

prof. dr hab. inż. SŁAWOMIR TUMAŃSKI

Politechnika Warszawska

## GMR – gigantyczny magnetoopór

W ostatnich latach trudno znaleźć równie spektakularny sukces w porównaniu z tym jaki odniosło odkrycie około dziesięć lat temu [1] zjawisko gigantycznego magnetooporu (GMR). Jeden z odkrywców tego zjawiska Parkin z IBM, w dziesięciolecie GMR napisał w artykule zatytułowanym „The magic of magnetic multilayers” : „*within less than a decade, magnetic multilayers have evolved from a scientific curiosity to become materials of significant technological importance*” [2].

Wszystkie najważniejsze koncerny branży komputerowej i audiowizualnej, takie jak IBM, Philips, Seagate, Sony, Kodak angażują olbrzymie środki na prace w tej dziedzinie. Literatura dotycząca GMR liczy już tysiące pozycji [3]. Prace nad GMR przyczyniły się do powstania nowej, dziedziny nauki i techniki nazywanej elektroniką spinową, inżynierią spinową lub magnetoelektroniką [4].

Do popularności zjawiska GMR przyczyniła się też znakomita marketingowo nazwa (odkrywcy magnetooporu w niektórych stopach ziem rzadkich poszli jeszcze dalej nazywając swoje zjawisko kolosalnym magnetooporem - colossal magnetoresistance – CMR [5]). Przede wszystkim jednak GMR trafił w oczekiwania przemysłu związanego z magnetycznym zapisem informacji [6]. Na świecie trwa walka między zapisem informacji: optycznym i magnetycznym. A jest o co walczyć, ponieważ tylko rynek związany z zapisem informacji komputerowej szacowany jest na około 100 miliardów dolarów rocznie (do tego dochodzi nowy rynek związany z rozwojem fotografii cyfrowej). Wynalezienie i opracowanie zapisu na płytach typu CD o gęstości zapisu około 600 MB/in<sup>2</sup> w praktyce oznaczało koniec klasycznej głowicy indukcyjnej, dla której górną granicą jest gęstość około 100 MB/in<sup>2</sup> [6]<sup>1</sup>. Wynaleziona przez Hunta w latach siedemdziesiątych [7] odczytowa głowica magnetoerezystancyjna [8] wykorzystująca zjawisko AMR (anisotropic magnetoresistance) broniła się dość długo, umożliwiając osiągnięcie gęstości rzędu 1 GB/in<sup>2</sup>. Ale pojawienie się zapisu na płytach DVD o gęstości około 3 GB/in<sup>2</sup> znowu podważyło sens zapisu magnetycznego.

GMR osiągający zmianę rezystancji nawet rzędu 200% (w porównaniu z 2% przy zjawisku AMR) oznaczał nową szansę dla zapisu magnetycznego. Wprawdzie w praktycznych realizacjach GMR rzadko udaje się osiągnąć zmianę rezystancji większą niż 20%, ale i tak nowej generacji głowice odczytowe wykorzystujące GMR bez trudu osiągają gęstości rzędu kilkudziesięciu GB/in<sup>2</sup>. Każdy miesiąc przynosi kolejny rekord w tej dziedzinie. Aktualnie IBM wykonuje głowice o gęstości odczytu 26 GB/in<sup>2</sup>, a Seagate o gęstości 33 GB/in<sup>2</sup> [9]. W zeszłym roku padł kolejny rekord – Seagate wykonał udany prototyp głowicy o gęstości 100 GB/in<sup>2</sup> zapowiadając, że następna granica 1000 GB/in<sup>2</sup> (1 TB/in<sup>2</sup>) zostanie pokonana przed 2005 rokiem [9].

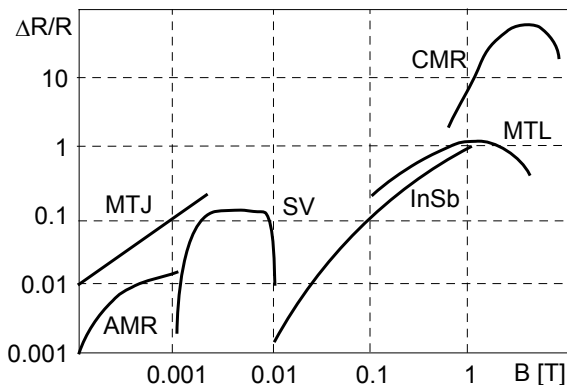
Zjawisko GMR mogło powstać dzięki postępowi technologicznemu umożliwiającemu wytwarzanie elementów o rozmiarach porównywalnych z rozmiarami atomu – tak zwanej nanotechnologii [10,11]. Wykonane elementy o tych rozmiarach wykazują zupełnie nowe, odmienne cechy, często nie dające się wytłumaczyć. Tak na przykład najnowsze zjawisko GMR, zjawisko tunelowe (MTJ – magnetic tunnel junction) polega na przedzieleniu dwóch cienkich warstw z materiału ferromagnetycznego jeszcze cieńszą, o grubości kilku atomów, warstwą izolatora. W myśl fizyki klasycznej taki element nie powinien przewodzić prądu, ale w myśl fizyki kwantowej jest to doskonały element magnetoerezystancyjny. W tradycyjnie wytwarzanych elementach magnetycznych źródłem szumu są ruchy ścian domenowych. Ale gdy rozmiary elementu są mniejsze niż grubość ściany domenowej taki element charakteryzuje się bardzo krótkimi czasami przemagnesowania, nawet rzędu pikosekund, co umożliwia konstrukcję elementów pamięciowych nowej generacji (tzw. MRAM – magnetic random access memory).

Rysunek 1 przedstawia porównanie różnych zjawisk magnetoerezystancyjnych. Symbolem InSb oznaczono dotychczas wykorzystywane zjawisko magnetoerezystancyjne występujące w strukturach półprzewodnikowych (tzw. gaussotrony), symbolem AMR zjawisko magnetoerezystancyjne w cienkowarstwowych strukturach permalojowych, a symbolem CMR kolosalne zjawisko magnetoerezystancyjne. Zjawiska z grupy GMR oznaczono jako: MTL (zjawisko w strukturach

---

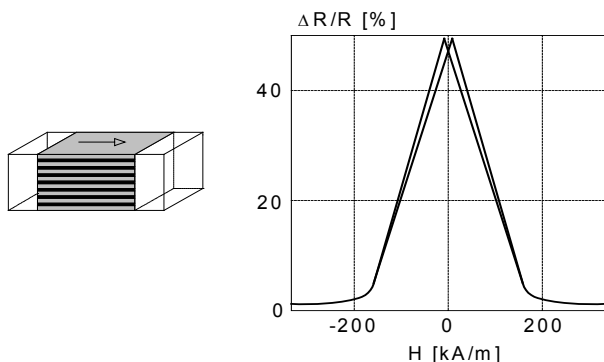
<sup>1</sup> Gęstość zapisu tradycyjnie podaje się w bajtach na cal, przejście do układu SI możliwe jest przy zastosowaniu konwersji: 1GB/in<sup>2</sup>= 1.55 MB/mm<sup>2</sup>.

wielowarstwowych – multilayer structures), SV (zawór spinowy – spin valve) i MTJ (zjawisko tunelowe). Największe nadzieje wiąże się ze zjawiskiem tunelowym, które wprawdzie charakteryzuje się współczynnikiem magnetorezystywności nie przekraczającym kilkunastu procent, ale za to występuje przy relatywnie małych wartościach pola magnetycznego.



Rys. 1. Porównanie różnych zjawisk magnetorezystancyjnych (opis w tekście)

Rysunek 2 przedstawia typowy czujnik typu GMR. Zjawisko GMR powstaje w elemencie złożonym z dwóch cienkich warstw ferromagnetycznych przedzielonych bardzo cienką warstwą z materiału niemagnetycznego, na przykład Co/Cu/Co. Dla wzmocnienia efektu strukturę tę zwielokrotnia się tworząc element wielowarstwowy (multilayer). I tak na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę przetwarzania czujnika o następującej strukturze: na podłożu krzemowe naniesiono warstwę żelaza o grubości 5nm, następnie 16 warstw Co/Cu o grubości odpowiednio 1 nm i 0,9 nm i wreszcie znowu naniesiono warstwę żelaza o grubości 5 nm.

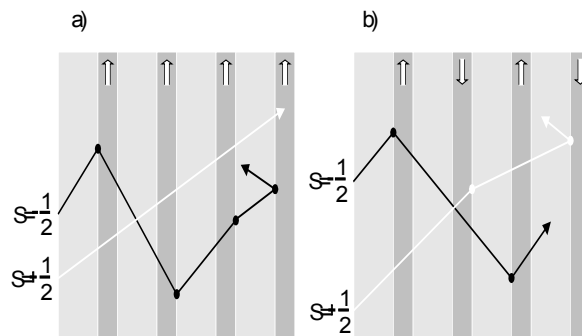


Rys.2. Struktura i charakterystyka przetwarzania czujnika GMR typu MTL (multilayer)

Do wyjaśnienia zjawiska GMR najczęściej wykorzystuje się heurystyczny model zaproponowany przez White [12] i przedstawiony na rysunku 3.

Zjawisko GMR powstaje na skutek rozpraszania elektronów na granicy między materiałem magnetycznym a przekładką, przy czym rozpraszanie to zależy od wzajemnego stosunku kierunku namagnesowania warstwy i kierunku spinu elektronu. Rozpraszanie jest najmniejsze gdy kierunki te są zgodne. Jeśli dwie warstwy ferromagnetyczne zbliżą się do siebie dostatecznie blisko to na skutek sprzężenia między nimi warstwy te magnesują się antyrównoległe (rys.3b). Umieszczenie struktury w polu magnetycznym o dostatecznie dużej wartości przewycięża sprzężenie

między warstwami i stają się one wtedy namagnesowane równoległe (rys.3a). W stanie początkowym (dla H=0) warstwy są namagnesowane antyrównoległe i elektrony są rozpraszane praktycznie na co drugiej przekładce niezależnie od ich spinu. Gdy warstwy stają się namagnesowane równoległe (dla H > 0) co najmniej połowa elektronów o spinie zgodnym z kierunkiem namagnesowania przemieszcza się przez materiał prawie bez rozpraszania. Tak więc po umieszczeniu czujnika w polu magnetycznym jego rezystancja gwałtownie maleje na skutek przemagnesowania warstw ze stanu antyrównoległego do równoległego.



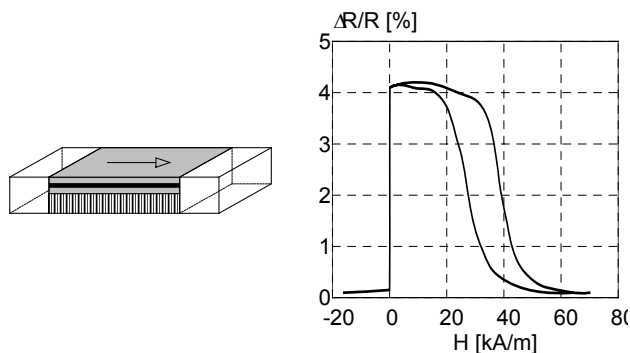
Rys.3. Model zjawiska GMR

Modele matematyczne zjawiska GMR są na ogół bardzo złożone. Analiza bilansu energetycznego modelu uproszczonego pozwala na opisanie zjawiska GMR przy pomocy następującej zależności [3]

$$R(H) = R_p + (R_{ap} - R_p) \left[ 1 - \frac{H^2}{(H_1 + H_k)^2} \right] \quad (1)$$

w której:  $R_p$  i  $R_{ap}$  – rezystancja struktury w stanie namagnesowania równoległym i antyrównoległym,  $H_1$  – pole sprzężenia między warstwami ( $H_1 = 4J/\mu_0 Mt$ ),  $H_k$  – pole anizotropii ( $H_k = 2K/M$ ),  $M$  – namagnesowanie warstwy,  $t$  – grubość warstwy,  $J$  – współczynnik sprzężenia,  $K$  – stała anizotropii.

Ponieważ pole sprzężenia ma dość znaczną wartość, rzędu kilkuset kA/m, to w celu uzyskania zjawiska GMR konieczne jest namagnesowanie czujnika polem zewnętrznym o równie dużej wartości. Mimo więc największego (spośród czujników typu GMR) współczynnika magnetorezystywności (rekord to ok. 220% [13]) struktury typu MTL są stosowane coraz rzadziej i mają raczej znaczenie historyczne. Zostały one zastąpione przez strukturę typu zawór spinowy zaproponowaną przez Dieny [9].



Rys.4. Struktura i charakterystyka przetwarzania czujnika GMR typu zawór spinowy

W elemencie typu zawór spinowy (rys.4) zwiększono grubość przekładki dzięki czemu znacznie zmniejszono sprężenie między warstwami magnetycznymi. Sprężenie to już jest jednak za małe żeby wywołać antyrównoległe namagnesowanie warstw i dlatego jedną z warstw podmagnesowuje się do stanu antyrównoległego przez naniesienie warstwy materiału antyferromagnetycznego, zazwyczaj FeMn albo NiO.

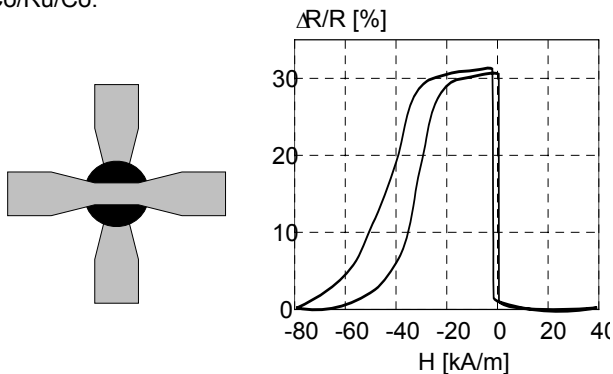
Zależność zmiany oporności od natężenia pola magnetycznego dla struktury typu SV można opisywać równaniem [3]

$$R(H) = R_p - \frac{R_{ap} - R_p}{2} \left( 1 - \frac{H - H_p - H_1}{H_k} \right) \quad (2)$$

w którym:  $H_p$  – pole podmagnesowujące ( $H_p = J_p / \mu_0 M_t$ ),  $J_p$  – współczynnik sprężenia antyferromagnetycznego.

Jak wynika z równania (2) pole podmagnesowujące odejmuje się od pola sprężenia (które i tak jest mniejsze niż w przypadku struktur MTL). Dzięki temu czujnik typu SV ma znacznie większą czułość niż czujniki MTL mimo, że współczynnik magnetorezystywności jest w tym przypadku relatywnie mały (największa odnotowana w literaturze wartość jest rzędu 20% [15]). Do celów praktycznych wykorzystuje się tylko początkowy, najbardziej stromy odcinek charakterystyki przedstawionej na rysunku 4. Charakterystyka przedstawiona na rysunku 4 została wyznaczona dla następującej struktury: na warstwę permaloju o grubości 6 nm naniesiono warstwę miedzi o grubości 2,2 nm, następnie drugą warstwę permaloju (4nm) i wreszcie warstwę FeMn o grubości 7 nm.

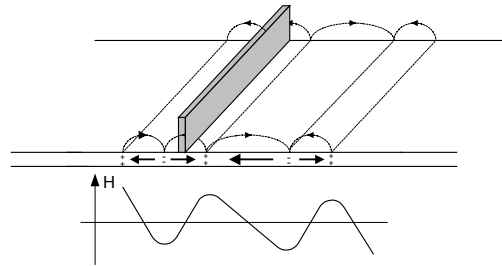
Wadą struktur typu SV podmagnesowanych przy wykorzystaniu warstwy materiału antyferromagnetycznego jest mała odporność FeMn na korozję. Próbuje się zastąpić materiał antyferromagnetyczny tzw. „syntetyczną strukturą antyferromagnetyczną” [16]. Rolę warstwy antyferromagnetycznej spełnia w tym przypadku „klasyczny” element typu MTL, na przykład struktura Co/Ru/Co.



Rys.5. Struktura i charakterystyka przetwarzania czujnika typu TMJ

Największe nadzieje wiąże się z czujnikami wykorzystującymi efekt tunelowy, głównie ze względu na ich największą czułość. Zjawisko tunelowe było znane już od dawna i teoretycznie uzasadnione przez Słoneczkowskiego [17]. Brakowało możliwości technologicznych do wytworzenia bardzo cienkiej (o grubości mniejszej niż 2 nm) warstwy izolatora. Nawet drobny defekt tak cienkiej warstwy tzw. „pin hole” niszczył całą strukturę. W ostatnich latach udało się na tyle opanować technologię złączy TMJ, że stosowane są one już na skalę przemysłową. Warstwę izolatora wytwarza się zazwyczaj nanosząc cienką warstwę aluminium, którą następnie poddaje się procesowi utleniania. Taka warstwa

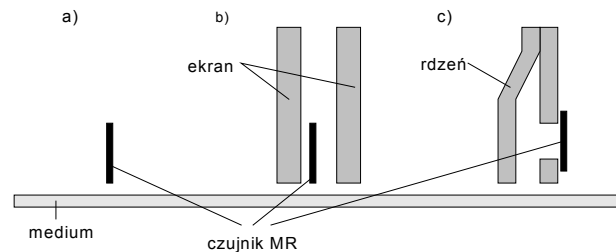
izolatora znajduje się między dwoma cienkimi warstwami ferromagnetycznymi, z których jedna podmagnesowana jest przez warstwę antyferromagnetyczną (podobnie jak to ma miejsce w przypadku zaworów spinowych). Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę czujnika o strukturze: MnFe/CoFe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoFe.



Rys.6. Zasada działania magnetorezystancyjnej głowicy odczytowej

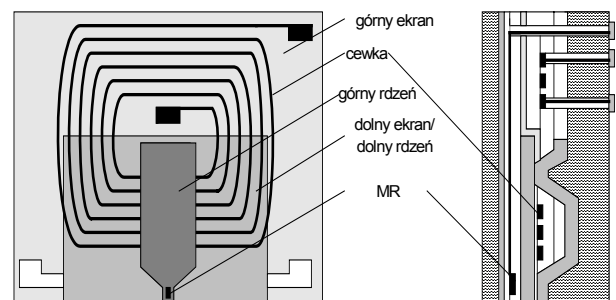
Czujniki typu GMR największe zastosowanie znalazły w odczytowych głowicach do zapisu danych na dysku lub taśmie. Ocenia się, że żeby odczytywać informacje z gęstością większą niż 10 Gbit/cal<sup>2</sup> czujnik powinien być mniejszy niż jeden mikrometr.

Zasadę działania głowicy magnetorezystancyjnej ilustruje rys.6. Czujnik przemieszczany jest nad dyskiem lub taśmą z cyklicznie namagnesowanego materiału magnetycznie twardego (przy zapisie o gęstości rzędu 10 GB/in<sup>2</sup> pojedynczy bit zajmuje obszar rzędu 0.1 μm). Bezpośredni odczyt przy wykorzystaniu pojedynczego czujnika (rys.7a) stosowany jest raczej rzadko (np. w czytnikach kart kredytowych). Zazwyczaj dla zwiększenia gęstości odczytu czujnik umieszcza się między dwoma ekranami – jak to przedstawiono na rysunku 7b.



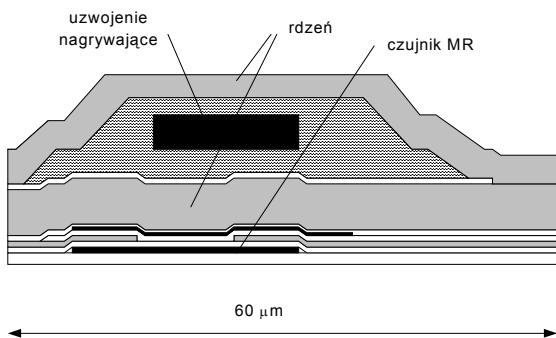
Rys.7. Typowe magnetorezystancyjne głowice odczytowe: a) odczyt bezpośredni, b) w ekranie, c) z wykorzystaniem rdzenia

Głowica magnetorezystancyjna unosi się nad dyskiem w niewielkiej odległości rzędu 30-50nm. W przypadku taśmy stwarza to zagrożenie nagrzewania się czujnika. Dlatego do zapisów taśmowych stosuje się nieco inną konstrukcję głowicy, gdzie czujnik jest oddalony od medium a rdzeń spełnia rolę koncentratora strumienia (rys.7c).



Rys.8. Konstrukcja głowicy magnetorezystancyjnej w wykonaniu IBM, wg. [18]

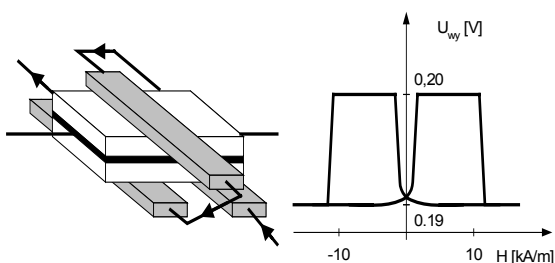
Typowa głowica składa się z indukcyjnej głowicy nagrywającej i magnetorezystancyjnej głowicy odczytowej. Przykład takiej głowicy o rozmiarach elementu GMR rzędu  $1 \mu\text{m}$  przedstawiono na rysunku 8. Przewiduje się, że głowica umożliwiająca odczyt informacji z gęstością  $100 \text{ GB/in}^2$  powinna mieć rozmiary poniżej  $0.2 \mu\text{m}$  [18].



Rys.9. Głowica magnetorezystancyjna stosowana przez firmę Philips w cyfrowym zapisie dźwięku typu DCC, wg. [19]

Na rysunku 9 przedstawiono przykład głowicy stosowanej przez firmę Philips w taśmowym zapisie informacji DCC (digital compact cassette).

Innym ważnym zastosowaniem zjawiska magnetorezystancyjnego jest konstrukcja elementów pamięciowych. Przewiduje się, że elementy takie mogą charakteryzować się konkurencyjnymi parametrami w porównaniu z elementami półprzewodnikowymi, a więc powinny być szybsze, tańsze i co jest ważne, nie wymagają zasilania aby zachować informację w długim okresie czasu. Rys.10 przedstawia zasadę działania takiego elementu pamięciowego. Zmiana stanu namagnesowania elementu pamięciowego zależy od kombinacji kierunku prądu w elemencie i kierunku prądu w szynie przewodzącej prąd magnesujący. Powstały już udane modele pamięci wykorzystujące złącza tunelowe [21].

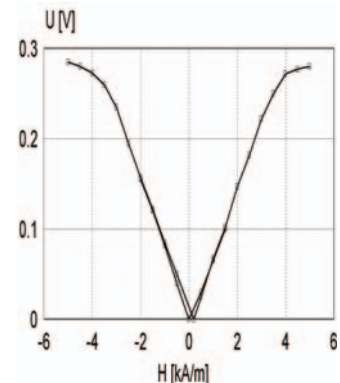
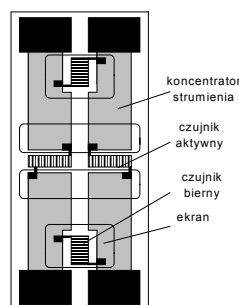


Rys.10. Konstrukcja elementu pamięciowego typu MRAM i jego charakterystyka przełączeniowa, wg. [20]

Liderem w dziedzinie wykorzystania zjawiska GMR jest firma Nonvolatile Electronics [22]. Na rysunku 11 przedstawiono przykład czujnika pola magnetycznego o wymiarach  $1,3 \times 0,4 \text{ mm}$  oraz charakterystykę przetwarzania tego czujnika. Dwa elementy GMR umieszczone są w szczelinie cienkowarstwowego koncentratora strumienia, a dwa bierne elementy (do kompensacji błędów temperaturowego) zasłonięte są cienkowarstwowym ekranem. Wprawdzie czułość elementu nie jest zbyt wielka, ale duży sygnał wyjściowy umożliwia stosowanie tego czujnika w praktyce bez wzmacniacza wyjściowego.

Na rysunku 12 przedstawiono inny przykład zastosowania zjawiska magnetorezystancyjnego - w systemach oddzielenia galwanicznego. Zmiana rezystancji

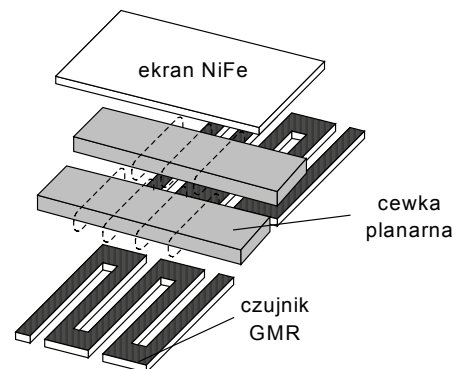
czujnika wywołwana jest przez zmianę prądu przepływającego przez cienkowarstwową planarną cewkę. Tego typu układy produkowane przez firmę NVE mogą służyć do cyfrowej transmisji danych. Charakteryzują się one szybkościami transmisji porównywalnymi z układami optycznymi przy mniejszych rozmiarach elementu i łatwiejszej integracji z elektroniką półprzewodnikową. Przetworniki te mogą być także stosowane w układach analogowych jako oddzielenie galwaniczne.



Rys.11 Czujnik pola magnetycznego w wykonaniu firmy NVE i jego charakterystyka przetwarzania

Zjawisko GMR jest obecnie dominującym tematem większości konferencji poświęconych magnetyzmowi. Trudno jest powiedzieć na ile jest to moda nowość a na ile jest to trwały element techniki. Może się tak zdarzyć, że postęp w dziedzinie zapisu optycznego związany z zastosowaniem niebieskiego lasera znowu podważy sens zapisu magnetycznego.

W przypadku elementów pamięciowych udane są próby z czasami przełączania w zakresie pikosekundowym. Zwraca się uwagę, że magnetoelektronika jest odporna na promieniowanie jonizujące (zastosowania militarne). Z drugiej strony elementy magnetyczne i tak zazwyczaj zintegrowane są z elektroniką półprzewodnikową. Historia techniki zna już fascynację magnetycznymi elementami pamięciowymi typu bubble, którymi dzisiaj się już nikt nie zajmuje.



Rys.12. Zastosowanie czujnika GMR w układzie oddzielenia galwanicznego, wg. [23]

Jako czujniki pola magnetycznego elementy GMR charakteryzują się dużym sygnałem wyjściowym (praca bez konieczności stosowania wzmacniacza). Ostatnio firma Siemens zaprzestala produkcji magnetorezystorów półprzewodnikowych zastępując je czujnikami GMR, przeznaczonymi przede wszystkim do konstrukcji przetworników prędkości obrotowej (np. w systemach ABS). Ale magnetorezystory typu AMR są znacznie prostsze i

tańsze przy podobnych parametrach (i to bez konieczności stosowania koncentratora strumienia).

Badania nad zjawiskiem GMR już odegrały ważną rolę w historii techniki. Przyczyniły się do znacznego rozwoju fizyki magnetyzmu oraz nanotechnologii. W tej ostatniej dziedzinie konstruktorzy ocierają się już o granicę tworzenia. W technologii nazywanej przez Parkina „spin engineering” strukturę cienkowarstwową tworzy się już bowiem niemal „atom po atomie”. W Polsce struktury cienkowarstwowe typu GMR wytwarzane są w Instytucie Fizyki Molekularnej PAN w Poznaniu oraz w Akademii Górniczo Hutniczej [24].

### Literatura

1. M.N. Baibich i inni – Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices, Phys. Rev. Lett., 61 (1988), 2472-2475
2. Specjalny numer IBM.J. Res. Develop. poświęcony zjawisku GMR, 42 (1998)
3. S. Tumański – Thin film magnetoresistive sensors, IOP Publ., 2000
4. Specjalny numer Physics Today poświęcony elektronice spinowej, nr.5 (1995)
5. Jin S. I inni – Colossal magnetoresistance in La-Ca-Mn-O ferromagnetic thin films, J.Appl.Phys., 76 (1994), 6929-6933
6. R. I. Comstock – Magnetism and magnetic recording, John Wiley, 1999
7. R.P. Hunt – Magnetoresistive head, US Patent 3 493 694 (1970)
8. J.C. Mallinson – Magnetoresistive and spin-valve heads, Academic Press, 2002
9. D. Weller – Extremely high density magnetic recording media, Referat na konferencji JEMS, Grenoble, 2001
10. H.S. Nalwa – Magnetic nanostructures, ASP, 2002
11. U. Hartmann – Magnetic multilayers and giant magnetoresistance, Springer, 2000
12. R.L. White – Giant magnetoresistance: a primer, IEEE Trans. Magn., 28 (1992), 2482-2486
13. R. Schad – Giant magnetoresistance in Fe/Cr superlattices with very thin Fe layer, Appl.Phys.Lett., 64 (1994), 3500-3502
14. B. Dieny – Spin valve effect in soft ferromagnetic sandwiches, J.Magn.Magn.Mat., 93 (1991), 101-104
- [15] W.F. Egelhoff i inni – Magnetoresistance values exceeding 21% in symmetric spin valves, J.Appl.Phys., 78 (1995), 273-277
16. J.G. Zhu – Spin valve and dual spin valve heads with synthetic antiferromagnets, IEEE Trans. Magn., 35 (1999), 655-660
17. J.C. Slonczewski – Conductance and exchange coupling of two ferromagnets separated by a tunneling barrier, Phys. Rev., B39 (1989), 6995-7002
18. R.E. Fontana i inni – Process considerations for critical features in high areal density thin film magnetoresistive heads, IEEE Trans. Magn., 35 (1999), 806-811
19. J.J.M. Ruigrok – Design of thin film tape heads, Philips J.Res., 51 (1998), 21-57
20. S. Tehrani – High density submicron magnetoresistive random access memory, J.Appl.Phys., 85 (1999), 5822-5827
21. S.S.P. Parkin – Exchange-biased magnetic tunnel junction and application to nonvolatile magnetic random access memory, J. Appl. Phys., 85 (1999), 5828-5833
22. Nonvolatile Electronics, <http://www.nve.com>
23. T.M. Hermann – Magnetically coupled linear isolator, IEEE Trans. Magn., 33 (1997), 4029-4031
24. M. Czapkiewicz – Badania zjawisk galwanomagnetycznych w strukturach wielowarstwowych metali przejściowych pod kątem zastosowania na detektory i głowice magnetyczne, Praca doktorska, 1999