

Badanie właściwości magnetyczne ciał stałych

I. Wprowadzenie teoretyczne

1. Źródła pola magnetycznego

W ogólnym przypadku źródłami pola magnetycznego są poruszające się ładunki – mogą to być nie tylko pojedyncze cząstki, ale także naładowane ciała i przewodniki z prądem.

Wielkością mikroskopową charakteryzującą źródło pola magnetycznego pod względem ilościowym jest **moment magnetyczny**. Jest to wielkość wektorowa, której sposób wyznaczenia zależy od rodzaju źródła pola magnetycznego. Na przykład, dla ramki wykonanej z drutu, w którym płynie prąd o natężeniu I , i zamykającej powierzchnię A moment magnetyczny ma wartość:

$$\vec{\mu} = IA\vec{n}$$

gdzie:

\vec{n} - wektor normalny do powierzchni A .

Ponieważ elektron poruszający się po orbicie w atomie jest równoważny obwodowi zamkniętemu z prądem, możemy napisać, jest on również źródłem pola magnetycznego o momencie magnetycznym:

$$\vec{\mu}_e = e v A \vec{n}$$

gdzie:

e - ładunek elementarny elektronu,

v - ładunek elementarny elektronu,

A - powierzchnia orbity,

\vec{n} - wektor normalny do powierzchni orbity.

Moment magnetyczny jest wielkością wektorową i podlega wszelkim regułom rachunku wektorowego – momenty magnetyczne pochodzące od różnych źródeł mogą się sumować, a więc w szczególnych przypadkach także znosić. Opisując badaną próbkę na poziomie

makroskopowym podaje się zazwyczaj inną wielkość wektorową zwaną **magnetyzacją** lub **namagnesowaniem**:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{\mu}_i$$

gdzie:

ΔV - objętość elementu, w którym sumowane są poszczególne momenty magnetyczne,

n - liczba sumowanych momentów magnetycznych,

$\vec{\mu}_i$ - elementarny moment magnetyczny (cząsteczki, atomu, itp.).

2. Siła Lorentza – wektory indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego

Badając pole magnetyczne odkryto, że na cząstki naładowane poruszające się w tym polu działa siła, którą nazwano **siłą Lorentza**. Siła ta jest zawsze prostopadła do wektora prędkości cząstki, w wyniku czego nie może ona zmienić energii cząstki, ale zakrzywia jej tor ruchu. Siła ta jest również skierowana prostopadle do linii pola magnetycznego.

Szczegółowe badania wykazały, że stosunek siły do ładunku jest równy iloczynowi wektorowemu prędkości cząstki i pewnego wektora \vec{B} , charakterystycznego dla badanego pola, który nazwano **wektorem indukcji magnetycznej**:

$$\frac{\vec{F}}{q} = \vec{v} \times \vec{B}$$

Jednostką wektora indukcji magnetycznej jest tesla [$1 \text{ T} = \text{N} / (\text{C} \cdot \text{m/s})$].

Wektor indukcji magnetycznej jest wielkością zależną od magnetycznych ośrodka i związany jest z **wektorem natężenia pola magnetycznego** następującą relacją:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

gdzie:

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni,

μ_r - względna przenikalność magnetyczna ośrodka.

Pomiędzy dwoma wprowadzonymi tutaj wektorami a wspomnianym już wcześniej wektorem namagnesowania zachodzi następująca relacja:

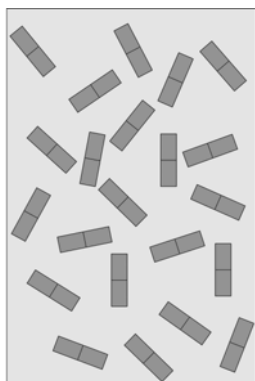
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J}$$

3. *Klasyfikacja substancji ze względu na właściwości magnetyczne*

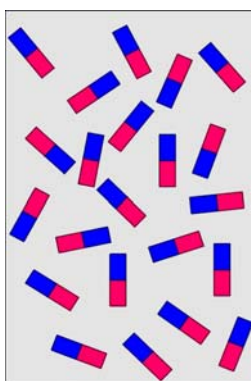
Ze względu na właściwości magnetyczne substancje występujące w przyrodzie można podzielić na trzy podstawowe kategorie: diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki.

Diamagnetyki są substancjami zbudowanymi z atomów pierwiastków nie posiadających własnego momentu magnetycznego. Właściwość ta jest skutkiem znoszenia się pól magnetycznych pochodzących od poszczególnych elektronów na orbitach (powłokach) atomowych tych pierwiastków. W wyniku tego atomy diamagnetyka nie oddziałują pomiędzy sobą. Dopiero przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego powoduje powstanie efektywnych momentów magnetycznych atomów diamagnetyka.

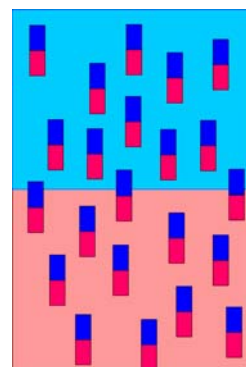
Substancje paramagnetyczne zbudowane są z atomów posiadających własne momenty magnetyczne. Jednak ich kierunki, na skutek wzbudzeń temperaturowych są całkowicie przypadkowe i zmienne w czasie. W wyniku tego w paramagnetyku przy braku zewnętrznego pola nie obserwuje się globalnego uporządkowania. Obniżenie temperatury lub przyłożenie odpowiednio silnego pola zewnętrznego umożliwia uporządkowanie się układu, czyli przejście próbki do fazy ferromagnetycznej.



Diamagnetyk



Paramagnetyk



Ferromagnetyk

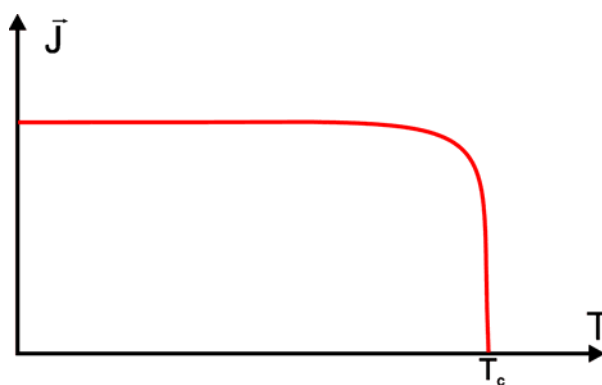
$\vec{J} = 0$	$\vec{J} = 0$	$\vec{J} \neq 0$
$\bar{\mu}_e = 0$	$\bar{\mu}_e \neq 0$	$\bar{\mu}_e \neq 0$

Rysunek 1. Podstawowa klasyfikacja układów magnetycznych

Z fizycznego punktu widzenia szczególnie interesującymi układami są ferromagnetyki. Tak jak paramagnetyki, są to substancje zbudowane z atomów o niezerowych momentach magnetycznych zwanych w uproszczeniu spinami (S). Właściwości ferromagnetyczne (w temperaturach poniżej 1000 K) wykazują, między innymi, takie pierwiastki jak żelazo, kobalt i nikiel. Charakterystyczną właściwością ferromagnetyków jest istnienie wewnętrznego pola magnetycznego porządkującego spiny. Zjawisko to objawia się w postaci niezerowego namagnesowania próbek ferromagnetyka. Z pierwszych oszacowań przeprowadzonych na początku XX wieku przez P. Weissa wynikało, że wewnętrzne pole magnetyczne porządkujące spiny i wywołujące potwierdzone pomiarami namagnesowanie musi mieć olbrzymią wartość rzędu 10^7 Oe. Obecności tak silnego pola nie potrafiono wyjaśnić na gruncie fizyki klasycznej. Zrobił to dopiero po kilkunastu latach W. Heisenberg, który zaproponował model uwzględniający założenia mechaniki kwantowej.

4. Temperatura Curie

Tak jak już zostało wspomniane, istnienie fazy ferromagnetycznej zależy nie tylko od oddziaływań wymiennych, ale także od temperatury. Fluktuacje termiczne mają bowiem destrukcyjny wpływ na uporządkowaną strukturę ferromagnetyka. W odpowiednio wysokiej temperaturze krytycznej (np. dla żelaza $T_c=1043\text{K}$), zwanej temperaturą Curie, fluktuacje stają się na tyle silne, że oddziaływania wymienne nie są już w stanie utrzymać uporządkowania układu, globalne namagnesowanie próbki zanika, a układ przechodzi do fazy paramagnetycznej. Należy podkreślić, że temperatura nie niszczy atomowych momentów magnetycznych, ale ich wzajemne uporządkowanie – drgania spinów w czasie stają się całkowicie przypadkowe. Przejście układu ze stanu ferromagnetycznego do paramagnetycznego jest przejściem fazowym drugiego rodzaju.



Rysunek 2. Przejście z fazy ferro- do paramagnetycznej

5. Prawo Curie-Weissa, podatność magnetyczna

Wielkością charakteryzującą reakcję próbki paramagnetyka na obecność pola magnetycznego nazywamy podatnością:

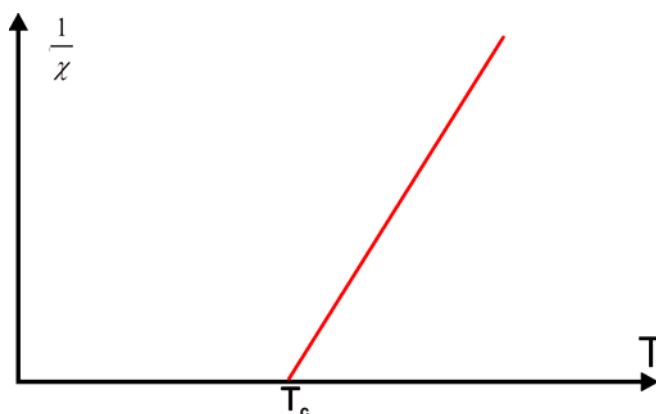
$$\chi = \frac{J}{H}$$

gdzie:

J - wartość wektora namagnesowania próbki,

H - wartość wektora natężenia pola magnetycznego wywołującego to namagnesowanie.

Zależność odwrotności podatności od temperatury po raz pierwszy wyznaczył P. Curie. Jej przebieg pokazany jest na rysunku 3.

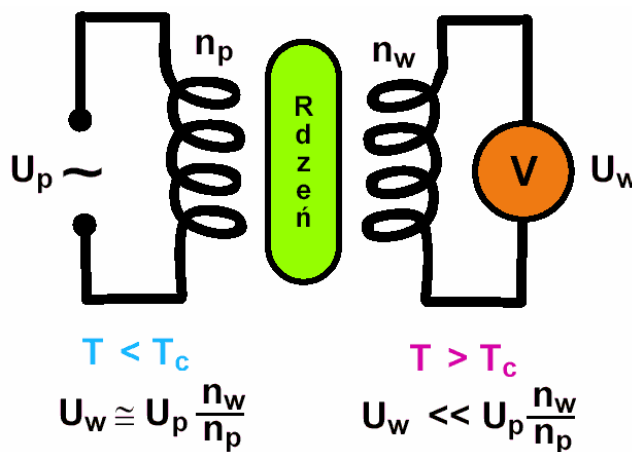


Rysunek 3. Zależność odwrotności podatności od temperatury (prawo Curie-Weissa)

Poniżej temperatury krytycznej podatność rośnie do nieskończoności i układ porządkuje się spontanicznie (przechodzi do fazy ferromagnetycznej) nawet przy braku zewnętrznego pola magnetycznego.

6. Zasada działania transformatora

W ogólnym przypadku transformator jest urządzeniem do przenoszenia energii prądu zmiennego z jednego obwodu elektrycznego do drugiego, w którym wykorzystuje się zjawisko indukcji elektromagnetycznej. W celu uzyskania optymalnego sprzężenia pomiędzy obwodami (uzwojeniami) w transformatorach stosuje się rdzenie ferrytowe lub stalowe.



Rysunek 4. Schemat transformatora.

W temperaturze niższej od temperatury Curie pole magnetyczne pochodzące od uzwojenia pierwotnego transformatora powoduje uporządkowanie domen magnetycznych w rdzeniu, dzięki czemu istnieje silne sprzężenie pomiędzy uzwojeniami transformatora i w uzwojeniu wtórnym indukowane jest napięcie proporcjonalne do napięcia w uzwojeniu pierwotnym i stosunku liczby zwojów w obu uzwojeniach (tzw. przekładni).

Podgrzanie rdzenia transformatora powyżej temperatury Curie powoduje zniszczenie uporządkowania domen magnetycznych i sprzężenie pomiędzy zwojami maleje, czego potwierdzeniem jest spadek napięcia na uzwojeniu wtórnym transformatora. W ten sposób, badając zależność napięcia na uzwojeniu wtórnym od temperatury rdzenia można wyznaczyć temperaturę Curie.

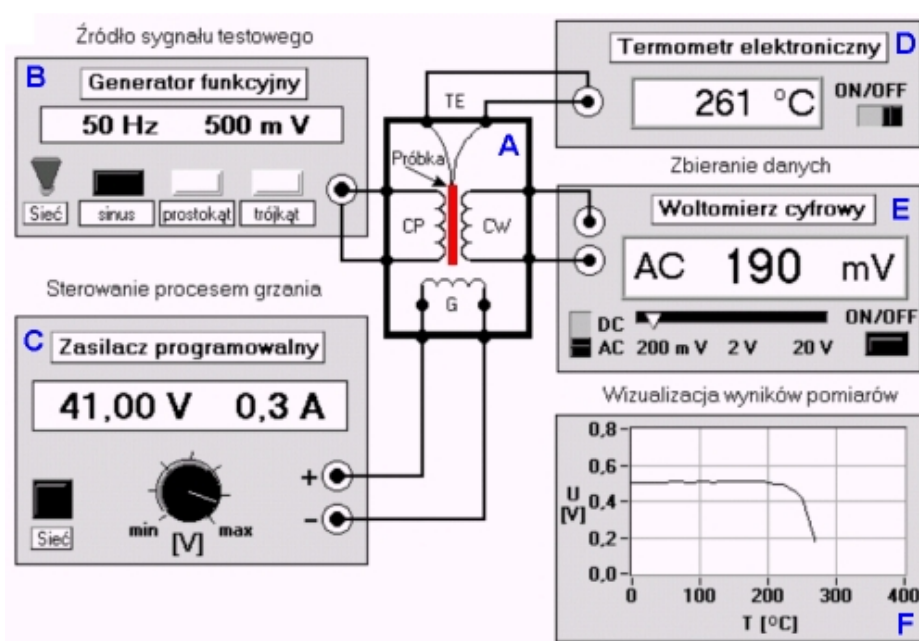
II. Opis aparatury pomiarowej

Wykorzystywana w eksperymencie aparatura jest przedstawiona na rysunku 5.

Podstawowym elementem układu pomiarowego jest cewka zaznaczona na rysunku jako A. Składa się ona z uzwojenia pierwotnego CP, uzwojenia wtórnego CW oraz rdzenia-próbki z badanego materiału ferromagnetycznego. Temperaturę próbki można zmieniać dzięki grzałce

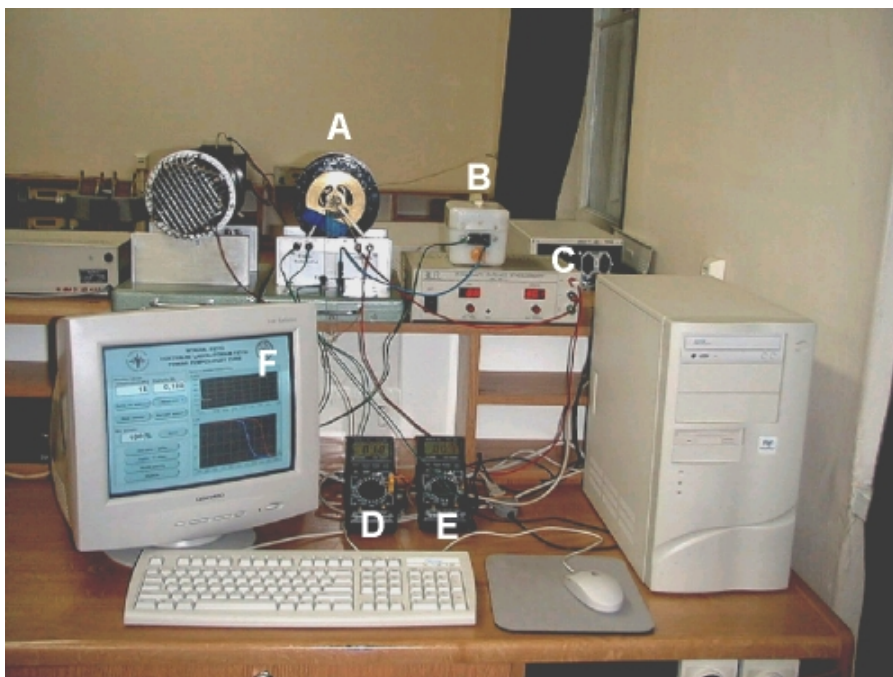
G umieszczonej wewnątrz cewki. Grzałka ta jest zasilana z programowalnego zasilacza C. Zmiany temperatury zostaną zarejestrowane przez termometr elektroniczny D.

Zasada pomiaru jest następująca: Generator B wytwarza na uzwojeniu pierwotnym cewki napięcie zmienne o amplitudzie około 0,5 V. Powoduje to zaindukowanie w uzwojeniu wtórnym napięcia zmiennego o amplitudzie proporcjonalnej do przenikalności magnetycznej rdzenia-próbki. Napięcie to jest mierzone przez woltomierz cyfrowy E. Badając wartość mierzonego napięcia można zaobserwować jak zmieniają się własności magnetyczne rdzenia w funkcji temperatury, a także wyznaczyć punkt przejścia fazowego ferromagnetyk – paramagnetyk, co jest jednym z głównych celów opisywanego ćwiczenia.



Rysunek 5. Schemat układu pomiarowego.

Całość procesu pomiarowego jest koordynowana przez komputer F wyposażony w odpowiednie oprogramowanie. Pozwala ono zarówno na sterowanie eksperymentem, akwizycję danych o temperaturze i indukowanym napięciu jak i na wizualizację otrzymanych wyników. Fotografia całego układu pomiarowego jest przedstawiona na rysunku 6.

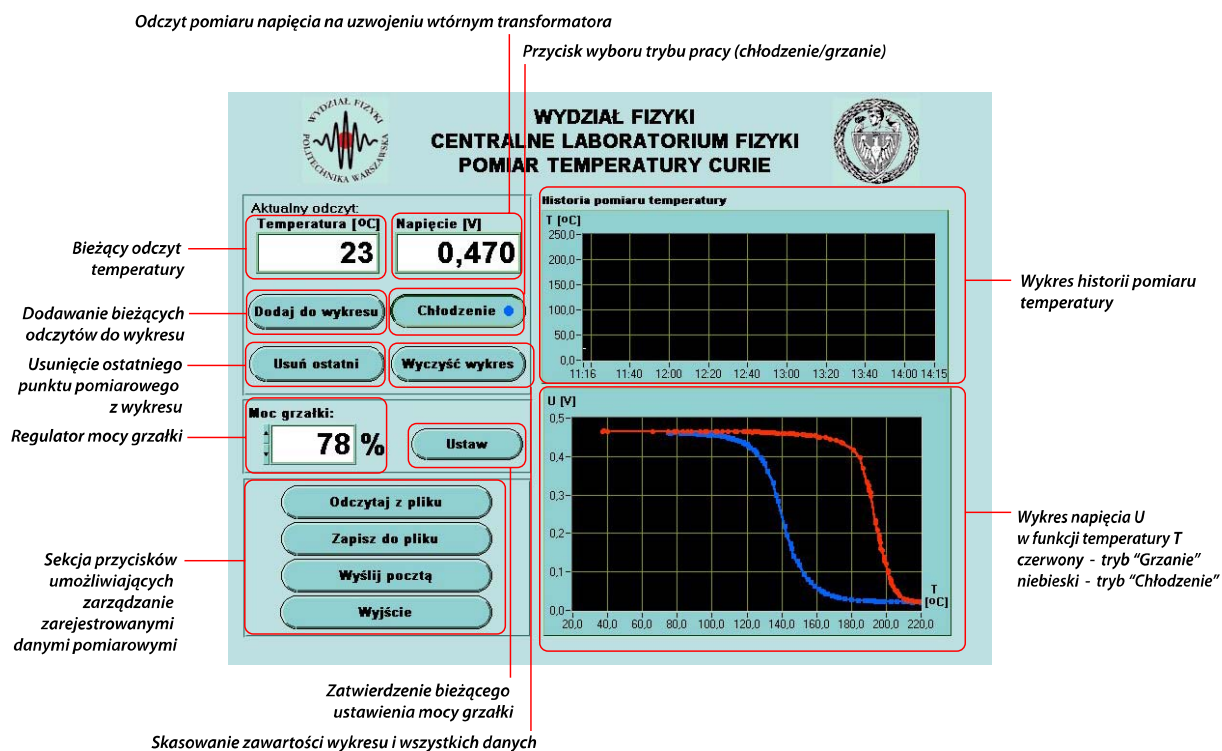


Rysunek 6. Widok ogólny układu pomiarowego.

Szczegółowy opis poszczególnych elementów sterujących w oknie programu znajduje się na rysunku 7.

Program do wyznaczania temperatury Curie

Opis okna programu



Rysunek 7. Opis poszczególnych elementów okna programu.

III. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie temperatury Curie rdzenia ferromagnetycznego w transformatorze. Metody wyznaczania należy uzgodnić z prowadzącym.

IV. Literatura pomocnicza

1. W. Bogusz, J. Garbarczyk, F. Krok, „Podstawy Fizyki”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997
2. Sawieliew I.W., Kurs fizyki t. 2 „Elektryczność, magnetyzm, fale, optyka”, PWN Warszawa 1989 r rozdz. VII Pole magnetyczne w materii.