

Pomiar pętli histerezy i temperatury Curie ferromagnetyka


Cel ćwiczenia

Pomiar pętli histerezy i temperatury Curie ferromagnetyka w postaci pierścienia ferrytowego.

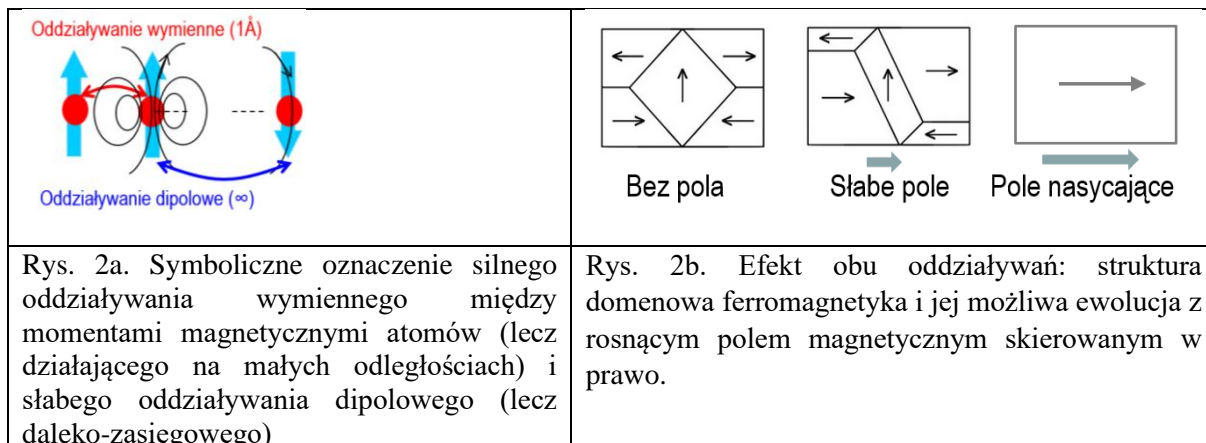
Wprowadzenie

Pomiar magnetycznej pętli histerezy B vs. H jest kluczowy dla rozumienia magnetyzmu, a samo zjawisko jest powszechnie obecne we współczesnej technice, w szczególności w działaniu transformatorów i silników elektrycznych. W ćwiczeniu mierzy się dynamiczną pętlę histerezy w pierścieniu ferrytowym (Rys. 1a), t.j. materiał przemagnesowuje się prądem o częstości do 9000 Hz. Dynamiczna pętla histerezy ma ważne zastosowania w przemyśle, ponieważ rdzenie silników i transformatorów działają właśnie przy zmiennych prądach.

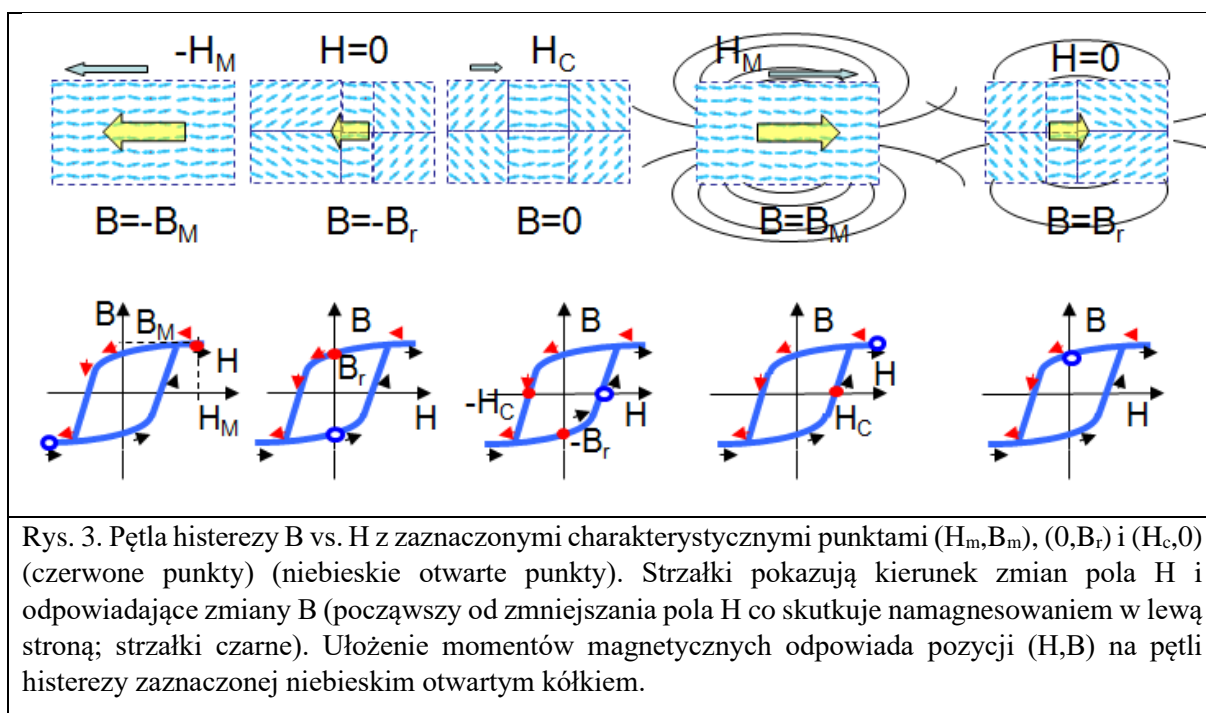
W ćwiczeniu mierzy się również temperaturę Curie T_C przemiany fazowej ferromagnetyk-paramagnetyk, co poza zjawiskiem ważnym w magnetyzmie, stanowi obserwację dodatkowej przemiany fazowej w stosunku do na co dzień obserwowanych przemian para-ciecz, czy też ciało stałe-ciecz.

| | |
|---|---|
|  |  |
| <p>Rys. 1a. Przykładowy rdzeń pierścieniowy mierzony w ćwiczeniu. Prąd w obwodzie z wyłącznikiem S daje pole magnesujące H, drugi obwód mierzy pole B wytworzone przez rdzeń.</p> | <p>Rys. 1b. Cewka nawinięta na materiał magnetyczny, której B vs. H pokazano przykładowo na Rys. 2.</p> |

Ferromagnetyk jest materiałem w którym atomy mają momenty magnetyczne, które starają się ustawić równoległe do siebie dzięki silnemu „oddziaływaniu wymiennemu” (OW) działającemu na bliskich odległościach (rzędu odległości między atomami; na Rys. 2a symbolicznie oznaczono „ 1\AA ”), czemu przeciwstawia się słabsze, lecz dalekozasięgowe „oddziaływanie dipolowe” (OD), Rys. 2a. (**Footnote: Oczywiście oba z tych „oddziaływań” są różnymi przejawami oddziaływania elektromagnetycznego. Jednak w przypadku OW podstawowym czynnikiem jest zakaz Pauliego, natomiast OD jest efektem wykorzystywanym w kompasie: moment magnetyczny ustawia się równoległe do pola magnetycznego i ten efekt co prawda słabnie z odległością, to, podobnie jak oddziaływanie elektromagnetyczne, ma zasięg nieskończony)



Efektom współzawodnictwa obu oddziaływań jest „struktura domenowa” (Rys. 2b): na bliskich odległościach „zwycięża” OW, a na większych OD. Przyłożenie zewnętrznego pola magnetycznego pokonuje słabsze OD w wyniku czego wszystkie momenty stopniowo ustawiają się równoległe (do zewnętrznego pola, co jednak zależy także od tzw. anizotropii magnetycznej, czego nie będziemy omawiać) i domeny magnetyczne zanikają, a taki materiał staje się magnesem, choć tylko w obecności pola. Pokazano to na Rys. 2b.



Jak każdy materiał magnetyczny, tak i ten można opisać podając jego namagnesowanie M , tj. moment magnetyczny jednostki objętości. Całkowity moment magnetyczny \vec{m} takiego namagnesowanego materiału jest całką z namagnesowania po objętości materiału, tj.

$$\vec{m} = \int_V \vec{M} dV \quad (1)$$

Również, jak każdy namagnesowany materiał, tak i ten jest źródłem pola magnetycznego, które wraz z polem zewnętrznym, wytwarza całkowite pole magnetyczne B ; symbolicznie, w postaci linii pola dla dwóch struktur domen, przedstawia to Rys. 3.

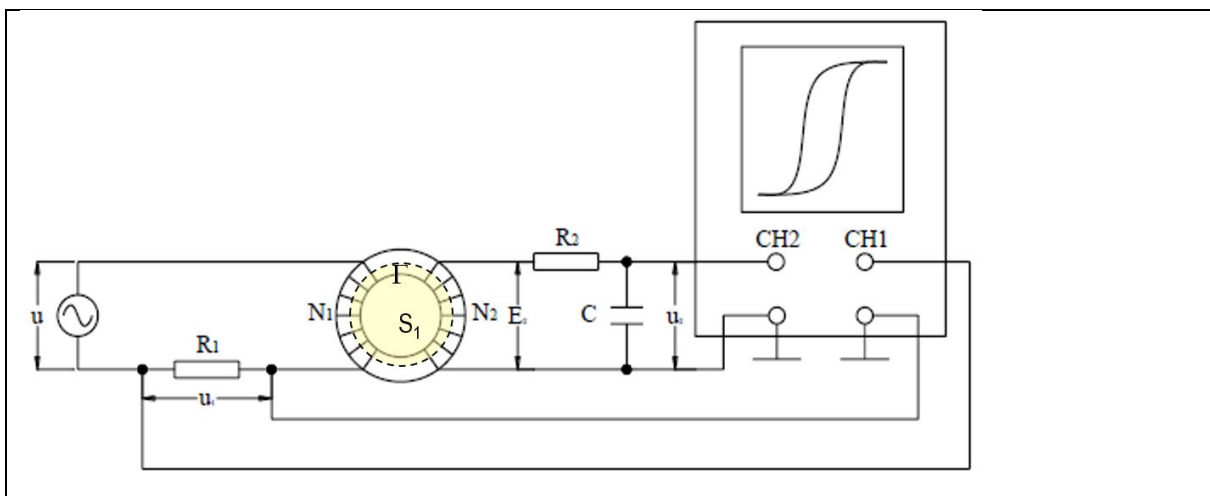
Zwykle stara się oddzielić pole zewnętrzne od pola całkowitego i choć nie zawsze można to zrobić dokładnie, definiuje się „natężenie pola magnetycznego H ” równaniem:

$$H = B/\mu_0 - M \quad (2)$$

Przy takiej definicji można w przybliżony sposób powiedzieć, że „pole H ” jest tą częścią pola magnetycznego B , która nie zależy od magnetyzmu samego magnesowanego materiału, a tylko od pola zewnętrznego. W przypadku cewki nawiniętej na pierścieniu, jak w obecnym ćwiczeniu, jest to bardzo dobre przybliżenie.

Przy takim rozumieniu pola H charakterystykę magnesowania materiału zewnętrznym polem magnetycznym przedstawia się w postaci pętli histerezy B vs. H (lub M vs. H , co daje podobny przebieg, jeśli pole H jest małe, jak w ćwiczeniu). To właśnie przedstawiono na schematycznym Rys. 3 i wyznaczanie pętli histerezy B vs. H jest jednym z celów ćwiczenia.

Należy pamiętać o tym, że OW tylko wtedy porządkuje momenty magnetyczne (w ramach domen), gdy jest silniejsze niż chaos spowodowany wysoką temperaturą. Temperatura, powyżej której siła oddziaływań wymiennych „przegrywa” z innymi oddziaływaniami destabilizującymi równoległe uporządkowanie (czyli z „chaosem cieplnym”) nazywa się temperaturą Curie, T_C , i jest charakterystyczną wielkością dla każdego ferromagnetyka. Wyznaczenie T_C ferrytu jest drugim celem ćwiczenia.



Rys. 4. Układ do pomiaru pętli histerezy B vs. H pierścienia ferrytowego. N_1 ($=10$) i N_2 ($=10$) to liczby zwojów cewek, odpowiednio, magnesujących i odczytujących pole magnetyczne rdzenia, u , u_1 i u_2 , to napięcia, odpowiednio, zasilające cewkę N_1 (zmienne, o częstotliwości 7500-9500Hz, regulowane pokrętelem), odczytujące prąd magnesujący przez spadek napięcia na oporniku R_1 ($=2\Omega$) i napięcie indukowane w cewce u_2 . Napięcia u_1 i u_2 podaje się na wejścia X i Y oscyloskopu i wykorzystuje się do obliczeń pól H i B . Zaznaczono też wykorzystywane w obliczeniach poniżej kontur Γ i powierzchnię S_1 .

Wykorzystywany w ćwiczeniu układ pomiarowy przedstawiono na Rys. 4. W celu wyznaczenia pętli histerezy mierzy się napięcia u_1 i u_2 następnie przeliczając je na wartości pól H i B .

Prawo Ampera zapisane dla pola H

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (3)$$

(Γ to kontur całkowania, w tym przypadku po wnętrzu rdzenia, I, to prąd w cewce N_1) pozwala na przedstawienie przybliżonej zależności H od u_1 :

$$H = \frac{N_1 \cdot u_1}{l \cdot R_1}, \quad (4)$$

gdzie l jest średnim obwodem rdzenia (=13.8 mm) w miejscu Γ . Założono tu, że H jest takie same w całym rdzeniu, a, zgodnie z prawem Ampera, prąd magnesujący przebijający powierzchnię S_1 z Rys. 4 wynosi $N_1 \cdot I_1 = N_1 \cdot u_1 / R_1$.

Zgodnie z prawem indukcji Faradaya, w cewce N_2 indukuje się siła elektromotoryczna

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\varphi_B}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (5)$$

która powoduje pojawienie się prądu zmiennego i_2 . Pełne równanie takiego obwodu ma postać:

$$\varepsilon_2 = L \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + \frac{Q}{C}, \quad (6)$$

gdzie Q jest ładunkiem na kondensatorze C dostarczanym przez prąd I_2 , tj.:

$$I_2 = \frac{dQ}{dt}, \quad (7)$$

Biorąc pod uwagę, że zwojów cewki N_2 nie jest zbyt wiele (czyli też jej indukcyjność jest niewielka) i prąd I_2 jest niewielki, indukowaną siłą elektromotoryczną $L dI_2/dt$ można pominąć, co oznacza, że równanie obwodu przyjmuje postać:

$$\varepsilon_2 = R_2 I_2 + \frac{Q}{C}. \quad (8)$$

Ponieważ R_2 i C są duże, dlatego $Q/C \ll R_2 I_2$ i ostatecznie prąd I_2 w obwodzie jest proporcjonalny to indukowanej w cewce N_2 siły elektromotorycznej ε_2 :

$$\varepsilon_2 = R_2 I_2 \Rightarrow I_2 = \varepsilon_2 / R_2 \quad (9)$$

Napięcie U_2 na kondensatorze C, mierzone oscyloskopem, wynosi:

$$U_2 = Q/C, \quad (10)$$

gdzie Q można otrzymać całkując prąd z równania 7. W rezultacie:

$$U_2 = \frac{1}{C} \int_T I_2 dt = \frac{N_2 S}{C R_2} \int_T \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 S}{C R_2} B, \quad (7)$$

co oznacza, że mierzone napięcie U_2 jest miarą pola B wytwarzanego w magnesowanym rdzeniu ferrytowym.

Pomiar napięć U_1 , U_2 , wyznaczenie na ich podstawie H i B, a także pomiar T_C , jest podstawą wykonania ćwiczenia.