

WYKŁAD 4

Pole magnetyczne - wielkości charakteryzujące pole. Indukcja elektromagnetyczna. Materiały diamagnetyczne, paramagnetyczne i ferromagnetyczne. Zastosowania twardych i miękkich ferromagnetyków w wybranych urządzeniach / systemach informatycznych.

Pole magnetyczne - wstęp

- Przestrzeń wokół ciała masywnego jest „wypełniona” polem grawitacyjnym.
- Przestrzeń otaczająca ładunek elektryczny zawiera pole elektryczne.
- Jeśli ładunek porusza się, to w przestrzeni tej występuje dodatkowa zmiana, nazywana **polem magnetycznym**.
- Ładunek w ruchu otoczony jest polem zarówno elektrycznym jak i magnetycznym.
- W obu polach zmagazynowana jest energia.
- Im większa prędkość ładunku, tym silniejsze pole magnetyczne → **Ruch ładunku elektrycznego zawsze jest „źródłem” pola magnetycznego.**



Skoro źródłem magnetyzmu są poruszające się ładunki elektryczne, to gdzie odbywa się ich ruch w magnesach trwałych?



Odpowiedź jest prosta: w atomach.



Magnes jako całość może pozostawać w spoczynku, ale elektrony jego atomów są w ciągłym ruchu.



Ruch ten może odbywać się na dwa sposoby: jako ruch postępowy po orbitach atomowych lub jako wirowanie elektronów wokół własnych osi.

Siła magnetyczna

W życiu codziennym często spotykamy się z „siłą magnetyczną”. Przykłady: magnesy trwałe, cewki indukcyjne, elektromagnesy, itd. Wszystkie te przejawy „siły magnetycznej” mogą być wytłumaczone w oparciu o fundamentalne oddziaływania pomiędzy poruszającymi się ładunkami.

„Siłę magnetyczną” i związane z nią pole magnetyczne można opisać poprzez analogię do siły elektrycznej i pola elektrycznego.

Niezależnie od tego czy cząstka porusza się, czy jest w spoczynku, działa na nią siła elektryczna $\vec{F}_E$:

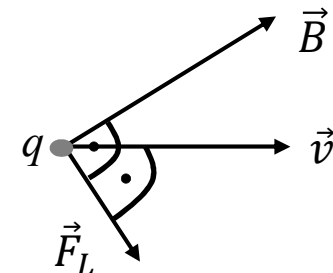
$$\vec{F}_E = q\vec{E}$$

gdzie: q - ładunek elementarny cząstki, $\vec{E}$ - wektor pola elektrycznego.

Jeżeli cząstka porusza się z prędkością $\vec{v}$, to działa na nią dodatkowa siła $\vec{F}_{magn.}$, która jak udowodniono eksperymentalnie, jest proporcjonalna do iloczynu ładunku elementarnego cząstki i jej prędkości. Kierunek tej siły zależy od pewnego ustalonego kierunku w przestrzeni, z kolei jej wartość zależy od wartości składowej prędkości, prostopadłej do wybranego kierunku. Wszystko to możemy opisać wprowadzając **wektor pola magnetycznego $\vec{B}$, który wyznacza ów kierunek w przestrzeni. Zapisujemy więc „**siłę magnetyczną**” (**siłę Lorentza**) w postaci:**

$$\vec{F}_{magn.} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = \vec{F}_L$$

$\vec{F}_L$ - **siła Lorentza**.



Wielkości charakteryzujące pole magnetyczne

➤ Indukcja magnetyczna

Wprowadzona wielkość $\vec{B}$ opisująca pole magnetyczne nazywana jest **indukcją magnetyczną**. Mierzona jest w teslach, T .

Wiedząc, że na cząstkę poruszającą się w polu magnetycznym z prędkością $\vec{v}$, działa siła Lorentza, prostopadła do wektora indukcji magnetycznej, możemy określić wartość $\vec{B}$:

$$B = \frac{F_L}{qv}$$

➤ Natężenie pola magnetycznego i przenikalność magnetyczna ośrodka

Wektor indukcji magnetycznej możemy zapisać jako:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

gdzie: μ - przenikalność magnetyczna ośrodka, $\vec{H}$ - wektor natężenia pola magnetycznego, μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, μ_r - przenikalność względna ośrodka.

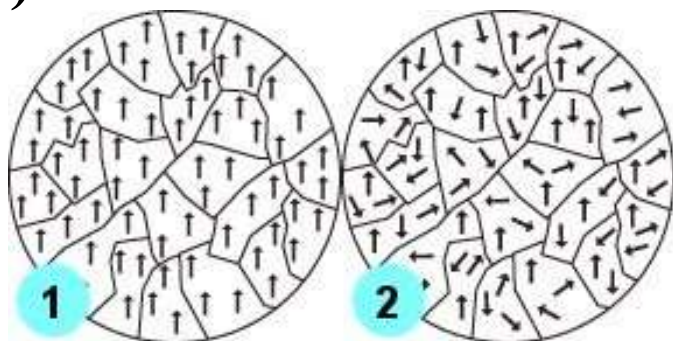
Wektor indukcji magnetycznej $\vec{B}$ umożliwia wyznaczenie linii sił pola magnetycznego. Jest on styczny w każdym punkcie do linii sił pola magnetycznego i ma ten sam zwrot.

Magnes trwały (stały). Domeny magnetyczne

Większość magnesów trwałych robi się ze stopów żelaza, niklu, kobaltu i aluminium.

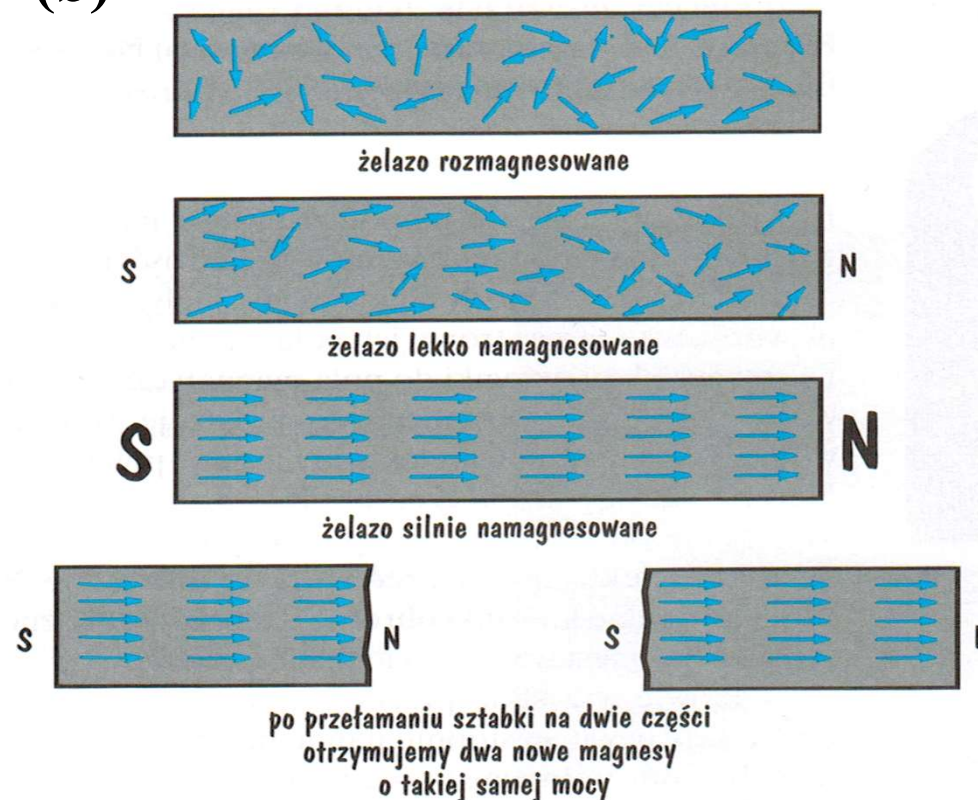
Domeny magnetyczne – spontanicznie namagnesowane obszary w materiałach magnetycznych (np. w ferromagnetykach), w których występuje uporządkowanie momentów magnetycznych. Sąsiednie domeny są rozdzielone **ściankami domenowymi**, w których następuje zmiana orientacji momentów magnetycznych. Każda domena zawiera miliardy atomów.

(a)



Rys. Mikroskopowy obraz domen magnetycznych w kryształach żelaza: (a) 1 - domeny z uporządkowanymi momentami magnetycznymi, 2 - domeny z chaotycznie uporządkowanymi momentami magnetycznymi. (b) Kawałki żelaza o różnym stopniu namagnesowania.

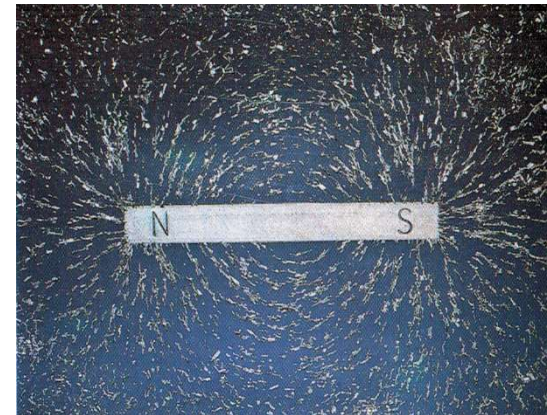
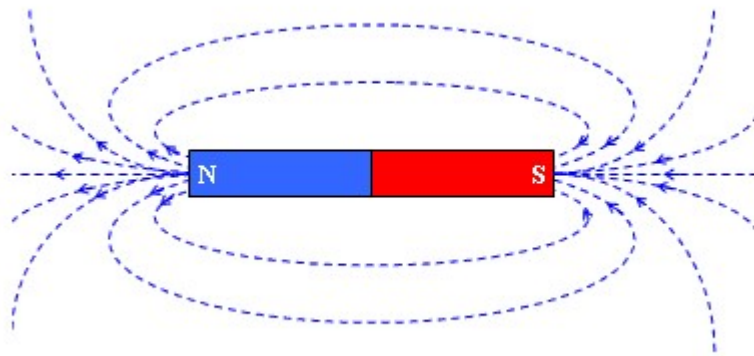
(b)



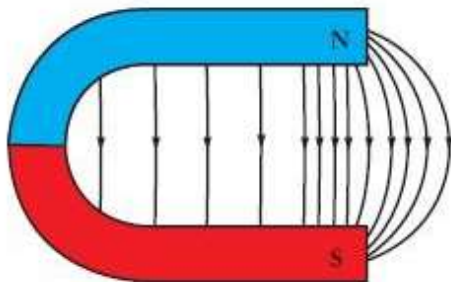
Linie pola magnetycznego

Linie pola magnetycznego cechuje:

- brak źródła (pole bezźródłowe),
- są krzywymi zamkniętymi,
- miarą zagęszczenia linii jest indukcja magnetyczna,
- nierozdzielność biegunów (nie można rozdzielić pola magnetycznego na niezależne bieguny (monopole magnetyczne)).



Rys. Rozkład linii sił pola magnetycznego dla magnesu sztabkowego (**lewa strona**), **prawa strona** – ustawienia opiłek żelaza rozproszonych na kartce papieru umieszczonej nad magnesem.



Rys. Rozkład linii sił pola magnetycznego dla magnesu podkowiastego.

Skąd się biorą własności magnetyczne materii?

- ❑ Materia zbudowana jest z atomów, których elektrony są w ciągłym ruchu.
- ❑ Ruch elektronów może odbywać się na dwa sposoby:
 - jako ruch postępowy po orbitach atomowych
 - jako wirowanie elektronów wokół własnych osi.

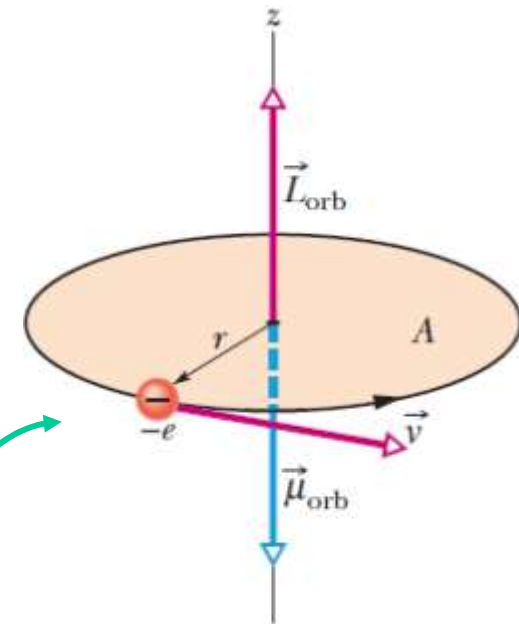
➤ Ruch postępowy po orbitach atomowych

Elektron w atomie ma także moment pędu, zwany **orbitalnym momentem pędu** $\vec{L}_{orb}$, oraz towarzyszący mu **orbitalny moment magnetyczny** $\vec{\mu}_{orb}$. Te dwie wielkości są związane równaniem:

$$\vec{\mu}_{orb} = -\frac{e}{2m} \vec{L}_{orb}$$

Znak minus oznacza, że $\vec{\mu}_{orb}$ i $\vec{L}_{orb}$ są skierowane przeciwnie.

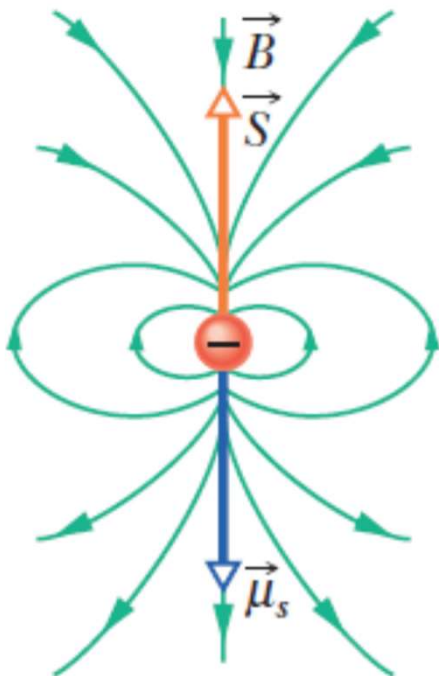
Rys. Elektron porusza się ze stałą prędkością $\vec{v}$ po kołowym torze o promieniu r , obejmującym powierzchnię A . Elektron ma orbitalny moment pędu $\vec{L}_{orb}$ i związany z nim orbitalny moment magnetyczny $\vec{\mu}_{orb}$ skierowane względem siebie w przeciwnych kierunkach.



Skąd się biorą własności magnetyczne materii? – c.d.

➤ Wirowanie elektronów wokół własnych osi

Elektron ma swój własny moment pędu, nazywany **spinowym momentem pędu** lub **spinem** $\vec{S}$. Z tym spinem związany jest własny **spinowy moment magnetyczny** $\vec{\mu}_S$. Wielkości te są związane równaniem:

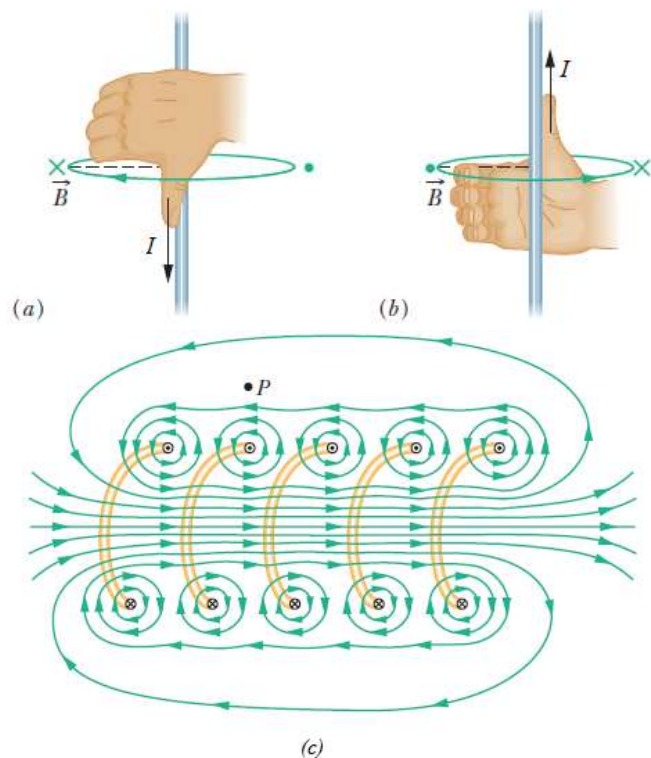


$$\vec{\mu}_S = -\frac{e}{2m} \vec{S}$$

Rys. Spin $\vec{S}$, spinowy moment magnetyczny $\vec{\mu}_S$ i wektor indukcji pola magnetycznego $\vec{B}$ dla elektronu.

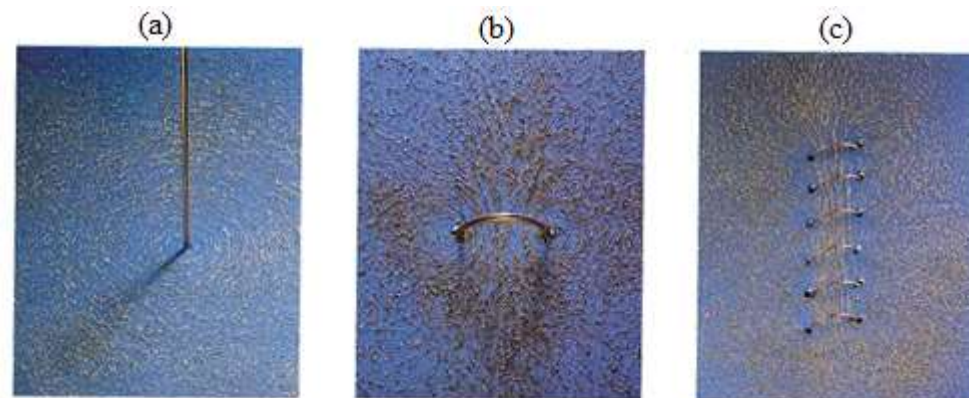
Indukcja elektromagnetyczna

➤ Indukcja magnetyczna – prawo Ampere’a



Rys. Rozkład linii pola magnetycznego wytworzonego przez prąd płynący w przewodach: prostoliniowym (rys. a i b) i kołowym (rys. c). Na rys. (a) prąd płynie w dół, wektor $\vec{B}$ skierowany jest **za płaszczyznę rysunku**, jak pokazuje znak $\times$; na rys. (b) prąd płynie w górę, wektor $\vec{B}$ skierowany jest **przed płaszczyznę rysunku**, jak pokazuje znak $\bullet$; (c) linie pola magnetycznego, przechodzące przez oś solenoidu (cewki) z rozsuniętymi zwojami.

prawa wiążące indukcję magnetyczną (powstanie pola magnetycznego) wokół przewodnika z prądem (z natężeniem prądu elektrycznego przepływającego w tym przewodniku).



Rys. Opilki żelazne rozrzucone na kartce papieru odzwierciedlają linie pola magnetycznego wokół: (a) prostoliniowego przewodnika, (b) przewodnika kołowego, oraz (c) spirali (solenoidu), w których płynie prąd.

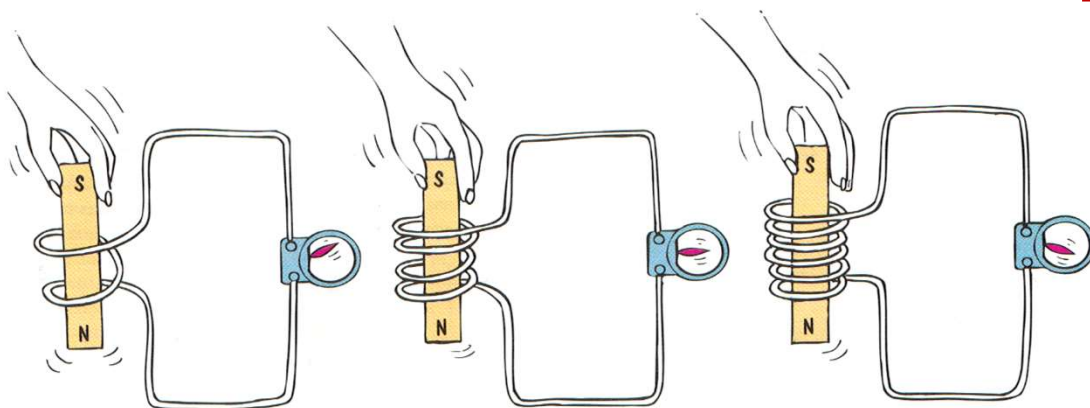
Wartość indukcji magnetycznej pola w odległości R od długiego prostoliniowego przewodu, przez który płynie prąd:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Indukcja elektromagnetyczna – c.d.

➤ Prawo Faraday'a

prawo indukcji elektromagnetycznej, polegające na powstawaniu siły elektromotorycznej (SEM) indukowanej w cewce przez poruszający się ruchem drgającym magnes sztabkowy.



➤ Im szybszy ruch magnesu (większa zmiana pola magnetycznego) tym większe napięcie (większa SEM).

Rys. Ilustracja prawa Faraday'a – powstanie napięcia, tj. siły elektromotorycznej (SEM), indukowanego przez ruch magnesu sztabkowego.

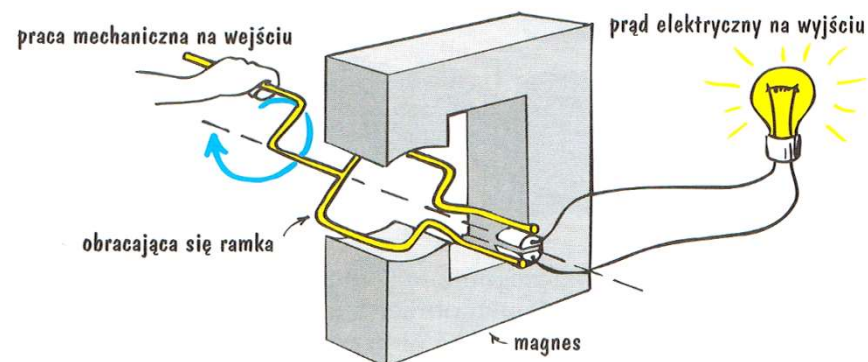
Napięcie w zwojnicy (SEM) można indukować przez ruch samej zwojnicy.



Napięcie w cewce jest proporcjonalne do liczby zwojów oraz do szybkości zmian pola magnetycznego wewnątrz cewki.

$$SEM = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

→ cewka o N zwojach
→ znak minus wynika z **reguły Lenza**
→ Φ_B – strumień pola magnetycznego



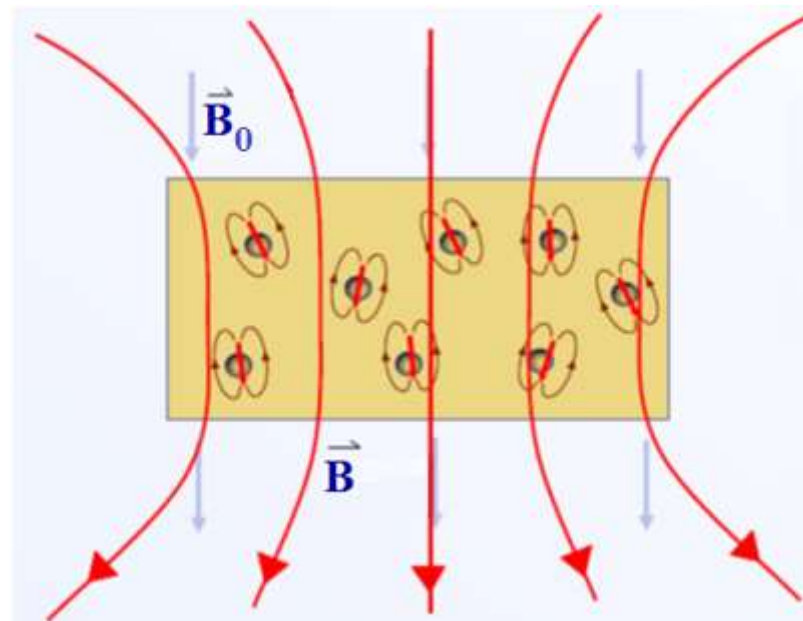
Materiały magnetyczne

Wartość względnej przenikalności magnetycznej ośrodka (μ_r) stanowi kryterium podziału ciał z punktu widzenia właściwości magnetycznych na:

1. **diamagnetyki** – $\mu_r < 1$, np.: woda, złoto, bizmut, cynk, magnez, miedź, grafit;
2. **paramagnetyki** – $\mu_r > 1$, np.: aluminium, platyna;
3. **ferromagnetyki** – $\mu_r \gg 1$ (rzędu 10^3 – 10^4), silnie zależy od natężenia pola magnetycznego (H), w ciele tworzą się obszary zwane domenami magnetycznymi, związane ze spontanicznym uporządkowaniem momentów magnetycznych, np.: żelazo, kobalt, nikiel.

Ad. 1. **Diamagnetyki** – w materiałach tych każdy atom ma nieuporządkowany własny moment magnetyczny ($\vec{B}_M$). Z kolei, gdy materiał umieszczony jest w zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji $\vec{B}_0$ wówczas w atomach indukowane są słabe momenty magnetyczne. Suma wszystkich indukowanych momentów magnetycznych wytwarza słabe wypadkowe pole magnetyczne ($\vec{B}$), które znika, gdy usuniemy $\vec{B}_0$.

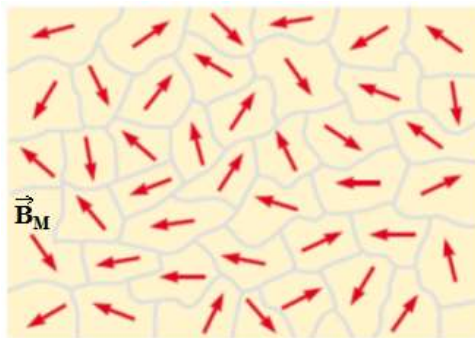
$$B = B_0 + B_M$$



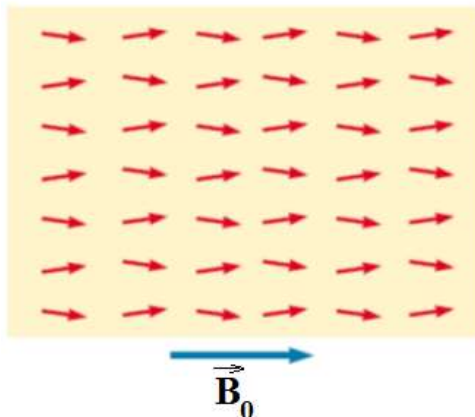
Materiały magnetyczne – c.d.

Ad. 2. **Paramagnetyki** – w materiałach tych każdy atom ma trwały własny moment magnetyczny ($\vec{B}_M$), ale momenty zorientowane są przypadkowo (chaotycznie, por. rys (a)) i materiał jako całość nie wytwarza wypadkowego pola magnetycznego. **Umieszczenie takiego materiału w zewnętrznym polu magnetycznym ($\vec{B}_0$) może częściowo uporządkować momenty magnetyczne (por. rys (b)).** Porządkowanie momentów magnetycznych prowadzi do słabego „namagnesowania się” materiału $\rightarrow$ powstania wypadkowego pola magnetycznego ($\vec{B}$), które znika gdy usuniemy $\vec{B}_0$.

(a)



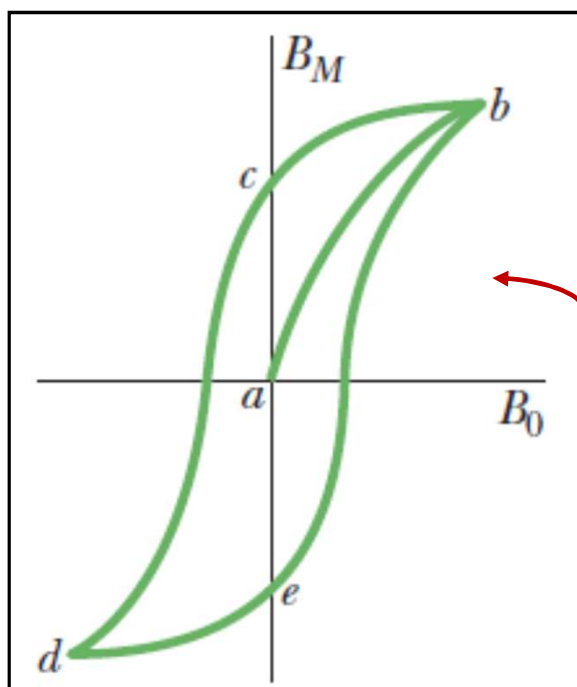
(b)



Ad. 3. **Ferromagnetyki** – w materiałach tych każdy atom ma uporządkowany, własny moment magnetyczny ($\vec{B}_M$), dzięki czemu powstają obszary o dużym momencie magnetycznym. Umieszczenie takiego materiału w zewnętrznym polu magnetycznym ($\vec{B}_0$) porządkuje momenty magnetyczne, wytwarzając silne wypadkowe pole magnetyczne ($\vec{B}$) i silne „namagnesowanie się” materiału. To pole utrzymuje się nawet po usunięciu $\vec{B}_0$. Dlatego mówi się, że ferromagnetyki wykazują **spontaniczne namagnesowanie nawet przy braku zewnętrznego pola magnetycznego.** Jest to zjawisko trwałego namagnesowania.

Ferromagnetyki

Jak wspomniano wcześniej ferromagnetyki wykazują trwałe namagnesowanie, co widać po tzw. krzywych magnesowania, tj. zależności $B_0 = f(B_M)$. Wartość B_0 zmieniamy poprzez zmianę natężenia prądu (I) płynącego przez materiał: $B_0 \sim \mu_0 I$.



Rys. Pętla histerezy, tj. zależność $B_0 = f(B_M)$: I – pomiar począwszy od nienamagnesowanego materiału (a), II – zwiększamy prąd aż B_0 osiągnie wartość w punkcie b, III – zmniejszamy prąd do zera, wówczas $B_0 = 0$ (punkt c), IV – zmieniamy kierunek prądu na przeciwny i zwiększamy jego wartość aż B_0 osiągnie wartość w punkcie d, V – ponownie zmniejszamy prąd do zera (punkt e), VI – jeszcze raz odwracamy kierunek prądu aż B_0 osiągnie ponownie wartość w punkcie b.

Zjawisko histerezy magnetycznej jest miarą nieodwracalności układu. Gdy indukcja B_0 przyłożonego pola rośnie, a następnie maleje do wartości początkowej, domeny nie wracają całkowicie do początkowego ułożenia, ale **zachowują pewną „pamięć” uporządkowania po początkowym wzroście pola.**

Ta pamięć materiałów magnetycznych jest podstawową **właściwością wykorzystywaną do magnetycznego gromadzenia informacji**, na przykład w kasetach magnetofonowych, dyskach komputerowych, taśmach, kartach itp.

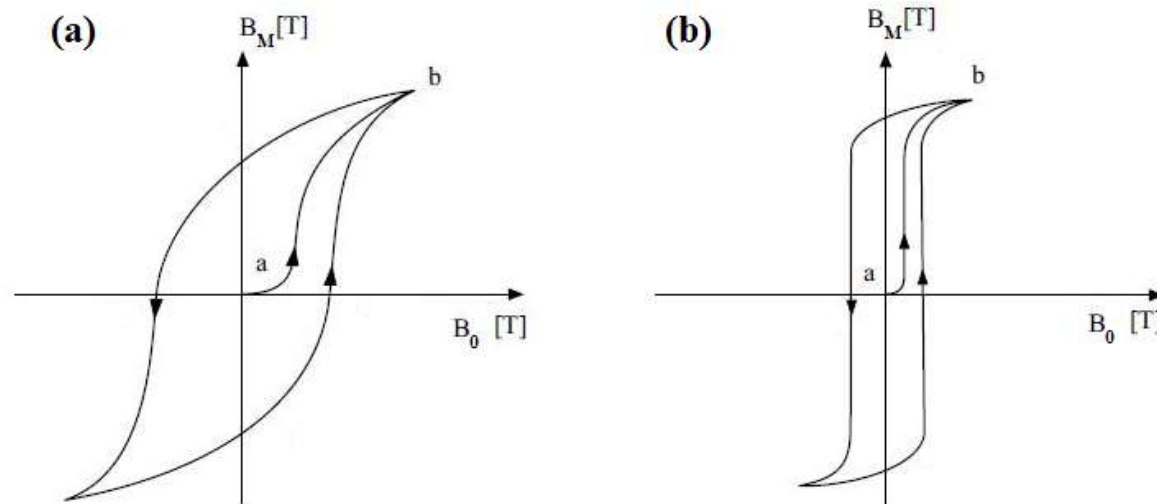
Ferromagnetyki – podział

Ferromagnetyki dzielimy na:

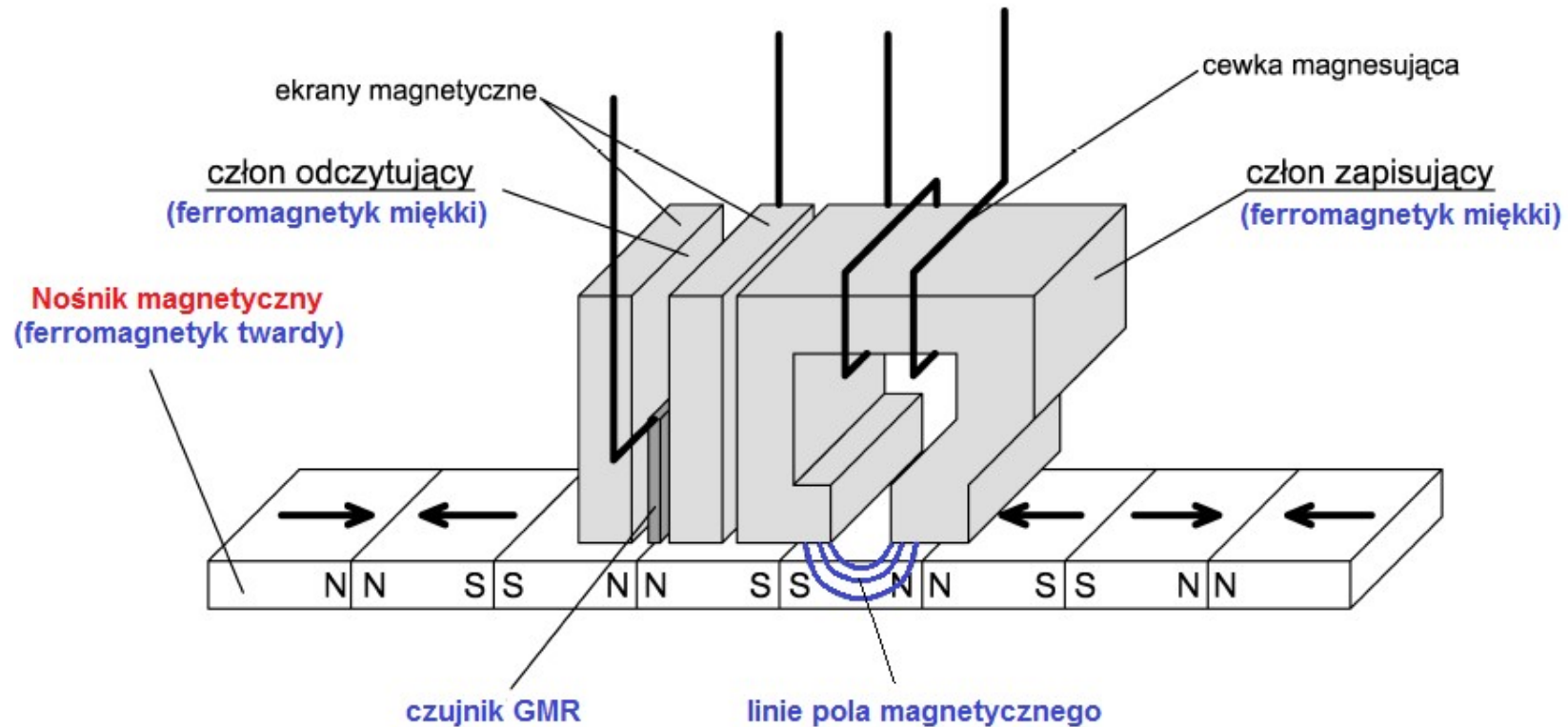
- magnetycznie miękkie,
- magnetycznie twarde.

Ferromagnetyki miękkie łatwo się magnesują, jednak namagnesowanie jest słabe. Charakteryzują się wąską pętlą histerezy (rys (b)). **Stosuje się je najczęściej do budowy prądnic, transformatorów i elektromagnesów.**

Ferromagnetyki twarde są trudne do namagnesowania. Po ustąpieniu zewnętrznego pola magnetycznego zachowują trwale stan namagnesowania. Charakteryzują się szeroką pętlą histerezy (rys (a)). **Stosuje się je najczęściej do budowy dysków twardych, taśm magnetycznych, pamięci komputerowych.**



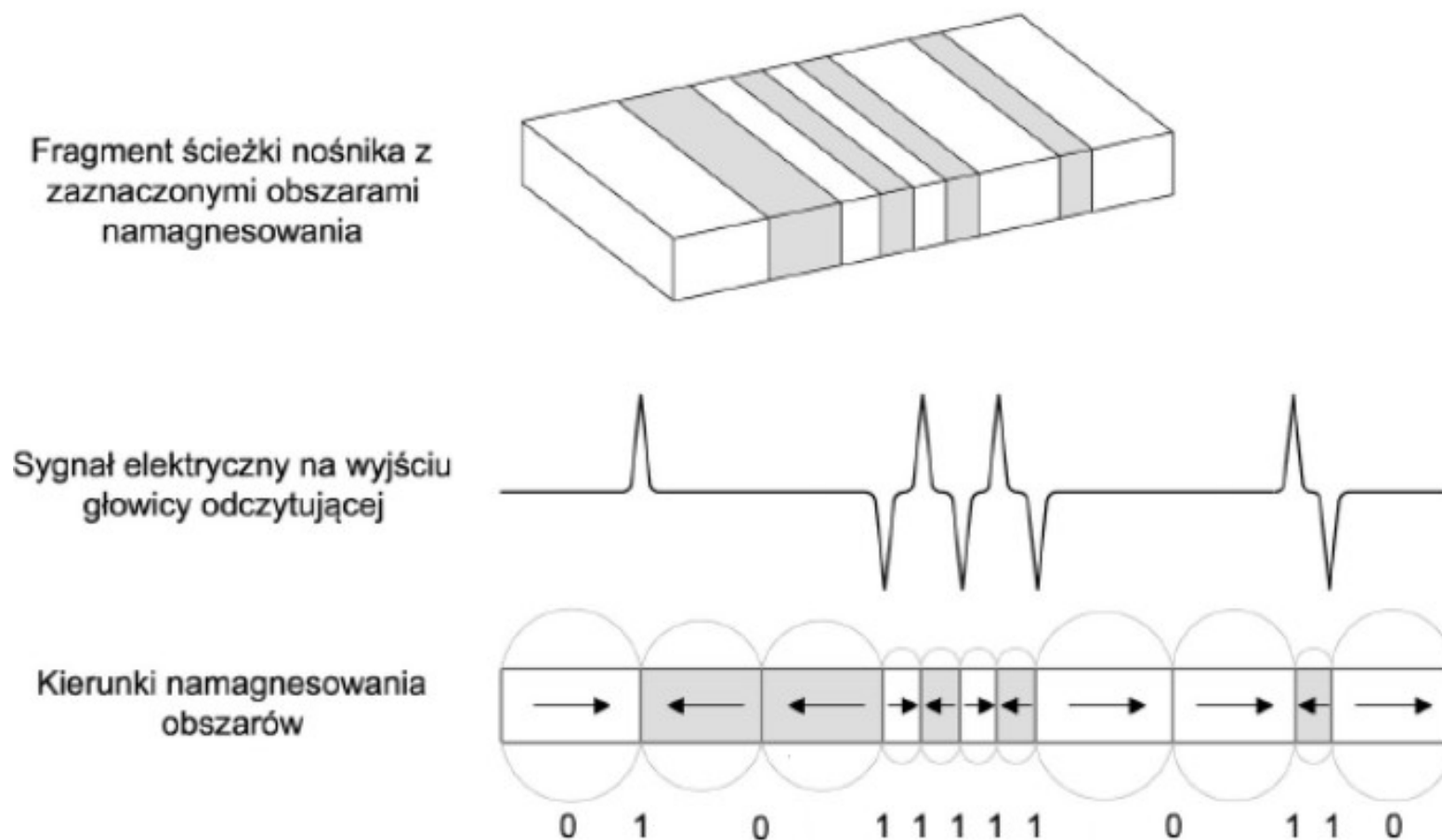
Zastosowania miękkich i twardych ferromagnetyków do magnetycznego zapisu i odczytu informacji



Rys. Budowa głowicy zapisująco-odczytującej stosowanej w dyskach twardych. Czujnik GMR (ang. **G**iant **M**agneto**R**esistance, tzn. gigantyczny magnetoopór).

- ❑ W zapisie informacji na nośnikach magnetycznych wykorzystywane jest **zjawisko powstawania pola magnetycznego** wokół przewodnika, przez który płynie prąd (**prawo Ampere'a**) oraz właściwości „zapamiętywania” pola magnetycznego przez nośnik magnetyczny w wyniku jego trwałego namagnesowania.
- ❑ Odczyt z nośnika magnetycznego następuje na skutek wykorzystania **zjawiska indukcji elektromagnetycznej (prawo Faraday'a)**.
- ❑ Pod głowicą odczytującą przesuwany jest fragment nośnika magnetycznego, na którym została zapisana informacja magnetyczna. Przewodnik nawinięty na głowicy odczytującej znajduje się w zmiennym polu magnetycznym, co powoduje wyindukowanie w nim napięcia. **Na wyjściu głowicy odczytującej sygnał elektryczny pojawiają się impulsy napięciowe, wytwarzane przy każdej zmianie pola magnetycznego.** Kierunek tych impulsów zależy od kierunku zmian pola magnetycznego.

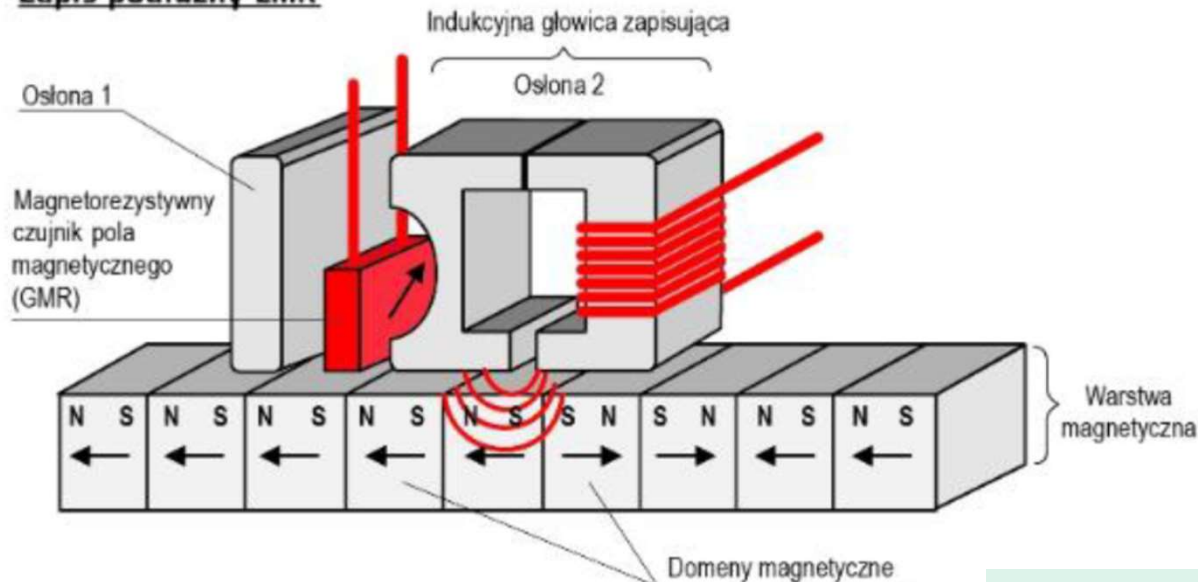
Zastosowania miękkich i twardych ferromagnetyków do magnetycznego zapisu i odczytu informacji



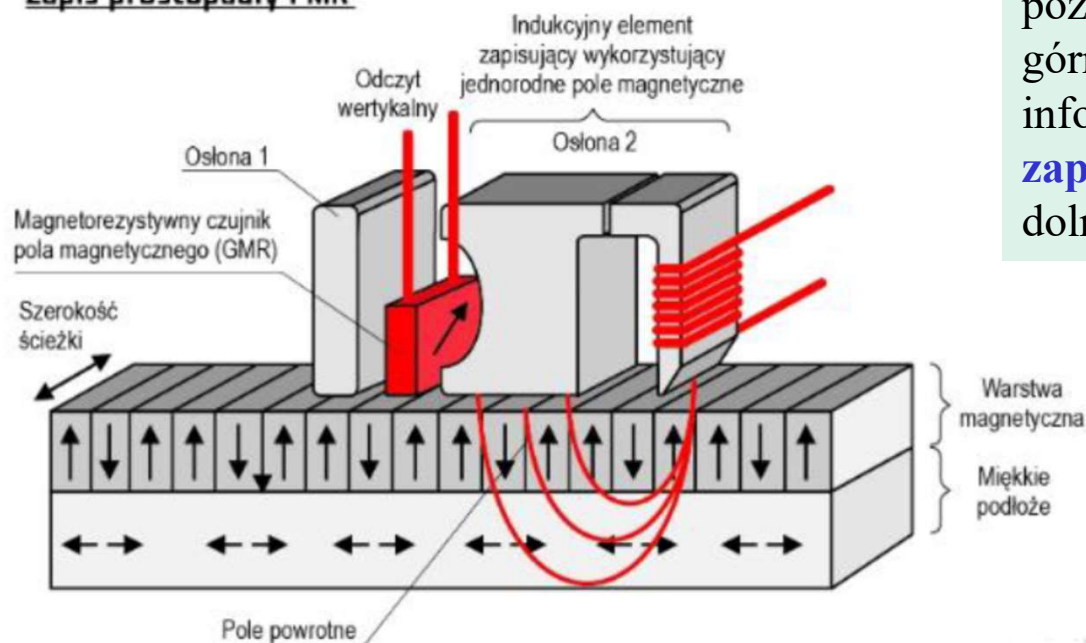
Rys. Zasada zapisu danych binarnych na nośnik magnetyczny. W głowicach dysków twardych zmiany rezystancji (w rzeczywistości napięcia) czujnika GMR interpretowane są **jako zmiany namagnesowania, czyli zapisana jedyńska binarna.**

Techniki zapisu na dyskach magnetycznych

Zapis podłużny LMR

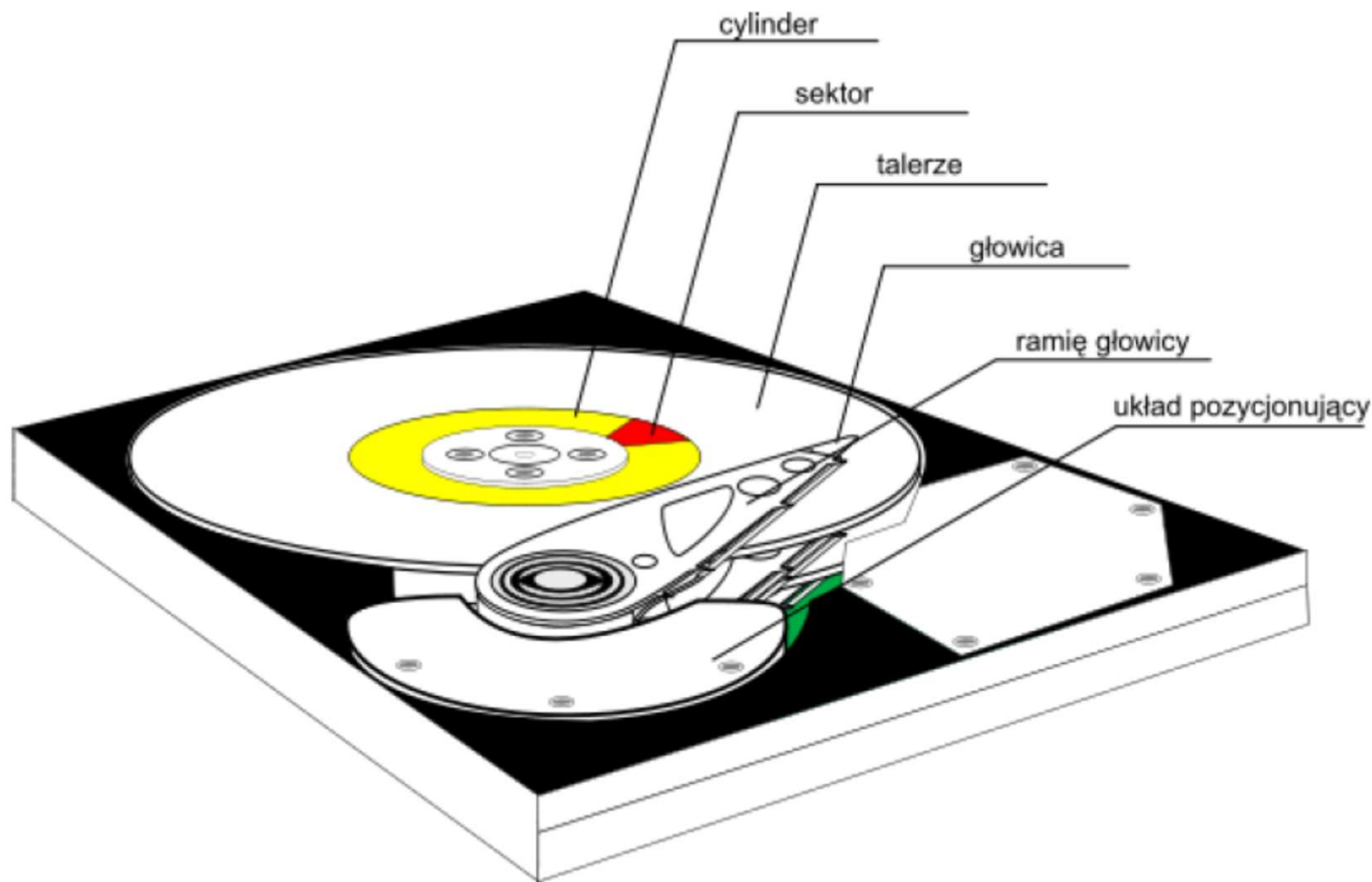


Zapis prostopadły PMR



Pierwotnie tarcze były namagnetyzowane poziomo (tzw. **zapis podłużny, LMR** - patrz górna część rysunku), ale by zagęścić ilość informacji magnesuje się je pionowo (tzw. **zapis prostopadły / pionowy, PMR** - patrz dolna część rysunku).

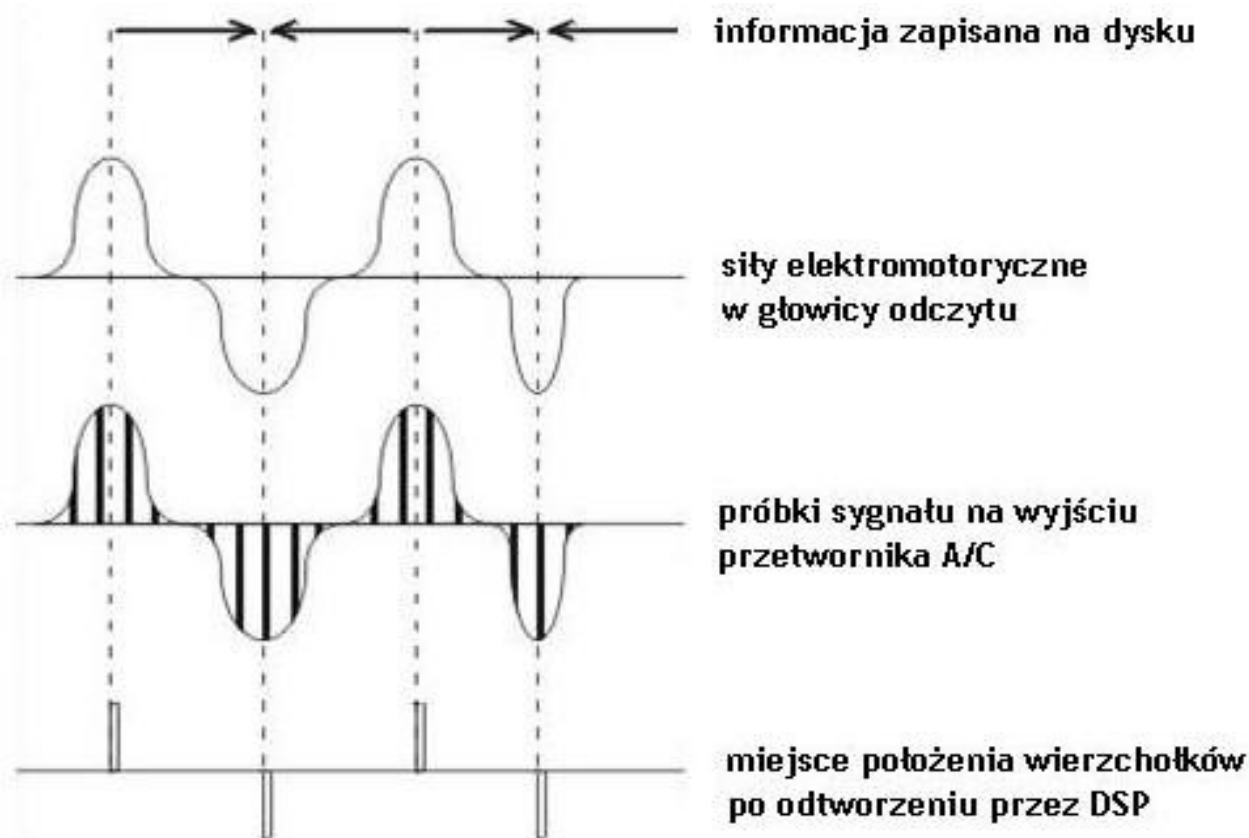
Struktura dysku magnetycznego



Głowica ta zawiera cewkę, dzięki której wytwarzane jest pole magnetyczne, którego orientacja zależy od kierunku prądu elektrycznego, przepływającego przez cewkę. Dysk jest podzielony na małe sektory, które będą zachowywać się jak oddzielne magnesy. Aby odczytać informację, ramię głowicy przesuwa głowicę czytającą a czujnik GMR, który jest umieszczony w głowicy, „mierzy” orientację pola magnetycznego, zapisanego na dysku twardym.

Odczyt informacji z dysków twardych

Metody stosowane do odczytu informacji w dyskach twardych polegają na wykrywaniu ekstremów odczytywanych sił elektromotorycznych (sygnałów napięciowych). Jednak przy wysokiej gęstości zapisu oraz dużej prędkości obrotowej dysku mogą powstawać zniekształcenia tych ekstremów. Nowa metoda odczytu zwana metodą **PRML** (z ang. *Partial Response Maximum Likelihood*) umożliwia **bezbłędne rozpoznanie szczytu sygnału siły elektromotorycznej pomimo występujących zakłóceń**. (poniższy rys. przedstawia schemat metody PRML).



DSP – ang. *digital signal processing*, tj. **cyfrowe przetwarzanie sygnału** przez mikroprocesor o architekturze przystosowanej do przetwarzania cyfrowych sygnałów