

# Wpływ dodatkowego pola magnetycznego podczas napyłania magnetronowego na efekt GMR w strukturach cienkowarstwowych

**Streszczenie.** W artykule wskazano zasadność badań nad technologią struktur wykazujących zjawisko gigantycznego magnetooporu. Przedstawiono proces napyłania magnetronowego oraz sposoby ukierunkowania namagnesowań warstw ferromagnetycznych w strukturach cienkowarstwowych. W wyniku przeprowadzonych pomiarów rezystancji otrzymanych struktur potwierdzono wpływ zastosowania zewnętrznego pola magnetycznego podczas napyłania warstw ferromagnetycznych na powtarzalność zjawiska gigantycznego magnetooporu.

**Abstract.** The article shows the validity of research of structures showing the phenomenon of giant magnetoresistance. Magnetron sputtering process and methods of inducing direction of magnetization of ferromagnetic layers in thin-film structures are presented. As a result of the resistance measurements of structures, the influence of the application of an external magnetic field during ferromagnetic layers sputtering process on the repeatability of the giant magnetoresistance effect was confirmed. (*Influence of an additional magnetic field during magnetron sputtering on the GMR effect in thin-film structures*)

**Słowa kluczowe:** gigantyczny magnetoopór, napyłanie magnetronowe, struktury cienkowarstwowe, statyczne pole magnetyczne  
**Keywords:** giant magnetoresistance, magnetron sputtering, thin-film structures, static magnetic field

## Wstęp

W 1988 roku dwa zespoły, prowadzone przez Alberta Fertę oraz Petera Grünberga, niezależnie odkryły efekt obecnie określany jako gigantyczny magnetoopór (ang. *Giant MagnetoResistance* – GMR) [1, 2]. Prawie dwadzieścia lat później odkrycie to zapewniło obu fizykom otrzymanie nagrody Nobla z dziedziny fizyki. Było to możliwe dzięki wielkiemu wpływowi odkrytego zjawiska na społeczeństwo [3]. W 1997 roku zaprezentowany został projekt głowicy odczytu danych dysków HDD bazujący na zjawisku gigantycznego magnetooporu, który w krótkim czasie zastąpił ówczesnie stosowane głowice wykorzystujące zjawisko anizotropowego magnetooporu [4].

Przemysł przechowywania danych zdaje się dążyć do rozwijania technologii bazujących na elementach półprzewodnikowych, a więc na dyskach SSD [5]. Jednak efekt gigantycznego magnetooporu może być sukcesywnie wykorzystany w wielu innych aplikacjach, na przykład jako główna podstawa działania pamięci MRAM [6]. Znacznie więcej możliwości wykorzystania tego efektu w zastosowaniach detekcyjnych. Większość czujników wykorzystujących GMR stanowią czujniki pola magnetycznego oraz natężenia prądu elektrycznego. Wykorzystywane są m.in. w pomiarach zaburzeń pola magnetycznego ziemi lub w detekcji obiektów z materiałów ferromagnetycznych [7]. Czujniki te mogą służyć również do detekcji m.in. w kadłubach samolotów [8]. Czujniki GMR w przemyśle samochodowym służą do pomiaru prędkości obrotowych lub kątów np. przy pomiarze kątów skrętu, prędkości obrotów wału korbowego, a także jako czujniki ABS [9]. Należy także zaznaczyć szerokie możliwości ich wykorzystania w biologii. Odpowiednio zaprojektowane, mogą wykrywać wzajemne interakcje między specyficznymi powiązаныmi i oznaczonymi magnetycznie biomolekułami [7]. Z ich pomocą możliwe jest wykrycie określonych bakterii [10], wirusów [11] i białek [13]. Używane są również mikromacierze skonstruowane z czujników GMR, mogące wykrywać obecność, aktywność oraz zmienność wielu genów w próbkach DNA [10, 13].

Wszystkie te przykłady czujnikowych aplikacji struktur GMR są obiektem prowadzonych badań, a ich szerokie zastosowanie wynika z szeregu zalet. W porównaniu z powszechnie znanymi czujnikami pola magnetycznego bazującymi na efekcie Halla i efekcie AMR (anizotropowa

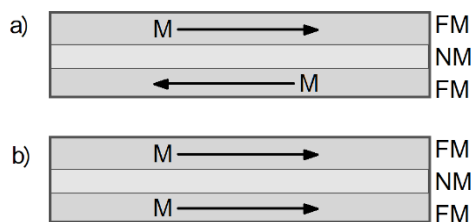
magnetoopór), czujniki bazujące na gigantycznym magnetooporze odznaczają się wysoką czułością, niskim poborem mocy oraz wysokim stosunkiem jakości do ceny. Ponadto, możliwe jest wytwarzanie struktur o bardzo małych wymiarach, a ich produkcja możliwa jest z wykorzystaniem względnie prostych procesów technologicznych. Struktury GMR jako czujniki powinny charakteryzować się m.in. wysoką stabilnością temperaturową, dobrą powtarzalnością oraz niezawodnością [14, 15].

Zjawisko gigantycznego magnetooporu polega na zmianie rezystancji struktury cienkowarstwowej pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego. Struktury, w których jest ono obserwowane, składają się z naprzemiennych warstw ferromagnetycznych (oznaczanych jako FM), takich jak żelazo lub nikiel, przedzielonych warstwą niemagnetyczną (oznaczoną jako NM). Materiały, z których wytworzone są oba rodzaje warstw muszą odznaczać się wysoką konduktywnością. Określenie „gigantyczny” magnetoopór pochodzi od porównania różnic wartości rezystancji uzyskiwanych w ramach tego efektu w zestawieniu ze zjawiskiem anizotropowego magnetooporu [16, 17].

Zmiany rezystancji w strukturach GMR są wynikiem zmian kierunku namagnesowania w warstwach ferromagnetycznych pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Elektrony przepływające przez strukturę rozpraszane są w warstwach ferromagnetycznych oraz na granicach warstw z różnym natężeniem w zależności od zgodności ich spinu z kierunkiem namagnesowania danej warstwy. Stan wysokooporowy struktury GMR odpowiada sytuacji, w której naprzemienne warstwy ferromagnetyczne mają przeciwny zwrot namagnesowania. Mówi się wtedy o konfiguracji antyrównoległej (AP) wzajemnych namagnesowań warstw ferromagnetycznych. W konfiguracji równoległej (P) kierunki namagnesowań warstw ferromagnetycznych mają zgodne zwroty, co przekłada się na zmniejszenie rezystancji struktury (rys. 1) [16, 17].

Grubości warstw struktur wykazujących zjawisko gigantycznego magnetooporu są rzędu nanometrów. Tak małe rozmiary są kluczowe dla wystąpienia tego efektu. Szczególnie ważna jest odpowiednia grubość warstwy niemagnetycznej. Wraz ze zmniejszaniem grubości warstwy niemagnetycznej obserwuje się wzrost efektu GMR [18].

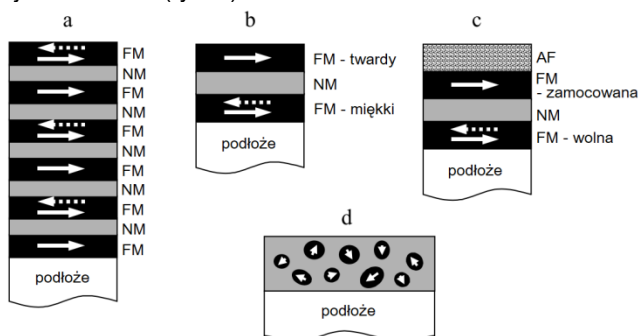
Dla grubości warstwy niemagnetycznej rzędu kilku nanometrów obserwowana jest oscylacyjna zależność oddziaływania wymiennego przekładająca się na oscylacyjność tego zjawiska [18, 19, 20].



Rys. 1 Struktura warstwowa FM/NM/FM; a) konfiguracja antyrównoległa AP, b) konfiguracja równoległa P

W przypadku wielowarstwowych struktur wykazujących GMR grubość warstwy magnetycznej powyżej 40 nm ma pomijalny wpływ [21, 22]. Główne znaczenie mają efekty związane z rozpraszaniem zależnym od spinu na interfejsach warstw FM/NM, a nie w objętości warstwy FM [21, 22, 23]. W związku z tym, w tej pracy, skupiono się na powtarzalności warstwy niemagnetycznej oraz uporządkowaniu domen w warstwach magnetycznych.

Wyróżnić można cztery główne struktury wykazujące zjawisko GMR (rys. 2).



Rys. 2 Podstawowe struktury GMR a) struktura wielowarstwowa FM/NM/FM, b) pseudo zawór spinowy, c) zawór spinowy, d) struktura ziarnista, na podstawie [18]

Najbardziej podstawową strukturą jest wielokrotna struktura o budowie FM/NM/FM (Rys. 2a). W założeniu przemagnesowaniu, podczas działania zewnętrznego pola magnetycznego, ulegać ma co druga warstwa ferromagnetyczna. Na rysunku 2b przedstawiono strukturę określaną jako pseudo zawór spinowy. Charakteryzuje się ona użyciem dwóch materiałów ferromagnetycznych o różnych polach koercji. Zawór spinowy (Rys. 2c), będący jednym z głównych instrumentów spintronicznych, zawiera dodatkową warstwę antyferromagnetyczną w sąsiedztwie warstwy ferromagnetycznej. Ma ona na celu magnetyczne „zamocowanie” warstwy ferromagnetycznej poprzez wystąpienie oddziaływania wymiennego pomiędzy warstwami. Ostatnią z podstawowych struktur jest magnetyk ziarnisty, w którym występują wydzielenia magnetyczne w osnowie metalu niemagnetycznego. Różnica w rozpraszaniu elektronów zachodzi na granicy ziaren ferromagnetycznych [10, 18]. Najczęściej, struktury GMR są modyfikacjami przedstawionych podstawowych wariantów polegających na dodaniu innych warstw np. warstwy kobaltu między warstwy FM i NM lub warstwy pasywnej np. tantalu [16].

Istnieje szerokie spektrum procesów dających możliwość wytworzenia struktur cienkowarstwowych. Metody te podzielić można na chemiczne metody osadzania z fazy lotnej oraz fizyczne metody osadzania

z fazy lotnej. Metody niewymagające chemicznych reakcji są częściej używane do produkcji struktur GMR ze względu na łatwość osadzania za ich pomocą warstw metalicznych. Metody chemiczne dobrze sprawdzają się w pokrywaniu nieregularnych powierzchni, które zwykle nie występują w strukturach GMR. W ramach metod fizycznych wyróżnia się głównie napyłanie próżniowe, rozpylanie jonowe, elektrodepozycję oraz napyłanie magnetronowe. Dwie ostatnie z wymienionych metod są najczęściej używanymi w produkcji struktur cienkowarstwowych wykazujących zjawisko gigantycznego magnetooporu [19, 23].

Napyłanie magnetronowe jest procesem, w którym w komorze napyłania atomy materiału źródła (targetu) wybijane są przez jony gazu szlachetnego. Wybite w ten sposób cząsteczki osadzają się na podłożu tworząc oczekiwaną warstwę. Główną cechą wyróżniającą tę metodę na tle innych metod rozpylania jonowego jest zastosowanie dodatkowego pola magnetycznego nad powierzchnią targetu. Dzięki temu usprawnieniu możliwe jest zwiększenie efektywności całego procesu rozpylania. Wśród zalet rozpylania magnetronowego wymienić należy wysoką szybkość osadzania, wysoką jakość osadzanych warstw oraz ich czystość, jednorodność grubości, a także łatwość kontroli warunków rozpylania [24].

Aby gigantyczny magnetoopór mógł być obserwowany w strukturach cienkowarstwowych, ważne jest zapewnienie antyrównoległej konfiguracji namagnesowań warstw ferromagnetycznych. Odpowiednia grubość warstwy niemagnetycznej ma duży wpływ na wzajemne kierunki namagnesowań warstw ferromagnetycznych, jednak istnieją także inne dodatkowe zabiegi pozwalające wymusić żądany kierunek namagnesowania.

Jednym z procesów technologicznych, który pozwala wymusić anizotropię jednoosiową w warstwie ferromagnetycznej jest wygrzewanie magnetyczne [7]. Dzięki obróbce cieplnej napyłonej już warstwy z kontrolowanym chłodzeniem, przy jednoczesnej aplikacji zewnętrznego pola magnetycznego, możliwe jest przełączenie łatwej osi namagnesowania danej warstwy. Jest to jeden z kluczowych procesów w produkcji zaworów spinowych [25,26].

Innym zabiegiem technologicznym pozwalającym wpływać na kierunek namagnesowania warstw ferromagnetycznych jest przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego do podłoża podczas procesu rozpylania. W ten sposób można wymusić żadaną łatwą oś namagnesowania [27–29].

W tym artykule omówiono wpływ aplikacji dodatkowego pola magnetycznego w obszarze podłoża podczas procesu rozpylania magnetronowego na efekt gigantycznego magnetooporu w strukturach cienkowarstwowych.

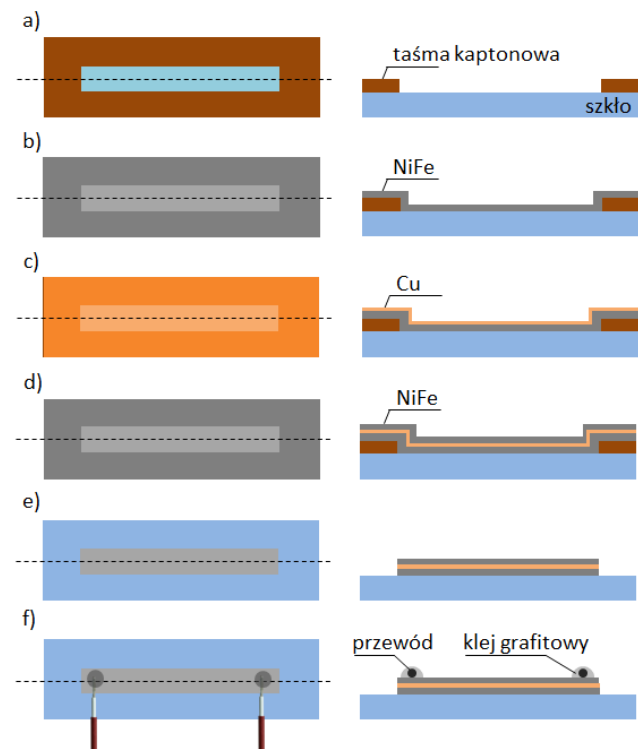
### Technologia struktur cienkowarstwowych

Struktury wielowarstwowe o budowie FM/NM/FM wyprodukowane zostały metodą rozpylania magnetronowego przy użyciu napyłarki NANO 36™ firmy Kurt J. Lesker będącej na wyposażeniu Politechniki Lubelskiej. Jako podłoża zastosowano szkło mikroskopowe. Materiałem użytym jako warstwy ferromagnetyczne był stop Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> o nazwie Permaloj. Warstwy ferromagnetyczne rozdzielono cienką warstwą miedzi. Wykonane zostały dwie serie próbek NiFe/Cu/NiFe różniące się między sobą grubościami warstw ferromagnetycznych oraz zastosowaniem dodatkowego pola magnetycznego przyłożonego do podłoża podczas procesu napyłania

Otrzymano dwie serie struktur trójwarstwowych NiFe/Cu/NiFe. W obu przypadkach na oczyszczone wcześniej podłoża nałożono cienką warstwę protektorową i wykonano odwrotny wzór struktur w postaci prostokątnych

pasków o wymiarach L×W. Wartości L oraz W dla serii pierwszej wynosiły L=10 mm i W=1 mm, a dla serii drugiej: L=10 mm i W=2 mm. W przeprowadzonych eksperymentach zastosowanie różnych grubości warstwy magnetycznej wiąże się z możliwościami technologicznymi w momencie produkcji próbek.

Proces napyłania warstwy NiFe prowadzono przy ciśnieniu próżni na poziomie  $10^{-5}$  Torr, gęstość mocy plazmy wynosiła 90 W/sq·cm, natężenie przepływu argonu było na poziomie 85 sccm, a szybkość napyłania ok. 0.3 Å/s. Napylenie warstwy miedzi prowadzono przy gęstości mocy plazmy wynoszącym 90 W/sq·cm, natężeniu przepływu argonu – 85 sccm i prędkości napyłania – 0,3 Å/s. Grubości osadzonych warstw ferromagnetycznych NiFe serii pierwszej wynosiły 100 nm, a serii drugiej 30 nm. Grubość warstwy miedzi obu serii wynosiła 5 nm.



Rys. 3 Procesy technologiczne wykonanych struktur: a) warstwa protektorowa, b) warstwa NiFe, c) warstwa Cu, d) warstwa NiFe, e) usunięcie warstwy protektorowej, f) finalna struktura

Podczas procesu napyłania drugiej serii próbek, wzdłuż dłuższej krawędzi struktur przyłożono do podłoża zewnętrzne pole magnetyczne o wartości 35 mT w postaci par magnesów neodymowych.

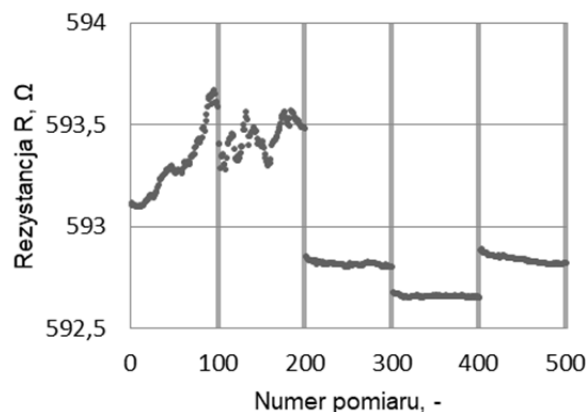
W celu przeprowadzenia pomiarów elektrycznych do wykonanych struktur przymocowane zostały przewody miedziane za pomocą kleju grafitowego Anders Products Wire Glue.

### Metody badawcze

Pomiary wartości rezystancji wykonanych próbek przeprowadzono za pomocą multimetru KeySight 34410A. Eksperyment polegał na pomiarze rezystancji danej struktury znajdującej się w zewnętrznym polu magnetycznym o stałej wartości indukcji wynosiła ok. 0,4 T. Rezystancję mierzono na przemian poza polem i w polu magnetycznym, rejestrując za każdym razem po 100 punktów pomiarowych.

### Wyniki i dyskusja

Wyniki przeprowadzonych pomiarów rezystancji dwóch struktur z obu serii zostały przedstawione na rysunkach 4 i 5. W przypadku struktury, dla której nie zastosowano dodatkowego pola magnetycznego przy podłożu podczas napyłania, pomiary nie są regularne. Pierwsze zarejestrowane punkty pomiarowe wykazują nieliniowy wzrost rezystancji w czasie (pomiar od 1 do 100). Umieszczenie próbki w polu magnetycznym (pomiar od 101 do 200) powoduje nagły mały spadek rezystancji, która nadal nie jest stała w czasie. Ponowne pomiary struktury poza polem magnetycznym (punkty od 201 do 300) wskazują ustabilizowanie się rezystancji próbki w czasie. Ta sama struktura w dalszej kolejności wykazuje zmianę rezystancji w polu magnetycznym, jednak jest to mała różnica nie sięgająca nawet 0,2 Ω. Inne próbki z tej serii wykazywały podobne wyniki – małe przewidywane skoki rezystancji pod wpływem pola magnetycznego, zaś duże wahania rezystancji nie wynikające ze zmian położenia struktury lub wartości indukcji pola magnetycznego.

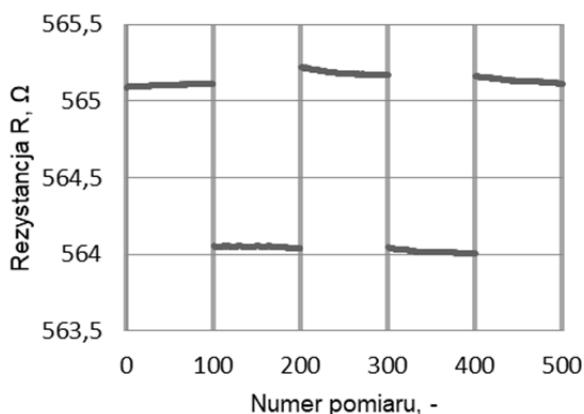


Rys. 4. Wyniki pomiarów rezystancji struktury trójwarstwowej NiFe(100)/Cu(5)/NiFe(100) bez przyłożonego pola magnetycznego podczas procesu napyłania

W celu wymuszenia danego ułożenia domen magnetycznych warstw ferromagnetycznych drugiej serii struktur, zastosowano zewnętrzne pole magnetyczne przyłożone wzdłuż podłoża podczas przeprowadzania procesu napyłania w komorze próżniowej. Wyniki pomiarów przykładowej próbki przedstawione zostały na rysunku 5.

Jak można zauważyć, rezystancja struktury ulega zmianie, gdy zostanie wprowadzona w pole magnetyczne, a po jego usunięciu – rezystancja próbki wraca do pierwotnego stanu. Wahania wartości rezystancji próbki w ramach danego stanu, nie występują tak, jak w przypadku próbek z serii 1 (rys. 4). Różnica rezystancji pomiędzy badanymi stanami wynosi 1 Ω.

Zaznaczyć należy dodatkowo, że struktury z serii pierwszej często wykazywały zmiany wartości rezystancji niemożliwie do przewidzenia. Wartość rezystancji próbki wzrastała, gdy wprowadzono ją w pole magnetyczne, występowały duże zmiany rezystancji w następujących po sobie punktach pomiarowych, a oczekiwane zmiany rezystancji, pod wpływem pola magnetycznego, nie były stałe w ramach jednej próbki. W przypadku próbek serii drugiej, zauważalna była znaczna powtarzalność wyników pomiarów – rezystancja próbki była stała w czasie, zaś zmiana wartości indukcji zewnętrznego pola magnetycznego powodowała zauważalne i powtarzalne zmiany rezystancji struktury.



Rys. 5 Wyniki pomiarów rezystancji struktury trójwarstwowej NiFe(30)/Cu(5)/NiFe(30) z dołączonym zewnętrznym polem magnetycznym podczas procesu napyłania

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono mechanizm zjawiska gigantycznego magnetooporu, podstawowe struktury wykazujące to zjawisko oraz opisano proces ich otrzymywania przy użyciu rozpylania magnetronego.

Wykonano dwie serie struktur typu FM/NM/FM, gdzie ferromagnetykiem był stop Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>, a warstwą niemagnetyczną była miedź. Grubości warstw FM serii pierwszej wynosiły 100 nm, zaś serii drugiej 30 nm. W obu przypadkach grubość warstwy środkowej NM wynosiła 5 nm. W czasie procesu napyłania próbek serii drugiej przyłożono pole magnetyczne wzdłuż podłoża.

Otrzymane wyniki pomiarów rezystancji stałoprądowej obu serii pozwoliły stwierdzić, że powtarzalność efektu magnetooporowego, jak i jego wartość, są większe niż w przypadku struktur, które otrzymano bez zastosowania dodatkowego pola magnetycznego podczas napyłania. Zgodnie z przytoczonymi pracami naukowymi, można stwierdzić, że otrzymane wyniki badań potwierdzają wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na ułożenie się domen w napyłanych warstwach ferromagnetycznych. Umożliwia to większą powtarzalność efektu magnetooporowego wyprodukowanych struktur oraz stabilność rezystancji w czasie.

*Dofinansowano przez Ministra Edukacji i Nauki ze środków z budżetu państwa w ramach programu „Studenckie kółka naukowe tworzą innowacje”.*

*Szkoła Doktorska – Grant – Jakub Kisała.*

**Autorzy:** mgr inż. Jakub Kisała, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38B, 20-618 Lublin, E-mail: [j.kisala@pollub.pl](mailto:j.kisala@pollub.pl).

### LITERATURA

- [1] Baibich M. N. et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett.* 61 (1988), 2472–2475.
- [2] Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W., Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange. *Phys. Rev. B* 39 (1989), 4828–4830.
- [3] Gerstner E. Nobel Prize 2007: Fert and Grünberg. *Nat. Phys.* 3 (2007), 754–754.
- [4] Hirohata A. et al. Review on spintronics: Principles and device applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 509 (2020), 166711.
- [5] Kadve A. Trade Of Between SSD and HDD. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 4 (2016), 473–475.

- [6] Tehrani S. et al., High density submicron magnetoresistive random access memory (invited). *J. Appl. Phys.*, 85 (1999), 5822–5827.
- [7] Reig C., Cubells-Beltrán M. D., Muñoz D. R. Magnetic field sensors based on Giant Magnetoresistance (GMR) technology: Applications in electrical current sensing, *Sensors* 9 (2009), 7919–7942.
- [8] Leitão D. C., Borme J., Orozco A., Cardoso S., Freitas P. P. Magnetoresistive sensors for surface scanning, *Smart Sensors. Measurement and Instrumentation*, 6 (2013), 275–299.
- [9] Kapser K., Weinberger M., Granig W., Slama P., GMR Sensors in Automotive Applications, *Smart Sensors. Measurement and Instrumentation*, 6 (2013), 133-155.
- [10] Djamal M., Ramli, Khairurrijal, Giant magnetoresistance material and its potential for biosensor applications. *Int. Conf. Instrumentation, Commun. Inf. Technol. Biomed. Eng.* (2009), 1–6.
- [11] Krishna V. D., Wu K., Perez A. M., Wang J. P., Giant magnetoresistance-based biosensor for detection of influenza A virus. *Front. Microbiol.* 7 (2016), 1–8.
- [12] Gupta S., Kakkar V., DARPIn based GMR Biosensor for the detection of ESAT-6 Tuberculosis Protein. *Tuberculosis* 118 (2019), 101852.
- [13] Llandro J., Palfreyman J. J., Ionescu A., Barnes C. H. W., Magnetic biosensor technologies for medical applications: A review, *Medical and Biological Engineering and Computing*, 48 (2010), 977–998.
- [14] Gao H. et al., Research on vibration sensor based on giant magnetoresistance effect, *Rev. Sci. Instrum.*, 90 (2019), 105001.
- [15] Djamal M., Ramli, Development of sensors based on giant magnetoresistance material. *Procedia Eng.*, 32 (2012), 60–68.
- [16] Baraduc C., Chshiev M., Dieny B., Spintronic Phenomena: Giant Magnetoresistance, Tunnel Magnetoresistance and Spin Transfer Torque, *Smart Sensors. Measurement and Instrumentation*, 6 (2013), 1-30.
- [17] Sabrie S., *Sensors Handbook*, second edition, McGraw-Hill Professional (2010).
- [18] Tsybmal E. Y., Pettifor D. G., Perspectives of giant magnetoresistance. *Solid State Physics*, 56 (2001), 113–237.
- [19] Johnson A., Spin Valve Systems for Angle Sensor Applications, *Tech. Univ. Darmstadt* (2004).
- [20] Jyoko, Y., Kashiwabara, S., Hayashi, Y., Preparation of Giant Magnetoresistance Co-Cu Heterogeneous Alloys by Electrodeposition. *J. Electrochem. Soc.*, 144 (1997) 193–195.
- [21] Rajasekaran, N., Mohan, S., Giant magnetoresistance in electrodeposited films: Current status and the influence of parameters, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 37 (2012), 158–180.
- [22] Parkin, S. S. P., More, N., Roche, K. P., Oscillations in exchange coupling and magnetoresistance in metallic superlattice structures: Co/Ru, Co/Cr, and Fe/Cr., *Phys. Rev. Lett.*, 64 (1990), 2304–2304.
- [23] Bakonyi I., Péter L., Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems, *Progress in Materials Science*, 55 (2010), 107–245.
- [24] Kelly P. J., Arnell R. D., Magnetron sputtering: A review of recent developments and applications, *Vacuum*, 56 (2000), 159–172.
- [25] Katada H. et al., Induced uniaxial magnetic anisotropy field in very thin NiFe and CoZrNb films, *IEEE Trans. Magn.*, 36 (2000), 2905–2908.
- [26] Albisetti E. et al., Temperature dependence of the magnetic properties of IrMn/CoFeB/Ru/CoFeB exchange biased synthetic antiferromagnets, *Materials (Basel)*, 13 (2020) nr 2, 387.
- [27] Zhao Z. D. et al., Large enhancement of magnetoresistance in NiFe film with MgO layers sandwiched after annealing, *Appl. Surf. Sci.*, 321 (2014), 554–559.
- [28] Chen L., Zhou Y., Lei C., Zhou Z. M., Ding W., Giant magnetoimpedance effect in sputtered single layered NiFe film and meander NiFe/Cu/NiFe film, *J. Magn. Magn. Mater.*, 322 (2010), 2834–2839.
- [29] Chen J., Ma J., Wu L., Shen Y., Nan C. W., Magnetic anisotropy of Fe films deposited by dc magnetron sputtering under an external magnetic field, *Science Bulletin*, 60 (2015), 1214–1217.