



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Technika sensorowa

Czujniki magnetyczne – cz.2

dr inż. Wojciech Maziarz, prof. dr hab. T. Pisarkiewicz

Katedra Elektroniki

C-1, p.301, tel. 12 617 30 39

Kontakt: Wojciech.Maziarz@agh.edu.pl

Magnetorezystory

Magnetorezystor wykazuje zależność rezystancji od pola magnetycznego.

Wczesne lata rozwoju magnetorezystorów wiązały się z wykorzystaniem półprzewodników, np. InSb dla pól $B > 2$ kGs.

Obecnie wykorzystuje się zjawiska magnetorezystancyjne zachodzące w:

- metalach ferromagnetycznych (efekt Thomsona) zwany również efektem AMR (*anisotropic magnetoresistance*),
- warstwowych strukturach magnetycznych (efekt GMR – *giant magnetoresistance*)
- magnetycznych złączach tunelowych (MTJ – *magnetic tunnel junction*)

Elementy AMR wchodzą w użycie wraz z rozwojem technologii cienkowarstwowych.

Stosuje się stopy:

Ni Fe

Ni Co

Ni Fe Co

Permaloj (z ang. permalloy) – stop żelaza (21%) i niklu (79%), materiał, którego właściwości magnetyczne (tzw. "miętkość magnetyczna") wykorzystywane są do budowy rdzeni transformatorów. Materiał ten charakteryzuje duża podatność magnetyczna, tj. łatwo się na- i rozmagnesowuje (*Wikipedia*).

Zmiana rezystancji w funkcji pola magnetycznego zależy od kąta, jaki tworzy kierunek prądu z osią anizotropii magnet. (oś łatwego magnesowania).

Magnetorezystory (MR) a czujniki Halla – porównanie...

...dla krzemowego czujnika Halla i magnetorezystancyjnego NiFe (cienkowarstwowego).

1. Technologie wytwarzania czujników obu typów są kompatybilne z technologią wytwarzania układów scalonych i można wytworzyć czujniki **zintegrowane**.
2. Czujnik MR jest około 200 razy bardziej czuły niż czujnik Halla (krzemowy). Co więcej – można sterować czułością przez zmianę grubości warstwy i szerokość paska.
3. Efekt Halla jest ściśle liniowy bez efektów nasycenia – nawet w ekstremalnie wysokich polach magnetycznych.
4. Efekt Halla występuje dla pól skierowanych prostopadle do płaszczyzny elementu. Efekt MR występuje dla pól skierowanych wzdłuż płaszczyzny elementu w kierunku jego długości.
5. Oba efekty występują dla pól niezmiennych w czasie i mogą być wykorzystane do konstrukcji czujników wielkości statycznych (zero speed sensors).

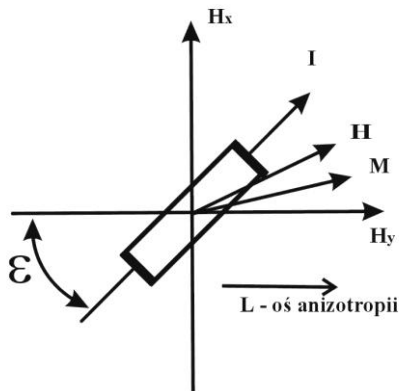
	Hall	MR
Process Technology	Silicon IC	NiFe Thin Film
Sensitivity	10uv/v/g	2 mv/v/g
Saturation Field	None	10 - 100g
Linearity	< 1%	$\text{COS}^2 \theta$
Sensitive Axis	Perpendicular to plane of chip	Parallel to plane of chip
Output for Constant Field	Yes	Yes

Magnetorezystor anizotropowy (AMR)

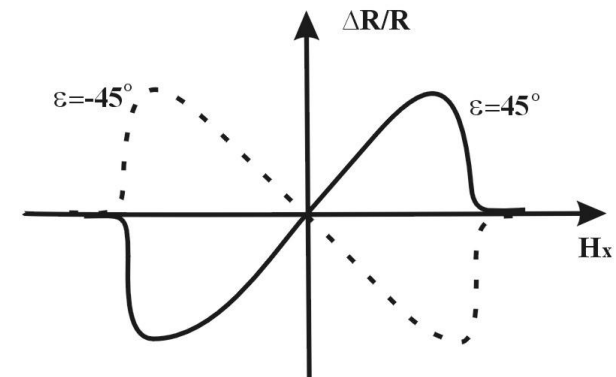
Wykorzystuje efekt anizotropowej magnetorezystancji (tzw. anomalia).

AMR - zjawisko występujące w metalach i stopach ferromagnetycznych, objawiające się zmianą oporności pod wpływem zmiany orientacji namagnesowania materiału względem kierunku płynącego przez niego prądu.

Zmiany oporu elektrycznego zachodzą w znacznie mniejszych natężeniach pola magnetycznego, niż ma to miejsce w przypadku zwyczajnego magnetooporu.



H – wektor pola magnetycznego
M – wektor namagnesowania



Charakter zmian rezystancji elementu MR w funkcji pola zależy od kąta, jaki tworzy kierunek prądu wzgl. tzw. **osi anizotropii magnetycznej** (osi łatwego magnesowania, która indukuje się w cienkiej warstwie w trakcie procesu technologicznego).

Dla $\varepsilon = 45^\circ$
zależność
kwaziliniowa

Magnetorezystor AMR - zastosowania

Typowe (dzięki możliwości analizy pól z rozdzielczością co najmniej $1 \mu\text{T}^*$):

- pomiary ziemskiego pola magnetycznego,
- konstrukcja kompasów elektronicznych
- magnetyczna detekcja pojazdów.

W miernictwie elektrycznym:

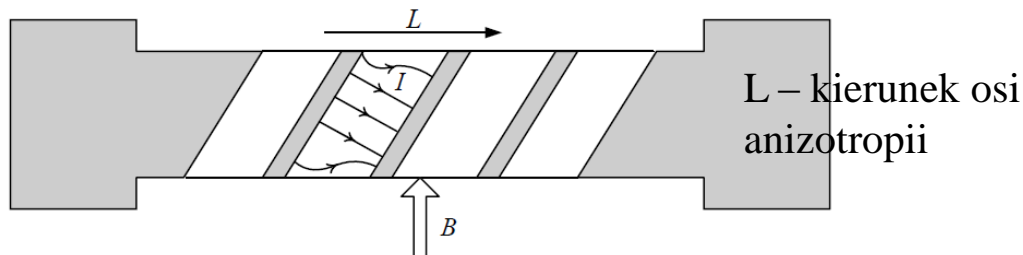
- separacja galwaniczna w układzie pracującym jako transformator prądu stałego,
- przetwornik mocy pracujący jako mnożnik prądów,
- transformowanie, dodawanie lub mnożenie dwóch sygnałów prądowych,
- bezstykowy pomiar prądu.

Pomiar wielkości mechanicznych: przesunięcia liniowego oraz określanie położenia, kąta i prędkości obrotowej, ciśnienia, drgań i przyspieszeń, momentu obrotowego, kształtu.

Badania materiałowe - pozwalają one na badanie nieniszczące materiałów ferromagnetycznych.

* Natężenie pola magnetycznego jest znacznie większe w jądrze Ziemi niż na jego powierzchni. Według pomiarów z 2010, przeciętne natężenie pola magnetycznego w jądrze zewnętrznym wynosi 25 Gausów - 50 razy tyle co na powierzchni Ziemi.

Magnetorezystor AMR – czujnik Barber-pole



Paski metaliczne Au lub Al (pod kątem 45°) wymuszają kierunek przepływu prądu.

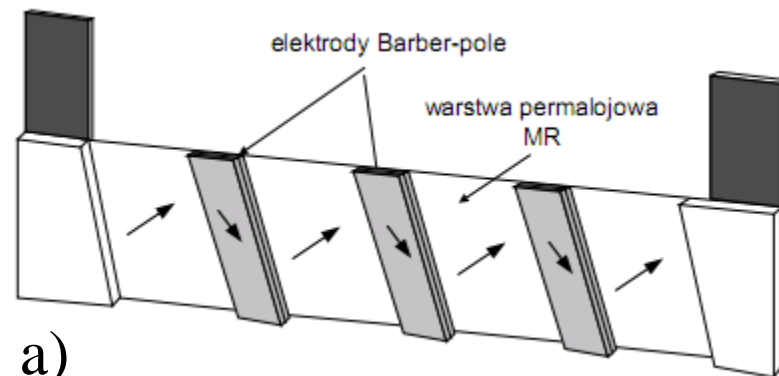
Zasada działania czujnika AMR Barber-pole:

1. Jeśli pole zewnętrzne $H_x = 0$, cienka warstwa jest namagnesowana w kierunku paska (na skutek wpływu anizotropii indukowanej w procesie wytwarzania warstwy).
2. Mierzone pole H_x jest skierowane prostopadle do osi paska (w płaszczyźnie warstwy) i powoduje obrót wektora namagnesowania.
3. Zmiana rezystancji $\Delta R/R$ zależy od kąta ϑ między kierunkiem wektora namagnesowania a kierunkiem przepływu prądu:

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} \sin^2 \vartheta$$

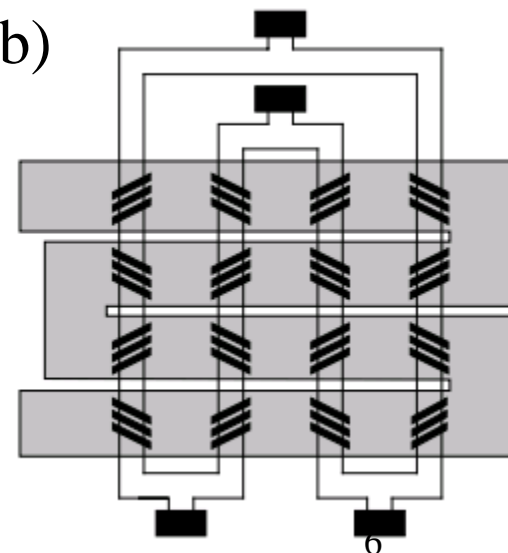
4. Dzięki orientacji pasków 45° uzyskuje się w przybliżeniu liniową charakterystykę czujnika.

Konstrukcja typu Barber-pole firmy PHILIPS.



a)

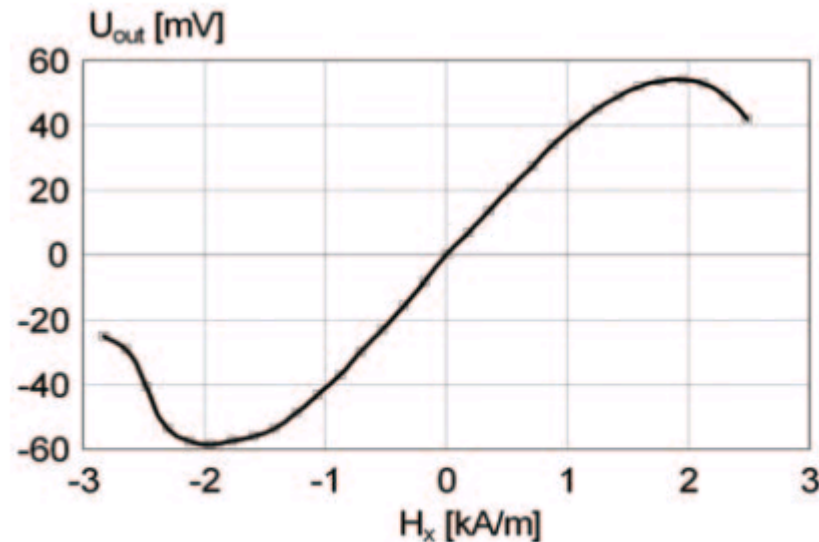
b)



- a) czujnik Barber-pole,
b) czujnik w układzie mostkowym (kompensacja składowej stałej R)

Magnetorezystor AMR – czujnik Barber-pole

Charakterystyka czujnika *Barber-pole* w przybliżeniu liniowa (w pewnym zakresie).



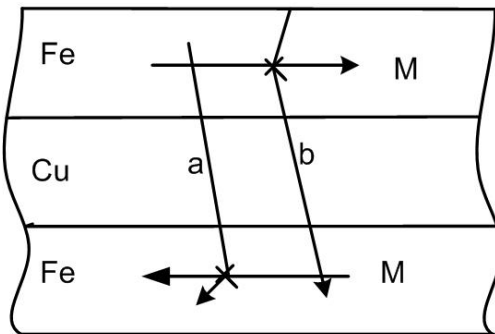
Rys.14. Charakterystyka przetwarzania typowego czujnika typu Barber-pole (czujnik KMZ10B prod. Philips)

Współczynnik magnetorezystywności $\Delta\rho/\rho$ dla typowej cienkiej warstwy permalojowej (81/19 NiFe) jest równy ok. 2%.

Gigantyczna magnetorezystancja GMR (*giant magnetoresistance*)

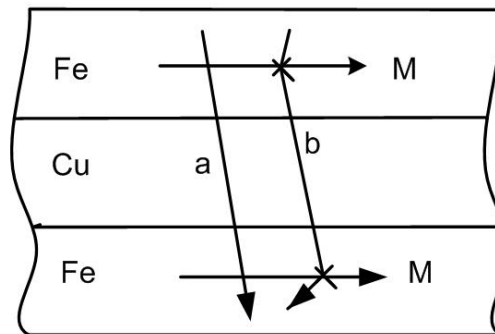
Jest to gwałtowny **spadek rezystancji w obecności pola magnetycznego** w strukturze wielowarstwowej, gdzie warstwy magnetyczne (Fe, Co) przedzielone są warstwami niemagnetycznymi (Cu, Ag) (Baibich 1988).

$B = 0$



Uporządkowanie antyferro

$B > 0$



Uporządkowanie ferro

1. W stanie początkowym (dla $H_x = 0$) obie warstwy namagnesowane są antyrównoległe (ze względu na oddziaływanie wzajemne warstw).
2. Umieszczenie czujnika w polu magnetycznym powoduje, że obie warstwy są namagnesowane równoległe.
3. Przejściu od stanu antyrównoległego namagnesowania do równoległego namagnesowania towarzyszy **duża zmiana rezystancji – nawet rzędu kilkuset %**.

Rozpraszanie elektronu w zależności od kierunku spinu względem wektora namagnesowania M
a – spin w górę, b – spin w dół



AGH

GMR – zawór spinowy

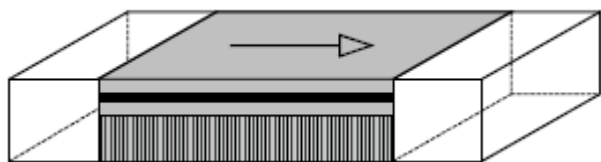
Stan początkowego namagnesowania antyrównoległego występuje „naturalnie” w magnetorezystorach, w których przekładka jest bardzo cienka – o grubości kilku atomów. Wówczas na skutek sprzężenia między dwoma warstwami magnesują się one antyrównoległe (w tego typu konstrukcjach wykryto zjawisko GMR po raz pierwszy).

WADA: Warstwy silnie sprzężone **wymagają** znacznie **większych wartości pola** magnetycznego do pokonania tego sprzężenia. Czujniki takie były więc o **małej czułości**.

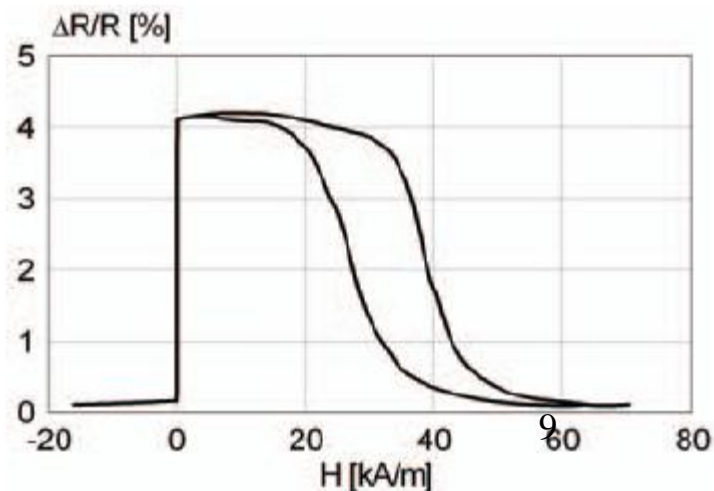
Zawór spinowy (*spin valve*)

→ zwiększono grubość przekładki, a namagnesowanie antyrównoległe uzyskuje się, nanosząc na jedną z warstw dodatkową warstwę podmagnesowującą z antyferromagnetyka (najczęściej FeMn). Druga warstwa - miękki magnetyk (np. NiFe), da się przemagnesować małym polem. Przekładka Cu zapobiega sprzężeniu magn. między warstwami.

Zmiana R: kilka-kilkanaście %, ale występuje ona przy wartościach pola ok. dziesięć razy mniejszych niż w przypadku czujników klasycznych GMR.



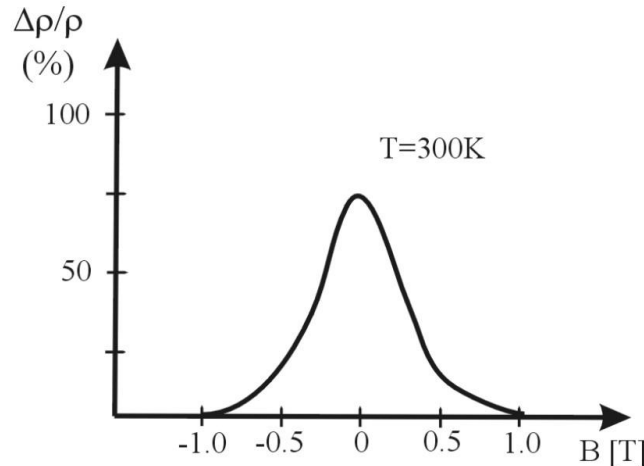
Charakterystyka przetwarzania



Konstrukcja czujnika typu zawór spinowy

GMR – zawór spinowy

W praktyce wytwarza się **supersieci** – układ typu: warstwa magnetyczna /warstwa niemagnetyczna powtarzany jest wiele razy (np. 100)



*Charakterystyka supersieci GMR
[Co (1.1nm) Cu(0.9nm)] · 100*

Względna zmiana rezystancji w
funkcji natężenia pola
magnetycznego

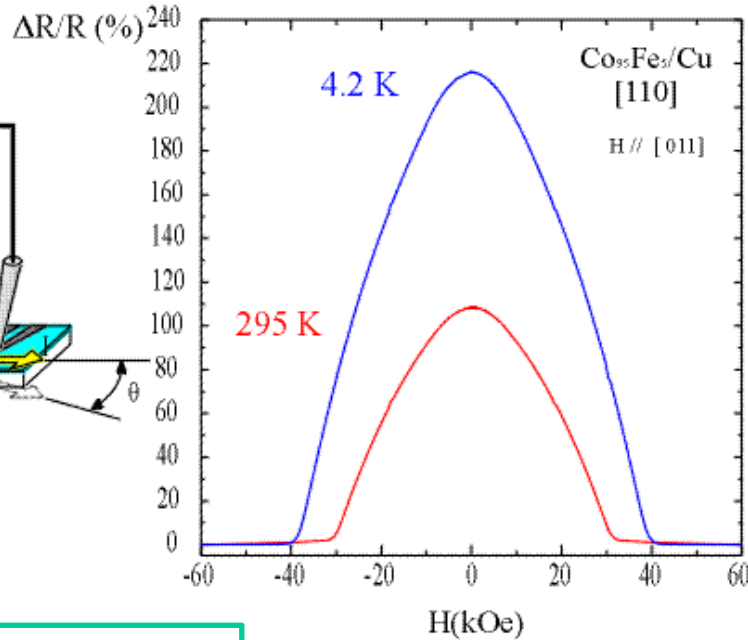
Wytwarzając strukturę w postaci tzw. zaworu spinowego uzyskuje się czułości dla małych pól magnetycznych.



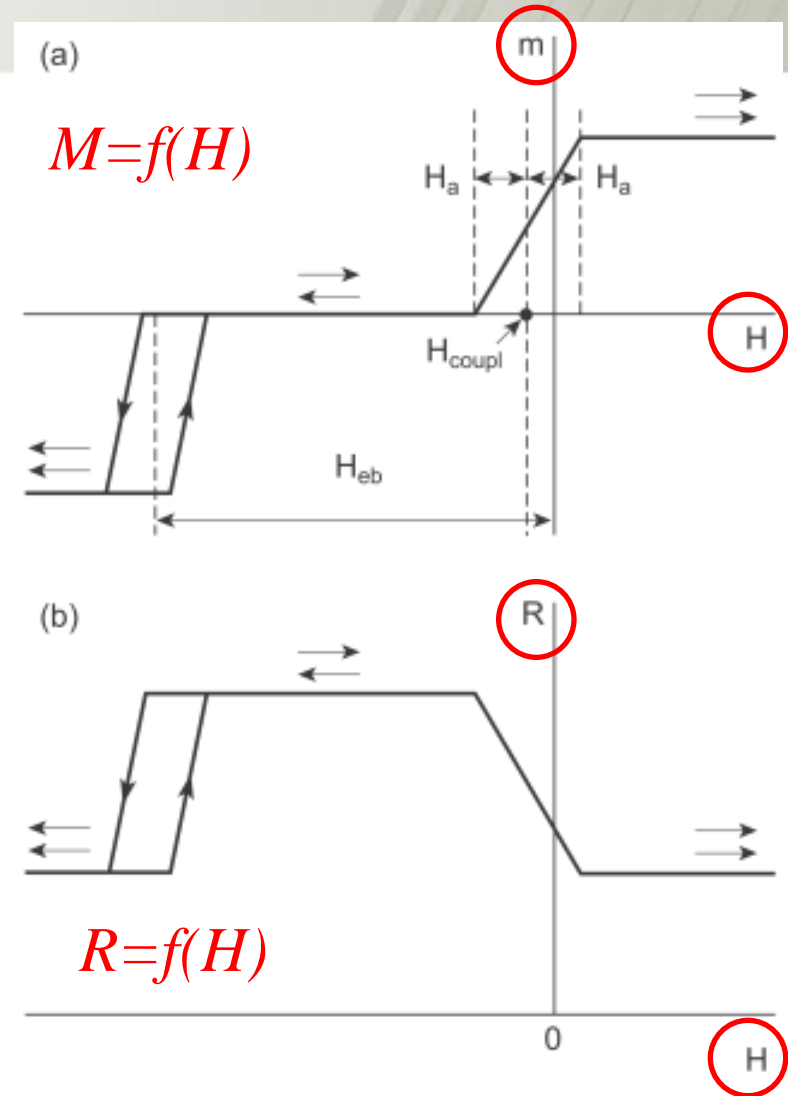
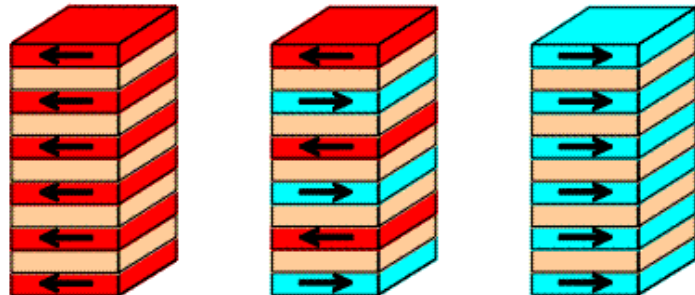
AGH

GMR – zawór spinowy

Giant Magnetoresistance

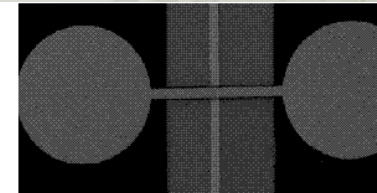
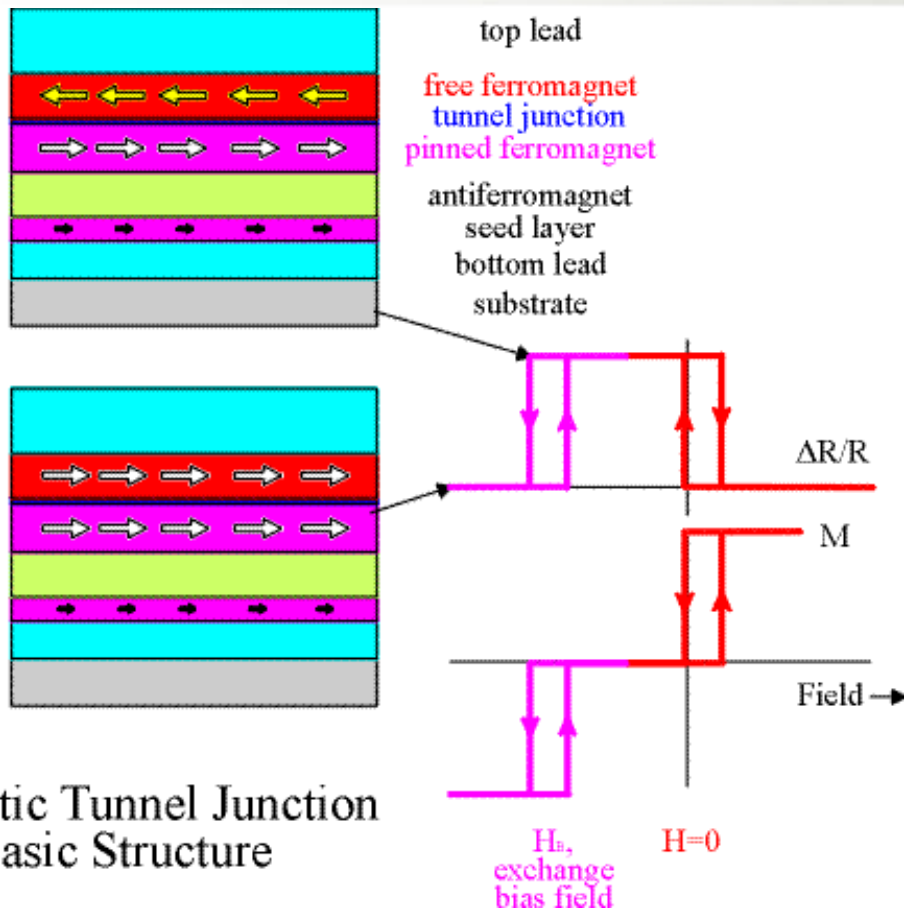


IBM Almaden Res. Center



Magnetyczne złącza tunelowe (Magnetic Tunnel Junction MTJ)

IBM Almaden Res. Center



Scanning electron microscope image of typical metal-masked magnetic tunnel junction, $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ in area.

1. Dwie ferromagnetyczne elektrody oddzielone są tunelową warstwą izolatora (np. Al_2O_3).
2. Prąd płynie prostopadle do złącza.
3. Przy antyrównoległych orientacjach warstwy swobodnej (górnej - *free*) i zamocowanej (dolnej - *pinned*) występuje wysoka rezystancja.
4. Przemagnesowanie warstwy górnej (polem zewnętrznego prądu) do orientacji równoległej daje spadek rezystancji (**kilkanaście %**).

Magnetic Tunnel Junction Basic Structure

Do przemagnesowania potrzebne pole znacznie mniejsze niż dla zaworów spinowych.

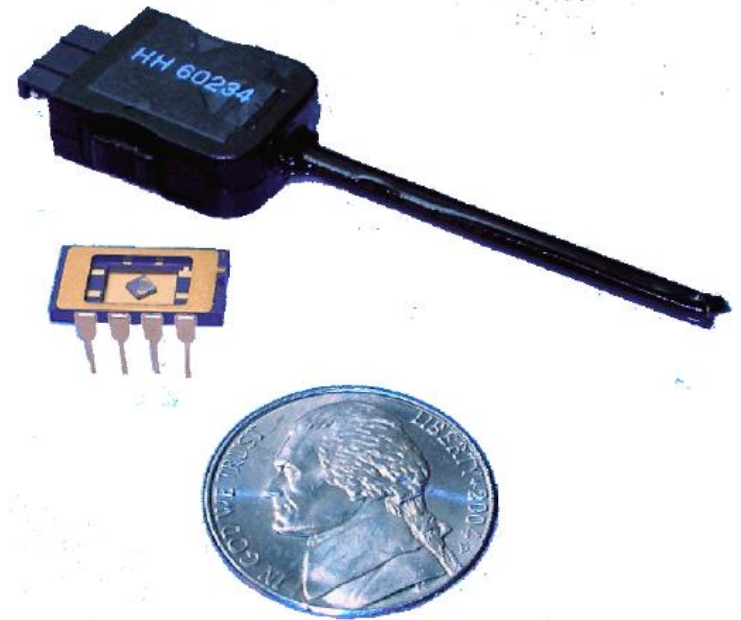
Czułości porównywalne jak dla czujników AMR, ale MTJ drogie (bo droga technologia!

→ cienki izolator o grubości kilku warstw atomowych).

Przykład czujnika MTJ



Struktura czujnika niskiego pola magnetycznego STJ-001. Obszar aktywny (elipsa) $4 \times 2 \mu\text{m}$.



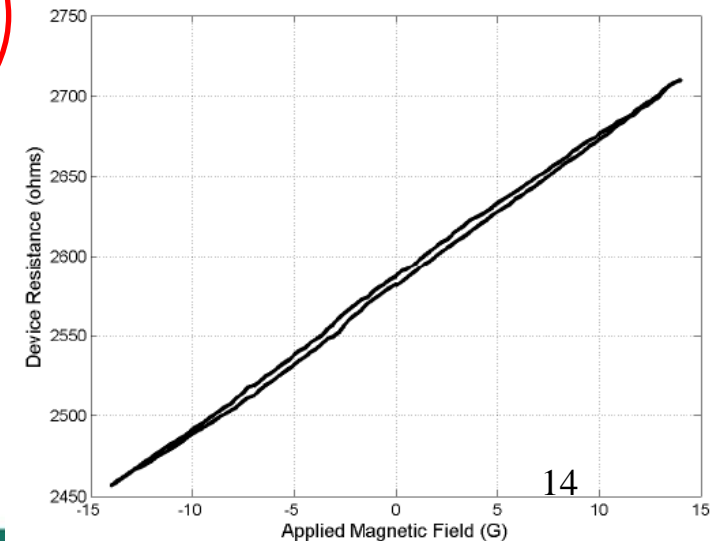
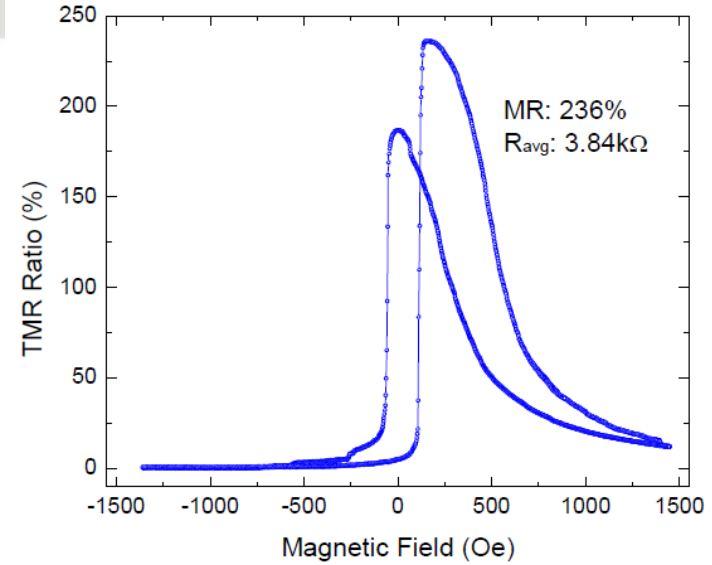
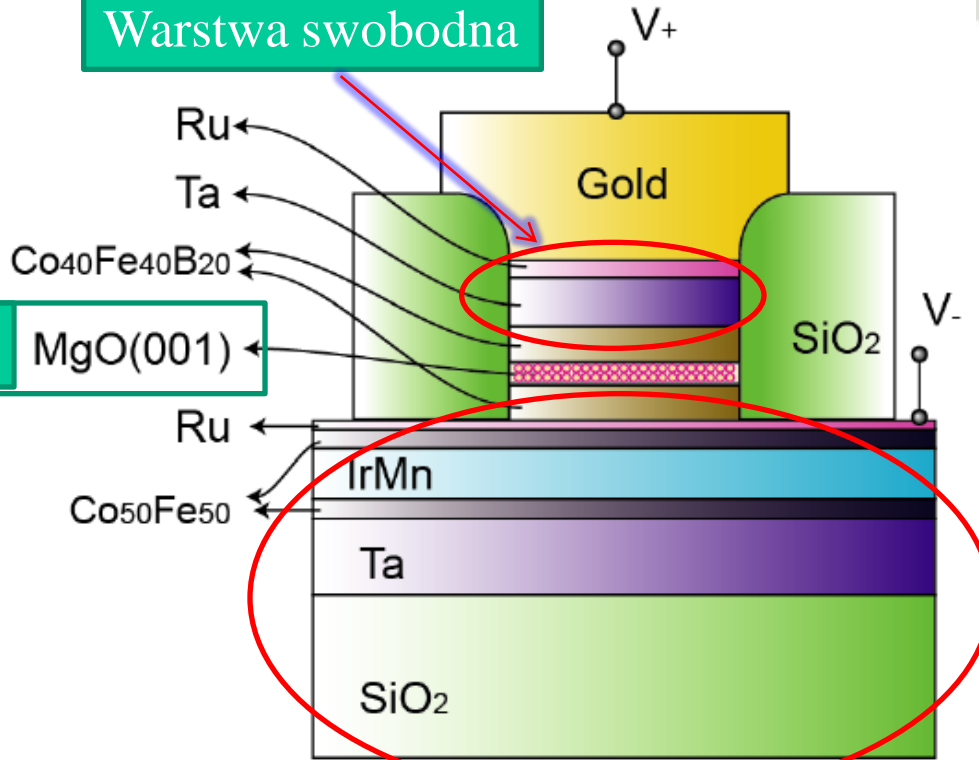
Podłoże: kwadratowe o dł. boku 1.27 mm i grubości $300 \mu\text{m}$.

Posiada 4 kontakty do bondingu drutowego, które umożliwiają pomiar 4-punktowy rezystancji czujnika.

Czułość STJ-001: **5 nT** (10 tys. razy mniej niż pole ziemskie).

Przykład czujnika MTJ – izolator MgO

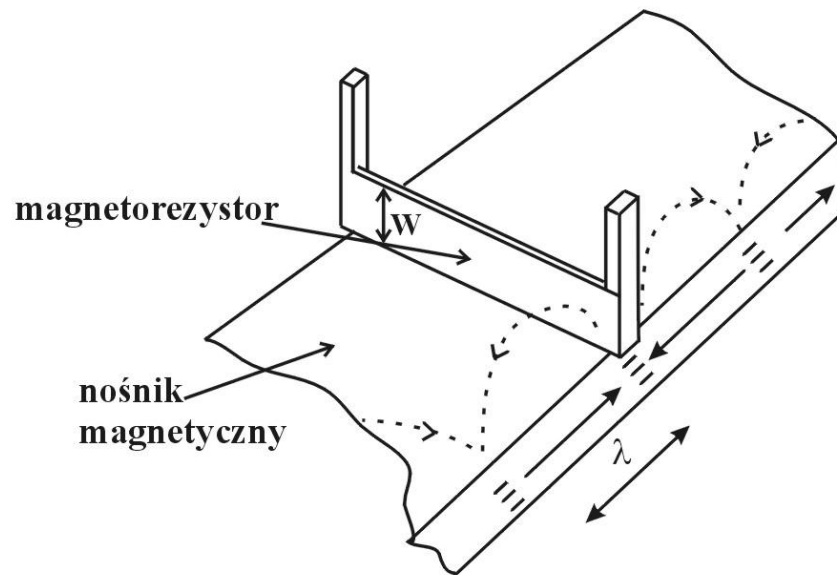
Warstwa swobodna



Schematic layer structure of an MgO-based magnetic tunnel junction sensor

Głowica odczytowa w napędzie dyskowym

- Pierwsza głowica z czujnikiem MR – 1970 r.
- Głowice do odczytu taśm, IBM –1985 r.
- **Obecnie wszystkie głowice do twardych dysków wykorzystują elementy MR do odczytu.**



Zasada działania magnetorezystancyjnej głowicy odczytowej.

Istotne są zmiany strumienia w kierunku prostopadłym do powierzchni nośnika.

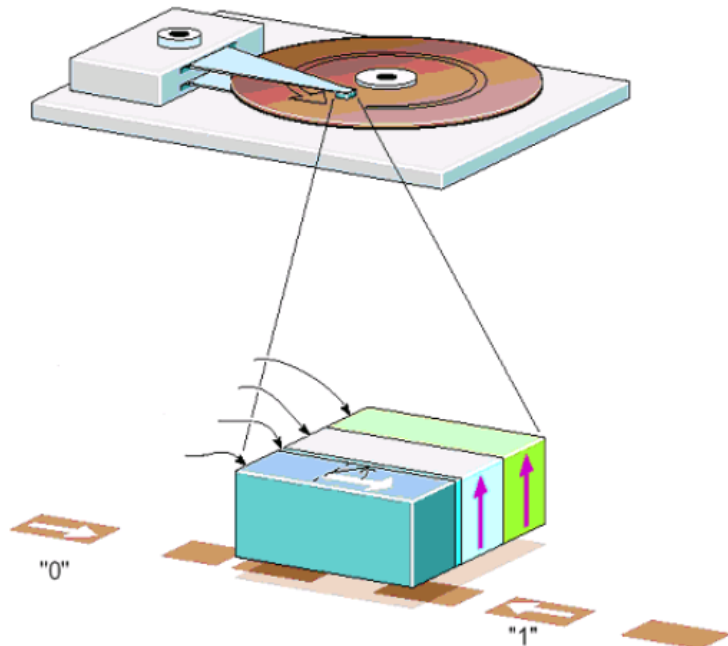
Zastosowania czujników MR

Najważniejsze zastosowanie: **główce odczytu informacji** (zastąpiły wcześniej stosowane głowice indukcyjne).

Zalety (w odniesieniu do głowic indukcyjnych):

- niezależność sygnału od szybkości przesuwu źródła pola magnetycznego,
- większa czułość (możliwość zastosowania w dyskach o większej gęstości zapisu).

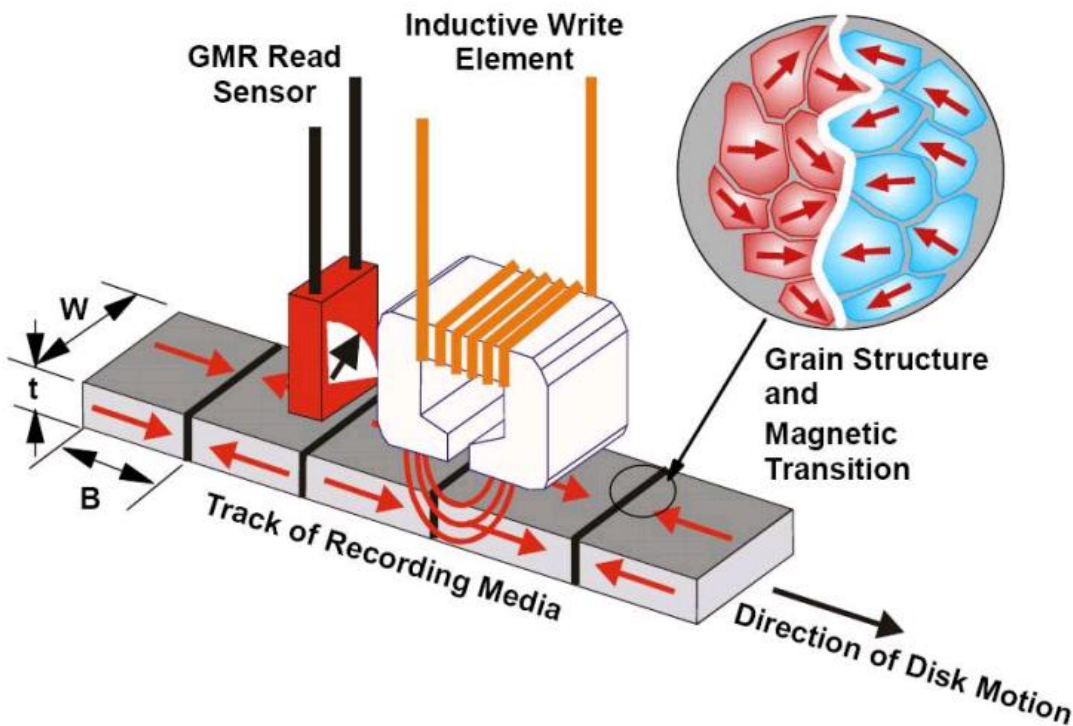
Wada: nie można za ich pomocą zapisywać informacji.



1. Informacja jest przechowywana w „magnetycznych” bitach, tzn. konkretny zwrot wektora magnetyzacji obszaru bitu oznacza „1”, a zwrot przeciwny \rightarrow „0”.
2. Obracający się talerz powoduje, że głowica GMR zostaje po kolei poddana działaniu odpowiednio skierowanych pól magnetycznych pochodzących od kolejnych obszarów bitowych.
3. W ten sposób **przemagnesowaniu** może ulegać warstwa swobodna elementu GMR, a co za tym idzie ma miejsce **zmiana jego rezystancji**.
4. Rejestrując prąd płynący przez element GMR jesteśmy w stanie odtworzyć zakodowaną informację.

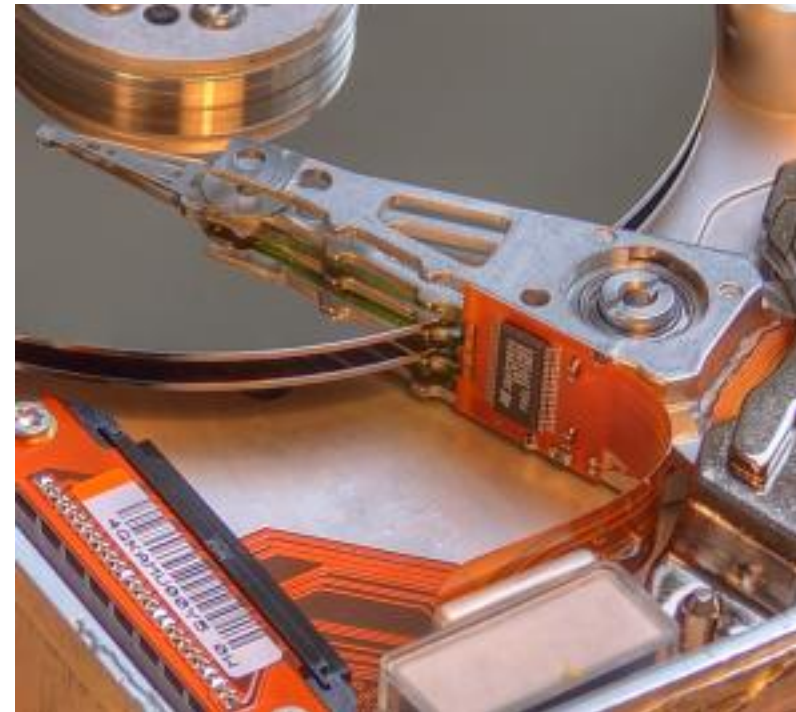
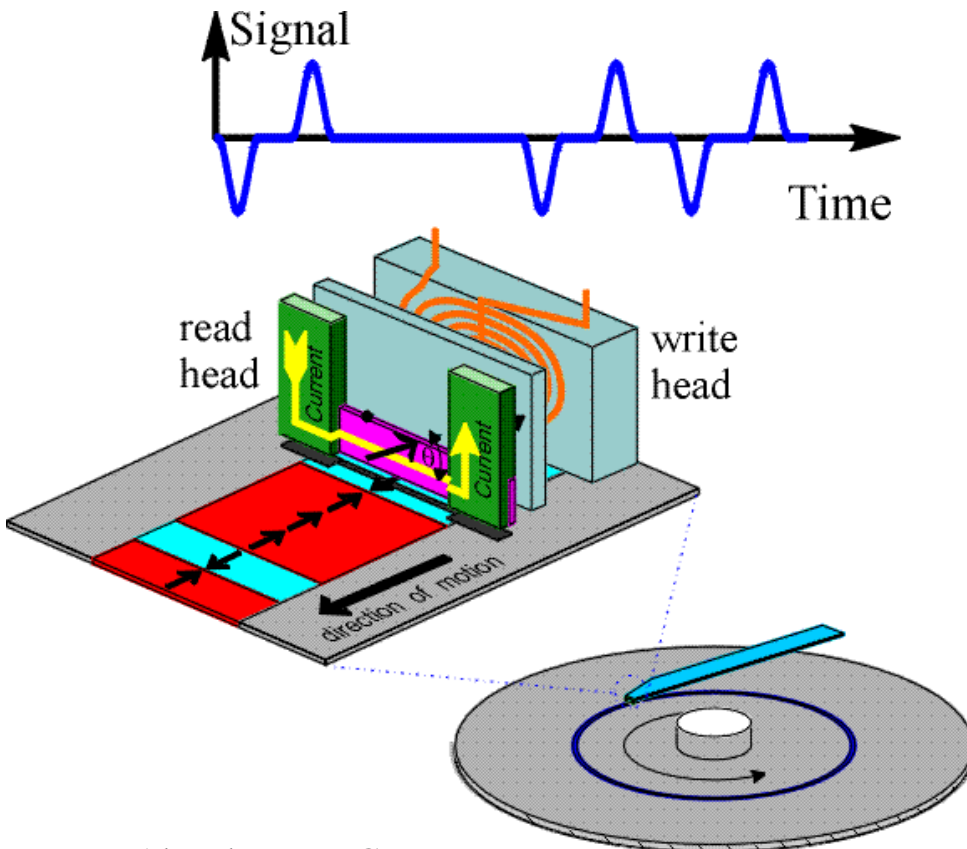
Nowoczesne głowice odczytujące tego typu umożliwiają odczyt informacji o gęstości zapisu nawet 100 Gbit/cal².

Zapis informacji na twardym dysku – głowica indukcyjna



1. Do zapisu danych służy **indukcyjna głowica cienkowarstwowa** (jej mikroskopijna cewka ma około 10 zwojów).
2. Gdy na twardym dysku zapisywane są dane, specjalny układ elektroniczny wysyła impulsy elektryczne do cewki.
3. W ten sposób indukowane jest pole magnetyczne, które przemagnesowuje lokalny obszar na dysku, ustawiając odpowiednią wartość bitu.

Główce w napędzie dyskowym: odczytująca i zapisująca



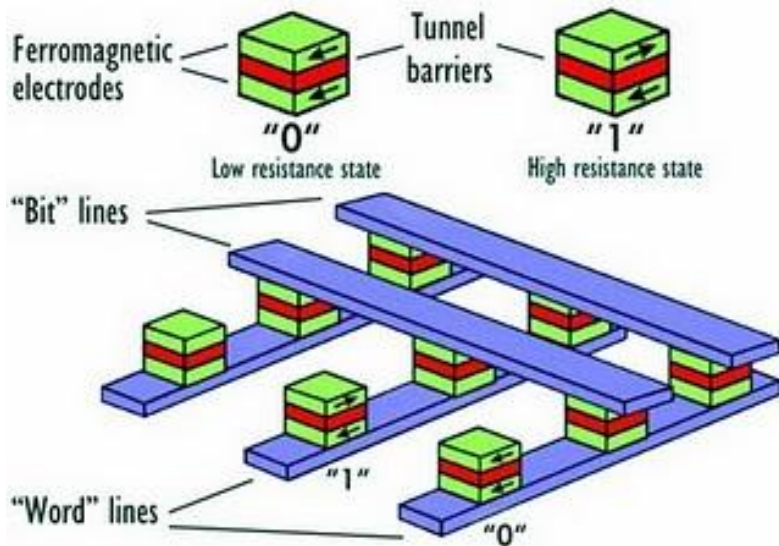
<http://pclt.sites.yale.edu/hard-disks-and-dvd-drives>

Zastosowania czujników MR

- Bezstykowe pomiary prądu DC i AC, transformowanie prądów stałych
- Wykrywanie zmian położenia i obrotu materiałów magnetycznych
- Busole cyfrowe (wskazanie kierunku magnetycznego pola Ziemi)
- Czytniki kart kredytowych i telefonicznych
- Wykrywanie kształtu monet w automatach wrzutowych
- Wykrywanie wad montażu i defektów w strukturach półprzewodnikowych
- Monitoring ruchu ulicznego
- Czujniki wielkości mechanicznych: przesunięcia, obrotu, drgań itd..
- Wykrywanie poruszających się pojazdów
- Pamięci MRAM



MRAM (Magnetic RAM) – magnetyczna pamięć nieulotna o dostępie swobodnym

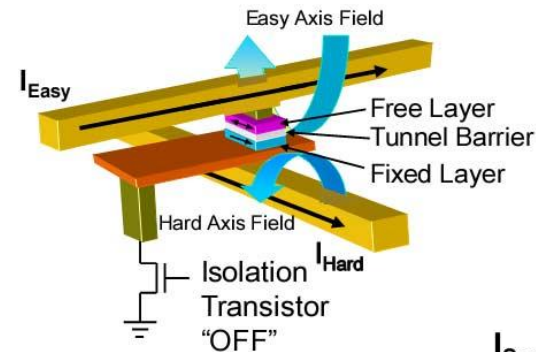


Cechy MRAM:

- Nieulotna
- nieskończona ilość zapisów bez zużycia
- Szybki zapis (nawet kilka ns)
- Niska energia zapisu
- Niedestrukcyjny odczyt

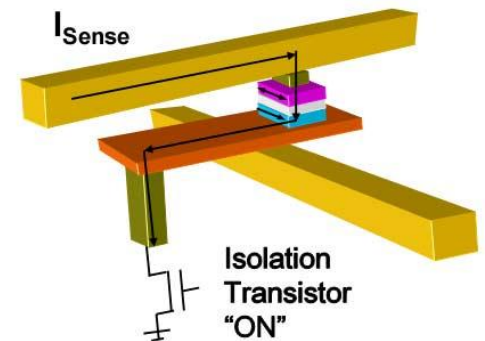
Zapis MRAM:

1. Prąd płynący przez linie programujące generuje pola magnetyczne
2. Do zaprogramowania bitu konieczna SUMA pól magnetycznych obu linii

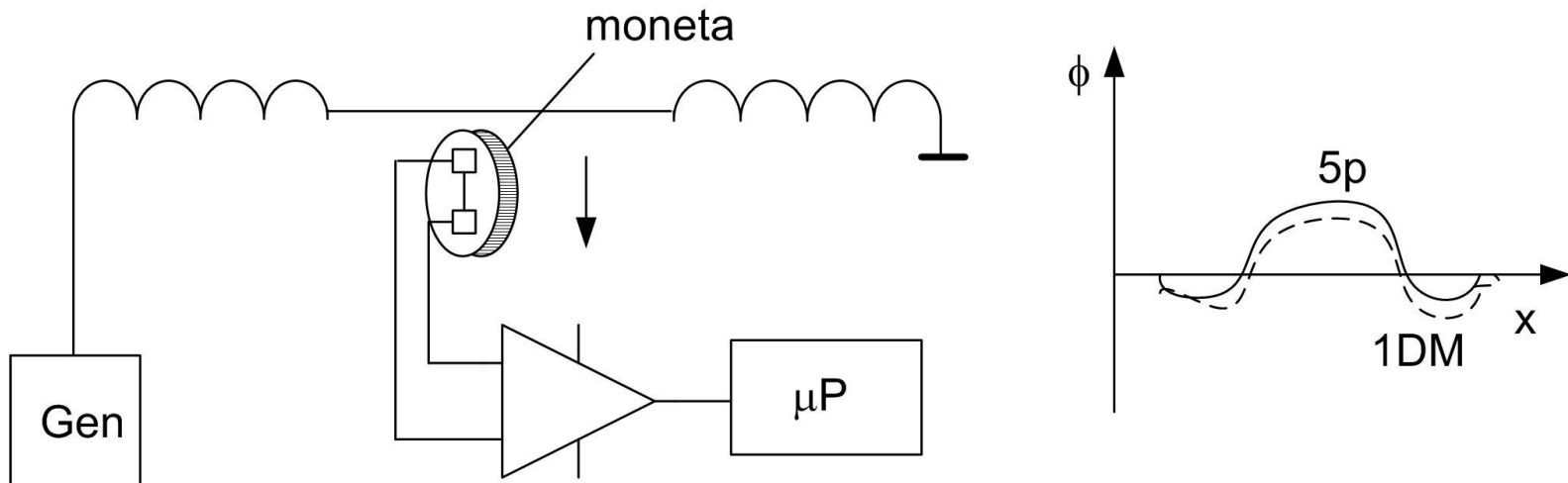


Odczyt MRAM:

Prąd płynie przez bit, wykrywana jest zmiana rezystancji bitu

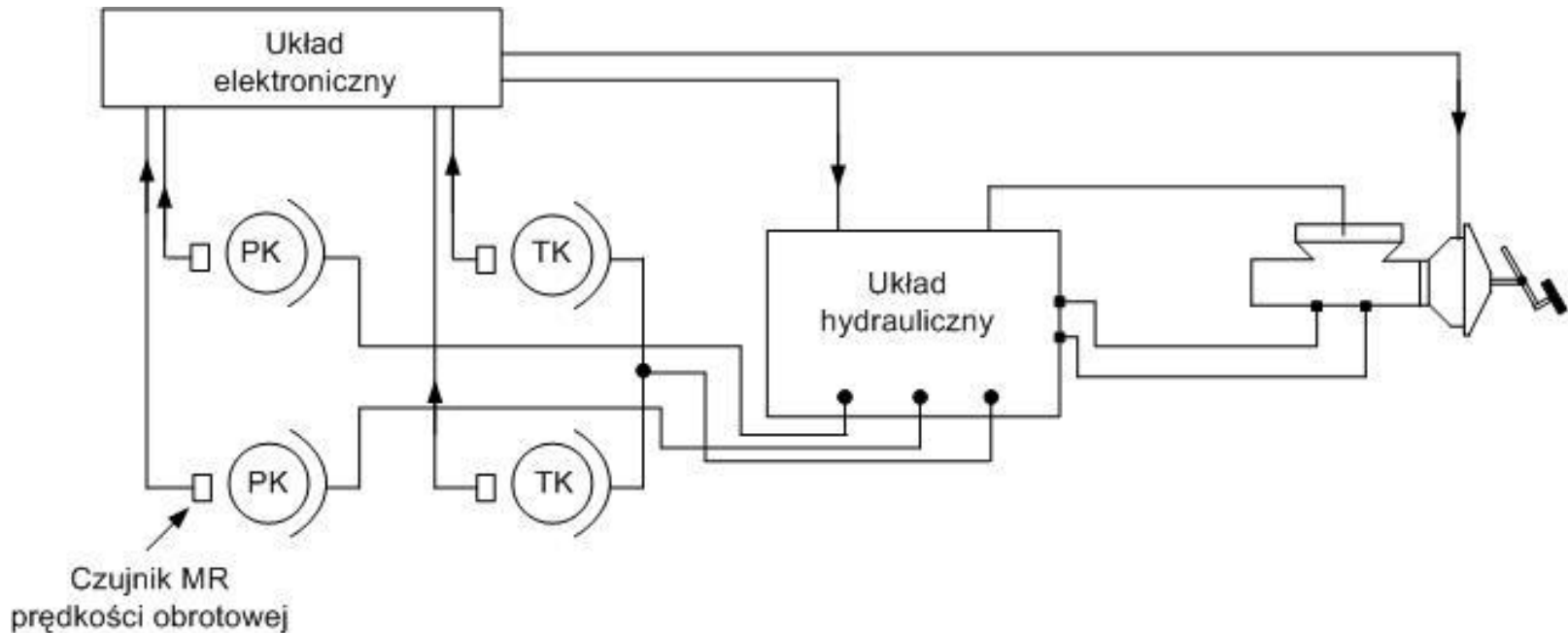


Układ identyfikacji monet



W trakcie przemieszczania monety w polu cewki indukują się prądy wirowe. Mierzone jest przesunięcie fazowe między sygnałem cewki i magnetorezystora, charakterystyczne dla danego rodzaju monety, a niezależne od szybkości przemieszczania monety.

Układ ABS z czujnikami MR

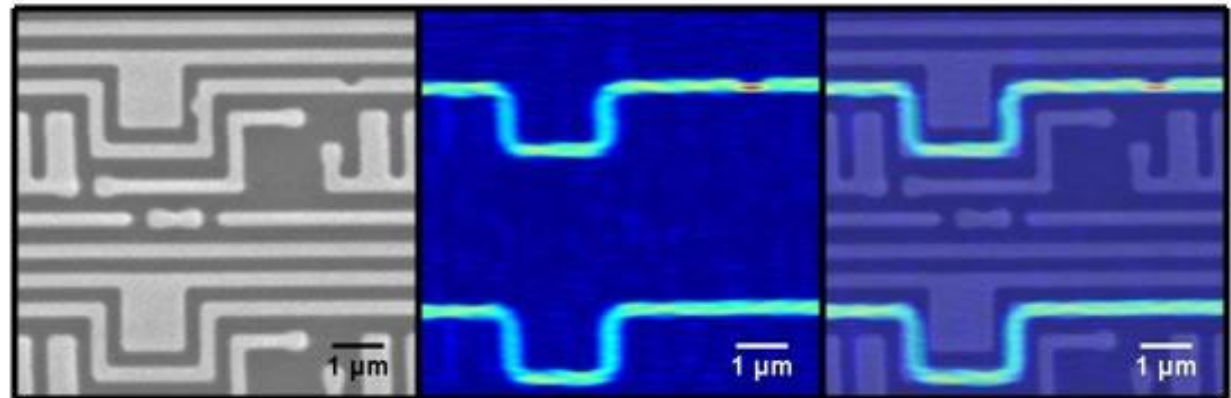


Przy tendencji poślizgowej układ elektroniczny oraz hydrauliczny wpływają na odpowiednie hamulce.

Zastosowanie magnetorezystorów MTJ

Nieinwazyjna diagnostyka w przemyśle półprzewodnikowym i elektronicznym.

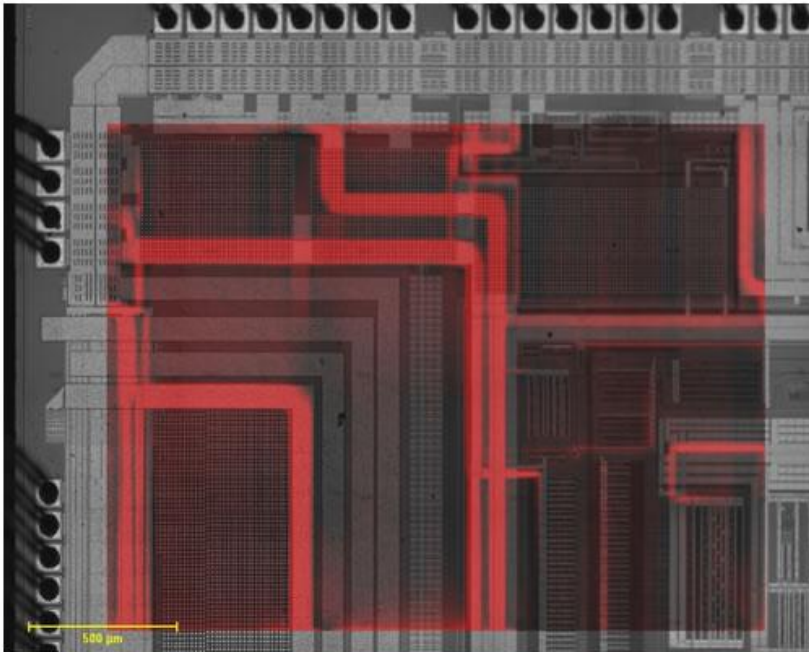
Uzyskiwany jest obraz pola magnetycznego – skutek przepływu prądu w układzie.



Scanning electron micrograph (left), current density image (center), and current density overlay (right) of two conductors with quarter-micron pitch. A 125 nm edge defect is clearly seen at the center right of the image. The Circuit Scan 1000 offers an unprecedented spatial resolution of better than 100 nm.

defekty połączeń
w mikrostrukturach

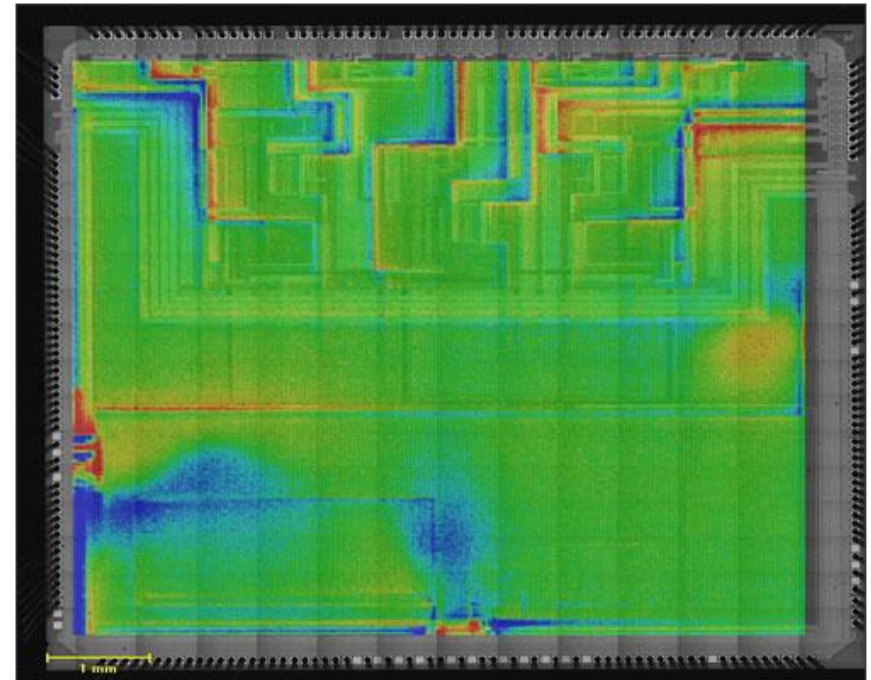
Zastosowanie magnetorezystorów MTJ



Overlaid current density map showing power distribution to a failed wirebonded device.

http://www.micromagnetics.com/image_library.html

Wykrywanie wad projektu / montażu



Overlaid magnetic field map of a failed part with a power-to-ground short. Total current flow is ~ 3 mA RMS.

Double click to close

Zastosowania medyczne

Kapsuła endoskopowa po połykaniu
(*Given Imaging*)

„Inteligentna pigułka”



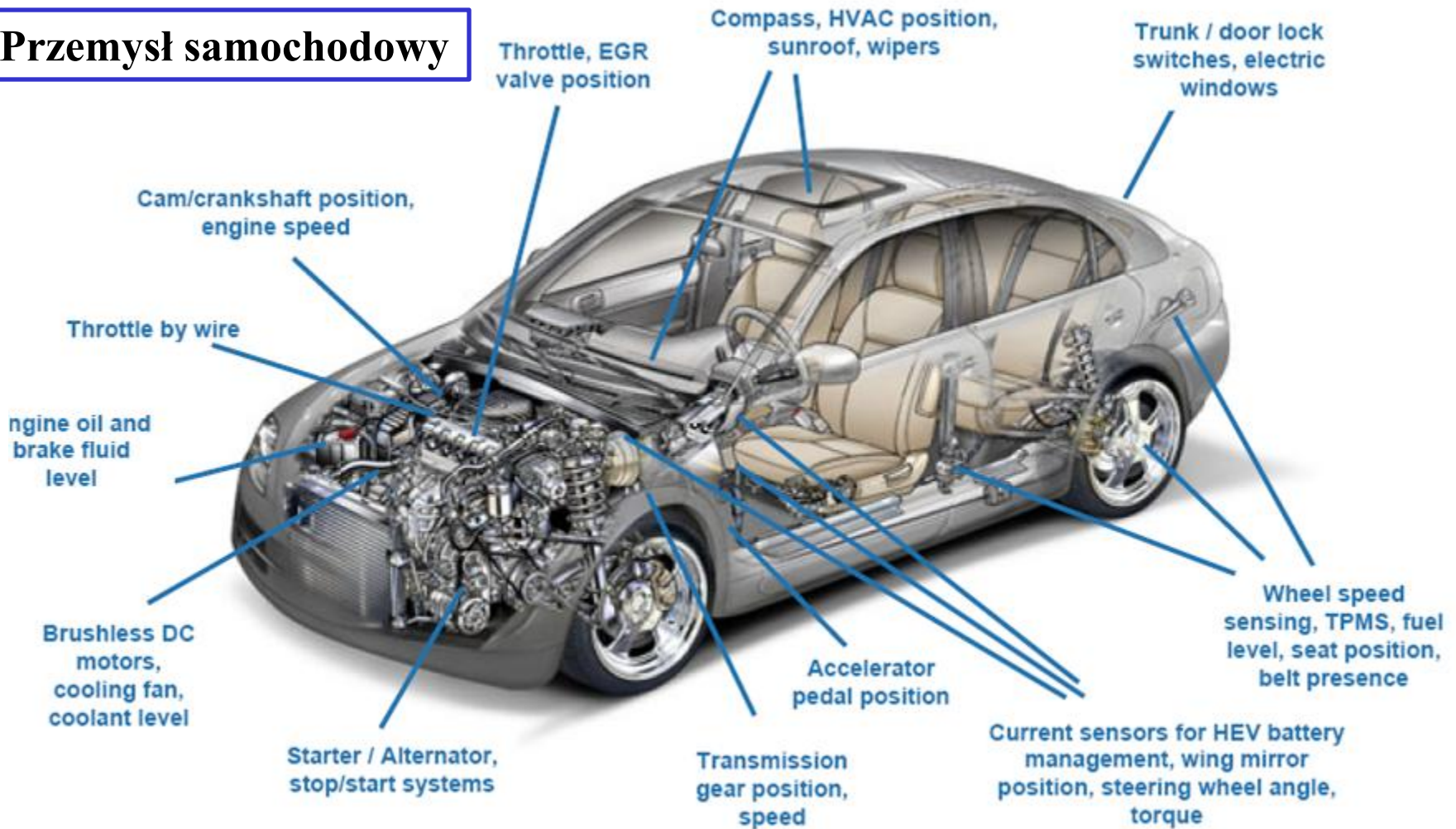
Urządzenia mobilne - kompas elektroniczny



Nowoczesne smartfony GPS posiadają 3-osiowe magnetometry krzemowe, np. Apple iPhone 3GS, Nokia N97 and N900, Motorola Droid, Google Nexus 1.

Kompas współpracuje z oprogramowaniem czasu rzeczywistego, które wyświetla informacje o scenie obserwowanej przez kamerę telefonu (*LAYAR: www.layar.com*)

Przemysł samochodowy

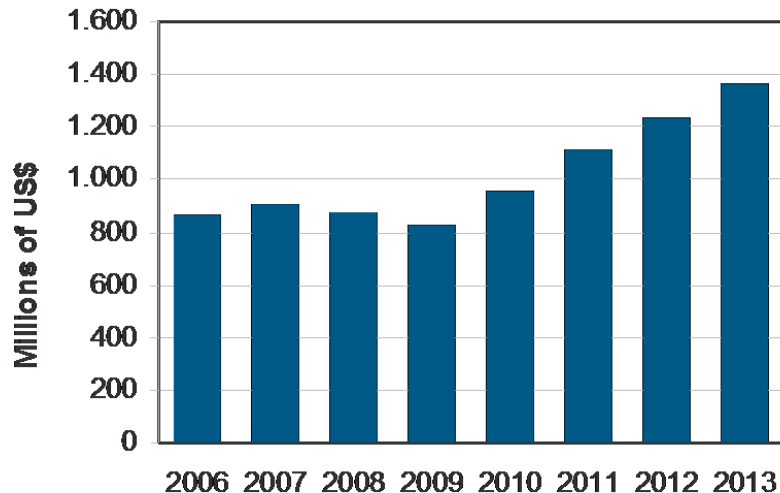


Przemysł samochodowy

Czujniki prędkości obrotowej (np. wału korbowego, wałka rozrządu) muszą być precyzyjne. Czujniki indukcyjne nie nadają się, bo nie mogą mierzyć w pozycji zerowej (brak obrotów) i potrzeba dużej prędkości dla dużej precyzji.

Czujniki Halla (również AMR i GMR) mierzą również „w zerze”.

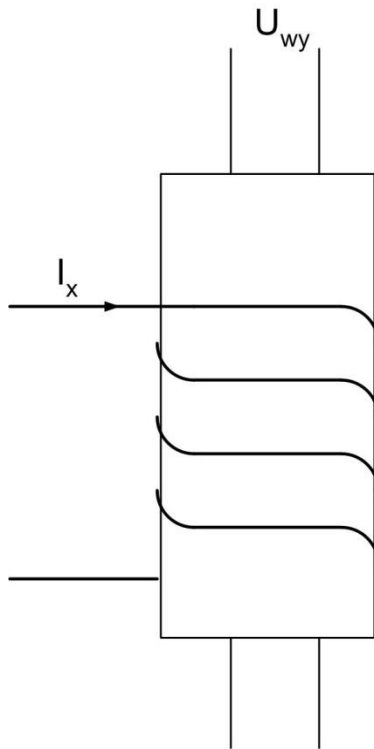
Sygnalizacja położenia turbosprężarek, zawory recyrkulacji spalin (EGR), położenia przepustnicy, itp.



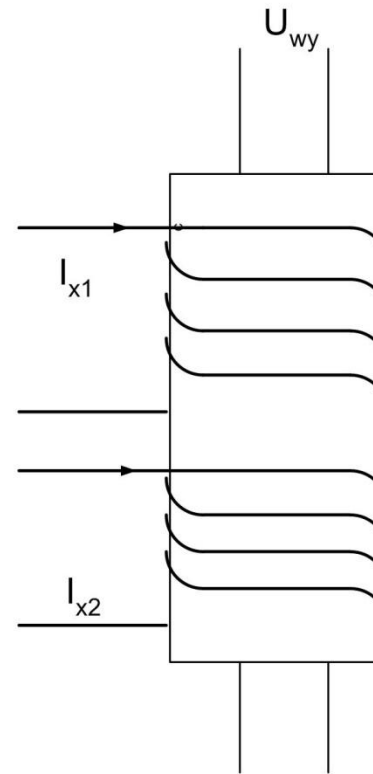
Czujnik Halla jest używany do wskazania pozycji manualnej skrzyni biegów w aucie na postoju.

Rynek czujników magnetycznych 2006 do 2013 (iSuppli)

Zastosowania czujników MR – izolacja galwaniczna



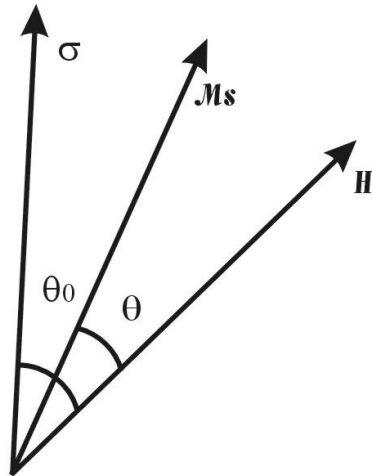
transformator prądu
stałego



sumator dwóch
prądów

Czujniki magnetoelastyczne

Zmiana własności magnetycznych pod wpływem oddziaływań mechanicznych

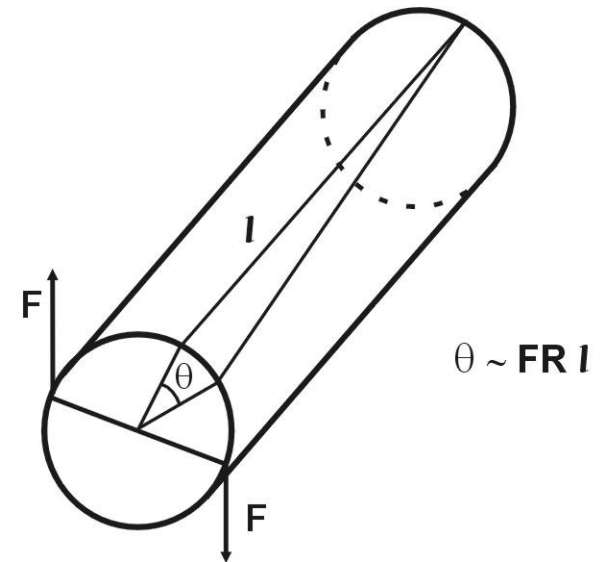


Napężenie σ obraca magnetyzację M_s o kąt θ względem pola magnetycznego H .

Z warunku minimum energii (dla $\theta \ll \theta_0$):

$$\theta \approx \frac{\sin 2\theta_0}{M_s H} \sigma$$

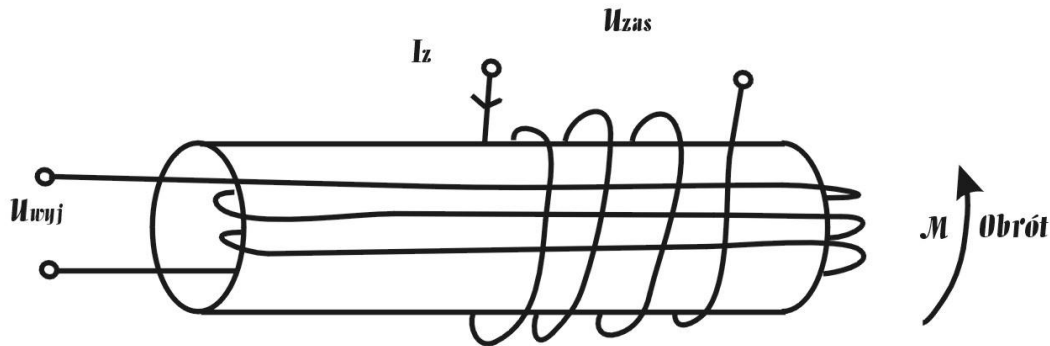
Optymalny przypadek: $\theta_0 = 45^\circ$, H - małe



Miarą momentu skręcającego FR dla pręta zamocowanego jednostronnie jest kąt skęcenia θ

Czujniki magnetoelastyczne

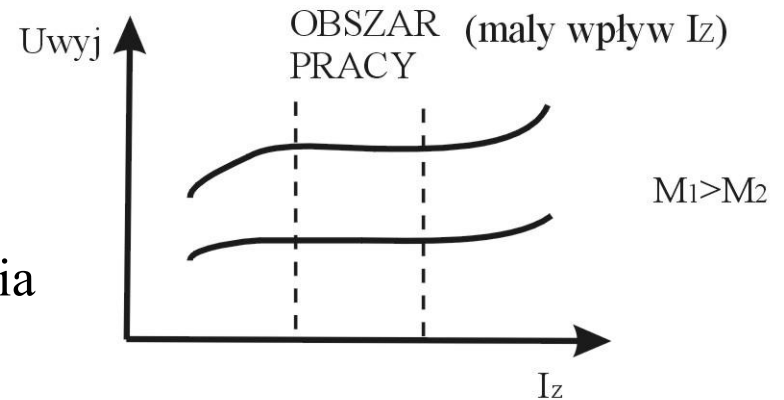
Pomiar momentu skręcającego z użyciem czujnika magnetoelastycznego w formie cylindra



Przy braku naprężenia (moment skręcający $M = 0$), nie ma sprzężenia między cewkami

Po przyłożeniu momentu skręcającego M pojawia się napięcie wyjściowe

$$U_{wyj} = kM$$



Materiały dodatkowe, źródła

- W. Maziarz, *Współczesne czujniki ciśnienia, Elektronik 1 (2002) 45–49.*
- N. Maluf, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering, Artech House, Inc., Boston, 2000.*
- M. Gad-el-Hak, (red.), *The MEMS handbook, The Mechanical Engineering Handbook Series. CRC Press, Boca Raton, 2002.*
- S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft i N. White, *MEMS Mechanical Sensors, Microelectromechanical Systems (MEMS) Series. Artech House, Inc., Boston, 2004.*
- J. Dziuban, *Technologia i zastosowanie mikromechanicznych struktur krzemowych i krzemowo-szklanych w technice mikrosystemow, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.*
- J. M. Łysko, *Anizotropia trawienia i piezorezystancji w kryształach półprzewodników. Przykłady wykorzystania w przyrządach MEMS, Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa, 2004.*
- Michael A. Cullinan i inni, *Scaling electromechanical sensors down to the nanoscale, Sensors and Actuators A 187 (2012) 162– 173*
- <http://mems.sandia.gov/about/actuators.html>
- <http://www.bacteria-world.com/what-are-mems.htm>
- <http://e-fab.com/>
- <http://www.dei.uminho.pt/pessoas/biomedica/ultra/01258171.pdf>