

SIFAT MAGNETIK MULTILAYER Cu/Co DALAM APLIKASINYA UNTUK BAHAN SENSOR MAGNET

Tri Mardji Atmono, Budi Santosa, Yunanto, Subarkah

Puslitbang Teknologi Maju – BATAN

ABSTRAK

SIFAT MAGNETIK MULTILAYER Cu/Co DALAM APLIKASINYA UNTUK BAHAN SENSOR MAGNET. Telah dilakukan preparasi dan karakterisasi sistem lapisan tipis multilayer dari logam peralihan yang bersifat magnetik Co dan logam penghantar/konduktor Cu. Preparasi dilakukan dengan metode sputtering pada frekuensi radio 13,56 MHz, sedangkan karakterisasi meliputi penelitian sifat magnetik dan pengukuran tahanan listrik yang merupakan realisasi efek GMR (Giant Magnetoresistance). Pengukuran dan pengamatan tersebut diperoleh hubungan antara medan magnet dengan tahanan lapisan tipis, dan menunjukkan hasil efek GMR yang signifikan sebesar 5,5%. Pengamatan kurva histerisis yang merupakan hubungan antara magnetisasi dengan medan luar menunjukkan suatu kurva yang "sederhana", bukan suatu sistem yang kompleks seperti pseudo ataupun pseudo spin valves. Efek simetris dari GMR yang kemungkinan disebabkan oleh anisotropi yang terjadi pada saat pertumbuhan thin film. Pengukuran sifat magnetic mengindikasikan telah terbentuknya easy-axis yang sejajar dengan bidang lapisan tipis dan hard-axis yang tegak lurus, membentuk in-plane-anisotropy. Gejala magnetoresistance yang teramati merupakan GMR-ratio yang disebabkan oleh hamburan (scattering) dari pembawa muatan penghantar/elektron pada batas antar lapisan Cu/Co. Teramati pula efek osilasi dari GMR yang merupakan fungsi ketebalan Cu-layer. Meskipun diperoleh efek GMR yang relatif besar, tetapi nampaknya masih belum tercapai sensitivitas yang memadai pada medan kecil, sehingga aplikasi multilayer tersebut untuk bahan sensor magnet masih perlu diperbaiki lagi, kemungkinan dengan perlakuan semacam implantasi atau penambahan compound lain seperti permalloy.

ABSTRACT

MAGNETIC BEHAVIOUR OF Cu/Co MULTILAYER IN THE APPLICATION AS THE MATERIAL FOR THE MAGNETIC SENSOR. Preparation and characterization of the multilayer system which has magnetic transitions of Co and metallic conductor Cu have been done. The preparation was carried out by using the sputtering method at the frequency of 13.56 MHz, while the characterization comprise the investigation of the magnetic behavior and the measurement of electric resistance which is the realization of the GMR (Giant Magneto resistance)-effect. The measurement and the investigation was found the relation between the magnetic field and the resistance of thin film, with shows the significant result i.e., 5.5 % of the GMR-ratio. The simple curve, did not a complex system as pseudo or pseudo-spin-valves. The symmetric effect of the GMR may be caused by an anisotropy occurred during the thin film growth. The magnetic measurement has indicated that the forming of easy-axis and hard-axis which was parallel and perpendicular to the plane of thin film, respectively and the in-plane anisotropy was then formed. The showed GMR-effect was the GMR-ratio caused by the scattering of the electron at the boundaries between the layers Cu/Co. Oscillation of the GMR-effect was also showed as the function of Cu-thickness. Though the GMR effect was significant, the sensitivity at the low field has not yet reached for the application of the magnetic sensor, so that the modification like implantation or the supplement of compound was needed.

PENDAHULUAN

Giant Magnetoresistance 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...8%) Timbulnya perubahan resistansi pada GMR tersebut kemungkinan disebabkan oleh hamburan 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 tsb adalah saling berlawanan untuk masing-masing orientasi spin (*up* dan *down*). Besarnya pergeseran ini adalah dalam orde eV pada

logam peralihan (Cu, Co, Ni, Fe) Banyaknya state yang berada dibawah *Fermi level* untuk elektron dengan *spin down* akan lebih besar, menyebabkan state tenaga bebas untuk *spin ↓* akan lebih banyak. Oleh karenanya keboleh jadian hamburan untuk *spin up* adalah lebih kecil dibanding *spin down*.

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. 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 (*antiferro-magnetic-coupling*)⁽³⁾. Kemungkinan akan bertambah apabila digunakan Si(100) sebagai substrat dan menggunakan Tantalum sebagai lapisan penutup. Realisasi dari GMR tersebut akan teramat 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 *system multilayer*⁽³⁾.

Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan sistem lapisan tipis yang tersusun dari lapisan penghantar non magnetic Cu dan lapisan penghantar magnetik Co. Kedua *layers* ini membentuk sistem multilayer 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 bisa diaplikasikan sebagai sensor medan magnet, terutama untuk medan rendah.

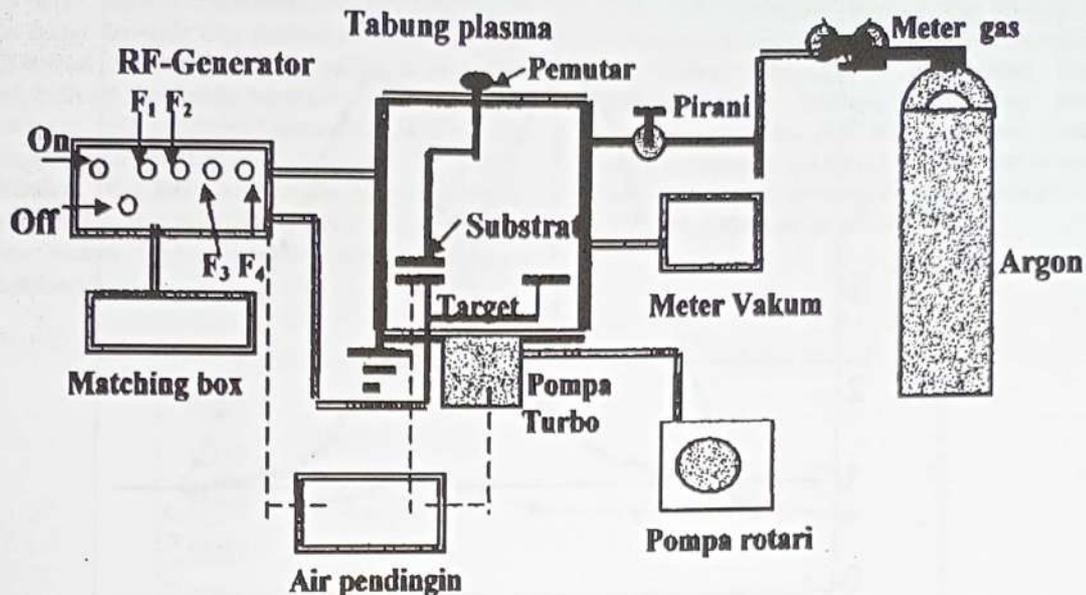
TATA KERJA DAN PERCOBAAN

Lapisan tipis 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 terbentuk tegangan self-bias maksimal pada katoda. Untuk mengoptimalkan daya yang digunakan pada proses pembentukan lapisan tipis, digunakan *match-box* yang berfungsi untuk menyesuaikan impedansi generator dengan sistem/tabung plasma. Gambar 1 menunjukkan skema sistem *RF-Sputtering* dan *DC-Sputtering* yang digunakan untuk preparasi *thin film*.

Untuk preparasi Cu/Co-*thin film* maka diperlukan 2 bahan material target Cu dan Co, masing-masing dengan diameter 75 mm, yang ditempatkan diatas 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 99,998 % Tabel 1 adalah merupakan *sputterparameter* pada saat preparasi lapisan tipis multilayer Cu/Co.

Tabel 1. Parameter *Sputtering* untuk preparasi multilayer Cu/Co.

Daya RF	175	W
Frekuensi RF	13,56	MHz
Arus katoda	125 - 150	mA
Tegangan bias	800 - 900	V (DC)
Jarak elektroda	45	Mm
Tekanan Ar	3×10^{-2}	mbar



Gambar 1. Skema sistem *sputtering* yang digunakan untuk preparasi *thin film*.

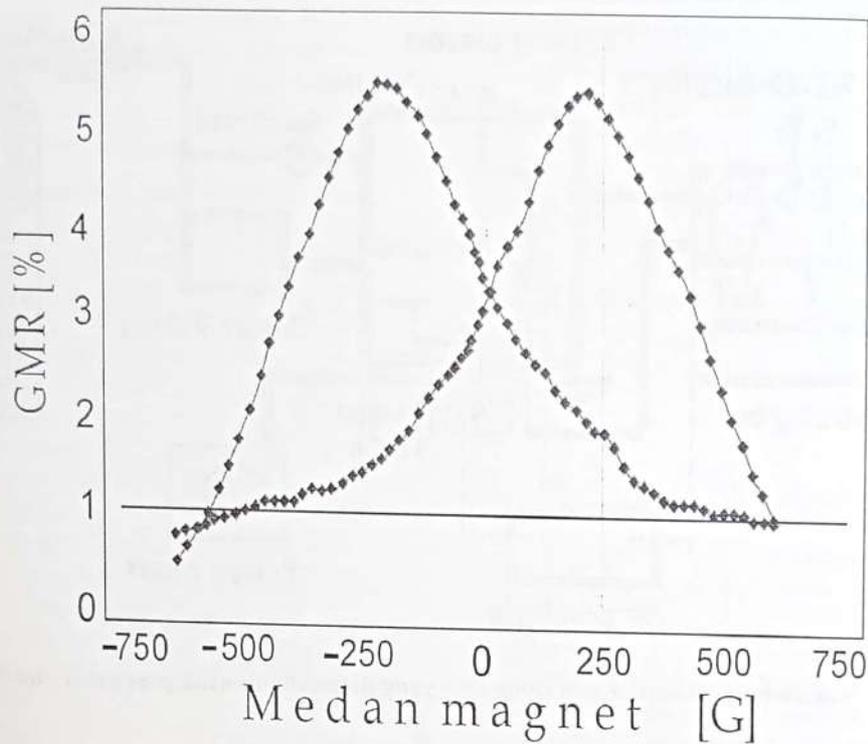
Ketebalan lapisan tipis berkisar 20 s/d 50 nm. Setelah terbentuk *thin film*, kemudian dilakukan karakterisasi, terutama sifat magnetik, yang merupakan titik berat dari pengukuran/pengamatan pada penelitian ini. Pengukuran efek/gejala GMR dikerjakan dengan metoda teknik *four-point-probe*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

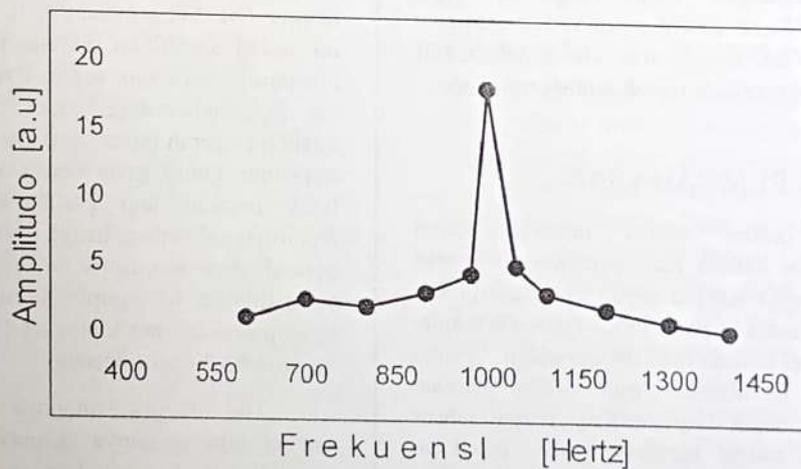
Secara umum semua material target ditempatkan pada katoda yang bertegangan negatif (*self-bias*) sehingga ion-ion argon (+) menembaknya, sedangkan substrat pada anoda (ground) tempat penyusun/partikel lapisan tipis dikumpulkan. Sistem lapisan tipis membentuk *spin valves* ataupun multilayer yang dapat diaplikasikan sebagai sensor medan magnet, sangat bergantung dari kepekaan lapisan spacer Cu dalam hubungannya dengan sifat GMR, ditentukan terutama oleh ketebalannya. Untuk membentuk susunan tersebut sangat diperlukan parameter *sputtering* yang sangat peka, seperti ketebalan lapisan dan tekanan argon. Seperti terlihat pada Gambar 2, 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 tunggal Cu dengan lapisan tunggal Co. Pengamatan histerisis, struktur mikro, pengukuran efek GMR sangat diperlukan untuk mengetahui karakter dari masing masing

lapisan dan dari sistem yang terintegrasi tersebut. Dari Gambar 2 diperoleh perubahan tahanan listrik maksimal terjadi pada medan 200 G, mencapai hampir 6%. Secara kuantitatif, besarnya perubahan ini sudah signifikan, karena pada system *pseudo* maupun *pseudo spin valves* dari *permalloy* maupun Co, diperoleh paling besar 5%⁽⁴⁾. Namun secara kualitatif daerah linearitas pada medan rendah belum terpenuhi. Untuk kuat medan diatas 750 G, tampak tidak muncul lagi perubahan tahanan, artinya diperoleh kejenuhan, hanya *noise* yang kemungkinan berasal dari elektronik. *Ripple* dari sumber arus yang dikirim ke sample merupakan sumber *noise* yang potensial, meskipun telah digunakan *Lock-in-Amplifier* sebagai filternya.

Hal ini erat kaitannya dengan getaran dari sumber lain, misalnya eksperimen yang dilakukan *parallel* pada ruangan lain, menimbulkan frekuensi yang tidak *terfilter* oleh *Lock-in* karena sinyal referensi yang berasal dari sumber arus (kurang lebih 1 kHz). Ini berarti bahwa pada saat medan negatif maksimal (didas 500 G) bukanlah GMR yang negatif, tetapi merupakan sinyal yang berasal dari *noise* tersebut. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, sinyal terbesar dari output *Lock-in* tetap merupakan fungsi dari frekuensi, tidak terfokus pada daerah/range frekuensi yang sempit, melainkan timbul pelebaran dan bahkan muncul *background* yang tidak dikehendaki, merupakan *noise*.



Gambar 2: Hasil pengukuran gejala GMR sebagai fungsi dari medan magnet luar.



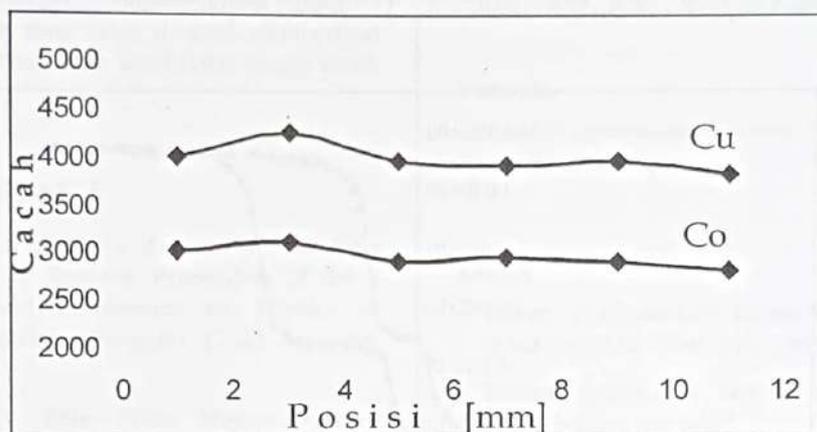
Gambar 3. Sinyal *output Lock-in* sebagai fungsi dari frekuensi.

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. Pada Gambar 4 ditunjukkan hasil pengamatan dengan

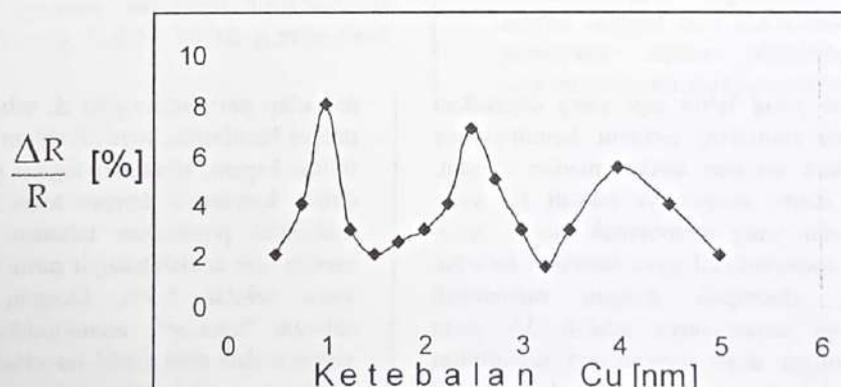
menggunakan EDAX. Berdasarkan sinar X karakteristik yang dipancarkan oleh unsur yang terkandung dalam lapisan *multilayer*, selain identifikasi unsur/jenis unsur atas dasar tenaga sinar X tersebut maka bisa dihitung pula besarnya prosentasenya (*counts*) dengan menggunakan software yang telah ada. Sumbu-X menyatakan posisi dari pusat $0(0,0)$, sedangkan sumbu Y adalah *counts*/cacah terdeteksi.

Terlihat bahwa pada daya dan tegangan yang sama maka material Cu memiliki *sputter yield* yang lebih tinggi daripada Co. Artinya Cu memiliki sifat *preferential sputtering*. Pada posisi 3 mm dari pusat, keduanya memiliki karakter yang sama, yaitu cenderung naik cacahnya/kandungan unsur dalam lapisan adalah lebih besar. Sehingga ini mengindikasikan sifat dari sistem katoda dalam hubungan dengan hubungan geometri terhadap katoda. Tetapi secara umum bisa dikatakan bahwa multilayer adalah homogen.

Gambar 5 menunjukkan ketergantungan efek GMR dari ketebalan lapisan Cu. Gejala yang pertama GMR teramati pada ketebalan Cu sebesar 1 nm. Disini kemungkinan berlangsung kopling antiferromagnetik (*AF-coupling*) yang pertama sesuai dengan teori dari RKKY. Untuk ketebalan antara 1 sampai 2 nm terjadi kopling ferromagnetik. *FM-coupling* yang pertama berada di sekitar $t = 1,75 - 1,25$ nm, kemudian terjadi AFM dst.



Gambar 4. Pengamatan dengan menggunakan EDAX terhadap prosentase kandungan Cu dan Co, dihitung dari titik pusat O(0,0).



Gambar 5. Efek GMR sebagai fungsi dari ketebalan lapisan spacer Cu.

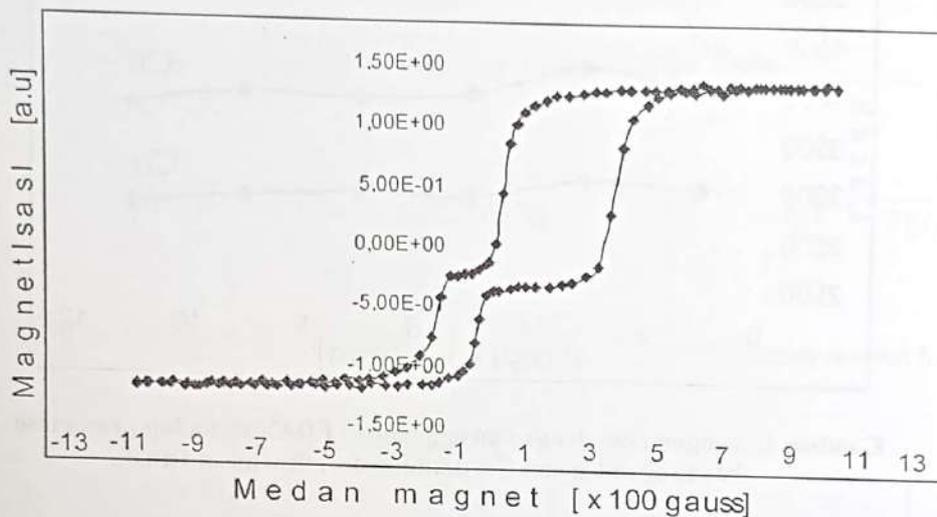
Kajian teori tentang efek osilasi ini ditulis oleh Rudermann, Kittel, Kasuya dan Yoshida (RKKY), dimana menurut model ini terjadi *exchange-coupling* antara elektron bebas berasal dari material magnetik yang diberi *impurity non magnetic*, disebut osilasi Fried dari Suszeptibilitas⁽⁵⁾. Dalam hubungan

dengan masalah teknis, terutama metoda preparasi, maka tegangan RF memberikan efek yang lebih besar. Sehingga untuk preparasi lapisan tipis dengan sifat *Magnetoresistance* lebih tepat menggunakan tegangan pada radio frekuensi tersebut. Namun meskipun tegangan terpasang jauh berbeda, tetapi daya yang

digunakan hampir sama, sehingga faktor impedansi (optimal = 50Ω) 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 menghasilkan kuat arus yang berbeda pula meskipun pada daya terpakai adalah 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 lapisan Cu yang lebih tebal daripada

lapisan Co. Panjang perioda masing-masing lapisan adalah 5-10, tebal *Cu-layer* divariasasi (Gambar 3) dalam hal meneliti sifat osilasi dari gejala *Giant Magnetoresistance* sesuai dengan teori RKKY⁽⁵⁾.

Dalam hubungannya dengan aplikasi sebagai sensor magnet, maka telah dilakukan pengamatan kurva hysteresis, yaitu hubungan antara medan luar dengan magnetisasi lapisan tipis. Dengan melihat hasil pengamatan kurva GMR dan kurva M vs B maka bisa dicari daerah linearitas yang memungkinkan aplikasi Cu/Co sebagai sensor medan magnet. Pada Gambar 6 ditampilkan hasil pengukuran dengan menggunakan VSM.



Gambar 6. Magnetisasi multilayer Cu/Co sebagai fungsi dari medan terpasang.

Lapisan pertama yang lebih *soft* yang dihasilkan dengan parameter sputtering tertentu, kemungkinan bisa diaplikasikan sebagai sensor medan magnet. Kelemahannya disini tampaknya adalah H_c yang masih agak besar yang membentuk sistem *spin-valves*. Untuk memperkecil gaya koersitiv tersebut mungkin bisa ditempuh dengan menambah ketebalan, tetapi kerugiannya adalah M_s yang meningkat sehingga akan mengurangi sensitivitas sebagai sensor^(1,2). 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 Spin-valves terjadi pergeseran gaya koersitiv dari lapisan tunggalnya. Dengan demikian terjadi kopling/interaksi antara kedua lapisan tipis. Hal tersebut bisa dijelaskan dengan model spin yang terorientasi parallel dan antiparallel 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, menyebabkan perubahan konduktivitas logam, terutama logam peralihan (3d), juga dalam kaitannya dengan teori RKKY⁽⁵⁾. Besarnya maksimal perubahan tahanan listrik akibat dari medan luar adalah hampir sama untuk kedua lapisan, yaitu sekitar 5,5%. Dengan menggunakan Cu sebagai "*spacer*", menunjukkan munculnya efek simetris dari efek GMR tersebut yang memungkinkan disebabkan oleh adanya pengaruh medan luar H sebesar 50 Oe pada saat preparasi menggunakan teknik *sputtering*.

KESIMPULAN

Pengukuran magnetisasi telah menghasilkan kurva hysteresis yang bersesuaian dengan efek GMR yang ditimbulkan. 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, simetris mengapit sumbu Y (*resistance*), berkisar 5,5% pada kuat medan luar 200 gauss (bergantung parameter *sputtering*). Meskipun sifat osilasi efek GMR (sebagai fungsi ketebalan lapisan) menunjukkan kopling RKKY, tetapi nampaknya medan luar ini masih terlalu besar untuk aplikasi lapisan Cu/Co sebagai sensor medan magnet, sehingga perlu modifikasi, misalnya dengan teknik implantasi ion (Al, Y, dll) untuk meningkatkan frekuensi *scattering* dari elektron yang bersifat *spin dependent* ataupun dengan menggunakan material target *permalloy* untuk preparasi lapisan tipis NiFe yang telah dikenal memberikan efek GMR yang besar dan sensitivitas tinggi untuk medan rendah.

DAFTAR PUSTAKA

1. W. CLEGG, *et.al*, *Some Aspects of Thin Film Magnetoresistive Sensors*, Proceeding of the 2nd International Conference on Physics of Magnetic Materials, Polandia 17-22 Setember 1984.
2. S. TUMASKI, *Thin Films Magnetoresistive Sensors*, ed Institute of Physics Publishing, Philadelphia, 2001.
3. KIENEL, G., FREY, H.; *Dünnschichttechnologie*; VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
4. J. DUBOWIK, F. STOBIECKI, T. LUCINSKI, *Interface Magnetism in Permalloy/Cu-Multilayer*, Phys.Rev.B, Vol.57, Nr.10, p.5955-5960, 1998.
5. P. BRUNO, C. CHAPPERT, *Interlayer Exchange Coupling : RKKY-Theorie and Beyond*, Physical Review Letters 67, 1602-1605, 1991.

TANYA JAWAB

Agus Purwadi

- Sampai seberapa banyak multi layer yang diperlukan sedemikian sehingga aplikasi sebagai bahan sensor magnet optimum?

Yunanto

- Jumlah lapisan untuk sensor magnet yang dibuat adalah enam lapis.

Zainus

- Dalam pembentukan magnetik tersebut bagaimana mengatur tebal layer yang homogen.
- Dalam aplikasinya sensor magnet digunakan dalam bidang apa saja?

Yunanto

- Untuk mengatur supaya lapisan tipis homogen ketebalan lapisan tipis tidak boleh terlalu tipis.
- Sensor magnet digunakan untuk mengukur medan magnet dari elektromagnet atau magnet permanen, sistem penyimpangan magnetik, kontrol otomatis dari penguat magnetik.