

# Katedra Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Łódzkiego

## Ćwiczenie 3

### Badanie przemiany fazowej w materiałach magnetycznych

**Cel ćwiczenia:** Celem ćwiczenia jest badanie charakteru przemiany fazowej w tlenkowych materiałach magnetycznych (ferytach) oraz wyznaczenie ich temperatury Curie.

#### **Plan prac badawczych**

1. Mierzmy siłę elektromotoryczną  $E_2$  indukowaną w cewce obejmującej badaną próbkę magnetyczną (rdzenie ferrytowe) typu:  $\mu 5000$ , F1001, rdzeń pamięciowy lub innych, dostarczonych przez prowadzącego ćwiczenie.
2. Pomiary wykonujemy w funkcji temperatury próbki w zakresie od temperatury pokojowej do temperatury przewyższającej o kilka stopni [K] temperaturę Curie (powyżej  $T_c$  siła elektromotoryczna  $E_2 = 0$  V). Pomiary wykonujemy zarówno dla temperatur rosnących jak i malejących (ze względów czasowych ograniczamy chłodzenie do  $\sim 60$  K).
3. Dodatkowo wykonujemy pomiar napięcia szumów dla temperatury pokojowej (bez prądu magnesującego) oraz dla temperatury nieco wyższej od temperatury Curie.
4. Pomiarów w punktach. 1 i 2 dokonujemy dla częstotliwości prądu magnesującego 4 kHz (najczęściej) lub dla innych częstotliwości w ustaleniu z prowadzącym ćwiczenie.
5. Pomiary powyższe wykonujemy dla „dużych” prądów magnesujących:  $\sim 200$  mA (rdzeń pamięciowy),  $\sim 400$  mA (rdzeń  $\mu 5000$ ), 1300 mA (rdzeń F1001) oraz dla „małych” prądów magnesujących, mniejszych od poprzednich o około jeden rząd wielkości (10 razy).
6. Odpowiednio skorygowane, dla poszczególnych rdzeni, wartości prądów magnesujących ustalamy obserwując histerezę magnetyczną danej próbki ferrytowej na ekranie oscyloskopu.

## Wstęp teoretyczny

Najbardziej naturalnym sposobem klasyfikacji substancji pod względem ich właściwości magnetycznych jest podanie wielkości charakteryzującej reakcję ośrodka na zewnętrzne pole magnetyczne  $H$ . Taką wielkością jest podatność magnetyczna:

$$\chi = \frac{M}{H}$$

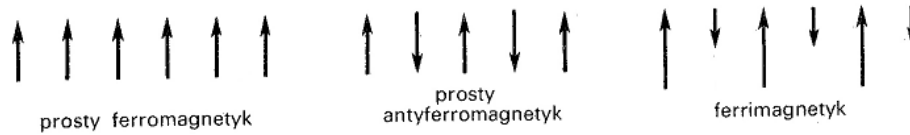
$M$  jest namagnesowaniem ośrodka, tzn. momentem magnetycznym przypadającym na jednostkę objętości. Substancje o dodatniej podatności nazywamy paramagnetykami a o ujemnej – diamagnetykami.

Ciała diamagnetyczne to takie, w których atomy, jony lub cząstki mają wypadkowy moment magnetyczny równy zero. Orbity elektronowe w atomach można wyobrazić sobie jako kołowe obwody elektryczne o zerowym oporze, w których płynie prąd o stałym natężeniu. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego powoduje zmianę przechodzącego przez te obwody strumienia indukcji magnetycznej. W orbitach elektronowych indukują się wówczas dodatkowe prądy, które płyną tak długo jak długo działa zewnętrzne pole. Zgodnie z prawem Lenza momenty magnetyczne indukowanych prądów kompensują zmianę strumienia indukcji magnetycznej, a więc mają kierunki przeciwne do pola zewnętrznego. Tak więc diamagnetyk umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym magnesuje się, przy czym zwrot wektora namagnesowania jest przeciwny do wektora natężenia pola. Podatność diamagnetyków jest zazwyczaj bardzo mała (rzędu  $-10^{-6}$ ) i nie zależy od temperatury.

Zjawisko paramagnetyzmu występuje tylko w tych materiałach, w których atomy lub molekuly mają stały moment magnetyczny. W ciałach tych momenty magnetyczne w atomach nie znoszą się; atomy można traktować jako maleńkie magnesy ustawione chaotycznie. Jeśli znajdują się one w zewnętrznym polu magnetycznym, ustawiają się równoległe do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego, powodując powstanie na końcach ciała tzw. biegunów magnetycznych; wytworzona indukcja dodaje się do indukcji pola zewnętrznego. Powstający w paramagnetyku wypadkowy moment magnetyczny jest bardzo słaby i znika gdy usunięte zostanie pole zewnętrzne.

Pewne kryształy zawierające atomy z różnym od zera momentem magnetycznym wykazują w dostatecznie niskich temperaturach spontaniczne namagnesowanie w nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego. Istnienie makroskopowego momentu magnetycznego w kryształach przy  $H=0$  sugeruje, że w wyniku wzajemnego oddziaływania momenty magnetyczne atomów tworzą regularną strukturę (uporządkowanie). Wyróżniamy

trzy najbardziej typowe uporządkowania momentów magnetycznych w kryształach wykazujących spontaniczne namagnesowanie: ferromagnetyczna, antyferromagnetyczna i ferrimagnetyczna.



Ferromagnetyzm możliwy jest jedynie w kryształach zawierających atomy pierwiastków przejściowych, tzn. atomy mające niezapełnioną wewnętrzną powłokę elektronową i powstaje w wyniku oddziaływania wymiennego elektronów z niezapełnionych powłok, przy czym oddziaływanie to jest efektem kwantowym opisanym przez W. Heisenberga.

Temperatura  $T_c$ , w której znika spontaniczne namagnesowanie, nazywana jest temperaturą Curie lub temperaturą krytyczną. Dla temperatur  $T > T_c$  ferromagnetyk zachowuje się w zewnętrznym polu magnetycznym tak jak paramagnetyk, przy czym podatność zależnością znaną jako prawo Curie-Weissa:

$$\chi = \frac{const}{T - T_c}$$

Ogólne cechy przejścia fazowego i zjawisk w jego otoczeniu, tzw. zjawisk krytycznych, można otrzymać za pomocą fenomenologicznej teorii zaproponowanej przez Landaua. U jej podstaw leżą następujące założenia:

1) że faza uporządkowana charakteryzuje się parametrem uporządkowania, którym jest w przypadku magnetyków magnetyzacja  $M(\vec{r})$

2) że w energii swobodnej układu występuje część odpowiedzialna za przejście fazowe, która może być wyrażona w postaci szeregu potęgowego względem

$M(\vec{r})$  całkowanego po całej przestrzeni:

$$F = \int \left\{ AM^2(\vec{r}) + BM^4(\vec{r}) + \dots \right\} d^3r$$

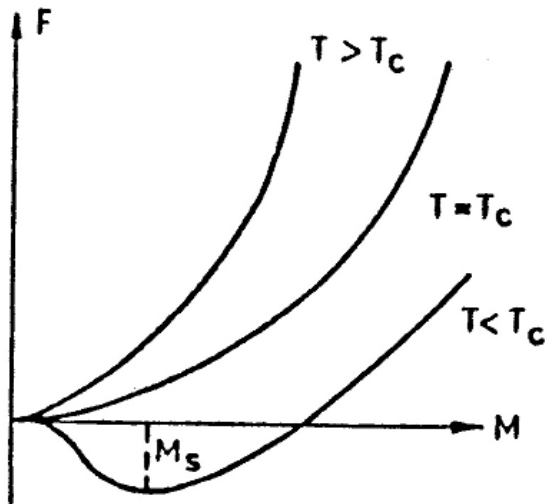
3) oraz, że wielość A jest równa:  $A = D(T - T_c)$

Przy czym stałe B i D są stałymi dodatnimi.

Minimum energii swobodnej F, przy ograniczeniu się do pierwszych jedynie wyrazów, prowadzi do równania:

$$AM + 2BM^3 = 0$$

Powyżej temperatury  $T_c$  (gdzie  $A > 0$ ) minimum energii odpowiada rozwiązaniu  $M = 0$ , natomiast poniżej  $T_c$  ( $A < 0$ ) mamy do czynienia z rozwiązaniem odpowiadającym magnetyzacji spontanicznej:



$$M_s = \sqrt{\frac{-A}{2B}} = \sqrt{\frac{DT_c}{2B}} |t|^{\frac{1}{2}}$$

gdzie tzw. zredukowana temperatura  $t$  jest zdefiniowana przez:

$$t = \frac{T - T_c}{T_c}$$

Informacje o zachowaniu się układów w obszarze krytycznym wyraża się zwykle za pomocą tzw. indeksów (wskaźników) krytycznych. Używając zredukowanej temperatury zdefiniowanej przez wzór (7) można zakładać, że magnetyzacja spontaniczna blisko temperatury krytycznej może być wyrażona w postaci:

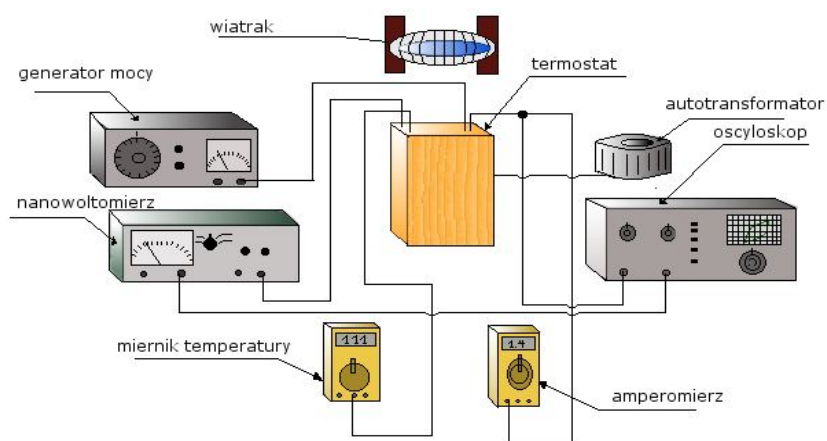
$$M_s(T) \sim |t|^\beta$$

$$\chi(T) \sim |t|^{-\gamma}$$

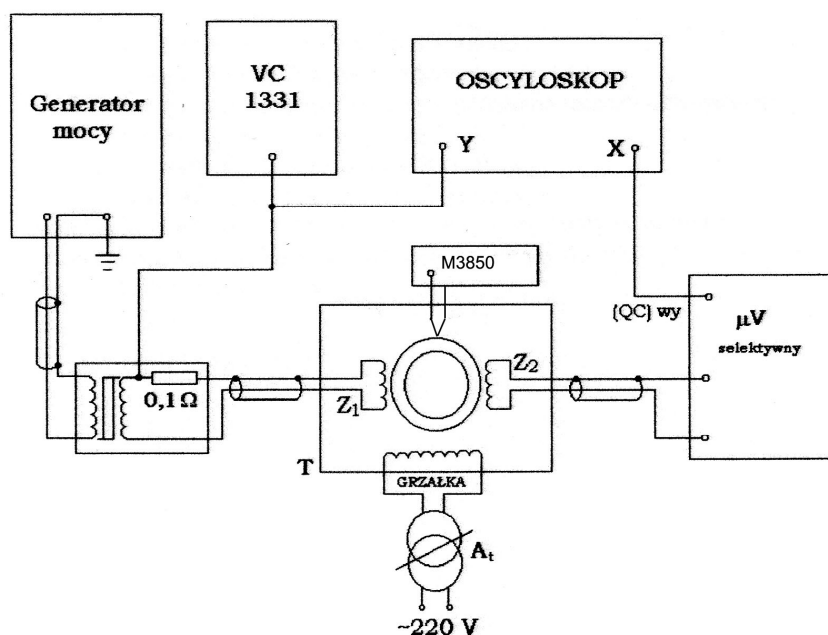
### Metodyka pomiarowa

Metoda indukcji elektromagnetycznej polega na pomiarze siły elektromotorycznej indukowanej w cewce, która obejmuje badaną próbkę znajdującą się w przemiennym polu magnetycznym o stabilizowanej amplitudzie.

## Schemat blokowy układu do pomiaru przemiany fazowej w magnetykach



## Schemat ideowy układu do pomiaru przemiany fazowej w magnetykach



Badaną próbkę umieszczamy w termostacie T, którego temperaturę regulujemy poprzez odpowiednie nastawienie napięcia, na autotransformatorze  $A_t$ , zasilającego grzałkę. Próbka stanowi rdzeń transformatora o uzwojeniu pierwotnym  $Z_1$  i wtórnym  $Z_2$ . Uzwojenie pierwotne  $Z_1$  spełnia rolę uzwojenia magnesującego i jest zasilane z generatora mocy poprzez transformator separujący o dużej wydajności prądowej. Amplitudę prądu magnesującego w uzwojeniu  $Z_1$  mierzy woltomierz cyfrowy prądu zmiennego. Uzwojenie wtórne  $Z_2$  jest podłączone do nanowoltomierza selektywnego.

Pomiar temperatury w termostacie odbywa się za pomocą cyfrowego miernika METEX typ M3850, natomiast rolę przetwornika temperatury na sygnał elektryczny pełni termopara umieszczona w bloku metalowym termostatu, umieszczona w pobliżu próbki.

Do badania przesunięcia fazowego między prądem magnesującym a napięciem na uzwojeniu  $Z_2$  służy oscyloskop, do którego wejść X i Y przychodzą sygnały prądu wzbudzającego oraz napięcia z wyjścia zmiennoprądowego nanowoltomierza selektywnego. Napięcie na uzwojeniu pierwotnym wynosi:

$$U_1 = U_R + U_L$$

gdzie:  $U_R = I_1 R_1$  – spadek napięcia na oporności czynnej,

$U_L = -E_1$  – spadek napięcia na oporności indukcyjnej, liczbowo równy sile elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu pierwotnym,

$$\text{zatem: } E_1 = I_1 R_1 - U_1$$

$$\text{oraz: } E_1 = - (d\Phi_1/dt) \cdot Z_1$$

gdzie  $\Phi_1$  to strumień magnetyczny przenikający każdy ze zwojów uzwojenia  $Z_1$ .

Strumień magnetyczny przenikający każdy ze zwojów uzwojenia  $Z_2$  równy jest  $\Phi_2 = k\Phi_1$ , gdzie  $k$  jest współczynnikiem magnetycznego sprzężenia między uzwojeniami  $Z_1$  i  $Z_2$ . Siła elektromotoryczna, indukowana w uzwojeniu wtórnym, wynosi:

$$E_2 = - (d\Phi_2/dt) \cdot Z_2 = - k(d\Phi_1/dt) \cdot Z_1$$

Z wyrażen powyższych wynika, że:

$$E_2 = E_1 k (Z_2/Z_1)$$

Uwzględniając wyrażenie na  $E_1$  otrzymujemy:

$$E_2 = k (Z_2/Z_1) (I_1 R_1 - U_1)$$

Gdy temperatura próbki zbliża się do punktu Curie, współczynnik sprzężenia magnetycznego  $k$  dąży do zera, a tym samym siła elektromotoryczna w uzwojeniu  $Z_2$  powinna maleć do zera.

### **Opracowanie wyników**

1. Na podstawie pomiarów wykreślić zależności siły elektromotorycznej  $E_2$  od temperatury. Oszacować na podstawie wykresów temperatury Curie poszczególnych próbek.
2. Wykonać analogiczne wykresy w skali logarytmicznej  $\log E_2 = f \{ \log (T) \}$
3. Korzystając z wniosków teoretycznych dotyczących wykładniczego charakteru przemiany fazowej w magnetykach wykreślić proste styczne do zbroczy wykreślonych w pkt.2

krzywych. Miejsca przecięcia tych stycznych z osią x określają dokładną temperaturę Curie danego rdzenia.

4. Oszacować błędy pomiarowe.

*Uwaga: wszystkie temperatury podajemy w kelwinach [K]*

### **Literatura:**

- [1] A.Sukiennicki, A.Zagórski „Fizyka ciała stałego”(seria Podręczniki akademickie), Wyd. Nauk. Techn., Warszawa 1984
- [2] J.Kociński L. Wojtczak „Zjawiska krytyczne” (skrypt), Wyd. UŁ, Łódź 1978
- [3] Encyklopedia fizyki współczesnej, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983
- [4] C. Kittel, „Wstęp do fizyki ciała stałego”, PWN, Warszawa 1976
- [5] A. Sukiennicki, „Fizyka magnetyków”, Politechnika Warszawska, Warszawa 1982