaitu suatu respon magnetik yang disyaratkan dalam pembuatan divais *spintronika* semikonduktor.

Film tipis TiO₂-Co dengan karakteristik magnetik dan kristal sebagaimana diterangkan di atas, diterapkan guna membuat divais *spintronika*. Kontak logam Ag digunakan dan sifat ohmiknya diuji. Pengujian sifat ohmik kontak logam Ag dilakukan dengan menggunakan struktur seperti ditunjukkan pada Gambar 1a. Karakteristik arus-tegangan diukur, dan kurvanya ditunjukkan pada Gambar 4. Teramati suatu hubungan yang linier antara arus dan tegangan, yang artinya bahwa Ag bersifat ohmik terhadap TiO₂-Co.



Gambar 4. Kurva arus-tegangan kontak Ohmik logam Ag terhadap film tipis TiO₂-Co.

Divais *spintronika* berstruktur TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co dengan kontak ohmik Ag, dibentuk (Gambar 1b). Karakteristik arus-tegangannya diukur pada suhu ruang dengan tanpa memberikan medan magnetik luar dan dengan medan magnetik sebesar 3500 Oe. Hasil kurvanya ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva arus-tegangan divais TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co yang diukur pada suhu ruang.

Divais, dengan struktur seperti diterangkan di atas, dimagnetisasi untuk mempolarisasi *spin* muatan pembawa di dalam semikonduktor feromagnetiknya. Selanjutnya, *spin* yang terpolarisasi tersebut diinjeksi ke dalam material semikonduktor non-magnetik Si. Pada bahan semikonduktor non-magnetik, elektron-elektron yang memiliki *spin-up* dan *spin-down* masing-masing berkontribusi setengah terhadap konduktivitas bahan [3]. Muatan pembawa dengan *spin* yang berbeda dianggap memiliki jalur konduksi yang berbeda. Ketika muatan pembawa, dengan *spin* terpolarisasi, diinjeksi ke dalam material semikonduktor non-magnetik, kedua jalur *spin* pada semikonduktor non-magnetik dilintasi oleh jumlah muatan pembawa yang berbeda. Karena setiap jalur memiliki konduktivitas yang sama, maka penginjeksian muatan pembawa dengan *spin* yang dipolarisasi akan menghasilkan peningkatan nilai resistansi divais. Peningkatan resistansi ini akan menjadi dua kali lebih besar dari resistansi normal apabila polarisasi *spin* muatan pembawa pada material semikonduktor magnetik mencapai 100% dan dengan jarak lintas konduksi lebih kecil dari panjang pembalikan *spin* (*spin flip*), sehingga hanya salah satu jalur saja yang digunakan.

Perubahan resistansi ini, di dalam kasus dimana jarak lintas konduksi *spin* lebih besar dari panjang *spin flip*, dinyatakan oleh [3]:

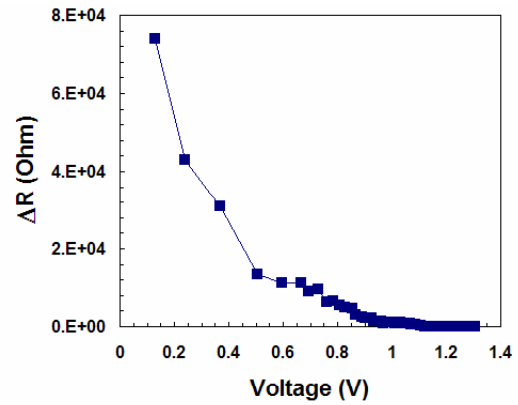
$$\frac{\Delta R}{R_{SNM}} = \beta^2 \frac{\lambda_{SM}}{\sigma_{SM}} \frac{\sigma_{SNM}}{x_o}$$

$$2 \frac{\lambda_{SM}}{\sigma_{SM}} \frac{\sigma_{SNM}}{\lambda_{SNM}} \left(1 + e^{-\frac{x_o}{\lambda_{SNM}}} \right) + 2 \frac{\lambda_{SM}}{\sigma_{SM}} \frac{\sigma_{SNM}}{x_o} e^{-\frac{x_o}{\lambda_{SNM}}} + 1 - \beta^2$$

dimana λ_{SM} , λ_{SNM} , σ_{SM} , σ_{SNM} adalah panjang *spin flip* dan konduktivitas masing-masing pada semikonduktor magnetik (SM) dan semikonduktor non-magnetik (SNM). x_o dan β masing-masing adalah jarak antara kontak SM dan derajat polarisasi *spin* pembawa muatan pada SM. Dengan kata lain, persamaan (1) menggambarkan efek magnetoresistansi akibat akumulasi *spin* pada salah satu jalur konduksi di dalam suatu semikonduktor non-magnetik. Akumulasi ini terjadi pada jarak sama dengan dan lebih kecil dari panjang *spin-flip*.

Dari hasil pengukuran karakteristik arus-tegangan divais berstruktur TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co pada suhu ruang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, teramati adanya fenomena magnetoresistansi sebagai efek injeksi *spin* terpolarisasi. Divais dimagnetisasi pada kuat medan H = 0 Oe dan H = 3500 Oe sejajar bidang substrat Si. Kuat medan H sebesar 3500 Oe digunakan untuk menjamin saturasi magnetisasi pada bahan TiO₂-Co (Gambar 3). Muatan pembawa yang *spinnya* telah terpolarisasi ini diinjeksi ke dalam semikonduktor non-magnetik Si dengan mengalirkan arus listrik melalui divais. Akumulasi muatan terjadi pada salah satu jalur konduksi.

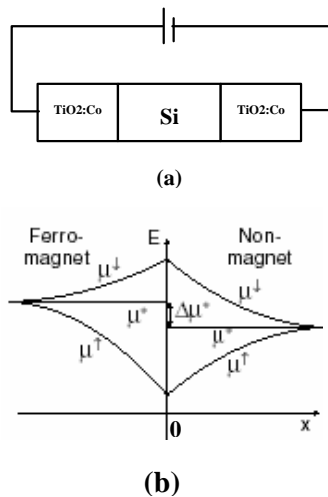
Untuk melihat lebih jelas fenomena efek injeksi *spin* pada salah satu jalur konduksi ini, kurva $\Delta R = R_{(H=3500)} - R_{(H=0)}$ diplot terhadap tegangan bias (V_{bias}) pada rezim linier dan non-liniernya seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Ketika tegangan bias diperbesar pada divais, penurunan magnetoresistansi secara tajam, teramati. Penurunan magnetoresistansi ke ½ kali nilai semula, terjadi pada nilai tegangan sekitar 0,3 Volt. Pada tegangan yang lebih tinggi, magnetoresistansi divais tidak selamanya bergantung pada kuat medan magnetik luar yang diberikan. Hal ini ditunjukkan oleh kenyataan bahwa tidak teramati adanya perubahan resistansi pada kasus H = 0 Oe dan H = 3500 Oe ketika tegangan bias yang diberikan melebihi 1 Volt. Fakta ini menunjukkan bahwa terjadi suatu pereduksian polarisasi *spin* yang diinjeksi sampai ke 0% ketika pada divais diberi tegangan bias di atas 1,1 Volt.



Gambar 6. Kurva perubahan resistansi R divais TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co yang diplot sebagai fungsi tegangan bias (V_{bias}). (Perhatikan, bahwa dibutuhkan tegangan sama dengan 1,1 Volt atau lebih untuk mengatasi perbedaan resistansi yang terjadi akibat akumulasi spin ke dalam salah satu jalur konduksi pada semikonduktor Si, sebagaimana diterangkan pada teks).

Penurunan magnetoresistansi yang tajam ini dapat difahami dengan mengkaji potensial elektrokimia (μ) muatan pembawa yang memiliki *spin-up* dan *spin-down* pada antar-muka (*interface*) persambungan SM-SNM.

Ketika arus dialirkan dari material SM (ambil kasus dimana konsentrasi muatan pembawa yang memiliki *spin-down* lebih besar dari pada yang memiliki *spin-up* pada material SM (lihat Gambar 7) sehingga derajat polarisasi *spin* (β) di bawah 100%) ke dalam material SNM, potensial elektrokimia muatan pembawa akan terpisah di *interface* berdasarkan *spinnya*. Pemisahan μ^{\uparrow} dan μ^{\downarrow} pada *interface* menjadi gaya penggerak (*driving force*) arus *spin* ke dalam material SNM. Penginjeksian *spin* ini menyebabkan terjadinya penurunan tegangan secara drastis sebesar V (drop tegangan) pada *interface* sebagai konsekuensi pengkonversian *spin* ke dalam material yang tidak bersifat feromagnetik. Drop tegangan ini terjadi sebagai akibat adanya perbedaan antara potensial elektrokimia



Gambar 7. (a) Idealisasi struktur satu dimensi TiO₂-Co/Si/TiO₂-Co; (b) Model potensial elektrokimia muatan pembawa spin-up dan spin-down pada interface persambungan SM/SNM, E adalah energi dan μ* adalah potensial elektrokimia [4].

rata-rata μ^* pada SM dan SNM. Besar beda energi oleh perbedaan potensial ini adalah $e\Delta V = \mu_{SM}^*(0) - \mu_{SNM}^*(0)$, yang selanjutnya menghasilkan resistansi $\Delta R = \Delta V/I$, dengan e dan I masing-masing adalah muatan elektron dan arus. Untuk memenuhi syarat kekekalan muatan pada interface, ΔV harus dikompensasi melalui ikatan pita energi, yang sangat kuat khususnya pada saat arus yang dialirkan diperbesar. Kondisi ini menjadikan ΔR sangat bergantung pada besarnya arus yang mengalir berkurang dengan naiknya arus.

KESIMPULAN

Film tipis TiO₂ yang dididat dengan elemen Co, TiO₂-Co, telah ditumbuhkan di atas substrat Si(100) dengan teknik MOCVD. Film tipis yang dihasilkan bersifat feromagnetik pada suhu ruang. Berdasarkan hasil respon magnetiknya, film tipis TiO₂-Co memiliki sifat magnetik lunak (*soft magnetic*) sebagaimana disyaratkan dalam pembuatan divais *spintronika* semikonduktor. Keberhasilan menumbuhkan film tipis TiO₂-Co, dilanjutkan kepada penerapannya untuk mengkonstruksi divais *spintronika* sederhana berstruktur TiO₂:Co/Si/TiO₂-Co. Dari hasil pengukuran karakteristik arus-tegangan teramati adanya efek injeksi *spin* terpolarisasi (fenomena magnetoresistansi). Resistansi divais bergantung pada medan magnetik luar. Resistansi divais lebih besar pada saat medan magnetik bekerja pada injektor. Hal ini disebabkan oleh peristiwa akumulasi muatan pembawa yang didasarkan pada *spinnya* ke dalam salah satu jalur konduksi yang terdapat pada semikonduktor non-magnetik. Kebergantungan resistansi terhadap medan magnetik luar terjadi pada nilai tegangan bias di bawah 1 Volt. Penambahan tegangan bias, yang selanjutnya menambah besarnya arus yang

mengalir pada divais, menyebabkan ikatan pita energi pada interface persambungan SM/SNM semakin kuat, sehingga mengurangi nilai resistansi. Sifat magnetoresistansi divais menjadi hilang ($\Delta R=0$) pada saat tegangan bias melebihi 1,1 Volt. Dari data-data sebagaimana diperoleh pada penelitian ini, telah berhasil dibuat suatu divais *spintronika* sederhana yang berbasis pada material TiO₂-Co yang dapat beroperasi pada suhu ruang. Adanya efek injeksi *spin* yang terpolarisasi telah teramati. Hal ini memberi harapan terhadap pengwujudan pembuatan divais *spintronika* ke arah aplikasi praktis.

DAFTARACUAN

- [1]. SCHMIDT, G., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38** (2005) R107
- [2]. SCHMIDT, G., FERRAND, D., MOLENKAMP, L.W., FILIP, A.T. and VAN WEES, B.J., *Phys. Rev. B*, **62** (2000) R4790
- [3]. AWSCHALOM, D.D., LOSS, D. and SAMARTH, N., *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, (2002)
- [4]. SCHMIDT, G., GOULD, C., GRABS, P., LUNDE, A.M., RICHTER, G., SLOBODSKYY, A. and MOLENKAMP, L.W., *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 226602-1
- [5]. SCHMIDT, G., RICHTER, G., GRABS, P., FERRAND and MOLENKAMP, L.W., *Phys. Rev. Lett.*, **87** (2001) 227203-1
- [6]. MANIVANNAN, A., SEEHRA, M.S., MAJUMDER, S.B. and KATIYAR, R.S., *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 111
- [7]. SARAGIH, H., ARIFIN, P., and BARMAWI, M., Growth of Oxide Semiconductor Ferromagnetic TiO₂:Co Thin Films on Si(100) Substrates by MOCVD Method and Its Characterizations, 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies 2005, Singapore (2005)
- [8]. SARAGIH, H., ARIFIN, P., dan BARMAWI, M., *Jurnal Matematika dan Sains*, **9** (4) (2004) 301
- [9]. SARAGIH, H., ARIFIN, P., dan BARMAWI, M., *Jurnal Matematika dan Sains*, **9** (3) (2004) 263