

XLV OLIMPIADA FIZYCZNA ETAP WSTĘPNY

Zadanie doświadczalne

ZADANIE D2

Nazwa zadania: „Zjawisko Halla”

Gęstość prądu; w półprzewodniku zależy od koncentracji nośników swobodnych n i od ich prędkości unoszenia v_u

$$j = qn v_u$$

gdzie q oznacza ładunek nośnika prądu.

Dla większości półprzewodników prędkość unoszenia nośników prądu v_u jest wprost proporcjonalna do wartości natężenia przyłożonego pola elektrycznego E

$$v_u = \mu E$$

przy czym stała μ nazywana jest ruchliwością nośników. Masz do dyspozycji:

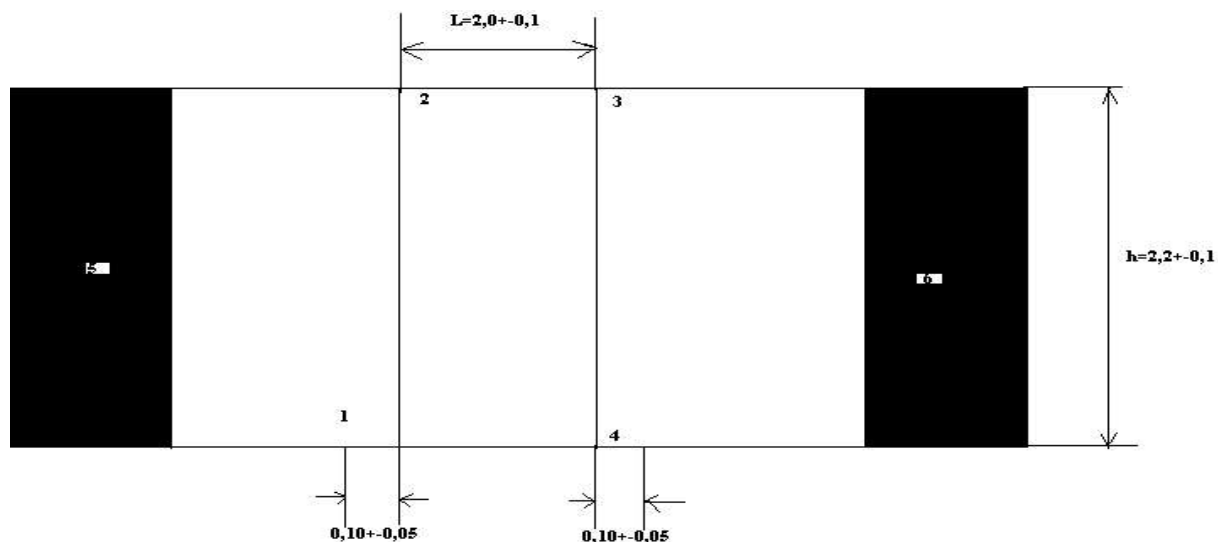
- warstwę półprzewodnikową o grubości $d = (2.00 \pm 0,05) \mu\text{m}$, osadzoną na izolującym elektrycznie podłożu, do której dołączono kontakty elektryczne,
- elektromagnes,
- regulowane źródło prądu stałego do zasilania elektromagnesu.
- dwa amperomierze.
- baterię 1,5 V,
- przewody zasilające.
- statyw i podstawki do mocowania elementów układu pomiarowego.

1. Określ znak ładunku nośników prądu w warstwie półprzewodnikowej.

2. Wyznacz koncentrację n nośników prądu i ruchliwość warstwy

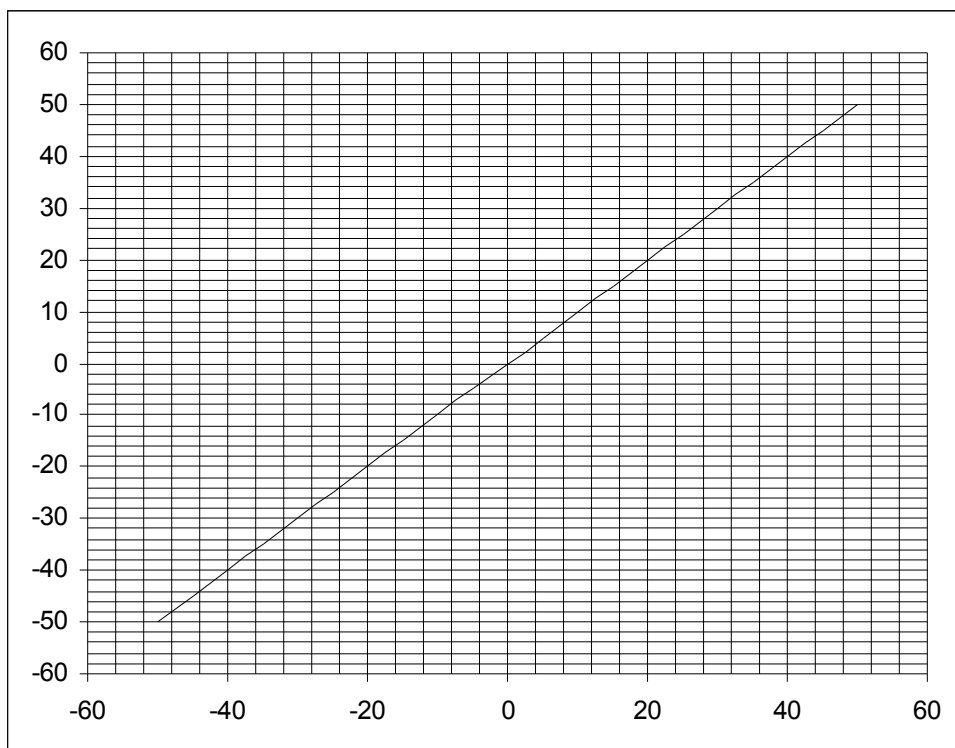
3. Wyznacz ruchliwość nośników prądu μ

Schemat rozmieszczenia kontaktów elektrycznych („napięciowych” i „prądowych”) na powierzchni warstwy, łącznie z wymiarami został przedstawiony na ryc. 3. Zaniedbaj rozmiary kontaktów napięciowych i załóż, że znajdują się one na brzegach warstwy. Zależność



Ryc 3. Rozmieszczenie kontaktów elektrycznych na próbce (widok od strony warstwy półprzewodnikowej). Wymiary podane są w milimetrach. Oznaczenia kontaktów elektrycznych: 1, 2, 1, 4 kontakty napięciowe; 5, 6 kontakty prądowe. Kolory doprowadzeń do kontaktów: 1 – czarny, 2 – czerwony, 3 – żółty lub brązowy (kontakt niewykorzystany), 4 – biały 5 – niebieski, 6 – zielony

indukcji pola magnetycznego B wytwarzanego przez elektromagnes od przepływającego przez jego uzwojenie prądu zasilania I . przedstawiono na ryc. 4. Zwrot pola magnetycznego wytwarzanego przez elektromagnes przy podłączeniu bieguna (+) zasilacza do zacisku elektromagnesu oznaczonego kolorem czerwonym, jest zgodny ze strzałką namalowaną na obudowie elektromagnesu.



Ryc. 4. Zależność wartości pola wytwarzanego przez elektromagnes od prądu zasilania I , Pomiary wykonano w odległości 1 mm od rdzenia

Przyjmy, że w warstwie znajduje się tylko jeden rodzaj nośników prądu.

- a) nie wolno łączyć zasilacza elektromagnesu z kontaktami elektrycznymi warstwy
- b) nie wolno łączyć baterii 1.5 V z kontaktami

ROZWIĄZANIE ZADANIA D2

1. Część teoretyczna

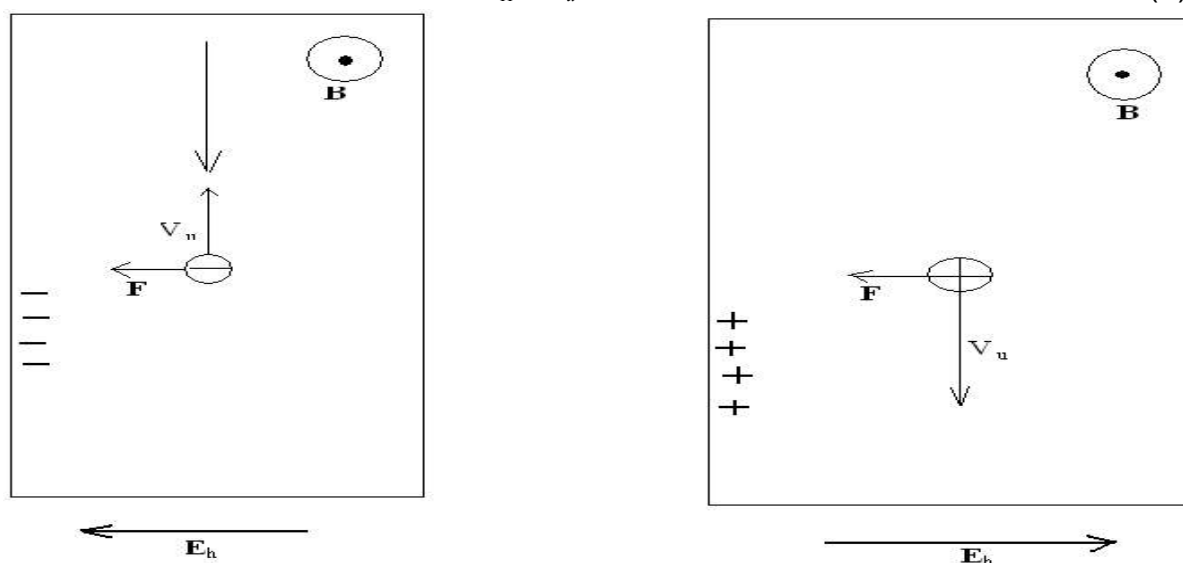
Rozwiązanie zadania opiera się na badaniu zjawiska Halla. Rozważmy prostopadłościenną próbkę półprzewodnikową o długości L szerokości h i grubości d . Załóżmy dla uproszczenia, że przepływające wzdłuż próbki nośniki prądu (obciążone dodatnim lub ujemnym ładunkiem) poruszają się z tą samą prędkością v_u wzdłuż próbki. Jeśli taką próbkę umieścimy w polu magnetycznym B skierowanym prostopadle do jej powierzchni (ryc. 5) to na przepływające ładunki zaczną działać siły magnetyczne odychylające je w kierunku poprzecznym do ich pierwotnego biegu o wartości

$$F = qv_u B \quad (1)$$

Gdzie q – ładunek nośnika prądu, v_u - wartość prędkości unoszenia, B - wartość indukcji pola magnetycznego.

W wyniku tego na brzegu warstwy zgromadzi się niezrównoważony ładunek elektryczny. Stanowi on źródło poprzecznego pola elektrycznego E_H , przedstawiającego się dalszemu odchyłaniu ładunków. W stanie równowagi magnetycznej siły odychylające działające na ładunki, równoważące są przez przeciwne siły elektryczne qE_u i zachodzi równość:

$$E_H = v_u B \quad (2)$$



Ryc. 5. Siły działające na elektrony a) oraz dziury b) poruszające się w półprzewodniku umieszczonym w polu magnetycznym. Pole magnetyczne, prostopadle do płaszczyzny rysunku jest skierowane w stronę czytelnika.

Badając zwrot wektora pola elektrycznego E_H można odpowiedzieć na pierwsze z pytań postawionych w treści zadania, dotyczące znaku ładunku nośników prądu. W półprzewodniku możemy się spodziewać, że mogą to być obdarzone ujemnym ładunkiem elektrony lub dodatnio naładowane dziury. W obu przypadkach wartość bezwzględna ładunku nośników jest równa ładunkowi elementarnemu $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$. Jeśli rozważyć dwie sytuacje, w których kierunek prądu w próbce jak również zwrot pola magnetycznego B nie zmienia się, natomiast zmienia ulega znak nośników ładunku, to zwrot poprzecznego pola elektrycznego E_H w sytuacji gdy nośnikami ładunku są elektrony; będzie przeciwny do jego zwrotu w przypadku, gdy są nimi dodatnio naładowane dziury (ryc 5). Doświadczalnie zwrot wektora pola elektrycznego E_H można wyznaczyć mierząc różnicę potencjałów powstającą między brzegami próbki. Ta różnica potencjałów nosi nazwę napięcia Halla U_H . Wartość napięcia Halla spełnia równanie:

$$U_H = E_H h$$

gdzie E_h - wartość natężenia pola, h - szerokość próbki. Łącząc równość (2) ze wzorem na gęstość prądu w próbce $j = en\mu E$ i wyrażeniem na prędkość unoszenia $v_u = \mu E$ dostajemy związki na koncentrację nośników n i ich ruchliwość μ :

$$n = \frac{j}{eE_H}$$

$$\mu = \frac{E_H}{EB}$$

Wyrażając natężenia pól elektrycznych oraz gęstość przez wielkości mierzone bezpośrednio w doświadczeniu dostajemy

$$n = \frac{IB}{edU_H}$$

$$\mu = \frac{LU_H}{hUB}$$

przy czym e - ładunek elementarny. U_H - napięcie Halla. I - natężenie prądu w próbce, L - długość próbki (odpowiada odległości między kontaktami napięciowymi), U - napięcie przewodnictwa mierzone wzdłuż próbki. h - szerokość próbki, d - grubość warstwy przewodzącej. Jeśli wprowadzić oznaczenie $\alpha = U_H/I$. powyższe wzory przyjmą postać:

$$n = \frac{I}{ed\alpha}$$

(3)

$$\mu = \frac{L}{hU}\alpha$$

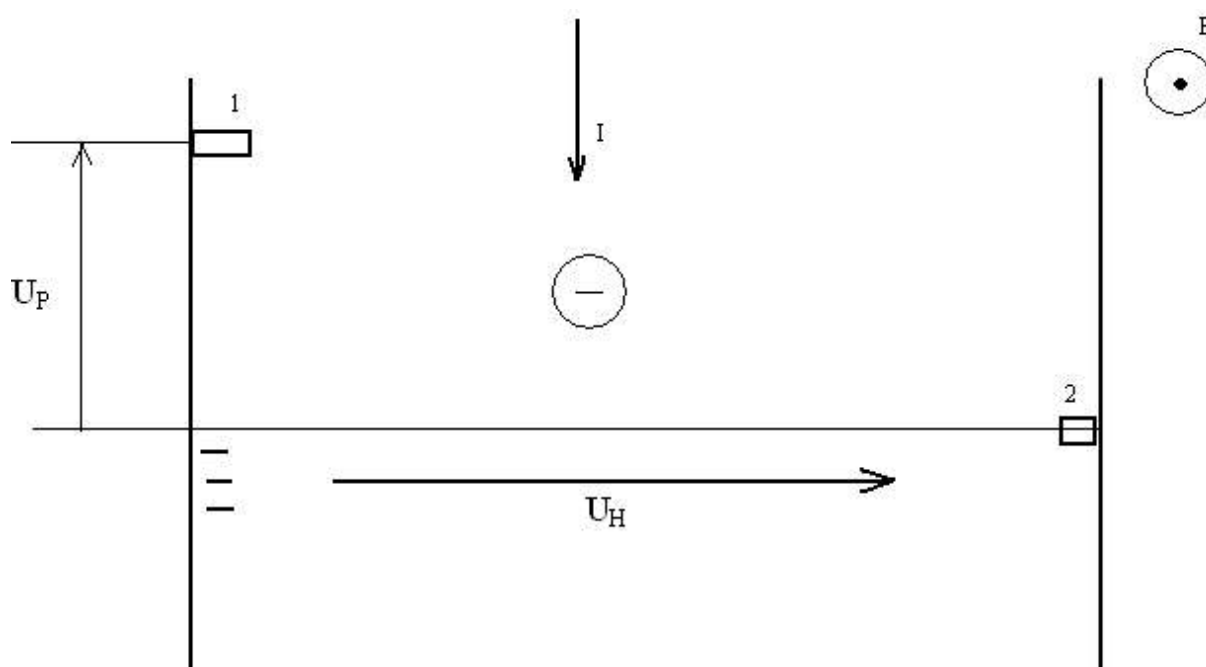
(4)

Przed przystąpieniem do pomiarów należy rozwiązać problem wynikający z niesymetrycznego (ryc. 3) rozmieszczenia kontaktów napięciowych na warstwie półprzewodnikowej. W związku z tym dołączając woltmierz do kontaktów 1 i 2 (ryc.3) nie można zmierzyć bezpośrednio napięcia Halla ale napięcie $U_{1,2}$, będące sumą U_H oraz napięcia niezrównoważenia U_p pojawiającego się w wyniku przepływu prądu I wzdłuż próbki (ryc. 6). Wobec tego w zależności od kierunku pola magnetycznego oraz kierunku przepływającego przez próbkę prądu:

$$U_{1,2} = U_p \pm U_H$$

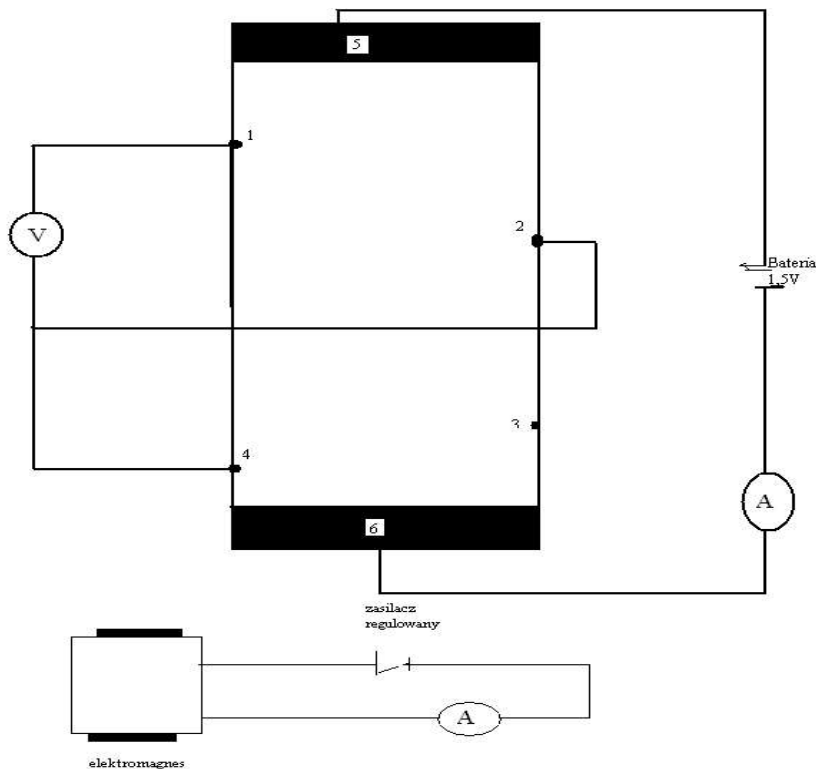
Powyższy związek można zapisać w postaci:

$$U_{1,2} = U_p \pm b\alpha$$



Ryc. 6. Napięcie $U_{1,2}$, mierzone między kontaktami 1 i 2 jest sumą lub różnicą napięcia niezrównoważenia U_p , oraz napięcia Halla U_H . Szkic wykonano przy założeniu, że nośnikami prądu są elektrody, natomiast pole magnetyczne prostopadłe do płaszczyzny rysunku jest skierowane do czytelnika.

Gdzie $\alpha = U_H/B$. Jeśli układ doświadczalny zgodnie z ryc. 7 i założyć, że nośnikami prądu są elektrony, to wartość napięcia $U_{1,2} = U_p - B\alpha$, powinna maleć w miarę wzrostu natężenia pola B . W sytuacji gdyby nośnikami prądu były dziury napięcie $U_{1,2}$ powinno rosnać. Tak więc, problem asymetrii kontaktów można rozwiązać wykonując pomiary dla różnych wartości pola można rozwiązać dla różnych wartości pola magnetycznego B . sporządzając wykres zależności napięcia $U_{1,2}$ od pola B i wyznaczyć stałą α . występującą we wzorach opisujących koncentrację n i ruchliwość μ nośników

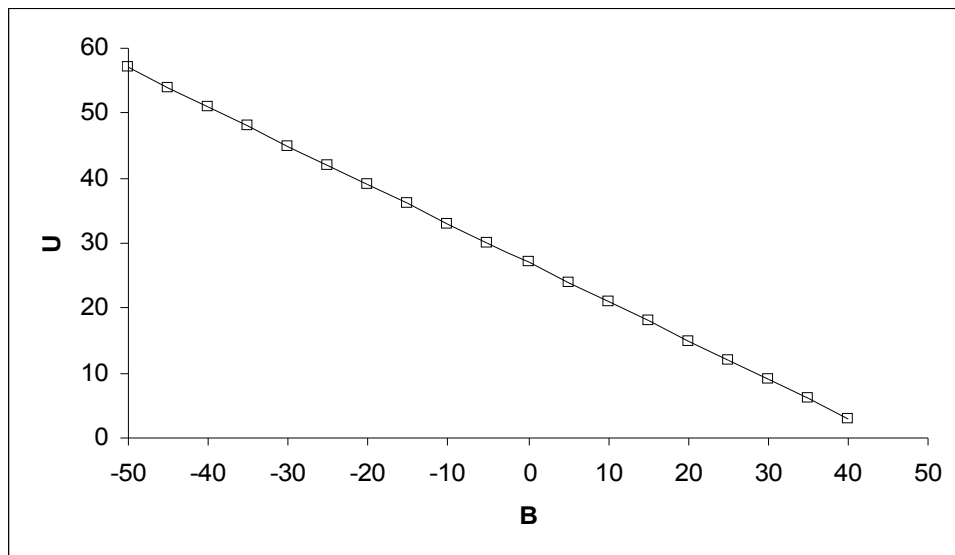


Ryc. 7. Układ doświadczalny. Linia przerywaną zaznaczono podłączenie woltomierza w przypadku pomiaru napięcia przewodnictwa U

2. Część doświadczalna

W celu wykonania pomiarów zestawiono układ elektryczny (ryc.7) składający się z próbki, zasilającej ją baterii (biegun dodatni do kontaktu 5, ujemny do kontaktu 6), woltomierza, dwóch amperomierzy oraz elektromagnesu zasilanego z regulowanego źródła prądu. Ponieważ dla wykonania zadania konieczny był pomiar dwóch napięć: napięcia przewodnictwa U między kontaktami 1 i 4 oraz napięcia $U_{1,2}$ między kontaktami 1 i 2, a do dyspozycji był tylko jeden woltomierz, to należało sprawdzić przed pomiarami czy jego oporność wewnętrzna jest wystarczająco duża w porównaniu z opornością próbki. Okazało się, że przyłączenie woltomierza między kontaktami 1, 2 oraz 1, 4 nie zmieniało wartości prądu płynącego przez próbkę $I = (5.20 \pm 0,01)\text{mA}$. Uchwyt próbki został tak zaprojektowany aby przy przemieszczeniu go próbka znajdowała się w odległości 1 mm od jego rdzenia, dzięki temu można było skorzystać z charakterystyki elektromagnesu dołączonej do treści zadania. Przed wykonaniem pomiarów w polu magnetycznym należało zdecydować o sposobie korzystania z przedstawionej na ryc.4 zależności pola magnetycznego elektromagnesu od prądu zasilania I_x . Zależność ta wykazuje histerezę. Ustalając więc wartość pola magnetycznego należy postępować w taki sposób aby wiedzieć z której gałęzi można odczytać aktualną wartość pola. Jeżeli na przykład ustawić maksymalny prąd (50 mA), a potem stopniowo go zmniejszać to pole magnetyczne należy odczytywać z górnej gałęzi charakterystyki. Elektromagnes dołączono do źródła prądu stałego w taki sposób aby pole magnetyczne „wchodziło” do próbki od strony izolującego podłoża. Po włączeniu pola magnetycznego, należy ustawić próbkę tak aby

uzyskać maksymalną zmianę napięcia $U_{1,2}$, wtedy jego składowa U_H jest maksymalna, i można stąd wnosić, że próbka znajduje się w obrębie rdzenia elektromagnesu. Następnie, zmieniając wartość pola magnetycznego B wykonano szereg pomiarów napięcia $U_{1,2}$ i naniesiono je na wykres (ryc. 8). Z dopasowania prostej otrzymano wartość współczynnika $\alpha = (0.54 \pm 0.031 [V, T])$. Ponieważ wartość napięcia $U_{1,2}$ malała ze wzrostem pola magnetycznego (ryc. 8), to zgodnie z wcześniejszymi



Ryc. 8. Zależność napięcia $U_{1,2}$, od pola magnetycznego

Rozważaniami nośnikami prądu w badanej warstwie są elektrony. Wartość napięcia przewodnictwa nie wykazywała zależności od pola magnetycznego i wynosiła $U = (691 \pm 1)$. Po podstawieniu tych wartości do wzorów (3) oraz (4) otrzymano koncentrację nośników $n = 3,0 \pm 0,2 \cdot 10^{22} \text{m}^{-3}$ oraz ruchliwość $\mu = 0.73 + 0.04 \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Na błąd wyznaczenia tych wielkości duży wpływ ma niepewność oznaczenia odległości między kontaktami. Innym źródłem błędów był sposób ustawienia próbki w polu elektromagnesu. Błąd ten można było ocenić kilkakrotnie wkładając i wyjmując próbkę z pola magnetycznego. Za zadanie można było uzyskać 20 punktów w tym około połowę za wyprowadzenie poprawnych wzorów oraz koncentrację i ruchliwość oraz poprawny pomysł na określenie znaku nośników. Pozostałe punkty można było uzyskać za uwzględnienie asymetrii kontaktów, uwzględnienie histerezy, poprawność wykonania pomiarów i przeprowadzenie rachunku błędów.

Punktacja za zadanie:

za poprawne rozwiązanie całości zadania i podanie prawidłowej odpowiedzi 5 pkt. w tym:

- za prawidłowe zestawienie układu 2 pkt
- za wyprowadzenie prawidłowych wzorów 2 pkt
- za określenie rodzaju ładunków 1pkt

Źródło:
Zadanie pochodzi z „Druk OF”

