

Sensory w Aplikacjach Wbudowanych

Sensory Magnetyczne

W-2

Piotr Wiśniowski

Instytut Elektroniki AGH

piotr.wisniowski@agh.edu.pl

1. Pole magnetyczne

- > Jednostki
- > Źródła

2. Sensory magnetyczne

- > Zasada działania
- > Cechy
- > Wielkości mierzone sensorami

3. Zastosowania

Jak definiuje się pole magnetyczne?

Pole magnetyczne

Przestrzeń w której na poruszający się ładunek lub materiał magnetyczny działa siła magnetyczna

Jakie jednostki pola magnetycznego wyróżnia się?

SI

- ▶ Indukcja pola magnetycznego B Tesla (T)
- ▶ Natężenia pola magnetycznego H (A/m)

$$B = \mu_0 (H + M)$$

CGS

- ▶ Indukcja pola magnetycznego B Gaus (Gs)
- ▶ Natężenia pola magnetycznego H Oersted (Oe)

$$B = H + 4\pi M$$

$$1 \text{ Oe} = 1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T} = 79,6 \text{ A/m}$$

Jakie źródła, rodzaje i wartości pola magnetycznego wyróżnia się?

Źródło pola	Zakres wartości	Rodzaj pola
Kula ziemska	$30 \mu\text{T} - 60 \mu\text{T}$	Stałe
Serce człowieka Mózg człowieka	$50 \times 10^{-3} \text{ nT}$ $1 \times 10^{-3} \text{ nT}$	Zmienne
Urządzenia elektryczne	$10^{-5} \text{ T} - 1 \text{ T}$	Zmienne
Magnesy trwałe elektromagnesy	$1 - 100 \text{ T}$	Stałe/Zmienne

1. Pole magnetyczne

- > Jednostki
- > Źródła

2. Sensory magnetyczne

- > Zasada działania
- > Cechy
- > Wielkości mierzone sensorami

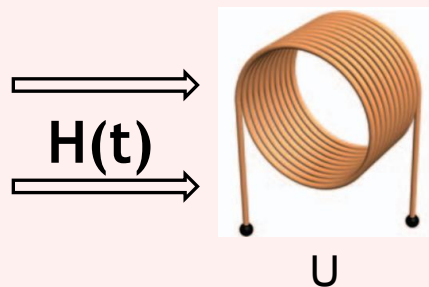
3. Zastosowania

Rodzaje

- > Indukcyjne
- > Transkonduktorowe
- > Hall
- > **SQUID** (Supeconducting Quantum Interference Device)
- > Atomowe

Zasada działania

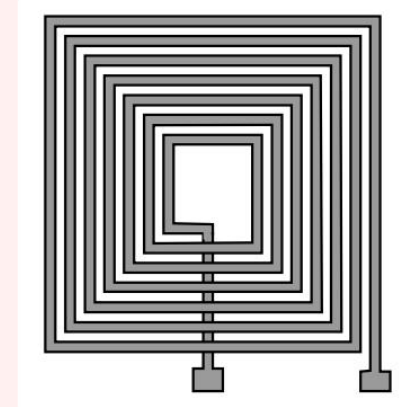
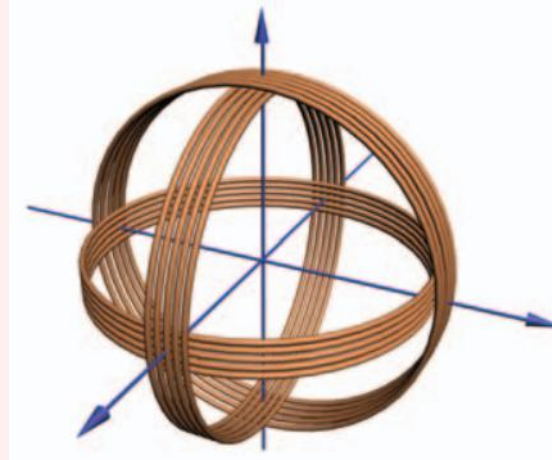
Zjawisko indukcji elektromagnetycznej



$$U = -z \frac{d\Phi_B}{dt} = -zS \frac{dB}{dt} = -z\mu_0 S \frac{dH}{dt}$$

Zmienne pole magnetyczne generuje w zwojach napięcie, którego wielkość i częstotliwość są proporcjonalne do zmian strumienia pola magnetycznego Φ_B

Konstrukcje



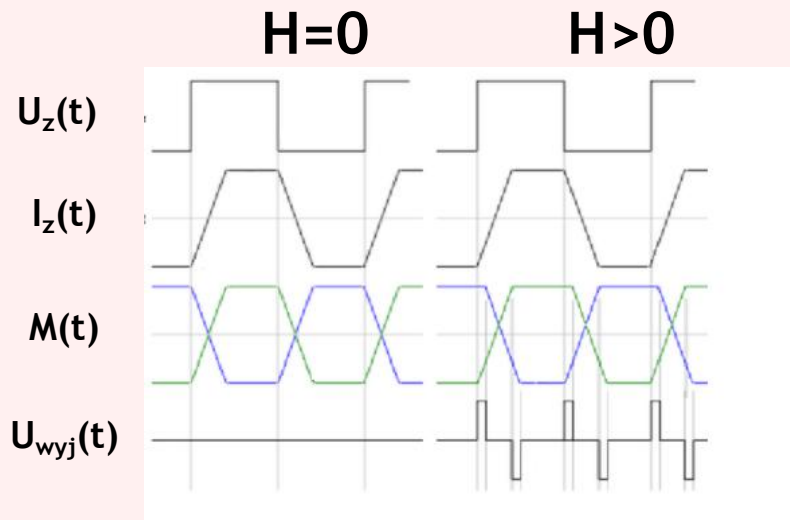
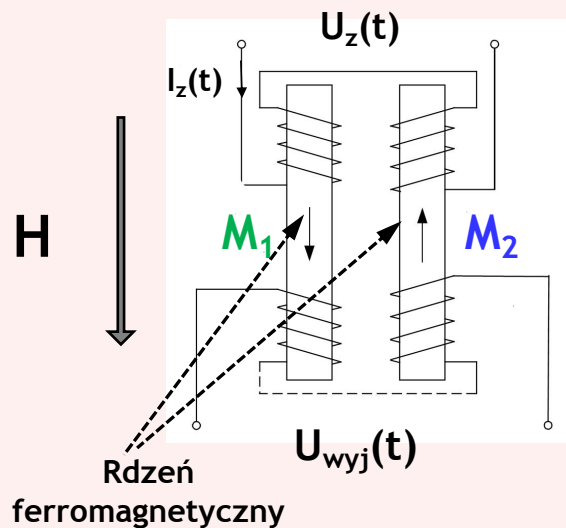
Cechy

- ▶ Mierzą tylko pole zmienne
- ▶ Napięcie zależne od częstotliwości
- ▶ Prostota działania i konstrukcji
- ▶ Ograniczona możliwość miniaturyzacji
- ▶ Brak konieczności zasilania
- ▶ Napięcie nie zależy wprost od B , ale od dB/dt
- ▶ Konieczność stosowania układów całkujących

Typowe parametry

- ▶ Zakres częstotliwości pracy: Hz - MHz.
- ▶ Czułość: mV/mT
- ▶ Zakres pomiarowy: pT do T
- ▶ Poziom szumów: pT/Hz^{1/2}

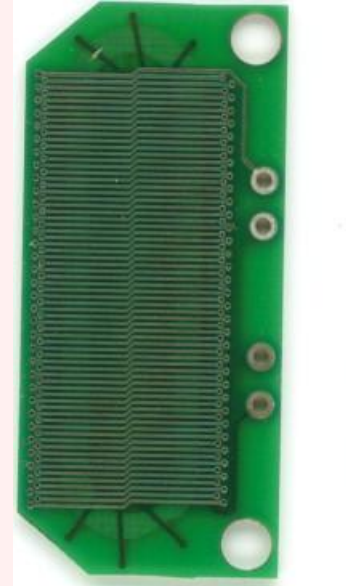
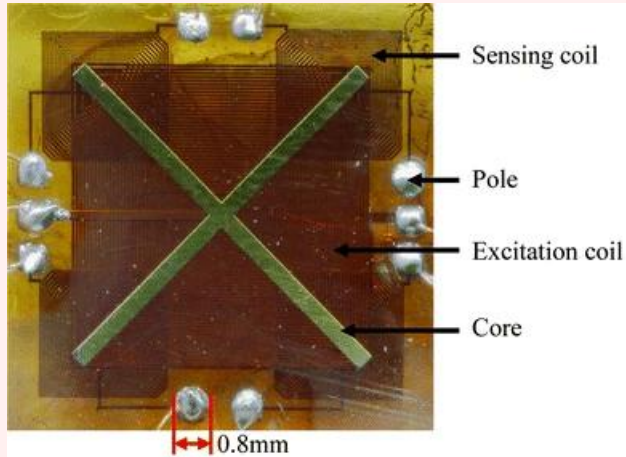
Zasada działania



Pole magnetyczne (H) powoduje asymetrię w przebiegu magnetyzacji rdzeni (M), co indukuje napięcie wyjściowe $U_{wyj}(t)$ proporcjonalne do pola magnetycznego.

Gdy prąd przepływa przez zwoje (I_z), jedna połowa rdzenia generuje pole ze składową o tym samym kierunku co H , a druga połowa generuje pole ze składową o kierunku przeciwnym do H .

Konstrukcje



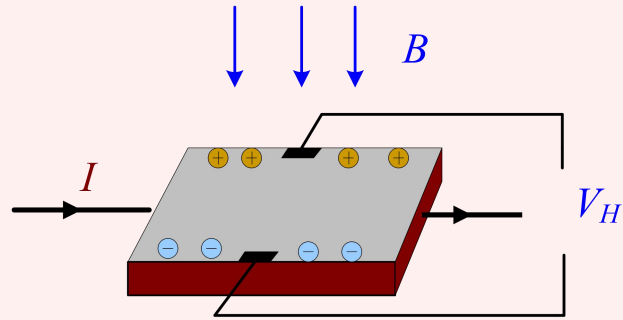
Cechy

- ▶ Pomiar pól stałych i zmiennych
- ▶ Kierunkowość pomiaru
- ▶ Wymagają zasilania
- ▶ Wymagają stosowania układów do wykrywania zmian napięcia wyjściowego

Typowe parametry

- ▶ Zakres częstotliwości pracy: DC- kHz.
- ▶ Czułość: kV/mT
- ▶ Zakres pomiarowy: nT do mT
- ▶ Poziom szumów: pT/Hz^{1/2}

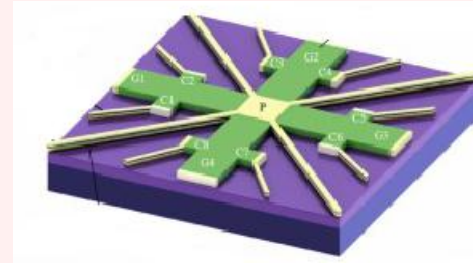
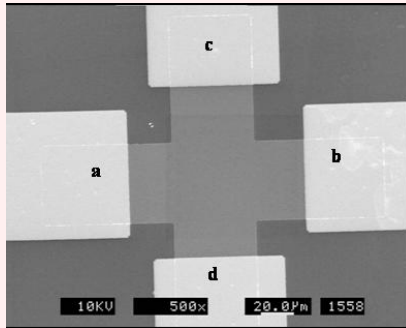
Zasada działania



$$V_H \sim I \times B$$

Generacja napięcia w wyniku działania pola magnetycznego B

Konstrukcje



Q. Wan Sensors and Actuators A: Physical 370, , 115243 (2024)

Cechy

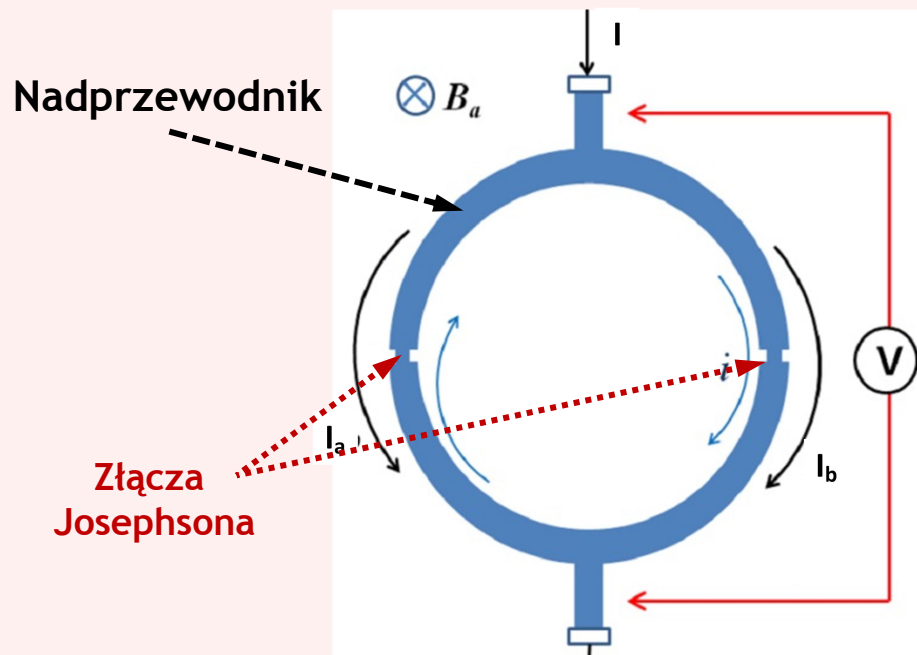
- ▶ Mierzą pole stałe i zmienne
- ▶ Napięcie zależne od kierunku pola
- ▶ Możliwość miniaturyzacji i integracji technologią półprzewodnikową
- ▶ Konieczne zasilanie
- ▶ Znaczny wpływ temperatury na właściwości

Typowe wartości parametrów

- ▶ Zakres częstotliwości pracy: Hz-kHz
- ▶ Czułość: 0.1V/T
- ▶ Zakres pomiarowy: mT do T
- ▶ Poziom szumów: $\mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$

Zasada działania

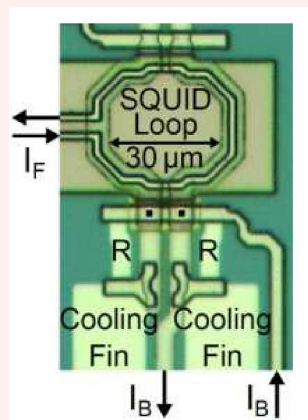
Modulacji prądu w cewce nadprzewodzącej



$$I(B_a)$$

W obecności pola magnetycznego (B) zmienia się faza funkcji falowej elektronów w nadprzewodniku, co prowadzi do zmian w prądzie nadprzewodzącym

Konstrukcje



D. Drung IEEE/CSC & ESAS SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM 4 (2016).



Cechy, właściwości

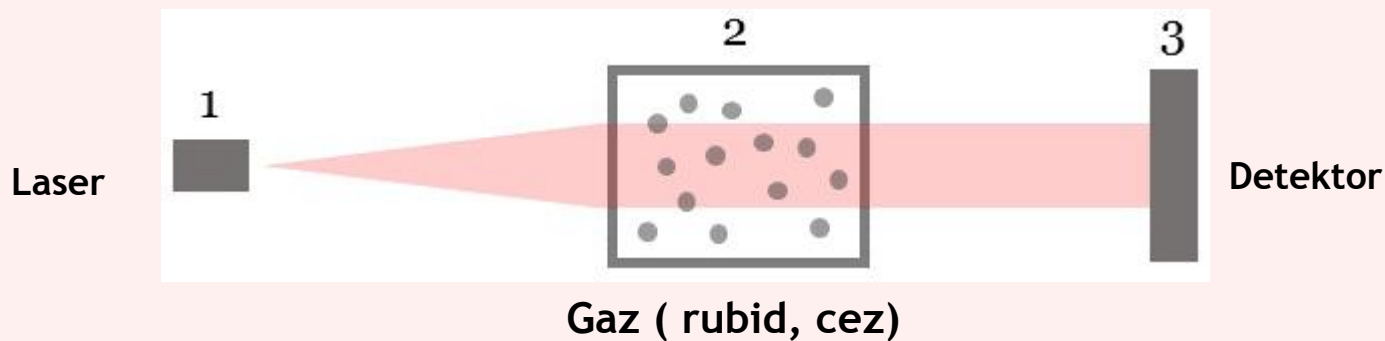
- ▶ Mierzą pole stałe i zmienne
- ▶ Wymagają kriogenicznego chłodzenia (4-77 K)
- ▶ Znaczne rozmiary systemu
- ▶ Znaczący pobór mocy
- ▶ Detekcyjność pola fT

Typowe wartości parametrów

- ▶ Zakres częstotliwości pracy: DC-kHz
- ▶ Zakres pomiarowy: fT do nT
- ▶ Poziom szumów: $\text{fT/Hz}^{1/2}$

Zasada działania

Sensory atomowe wykorzystują rozszczepienia poziomów energetycznych w atomach pod wpływem pola magnetycznego



Laserowe odczyty stanu spinowego atomów

Cechy, właściwości

- ▶ Detekcyjność pola fT
- ▶ Nie wymagają kriogenicznego chłodzenia
- ▶ Małe rozmiary
- ▶ Mierzą pole stałe i zmienne

Typowe wartości parametrów

- ▶ Zakres częstotliwości pracy: DC-kHz
- ▶ Zakres pomiarowy: fT do nT
- ▶ Poziom szumów: $\text{fT/Hz}^{1/2}$

Jakie wielkości można mierzyć sensorami magnetycznymi?

Elektryczne/Magnetyczne

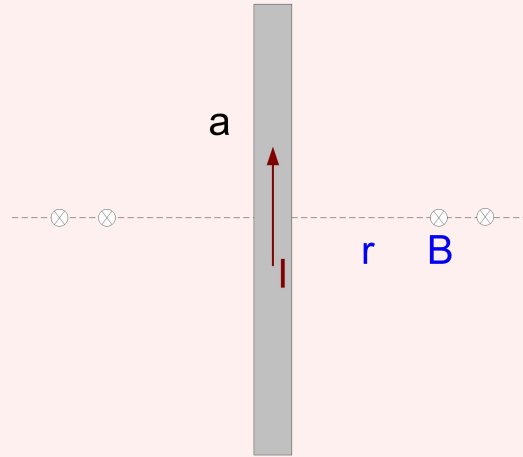
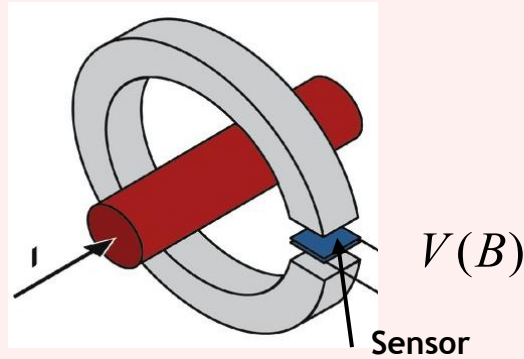
- ▶ Natężenie prądu elektryczny
- ▶ Pole magnetyczne

Mechaniczne

- ▶ Położenie liniowe
- ▶ Kąt/położenie kątowe
- ▶ Prędkość obrotowa

Pomiar prądu

Pomiar pola generowanego przez przepływający prąd

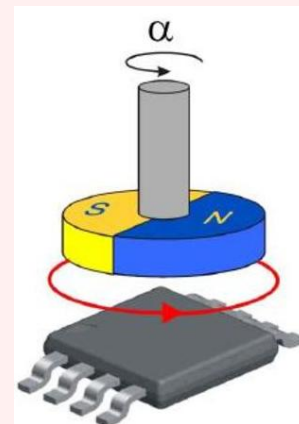
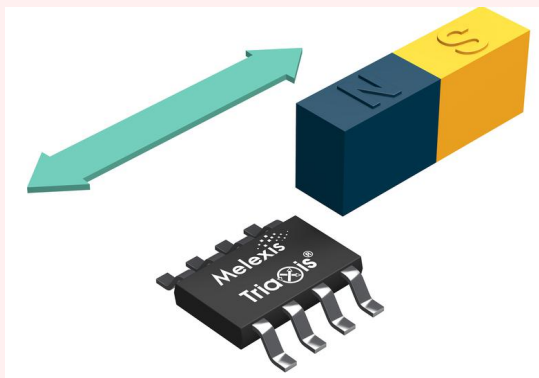


$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$a \gg r$

Pomiar wielkości mechanicznych

**Modyfikacji pola magnetycznego (magnes)
oddziałującego na sensor wymuszone zmianą
położenia/kąt/prędkości magnesu**



1. Pole magnetyczne

- > Jednostki
- > Źródła

2. Sensory magnetyczne

- > Zasada działania
- > Cechy
- > Wielkości mierzone sensorami

3. Zastosowania

Indukcyjne

- ▶ **Przemysł:** wykrywanie metalowych obiektów, kontrola jakości w taśmach produkcyjnych.
- ▶ **Energetyka:** monitorowanie pól magnetycznych w transformatorach i liniach wysokiego napięcia

Transkonduktorowe

- ▶ **Geofizyka** - pomiary pola ziemskiego i jego zmian.
- ▶ **Nawigacja inercyjna** - w systemach bez GPS
- ▶ **Detekcja obiektów magnetycznych** - np. w poszukiwaniach podwodnych.
- ▶ **Przemysł lotniczy i kosmiczny** - do mapowania pól magnetycznych planet

Hall

- ▶ **Motoryzacja** - pomiar prędkości, położenia, prądu
- ▶ **Przemysł** - wykrywanie pozycji, automatyzacja procesów.
- ▶ **Elektronika użytkowa** - detekcja otwarcia/zamknięcia
- ▶ **Energetyka** - pomiar prądu

SQUID

- ▶ **Biomedycyna** - magnetoencefalografia (MEG), magnetokardiografia (MCG), badania neurologiczne.
- ▶ **Geofizyka** - wykrywanie anomalii magnetycznych w skorupie ziemskiej, poszukiwanie minerałów.
- ▶ **Przemysł wojskowy i lotniczy** - ultra-dokładne systemy nawigacyjne i wykrywanie obiektów podziemnych.

Atomowe

- ▶ **Biomedycyna** - magnetoencefalografia (MEG), magnetokardiografia (MCG), badania neurologiczne.
- ▶ **Geofizyka** - wykrywanie anomalii magnetycznych w skorupie ziemskiej, poszukiwanie minerałów.
- ▶ **Przemysł kosmiczny** - precyzyjna detekcja pola magnetycznego w przestrzeni kosmicznej

Ripka P. (ed), **Magnetic sensors and magnetometers**
Artech House, 2001

Boll R, Overshott K.J. (ed), **Magnetic sensors**
VCH Publ, 1989

John R. Brauer, **Magnetic actuators and sensors**
John Wiley & Sons, 2006

J. Lenz, A. Edelstein **Magnetic Sensors and their applications**
IEEE Sensors Journal, 2006

Dziękuję za uwagę