

8

WYBRANE PRZYRZĄDY ELEKTRONICZNE

8.1. TERMOELEMENT PELTIERA
(CHŁODZIARKA TERMoeLEKTRYCZNA)

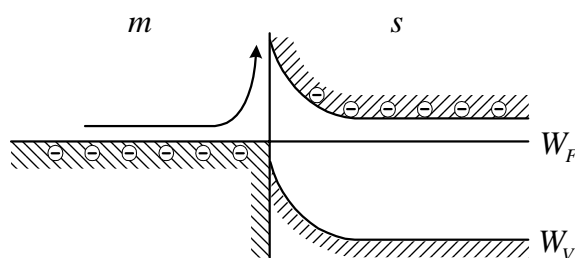
Termoelement Peltiera jest w istocie pompą ciepła zbudowaną w technologii półprzewodnikowej i może być używany do chłodzenia, grzania lub stabilizacji temperatury ale jego podstawowe zastosowanie to chłodziarka termoelektryczna (TEC - thermoelectric cooler). Elementy TEC znajdują zastosowanie w przenośnych chłodziarkach niedużych mocy (rzędu 100 W), w kamerach CCD, do chłodzenia mikroprocesorów, diod laserowych i innych mikroukładów elektronicznych gdzie wymagane jest intensywne odprowadzanie ciepła.

Efekt Peltiera, odkryty w 1834 r, polega na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła na styku dwu materiałów w zależności od kierunku przepływającego prądu. Wielkość wydzielanego ciepła Q i jego znak zależą od rodzaju stykających się materiałów oraz ilości ładunku przepływającego przez złącze

$$dQ_{12} = \Pi_{12} I dt \quad (8.1)$$

przy czym współczynnik Peltiera $\Pi_{12} = \Pi_2 - \Pi_1$ jest proporcjonalny do różnicowej siły termoelektrycznej α ($\Pi_{12} = \alpha_{12}T$). Zmieniając kierunek I otrzymuje się z wyrażenia (8.1) zmianę znaku przy dQ (w odróżnieniu od ciepła Joule'a, które zależy od kwadratu prądu) i złącze chłodzone zacznie się ogrzewać oraz na odwrót. Praktyczne wykorzystanie zjawiska stało się możliwe dzięki zastosowaniu półprzewodników o dobrym przewodnictwie elektrycznym i słabym przewodnictwie cieplnym.

Mechanizm zjawiska można objaśnić posługując się schematem pasmowym złącza metal-półprzewodnik, rys.8.1.



Rys.8.1. Złącze metal -
półprzewodnik typu n

W takim przypadku w przewodnictwie biorą udział elektrony bliskie energii Fermiego W_F w metalu oraz elektrony pasma przewodnictwa

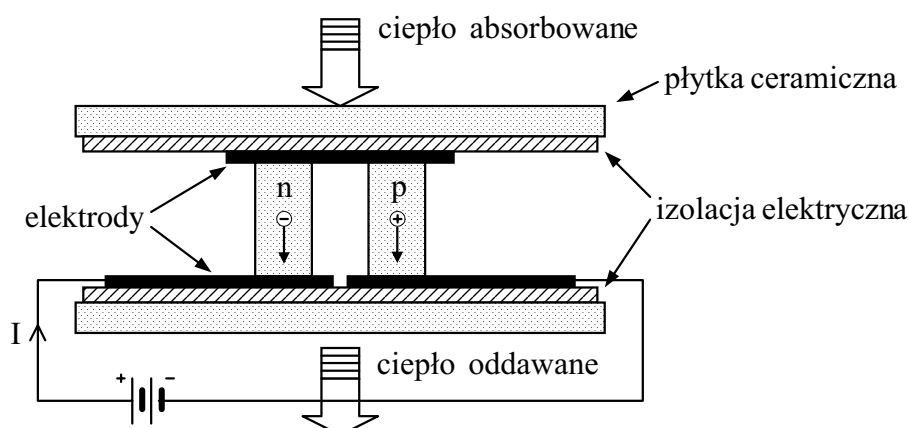
w półprzewodniku. Jak wynika z rys.8.1 średnia energia elektronów przewodnictwa w metalu jest niższa niż w półprzewodniku. Przejście elektronów z metalu do półprzewodnika związane jest z pokonaniem bariery potencjału i koniecznością pobrania energii od sieci czyli ochłodzeniem złącza. Zmiana kierunku prądu powoduje, że nadmiar energii elektronów przechodzących z półprzewodnika do metalu zostanie oddany sieci i wydzielony ciepło.

Dobroć materiału termoelektrycznego można wyrazić jako

$$z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa}$$

Istotne są więc duża różnicowa siła termoelektryczna α (co odpowiada dużemu Π), małe przewodnictwo cieplne materiału κ i duża konduktancja σ .

W praktycznych wykonaniach moduł termoelektryczny TEC zbudowany jest z pewnej ilości par półprzewodników n oraz p połączonych szeregowo za pomocą elektrod metalicznych i umieszczonych między dwiema płytkami ceramicznymi, rys.8.2.



Rys.8.2. Przekrój modułu termoelektrycznego z pokazaną parą połączonych szeregowo półprzewodników n oraz p ; wykorzystywanym najczęściej materiałem jest Bi_2Te_3 domieszkowany donorowo lub akceptorowo

W konfiguracji jak na rys.8.2 ciepło jest transportowane od górnej (chłodzonej) płytki do dolnej. Moduły mogą być łączone równolegle aby zwiększyć ilość pompowanego ciepła, albo mogą być nakładane jeden na drugi (kaskada) aby zwiększyć różnicę temperatur między granicznymi powierzchniami chłodziarki. Jeżeli nie jest wymagana różnica temperatur między powierzchniami gorącą i zimną większa od ok. 60°C , wystarczy moduł jednostopniowy.

Typowe dane charakterystyczne chłodziarki są następujące:

- Q_{max} - maksymalna ilość pompowanego ciepła przy $\Delta T = 0$
 ΔT_{max} - maksymalna osiągalna różnica temperatur między końcami gorącym i zimnym bez obciążenia cieplnego
 I_{max} - maksymalny (optymalny) prąd wejściowy w amperach
 V_{max} - maksymalne napięcie przy obciążeniu prądowym I_{max}

Jako zalety chłodziarek termoelektrycznych należy wymienić małą masę i wymiary, cichą pracę, brak części ruchomych, małe szумы, łatwość sterowania temperaturą z użyciem regulatora. Problemy występują wtedy, gdy wymagana wielkość chłodzenia przekracza 200W.

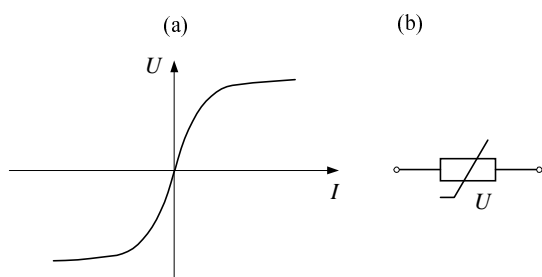
8.2. WARYSTOR

Warystor jest rezystorem półprzewodnikowym o wartości rezystancji zależnej od napięcia. Dzięki takiej właściwości warystory stosowane są przede wszystkim jako elementy zabezpieczające obwody elektryczne przed przepięciami.

Nieliniowa charakterystyka napięciowo-prądowa warystora jest typu potęgowego [87]

$$U = A I^{\beta} \quad (8.2)$$

gdzie współczynnik β przyjmuje wartości w granicach od 0,1 do 1,0. Współczynniki A i β zależne są od rodzaju materiału, z którego wykonany jest dany element, a także częściowo od geometrii warystora. Kształt charakterystyki (8.2), przedstawionej na rys.8.3 wskazuje, że warystor jest elementem symetrycznym o właściwościach niezależnych od kierunku przepływającego prądu.



Rys.8.3. Charakterystyka napięciowo-prądowa typowego warystora (a) oraz jego symbol graficzny (b)

Charakterystyka opisana równaniem (8.2), po obustronnym zlogarytmowaniu, przedstawia linię prostą

$$\log U = \log A + \beta \log I \quad (8.3)$$

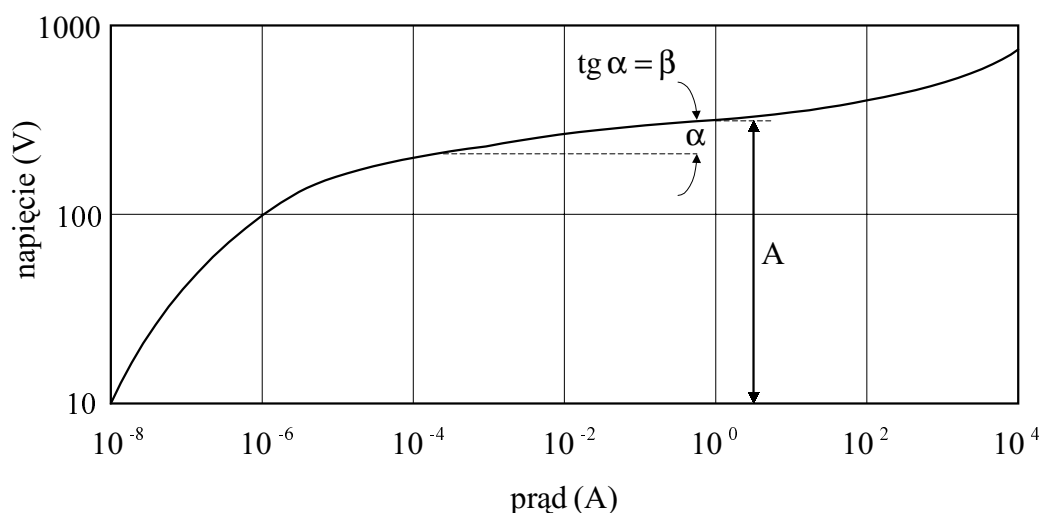
w logarytmicznym układzie współrzędnych ($\log U$, $\log I$). Po zróżniczkowaniu zależności (8.3) otrzymuje się wyrażenie pozwalające zdefiniować β jako współczynnik określający nieliniowość charakterystyki

$$\frac{dU}{U} = \beta \frac{dI}{I} \quad (8.4a)$$

$$\beta = \frac{\frac{dU}{U}}{\frac{dI}{I}} = \frac{\delta R}{R} \quad (8.4b)$$

Tak więc β jest równe stosunkowi rezystancji różniczkowej do rezystancji średniej w danym punkcie charakterystyki.

Przebieg charakterystyki rzeczywistego warystora odbiega od zależności liniowej (8.3) w zakresie małych prądów (mniejszych od ok. 10^{-4} A) oraz w zakresie prądów dużych (większych od ok. 100A), rys.8.4.



Rys.8.4. Charakterystyka warystora ZnO w układzie współrzędnych logarytmicznych; stała A równa jest wartości napięcia dla jednostkowego prądu

Z przebiegu charakterystyki dowolnego warystora w układzie podwójnie logarytmicznym można więc wyznaczyć współczynnik nieliniowości β oraz stałą A .

Stosując warystor w układach prądu stałego i zmiennego posługujemy się pojęciami rezystancji statycznej i dynamicznej. Rezystancję statyczną określa wyrażenie

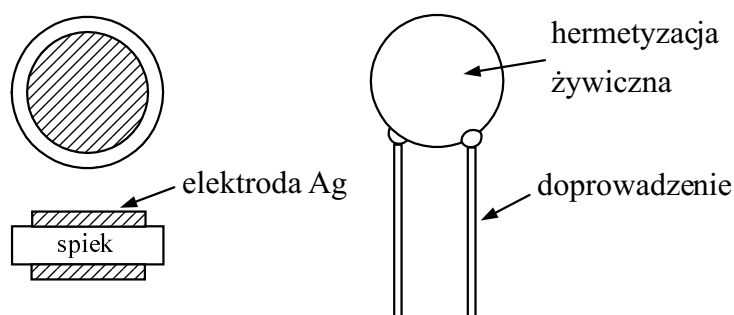
$$R = \frac{U}{I} = A I^{\beta-1} \quad (8.5)$$

a rezystancję dynamiczną

$$r = \frac{dU}{dI} = \beta A I^{\beta-1} = \beta R \quad (8.6)$$

Tak więc rezystancja dynamiczna warystora jest mniejsza od rezystancji statycznej.

Do produkcji warystorów stosuje się najczęściej węglík krzemu (SiC) oraz tlenek cynku (ZnO) w postaci spieków ceramicznych z odpowiednimi domieszkami. Kształt elementu nadaje się w trakcie prasowania proszku. Po spieczeniu i nałożeniu elektrod (pasta Ag) oraz ich wypaleniu, przylutowuje się druty wyprowadzeniowe i w końcowym etapie nakłada lakiery żywiczne, rys.8.5. Wytworzony warystor poddaje się starzeniu elektrycznemu i cieplnemu aby ustabilizować jego parametry.



Rys.8.5. Warystor w postaci dysku

Brak jest jednolitej teorii tłumaczącej nieliniowość charakterystyki warystora. W przypadku SiC wprowadza się m.in. koncepcję, że na powierzchni ziarna następuje inwersja typu przewodnictwa i w związku z tym ziarna tworzą szeregowo, przeciwsobne połączenia diod. Charakterystyka pokazana na rys. 8.3 w istocie przypomina przebieg dla szeregowego układu dwu diod *p-n* połączonych przeciwsobnie.

Inna teoria objaśnia gwałtowny wzrost prądu ze wzrostem napięcia jako efekt zimnej emisji elektronów z ostrych krawędzi ziarn powodowanej przez lokalne silne pola elektryczne. Istnieje też koncepcja, która przypisuje wzrost konduktancji zjawisku nagrzewania się styków ziarn, czyli obszarów o zwiększonej rezystancji, ze wzrostem natężenia prądu.

Każdy z mechanizmów wspomnianych wyżej może być istotny w zjawisku nieliniowych zmian prądu pod wpływem napięcia w warystorze. Będzie to zależało od rodzaju użytego materiału, a dla

danego materiału od położenia punktu pracy na charakterystyce napięciowo-prądowej.

Typowe zastosowania warystorów to zabezpieczenia przed przepięciami w układach półprzewodnikowych, w układach z obciążeniem indukcyjnym (przełączniki, styczniki, dławiki), w instalacjach samochodowych, w systemach telewizji kablowej i telefonii komórkowej, w zasilaczach, w systemach zabezpieczeń przed elektrycznością statyczną. Dzięki łączeniu warystora z typowymi rezystorami uzyskuje się elementy o charakterystykach wykorzystywanych w regulacji automatycznej.

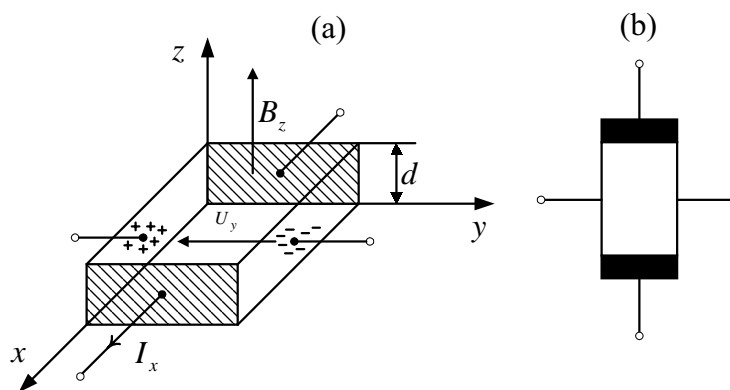
8.3. HALLOTRON

Hallotron jest przyrządem półprzewodnikowym, którego działanie jest oparte na zjawisku galwanomagnetycznym zwanym efektem Halla.

Jeżeli przez próbkę, rys.8.6a, przepuścimy w kierunku x prąd I_x , a w kierunku z przyłożymy pole magnetyczne B_z , to na kierunku y pojawi się napięcie, zwane napięciem Halla, równe

$$U_y = \gamma I_x B_z = \frac{R_H}{d} I_x B_z \quad (8.7)$$

gdzie R_H jest tzw. stałą Halla, a d grubością próbki.



Rys.8.6. Powstawanie napięcia Halla w półprzewodniku (a) oraz symbol graficzny Hallotronu (b)

Stała Halla dla półprzewodnika domieszkowanego z nośnikami jednego rodzaju wynosi

$$R_H = \pm \frac{A}{Nq} \quad (8.8)$$

gdzie A jest czynnikiem zależnym od mechanizmu rozpraszania nośników (dla półprzewodników, w których dominuje rozpraszanie na drganiach cieplnych sieci $A = 3\pi/8$), N jest koncentracją nośników (elektronów lub dziur), a znak zależy od rodzaju nośników („+” dla dziur a „-” dla elektronów). W ten sposób ze znajomości stałej Halla wyznacza się koncentrację nośników ładunku w półprzewodniku oraz rodzaj nośników. Iloczyn stałej Halla i konduktywności pozwala wyliczyć ruchliwość holowską μ_H będącą jednym z podstawowych parametrów materiału półprzewodnikowego

$$\mu_H = R_H \sigma \quad (8.9)$$

Fizyczną przyczyną powstawania napięcia holowskiego jest siła Lorentza \vec{F} działająca na nośniki ładunku poruszające się w polu magnetycznym z prędkością \vec{v}

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (8.10)$$

Siła ta powoduje odchylenie nośników prostopadle do płaszczyzny, w której leżą wektory \vec{v} i \vec{B} . W ten sposób na jednej ze ścianek prostopadłej do kierunku y (rys.8.6a) gromadzi się ładunek określonego znaku, a na drugiej ścianie nieskompensowany ładunek przeciwnego znaku. Rozdzielenie ładunków jest przyczyną powstania pola elektrycznego, które działa na odchylane nośniki siłą przeciwnie skierowaną do siły Lorentza. Gdy siły te zrównają się, ładunek przestaje wzrastać i następuje stan równowagi.

Jako materiały do wytwarzania hallotronów stosuje się półprzewodniki o dużych ruchliwościach nośników takie jak Si, Ge, InSb, HgTe, HgSe.

Hallotrony wytwarzane są w postaci płytek wyciętych z krysztalu półprzewodnikowego lub w postaci cienkich warstw nanoszonych próżniowo na podłoże izolacyjne. Każdy hallotron posiada cztery elektrody: dwie prądowe i dwie holowskie. Obwód prądowy oraz obwód pola magnetycznego tworzą dwa obwody wejściowe. Zaciski do pomiaru napięcia Halla należą do obwodu wyjściowego.

Praktyczne wykonania hallotronów muszą spełnić takie wymagania jak: duże napięcie i moc wyjściowa, duża czułość, liniowość, niezależność parametrów hallotyonu od temperatury, mały prądowy sygnał sterujący. W zależności od przeznaczenia kładzie się większy nacisk na pewne istotne parametry hallotyonu, gdyż trudno jest spełnić wszystkie wymagania jednocześnie.

Mając na względzie pełny opis właściwości hallotyonu określa się jego charakterystyki statyczne przy określonych parametrach stałych.

Jako wielkość wyjściową przyjmuje się napięcie Halla U_y a jako wejściowe prąd sterujący I_x , zależny od obciążenia prąd w obwodzie wyjściowym I_y oraz pole magnetyczne B . W ten sposób można otrzymać trzy rodziny charakterystyk w postaci zależności napięcia Halla od jednej z wielkości wejściowych przy dwu pozostałych wielkościach stałych. W praktyce dąży się do tego aby charakterystyki hallotronu były liniowe. Zmiany temperatury czy też zmiany rezystancji hallotronu w funkcji pola magnetycznego są głównymi przyczynami występujących nieliniowości.

Hallotrony znajdują zastosowanie głównie w miernictwie i technice sensorowej, ale także w energetyce czy elektronice. Jako przykłady tych zastosowań można wymienić.

1. Pomiar wartości i rozkładu przestrzennego pola magnetycznego, w szczególności jako czujnik w układach stabilizacji pola wytwarzanego przez elektromagnesy.
2. Pomiar natężeń prądów rzędu tysięcy amperów w wyniku oddziaływania na hallotron pola magnetycznego wytwarzanego przez przewodnik z prądem (unika się w ten sposób przerywania ciągłości przewodu).
3. Pomiar mocy prądu stałego lub zmiennego (aż do częstotliwości kilku GHz). Prąd w obwodzie pomiarowym jest źródłem pola magnetycznego przykładanego do hallotronu, a prąd sterujący hallotronu jest proporcjonalny do napięcia na odbiorniku energii. Napięcie Halla jako iloczyn wielkości sterujących jest miarą mocy wydzielanej w obciążeniu.
4. Rejestracja przemieszczenia poziomego, pionowego lub obrotu obiektu, do którego przymocowany jest magnes oddziałujący na nieruchomy hallotron. Analogicznie można również rejestrować drgania obiektu.
5. Hallotron jako część składowa komutatora bezszczotkowego silnika elektrycznego.

8.4. MAGNETOREZYSTOR

Współcześnie używane magnetorezystory jako warstwy metaliczne nie są wprawdzie przyrządami półprzewodnikowymi w pełnym znaczeniu tego słowa ale ich rola w elektronice, jako rezystorów czułych na zmiany pola magnetycznego, szybko rośnie i z tego względu zostaną krótko omówione w tym rozdziale.

Początkowo rezystory czułe na pole magnetyczne wytwarzano w oparciu o półprzewodniki (nazywane wtedy gaussotronami). Dla

półprzewodników zmiana rezystancji towarzyszy efektowi Halla a wielkość obserwowanej zmiany zależy od kształtu próbki (stosunku długości do szerokości), ruchliwości nośników μ i wielkości pola B ($\nabla\rho/\rho \sim (\mu B)^2$). Dla próbek o dużej ruchliwości nośników uzyskiwane czułości pozwalały wykorzystywać magnetorezystory do pomiaru pól magnetycznych większych od 2 kGs.

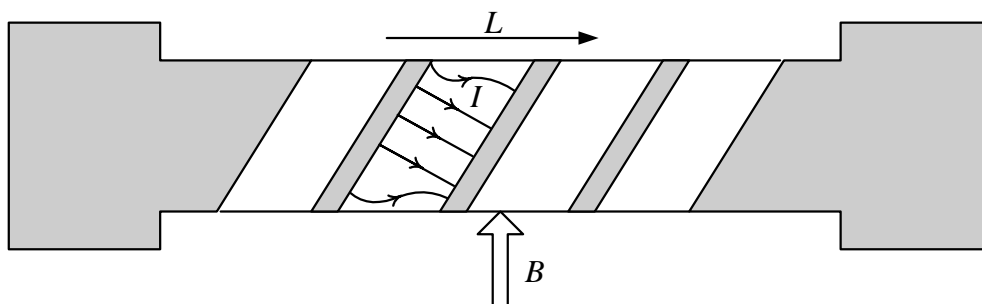
Obecnie wykorzystuje się zjawisko magnetorezystancyjne zachodzące w metalach ferromagnetycznych [90]. Sam efekt określany jako zjawisko Thomsona (Kelvina) lub magnetorezystancyjne zjawisko anizotropowe (AMR) został odkryty jeszcze w XIX wieku, ale jego praktyczne wykorzystanie stało się możliwe dopiero dzięki wprowadzeniu technologii cienkich warstw ferromagnetycznych. W takich materiałach rezystywność uwarunkowana jest stanem namagnesowania próbki $\rho = \rho(M)$. W cienkiej warstwie mechanizm magnesowania jest zbliżony do modelu jednodomenowego, gdzie niewielkie pole magnetyczne wystarcza do zmiany kierunku wektora M . W ten sposób uzyskuje się czułości o dwa rzędy większe niż w przypadku typowych czujników hallotronowych.

Materiały na cienkowarstwowe magnetorezystory to przede wszystkim stopy niklowo-żelazowe, niklowo-kobaltowe i niklowo-żelazowo-kobaltowe o dobranych eksperymentalnie składach.

Charakter zmian rezystancji magnetorezystora cienkowarstwowego w funkcji zewnętrznego pola magnetycznego jest w znacznym stopniu zależny od kąta jaki tworzy kierunek prądu względem tzw. osi anizotropii magnetycznej (osi łatwego magnesowania, którą indukują się w warstwie w trakcie procesu technologicznego). Jeżeli kąt ten jest równy $\pm 45^\circ$, to uzyskuje się rezystor o liniowej zależności zmian rezystancji w funkcji pola magnetycznego. Opracowany przez firmę Philips czujnik typu Barber-pole jest zbudowany w ten sposób, że na ferromagnetyczną ścieżkę naniesione są pod kątem 45° paski metalu (Au, Al) dobrze przewodzącego prąd, rys.8.7.

Geometria ta sprawia, że kierunek przepływu prądu tworzy kąt 45° z osią anizotropii (jest nią oś próbki) i uzyskuje się w przybliżeniu liniową charakterystykę czujnika.

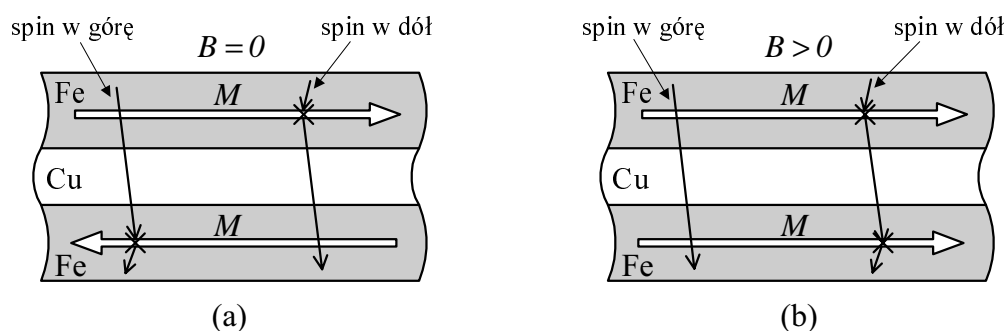
Nałożenie pasków pod kątem -45° umożliwia uzyskanie magnetorezystora o charakterystyce różnicowej w stosunku do rezystora z paskami pod kątem $+45^\circ$. W ten sposób można uzyskać kompensację składowej stałej rezystancji np. poprzez włączenie magnetorezystorów różnicowych w sąsiednie gałęzie układu mostkowego.



Rys. 8.7. Czujnik magnetorezystancyjny typu Barber-pole; L jest kierunkiem osi anizotropii

Takie firmy jak Philips czy Sony wytwarzają różne odmiany magnetorezystorów omawianego typu w konfiguracjach jedno- i wielośćkowych, w wersji półmostka i pełnego mostka. Firmy NEC oraz Honeywell oferują magnetorezystory jako elementy zintegrowane z układem pomiarowym.

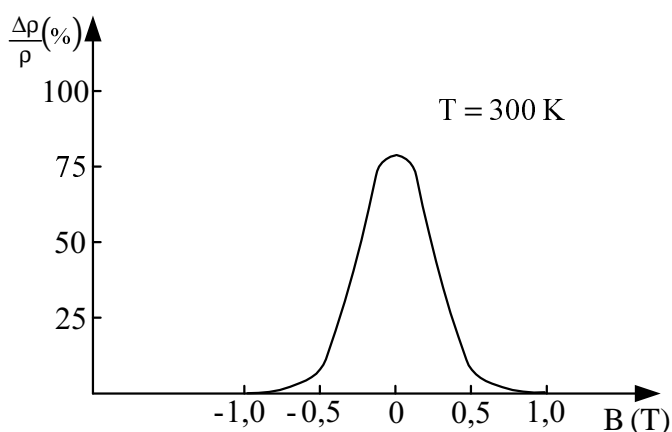
Pod koniec lat osiemdziesiątych (Baibich 1988) odkryto zjawisko zwane gigantyczną magnetorezystancją GMR (giant magnetoresistance) polegające na gwałtownym spadku rezystancji w obecności pola magnetycznego. Efekt ten występuje w strukturach wielowarstwowych, w których warstwy materiału magnetycznego (Fe, Co) przedzielone są cienką warstwą metalu niemagnetycznego (Cu, Ag). Mechanizm zjawiska ilustruje rys.8.8.



Rys.8.8. Struktura warstwowa GMR składająca się z dwu warstw ferromagnetycznych z przekładką niemagnetyczną wykazująca uporządkowanie antyferromagnetyczne (a), które przechodzi w uporządkowanie ferromagnetyczne w zewnętrznym polu magnetycznym (b)

Rozpraszanie elektronu w ferromagnetyku (a więc i jego ruchliwość) zależy m.in. od kierunku spinu tego elektronu względem kierunku wektora namagnesowania. Przy zgodnych kierunkach rozpraszanie jest małe, a przy przeciwnych duże. W strukturze GMR przy braku zewnętrznego pola magnetycznego warstwy magnetyczne na skutek

oddziaływania wzajemnego namagnesowane są antyrównolegle i wtedy zarówno elektron ze spinem „w górę” jak i elektron ze spinem „w dół” trafi na warstwę niekorzystnie namagnesowaną (rys.8.8a). Przy zmianie uporządkowania na ferromagnetyczne, po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego, część elektronów o korzystnie zorientowanym spinie przejdzie przez wszystkie warstwy bez rozpraszania dając wkład w obniżenie rezystancji. W praktyce wytwarza się struktury zwane supersieciami, gdzie układ warstwa magnetyczna / warstwa niemagnetyczna powtarzany jest wiele razy (np. 100). Charakterystyka takiego układu przedstawiona jest na rys.8.9.

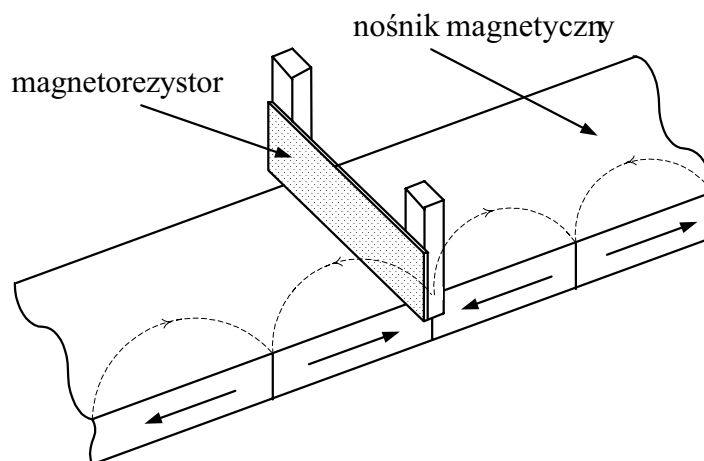


Rys.8.9. Względna zmiana rezystancji w funkcji pola magnetycznego struktury GMR w postaci supersieci [Co (1,1nm) Cu (0,9nm)] * 100

Wadą omówionego układu czujnika GMR jest konieczność użycia dużego pola magnetycznego niezbędnego do przemagnesowania warstw. W związku z tym rozwinięto technologię pewnej odmiany tej struktury zwaną „zaworem spinowym”, gdzie wymagane jest znacznie niższe natężenie pola magnetycznego. W takich strukturach jedna z warstw ferromagnetycznych jest silnie sprzężona z warstwą antyferromagnetyczną, np. FeMn, a przemagnesowanie tej warstwy ferro wymagałoby pola o dużym natężeniu. Druga warstwa ferromagnetyczna z miękkiego magnetyka, np. NiFe, jest przemagnesowywana polem o małym natężeniu. Przekładka Cu między warstwami ferro ma grubość uniemożliwiającą sprzężenie magnetyczne między tymi warstwami. Uzyskuje się w ten sposób dużą czułość i możliwość miniaturyzacji magnetorezystora.

Zalety czujników magnetorezystancyjnych sprawiły, że wykorzystuje się je do konstrukcji głowic odczytowych dysków magnetycznych o dużej gęstości zapisu. Firma IBM wprowadziła takie głowice do seryjnej produkcji w 1985 r, początkowo do odczytu danych

zapisanych na taśmach magnetycznych, a następnie na twardych dyskach. Obecnie wszystkie ważne firmy produkujące sprzęt komputerowy stosują głowice magnetorezystancyjne w napędach dyskowych. Zasadę budowy takiej głowicy ilustruje rys.8.10 [90].



Rys.8.10. Magnetorezystancyjna głowica odczytująca informację cyfrową zapisaną na nośniku magnetycznym

Pole magnetyczne prostopadłe do powierzchni poruszającego się nośnika, które występuje na granicy między obszarami o przeciwnym namagnesowaniu, powoduje zmianę rezystancji głowicy magnetorezystancyjnej. Zaletami takiej głowicy, w porównaniu z głowicą indukcyjną, są: niezależność sygnału od szybkości przesuwu nośnika, duża czułość przy małych wymiarach co umożliwia stosowanie większej gęstości zapisu. Wadą tej głowicy jest brak możliwości użycia jej jako głowicy zapisującej i dlatego głowice stosowane aktualnie składają się z magnetorezystancyjnej głowicy odczytowej i indukcyjnej zapisującej.

Z innych zastosowań elementów magnetorezystancyjnych należy wymienić: czytniki kart kredytowych i telefonicznych, czujnik kształtu monet w automatach wrzutowych, kompas elektroniczny wskazujący kierunek magnetycznego pola ziemskiego, transformator prądu stałego, miernik mocy, bezstykowy miernik prądu. Magnetorezystory znajdują też zastosowania jako czujniki wielu wielkości mechanicznych takich jak: przesunięcia, obroty (układy ABS), momenty obrotowe, parametry drgań.