

Zakład Inżynierii Materiałowej i Systemów Pomiarowych

Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka

FIZYKA I INŻYNIERIA MATERIAŁÓW

ĆWICZENIE 11 FIM

**Badanie właściwości materiałów
magnetycznych,
magnetyczny zapis i odczyt informacji**

Łódź 2020

Wstęp

Siły magnetyczne są jednym z podstawowych oddziaływań występującym w naturze. Każdy materiał oddziałuje z polem magnetycznym, jednak nie każdy wykazuje zdolność do silnego magnesowania się. Cechy takie wykazują ferromagnetyki, dzięki czemu stosowane są w tzw. pamięciach magnetycznych. Pamięci magnetyczne stanowią obecnie podstawową grupę urządzeń do masowego gromadzenia i przechowywania danych. Zapis i odczyt magnetyczny umożliwia gromadzenie danych w postaci zarówno analogowej, jak i cyfrowej na zasadzie zmiany stopnia namagnesowania nośnika ferromagnetycznego (np. taśmy, dysku, bębna, karty itp.). Zmiana namagnesowania materiału jest adekwatna do charakteru zmian sygnału (informacji), który ma być zapisany. Odczyt informacji odbywa się na analogicznej zasadzie, zmiany namagnesowania zamieniane są na sygnał zawierający zapisaną informację.

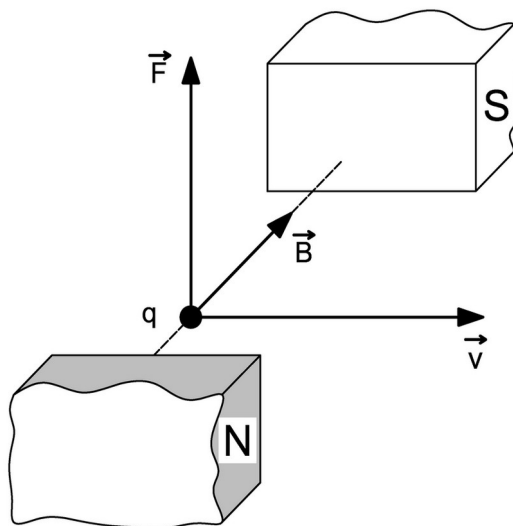
Pole magnetyczne

Polem magnetycznym nazywamy właściwość przestrzeni, w której na znajdujące się w niej obiekty namagnesowane lub ruchome nośniki ładunku elektrycznego działają siły magnetyczne. Siła oddziaływania zależy od natężenia pola magnetycznego oraz od właściwości magnetycznych obiektów, na które oddziałuje. Pole magnetyczne wytwarzane jest zawsze tam, gdzie poruszają się ładunki elektryczne. Źródłami pola magnetycznego są: Ziemia, magnesy stałe, elektromagnesy. Podstawowe wielkości fizyczne używane do opisu pola magnetycznego to indukcja, strumień oraz natężenie pola magnetycznego.

Pojęcie indukcji magnetycznej wiąże się ściśle z pojęciem siły, z jaką pole magnetyczne oddziałuje na poruszający się ładunek (siła Lorentza):

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

Powyższa zależność umożliwia zdefiniowanie wektora indukcji magnetycznej \vec{B} .



Rys 1. Wektor indukcji magnetycznej \vec{B} .

Jednostką indukcji magnetycznej jest tesla $[T] = [N/(A \cdot m)] = [V \cdot s/m^2]$. Wektor indukcji magnetycznej \vec{B} umożliwia wyznaczenie linii sił pola magnetycznego. Jest on styczny w każdym punkcie do linii sił pola magnetycznego i ma ten sam zwrot. Linie pola magnetycznego cechuje:

- brak źródła (pole bezźródłowe),
- są krzywymi zamkniętymi,

- zwrot od bieguna N do S (założenie formalne),
- miarą zagęszczenia linii jest indukcja magnetyczna,
- nierozdzielność biegunów (nie można rozdzielić pola magnetycznego na niezależne bieguny (monopole magnetyczne)).

Rozpatrując skończoną liczbę linii przechodzących przez daną powierzchnię można określić strumień indukcji magnetycznej Φ . Dla powierzchni płaskiej S strumień opisuje zależność:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (2)$$

Jednostką strumienia jest weber [Wb]=[T·m²]=[N·m/A]=[V·s]

Natężenie pola magnetycznego dla środowiska anizotropowego można wyznaczyć z zależności:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (3)$$

Jednostka natężenia pola magnetycznego \vec{H} jest A/m. Wielkością łączącą indukcję i natężenie pola magnetycznego jest przenikalność magnetyczna ośrodka μ , która określa właściwości magnetyczne ośrodka. Jednostką przenikalności bezwzględnej jest H/m (gdzie H – henr). [H/m]=[T·m/A]=[N/A²]=[V·s/(A·m)]. Wielkość \vec{M} nazywana jest magnetyzacją i określa pole magnetyczne wytwarzane przez ośrodek – jego namagnesowanie. Wielkości μ_0 i μ_r to odpowiednio przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) i przenikalność względna ośrodka.

Material	Przenikalność względna μ_r [-]
Próżnia	1
Aluminium	1,000020
Miedź	0,99999
Powietrze	1,00000037
Nikiel	250*
Kobalt	600*
Żelazo	4000 – 1500000**
Izotropowa blacha elektrotechniczna (Fe ₉₆ Si ₄)	7000**
Anizotropowa blacha elektrotechniczna (Fe ₉₇ Si ₃)	100000**
Supermalloy (Ni ₇₉ Fe ₁₅ Mo ₅)	1000000**
Monokrystaliczny stop (Fe ₉₇ Si ₃)	3800000**
* - średnia przenikalność statyczna	
** - przenikalność maksymalna	

Tabela 1. Przenikalność względna podstawowych metali ferromagnetycznych oraz ich stopów

Przenikalność względna jest przenikalnością ośrodka odniesioną do przenikalności próżni i jest wielkością bezwymiarową ($\mu_r = \mu/\mu_0$).

Wartość przenikalności względnej stanowi kryterium podziału ciał z punktu widzenia właściwości magnetycznych na:

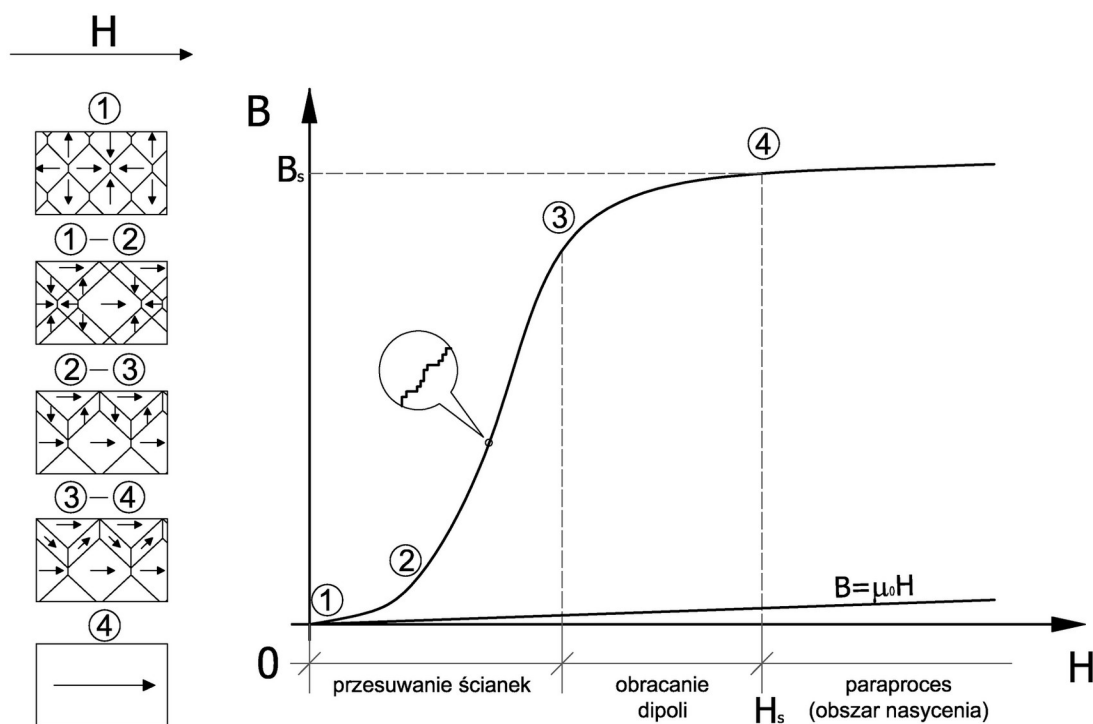
1. **diamagnetyki** - $\mu_r < 1$ - wektor magnetyzacji (namagnesowania) \vec{M} i natężenia pola magnetycznego \vec{H} są antyrównoległe (woda, złoto, bizmut, cynk, magnez, miedź, grafit),
2. **paramagnetyki** - $\mu_r > 1$ - wektor magnetyzacji \vec{M} i natężenia pola magnetycznego \vec{H} są równoległe (tlen, aluminium, platyna),
3. **ferromagnetyki** - $\mu_r \gg 1$ (rzędu 10^3 – 10^4 , silnie zależy od natężenia pola magnetycznego \vec{H}) - wektor namagnesowania \vec{M} i natężenia pola magnetycznego \vec{H} są

równoległe oraz w ciełe tworzą się obszary zwane domenami magnetycznymi, związane ze spontanicznym uporządkowaniem momentów magnetycznych (żelazo, kobalt, nikiel).

Zgodnie z powyższą klasyfikacją ferromagnetyki charakteryzują się silnymi właściwościami magnetycznymi związanymi z występowaniem spontanicznego namagnesowania, czyli występowaniem namagnesowania przy braku zewnętrznego pola magnetycznego. Jest to podstawowa cecha wykorzystywana w tzw. zapisie magnetycznym.

Ferromagnetyki

W stanie nienamagnesowanym ferromagnetyk jest zbiorem tzw. domen magnetycznych (domen Weissa) – obszarów o rozmiarach rzędu 10^{-4} – 10^{-5} m charakteryzujących się stałym namagnesowaniem. Każda z domen jest całkowicie namagnesowana w jednym kierunku, najczęściej zgodnie z główną osią krystalograficzną. Wypadkowe namagnesowanie ciała ferromagnetycznego jest jednak zerowe, ponieważ momenty magnetyczne obszarów o stałym namagnesowaniu są rozmieszczone chaotycznie. Granice pomiędzy domenami, czyli obszary, w których magnetyzacja stopniowo zmienia kierunek, nazywane są granicami (ściankami) Blocha. Granice rozciągają się w przypadku żelaza na obszar ok. 300 jonów. Po umieszczeniu ferromagnetyka w zewnętrznym polu magnetycznym następuje stopniowe porządkowanie domen, związane z przegrupowaniem momentów magnetycznych zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego. Następuje skokowe przemieszczanie granic międzydomenowych, co skutkuje skokowym wzrostem namagnesowania całego ferromagnetyka. Skokowe zmiany namagnesowania przy ciągłym, liniowym wzroście natężenia pola magnetycznego nazywa się zjawiskiem Barkhausena (lub szumem Barkhausena). Przyczyną występowania tego zjawiska są niejednorodności struktury krystalicznej, które utrudniają przemieszczanie ścianek i obroty domen. Nagłe przełamanie oporu przejawia się skokową zmianą namagnesowania. Proces porządkowania domen zachodzi do chwili, gdy możliwie największa objętość ferromagnetyka będzie posiadała momenty magnetyczne skierowane równoległe do kierunku pola magnetycznego. Graficzną interpretację tego procesu nazywa się pierwotną krzywą magnesowania $B=f(H)$. Wyznacza się ją umieszczając próbkę bez przeszłości magnetycznej w jednostajnie, wolno narastającym od zera polu magnetycznym (rys. 2).

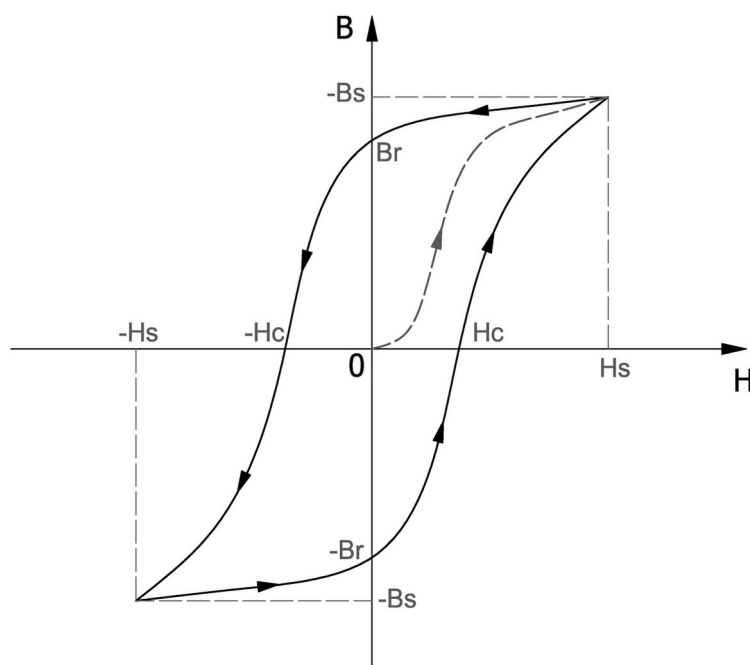


Rys.2. Pierwotna krzywa magnesowania ferromagnetyka.

Krzywą magnesowania można podzielić na trzy części odpowiadające zachodzącym procesom:

1. **przesuwanie ścianek** – zachodzi w zakresie słabych pól magnetycznych i polega na powiększeniu obszarów spontanicznej magnetyzacji. Powiększane są obszary o kierunku zbliżonym do kierunku pola magnetycznego \vec{H} kosztem sąsiednich obszarów o kierunku mniej zgodnym. Proces ten jest odwracalny w zakresie słabych pól (odcinek 1-2). W prawie liniowym zakresie charakterystyki (odcinek 2-3) proces jest nieodwracalny i jest przyczyną występowania zjawiska histerezy magnetycznej. Oznacza to, że część energii pobranej z zewnętrznego pola magnetycznego jest zamieniana na ciepło w ferromagnetyku.
2. **obracanie dipoli** – występuje wraz z przemieszczeniem ścianek Blocha w zakresie silniejszych pól (odcinek 3-4). Polega na obrocie momentów magnetycznych obszarów spontanicznego namagnesowania zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego. Intensywność procesu maleje w miarę zmniejszania się kąta pomiędzy kierunkiem namagnesowania obszaru i kierunkiem \vec{H} . Dla całkowitej zgodności kierunków osiągnięte jest tzw. nasycenie techniczne B_s (punkt 4).
3. **paraproces (obszar nasycenia)** – ostatni etap magnesowania, w którym możliwie największa liczba obszarów ma kierunek zgodny z kierunkiem zewnętrznego pola. Charakterystyka staje się równoległa do prostej $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$.

Zmniejszanie natężenia pola od wartości H_s powoduje, że punkt pracy nie będzie poruszał się po pierwotnej krzywej magnesowania i wyznaczy **graniczną pętlę histerezy** (rys. 3). Dla wartości $H=0$ materiał pozostanie namagnesowany do wartości odpowiadającej indukcji B_r zwanej remanencją (magnetyzmem szczątkowym, pozostałością magnetyczną).



Rys.3. Graniczna pętla histerezy magnetycznej.

Osiągnięcie zerowej indukcji (rozmagiesowanie) jest możliwe po umieszczeniu próbki w polu magnetycznym o przeciwnie skierowanym natężeniu $-H_c$. Wielkość H_c nazywana jest koercją magnetyczną (siłą koercji, powściągliwością magnetyczną). Dalszy wzrost wartości $-H$ prowadzi do osiągnięcia stanu nasycenia przy wartości natężenia równej $-H_s$. Drugą gałąź pętli uzyskuje się przez zmniejszenie wartości bezwzględnej natężenia pola do wartości $H=0$ i następnie zwiększenie do wartości H_s . Zjawisko histerezy magnetycznej jest miarą nieodwracalności układu, dzięki czemu obserwujemy tzw. „efekt pamięci”. Ta cecha jest wykorzystywana w pamięciach magnetycznych tj.

dyskach, taśmach, kartach itp. Wartość koercji oraz kształt pętli histerezy klasyfikują materiały magnetyczne na:

- magnetycznie miękkie,
- magnetycznie półtwarde,
- magnetycznie twarde.

Materiały magnetycznie miękkie łatwo się magnesują, jednak namagnesowanie jest nietrwałe i zanika po ustąpieniu zewnętrznego pola magnetycznego. Materiały te cechuje wąska pętla histerezy magnetycznej, mała wartość koercji ($<1000\text{A/m}$). Stosuje się je najczęściej do budowy obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych, transformatorów i elektromagnesów (np. blachy transformatorowe i prądnicowe).

Materiały magnetycznie półtwarde podobnie jak twarde zachowują stan namagnesowania po usunięciu pola magnetycznego. Stosunkowo niewielka wartość koercji ($1\text{--}10\text{kA/m}$) pozwala jednak na usunięcie namagnesowania lub jego zmianę. Dodatkową cechą tej grupy materiałów jest znaczna wartość remanencji. Dzięki temu materiały te znajdują zastosowanie w pamięciach magnetycznych (np. dyski twarde).

Materiały magnetycznie twarde są trudne do namagnesowania. Po ustąpieniu zewnętrznego pola magnetycznego zachowują trwałe stan namagnesowania. Charakteryzują się szeroką pętlą histerezy magnetycznej, dużą koercją ($>10\text{kA/m}$, nawet do 25MA/m!!). Są nazywane magnesami trwałymi.

Straty energii

Z procesem magnesowania ferromagnetyka związane jest wydatkowanie energii pobieranej z zewnętrznego pola magnetycznego. Energia gromadzona jest w polu magnetycznym próbki (namagnesowanie) i częściowo zamieniana na ciepło (podgrzewanie próbki). Oznacza to, że bilans energii dostarczonej (zewnętrzne pole) i odzyskanej (pozostałość magnetyczna) jest ujemny. Różnicę stanowią tzw. **straty histerezy**, proporcjonalne do pola powierzchni pętli histerezy magnetycznej.

Oprócz strat histerezy procesowi magnesowania w zmiennym polu magnetycznym towarzyszą **straty wirowe**. Straty te są efektem indukowania w materiale prądów wirowych w płaszczyznach prostopadłych do linii strumienia magnetycznego. Ilość traconej energii zależy od rezystywności materiału oraz zgodnie ze zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej od szybkości zmian pola magnetycznego i wartości indukcji.

Przenikalność magnetyczna

Podstawowym parametrem charakteryzującym właściwości magnetyczne materiału jest przenikalność magnetyczna μ . Wartość przenikalności zależy nieliniowo od natężenia pola magnetycznego i silnie maleje powyżej natężenia nasycenia. Wpływ na wartość przenikalności ma również temperatura materiału. W wyniku wzrostu temperatury spontaniczne namagnesowania (lokalne uporządkowanie momentów) ulega zaburzeniu. Jest to efekt wzrostu energii ruchów cieplnych. Materiał przechodzi ze stanu ferromagnetycznego ($\mu_r \gg 1$) w stan paramagnetyczny ($\mu_r > 1$). Temperatura, w której zachodzi to przejście nazywana jest temperaturą Curie (punktem Curie). Ferromagnetyk w temperaturze Curie traci gwałtownie właściwości magnetyczne.

Dla materiałów ferromagnetycznych wyróżnia się następujące pojęcia przenikalności, które określa się na podstawie przebiegu pierwotnej krzywej magnesowania (rys.4):

- przenikalność statyczna μ ,
- przenikalność dynamiczna μ_d ,
- przenikalność początkowa μ_p .

Przenikalność statyczna μ – przenikalność określona w dowolnym punkcie np. A charakterystyki magnesowania, wyrażona zależnością (rys. 4):

$$\mu = \frac{B_A}{H_A} \quad (4)$$

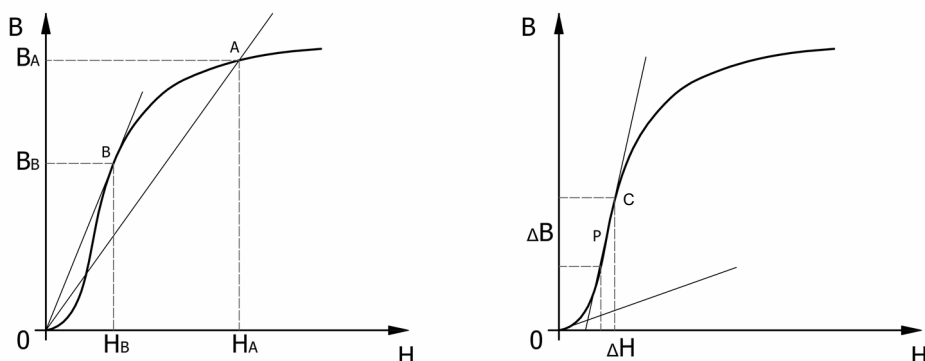
B_A, H_A – indukcja i natężenie określone w punkcie A, leżącym na pierwotnej charakterystyce magnesowania.

Wartość maksymalną osiąga w punkcie styczności prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych i pierwotnej charakterystyki magnesowania (przenikalność maksymalna statyczna μ_{max} – rys. 4, punkt B).

Przenikalność dynamiczna μ_d – przenikalność określana jako nachylenie pierwotnej krzywej magnesowania (pochodna indukcji względem natężenia pola w punkcie P).

$$\mu_d = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{dB}{dH} \quad (5)$$

Wartość maksymalną osiąga w punkcie największej stromości charakterystyki magnesowania (przenikalność maksymalna dynamiczna μ_{dmax} – rys. 4, punkt C).



Rys. 4. Interpretacja graficzna rodzajów przenikalności magnetycznej.

Przenikalność początkowa μ_p – przenikalność określona w punkcie $H=0$, równa liczbowo współczynnikowi kierunkowemu stycznej do pierwotnej krzywej magnesowania w początku układu współrzędnych.

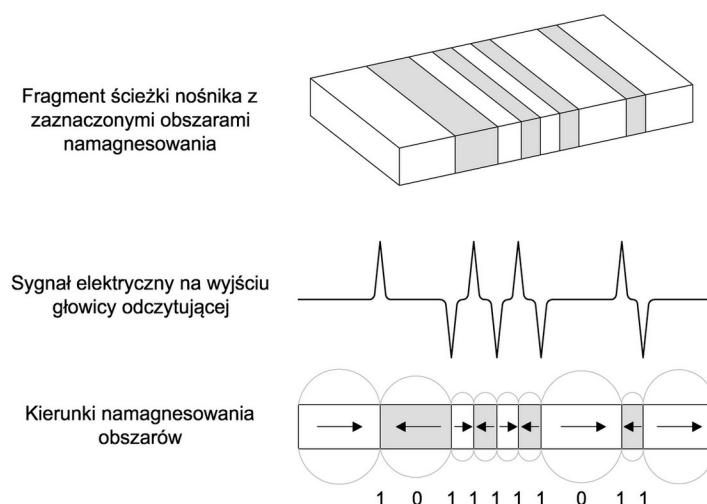
$$\mu_p = \left(\frac{dB}{dH} \right)_{H=0} \quad (6)$$

W katalogach materiałów ferromagnetycznych podawane są wartości przenikalności maksymalnej μ_{max} i przenikalności początkowej μ_p .

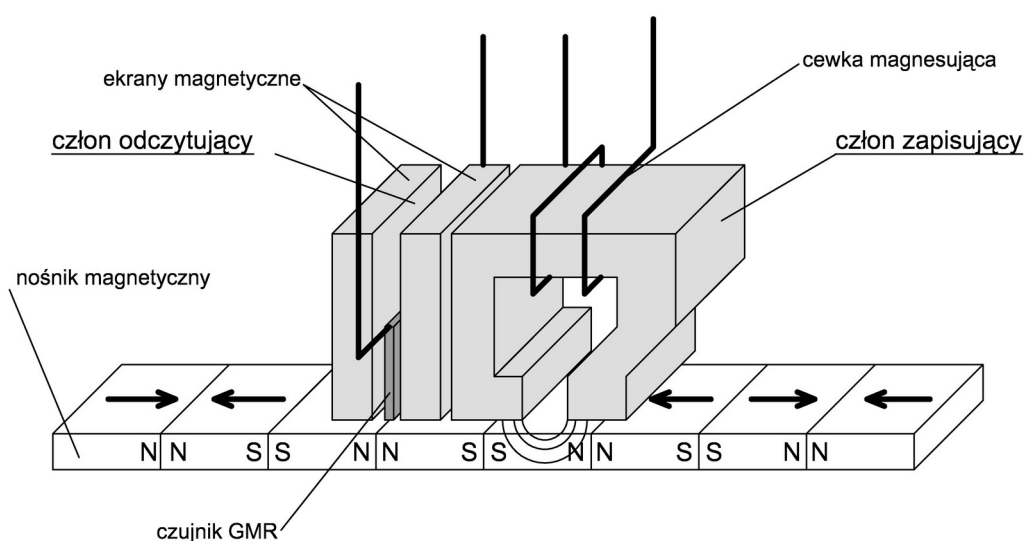
Zapis i odczyt magnetyczny informacji

Zapis magnetyczny polega na gromadzeniu informacji w cienkiej warstwie magnetycznej, nazywanej medium zapisywalnym, naniesionej na niemagnetyczne podłoże. W przypadku danych cyfrowych jedynka binarna zapisywana jest jako lokalna zmiana namagnesowania warstwy magnetycznej - zmiana zwrotu momentu magnetycznego. Brak lokalnej zmiany namagnesowania oznacza zero logiczne (rys. 5). Zorientowanie momentu magnetycznego następuje zgodnie z ułożeniem ścieżki danych (okrężnie w przypadku dysku twardego). Jest to tzw. wzdłużna metoda zapisu magnetycznego. Zachowanie danych jest możliwe dzięki występowaniu zjawiska histerezy magnetycznej cienkiej warstwy materiału magnetycznego. W dyskach twardych nośnik (dysk z warstwą ferromagnetyczną) wiruje z prędkością od 3600 do 15000 obr/min, najczęściej 5400

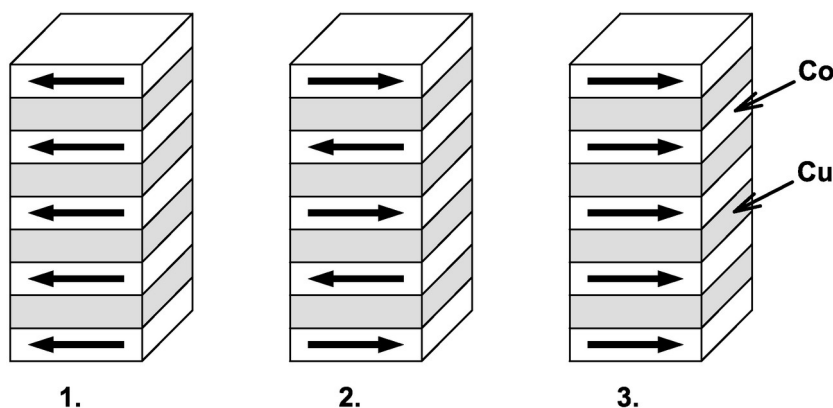
obr/min i 7200 obr/min. Zapis i odczyt danych realizuje dwuczłonowa głowica umieszczona na ramieniu pozycjonującym. Podczas pracy głowica unosi się na poduszce powietrznej ok. 5nm nad powierzchnią dysku. Członem zapisującym głowicy jest przetwornik elektromagnetyczny (cewka). Przetwornik wytwarza pole magnetyczne, które magnesuje fragment nośnika znajdujący się w pobliżu szczeliny obwodu magnetycznego (rys. 6). Zmiana kierunku prądu płynącego w uzwojeniu powoduje zmianę zwrotu wytwarzanego pola magnetycznego, czego efektem jest lokalna zmiana orientacji namagnesowania obszaru ferromagnetyka znajdującego się w pobliżu szczeliny obwodu magnetycznego głowicy. Zmiana namagnesowania jest możliwa, gdy natężenie wytwarzanego pola magnetycznego jest większe od wartości siły koercji nośnika magnetycznego H_c . Każda zmiana kierunku przepływu prądu powoduje zapis jednego bitu. Odczyt danych realizowany jest z wykorzystaniem czujnika GMR umieszczonego w ekranie magnetycznym. Ekrany magnetyczne ograniczają wpływ pola magnetycznego wytwarzanego przez człon magnesujący oraz pełnią rolę obwodu magnetycznego członu odczytującego.



Rys.5. Zasada zapisu danych binarnych na nośnik magnetyczny



Rys.6. Budowa głowicy zapisująco–odczytującej stosowanej w dyskach twardych.



Rys.7. Materiał o strukturze warstwowej Co/Cu.
(1,2,3 – kierunki i zwroty momentów magnetycznych w warstwach)

Czujnik GMR działa na zasadzie tzw. efektu gigantycznej magnetorezystancji, będącej jedną z wielu odkrytych do tej pory rodzajów magnetorezystancji. Magnetorezystancja jest zjawiskiem polegającym na zmianie rezystancji materiału pod wpływem działającego pola magnetycznego. Zjawisko to wynika bezpośrednio z prawa Lorentza. Jego źródłem jest działanie pola magnetycznego na elektrony, czego efektem jest zmiana ich drogi. Zmiana rezystancji może być dodatnia lub ujemna i zależy to od rodzaju materiału oraz kierunku pola magnetycznego. W konwencjonalnych ferromagnetykach efekt ten jest niewielki i np. dla permaloju $\Delta R/R$ (zmiana rezystancji w stosunku do jej pierwotnej wartości) wynosi zaledwie 1-3%. Sytuacja ulega zmianie w przypadku materiałów nanokrystalicznych, gdzie $\Delta R/R$ osiąga wartości nawet 50%. Stąd efekt ten nazywany jest efektem gigantycznej magnetorezystancji. Efekt gigantycznej magnetorezystancji obserwuje się w strukturze zawierającej warstwy o grubości nanometrycznej odpowiednio: ferromagnetyczne (np. kobalt i żelazo (1-3nm)) rozdzielone warstwą metalu niemagnetycznego (np. miedź, chrom, złoto, srebro). Jedna z warstw jest namagnesowana ze stałą orientacją, podczas gdy namagnesowanie drugiej może zmieniać się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Przyłożenie pola magnetycznego powoduje zmniejszenie oporu elektrycznego struktury – ujemna zmiana rezystancji. Przy braku pola magnetycznego namagnesowanie w warstwach ma kierunki przeciwnoległe i kolejne warstwy są sprzężone antyferromagnetycznie (rys.7, (2)). Przy odpowiednio dużym natężeniu pola magnetycznego skierowanego równoległe do powierzchni warstw sprzężenie zmienia się na ferromagnetyczne (rys.7, (1,3)). Oporność takiej struktury jest mniejsza w przypadku sprzężenia ferromagnetycznego. W głowicach dysków twardych zmiany rezystancji czujnika GMR interpretowane są jako zmiany namagnesowania, czyli zapisana jedynka binarna (rys. 6).

Literatura:

- F. Kostrubiec, *Podstawy fizyczne materiałoznawstwa dla elektryków*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1999
- M. Soiński, *Materiały magnetyczne w technice*, SEP Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw,
- M. Leonowicz, *Nanokrystaliczne materiały magnetyczne*, WNT, Warszawa 1998
- Jian-Gang (Jimmy) Zhu, *New heights for hard disk drivers*, Materials Today, July/August 2003 str.22-30

Wykonanie ćwiczenia

UWAGA!

Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia proszę zapoznać się z instrukcją dodatkową umieszczoną na stanowisku laboratoryjnym.

1. Wyznaczanie pętli histerezy magnetycznej ferromagnetyków.

Tabela pomiarowa

Material	B_r	H_c	B_{nas}	H_{nas}
-	T	A/m	T	A/m

Pomiary należy wykonać zgodnie z instrukcją dodatkową umieszczoną przy stanowisku pomiarowym.

2. Badanie wpływu częstotliwości zmian pola magnetycznego na kształt dynamicznej pętli histerezy magnetycznej.

Tabela pomiarowa

Material	f	B_r	H_c	B_{nas}	H_{nas}
-	Hz	T	A/m	T	A/m

Pomiary należy wykonać zgodnie z instrukcją dodatkową umieszczoną przy stanowisku pomiarowym.

3. Wyznaczanie obszarów namagnesowania na nośnikach magnetycznych.

Uwaga! Przed rozpoczęciem badań proszę wstrząsnąć pojemnikiem z mieszaniną ferromagnetyczną.

Za pomocą zakraplacza nanieść kroplę mieszaniny na zwilżoną powierzchnię badanego nośnika i równomiernie rozprowadzić na powierzchni (ok. 1 cm²). Pozostawić na ok. 10 sekund, a następnie korzystając z mikroskopu stereograficznego zaobserwować rozkład namagnesowanych obszarów.