

Spintronika

Spintronics

Tadeusz Mydlarz

Wrocławska Wyższa Szkoła Informatyki
Stosowanej
ul. Wejherowska 28, 54-239 Wrocław

Treść. W pracy pokazano przegląd wiedzy na temat mikro i spin elektroniki. Rozwój mikroelektroniki związany jest z fizyką półprzewodników. Poznanie własności fizycznych półprzewodników ich domieszkowanie i manipulowanie ładunkiem doprowadziło do rozwoju mikroelektroniki, powstawaniu zminiaturyzowanych podzespołów i urządzeń elektronicznych (diod i tranzystorów, układów scalonych, mikroprocesorów, komputerów, telefonów komórkowych itp.). Pytanie jest zasadnicze „Czy manipulowanie ładunkiem w półprzewodnikach jest ograniczone jeśli tak to co dalej?” z rozwojem budową zminiaturyzowanych urządzeń elektronicznych nowoczesnych szybkich komputerów. Autor przedstawił krótki opis wiedzy i możliwości nowych materiałów magnetycznych mogących mieć ogromne zastosowanie w spinelektronice, nowej gałęzi wiedzy mającej początek w ostatnich latach ubiegłego wieku, w której to zasadniczą rolę odgrywa spin elektronu a właściwie manipulowanie nim.

Słowa kluczowe: półprzewodnik, półprzewodnik magnetyczny, spin elektronu, magnetoopór, nanostruktury, grafen, głowice indukcyjne, głowice rezystywne, urządzenia magnetorezystywne, twardy dysk.

Abstract. In the paper an overview of knowledge about microelectronics and spinelectronics is presented. The development of microelectronics is associated with the physics of semiconductors. Understanding the physical properties of semiconductors, their admixturing and manipulating of the charge has led to the development of the microelectronics and to the creating of the miniaturized components and electronic instruments and devices (diodes and transistors, integrated circuits, microprocessors, computers, mobile phones etc). The main question is: Is the manipulating of the charge in the semiconductors limited and if it is, what is next with the development and the construction of the miniaturized electronic devices and modern and fast computers? The author has presented a brief description of the knowledge and the possibilities of the new magnetic materials, that may have great applications in spinelec-

tronics, which is a new branch of knowledge having the beginning in the last years of the previous century, and where the spin of the electron and the process of manipulation it plays the main role.

Keywords: semiconductors, diluted magnetic semiconductors, electron spin, magnetic resistivity, nanostructure, graphene materials, induction heat, resistivity heat, magnetoresistive device, hard disk.

1. Wstęp

Spintronika (elektronika spinowa) w dzisiejszych czasach to bardzo modny kierunek rozwoju fizyki. Dotychczas rozwój mikroelektroniki i wszystkich urządzeń oparty był na manipulowaniu ładunkiem elektrycznym w materiałach półprzewodnikowych. Odkrycie i poznanie własności fizycznych półprzewodników typu n i p pozwoliło na powstanie wielu zminiaturyzowanych urządzeń elektronicznych układów scalonych, mikroprocesorów, złącz półprzewodnikowych p-n tranzystorów MOSFET, diod świecących. Wszystkie te podzespoły mają zastosowanie w budowie komputerów i wszelkiego rodzaju sprzętu elektronicznego. Poszukujemy coraz to nowszych materiałów magnetycznych, które można by było wykorzystywać do budowy twardych dysków, głowic, elementów pamięci. Materiały te powinny mieć co najmniej pokojową temperaturę uporządkowania magnetycznego T_c . W dzisiejszych komputerach w głowicach wykorzystuje się materiały wykazujące bardzo duży magnetoopór (opór elektryczny zależny od pola magnetycznego). Pytanie jest zasadnicze, czy istnieje granica manipulowania ładunkiem elektrycznym w półprzewodniku przez wprowadzanie atomów domieszkowych do czystego półprzewodnika, a przez to otrzymywanie coraz to ciekawszych nowych materiałów. Wydaje się, że ten czas nadchodzi. Uczni wpadli na pomysł wykorzystania spinu elektronu w materiałach półprzewodnikowych, jego manipulowaniem, co pozwoliło na poznanie wielu nowych materiałów magnetycznych. Uporządkowanie magnetyczne w ciele stałym było przypisywane atomom obdarzonym trwałym momentem magnetycznym (metalom przejściowym 3d, żelazo, kobalt, nikiel z do końca nie zapełnionymi pod powłokami 3d), metalom ziem rzadkich (w pewnym zakresie temperatur). Atomy Fe, Co, Ni w określonej strukturze krystalograficznej oddziaływały wzajemnie ze sobą bezpośrednio siłami wymiennymi dając spontaniczne namagnesowanie poniżej temperatury T_c . Oddziaływania wymienne między atomami Ziemi Rzadkich były pośrednie poprzez spolaryzowane elektrony przewodnictwa (oddziaływanie RKKY). W Układzie Mendelejewa jest bardzo mało pierwiastków wykazujących magnetyczne uporządkowanie. Jednak

połączenia różnych pierwiastków w związkach między-metalicznych prowadzi nie jednokrotnie to uporządkowania magnetycznego i to czasem niespodziewanego [1]. O ile w związkach międzymetalicznych zawierających atomy obdarzone trwałym momentem magnetycznym jest to spodziewane i oczekiwane to w związkach aktywność z niemetalem czy wodorem było dużym zaskoczeniem uczonych w czasach gdy te własności odkrywali [2]. Własności magnetyczne przypisywano ciału stałemu o określonej strukturze krystalicznej, ciała masywnemu. Dzisiaj uporządkowanie magnetyczne spotykamy w nanostrukturach kryształach molekularnych, nanorurkach a ostatnio w grafenie [3]. Grafen jedna z alotropowych odmian węgla odkryta w 2004 roku przez uczonych rosyjskich i brytyjskich (Andriej Gejm, Konstantin Nowosiółow [4]) jest zbudowany jest z pojedynczej warstwy atomów węgla tworzących połączone pierścienie sześciokątowe (dwuwymiarową siatkę o sześciokątnych oczkach, której struktura przypomina plaster miodu).

Spintronika to alternatywa dla klasycznej elektroniki gdzie zasadniczą rolę odgrywa spin elektronu [5]. Od wielu lat myśli się o wykorzystaniu spinu jako dodatkowego stopnia swobody w urządzeniach elektronicznych. Mam tu na myśli takie urządzenia jak tranzystor spinowy, spinowe procesory. Specjaliści zajmujący się różnymi dziedzinami fizyki, elektroniki i teorii informacji, informatycy stawiają sobie różne cele. Informatycy uważają, że manipulowaniem spinem daje możliwość zbudowania nowego typu procesora logicznego związanego z kwantowym charakterem spinu.

2. Spin elektronu a zakaz Pauliego

Spin elektronu to w 100% wielkość kwantowa. Ma ona reputację wielkości, której nie można zrozumieć. Analogia do klasycznego momentu pędu wokół własnej osi jest wysoce niedoskonała. Np. cząstka nie może stracić ani zyskać spinu, może jedynie zmienić jego kierunek. Fermiony mają spin połówkowy $(2n+1)1/2$ (elektron, neutron, proton) a bozony (foton, pion) mają spin całkowity. Spin elektronu jest skwantowany i jego wartość wynosi:

$$S = \hbar(s(s+1))^{1/2}$$

Gdzie $s = 1/2$ jest spinowa liczbą kwantową.

Rzut spinu na oś z (np. kierunek przyłożonego pola magnetycznego) jest skwantowany

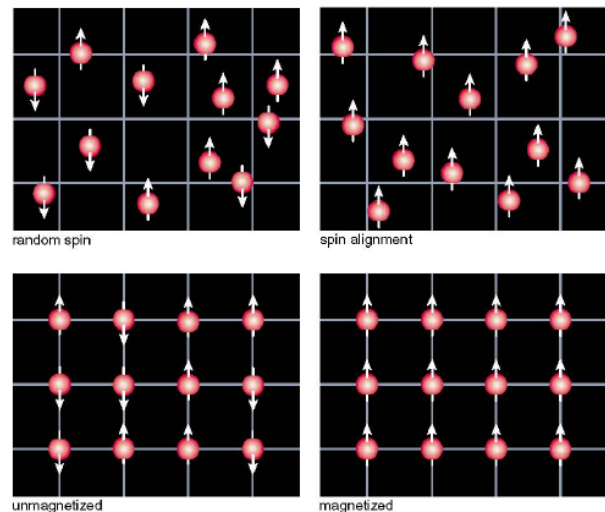
$$S_z = m_s \hbar$$

Gdzie m_s przyjmuje wartości $+1/2$ i $-1/2$

Omawiając oddziaływania spinowe musimy pamiętać o dwóch cechach spinu. Pierwszą cechą jest to, że związanemu z nim momentowi pędu odpowiada

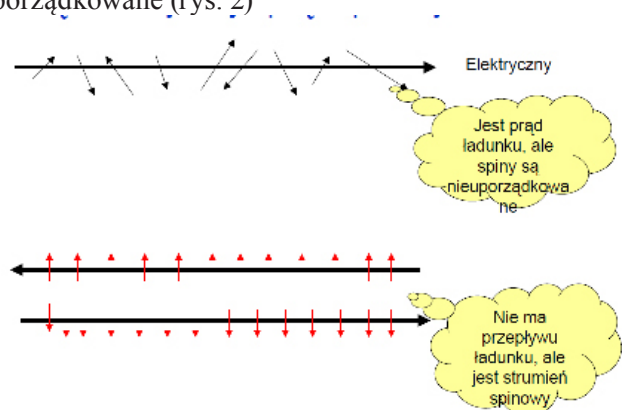
moment magnetyczny, a ten ulega wpływowi pola magnetycznego. Drugą cechą to połówkowość spinu, która oznacza, że obsadzanie stanów elektronowych przebiega ściśle według zasady Pauliego, zabraniającej obsadzania tego samego stanu przez dwa elektrony. Jeśli jeden stan jest już obsadzony przez elektron o określonej orientacji spinu to drugi elektron musi mieć spin przeciwny. Jest to wystarczający powód aby wykorzystać spin jako element logiczny.

Spiny mogą być różnie uporządkowane (rys. 1)



Rysunek 1. Różne rodzaje uporządkowania spinów

Może wystąpić przepływ prądu gdy spiny są nieuporządkowane lub nie ma przepływu prądu a spiny są uporządkowane (rys. 2)

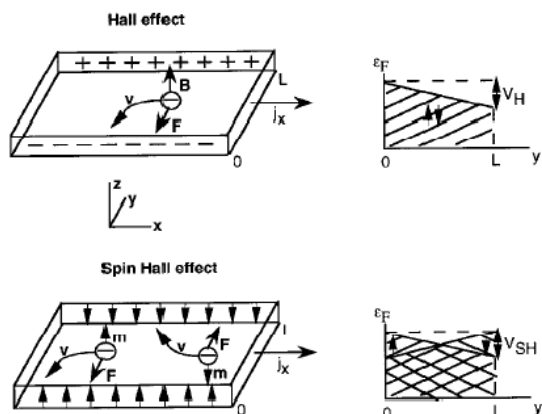


Rysunek 2. Możliwości przepływu prądu elektrycznego w przypadku nieuporządkowanych i uporządkowanych spinów

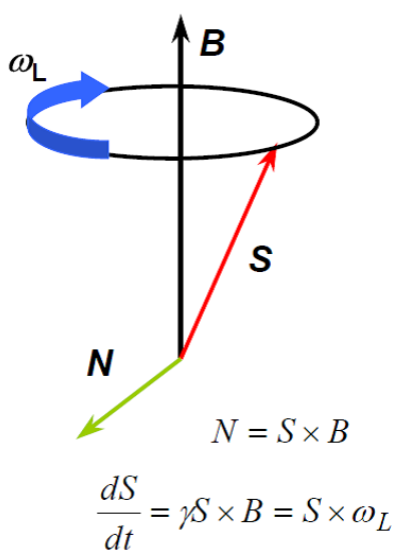
Często obserwuje się spinowy efekt Halla (rys. 3)

Na kierunek spinu możemy wpływać przez zastosowanie: pola magnetycznego, rozpraszania na domieszkach magnetycznych i optycznie.

W polu magnetycznym spin wykonuje precesję wokół kierunku pola z częstością Larmora $\omega_L = gB$ (rys. 4)



Rysunek 3. Spinowy Efekt Haala



Rysunek 4. Precesja spinu w polu magnetycznym



Rysunek 5. Rozpraszanie spinu na domieszkach magnetycznych

Na rys.5 pokazano rozpraszanie spinu na domieszkach magnetycznych. Spinem można manipulować optycznie, naświetlając kwantem energii $E = h\nu$ InMnAs otrzymano uporządkowanie magnetyczne w tym związku rys. 6 [6].

W wielu materiałach opór elektryczny zależy od pola magnetycznego

$$\rho(B) = \rho(0)(1 + HB^2)$$

gdzie :

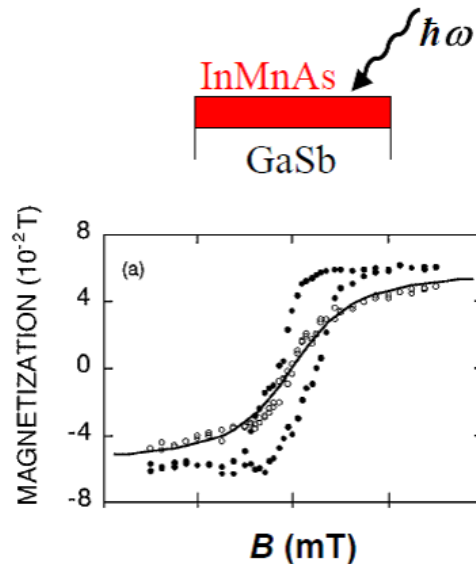
B – indukcja pola magnetycznego

$\rho(B)$ – opór właściwy w polu magnetycznym

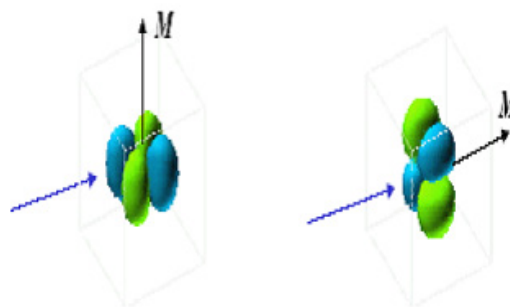
$\rho(0)$ – opór właściwy bez pola magnetycznego.

Magnetyzm generowany optycznie

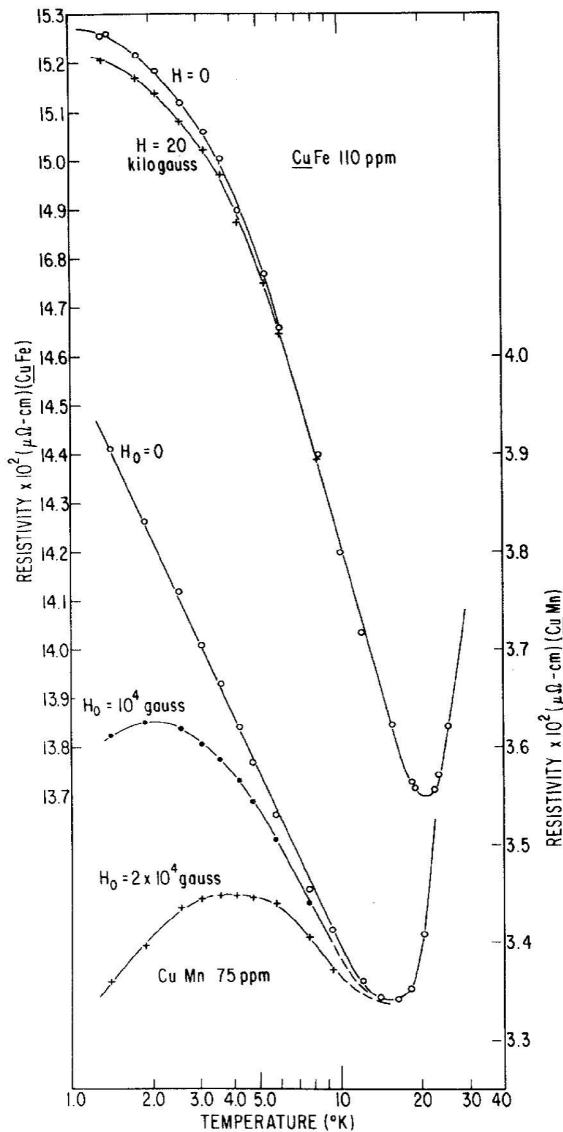
Koshihara PRL (1997)

Rysunek 6. Indukowany ferromagnetyzm w InMnAs światłem o energii $E = h\nu$ [6].

Zależność oporu elektrycznego w zwykłych metalach i półprzewodnikach od pola magnetycznego pojawia się w silnych polach magnetycznych, więc ich zastosowanie w spin elektronice nie jest możliwe. Ponadto w metalach ferromagnetycznych (metalach przejściowych) opór elektryczny zależy od kierunku prądu względem kierunku namagnesowania (anizotropowy magnetoopór). Ten anizotropowy magnetoopór wynika z obecności elektronów 3d. Namagnesowanie w tym przypadku wpływa na orbitale 3d (sprzężenie spin – orbita). Orbitale zmieniają orientację w polu magnetycznym (rys. 7).

Rysunek 7. Zmiana orientacji orbitali 3d w polu magnetycznym B

Wprowadzenie niewielkiej ilości domieszek magnetycznych do stopów ze zwykłymi metalami może spowodować powstanie magneto oporu. Pojawia się efekt Kondo rys. 8



Rysunek 8. Zależność oporu elektrycznego R od temperatury dla stopów Cu domieszkowanych atomami Mn i Fe.

Wprowadzenie do półprzewodnika niewielkiej ilości domieszek magnetycznych powoduje powstanie uporządkowania magnetycznego w półprzewodnikach. Takie półprzewodniki magnetyczne mogą stanowić najważniejsze materiały dla spintroniki.

3. Materiały spintroniczne

Do materiałów mogących mieć zastosowanie w spintronice należy zaliczyć:

1. metale ferromagnetyczne,
2. półprzewodniki magnetyczne (perovskity),
3. półprzewodniki magnetyczne EuX ,
4. półprzewodniki magnetyczne DMS (diluted magne-

tic semiconductors),

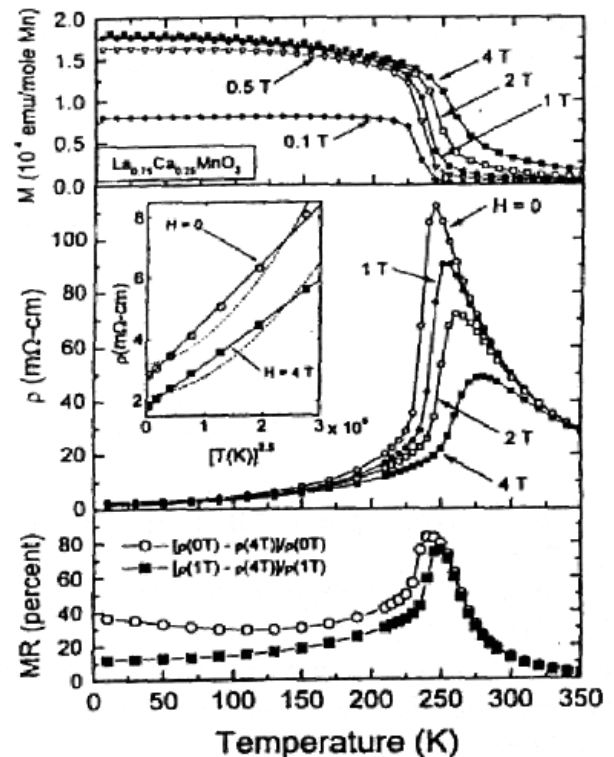
5. nanostruktury, nanorurki, grafeny.

Metale ferromagnetyczne nie są nowymi materiałami ale w spin elektronice są stosowane ponieważ

- oddziaływanie wymiany powoduje, że koncentracja elektronów o spinie \uparrow i spinie \downarrow może być różna,
- mają anizotropowy magnetoopór.

Półprzewodniki magnetyczne o strukturze perovskitu to manganowe związki $A_{1-x}B_xMnO_3$ gdzie $A = La, Nd, Pr, B = Ca, Ba, Sr$.

Materiały te w pobliżu temperatury Curie wykazują bardzo silny magnetoopór (rys. 9)



Top: Magnetization against temperature for $La_{0.75}Ca_{0.25}MnO_3$ for various field values

Middle: resistivity against temperature

Bottom: magnetoresistance against temperature

Rysunek 9. Zależności namagnesowania, oporu właściwego i magnetooporu w funkcji temperatury dla $La_{0.75}Ca_{0.25}MnO_3$.

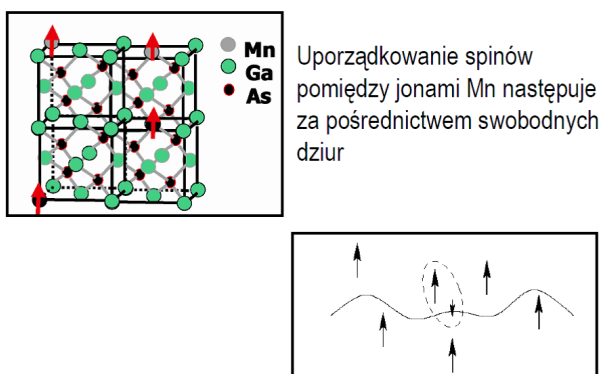
Przewodzenie prądu odbywa się w nich przez hopping między jonami Mn^{3+} i Mn^{4+} . Momenty magnetyczne muszą być równoległe aby to było możliwe, to znaczy powinien być stan ferromagnetyczny.

W temperaturze T_c zachodzi przemiana izolator – metal a pole magnetyczne zwiększa uporządkowanie ferromagnetyczne, opór elektryczny maleje.

We wczesnych latach 60-tych badano związki typu EuX gdzie $X = O, S, Te$, w których jon magnetyczny Eu^{2+} zajmował położenia w każdym węzle sieci, oraz inne materiały GdS , $EuSe$ i spinele $CuCr_2Se_4$.

Półprzewodniki magnetyczne tego typu jednak nie znalazły zastosowania w spin elektronice, ponieważ temperatura Curie wynosi około 80K , trudno jest je syntezować, struktura krystaliczna jest inna niż *Si* i *GaAs*, małe są nadzieje na poprawę ich własności.

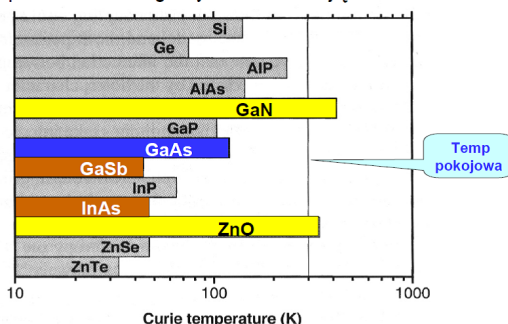
Rozwój półprzewodników DMS (diluted magnetic semiconductors) zaczyna się w latach 80-tych. Są to półprzewodniki w których atomy III grupy Układu Mendelejewa w związkach typu III – V są częściowo zastąpione przez jony magnetyczne np.: Mn, Co. Mogą to być również półprzewodniki II – VI. Uporządkowanie spinów pomiędzy jonami Mn następuje za pośrednictwem swobodnych dziur (rys. 10)



Rysunek 10. Uporządkowanie spinów manganu w *MnGaAs*.

Zasadniczym problemem jest bardzo trudna synteza takich półprzewodników. Bardzo trudno je domieszkować tak aby otrzymać półprzewodniki magnetyczne typu *n*, *p* a potem stosować je w elektronice. Inny problem ich zastosowania to niskie temperatury Curie. Na rys. 11 przedstawiono różne półprzewodniki magnetyczne. Z rys. 11 wynika, że nadzieje budzą półprzewodniki GaN i ZnO. Ostatnio potwierdzono, że GaMnN jest ferromagnetykiem z $T_c = 300\text{K}$.

Różne półprzewodniki magnetyczne zawierające 5% Mn



Dietl *et al.*, Science, (2000)

Rysunek 11. Temperatury Curie dla wybranych półprzewodników magnetycznych (7)

Ostatnio są prowadzone intensywne badania zastosowania krzemu w urządzeniach spintronicznych o własnościach magnetycznych. Badania prowadzone przez Vincenta LaBella i Martina Bolduc pokazały, że Si implantowany Mn (koncentracja do 1%) ma własności magnetyczne aż do 1270C .

Niezwykle ciekawą grupę materiałów magnetycznych stanowią niedawno odkryte materiały, które nie zawierają pierwiastków magnetycznych ale wykazują uporządkowanie magnetyczne poniżej 300K . W tych materiałach oddziaływania wymienne są spowodowane sprzężeniem elektronów sp^2 na orbicie ze spinem. Należą do nich (CaLa)B₆ polimeryzowany C60 (TDA-E-C60) i ostatnio grafen [3]. W romboedrycznym C60 stwierdzono ferromagnetyczne uporządkowanie z $T_c = 500\text{K}$ pod wysokim ciśnieniem [8]. Możliwość wystąpienia magnetycznego uporządkowania w grafenie i nanostrukturach przedstawił Oleg V Yazyev w teoretycznych rozważaniach [3], oraz ich możliwego zastosowania w spintronice. Grafen jest bardzo dobrym przewodnikiem ciepła ($4840 - 5300\text{W/mK}$), podczas gdy srebro ma 429W/mK , posiada niewielką rezystancję. Bardzo wysoka ruchliwość elektronów w temperaturze pokojowej przy założeniu, że rozpraszanie jest jedynie na fononach wynosi $8500\text{cm}^2/\text{Vs}$ (dla krzemu $1500\text{cm}^2/\text{Vs}$, arsenek galu $8500\text{cm}^2/\text{Vs}$). Prędkość przepływu elektronów wynosi $1/300$ prędkości światła, umożliwia badanie efektów relatywistycznych dla elektronu poruszającego się w przewodniku. Jest prawie że przezroczysty, pochłania tylko 2% światła. Jest prawie 100 razy mocniejszy niż stal, a zarazem tak elastyczny, że można go rozciągać do 20%. Grafenu w stanie wolnym nie można otrzymać ze względu na jego nietrwałość i skłonność do tworzenia struktur trójwymiarowych (fullerenów i nanorurek). Otrzymuje się go metodami mikromechanicznymi. Grafen do niedawna był najdroższym materiałem na Ziemi. Cena mikromechanicznie odłupanego krystalitu grafenu wielkości powierzchni przekroju włosa ludzkiego kosztowała 1000 dolarów. Koreańczycy z Uniwersytetu Sungkyunkwan opracowali metodę pozwalającą na tańsze wyprodukowanie fragmentów grafenu o powierzchni nawet 1cm^2 .

4. Wstrzykiwanie i manipulacja spinem

Wstrzykiwanie spinu może być z metalu do metalu. Najprostszą metodą jest wstrzykiwanie elektronów z ferromagnetyka w którym dominuje pewien kierunek ułożenia spinów do niemagnetycznego półprzewodnika poprzez kontakt elektryczny. Okazuje się, że efektywność tego procesu jest bardzo mała z powodu niedopasowania pasm energetycznych, a co za tym idzie energii nośników oraz ich koncentracji. Problemem jest również relaksacja (uporządkowanie spinów zanika w

czasie). Lepszym rozwiązaniem jest tworzenie złączeń ferromagnetycznego metalu i półprzewodnika takich przez które elektrony tunelują. Ferromagnetyczne uporządkowanie możemy wywołać światłem zwłaszcza w przypadku heterostruktur (AlGaMnSb).

5. Urządzenia spintroniczne

Początki rozwoju spintroniki datuje się od wykrycia gigantycznego magnetooporu w metalach. Peter Grunberg (Niemcy) i Albert Fert (Francja) w roku 2007 otrzymali nagrodę nobla w dziedzinie fizyki za wykrycie magnetooporu w układzie trójwarstwowym Fe/Cr/Fe. Okazało się, że im więcej było warstw tym silniejsza była zmiana magnetooporu [9, 10]. Opór układów wielowarstwowych złożonych z magnetyka i niemagnetyka silnie zależy od pola magnetycznego. Przyczyną gigantycznego magnetooporu jest zależność rozpraszania elektronów od spinu. Elektrony o danej orientacji spinu są silnie rozpraszane w warstwie o pewnym kierunku namagnesowania a słabo w warstwie o przeciwnym namagnesowaniu.

W przypadku sprzężenia ferromagnetycznego warstw elektrony o spinie zorientowanym w dół mogą przepływać przez układ. Mamy do czynienia z niskim oporem układu. W przypadku antyferromagnetycznego sprzężenia warstw elektrony o spinie zorientowanym w dół nie mogą przepływać przez układ i mamy przypadek powstania bardzo dużego magnetooporu. Różnica oporów dla układu wielowarstwowego może sięgać kilkudziesięciu procent. Gigantyczny magnetoopór może powstawać gdy warstwy niemagnetyczne są wąskie (węższe niż droga swobodna elektronu [11, 12]). W przypadku gdy dwie warstwy ferromagnetyczne są oddzielone od siebie warstwą izolatora może wystąpić tunelowanie. Tunelowanie zachodzi zazwyczaj bez zmiany orientacji spinu. Większość elektronów na poziomie Fermiego ferromagnetyka ma jeden kierunek spinu, zatem prąd tunelowy jest spolaryzowany pod tym względem. Opór złącza tunelowego też zależy od tego czy ferromagnetyczne warstwy są namagnesowane zgodnie czy przeciwnie. Jeżeli potrafimy sterować namagnesowaniem to będziemy mieć urządzenia spintroniczne. tzw. zawór spinowy (spin valve).

6. Zastosowanie GMR (gigantycznego magnetooporu)

1. Pomiar pola magnetycznego w sterownikach dysków magnetometrach kompasach
2. detekcja położenia – sensor mierzy zmianę pola magnetycznego związana z przemieszczaniem czegoś co wytwarza pole np. magnes na wale silnika spalinowego

(obecnie są stosowane sondy hallowskie).

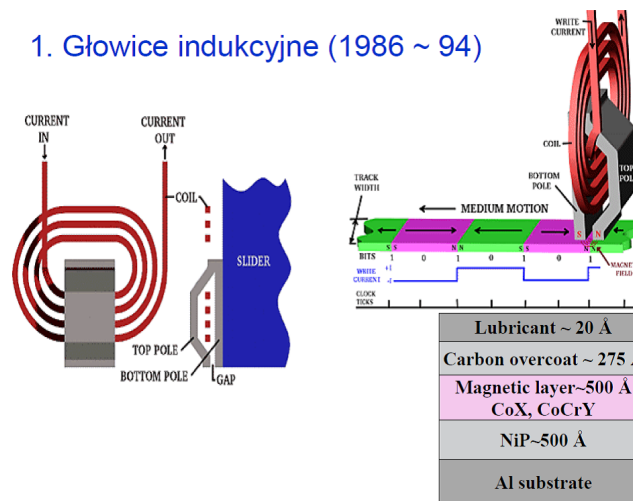
3. Głowice – od głowic indukcyjnych do zaawansowanych głowic GMR.

4. Twarde dyski:

1973 – pierwszy twardy dysk o nowoczesnej konstrukcji model IBM 3340”Winchester o pojemności 60 MB
1983 pierwsza dyskietka 3,5”.

Na rys.12 przedstawiono zasadę działania głowicy indukcyjnej, którą stosowano najczęściej w latach 1986 – 1994 w komputerach

1. Głowice indukcyjne (1986 ~ 94)



Rysunek 12. Schemat i budowa głowicy indukcyjnej stosowanej w komputerach w latach 1986-1994.

2. Głowice magnetorezystywne (MR : 1991 ~ 2000)

Typowy materiał: stopy Ni-Fe

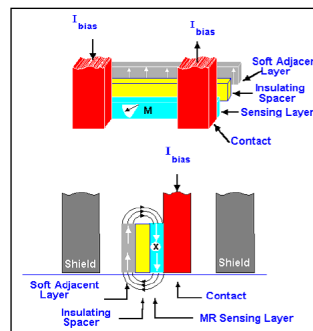
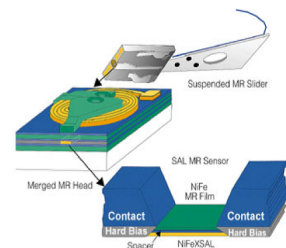


Figure 5. MR head basics.



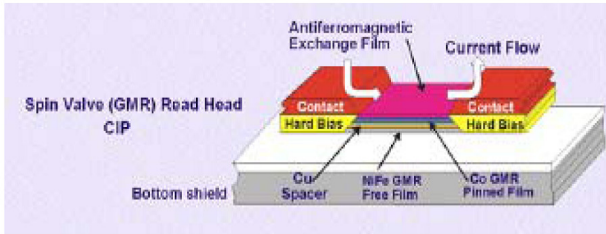
Rysunek 13. Schemat głowicy magnetorezystywnej stosowanych w latach 1991-2000 w komputerach

Głowicę magnetorezystywne najczęściej stosowane w latach 1991-2000 (rys. 13) bazują na anizotropowym magnetooporze, w których $\Delta R/R = 2 - 5\%$ co daje od 1 do 5 Gb/sq.inch. Po raz pierwszy wprowadzone zostały przez IBM. Materiałem typowym stosowanym w budowie głowicy jest stop Ni-Fe.

Od 1997 roku stosuje się głowice z gigantycznym magnetooporze $\Delta R/R = 10 - 50\%$ co daje 10Gb/sq.inch

3. Głowice z gigantycznym magnetooporem (od 1997)

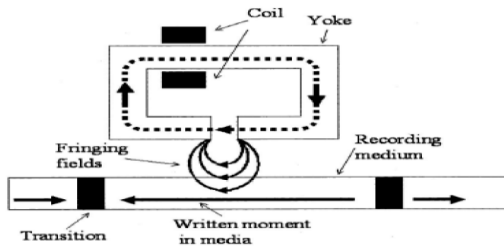
⚡ $\Delta R/R=10\sim 50\%$, co daje 10Gb/sq.inch



http://www.owl.net.rice.edu/~phys533/notes/week14_lectures.pdf

Rysunek 14. Przekrój warstwowy głowicy z gigantycznym magnetooporem

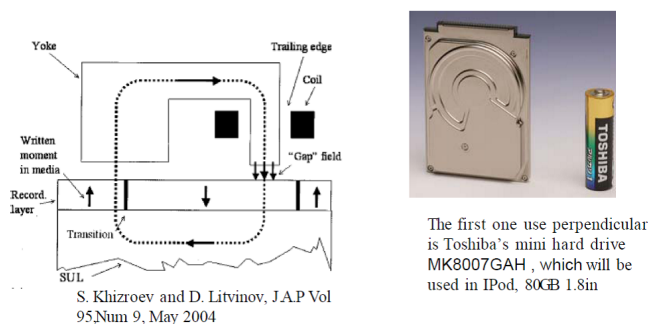
Głowica: zapis podłużny



S. Khizroev and D. Litvinov, J.A.P Vol 95, Num 9, May 2004

Rysunek 15. Schemat działania głowicy przy zapisie podłużnym [13]

Głowica: zapis poprzeczny



S. Khizroev and D. Litvinov, J.A.P Vol 95, Num 9, May 2004

Rysunek 16. Schemat działania głowicy przy zapisie poprzecznym. [13]

Na rys. 14 przedstawiono schemat takiej głowicy. Kolejne rys. 15, 16 przedstawiają zapisy podłużny i poprzeczny [13].

Materiały magnetyczne do budowy głowicy muszą spełniać pewne wymagania, muszą to być magnetyki o małym ziarnie krystalicznym (CoCrPtTa, CoCrPtB). Na rys. 17 pokazano przekrój przez materiał głowicy. Do budowy twardego dysku stosuje się warstwę ma-

gnetyczną stop Co o grubości 10 – 30 nm naniesiony na podłoże Al-Mg z warstwą NiP lub szkło. Podłoże najpierw jest powlekane cienką warstwą Cr lub stopu CrV w celu zapewnienia odpowiedniej orientacji krystalograficznej warstwy magnetycznej. Gładkość powierzchni twardego dysku powinna wynosić kilka nm, zaś przerwa pomiędzy głowicą a twardym dyskiem wynosić powinna około 15 nm.

Lubricant ~ 20 Å
Carbon overcoat ~ 70 Å
Top magnetic layer ~ 100 Å
Spacer layer ~ 0 - 20 Å
Bottom magnetic layer ~ 100 Å
Intermediate layer ~ 50 Å
Under layer ~ 100 Å
Seed layer ~ 100 Å
Substrate

Rysunek 17. Warstwowy przekrój głowicy

Pytanie stawiane przez naukowców często sprowadza się do „Czy istnieje granica możliwości pojemności twardego dysku.”

Każdy bit zawiera setki ziaren krystalicznych. Zapis magnetyczny polega na uśrednieniu namagnesowania wszystkich ziaren. Gdy bity maleją to ziarna też muszą maleć. W końcu stają się superparamagnetyczne. Superparamagnetyzm polega na tym, że magnetyczna informacja zawarta w ziarnie ulega z pomocą energii termicznej spontanicznemu przełączaniu. Aby zachować informację dłuższą niż 10 lat magnetyczna anizotropia ziarna $K_u V > 40-50kT$, oznacza to, że gdy V maleje to K_u musi rosnąć.

Magnetyczna anizotropia może być zwiększona poprzez wytwarzanie materiałów o małym rozrzucie wielkości ziarna. Zapis magnetyczny prostopadły pozwala na użycie większego pola zapisu. Przy pomocy lokalnego ogrzewania materiału dysku można obniżyć pole koercji.

Naukowcy wiążą nadzieję z niedawno odkrytym grafenem. Materiał ten może zastąpić krzem. W Massachusetts Institute of Technology (MIT) zbudowano grafenowy układ (mnożnik częstotliwości) pozwalający odebrać sygnał elektryczny pewnej częstotliwości i wyprodukować sygnał będący wielokrotnością tej częstotliwości. Testy wykazały, że tranzystor wytworzony w procesie technologicznym na bazie grafenu 240 nm

jest w stanie osiągnąć częstotliwość do 100 GHz. Czujniki grafenowe potrafią zarejestrować obecność pojedynczej cząsteczki szkodliwej substancji. Stosując go w urządzeniach spintronicznych możemy otrzymywać materiały magnetyczne z bardzo dużym magnetooporem gdy ma on kontakt z antyferromagnetycznymi warstwami lub mały opór gdy jest wkomponowany pomiędzy ferromagnetyczne warstwy. Son et al. [14] pokazał, że w nanodrutach grafenu polem elektrycznym można wymusić przejście half-metallicity. Ten stan odpowiada współistnieniu stanu metalicznego dla spinów zorientowanych w górę i izolatora dla spinów zorientowanych przeciwnie.

Pole elektryczne przyłożono poprzecznie do nanodrutu z grafenu. W polu zerowym układ jest scharakteryzowany przez przerwę energetyczną Δ_s dla spolaryzowanych spinów na końcach nanodrutu grafenu spinów. Przyłożone pole elektryczne narusza symetrie energetyczną i prowadzi do zniszczenia przerwy energetycznej. Wartość krytycznego pola elektrycznego odpowiadająca przejściu half-metallicity jest 3.0/w V gdzie w jest przekrojem nanodrutu. To zjawisko może być wykorzystywane do budowy prostego czujnika elektrycznego transportu spinu.

Nowe odkryte materiały magnetyczne w nanostrukturach, nanodrutach, nanorurkach będą miały duże zastosowanie w mikroelektronice. Otrzymywanie tych materiałów na skale przemysłową jest trudne ale możliwe.

Literatura (References)

- [1] K. A. Gsschnejder, L. Eyring, *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. Vol. 12. North-Holland, Amsterdam 1989.
- [2] J. Mulak, W. Suski, R. Troć, *2nd International Conference on the Electronic Structure of the Actinides proceedings*, September 13-16, 1976. Ossolineum, Wrocław 1977.
- [3] O. V. Yazyev, *Emergence of magnetism in grapheme materials and nanostructures*, Reports on Progress in Physics 73 (2010), 1-15.
- [4] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zang, S. V. Dubonos, I. V. Grigoriewa, A. A. Firsow, *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*, Science 306 (2004), 666-669.
- [5] Z. Wilamowski, *Spintronika. Postępy Fizyki* tom 55, zeszyt 3 (2004), 115-119.
- [6] S. Koshihara, A. Oiwa, M. Hirasawa, S. Katsumoto, Y. Iye, C. Urano, H. Takagi, H. Mune-kata, *Ferromagnetic Order Induced by Photogenerated Carriers in Magnetic III-V Semiconductor Heterostructures of (In, Mn)As/GaS.*, Physical Review Letters 78 (1997), 4617-4620.
- [7] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand, *Zener Model Description of Ferromagnetism in Zinc-Blende Magnetic Semiconductors*, Science 287 (2000), 1019-1022.
- [8] T. L. Makarova, B. Sundquist, R. Hohne, P. Esquinazi, Y. Kopelevich, P. Scharff, V. A. Davydov, L. S. Kashevarova, A. V. Rakhmanina, *Magnetic carbon*, Nature 413 (2001), 716-718.
- [9] P. Grünberg, *Light Scattering from Spinwaves in Layered Magnetic Structures. Light Scattering in Solids V*, (red.) M. Cardona, G. Güntherodt, Applied Physics Letters 66 (1989).
- [10] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen, P. Van Dau, F. Petroff, *Giant Magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr Magnetic Superlattices*, Physical Review Letters 61, 21 (1988), 2472-2475.
- [11] M. Bowen, M. Bibes, A. Barthélémy, J.-P. Contour, A. Anane, Y. Lemaître, A. Fert, *Nearly total spin polarization in La₂/3Sr₁/3MnO₃ from tunneling experiments*, Applied Physics Letters 82 (2001), 233-236.
- [12] S. S. P. Parkin, Ch. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant i S.-H. Yang, *Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers*, Nature Materials 3 (2004), 862-867.
- [13] S. Khizoroev and D. Litwinov, JAP 95,9, (2004).
- [14] Y. W. Son, M. L. Cohen, S. G. Louie, *Half-metallic grapheme nanoribbons*. Nature 444 (2006), 347-349.