

PENGAMATAN EFEK GIANT MAGNETORESISTANCE PADA MULTILAYER SI(111)/CO/CU UNTUK APLIKASI SENSOR MEDAN MAGNET

Tri Mardji Atmono, Yunanto, Eko Yudho Pramono

PSTA-BATAN

Jl. Babarsari Po Box 6101 Ykbb

trimardji-A@batan.go.id

Eko Yudho Pramono

PSTBM - BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang

ABSTRAK

PENGAMATAN EFEK GIANT MAGNETORESISTANCE PADA MULTILAYER Si(111)/Co/Cu UNTUK APLIKASI SENSOR MEDAN MAGNET. Telah dilakukan preparasi dan karakterisasi sistem lapisan tipis multilayer dari bahan logam peralihan yang bersifat magnetik Co dan logam konduktor Cu, membentuk sistem lapisan tipis Si(111)/Co/Cu. Sistem lapisan tipis tersebut harus menunjukkan gejala GMR (Giant Magnetoresistance) yang optimal, dan memiliki sifat in-plane anisotropy, yang dapat diaplikasikan sebagai komponen utama sensor medan magnet. Preparasi lapisan multilayer dilakukan dengan metode sputtering pada frekuensi radio 13,56 MHz, sedangkan karakterisasi meliputi kandungan unsur menggunakan EDX, SEM, sifat magnetisasi/kurva histeresis pada arah EA dan HA, serta pengukuran tahanan listrik yang merupakan realisasi efek GMR. Multilayer tersebut menunjukkan gejala GMR yang cukup signifikan sekitar 20% pada medan luar sampai dengan 2500 gauss. Beberapa lapisan tipis memiliki efek GMR bila tahanan listrik awal (R_0) berada pada orde 20 - 40 Ω , sedangkan pada $R > 50$ ohm pada umumnya tidak menunjukkan efek GMR yang signifikan. Untuk aplikasi sebagai sensor medan magnet, maka secara teori telah didapatkan daerah kurva yang linier, diperoleh pada medan rendah sekitar 1000 gauss, serta syarat in-plane anisotropy yang terpenuhi.

Kata kunci : lapisan tipis, GMR, sensor magnet, hamburan elektron, in-plane anisotropy

ABSTRACT

MEASUREMENT OF GIANT MAGNETORESISTANCE ON THE MULTILAYER Si(111)/Co/Cu FOR THE APPLICATION AS SENSOR OF MAGNETIC FIELD. The preparation and characterization of the system multilayer based on magnetic transition metal Co and metallic conductor Cu, in the form of thin film system Si(111)/Co/Cu has been done. The desired multilayer should has GMR effect, and also magnetic in-plane anisotropy, that can be applied as main component of magnetic field sensor. Preparation has been carried out by means of sputtering method at 13.56 MHz, followed by characterization by using EDX, SEM, magnetic measurement/hysteresis curve in the direction of EA and HA, as well as the the important measurement of GMR. The best multilayer showed a significant GMR effect, i.e 20% by the applying magnetic field up to 2500 gauss. We have also some thin films with initial electrical resistance in the order of 20 - 40 Ω , they showed in general a GMR effect. On the other hand, the multilayer having resistance > 50 Ω showed a small effect. For the application as magnetic field sensor it was found the linear area of GMR effect in the low field of 1000 gauss, as well as the condition of in-plane anisotropy that has been fulfilled.

Keywords : thin film, GMR, magnetic sensor, electron scattering, in-plane anisotropy

PENDAHULUAN

Preparasi bahan baru dalam bentuk lapisan tipis (*thin film*) menggunakan teknik *sputtering* merupakan salah satu cabang *material science* (ilmu bahan) dengan keunggulan aplikasi yang beragam, karena sifat fisika dan kimia dari lapisan tipis yang bisa dikontrol ataupun dioptimasi melalui parameter

sputtering. Salah satunya adalah untuk aplikasi dalam bidang sensor magnet. Dengan memanfaatkan efek perubahan tahanan listrik dari lapisan tipis oleh adanya medan magnet luar, maka medan magnet tersebut bisa diukur dengan cara kalibrasi resistansi sebagai fungsi medan pada daerah linier.

Giant Magnetoresistance (GMR) adalah efek perubahan tahanan listrik suatu bahan penghantar

(magnetik/non magnetik) oleh adanya medan magnet luar. Gejala/efek yang tampaknya sangat sederhana ini ternyata tidak mudah untuk dimengerti, karena melibatkan interaksi *exchange coupling* serta teori listrik dan magnetik yang sangat kompleks^[1]. Aplikasi dari gejala ini antara lain adalah untuk pengukuran medan magnet, sebagai *head* pada sistem *data storage*^[2], pengukuran putaran mesin dll. Dalam hubungannya dengan logam peralihan yang bersifat magnetik dan sekaligus sebagai penghantar, efek dari GMR memegang peranan yang sangat penting karena perubahan tahanan listrik yang relatif besar, terutama pada *permalloy* (3 - 20%). Namun pelaksanaan teknis untuk aplikasi magnet tidaklah mudah, dalam hal ini diperlukan lapisan yang dibuat (preparasi, deposisi) secara khusus karena harus menghasilkan lapisan tipis dengan sensitivitas yang tinggi pada medan rendah.

Pada sistem lapisan ganda atau *multilayer*, elektron dengan *spin up* akan diteruskan oleh lapisan dengan arah magnetisasi vertikal ($\mathbf{M}\uparrow$), sehingga *mean-free-path* akan bertambah, tetapi akan dihamburkan oleh lapisan dengan arah magnetisasi yang berlawanan ($\mathbf{M}\downarrow$). Gejala demikian akan menimbulkan efek perubahan tahanan listrik karena muatan penghantar terhamburkan “bolak-balik” di dalam sistem lapisan tipis, dan hanya sebagian kecil saja yang diteruskan, sehingga gejala GMR tersebut akan maksimal bila sistem lapisan saling antiparalel (*antiferromagnetic-coupling*)^[1]. Realisasi dari GMR tersebut, yang bisa diaplikasikan sebagai sensor magnet, akan teramati nyata dalam suatu *spin-valves*. Sistem ini tersusun dari lapisan ferromagnetik FM (contohnya Fe, Ni, dan *compound*-nya) yang terikat oleh lapisan antiferromagnetik AFM (FeO, NiO) serta lapisan FM sebagai *free layer* yang dipisahkan melalui *spacer* (Cu, Ag) Beberapa lapisan *spin-valves* bisa digabung untuk membentuk *multilayer* agar diperoleh efek GMR yang besar. Untuk teknik sputtering, sistem ini hanya bisa dibuat dengan parameter tertentu saja, terutama diperlukan UHV (*ultra high vacuum*) dan tegangan *self-bias*, tekanan argon dan *flow rate* oksigen (pembentukan AFM) untuk mendapatkan *high purity thin film*^[2]. Oleh adanya “perlakuan” irradiasi ataupun implantasi dengan menggunakan ion-ion Al, He, Y, sifat magnetik, *exchange coupling* antara lapisan AFM/FM dan juga sifat GMR dapat dimanipulasi sedemikian sesuai dengan tujuan aplikasi^[3,4].

Hamburan spin yang terjadi dalam material magnetik adalah hamburan *spin flip* (*spin-flip scattering*) dan hamburan potensial (*potential scattering*)^[3]. Kedua hamburan tersebut menyebabkan perbedaan jumlah rapat keadaan (*state density*) elektron konduksi di kedua “kanal” *spin up* dan *spin-down*. Pengotor non magnetik yang “ditanam” melalui proses implantasi dapat memberikan sumbangan pada resistansi, karena akan menimbulkan hamburan

potensial pada elektron konduksi. Oleh karena kontribusi terbesar transport arus listrik pada logam adalah elektron-elektron pada daerah energi Fermi E_F .

Parameter yang menentukan adalah rapat keadaan (*state density*) sebagai fungsi dari tenaga^[4]. Pergeseran dari pita s pada umumnya diabaikan karena pengaruhnya yang tidak begitu signifikan terhadap *occupations number*. Bila orientasi dari spin adalah parallel terhadap magnetisasi maka terjadi pergeseran pita d ke arah tenaga yang lebih rendah, sedangkan orientasi antiparalel menyebabkan pergeseran ke tenaga yang lebih tinggi. Dengan demikian terjadi perubahan yang besar pada *occupations-number* pada daerah tenaga Fermi E_F , ditandai dengan perubahan bentuk/form dari pita d , sehingga tentu saja akan mengubah sifat konduktivitas dari logam. Perubahan *state density* tersebut oleh adanya hamburan akibat ion pengotor melalui proses implantasi juga akan memberikan pengaruh positif pada efek GMR.

Penelitian lapisan tipis yang bersifat magnetik dan non magnetik beserta aplikasinya telah sangat pesat kemajuannya^[2]. Salah satunya adalah untuk aplikasi dalam bidang sensor magnet. Sebelum ditemukannya lapisan tipis magnetik dengan sifat GMR, pengukuran medan magnet dilakukan dengan menggunakan batang semi konduktor kristal hall, dengan menggunakan prinsip gaya Lorentz yang besarnya adalah sebanding dengan kuat medan. Sensor magnet semacam ini tidak praktis karena harus menggunakan sumber arus, dan juga ketepatannya tidak bisa diandalkan karena adanya interaksi antara arus dan medan. Bila magnetisasi lapisan tipis ditentukan oleh medan luar, maka lapisan tipis magnetik yang memiliki sifat GMR bisa difungsikan sebagai sensor medan magnet lewat pengukuran tahanan listrik.

Dua mekanisme/proses untuk mengukur/menentukan medan luar adalah bahwa medan terpasang menentukan arah dan besar magnetisasi *thin film* dan kemudian magnetisasi menentukan besarnya resistivitas/resistansi. Berdasarkan teori *scattering*, elektron dengan *spin up* akan diteruskan oleh lapisan dengan arah magnetisasi vertikal, sehingga *mean-free-path* akan bertambah, tetapi akan dihamburkan oleh lapisan dengan arah magnetisasi yang berlawanan. Gejala demikian akan menimbulkan efek terhadap tahanan listrik karena muatan penghantar terhamburkan “bolak-balik” di dalam sistem lapisan tipis, sebagian kecil saja yang diteruskan. Efek GMR adalah besar bila sistem lapisan saling antiparalel (*antiferromagnetic-coupling*)^[3]. Kemungkinan akan bertambah apabila digunakan Si(100) sebagai substrat dan menggunakan Tantalum sebagai lapisan penutup. Realisasi dari GMR tersebut akan teramati nyata dalam suatu sistem *pseudo/pseudo spin-valves*^[3].

Dalam suatu sistem *pseudo-spin valves*, dikenal dua besaran, yaitu gaya koersitif (contohnya pada lapisan NiFe) dan *H-pinning* dari NiFe yang terikat pada lapisan antiferromagnetik (misalnya NiO). Sistem ini hanya bisa dibuat dengan parameter sputtering tertentu saja dan stabil pada daerah temperatur yang juga tertentu. Jadi oleh sebab timbulnya perubahan tahanan akibat adanya medan luar, maka sistem tersebut bisa diaplikasikan sebagai sensor magnet tanpa menggunakan arus seperti pada metoda lama Hall, terutama untuk pengukuran medan kecil (beberapa Oe sampai puluhan Oe), tergantung dari daerah linearitas. Kemungkinan sensitivitas dari sensor magnet tersebut akan bisa dinaikkan dengan cara implantasi atau iradiasi pada sistem *pseudo-spin-valves* dan juga pada sistem *multilayer*^[3].

Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan sistem lapisan tipis yang tersusun dari lapisan penghantar non magnetik Cu yang berfungsi sebagai *spacer* dan lapisan yang bersifat konduktor magnetik Co di atas substrat Si(111) Kedua lapisan ini membentuk sistem *multilayer* Si(111)/Cu/Co. Kemudian pada sistem tersebut dilakukan karakterisasi magnetik dan elektrik untuk mengetahui sifat GMR. Dari hasil penelitian diharapkan diperolehnya pengetahuan tentang sifat GMR dari *multilayer* yang dapat diaplikasikan sebagai sensor medan magnet.

TATA KERJA

Lapisan tipis/*multilayer* Si(111)/Co/Cu pada penelitian ini dihasilkan dengan metoda *sputtering* pada frekuensi radio 13,56 MHz. Frekuensi ini dipakai karena telah disepakati secara internasional dan juga agar tidak mengganggu komunikasi, disamping juga merupakan frekuensi optimal agar plasma yang terbentuk diantara elektroda dapat menghasilkan tegangan *self-bias* yang maksimal pada katoda. Secara umum semua material target ditempatkan pada katoda yang bertegangan negatif (*self-bias*) sehingga ion-ion argon (+) menembaknya, sedangkan substrat, dalam hal ini silikon kristal tunggal Si(111), pada anoda (*ground*) tempat penyusun/partikel lapisan tipis dikumpulkan. Untuk mengoptimalkan daya dari generator RF yang digunakan pada proses pembentukan lapisan tipis, diselarasakan dengan *matching-box* yang berfungsi untuk menyesuaikan impedansi generator dengan *load/sputter-chamber*.

Preparasi Cu/Co-thin film memerlukan 2 bahan material target Cu dan Co, masing-masing dengan diameter 75 mm, yang ditempatkan di atas 2 buah katoda terpisah. Oleh karena posisi substrat (ditempatkan pada anoda) harus berganti-ganti di atas material target Cu dan Co, maka diperlukan pemutar yang tidak akan mengubah kondisi kevakuman *plasma-chamber*. Derajat kevakuman dengan menggunakan pompa rotary dan *turbo molecular pump*

mencapai orde 10^{-6} mbar. Sebagai sensor tekanan digunakan *gauge*, pirani dan penning, sedangkan *sputter-gas* adalah argon dengan kemurnian 99,9 %.

Efek GMR diamati dengan cara meletakkan *multilayer* di dalam medan magnet -3000 sampai 3000 gauss, lalu diamati perubahan tahanan listrik sebagai fungsi medan magnet. Dilakukan pula optimasi parameter *sputtering* untuk memperoleh gejala GMR yang paling baik (kualitatif dan kuantitatif).

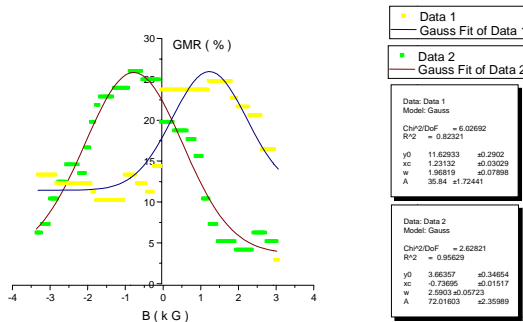
Pengamatan mikrostruktur dilakukan dengan SEM, sedangkan untuk analisis unsur digunakan EDX.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem lapisan tipis membentuk *multilayer* yang dapat diaplikasikan sebagai sensor medan magnet sangat bergantung dari sensitivitas lapisan *spacer* Cu dalam hubungannya dengan sifat GMR, ditentukan terutama oleh ketebalannya. Untuk membentuk susunan tersebut sangat diperlukan parameter *sputtering* yang sangat peka, seperti lamanya waktu *sputtering*, besarnya tegangan *self bias* dan tekanan argon. Seperti terlihat pada Gambar 1, efek GMR sebagai fungsi dari medan luar menunjukkan sifat simetris terhadap sumbu Y, mengindikasikan suatu sistem *multilayer* yang terpadu, dimana sifat-sifatnya saling melengkapi antara sifat lapisan Cu dengan lapisan Co. Dengan parameter *sputtering* terpenting, yaitu tekanan awal 10^{-6} mbar dan tekanan gas Argon 6×10^{-2} mbar serta *impurity* bahan material target yang kecil, maka diperoleh efek perubahan tahanan listrik yang signifikan dari *multilayer* Cu/Co.

Dari Gambar 1 diperoleh perubahan tahanan listrik maksimal terjadi pada medan 1500 G, mencapai hampir 20%. Secara kuantitatif, besarnya perubahan ini sudah signifikan, karena pada sistem *pseudo* maupun *pseudo spin valves* dari permalloy maupun Co, diperoleh paling besar 15%^[4]. Secara kualitatif daerah linearitas pada medan magnet antara 0-1000G. Ripple dari sumber arus yang dikirim ke cuplikan merupakan sumber noise yang potensial, meskipun telah digunakan *Lock-in-Amplifier* sebagai filternya.

Timbulnya perubahan resistansi tersebut kemungkinan disebabkan oleh *scattering* partikel bermuatan (elektron-elektron penghantar) yang bergantung dari orientasi spin, yaitu *spin up* (\uparrow) dan *spin down* (\downarrow), memberikan efek yang berbeda pada hamburan. Oleh adanya medan magnet luar yang menyebabkan *exchange-coupling*, terjadi pergeseran state tenaga yang tergantung dari arah spin. Arah dari pergeseran tersebut adalah saling berlawanan untuk masing-masing orientasi spin (*up* dan *down*).



Gambar 1. Hasil pengukuran gejala GMR lapisan multilayer Si(111)/Co/Cu sebagai fungsi dari medan magnet luar

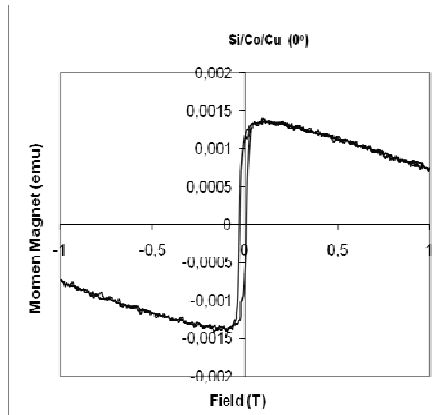
Besarnya pergeseran ini adalah dalam orde eV pada logam peralihan (Cu, Co, Ni, Fe) Banyaknya state yang berada di bawah *Ferminiveau* untuk elektron dengan *spin down* akan lebih besar, menyebabkan state tenaga bebas untuk \downarrow akan lebih banyak. Oleh karenanya keboleh jadian hamburan untuk *spin up* adalah lebih kecil dibanding *spin down*. *Perpendicular anisotropy* misalnya, merupakan sifat mutlak yang harus tersedia [6]. Sifat ini bisa diperoleh dengan cara memberikan kondisi sputter tertentu tanpa mempengaruhi sifat yang lain, atau dengan iradiasi ion. Gaya koersitiv H_c harus bisa divariasikan/dikontrol dengan mengubah komposisi/kandungan dari komponen logam peralihan. Suhu Curie bisa dikendalikan melalui kontrol kandungan Co [2].

Pengamatan histerisis, struktur mikro, pengukuran efek GMR sangat diperlukan untuk mengetahui karakter dari masing masing lapisan dan dari sistem yang terintegrasi tersebut. Untuk aplikasi bidang sensor magnet maka diperlukan syarat *in-plane anisotropy*. Tampak dari Gambar 2 bahwa lapisan yang membentuk *multilayer* tersebut memiliki *easy axis* sejajar bidang, dengan nilai H_c yang relatif rendah, artinya *hard axis* terletak sejajar normal bidang. Dengan demikian syarat untuk aplikasi sensor magnet telah terpenuhi.

Lapisan tipis pada umumnya mempunyai sifat magnetik anisotrop dimana E.A dari magnetisasi bisa terletak sejajar ataupun tegak lurus bidang. Pada lapisan tipis terjadinya anisotropi tergantung dari medan demagnetisasi (*demagnetizing field*) yang besarnya adalah

$$H_d = -N.M_s$$

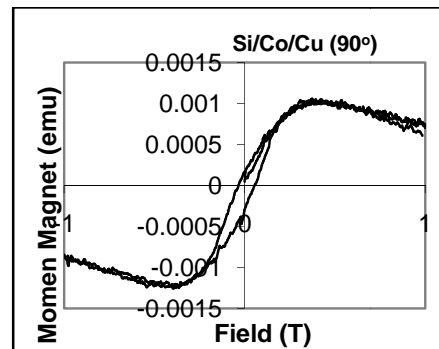
dengan N adalah tetapan demagnetisasi. Nilai N sangat bergantung dari bentuk cuplikan. Untuk lapisan tipis $N=4\pi$ pada arah tegak lurus bidang ($H_d = -4\pi M_s$).



Gambar 2. Hasil pengamatan kurva histerisis pada arah EA

Dari hasil perhitungan pada penelitian ini, untuk multilayer Si(111)/Cu/Co medan demagnetisasi pada arah tegak lurus sangat besar cukup signifikan $\approx 8 \times 10^6$ A/m, sehingga magnetisasi terletak sejajar bidang.

Pada Gambar 3 ditunjukkan hasil pengamatan kurva histerisis pada arah HA.



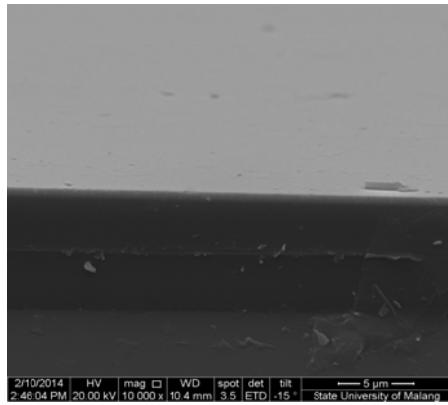
Gambar 3. Hasil pengamatan kurva histerisis pada arah HA

Ukuran dari besarnya anisotropi adalah kuat medan anisotropi :

$$H_k = 2K_u/M_s$$

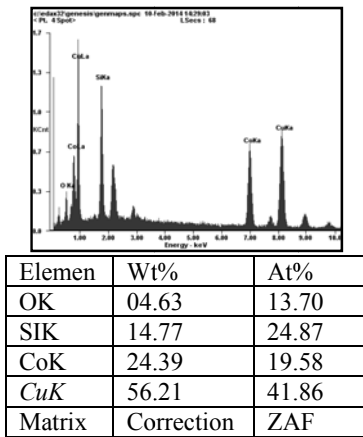
dengan K_u adalah tetapan anisotropi sumbu tunggal, diperoleh nilai 4×10^5 J/m³. Besarnya anisotropi ini sangat cukup untuk mempertahankan kondisi *in-plane anisotropy*, sehingga memenuhi syarat untuk aplikasi sebagai sensor magnet.

Pengamatan mikrostruktur dengan menggunakan SEM ditunjukkan pada Gambar 4, teramati suatu struktur yang nampak homogen, sehingga mengindikasikan proses deposisi yang kontinu, serta gejala GMR yang signifikan.



Gambar 4. Hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM

Exchange coupling antara kedua lapisan sangat menentukan kurva GMR ($\Delta R/R$) vs. $B(G)$ ataupun $H(Oe)$. Hal ini terutama berlaku untuk sistem *multilayer* yang memang sangat kompleks. Parameter yang terlibat dalam proses ini terutama adalah tegangan RF dan tegangan *self-bias* pada katoda. Besarnya tegangan ini menentukan komposisi atau kandungan unsur tertentu dalam lapisan tipis. Untuk menganalisa kandungan unsur di dalam *multilayer*, telah dilakukan pula pengamatan dengan menggunakan EDX, dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5.

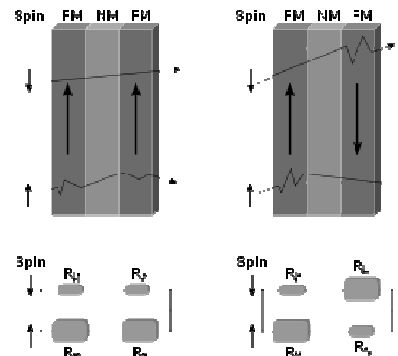


Gambar 5. Hasil pengamatan dengan EDX

Rudermann, Kittel, Kasuya dan Yoshida (RKKY)^[5], telah mempublikasikan kajian teori tentang efek osilasi dari GMR. Menurut model ini terjadi *exchange-coupling* antara elektron bebas berasal dari material magnetik yang diberi *impurity* non magnetik, disebut osilasi Fried dari Suszeptibilitas. Dalam hubungan dengan masalah teknis, terutama metoda preparasi, maka tegangan RF memberikan efek yang lebih besar, sehingga untuk preparasi lapisan tipis yang memiliki efek *Magneto-resistance* lebih tepat menggunakan tegangan pada

radio frekuensi tersebut. Namun meskipun tegangan terpasang jauh berbeda, tetapi daya yang digunakan hampir sama, sehingga faktor impedansi ($optimal=50 \Omega$) yang memberikan kontribusi besar mempengaruhi daya dan juga kemungkinan terhadap kandungan unsur dan sifat magnetisasi maupun sifat GMR di dalam lapisan tipis multilayer. Impedansi yang berbeda tampaknya meghasilkan kuat arus yang berbeda pula meskipun pada daya terpakai yang sama, menghasilkan derajat ionisasi yang lebih besar untuk RF. Oleh karenanya maka *sputter-yield* akan berbeda untuk kedua proses tersebut, *sputteryield* untuk Cu adalah lebih besar daripada Co. Dengan demikian maka untuk waktu sputter yang sama akan dihasilkan sputter yang sama akan dihasilkan lapisan Cu yang lebih tebal daripada lapisan Co, sehingga teramati kandungan Cu yang jauh lebih banyak ($\approx 42\%$) daripada unsur Co ($\approx 20\%$), seperti ditunjukkan oleh pengamatan dengan menggunakan EDX.

Mekanisme terjadinya efek GMR pada struktur multilayer adalah hamburan *spin-dependent* pada permukaan antara lapisan magnetik dan non magnetik dan juga didalam lapisan magnetik sendiri. Demikian pula efek GMR pada lapi san granular, sangat erat hubungannya dengan reorientasi momen magnetik *cluster*, dan pada umumnya diinterpretasikan sebagai bagian dasar dari hamburan *spin-dependent*^[5,7] terjadi baik pada *magnetic cluster* maupun pada batas FM/AM.



Gambar 5. Hamburan pada batas antar lapisan tipis secara skematis

Berdasarkan hasil pengukuran yang dijelaskan/ dibahas, serta tinjauan tentang *exchange coupling*, maka lapisan tipis *multilayer* ini telah mengindikasikan untuk aplikasi dibidang sensor magnet pada daerah -1000 sampai 1000 gauss. Namun demikian masih diperlukan komponen elektronik untuk melengkapi pembuatan prototipe sebuah sensor magnet. Juga diperlukan *array* dari lapisan tipis agar menghasilkan unjuk kerja dan *performance* yang stabil. Diperlukan juga suatu lapisan pelindung agar tidak bereaksi dengan udara luar. Gaya koersitif H_c bisa dinaikkan untuk memperbesar sensitivitas sensor.

Untuk memperbesar gaya koersitiv tersebut mungkin bisa ditempuh dengan mengurangi ketebalan, tetapi kerugiannya adalah M_s yang menjadi lebih kecil, sehingga akan berubah menjadi *perpendicular anisotropy*^[6]. Berdasarkan pengukuran sifat magnetik, medan yang relatif kecil 50 Oe dalam sistem *sputtering* mampu membentuk *easy-axis* yang sejajar dengan H dan *hard-axis* yang tegak lurus bidang lapisan tipis.

Pada aplikasinya dalam sistem *multilayer* dan *spin-valves* terjadi pergeseran gaya koersitif dari lapisan tunggalnya. Dengan demikian terjadi kopling/interaksi antara kedua lapisan tipis. Hal tersebut bisa dijelaskan dengan model spin yang terorientasi paralel dan antiparalel terhadap arah magnetisasi, yaitu *spin-up* dan *spin down* yang jelas memberikan kontribusi pada efek medan magnet luar terhadap pergeseran pita d , sehingga menyebabkan proses hamburan, dan mengakibatkan perubahan konduktivitas logam, terutama logam peralihan (3d), juga dalam kaitannya dengan teori RKKY^[5]. Dengan menggunakan Cu sebagai “*spacer*”, menunjukkan munculnya efek simetris dari efek GMR tersebut, sedangkan efek pergeseran kurva terjadi karena hysteresis (Gambar 1).

KESIMPULAN

Dengan parameter *sputtering* terpenting, yaitu tekanan awal 10^{-6} mbar dan tekanan gas Argon 6×10^{-2} mbar serta *impurity* bahan material target yang kecil, maka diperoleh efek perubahan tahanan listrik yang signifikan dari multilayer Co/Cu di atas substrat Si(111), mencapai sekitar 20%. Pengamatan dengan EDX menghasilkan kandungan masing-masing komponen dalam lapisan tipis. Terjadinya pergeseran kurva GMR pada medan negatif dibandingkan medan positif mengindikasikan terjadinya kopling interaksi (*exchange coupling*) antara lapisan tipis yang membentuk multilayer. Pengamatan *Magneto-resistance* menunjukkan efek yang signifikan, serta ketergantungan tahanan listrik dari medan magnet terpasang. Kedua hal tersebut bisa dijelaskan dengan model *spin* yang terorientasi paralel dan antiparalel terhadap arah magnetisasi, yaitu *spin-up* dan *spin down* yang jelas memberikan kontribusi pada efek medan magnet luar terhadap pergeseran pita d , sehingga menyebabkan proses hamburan yang bergantung dari spin, mengakibatkan perubahan konduktivitas *multilayer*. Berdasarkan hasil pengukuran serta tinjauan tentang *exchange coupling*, maka susunan *multilayer* tersebut telah mengindikasikan untuk aplikasi dibidang sensor magnet pada daerah medan rendah -1000 sampai 1000 gauss. Namun demikian masih diperlukan komponen elektronik untuk melengkapi pembuatan prototip sebuah sensor magnet. Juga diperlukan *array* dari lapisan tipis agar menghasilkan unjuk kerja dan *performance* yang stabil.

DAFTAR PUSTAKA

1. CLEGG, W., et.al, *Some aspects of Thin Film Magnetoresistive Sensors*, Proceeding of the 2nd International Conference on Physics of Magnetic Materials, Polandia 17-22 Setember 2010.
2. TUMASKI, S., *Thin Films Magnetoresistive Sensors*, ed Institute of Physics Publishing, Philadelphia, 2001.
3. <http://www.Giant Magneto Resistance> (2012, 2013)
4. <http://srs.dl.ac.uk/OTHER/OW/MAGNETISM/Giant-Magneto.html> (2012, 2013, 2014).
5. BRUNO, P., CHAPPERT, C., *Interlayer exchange coupling : RKKY-theorie and beyond*, Physical Review Letters 67, 1991, 1602-1605.
6. FOLKS, L., et al.: “*Track width definition of giant magnetoresistive sensors by ion irradiation*” IEEE Trans. Magn. 37 (2011), 1730–1732.
7. MOUGIN, A., et al.: “*Magnetic micropatterning of FeNi/FeMn exchange bias bilayers by ion irradiation*” J. Appl. Phys. 89 (2002), 6606–6608.

Tjipto Sujitno

- Berapa ukuran sampel untuk mengamati kurva Histerisis arah vertikal dan horisontal
- Target penelitian ini apa dan kapan terealisasi
- Gambar struktur mikro mohon diperjelas batas layernya

Tri Mardji Atmono

- *Ukuran lapisan tipis disesuaikan dengan fasilitas VSM-komersial yang ada di PSTBM, yaitu 4mm×4mm baik untuk arah Y (vertikal) maupun arah horisontal sumbu X)*
- *Target final dari penelitian ini adalah prototip sensor medan magnet berdasar efek GMR, cita-citanya akan bisa terealisasi pada akhir tahun 2016*
- *Okey akan ditampilkan hasil SEM-Crosssection dengan resolusi yang sesuai agar tampak batas layer*