



**ĆWICZENIE
58**

**WYZNACZANIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW
FERROMAGNETYKÓW**

Cel ćwiczenia: Obserwacja, pomiar i wykreślenie nasyconej pętli histerezy ferromagnetycznej, wyznaczenie krzywej namagnesowania pierwotnego, pozostałości magnetycznej B_r i pola koercji H_c .

Zagadnienia: pole magnetyczne, indukcja magnetyczna, strumień magnetyczny, prawo Faradaya indukcji magnetycznej, diamagnetyki, paramagnetyki, ferromagnetyki, pętla histerezy, pozostałość magnetyczna, pole koercji, wektor namagnesowania, domeny ferromagnetyczne, temperatura Curie.

1 Wprowadzenie

Ferromagnetyczne własności materii

Ferromagnetyki (FM) to krystaliczne ciała stałe, w których poniżej temperatury T_c , zwanej temperaturą Curie, występuje, zależne od temperatury T , spontaniczne namagnesowanie $\overline{M(T)}$ $\left[\frac{A}{m}\right]$, pod nieobecność zewnętrznego pola magnetycznego H . Pod namagnesowaniem rozumiemy moment magnetyczny jednostki objętości ciała, czyli gęstość przestrzenną momentów magnetycznych. Najbardziej reprezentatywnymi przykładami FM są: żelazo ($T_c = 1043$ K), nikiel (631 K), kobalt (1404 K), gadolin (281 K) oraz inne stopy i związki, które są ferromagnetykami w dostatecznie niskich temperaturach, gdy energia cieplna kT jest znacznie mniejsza od energii oddziaływań magnetycznych J .

W ujęciu modelowym można wyobrazić sobie, że w FM w temperaturach niższych od T_c istnieje silne wewnętrzne pole magnetyczne, tzw. pole molekularne H_m , podtrzymujące stan namagnesowania, którego wartość przekracza 10^2 , a nawet 10^3 razy pola zewnętrzne.

FM to zjawisko kwantowe przejawiające się w temperaturach pokojowych. Jego natura jest związana z właściwościami elektronów, które będąc cząsteczkami elementarnymi są nierozróżnialne a jako fermiony podlegają zakazowi Pauliego. Z elektronami związane są spinowe momenty magnetyczne, które w kryształach FM oddziałują ze sobą kwantowomechanicznie (nie są to oddziaływania typu dipol magnetyczny - dipol magnetyczny). Momenty magnetyczne sąsiednich atomów w sieci krystalicznej ustawiają się w kierunkach i zwrotach zgodnych, co obniża energię całkowitą FM i jest przyczyną istnienia FM.

Rzeczywiste próbki ciał FM nie wykazują na ogół wypadkowego spontanicznego namagnesowania pod nieobecność zewnętrznego pola magnetycznego. Przyczyna tego zjawiska tkwi w tzw. domenowej strukturze ferromagnetyka. Globalna struktura uporządkowana w kryształach jest podzielona na oddzielne niewielkie obszary o rozmiarach liniowych rzędu $10^{-5} - 10^{-4}$ m, rozgraniczone tzw. ściankami Blocha. Pojedyncze domeny wykazują jednorodne namagnesowanie w określonym kierunku osiągające swoje maksimum. Jednak z powodu chaotycznego rozkładu różnych kierunków namagnesowania domen ich pola wzajemnie się znoszą i próbka FM jako całość może nie przejawiać wypadkowego namagnesowania. Partycja struktury FM na domeny prowadzi do minimalizacji energii oddziaływań magnetycznych w próbce.

Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje porządkowanie domen w kierunku tego pola. Proces ten może zachodzić w dwojaki sposób: (1) w słabych polach magnetycznych objętości domen korzystnie zorientowanych w stosunku do zewnętrznego pola wzrastają kosztem objętości domen zorientowanych niekorzystnie poprzez przesuwanie się ścianek Blocha. (2) W silnych zewnętrznych polach magnetycznych kierunek namagnesowania w obszarze domen obraca się w kierunku zewnętrznego pola. Przy dostatecznej zdolności rozdzielczej na krzywej namagnesowania $\vec{B}(\vec{H})$ uwidacznia się subtelna struktura schodkowa związana z przeorientowaniem się poszczególnych domen (efekt Barkhausena). Efektem tych nieodwracalnych zmian jest *histereza magnetyczna*.

Ciała obdarzone trwałymi momentami magnetycznymi, a nie osiągające kooperatywnego stanu uporządkowania magnetycznego, zwane są paramagnetykami. Zaliczają się do nich związki metali d - i f -elektronowych, tlen, metale itd. Również każdy FM powyżej T_c , po utracie stanu uporządkowania, staje się paramagnetykiem.

Substancje pozbawione trwałych momentów magnetycznych są diamagnetykami. W zewnętrznym polu magnetycznym wykazują one wyindukowane małe namagnesowanie skierowane przeciwnie do pola zewnętrznego (reguła Lenza).

Do charakterystyki tych tzw. słabo-magnetycznych materiałów najlepiej nadaje się pojęcie podatności magnetycznej, czyli liniowy związek pomiędzy namagnesowaniem \vec{M} $\left[\frac{A}{m}\right]$, a natężeniem przyłożonego pola magnetycznego \vec{H} .

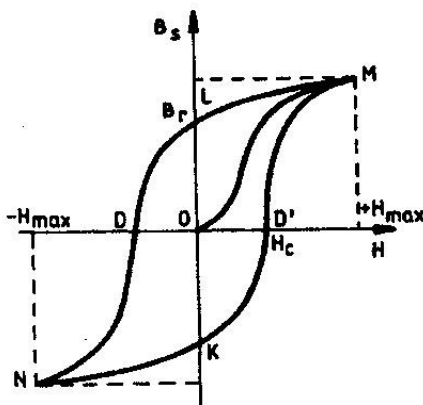
Rozważmy w tym celu podstawową relację pomiędzy indukcją magnetyczną \vec{B} oraz \vec{H} i \vec{M} . Indukcja magnetyczna wewnątrz materiału lub ośrodka magnetycznego wyraża się wzorem $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$, gdzie $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ jest przenikalnością magnetyczną próżni. Przyjmując, że $\mu = \frac{\mu_m}{\mu_0}$ jest tzw. względną przenikalnością magnetyczną ośrodka, gdzie μ_m to przenikalność magnetyczna ośrodka, otrzymujemy związek $\vec{B} = \mu_m \vec{H} = \mu \mu_0 \vec{H}$, a stąd zależność $\vec{M} = (\mu - 1)\vec{H} = \chi \vec{H}$.

W przypadku *paramagnetyków* $\chi > 0$, $\mu > 1$, χ nie zależy od H , a zależy od T wg. prawa Curie lub Curie-Weissa.

W przypadku *diamagnetyków* $\chi < 0$, $\mu < 1$, χ nie zależy od H i nie zależy od T .

Podatność magnetyczna jest mało przydatna do charakterystyki FM ($\chi \gg 0$, $\mu \gg 1$), bowiem zależy nie tylko od T , lecz również od H . Do charakterystyki FM używa się przede wszystkim namagnesowania nasycenia i wyliczonej z niego wartości uporządkowanego momentu magnetycznego μ_f oraz parametrów pętli histerezy.

Pętla histerezy ferromagnetycznej



Rys. 1. Pętla histerezy w układzie H-B

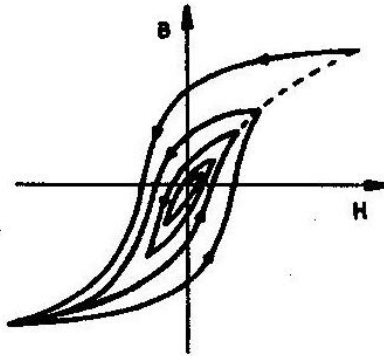
1. Zależność indukcji magnetycznej od natężenia pola magnetycznego w rozmagnesowanej próbce ferromagnetyka ilustruje krzywa OM (Rys.1). Dla $H = H_{max}$ osiągnięte jest nasycenie namagnesowania po tzw. *krzywej pierwotnego namagnesowania*.
2. Gdy H maleje od H_{max} do zera to indukcja magnetyczna próbki $B(H)$ nie powraca po krzywej pierwotnego namagnesowania MO, lecz po krzywej ML i dla natężenia pola $H = 0$ mamy $B = B_r$, czyli tak zwaną pozostałość magnetyczną (odpowiada to namagnesowaniu resztkowemu lub szczytkowemu M_r w magnesie trwałym).
3. Po zmianie kierunku pola i zwiększaniu jego wartości obserwujemy spadek B wzdłuż krzywej LD, gdzie dla $-H_c$, zwanym *polem koercji*, mamy $B = 0$ w punkcie D. Zatem pole koercji to takie pole, które usuwa namagnesowanie resztkowe.
4. Wraz z dalszą zmianą pola magnetycznego przeciwnie skierowanego aż do $-H_{max}$, indukcja B rośnie w przeciwnym kierunku zgodnie z krzywą DN (osiągnięte jest przeciwne namagnesowanie nasycenia).

5. W końcu, gdy wartość pola zmienia się od $-H_{max}$ do zera i dalej do H_{max} , zmianę indukcji ilustrują odpowiednio krzywe NK i KM. W punkcie M indukcja B osiąga ponownie nasycenie. Tym samym zamknięta zostaje cała pętla histerezy magnetycznej.

Zmiana kierunku magnetyzacji \vec{M} lub indukcji magnetycznej \vec{B} w próbce wymaga pracy przemagnesowania. Odpowiada jej pole powierzchni pętli histerezy. Przy cyklicznym przemagnesowaniu praca ta wydatkowana jest na ciepło wydzielone w próbce.

Pozostałość magnetyczna B_r oraz pole koercji H_c decydują o przydatności FM w zastosowaniach technicznych. Gdy pole koercji jest duże, a pętla histerezy jest szeroka, mamy do czynienia z twardym FM. To magnesy stałe (pamięć magnetyczna w komputerach wymaga właśnie takiej stromej i szerokiej pętli histerezy o dużym polu koercji). Gdy z kolei pole koercji jest małe, a pętla histerezy staje się wąska, tym samym straty energii przemagnesowania są niewielkie, dostajemy FM miękkie (żelazo na silniki elektryczne i transformatory). FM wykorzystywane są jako ekrany magnetyczne ochraniające określone obszary przestrzeni przed działaniem zewnętrznych pól magnetycznych; skupiają one linie \vec{B} w materiale FM; np. galwanometr umieszczony pod żelaznym płaszczem jest ekranowany od zewnętrznego pola magnetycznego.

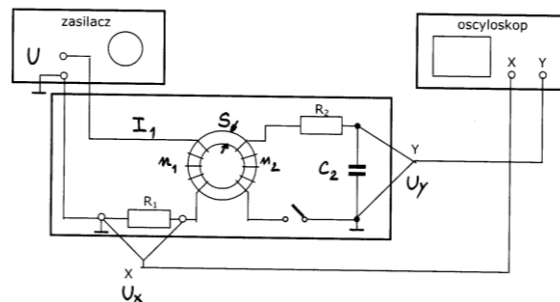
Rozmagnesowanie FM udaje się przeprowadzić w zmiennym polu magnetycznym, którego maksymalne natężenie systematycznie maleje. Wtedy pole powierzchni histerezy zmniejsza się stopniowo do zera (Rys.2).



Rys.2 Przebieg indukcji w rozmagnesowywaniu ferromagnetyka

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Pętla histerezy magnetycznej wyznaczana jest i badana metodą oscyloskopową. Poniżej przedstawiono schemat układu pomiarowego (Rys.3)



Rys.3 Schemat układu pomiarowego

Idea pomiaru polega na wytwarzaniu zmiennego pola magnetycznego H na toroidalnym rdzeniu FM przez prąd płynący w uzwojeniu n_1 oraz na pomiarze siły elektromotorycznej U_y , indukowanej na uzwojeniu n_2 , proporcjonalnej do szybkości zmian strumienia magnetycznego w rdzeniu.

Uzwojenie magnesujące złożone z n_1 zwojów zasilane jest prądem zmiennym I_1 o regulowanej amplitudzie. Z prawa Ampere dla solenoidu mamy:

$H = \frac{n_1 I_1}{l}$, gdzie l jest średnią długością drogi magnetycznej w rdzeniu. Ponieważ $I_1 = \frac{U_x}{R_1}$, więc $H = \frac{n_1 U_x}{l R_1} = \frac{n_1 U_x}{l R_1}$. Natężenie H należy wyznaczyć poprzez pomiar U_x podawanego na płytce oscyloskopu.

W uzwojeniu wtórnym (n_2 zwojów) indukuje się SEM o wartości: $U_y = n_2 \frac{d\Phi}{dt}$, gdzie $\frac{d\Phi}{dt}$ jest szybkością zmian strumienia Φ w rdzeniu toroidu.

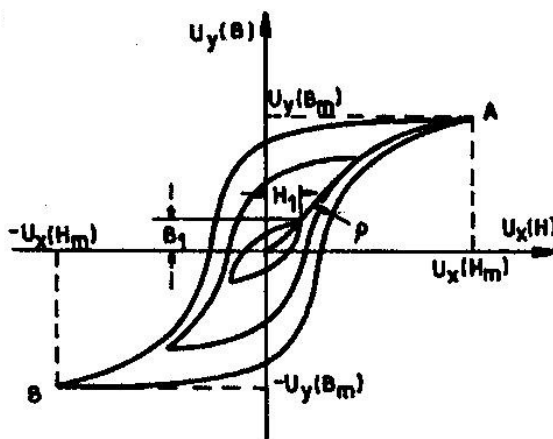
Wielkości R_2 i C_2 obwodu wtórnego są tak dobrane, że stanowi on obwód całkujący, tzn. $R_2 \gg \frac{1}{\omega C_2}$ (ω jest częstością zmian napięcia w sieci). Można zatem przyjąć, że napięcie U_y na wyjściu obwodu całkującego wynosi:

$U_y = \frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t U_y dt = \frac{n_2}{R_2 C_2} \int_0^t d\Phi = \frac{n_2 \Phi}{R_2 C_2} = \frac{n_2 \vec{S} \cdot \vec{B}}{R_2 C_2}$, gdzie \vec{S} jest wektorem powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia toroidu.

Widzimy, że napięcie U_y podawane na płytce oscyloskopu jest wprost proporcjonalne do indukcji B . Przekształcając ostatni wzór otrzymujemy wartość indukcji jako:

$$B = \frac{U_y R_2 C_2}{n_2 S}$$

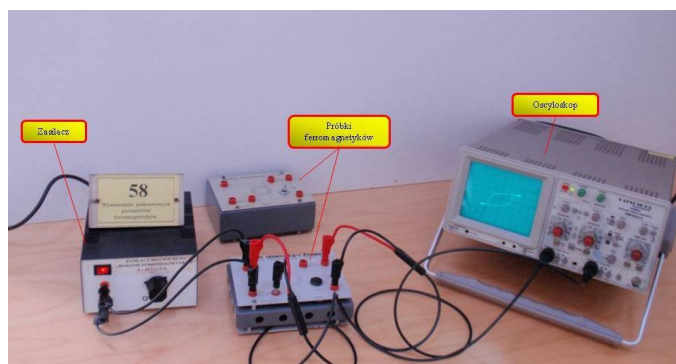
Zmieniając wartość napięcia zasilającego układ pomiarowy U_x można wyznaczyć krzywą pierwotnego namagnesowania oraz pętlę histerezy.



Rys.4 Pomiar krzywej pierwotnego namagnesowania (w układzie $U_x - U_y$ na ekranie oscyloskopu)

3 Zadania do wykonania

A) Pomiary:



Rys.5 Stanowisko pomiarowe ćwiczenia 58

Wykaz przyrządów

a. oscyloskop; b. zasilacz (0 – 24V; 2A); c. trzy próbki ferromagnetyków
 UWAGA! Czas obserwacji próbki nr 3 nie może przekraczać 10 sekund!

1. Zmontować układ pomiaru wg. schematu na Rys.3.
2. Włączyć oscyloskop.
3. Przeprowadzić kalibrację wzmacniaczy x i y oscyloskopu wykorzystując generator napięcia wzorcowego oscyloskopu (sprawdzić kalibrację i w razie potrzeby wykonać korektę).

4. Ustawić plamkę na środku ekranu oscyloskopu.

5. Stopniowo zwiększając napięcie zasilające badaną próbkę otrzymać na ekranie pętlę histerezy w stanie nasycenia w położeniu dogodnym do pomiarów; w tym celu dobrać odpowiednie wartości współczynników wzmocnienia w_x i w_y dla płytek odchylenia poziomego x oraz pionowego y (pokręćła regulacji wzmocnienia płytek odchylenia poziomego i pionowego w jednostkach $\frac{V}{cm}$).

6. Zmniejszyć do zera napięcie zasilające próbkę.

7. Przeprowadzić rozmagnesowanie próbki zmieniając napięcie zasilające od $U = 0$ do U_{max} i ponownie stopniowo zmniejszyć napięcie do zera. Przebieg indukcji w rozmagnesowywanym rdzeniu przedstawiony jest na Rys.4.

8. Wyznaczyć krzywą pierwotnego namagnesowania. W tym celu dla kilku wartości napięcia zasilającego próbkę (napięcie zasilające należy zwiększać skokowo za pomocą autotransformatora od zera do wartości przy której zostaje osiągnięta krzywa pierwotnego namagnesowania w stanie nasycenia) zmierzyć na ekranie oscyloskopu z dokładnością do 0,2 cm współrzędne x i y wybranych punktów krzywej pierwotnego namagnesowania (dla każdej pętli histerezy wyznaczyć H_m i B_m w A i B).

9. Wyznaczyć nasyconą pętlę histerezy;

a) należy dobrać takie napięcie zasilające próbkę, aby uzyskać nasyconą pętlę histerezy,

b) zmierzyć i zanotować współrzędne x i y punktów leżących na pętli histerezy, tak aby można było odwzorować jej kształt na wykresie $B = f(H)$.

10. Wyznaczyć pozostałość magnetyczną B_r i pole koercji H_c ;

a) z wykresu nasyconej pętli histerezy zmierzyć na ekranie oscyloskopu odległość y_r między punktami przecięcia pętli histerezy z osią pionową Y ($H = 0$).

b) z wykresu nasyconej pętli zmierzyć odległość x_c między punktami przecięcia pętli histerezy z osią poziomą X ($B = 0$).

B) Opracowanie wyników:

1. Wartość natężenia pola magnetycznego H obliczyć ze wzoru:

$$H = \frac{n_1}{lR_1} U_x, \quad (1)$$

gdzie: $U_x = w_x x$ - napięcie podawane na płytce poziome oscyloskopu

n_1 - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego

l - średnia długość drogi magnetycznej

R_1 - rezystancja opornika R_1

w_x - współczynnik wzmocnienia płytek odchylenia poziomego

x - współrzędna pozioma określonego punktu krzywej

Obliczyć niepewność $u_c(H)$ przyjmując $u(x) = 0,2$ cm.

2. Wartość indukcji magnetycznej B obliczyć ze wzoru:

$$B = \frac{R_2 C_2}{n_2 S} U_y, \quad (2)$$

gdzie: $U_y = w_y y$ - napięcie podawane na płytce pionowej oscyloskopu (spadek napięcia na C_2)

R_2 - rezystancja opornika R_2

C_2 - pojemność kondensatora C_2

S - przekrój poprzeczny próbki

n_2 - liczba zwojów uzwojenia wtórnego

w_y - współczynnik wzmocnienia płytek odchylenia pionowego

y - współrzędna pionowa określonego punktu krzywej

Obliczyć niepewność $u_c(B)$ przyjmując $u(y) = 0,2$ cm.

3. Na papierze milimetrowym wykreślić pierwotną krzywą namagnesowania $B = f(H)$ korzystając z obliczonych, na podstawie wzorów (1) i (2), wartości H i B . Dla kilku wybranych punktów zaznaczyć prostokąt niepewności.

4. Wykreślić pętlę histerezy w stanie nasycenia w układzie $B = f(H)$.

5. Obliczyć wartości pozostałości magnetycznej B_r i pola koercji H_c .

a) Wartość B_r obliczyć ze wzoru

$$B_r = \frac{R_2 C_2}{n_2 S} w_y \frac{y_r}{2}, \quad (3)$$

b) Wartość H_c obliczyć ze wzoru

$$H_c = \frac{n_1}{lR_1} w_x \frac{x_c}{2} \quad (4)$$

c) Zaznaczyć wartości B_r i H_c na krzywej pętli histerezy. Zaznaczyć także ich niepewności.

6. Z zależności

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (5)$$

obliczyć wartość przenikalności magnetycznej μ dla badanych ferromagnetyków oraz ich niepewności, gdzie $\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7}$ H/m.

7. Przedstawić na wykresie zależność $\mu = f(H)$ dla badanych ferromagnetyków i zaznaczyć prostokąty niepewności.

Pytania

1. Zdefiniować wielkości charakteryzujące magnetyczne własności materii i dokonać podziału ciał ze względu na własności magnetyczne.
2. Wyjaśnić naturę ferromagnetyzmu.
3. Przedstawić domenową strukturę ferromagnetyka. Wyjaśnić dlaczego moment magnetyczny próbki ferromagnetyka jest równy zeru?
4. Wyjaśnić wpływ temperatury na magnetyczne własności ferromagnetyka.
5. Omówić zachowanie się ferromagnetyka w zewnętrznym polu magnetycznym. Wyjaśnić występowanie pętli histerezy.
6. W jaki sposób można wyznaczyć krzywą pierwotnego namagnesowania i pętlę histerezy w układzie $B = f(H)$?
7. Co to jest pozostałość magnetyczna oraz pole koercji? Jaki jest wpływ wartości tych wielkości na zastosowanie ferromagnetyka?

Informacje dodatkowe

Wartości C_2 i R_2 są dla wszystkich próbek takie same i wynoszą:

$$C_2 = 1,5 \mu\text{F}, R_2 = 200 \text{ k}\Omega$$

| Próbka | R_2 [Ω] | n_1 [zwoje] | n_2 [zwoje] | l [mm] | S [mm ²] |
|--------|-----------------------|------------------|------------------|-------------|---------------------------|
| 1 | 10 | 200 | 200 | 90 | 45 |
| 2 | 8,2 | 250 | 200 | 94 | 56 |
| 3 | 2,8 | 200 | 314 | 150 | 5,4 |

Uwaga: ze względu na ograniczony czas obserwacji pętli histerezy dla próbki nr 3 sugeruje się przyjąć $w_x = 10$ V/cm, $w_y = 10$ mV/cm, przy pięciokrotnym wzmocnieniu (wciśnięte oba przyciski YMAG x 5).

Proponowane tabele (do zatwierdzenia u prowadzącego)

$$w_x =$$

$$w_y =$$

| U [V] | x [cm] | y [cm] | $u(x,y)$ [cm] | U_x [V] | $u_c(U_x)$ [V] | U_y [V] | $u_c(U_y)$ [V] | H [T] | $u_c(H)$ [T] | B [T] | $u_c(B)$ [T] | μ | $u_c(\mu)$ |
|------------|-------------|-------------|------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-------|------------|
| | | | | | | | | | | | | | |

| y_r [cm] | $u(y_r)$ [cm] | B_r [T] | $u_c(B_r)$ [T] |
|---------------|------------------|--------------|-------------------|
| | | | |

| x_c [cm] | $u(x_c)$ [cm] | H_c [T] | $u_c(H_c)$ [T] |
|---------------|------------------|--------------|-------------------|
| | | | |

Literatura

- [1] D. HALLIDAY, R. RESNICK, J. WALKER, *Podstawy fizyki*, PWN, Warszawa 2003.
- [2] SAWIELIEW I. W., *Wykłady z fizyki*, t.2, PWN, Warszawa 1994.
- [3] JANUSZAJTIS A., *Fizyka dla politechnik*, t.2, Pola, PWN, Warszawa 1986.
- [4] ASHCROFT N. W., MERMIN N. D., *Fizyka ciała stałego*, PWN, Warszawa 1986.
- [5] http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/maria/pdf/MF9_6.pdf
- [6] http://users.uj.edu.pl/~ufbaran/dydaktyka/PFMS/PFMS-11_Ferromagnetyzm_i_Antyferromagnetyzm.pdf
- [7] <http://sergeev.fiz.univ.szczecin.pl/Dydaktyka/Wyklady/Podstawy%20Fizyki-Studia%20oczne/Fizyka%20III/Wyklad-39.pdf>
- [8] <http://www.mif.pg.gda.pl/homepages/jasiu/stud/EiM/pdf/28-materia-magn.pdf>

opracował dr inż. Maciej Mulak