

## Badania wpływu grubości warstwy miedzi na efekt gigantycznego magnetooporu w cienkowarstwowych strukturach NiFe/Cu/NiFe

**Streszczenie.** W pracy opisane zostały podstawowe informacje dotyczące zjawiska gigantycznego magnetooporu, jak i struktur, w których zjawisko to jest obserwowalne. Przedstawiona została sekwencja technologiczna cienkich struktur NiFe/Cu/NiFe wykonanych metodą rozpylania magnetronowego. Dwie prezentowane serie struktur różnią się zastosowaną grubością warstwy niemagnetycznej miedzi wynoszącą 5 nm oraz 2,5 nm. Wykonane zostały pomiary rezystancji stałoprądowej struktur obu serii w stałym polu magnetycznym o wartości 0,5 T. Porównanie otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że zmiany rezystancji struktury w ramach zjawiska gigantycznego magnetooporu są większe dla przyrządu o mniejszej grubości warstwy miedzi.

**Abstract.** This paper describes the basic information about the phenomenon of giant magnetoresistance as well as the structures exhibiting in which this phenomenon is observable. The technological sequence of NiFe/Cu/NiFe thin structures fabricated by magnetron sputtering is presented. The two series of structures presented differ in the thickness of the non-magnetic copper layer used being 5 nm and at 2,5nm. Measurements of the DC resistance of the structures of both series in a constant magnetic field of 0.5 T were performed. Comparison of the obtained results allows us to conclude that the changes of the structure resistance under the giant magnetoresistance phenomenon are larger for smaller thickness of the copper layer. (Investigations of the influence of copper layer thickness on the giant magnetoresistance effect in NiFe/Cu/NiFe thin films)

**Słowa kluczowe:** magnetoresistance, magnetron sputtering, thin films, static magnetic field

**Keywords:** magnetorezystancja, rozpylanie magnetronowe, cienkie warstwy, statyczne pole magnetyczne

### Wstęp

Odkryty w 1988 przez dwa niezależne zespoły z Niemiec i Francji gigantyczny magnetoopór był powodem otrzymania przez głównych naukowców obu zespołów, Alberta Fertę oraz Petera Grünberga, nagrody Nobla z dziedziny fizyki. Zjawisko to, początkowo głównie wykorzystywane w głowicach dysków twardych, pozwoliło znacznie zwiększyć gęstość zapisu danych, co przekładało się na bezpośrednie udogodnienie mające wpływ na wszystkich ludzi. Obecnie, potencjał tego zjawiska tkwi w zastosowaniach detekcyjnych np. w roli czujników pola magnetycznego, prądu, jak i innych wielkości fizycznych; głównie w diagnostyce i medycynie. Nazwa gigantyczny magnetoopór (GMR – ang. Giant Magnetoresistance) została nadana przez odkrywców zjawiska. Może ona wzbudzać ciekawość ze względu na fakt, że nie odnosi się do mechanizmu zjawiska, a do jego widocznych konsekwencji.

Magnetoopór to ogólne określenie grupy zjawisk polegających na zmianie rezystancji struktury lub materiału pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego. W momencie odkrycia gigantycznego magnetooporu znany był już anizotropowy, w którym rezystancja materiału ferromagnetycznego ulega zmianom w zależności od kąta między wektorem działania zewnętrznego pola magnetycznego a kierunkiem przepływu prądu przez dany materiał. W przypadku gigantycznego magnetooporu zauważalne spadki rezystancji obserwowane w strukturach warstwowych były na tyle duże, w porównaniu ze zmianami rezystancji w ramach anizotropowego magnetooporu, że określone zostały jako gigantyczne i takie przyjęło się nazywać [1].

### Gigantyczne magnetoopór

Gigantyczna magnetorezystancja jest zjawiskiem zachodzącym w konkretnych strukturach i objawia się spadkiem rezystancji struktury pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego [2]. Podstawową strukturą, w której zjawisko to może być obserwowane, jest struktura warstwowa FM/NM/FM gdzie FM oznacza

materiał niemagnetyczny, zaś NM – materiał nie wykazujący silnych właściwości magnetycznych, a więc np. paramagnetyk lub diamagnetyk.

Osiągane zmiany rezystancji wyrażane są za pomocą współczynnika GMR wyrażanego wzorem:

$$(1) \quad \Delta R / R = \frac{R(H) - R(0)}{R(0)}$$

gdzie:  $R(H)$  – wartość rezystancji struktury w polu magnetycznym o natężeniu  $H$ ,  $R(0)$  – wartość rezystancji struktury w zerowym polu magnetycznym.

Mechanizm zauważalnych zmian rezystancji w polu magnetycznym opiera się na rozpraszaniu elektronów przewodnictwa w warstwach ferromagnetycznych oraz na interfejsach ferromagnetyk/niemagnetyk, w zależności od zgodności spinu danego elektronu z kierunkiem namagnesowania warstwy ferromagnetycznej. Przekłada się to na zmiany rezystancji struktury warstwowej w zależności od wzajemnych kierunków namagnesowania kolejnych warstw ferromagnetycznych. Elektrony przepływające przez strukturę rozpraszane są częściej w warstwie ferromagnetycznej, której domeny magnetyczne mają zwrot przeciwny do spinu danego elektronu. Wyróżniane są dwie graniczne konfiguracje tego typu struktury określane jako równoległa (ang. parallel) i antyrównoległa (ang. antiparallel) [3], [4].

Konfiguracja antyrównoległa jest idealnym stanem domyślnym struktury, gdy nie działa na nią zewnętrzne pole magnetyczne. Struktura w takiej konfiguracji ma największą rezystancję. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego skutkuje zmianą kierunku namagnesowania jednej z warstw ferromagnetycznych, gdy ich zwroty w naprzemiennych warstwach ferromagnetycznych są zgodne, mówić można o stanie niskooporowym, a więc najmniejszej rezystancji całej struktury [5].

Warstwa materiału nie wykazującego silnych właściwości magnetycznych przedzielająca warstwy ferromagnetyczne ma za zadanie magnetycznie oddzielić

obie warstwy oraz, cechując się wysoką konduktywnością, zapewnić swobodny przepływ elektronów. Jej grubość jest jednym z głównych parametrów tego typu struktur [6]. Zbyt duża grubość warstwy niemagnetycznej może doprowadzić do rozpraszania się elektronów w tej warstwie, co wpływa na zmniejszenie wartości zmian rezystancji. Optymalna grubość zależy od żądanych do uzyskania właściwości struktury. Zbyt mała grubość warstwy może skutkować silnym oddziaływaniem wymiennym pomiędzy warstwami ferromagnetycznymi oraz, chcąc uzyskać bardzo cienką warstwę, istnieje większe prawdopodobieństwo nieciągłości warstwy powodującej kontakt pomiędzy warstwami magnetycznymi [7], [8]. Badania wskazują, że wraz ze zmniejszaniem się warstwy niemagnetycznej wartość rezystancji struktury GMR maleje [9]. Jednak, zbyt znaczne zmniejszenie tej grubości doprowadza do zaniku zjawiska. Obserwowany jest również oscylacyjny charakter zależności zmian rezystancji struktury od grubości warstwy niemagnetycznej, co przypisywane jest oscylacyjnemu charakterowi oddziaływania wymiennego między warstwami ferromagnetycznymi [10].

Magnetorezystory FM/NM/FM stanowią niejako podstawę do struktur wykorzystywanych w praktyce. Są nimi głównie: wielowarstwowe struktury FM/NM, zawory spinowe i pseudozawory spinowe oraz magnetyki granularne [11]. Struktury wielowarstwowe składają się nawet z kilkudziesięciu przedzielonych warstw ferromagnetycznych. Ich zastosowanie pozwala zwiększyć wartość obserwowanych zmian GMR. Zawór spinowy, dzięki zastosowaniu dodatkowej warstwy antyferromagnetycznej w sąsiedztwie jeden z warstw ferromagnetycznych oraz dodatkowych procesów, tj. wygrzewanie w polu magnetycznym, pozwala magnetycznie „zamocować” jedną z warstw ferromagnetycznych. Dzięki temu warstwa ta wymaga większego, co do wartości, natężenia pola magnetycznego w celu jej przemagnesowania. W pseudozaworach spinowych osiąga się ten sam efekt poprzez wykorzystanie materiałów ferromagnetycznych o różnych polach koercji. Magnetyk granularny, zwany także magnetykiem ziarnistym lub granulowanym stopem magnetycznym, jest stopem materiału ferromagnetycznego i niemagnetycznego, w którym ziarna ferromagnetyczne zawarte są w osnowie materiału o słabych właściwościach magnetycznych.

W ramach niniejszej pracy zostały wytworzone cienkie magnetorezystory warstwowe o budowie FM/NM/FM w dwóch seriach różniących się grubością warstwy niemagnetycznej.

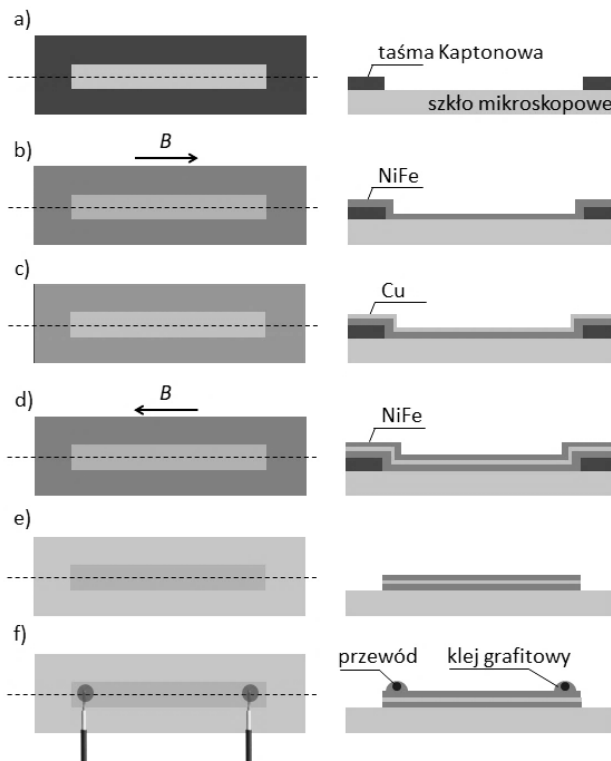
### Technologia cienkowarstwowych struktur GMR

Do wytworzenia struktur cienkowarstwowych wykazujących zjawisko gigantycznego magnetooporu wykorzystany został system napyłania magnetronowego Kurt J. Lesker® NANO 36 będący na wyposażeniu Katedry Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Lubelskiej. Zastosowana sekwencja procesów technologicznych została przedstawiona na rysunku 1.

Jako podłoże wykorzystano szkło mikroskopowe. Maskę technologiczną, określającą żądany kształt struktury, wykonaną została za pomocą taśmy Kaptonowej. Procesy napyłania wszystkich 3 warstw przeprowadzono w wysokiej próżni, wynoszącej  $10^{-7}$  Torr. Jako materiał ferromagnetyczny zastosowano permalój NiFe, zaś jako materiał niemagnetyczny miedź wykazującą właściwości diamagnetyczne. Wykonane zostały 2 serie struktur różniące się grubością warstwy miedzi – grubość ta wynosiła odpowiednio 5 nm i 2,5 nm.

Szybkość powstawania warstw była monitorowana podczas procesu napyłania, a więc odpowiednie dobranie

czasu przeprowadzania procesu pozwalało osiągać zamierzoną grubość materiału. Dla wszystkich warstw permalaju wynosiła ona 30 nm. Podczas ich napyłania, do podłoża zostało przyłożone pole magnetyczne w postaci magnesów neodymowych o wartości indukcji magnetycznej wynoszącej 15 mT wzdłuż dłuższej krawędzi struktury. Miało to na celu indukację łatwej osi namagnesowania w próbce [12], [13]. Parametry napyłania przedstawione zostały w tabeli 1.



Rys. 1. Sekwencja technologiczna struktury cienkowarstwowej: (a) maska technologiczna na szkłe mikroskopowym, (b) napyłanie warstwy NiFe o grubości 30 nm w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, (c) napyłanie warstwy Cu o grubości 5 lub 2,5 nm, (d) napyłanie drugiej warstwy NiFe o grubości 30 nm w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, (e) usunięcie taśmy Kaptonowej, (f) finalna struktura

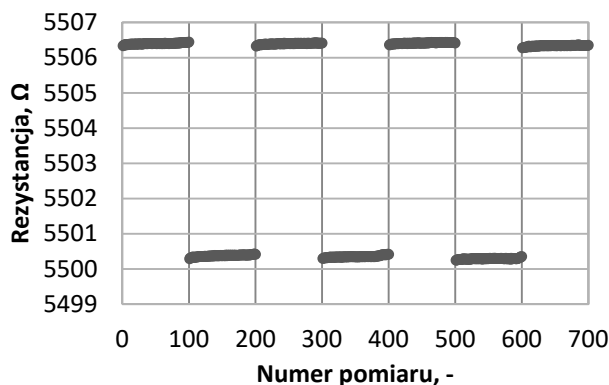
Tab. 1. Parametry przeprowadzonych procesów technologicznych

Lp.	Materiał i grubość warstwy	Gęstość mocy plazmy [W/sq <sup>2</sup> ]	Szybkość przepływu argonu [sccm]	Czas napyłania [min.]
Seria 1	NiFe (30 nm)	90	85	15
	Cu (5 nm)	90	50	3,5
	NiFe (30 nm)	65	85	18
Seria 2	NiFe (30 nm)	75	90	18
	Cu (2,5 nm)	50	75	2,5
	NiFe (30 nm)	75	90	18

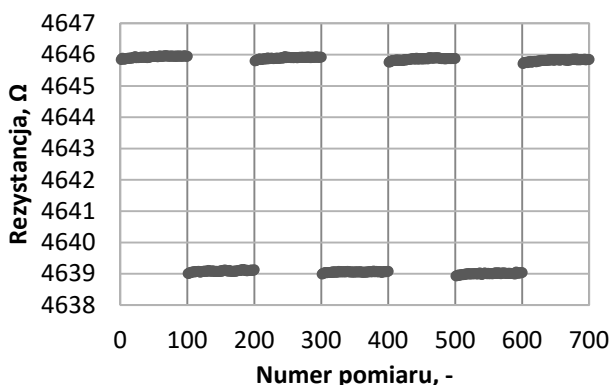
Ostateczne wymiary wykonanych magnetorezystorów wynosiły 20 mm × 2 mm × 65 nm/62,5 nm. W celu przeprowadzenia pomiarów, do struktur przymocowano przewody miedziane za pomocą przewodzącego kleju grafitowego.

## Metodologia badawcza i wyniki

Magnetorezystory obu serii zostały poddane badaniom rezystancji stałoprądowej poza polem oraz w obecności silnego pola magnetycznego magnesów neodymowych o wartości indukcji 0,5 T. W pomiarach wykorzystany został multimetr KeySight 34410A sterowany oprogramowaniem LabVIEW. Dłuższa z krawędzi badanych struktur jest równoległa do kierunku działania pola magnetycznego. Wyniki przeprowadzonych pomiarów obu serii przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Pomiary rezystancji struktury pierwszej serii NiFe(30 nm)/Cu(5 nm)/NiFe(30 nm)



Rys. 3. Pomiary rezystancji struktury drugiej serii NiFe(30 nm)/Cu(2,5 nm)/NiFe(30 nm)

Pierwszych sto pomiarów wykonywanych było w zerowym polu magnetycznym zaś dla kolejnych stu, próbka umieszczana była w silnym polu magnetycznym. Obie badane struktury znajdowały się w tym samym miejscu podczas procesów technologicznych. Otrzymane wyniki pomiarów wykazują wyraźne spadki mierzonej rezystancji pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego. W przypadku struktury z serii 1, w której grubość warstwy miedzi wynosi 5 nm, osiągnięta jest różnica rezystancji wynosząca 6 Ω. W przypadku struktury o cieńszej warstwie miedzi, równej 2,5 nm, spadek rezystancji próbki w polu magnetycznym wynosi około 7 Ω. W przypadku struktury o grubości warstwy miedzi 5 nm współczynnik GMR wynosi ponad 0,1%, zaś w przypadku struktury o grubości miedzi równej 2,5 nm współczynnik GMR wynosi 0,15%.

## Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy wyprodukowane zostały dwie serie struktur cienkowarstwowych NiFe/Cu/NiFe różniących się grubością warstwy miedzi, która wynosiła kolejno 5 oraz 2,5 nm. Przeprowadzone pomiary rezystancji stałoprądowej magnetorezystorów w zerowym oraz silnym polu magnetycznym struktur obydwu serii pozwalają stwierdzić

występowanie zjawiska gigantycznego magnetooporu. W przypadku serii o cieńszej warstwie niemagnetycznej, uzyskany współczynnik gigantycznego magnetooporu okazał się nieznacznie większy i wynosił 0,15%. Kilkuomowe zmiany rezystancji są łatwe do zaobserwowania, jednak chcąc wykorzystać tego typu struktury w roli czujników pola magnetycznego, zmiany rezystancji powinny być większe. W obecnej formie, wyprodukowane struktury posłużyć mogłyby jako detektory stosunkowo silnego pola magnetycznego.

Przeprowadzane badania zdają się potwierdzać poprawność zastosowanej technologii oraz stanowią kolejny krok w pracach mających na celu określenie wpływu grubości warstwy niemagnetycznej na efekt gigantycznego magnetooporu w strukturach cienkowarstwowych.

*Dofinansowano przez Ministra Edukacji i Nauki ze środków z budżetu państwa w ramach programu „Studentkie koła naukowe tworzą innowacje” oraz z funduszy na działalność młodych naukowców Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie TKT/MN-1/IMECH/21.*

*Szkoła Doktorska – Grant – Jakub Kisała.*

**Autorzy:** mgr inż. Jakub Kisała, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, E-mail: j.kisala@pollub.pl; dr inż. Andrzej Kociubiński, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, E-mail: akociub@semiconductor.pl; mgr inż. Karolina Czarnacka, Uniwersytet Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Produkcji, ul. Akademicka 13, 20-950 Lublin, E-mail: karolina.czarnacka@up.lublin.pl; mgr inż. Mateusz Gęca, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, E-mail: mati.geca@gmail.com; Jakub Duk, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin, E-mail: s96134@pollub.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] White, R. L. Giant Magnetoresistance: A Primer, *IEEE Trans. Magn.*, 28 (1992), 2482–2487
- [2] Inoue J., GMR, TMR and BMR, *Nanomagnetism and Spintronics*, (2009), 15–92
- [3] Ennen I., Kappe D., Rempel T., Glenske C., Hütten A., Giant Magnetoresistance: Basic concepts, microstructure, magnetic interactions and applications, *Sensors*, 16 (2016), s16060904
- [4] Barnaś J., Spin w elektronice, *Materiały XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich*, Toruń, (2001), 78–84
- [5] Szewczyk A., Wiśniewski A., Puźniak R., Szymczak H., Magnetyzm i nadprzewodnictwo, PWN, Warszawa, (2012)
- [6] Kuru H., Kockar H., Alper M., Giant magnetoresistance (GMR) behavior of electrodeposited NiFe/Cu multilayers: Dependence of non-magnetic and magnetic layer thicknesses, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 444 (2017), 132–139
- [7] Bakonyi I., Péter L., Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems, *Progress in Materials Science*, 55 (2010), 107–245
- [8] Rajasekaran N., Giant Magnetoresistance and Structure of Electrodeposited Co/Cu Multilayers: The Influence of Layer Thicknesses and Cu Deposition Potential, *Journal of The Electrochemical Society*, 162 (2015), n.6, 204–212
- [9] Tripathy D., Adeyeye A. O., Shannigrahi S., Effect of spacer layer thickness on the magnetic and magnetotransport properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Cu/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> spin valve structures, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, 75 (2007), 2–5
- [10] Johnson, A., Spin Valve Systems for Angle Sensor Applications, Technische Universität Darmstadt, (2004)
- [11] Tsymbal E. T., Pettifor D. G., Perspectives of Giant Magnetoresistance, *Solid State Physics*, 56 (2001), 113–237
- [12] Kisała J., Wpływ dodatkowego pola magnetycznego podczas napyłniania magnetonowego na efekt GMR w strukturach cienkowarstwowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (2022), 194–197
- [13] Wu Y. P., Han G. C., Kong L. B.: Microstructure and microwave permeability of FeCo thin films with Co underlayer, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (2010), 3223–326