

Sensor Magnetik GMR, Teknologi dan Aplikasi Pengembangannya

¹Mitra Djamal, ^{1,2}Ramli, ^{1,3}Rahadi Wirawan, ^{1,4}Edi Sanjaya

¹Jurusan Fisika, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia

²Jurusan Fisika, Universitas Negeri Padang, Jl. Prof. Hamka, Padang 25131, Indonesia

³Prodi Fisika, FMIPA Universitas Mataram, Jl. Majapahit 62 Mataram 83125, Indonesia

⁴Fisika, FST UIN Jakarta, Jl. Ir. H. Juanda 49 Jakarta, Indonesia

¹mitra@fi.itb.ac.id

Abstrak – Kebutuhan akan sensor tidak hanya pada bidang industri, namun juga merambah pada aplikasi di bidang otomotif, kesehatan, pertambangan, transportasi, dan bidang-bidang lainnya. Salah satu sensor yang banyak dikembangkan saat ini adalah sensor magnetik, yakni sensor yang mengukur besaran-besaran fisika berdasarkan perubahan medan magnet. Giant magnetoresistance (GMR) merupakan suatu material yang memiliki karakteristik magnetoresistansi yang tinggi, sifat-sifat magnetik dan elektrik yang baik, sehingga GMR sangat berpotensi untuk dikembangkan menjadi berbagai divais pengindera medan magnet generasi mendatang (*next generation magnetic field sensing devices*) seperti sensor, penyimpanan data, heads recording, dan non-volatile magnetic random access memory (MRAM). Dalam tulisan ini akan dipaparkan tentang material GMR dan pengembangannya sebagai sensor magnetik serta prospek GMR sebagai biosensor.

Kata Kunci : sensor, sensor magnetik, magnetoresistance, GMR.

I. PENDAHULUAN

Kemajuan dunia industri saat ini dan masa datang yang menekankan pada peningkatan sistem otomatisasi, keamanan dan kenyamanan akan sangat bergantung pada suatu piranti yang dikenal sebagai sensor. Kebutuhan akan sensor tidak hanya pada bidang industri, namun juga merambah pada aplikasi di bidang otomotif, kesehatan, pertambangan, transportasi, dan kebutuhan untuk menghadapi berbagai permasalahan seperti bencana alam gempa bumi, tsunami, gunung meletus, serta polusi lingkungan. Penelitian dan pengembangan sensor serta sistem sensor di semua bidang menempati posisi yang sangat penting^[1]. Para peneliti di lembaga riset maupun perguruan tinggi terus-menerus berusaha membuat dan mengembangkan sensor-sensor baru dan sistem sensor dengan teknologi dan metode yang berbeda-beda serta mengembangkan berbagai aplikasi sensor-sensor tersebut.

Salah satu sensor yang cukup banyak dikembangkan saat ini adalah sensor magnetik, sensor yang mengukur besaran-besaran fisika berdasarkan perubahan medan magnet. Berbeda dengan sensor lainnya, sensor magnetik tidak melakukan pengukuran secara langsung sifat fisik besaran yang diukur namun melalui pendeteksian perubahan medan magnet yang diakibatkan karena keberadaan atau pergerakan suatu benda yang menjadi obyek pengukuran. Beberapa metode pembuatan sensor magnetik^[2] antara lain: menggunakan efek Hall, menggunakan bahan magnetoresistif dan menggunakan metode *fluxgate*.

Giant magnetoresistance (GMR) merupakan suatu material yang memiliki karakteristik magnetoresistansi yang tinggi, sifat-sifat magnetik dan elektrik yang baik. Berdasarkan karakteristik yang dimiliki tersebut, GMR sangat berpotensi untuk dikembangkan menjadi berbagai divais pengindera medan magnet generasi mendatang (*next generation magnetic field sensing devices*).

Dalam paper ini dipaparkan tentang karakteristik, keunggulan, teknologi pembuatan serta aplikasi pengembangan GMR sebagai sensor magnetik.

II. SENSOR MAGNETIK GMR

Sensor magnetik berbasis GMR (*giant magnetoresistance*) merupakan sensor yang bekerja berdasarkan efek perubahan resistansi yang sangat besar pada bahan logam bila berada dalam medan magnet luar.

Material GMR memiliki *magnetoresistance* yang sangat besar sehingga memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi devais pendeteksi medan magnet. Penggunaan material GMR sebagai sensor medan magnet, memiliki beberapa kelebihan dibandingkan sensor lainnya yakni: sensitivitas yang tinggi, kestabilan temperatur tinggi, konsumsi daya rendah, ukuran kecil dan harga murah, sifat magnetik dapat bervariasi dalam rentang yang sangat luas^[3,4]. Pada tabel 1 ditunjukkan perbedaan sensor GMR dengan beberapa sensor medan magnet lainnya.

TABEL 1 PERBANDINGAN KARAKTERISTIK BEBERAPA SENSOR MEDAN^[5]

Sensor	Range H (T)	Sensivitas (V/T)	Waktu respon	Konsumsi daya	Ukuran sensor (head size)
GMR	10^{-12} - 10^{-2}	120	1 MHz	10 mw	10-100 μ m
Hall	10^{-6} - 10^2	0.65	1 MHz	10 mw	10-100 μ m
SQUID	10^{-14} - 10^{-6}	10^{-14}	1 MHz	10 mw	10-100 μ m
Fluxgate	10^{-12} - 10^{-2}	3.2	5 kHz	1 w	10-20 mm

Selain itu, pemasangan sensor GMR yang tidak bersentuhan dengan rangkaian yang diukur, dapat mengurangi kesalahan pengukuran.

A. Prinsip Kerja

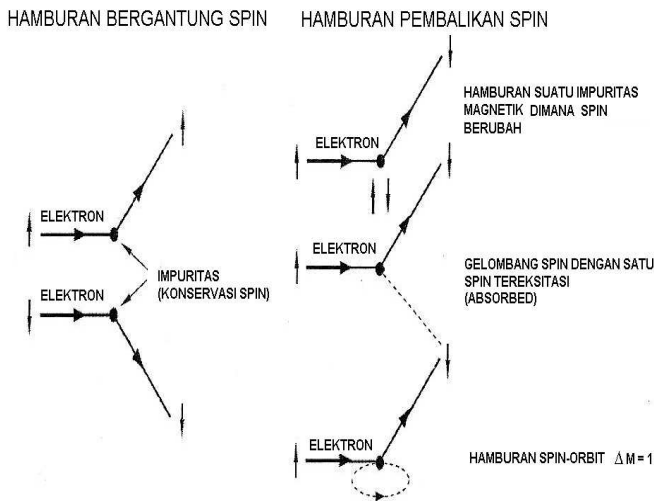
Prinsip dasar dari *magnetoresistance* (MR) adalah perubahan resistivitas material sebagai akibat dari respon terhadap keberadaan medan magnet luar. Fenomena efek

GMR ini pertama kali dilaporkan oleh Baibich, dkk. (1988)^[6]. Perubahan resistansi GMR sebagai akibat keberadaan magnet luar secara umum dituliskan melalui persamaan (1):

$$R = f(B) \tag{1}$$

dengan R adalah resistansi, B adalah medan magnet.

Efek GMR merupakan efek mekanika kuantum yang diamati dalam struktur lapisan tipis yang terdiri lapisan-lapisan feromagnetik yang dipisahkan oleh lapisan nonmagnetik. Efek GMR ini berhubungan dengan kenyataan bahwa spin elektron memiliki dua nilai yang berbeda (spin up dan spin down). Ketika spin-spin ini melintasi material yang telah dimagnetisasi, salah satu jenis spin mungkin mengalami hambatan (*resistance*) yang berbeda daripada jenis spin lainnya. Sifat ini menunjukkan adanya hamburan bergantung spin (*spin-dependent scattering*). Dalam multilayer magnetik terjadi dua jenis hamburan yaitu: hamburan bergantung spin (*spin-dependent scattering*) dan hamburan pembalikan spin (*spin flip scattering*) seperti tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. Jenis hamburan spin dalam multilayer magnetik^[7]

Hamburan bergantung spin menyebabkan timbulnya GMR, sedangkan hamburan pembalikan spin merusak timbulnya GMR. Kedua jenis hamburan ini dibedakan berdasarkan perubahan arah perambatan elektron.

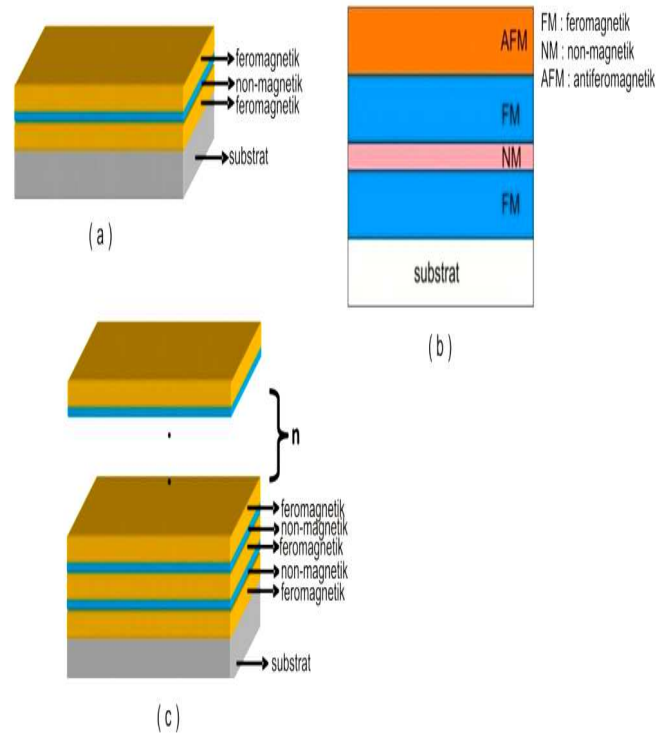
Kajian fisika dari GMR berdasarkan pada pengaruh spin terhadap sifat konduksi dan sifat penerobosan (*tunneling*) elektron-elektron dalam logam feromagnetik. Perbedaan sifat konduksi mayoritas dan minoritas dari spin elektron dalam logam feromagnetik pertama kali diamati oleh Mott^[8]. Secara kualitatif, GMR dapat dijelaskan dengan menggunakan model Mott ini. Ada dua hal yang diusulkan oleh Mott, yakni: (1) konduktivitas listrik dalam logam dapat diuraikan dalam hubungannya dengan dua saluran konduksi bebas; yang pertama berhubungan dengan elektron dengan *spin up* dan yang lain berhubungan dengan elektron dengan *spin down* dan (2) di dalam logam feromagnetik, laju hamburan dari *spin up* dan *spin down* elektron-elektron sangat berbeda.

Menurut Mott arus listrik semata-mata dibawa oleh elektron-elektron dari pita valensi *sp* dengan massa efektif rendah dan mobilitas tinggi. Pita valensi *d* memainkan peran

penting dalam menyediakan keadaan akhir untuk hamburan elektron-elektron dalam pita *sp*. Dalam feromagnetik pita *d* adalah bertukar-pisah (*exchange-split*), sehingga rapat keadaan elektron-elektron pada tingkat energi Fermi tidak sama untuk *spin up* dan *spin down*. Peluang hamburan dalam keadaan ini sebanding dengan kerapatannya, sehingga laju hamburan bergantung spin, atau dengan kata lain hamburan berbeda untuk kedua saluran konduksi di atas.

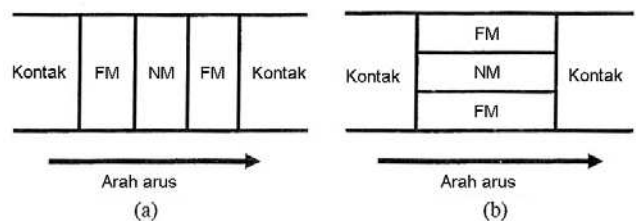
B. Struktur dan Rasio GMR

Struktur GMR terdiri dari struktur *sandwich*, *spin valve* (*sandwich pinned*) dan *multilayer*. Struktur *sandwich* merupakan struktur dasar GMR yang terdiri dari tiga lapisan dengan susunan bahan feromagnetik/nonmagnetik/feromagnetik (FM-NM-FM). Struktur *spin valve* merupakan struktur *sandwich* yang diberi lapisan pengunci (*pinning layer*), sedangkan struktur *multilayer*, adalah struktur dengan pengulangan lapisan feromagnetik/non magnetik (FM/NM)_n dengan indeks n adalah jumlah pengulangan seperti terlihat pada Gambar 2.



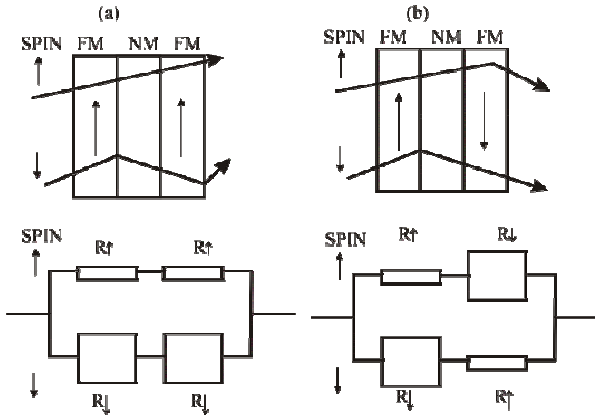
Gambar 2. Struktur lapisan tipis GMR: (a) sandwich, (b) spin valve, dan (c) multilayer.

Ketiga struktur di atas memiliki dua geometri utama dari efek GMR, yaitu geometri arus tegak lurus bidang (CPP) dan geometri arus sejajar bidang (CIP), seperti tampak pada Gambar 3.



Gambar 3. Geometri GMR; (a) CPP, (b) CIP

Pada Gambar 4 dideskripsikan tentang hamburan pada lapisan multilayer ferromagnetik dimana hamburan kuat terjadi untuk elektron dengan spin antiparalel terhadap arah magnetisasi, sedangkan hamburan lemah terjadi untuk elektron dengan spin paralel terhadap arah magnetisasi. Anggapan ini menggambarkan asimetri dalam rapat keadaan pada tingkat Fermi yang bersesuaian dengan argumentasi Mott yang kedua.



Gambar 4. Model rangkaian resistor untuk magnetisasi paralel dan antiparalel pada lapisan GMR^[7]

Material GMR memperlihatkan bahwa resistansinya rendah ketika arah magnetisasi dalam lapisan-lapisan ferromagnetik dalam arah paralel, namun bila arah magnetisasi dalam lapisan ferromagnetik antiparalel, maka resistansinya menjadi besar. Hal ini menunjukkan bahwa momen magnetik elektron internal yang terkait dengan spin memainkan dalam transport muatan listrik. Dalam multilayer magnetik yang terdiri dari dua lapisan ferromagnetik dengan lapisan pemisah non magnetik, GMR memiliki rasio magnetoresistance yang amat besar. Secara umum, besarnya rasio *magnetoresistance* diungkapkan melalui persamaan:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R^{\downarrow} - R^{\uparrow}}{R^{\uparrow}} \tag{2}$$

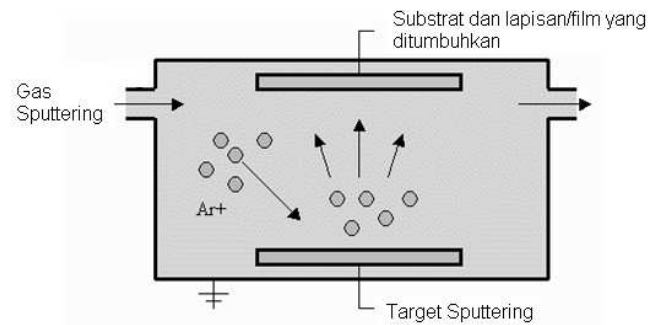
dengan R^{\downarrow} adalah resistansi material GMR ketika konfigurasi magnetisasi anti paralel, dan R^{\uparrow} adalah resistansi material GMR ketika konfigurasi magnetisasi paralel.

C. Teknologi Penumbuhan GMR

Teknik penumbuhan lapisan tipis GMR dapat dilakukan dengan metode *Opposed Target Magnetron Sputtering* (OTMS).

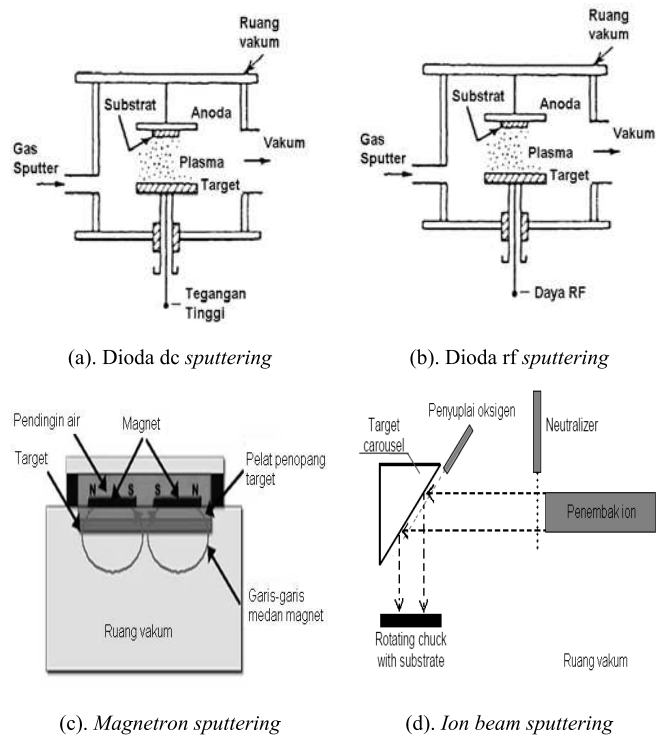
Ketika permukaan benda padat (*target sputtering*) ditembak dengan partikel-partikel berenergi, seperti ion-ion Ar⁺ yang dipercepat, maka atom-atom permukaan dari target itu akan terpecah ke arah berlawanan dengan arah partikel datang, yang disebabkan oleh tumbukan antara atom-atom permukaan target dengan ion-ion Ar⁺ tersebut. Peristiwa ini disebut dengan *sputtering*. Dengan energi termal yang cukup, atom-atom permukaan yang terlepas ini akan

menempel pada substrat dan membentuk lapisan tipis di substrat. Ilustrasinya diperlihatkan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi proses *sputtering*

Beberapa sistem *sputtering* yang dapat digunakan untuk deposisi lapisan tipis meliputi; dioda dc, dioda rf, magnetron, dan *ion-beam sputtering*^[9]. Konstruksi dasar sistem *sputtering* dideskripsikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Sistem *Sputtering*

Metode *opposed target sputtering* (OTS) dikembangkan tahun 1980-an^[10], yang didesain khusus untuk penumbuhan lapisan tipis material magnetik dengan laju *sputtering* yang tinggi dan pada suhu rendah^[11]. Keuntungan metode OTS adalah mampu men-*sputter* hampir semua jenis material termasuk material ferromagnetik dengan laju yang tinggi tanpa menaikkan temperatur substrat. Untuk meningkatkan laju deposisi dapat dilakukan dengan penurunan tekanan gas *sputtering* serendah mungkin, dan membuat jarak substrat dan sumber *sputtering* sedekat mungkin.

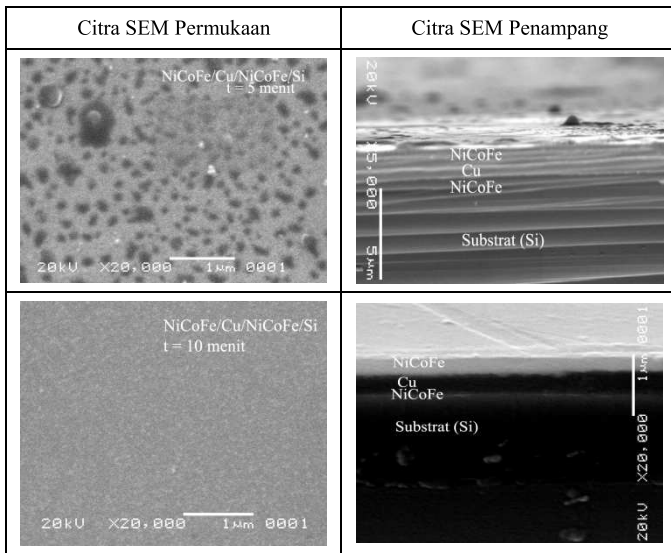
Pada Laboratorium Fisika Material Elektronik, Departemen Fisika ITB, OTS dikembangkan menjadi sistem *Opposed Target Magnetron Sputtering* (OTMS) dengan menggunakan magnet tak seimbang^[11]. Gambar 7.

menunjukkan foto reaktor dc-OTMS yang telah dikembangkan untuk penumbuhan lapisan tipis GMR.



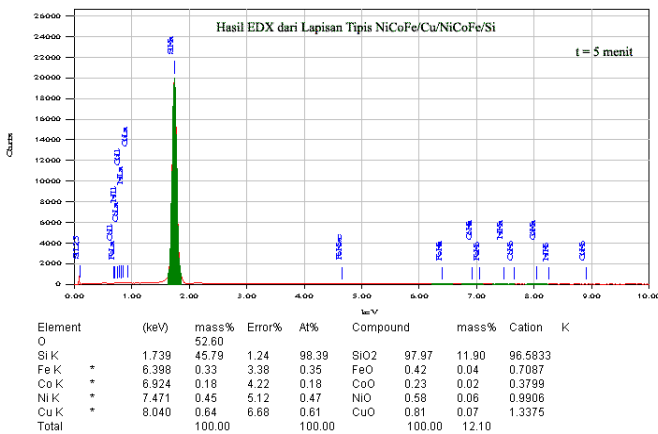
Gambar 7. Foto reaktor dc-OTMS^[11]

Dalam Gambar 8. ditampilkan hasil citra SEM permukaan dan penampang lapisan tipis NiCoFe/Cu/NiCoFe/Si dengan waktu penumbuhan 5 dan 10 menit.

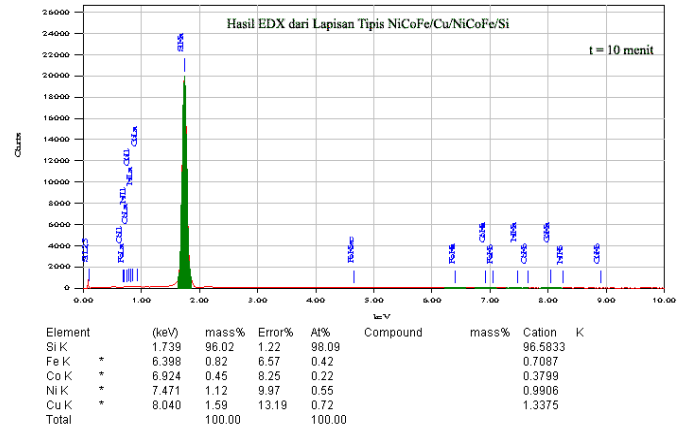


Gambar 8. Citra SEM permukaan dan penampang dari lapisan tipis NiCoFe/Cu/NiCoFe/Si dengan perbesaran 20.000 kali^[12].

Untuk hasil EDX lapisan tipis NiCoFe/Cu/NiCoFe/Si yang menunjukkan komposisi atomik Ni, Co dan Fe dengan waktu penumbuhan 5 menit dan 10 menit ditunjukkan dalam Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. Hasil EDX dari lapisan tipis NiCoFe/Cu/NiCoFe/Si dengan waktu penumbuhan 5 menit^[12].



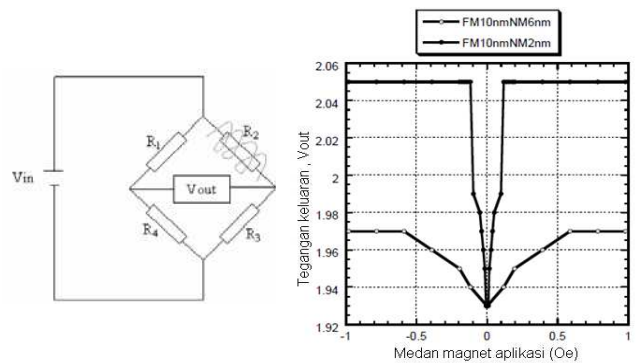
Gambar 10. Hasil EDX dari lapisan tipis NiCoFe/Cu/NiCoFe/Si dengan waktu penumbuhan 10 menit^[12].

III. APLIKASI PENGEMBANGAN GMR

Pengembangan penelitian GMR yang dilakukan di Laboratorium Fisika Material Elektronik dan Laboratorium Instrumentasi ITB antara lain meliputi penelitian pada pengembangan material GMR dan aplikasi GMR sebagai sensor pendeteksi medan magnetik. Berikut ini beberapa penelitian yang dikembangkan antara lain:

A. Pengukuran Medan Magnetik (Metode Jembatan Wheatstone)

Dalam aplikasi sensor medan magnetik, sensor yang terintegrasi dalam jembatan Wheatstone dimasukkan kedalam kumparan solenoida yang merupakan sumber medan magnetik. Pendeteksian medan magnet didasarkan pada perubahan tegangan keluaran jembatan Wheatstone. Konfigurasi jembatan *Wheatstone* ditunjukkan Gambar 11.



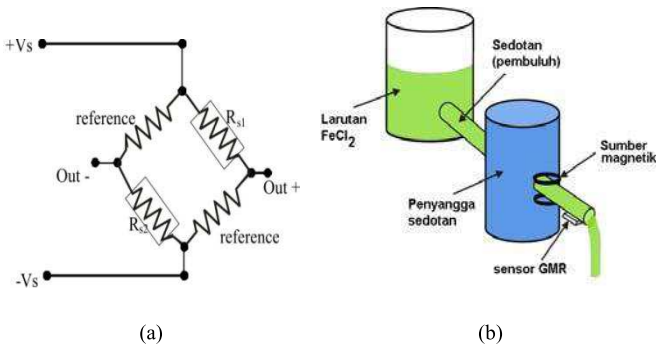
Gambar 11. (a) Konfigurasi Jembatan Wheatstone, (b) Hasil pengukuran dalam konfigurasi jembatan Wheatstone^[13].

Dalam penelitian ini, karakteristik solenoida yang digunakan: panjang solenoida 240 mm, diameter 41.6 mm, jumlah lilitan kawat sekitar 200 buah, dengan diameter kawat sekitar 0.4 mm. Hasil kalibrasi menunjukkan hubungan antara medan magnet aplikasi yang dialami sampel terhadap arus induksi (I) sebagai fungsi linier berikut:

$$H(I) = 1.9568I - 0.043 \tag{3}$$

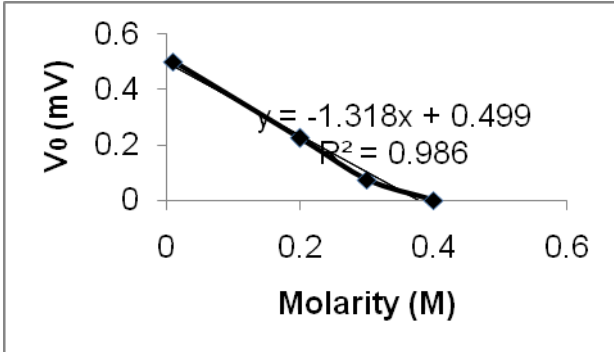
dimana induksi magnetik H dalam μT dan arus induksi I dalam mA. Hasil pengukuran karakteristik sensor GMR dengan ketebalan lapisan magnetik 10 nm untuk ketebalan lapisan non magnetik 2 nm dan 6 nm ditunjukkan pada Gambar 11(b).

Pengukuran medan magnetik menggunakan metode jembatan *wheatstone* juga dikembangkan pada aplikasi pengukuran medan magnetik pada larutan yang mengandung besi (Fe^{2+}), dengan menggunakan lapisan tipis GMR NiCoFe/Cu/NiCoFe sebagai sensor pendeteksi medan magnetik seperti tampak pada Gambar 12.



Gambar 12. Seting peralatan sensor GMR untuk mendeteksi larutan yang mengandung bahan magnetik Fe^{+2} [14]

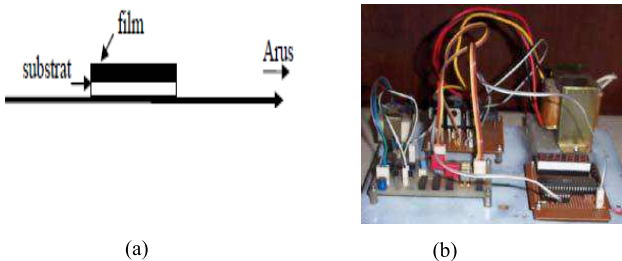
Medan magnetik pada larutan dideteksi melalui pengukuran tegangan keluaran GMR. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan output sensor GMR sebanding dengan konsentrasi molar larutan pada range 0,01-0,4 M [14] seperti tampak pada Gambar 13.



Gambar 13. Hubungan antara tegangan keluaran GMR dengan molaritas larutan $FeCl_2$ [14].

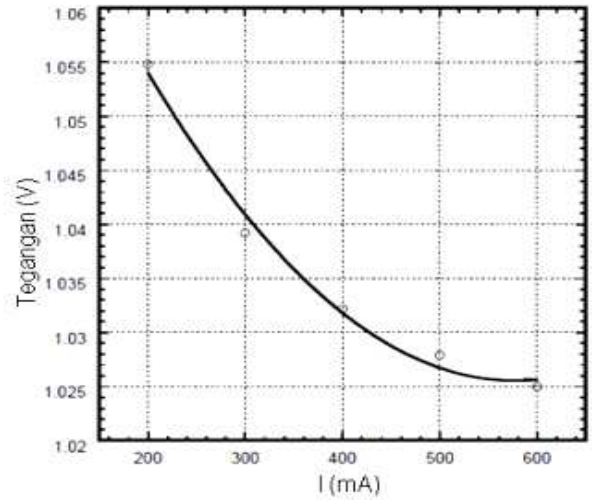
B. Pengukuran Arus

Dalam aplikasi sebagai sensor arus, film tipis sandwich GMR diletakkan diatas kawat yang dialiri arus, seperti tampak pada Gambar 14.



Gambar 14. (a) Posisi film tipis sandwich GMR sebagai sensor arus, (b) Foto set up peralatan pengukuran arus [13].

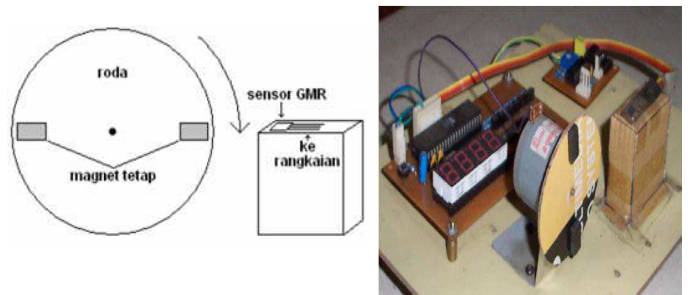
Hasil pengukuran arus ditunjukkan pada Gambar 15. Medan yang terdeteksi sandwich GMR untuk arus dibawah 200 mA cukup kecil (akibat adanya perbedaan jarak antara arus dan permukaan *sandwich*). Oleh karena itu rentang kerja sensor diambil di atas 200 mA. Grafik keluaran sensor terhadap arus yang dilewatkan pada kawat untuk daerah kerja di atas 200 mA. Kesalahan absolut maksimum dan kesalahan relatif maksimum pengujian adalah masing-masing 1.65 mV dan 5.77 % pada arus 300 mA.



Gambar 15. Keluaran sensor terhadap arus yang dilewatkan pada kawat [15].

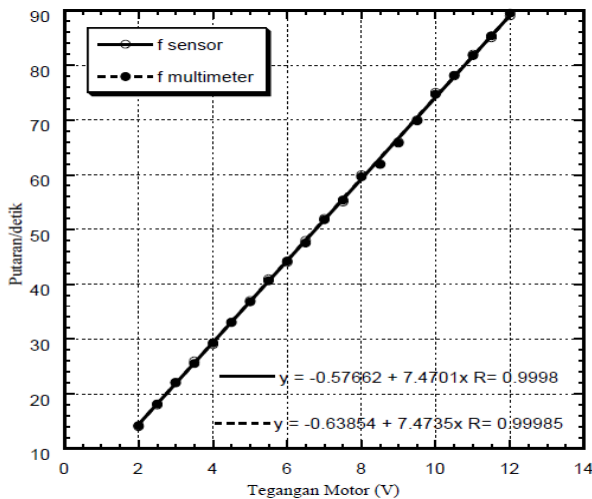
C. Pengukuran Putaran

Karakteristik sensor GMR yang peka terhadap adanya medan magnet eksternal dapat dimanfaatkan untuk menghitung pulsa yang ditimbulkan oleh medan magnet tetap yang ditempelkan pada suatu roda atau motor, sehingga dapat diaplikasikan sebagai suatu sensor putaran, seperti tampak pada Gambar 16.



Gambar 16. Setting sensor GMR untuk sensor putaran [16].

Sensor magnet GMR mendeteksi putaran ketika magnet tetap yang melekat pada piringan roda bergerak menjauh dan mendekati sensor, akibatnya akan timbul pulsa-pulsa dari rangkaian sensor. Pulsa-pulsa ini kemudian dihitung dengan menggunakan pemisah mikrokontroler, dan ditampilkan langsung pada display *seven segment*. Hasil pengukuran sensor putaran ini diperlihatkan dalam Gambar 17, dimana diperoleh hubungan yang linear antara tegangan motor dengan banyaknya putaran/perdetik motor yang tercacah.

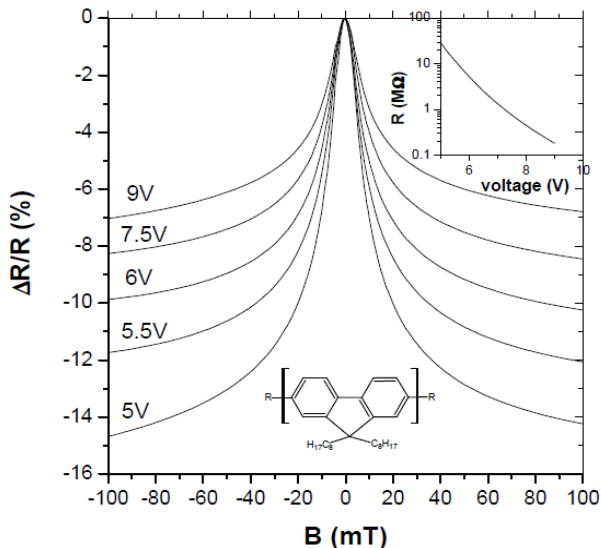


Gambar 17. Tegangan keluaran motor terhadap putaran/detik^[16].

D. Pengembangan material GMR berbasis material organik (OMAR)

Dalam struktur sandwich GMR yang telah dikembangkan digunakan lapisan pemisah (non ferromagnetik) berbasis material anorganik. Pengembangan penelitian material GMR yang dilakukan saat ini adalah pengembangan material sensor GMR baru berbasis material organik (OMAR).

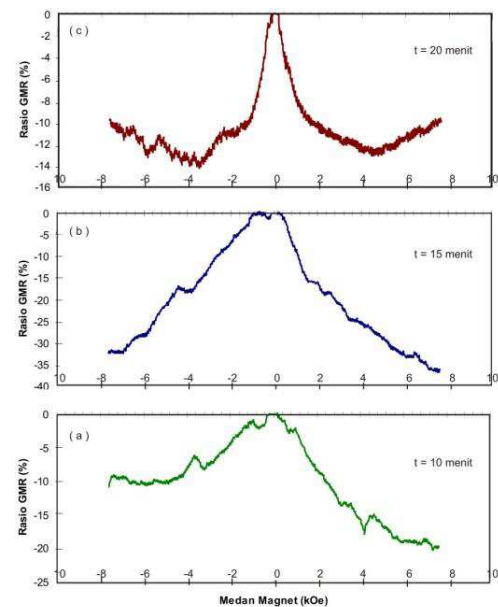
Pada awalnya, OMAR ditemukan dalam divais *sandwich polyfluorene* (PFO) oleh Francis, dkk^[17]. Kurva rasio magnetoresistance untuk tegangan yang berbeda-beda yang mereka peroleh diperlihatkan dalam Gambar 18. Mereka memperoleh rasio magnetoresistance maksimum 13,5 %.



Gambar 18. Kurva magnetoresistance yang diukur pada suhu ruang yang diperoleh oleh Francis, dkk. Inset: Resistansi divais sebagai fungsi tegangan^[17].

Selain PFO, material organik seperti polimer π -conjugated dan semikonduktor organik juga memperlihatkan efek *magnetoresistance*, yang mana telah diperoleh lebih dari 10% rasio GMR pada suhu ruang dan pada medan magnet rendah^[17,18]. Penemuan ini membuka jalan pada bidang baru yang menjanjikan yang dinamakan *organic spintronics*. Dalam *organic spintronic* digunakan material organik untuk mengontrol atau sebagai perantara sebuah sinyal *spin-polarized*^[19].

Terkait dengan material sensor GMR baru ini, penelitian yang dilakukan di Laboratorium Fisika Material Elektronik ITB telah berhasil menumbuhkan struktur *sandwich* NiCoFe/Alq3/NiCoFe dengan metode *dc-Opposed Target Magnetron Sputtering* (dc-OTMS) di atas substrat Si (100). Pembuatan target NiCoFe dilakukan dengan reaksi padatan dengan perbandingan molar Ni:Co:Fe = 60:30:10. Nilai rasio *magnetoresistance* maksimum yang diperoleh sekitar 35,5% pada suhu ruang dengan lama penumbuhan 15 menit^[20]. Kurva rasio magnetoresistansi dari lapisan tipis NiCoFe/Alq3/NiCoFe ditunjukkan dalam Gambar 19.

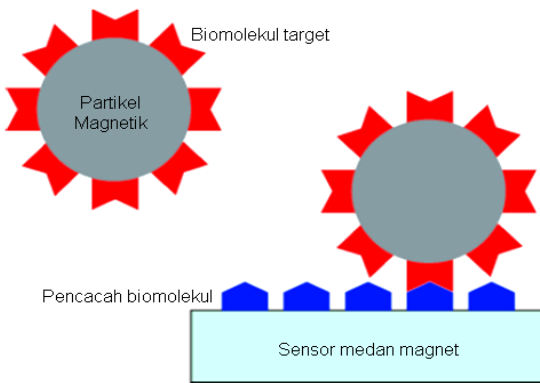


Gambar 19. Kurva rasio GMR sandwich NiCoFe/Alq3/NiCoFe pada suhu kamar dengan lama penumbuhan: (a) 10 menit (b) 15 menit, dan (c) 20 menit^[20].

IV. TREND PENGEMBANGAN GMR KE DEPAN

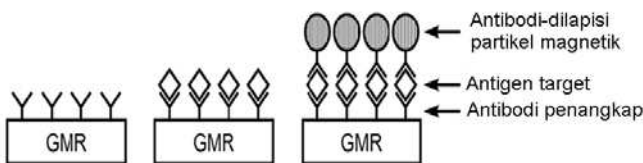
GMR memiliki potensi untuk dikembangkan ke arah biosensor, dan pengembangannya diharapkan dapat memberikan implikasi yang luas dalam pengobatan, diagnosa klinis untuk perawatan, pengembangan obat farmasi, dan penelitian genomik dan proteomika.

Biosensor memanfaatkan medan magnet untuk pengikatan partikel-partikel magnetik biomolekul target seperti tampak pada Gambar 20.



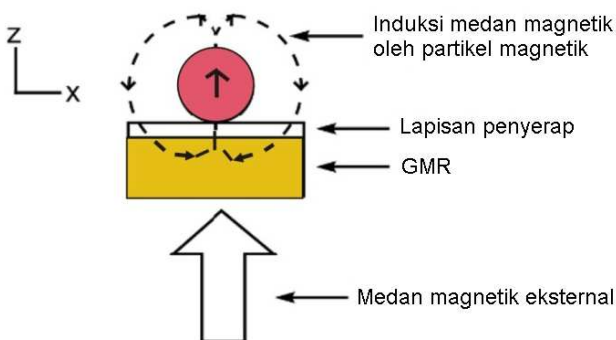
Gambar 20. Skema pendeteksian biomolekul secara magnetik pada biosensor.

Pada Gambar 21 diilustrasikan proses penggabungan struktur GMR dalam penginderaan bakteri oleh Millen^[21]. Modifikasi area penginderaan GMR dilakukan untuk memungkinkan pengikatan antibodi. Ketika struktur GMR terkena larutan sampel yang mengandung antigen sasaran, terbentuk ikatan kompleks antara antigen target dan antibodi. Hal ini diikuti dengan penambahan lapisan antibodi-partikel magnetik yang kemudian dilapisi antigen target hingga membentuk lapisan seperti struktur sandwich.



Gambar 21. Penginderaan bakteri menggunakan biosensor GMR^[21].

Untuk mendeteksi lapisan partikel magnetik pada struktur permukaan GMR, medan magnetik luar diaplikasikan dalam arah sumbu-z, seperti dilukiskan pada Gambar 22^[22].



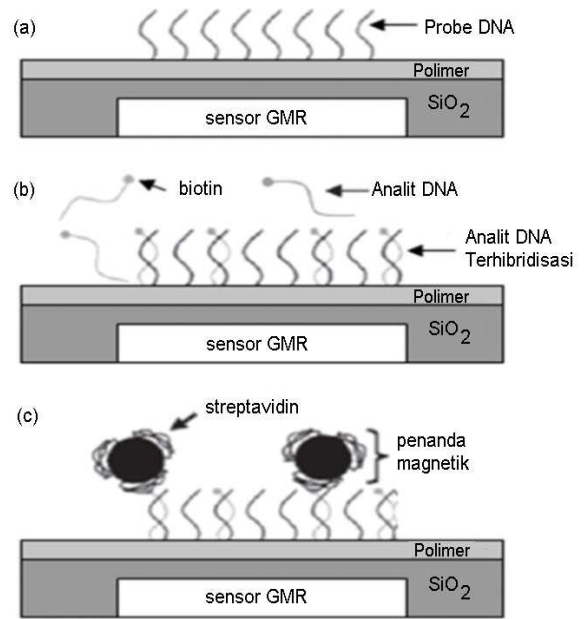
Gambar 22. Pendeteksian partikel magnetik pada biosensor GMR^[22].

Biosensor GMR mendeteksi penyimpangan medan dari tag magnetik untuk menyimpulkan banyaknya analit yang ditangkap. Lapisan batas partikel magnetik yang terekspose oleh medan magnet akan menghasilkan induksi magnetik di arah-x. Karenanya struktur GMR hanya mendeteksi medan magnet dalam arah-x, medan magnet eksternal dalam arah-z tidak memberikan pengaruh pada pendeteksian.

Hambatan sensor GMR akan berubah bila medan magnet dikenakan pada sensor, sehingga biomolekul yang dilabeli secara magnetis dapat menghasilkan sinyal. Jika dibandingkan dengan pendeteksian optik yang saat ini banyak digunakan dalam biomedis, keunggulan sensor GMR adalah

lebih sensitif, portabel dan dapat memberikan pembacaan elektronik sepenuhnya^[23].

Selain itu, sensor GMR murah dan fabrikasinya saat ini kompatibel dengan teknologi VLSI (*Very Large Scale Integration*), sehingga sensor GMR dapat dengan mudah diintegrasikan dengan rangkaian elektronik dan mikrofluida untuk mendeteksi banyak analit yang berbeda pada sebuah chip tunggal. Salah satu contoh penerapan biosensor GMR adalah pada pendeteksian DNA. Pada Gambar 23 diilustrasikan langkah-langkah pendeteksian DNA oleh biosensor.



Gambar 23. Prinsip biosensor GMR: (a) immobilisasi probe DNA; (b) hibridisasi DNA dari analit (c) pengikatan penanda magnetik dan deteksi medan oleh biosensor GMR^[23].

V. KESIMPULAN

GMR memiliki potensi sebagai pengindera medan magnet yang cukup potensial, hal ini didasarkan pada karakteristik yang dimiliki yaitu rasio *magnetoresistansi* yang tinggi, sifat-sifat magnetik dan elektrik yang baik. Teknologi nano memungkinkan GMR dibuat dalam ukuran sekecil mungkin, kompak, dengan biaya produksi yang lebih murah. Potensi pengembangan GMR ke depan sebagai biosensor sangat potensial terutama untuk instrumen biomedis.

PUSTAKA

- [1] M. Djamal, *Sensor dan Sistem Sensor: State of The Art, Kontribusi dan Perspektif Pengembangannya di Masa Depan*, Bandung 2010.
- [2] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensor*, New York, Springer-Verlag New York Inc, 1996.
- [3] S. Tumanski, *Thin Film Magnetoresistive Sensors*, IoP Publishing, London, 2001.
- [4] NVE Corporation, Application Notes, www.nve.com, 2007.
- [5] M. Han, D. F. Liang, L. J. Deng, Sensors development using its unusual properties of Fe/Co-based amorphous soft magnetic wire, *Journal of Materials Science*, 40, 5573-5580, 2005.
- [6] M. N. Baibich, et. al, "Giant Magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr Magnetic Superlattices", *J. Phys. Rev. Lett.* 68 pp. 2472 – 2475, 1998.

- [7] J. Mathon, *Phenomenology Theory of Giant Magnetoresistance, dalam Spin Electronics*, ed. By M. Ziese and Thornton, M.J., Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [8] A. Fert, A. Barthelemy, and F. Petroff, "Spin Transport in Magnetic Multilayers and Tunnel Junctions", dalam *Contemporary Concepts of Condensed Matter Science, Nanomagnetism: Ultrathin films, multilayers and nanostructures*, Elsevier B.V., Amsterdam, 2006.
- [9] K. Wasa, M. Kitabatake, H. Adachi, *Thin Film Materials Technology, Sputtering of Compound Materials*, William Andrew. Inc, NY, 2004.
- [10] M. Naoe, Y. Hoshi, and S. Yamanaka, Facing targets type of sputtering method for deposition of magnetic metal films at low temperature and high rate, *IEEE Trans.Magn., MAG-18*, 646-648, 1980.
- [11] T. Saragi, Pengembangan Reaktor Opposed-Target Magnetron Sputtering (OTMS) untuk Penumbuhan Lapisan Tipis Giant Magnetoresistance (GMR), *Disertasi Program Doktor Departemen Fisika, Institut Teknologi Bandung*, 2005.
- [12] M. Djamal, Pengembangan Material *Giant Magnetoresistance (GMR) dan Aplikasinya untuk Sensor Getaran*, Laporan Penelitian Program Riset KK-ITB, November 2008.
- [13] M. Djamal, Ramli, Giant Magnetoresistance, dalam *Kapita Selektta Fisika Teoritik Energi Tinggi dan Instrumentasi*, Penerbit ITB Bandung, 2009.
- [14] Ramli, A. H. Muhtadi, M. F. Sahdan, Freddy Haryanto, Khairurrijal and Mitra Djamal, The Preliminary Study of Giant Magnetoresistance Sensor for Detection of Oxygen in Human Blood, *Proceeding 4rd Asian Physic Symposium (APS) 2010*, Bandung, 12 – 13 Oktober 2010.
- [15] M. Djamal, R.N. Setiadi, Current Sensor Instrument Using GMR Magnetic Sensor, *Proceedings on International Conference on Instrumentation, Communication and Information Technology (ICICI 2005)*, Bandung, Indonesia, 3-5 Agustus, 2005.
- [16] M. Djamal, R.N. Setiadi, Rotation Speed Measurement Using GMR Magnetic Sensor, *Proceedings on International Conference on Instrumentation, Communication and Information Technology (ICICI 2005)*, Bandung, Indonesia, 3-5 Agustus, 2005.
- [17] T.L. Francis, O. Mermer, G. Veeraraghavan, M. Wohlgenannt, Large magnetoresistance at room temperature in semiconducting polymer sandwich devices, *New J. Phys.* 6, p.185, 2004.
- [18] J. Kalinowski, M. Cocchi, D. Virgili, P. Di Marco, and V. Fattori, Magnetic field effects on emission and current in alq3-based electroluminescent diodes, *Chem. Phys. Lett.* 380 (2003) p.710.
- [19] Dediu V, Murgia M, Maticotta F C, Taliani C and Barbanera S, Room temperature spin polarized injection in organic semiconductors, *Solid State Commun.* 122 181 (2002).
- [20] M. Djamal, Ramli, R. Wirawan, Widyaningrum, Khairurrijal, Pengembangan Material Sensor *Giant Magnetoresistance* Berbasis Material Organik, SIBF 22 Desember 2010, ITB Bandung.
- [21] Millen RL, Kawaguchi T, Granger MC, Porter MD, Giant Magnetoresistive Sensors and Superparamagnetic Nanoparticles: A Chip-Scale Detection Strategy for Immunosorbent Assays". *Anal. Chem.* 77, 6581–6587, 2005.
- [22] J.C. Rife, M.M. Miller, P.E. Sheehan, C.R. Tamanaha, M. Tondra and L.J. Whitman, Design and performance of GMR sensors for the detection of magnetic microbeads in biosensors, *Sens. Actuator A:Physical* 107, 209-218, 2003.
- [23] J. Schotter, P.B. Kamp, A. Becker, A. Puhler, G. Reiss and H. Brückl, Comparison of a prototype magnetoresistive biosensor to standard fluorescent DNA detection, *Biosensors and Bioelectronics* 19 (10), 1149 -1156, 2004.