

T6

Anomalny efekt Halla w materiale dla spintroniki

Celem wykonywanych pomiarów jest zbadanie własności półprzewodnika półmagnetycznego (Ga,Mn)As, wyznaczenie temperatury Curie oraz pola koercji. (Ga,Mn)As to GaAs domieszkowany manganem Mn ($[Ar]3d^5 4s^2$), który ma wypadkowy moment magnetyczny. Dzięki obecności nośników, w niskich temperaturach, atomy manganu sprzęgają się ferromagnetycznie, co pozwala otrzymać niezwykle ciekawy materiał, łączący w sobie cechy półprzewodnika i ferromagnetyka.

W ćwiczeniu wyznacza się temperaturę przejścia z fazy paramagnetycznej do fazy ferromagnetycznej i bada się jej własności.

1. Co należy wiedzieć przed przystąpieniem do ćwiczenia?

Ogólne własności półprzewodników, elementy magnetyzmu, w szczególności:

- budowa i struktura elektronowa półprzewodników (struktura pasmowa $E(\mathbf{k})$, elektrony, dziury, masa efektywna, domieszkowanie)
- transport elektryczny (przewodnictwo, ruchliwość, fonony, rozpraszanie, średnia droga swobodna)
- namagnesowanie, paramagnetyzm, ferromagnetyzm (namagnesowanie w zależności od pola magnetycznego, od temperatury, pole koercji, namagnesowanie nasycenia)

Metoda pomiarowa

- efekt Halla w obecności jednego rodzaju nośników prądu
- wyznaczanie współczynnika Halla i przewodnictwa elektrycznego - sposób eliminacji zjawisk pasożytniczych jak asymetria w próbce czy efekty termoelektryczne
- anomalny efekt Halla

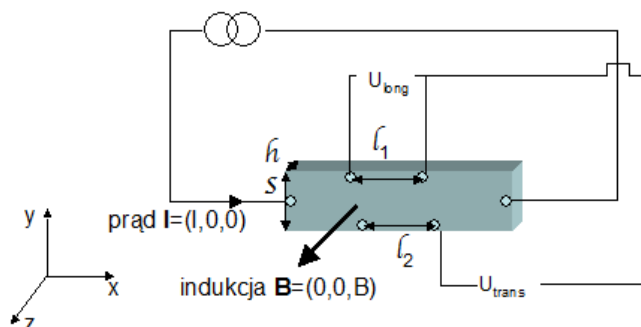
Anomalny efekt Halla w pigułce

Jeżeli w próbce znajdują się elektrony o koncentracji n i ruchliwości μ , to przewodnictwo właściwe materiału (σ) dane jest przez: $\sigma = en\mu$ (1.1)

gdzie: e – ładunek elementarny ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C). Opór właściwy jest odwrotnością przewodnictwa: $\rho = 1/\sigma$.

Przyłożenie pola elektrycznego E spowoduje przepływ prądu o gęstości $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$, (1.2)

gdzie $\mathbf{j} = I / sh$ (patrz rysunek 1). Gęstość prądu zależy od koncentracji nośników (n) i od ich prędkości w sposób następujący: $\mathbf{j} = n q \mathbf{V}$ (1.3)



Rys. 1. Przewodząca próbka w polu magnetycznym.

Jeżeli próbkę wstawimy w pole magnetyczne prostopadłe do kierunku prądu, na poruszające się nośniki działa siła Lorentza, proporcjonalna do ich prędkości $\mathbf{V}$ i do indukcji pola magnetycznego $\mathbf{B}$ ($\mathbf{F}_L = q(\mathbf{V} \times \mathbf{B}) = |j| \cdot |B| / n (0, 1, 0)$). Ponieważ przepływ prądu może odbywać się tylko wzdłuż próbki (kierunek X na rys. 1.), w stanie ustalonym w próbce powstanie poprzeczne pole elektryczne $\mathbf{E}_p$ (kierunek Y na rys. 1.), takie by wypadkowa siła w kierunku poprzecznym była równa zero ($\mathbf{E}_p = -\mathbf{F}_L/q$).

Napięcie mierzone w poprzek próbki wynosi: $U_H = E_p \cdot s = j B s / q n = U_H = R_H B I / h$. (1.4)

Współczynnik $R_H = (1/(qn))$ nazywamy stałą Halla. W przypadku przewodnictwa jednośnikowego R_H jest dodatnia dla dziur, ujemna dla elektronów. W ogólności U_H zależy od pola magnetycznego w sposób bardziej skomplikowany (nieliniowy).

Dla próbek z wypadkowym momentem magnetycznym M wartość indukcji pola magnetycznego jaką „widzi” elektron wynosi: $B = \mu_0 \cdot (H+M) = B_0 + \mu_0 M$. Zatem siła Lorentza będzie pochodziła również od namagnesowania. Prowadzi to do pojawienia się dodatkowego (tzw. anomalnego) składnika w napięciu hallowskim:

$$\frac{U_H}{I} = \frac{R_H B_0}{h} + \frac{R_s \mu_0 M}{h} \quad (1.5)$$

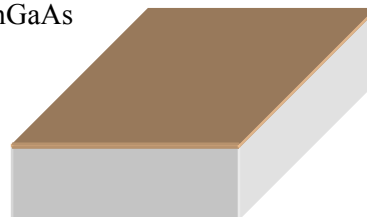
gdzie R_H to zwykła stała Halla, R_s – anomalny współczynnik Halla. Anomalna stała Halla jest proporcjonalna do oporności, tj. $R_s \sim \rho_{xx}^\alpha$, gdzie α zależy od mechanizmów rozpraszania i $\alpha \in (1,2)$.

2. Badana próbka

Cienka warstwa $Ga_{1-x}Mn_xAs$ została wyhodowana na półizolacyjnym InGaAs przez dr hab. Janusza Sadowskiego (MAX-Lab, Lund University)

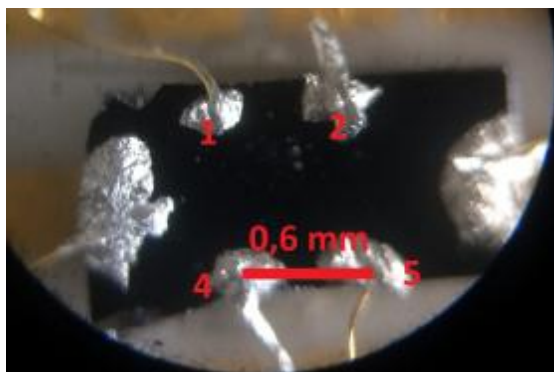
Zawartość Mn (x) to 6%.

Grubość warstwy (h) wynosi 100 Å



Rys. 2. Szkic próbki z cienką warstwą półprzewodnika GaMnAs

Na próbce nałożono kontakty z czystego indu, następnie wygrzano je przez 2' w 180°C.



Rys. 3. Zdjęcie próbki (© K.Budzik). Jak widać, odległości między kontaktami są tego samego rzędu, co rozmiar kontaktów. Wobec tego niepewność wyznaczenia odległości pomiędzy nimi jest znaczna.

3. Przebieg ćwiczenia

Pomiar transportu elektronowego w funkcji pola magnetycznego w temperaturze pokojowej i temperaturze ciekłego azotu:

- 1) Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej (I-V) próbki w temperaturze pokojowej i w 77K; **UWAGA!!! Przez próbkę nie wolno puścić większego prądu niż 0.1 mA.**
- 2) Pomiar dwóch napięć: podłużnego i poprzecznego w zależności od temperatury dla dwóch wartości pola $B \approx \pm 50\text{mT}$. Temperaturę mierzymy termoparą. Kalibracja termopary znajduje się na końcu instrukcji.
- 3) Pomiary napięć: poprzecznego i podłużnego w funkcji pola magnetycznego w dwóch temperaturach. Napięcia mierzymy dla dwóch par kontaktów. Każde z nich mierzymy dla dwóch zwrotów prądu (+I i -I) i pola (+B i -B), przy czym ze względu na obecność ferromagnetycznych nabiegunników w elektromagnesie, należy to zrobić w następującej sekwencji pola magnetycznego: $I_B = 0 \rightarrow I_B = +\text{max} \rightarrow I_B = -\text{max} \rightarrow I_B = +\text{max} \rightarrow I_B = 0$.

4. Analiza danych.

1. **Charakterystyki I(V).** Sprawdzić prawo Ohma, wyznaczyć opór dopasowując prostą $U=aI+b$; skomentować wynik; oszacować (a nie wyznaczyć – ze względu na znaczne niepewności) wartość oporności i sprawdzić, czy są dobrego rzędu.
2. **Zależność $U_{\text{long}}(T)$** (napięcia podłużnego od temperatury). Porównać wyniki dla różnych kierunków prądu dla tej samej pary sond. Skomentować. Porównać wyniki dla różnych par kontaktów. Skomentować.
Wyznaczyć temperaturę Curie (T_c) na podstawie U_{long} . Zgodnie z pracą¹ T_c występuje w temperaturze, dla której pochodna oporności po temperaturze dp/dT ma maksimum. Z dobrym przybliżeniem to maksimum odpowiada maksimum $d U_{\text{long}}/dT$. Oszacować niepewność T_c .
3. **Zależność $U_{\text{transverse}}(T)$** (napięcia poprzecznego od temperatury). Porównać wyniki dla różnych kierunków prądu dla tej samej pary sond. Skomentować. Porównać wyniki dla różnych par kontaktów. Skomentować. Porównać wyniki dla różnych zwrotów pola. Skomentować.
4. Napięcie poprzeczne $U_{\text{transverse}} \sim M$. Zależność namagnesowania od temperatury jest zależnością krytyczną $M \sim (T_c - T)^\beta$, gdzie β jest wykładnikiem krytycznym. W zależności od natury oddziaływania ferromagnetycznego wartość β może przyjmować różne wartości²:

β	model
$\frac{1}{2}$	pola średniego
$\frac{1}{3}$	Heisenberga
$\frac{1}{8}$	Isinga

Należy ustalić wykładnik krytyczny i wyznaczyć temperaturę Curie (oczywiście niepewność też). Wartość T_c porównać z tą z pkt.2.

5. **Zależność $U_{\text{transverse}}(B_0)$.** Należy określić pole koercji dla warstwy GaMnAs.

5. Przygotowanie opisu

Opis powinien składać się z następujących części:

1. Streszczenia (także w języku angielskim)
2. Wstępu teoretycznego (krótko, najważniejsze informacje o półprzewodnikach półmagnetycznych)
3. Opisu metody pomiarowej, układu pomiarowego i próbki
4. Wyników i ich analizy (wyniki dobrze jest komentować)
5. Podsumowania zawierającego wnioski

Przygotowując opis, należy pamiętać o numeracji wzorów (1) i rysunków (patrz Rys. 1.). Przy korzystaniu z materiałów (teksty, rysunki, programy) pochodzących od innych autorów należy w tekście umieścić odnośnik ([1]), a na końcu podać spis cytowanych źródeł (autor, tytuł, adres strony itp.). Terminy oddania zgodnie z regulaminem.

6. Literatura

Ciało Stałe:

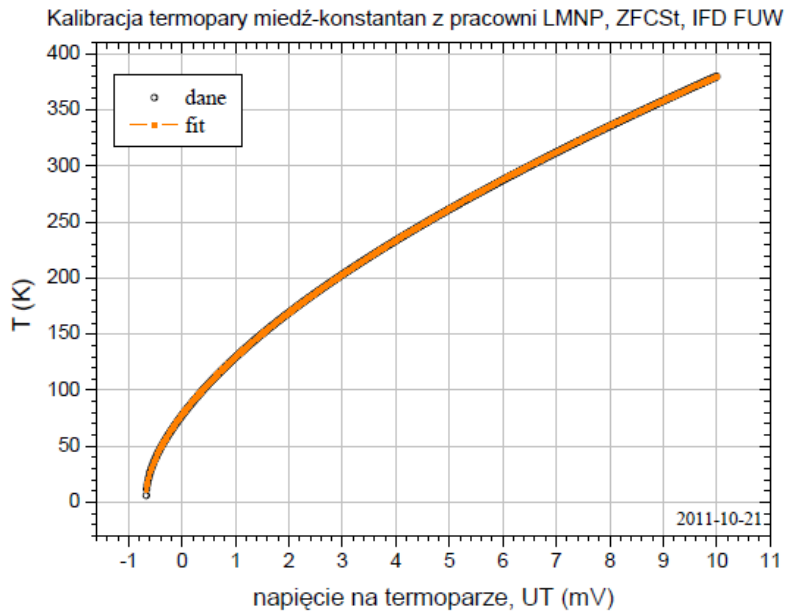
1. T. Stacewicz, A. Witowski, J. Ginter, Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego, Rozdz. XV, XVII Wydawnictwa UW, 2002
 2. R. A. Smith, Półprzewodniki, PWN, 1966
 3. H. Ibach, H. Lüth, Fizyka ciała stałego, PWN, 1996
 4. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, 1999-2012
 5. J. Singleton, Band Theory And Electronic Properties Of Solids, Oxford University Press
- ##### Efekt Halla i anomalny efekt Halla
6. Naoto Nagaosa et al., Anomalous Hall effect, Reviews of Modern Physics 82, 1539 (2010)
 7. W. Giriat, J. Rauluszkiewicz, Hallotrony, PWN, 1962

¹ M. Wang, R. A. Marshall, K. W. Edmonds, A. W. Rushforth, R. P. Champion, and B. L. Gallagher, Appl. Phys. Lett. **104**, 132406 (2014).

² S. J. Blundell, "Magnetism in Condensed Matter", Oxford University Press, 2007

8. H. Ohno, Science **281**, 951 (1998) →

<https://poggiolab.unibas.ch/full/Nanooptics/1998OhnoScienceMagSemReview.pdf>



Krzywa kalibracyjna dana jest przez:

$$y = P_0 + P_3(x-a)^{0.1} + P_2(x-a)^{0.3} + P_1(x-a)^{0.5} + P_4(x-a)^{0.7};$$

$$a = -0.67, P_0 = 9.97, P_1 = 72.47, P_2 = -14.16, P_3 = -2.8, P_4 = 31.5$$

gdzie y jest temperaturą wyrażoną w K, x jest napięciem na termoparze w mV.