

C2

Badanie czasu życia i drogi dyfuzji nośników mniejszościowych w Ge metodą Valdesa

Celem pomiarów jest zbadanie zjawiska dyfuzji w kryształ germanu typu n i określenie długości drogi dyfuzji i czasu życia nośników.

1. Co należy wiedzieć przed przystąpieniem do ćwiczenia?

Ogólne wiadomości z fizyki półprzewodników.

- model pasmowy (funkcja Blocha, pseudopęd, struktura pasmowa $E(\mathbf{k})$, elektron w ciele stałym, dziura, masa efektywna, przerwa prosta, przerwa skośna)
- gęstość stanów, statystyka obsadzeń, koncentracja, jej zależność od temperatury, od oświetlenia, mechanizmy rekombinacji, wpływ domieszkowania na koncentrację

Ponieważ badać będziemy german, należy znać podstawowe dane dla tego materiału.

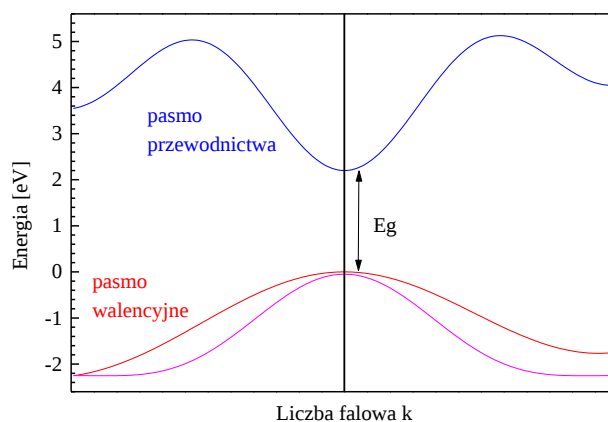
Zjawiska transportu elektronowego, m.in.

- prąd unoszenia, prąd dyfuzji
- równanie dyfuzji, czas życia nośników
- złącze metal – półprzewodnik, struktura energetyczna, polaryzowanie złącza, charakterystyka prądowo-napięciowa
- zasada działania lock-in'a (opis w Dodatku).

2. Krótkie wprowadzenie

W ciałach krystalicznych elektrony przebywają w potencjale mającym charakter okresowy. Na skutek tego ich funkcje falowe mają postać funkcji Blocha.

Postać ta dopuszcza możliwość ruchu elektronów, aczkolwiek kwazicząstki przez nią opisywane mają nieoczekiwane własności – ich masy różnią się od masy elektronu w próżni, a ich ładunki mogą być dodatnie. Zależność ich energii, E , od pseudopędu, $p = \hbar k$, także jest inna niż dla elektronu w próżni. Zależność $E(k)$ nazywamy strukturą pasmową (patrz rys. 1). Rozróżniamy pasmo walencyjne, zawierające cząsteczki o ładunku dodatnim – dziury i pasmo przewodnictwa, w którym znajdują się ujemnie naładowane elektrony (poprawnie kwazi-elektrony). Pasma te oddzielone są przerwą energetyczną. Szerokość przerwy energetycznej w półprzewodniku mieści się w granicach od 0 eV (CdHgTe) do ponad 5 eV (AlN, diament).



Rys. 1. Przykład struktury pasmowej półprzewodnika

Półprzewodniki różnią się od metali tym, że w zerowej temperaturze, mają całkowicie zapełnione pasmo walencyjne i całkowicie puste pasmo przewodnictwa (o ile nie jest domieszkowany).

Przerwa energetyczna w półprzewodnikach może być prosta lub skośna. O przerwie prostej mówimy wtedy, gdy minimum pasma przewodnictwa znajduje się nad wierzchołkiem pasma walencyjnego, tak jak w strukturze przedstawionej na rysunku 1. Przerwę skośną mamy, gdy minimum pasma przewodnictwa odpowiada wartości k różnej od zera. W półprzewodnikach z taką przerwą nośniki, aby zrekombinować muszą przekazać swój pęd kryształowi; żyją, więc dłużej.

Liczbę nośników ładunku (elektronów lub dziur) w jednostkowej objętości nazywamy koncentracją. Zdolność cząsteczek do przewodzenia prądu określa ich ruchliwość, μ , czyli średnia prędkość, jaką osiągają one w jednostkowym polu elektrycznym. Ruchliwość nośników zależy od ich masy, która jest różna w różnych związkach półprzewodnikowych. Jeżeli w próbce znajdują się dziury o koncentracji p i ruchliwości μ , to przewodnictwo właściwe materiału (σ) będzie wynosiło: $\sigma = ep\mu$, gdzie: e – ładunek elementarny ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C). Opór właściwy jest odwrotnością przewodnictwa: $\rho = 1/\sigma$.

W dowolnej temperaturze większej od zera, nośniki swobodne znajdują się w ciągłym ruchu. Jeżeli jednak ich rozkład jest równomierny (koncentracja odpowiada warunkom równowagi), to nie obserwujemy przepływu prądu. Jeśli jednak wprowadzimy do materiału nadmiarową koncentrację nośników (np. wzbudzając je światłem), to zauważymy rozpyływanie się tych nośników we wszystkich kierunkach. Zjawisko to nazywamy dyfuzją. Gęstość prądu nośników, j_D , wywołanego gradientem koncentracji dziur p dana jest wzorem:

$$\vec{j}_D = -D_p \vec{\nabla} p \quad (1)$$

gdzie D_p jest stałą dyfuzji dziur. Stała dyfuzji jest zależna od ruchliwości μ i temperatury T :

$$D_p = \frac{\mu k_B T}{e} \quad (2)$$

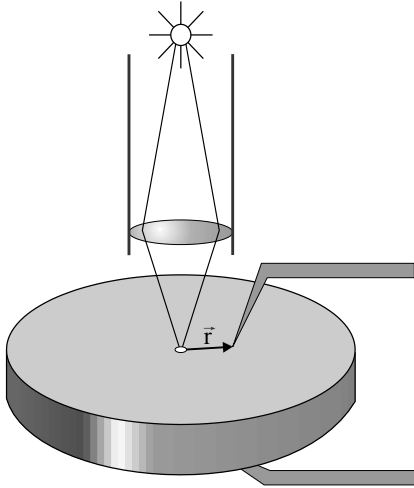
gdzie: k_B – stała Boltzmana ($= 0,0861 \text{ meV/K}$).

W przypadku stałego pobudzenia i stałej prędkości rekombinacji (związanej z czasem życia dziur τ) powstają warunki stacjonarne, to znaczy $j_D = \text{const}$, $dp/dt = 0$. Rozkład koncentracji dziur $p(r)$ dany będzie przez stacjonarne równanie dyfuzji:

$$\nabla^2 p(r) - \frac{p(r)}{L_p^2} = 0 \quad (3)$$

gdzie: L_p to droga dyfuzji dana wzorem

$$L_p = \sqrt{D\tau} \quad (4)$$



Rys. 2. Schemat doświadczenia Valdesa w wersji wykonywanej na II pracowni.

W odróżnieniu od oryginalnego doświadczenia Valdesa [12] w naszym doświadczeniu używany punktowej plamki światła, więc zjawisko dyfuzji ma symetrię sferyczną (patrz rys. 2) i interesuje nas jedynie zależność p od odległości r . Wystarczy, gdy rozwiążemy równanie dyfuzji w układzie sferycznym. Przyjmuje ono wówczas postać:

$$\frac{\partial^2 p(r)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p(r)}{\partial r} - \frac{p(r)}{L_p^2} = 0 \quad (5)$$

Przy założeniu, że daleko od plamki koncentracja dziur jest zerowa, $p(\infty) = 0$, rozwiązaniem tego równania jest funkcja w postaci:

$$p(r) = A_R \frac{\exp(-r/L_p)}{r} \quad (6)$$

gdzie A_R jest pewna stałą. Jeśli wykreślimy zależność $\ln(p(r) * r)$ od r to powinniśmy otrzymać prostą.

3. Badana próbka

Badana próbka to duży monokryształ Ge, typu n. Od spodu kryształu wykonany jest kontakt omowy. Kontakt na górze (złącze metal-półprzewodnik) realizowany jest poprzez przyciśnięcie stalowej igły (patrz rys.2) do powierzchni próbki. Powierzchnia próbki została przygotowana poprzez szlifowanie bądź trawienie chemiczne. Stan powierzchni wpływa na tempo rekombinacji powierzchniowej.

4. Przebieg ćwiczenia

- 1) Charakterystyki prądowo-napięciowe złącza metal-półprzewodnik dla kilku położań igły (dla kilku złącz metal – półprzewodnik), zbadanie wpływu oświetlenia na tę zależność. → fit krzywej teoretycznej dla kierunku przewodzenia, wyznaczenie współczynnika niedoskonałości złącza
- 2) Pomiary dyfuzji metodą Valdesa.
 - a. Zbadanie zależności fotoprądu od odległości r (patrz rys.2) dla kilku (4-5) polaryzacji złącza w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym. Pomiar fotoprądu przy oświetleniu światłem modulowanym, odbywa się, jako pomiar napięcia U_{foto} na wyjściu przetwornika I-V, które po wzmożeniu poddawane jest detekcji fazowej. Wykreślenie zależności $\Delta I(r) \cdot r$ od r w skali półlogarytmicznej pozwala na wyznaczenie L_d a następnie τ
 - b. Pomiar zaniku sygnału w funkcji czasu przy pomocy oscyloskopu cyfrowego → wyznaczenie τ

5. Przygotowanie opisu

Opis powinien składać się z następujących części:

1. Streszczenia (także w języku angielskim)
2. Wstępu teoretycznego (krótko, na temat materiałów z przerwą skośną)
3. Opisu metody pomiarowej, układu pomiarowego i próbki
4. Wyników i ich analizy
5. Podsumowania zawierającego wnioski

Ad. 4.

Na podstawie zależności efektywnej drogi dyfuzji od napięcia, $L_E(U_B)$, należy oszacować drogę dyfuzji, jaka byłaby w przypadku braku polaryzacji $L_D(U_B = 0)$.

Zakładając, że ruchliwość dziur w germanie wynosi $\mu = 1700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, obliczamy stałą dyfuzji. Wyznaczamy czasy życia dziur. Niezależnie wyznaczamy czas życia nośników poprzez dopasowanie zaniku wykładniczego do pomiarów wykonanych oscyloskopem cyfrowym i porównujemy wyniki.

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.).

6. Literatura

Ciało Stałe, dyfuzja:

1. R. A. Smith, Półprzewodniki, PWN, 1966
2. H. Ibach, H. Lüth, Fizyka ciała stałego, rozdziały VI, VII i XII, PWN, 1996
3. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, 1999-2012
4. P. S. Kirijew, Fizyka Półprzewodników, PWN. ~1970
5. T. Stacewicz, A. Witowski, J. Ginter, Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego, , Rozdz. XV, XVII Wydawnictwa UW, 2002
6. Z. Kleszczewski, Fizyka kwantowa, atomowa i ciała stałego, Wyd. Politechniki Śląskiej, 1997
7. K. Sierański, M. Kubisa, J. Szatkowski, J. Misiewicz, Półprzewodniki i struktury półprzewodnikowe, Oficyna Wyd. Pol. Wrocł., 2002
8. K. W. Szalimowa, Fizyka półprzewodników, PWN, 1974
9. W.L.Boncz-Brujewicz, S.G. Kałasznikow, Fizyka półprzewodników, PWN, 1985

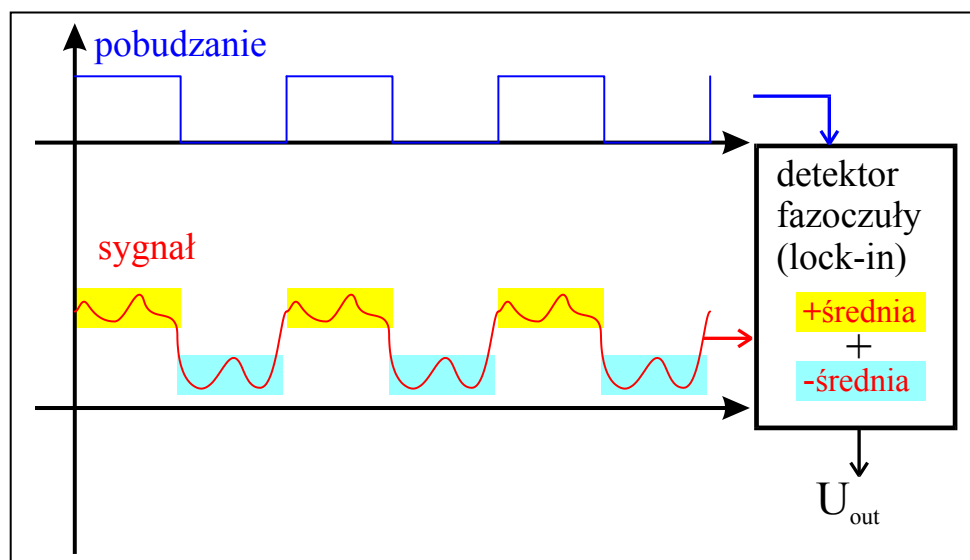
Złącze metal – półprzewodnik:

10. L.V. Azaroff, Struktura i własności ciał stałych, WNT, 1964
11. R. A. Smith, Półprzewodniki, PWN, 1966
12. L.B Valdes, Measurement of Minority Carrier Lifetime in Germanium, Proceedings Inst. Radio Engrs (1952) 40 (11), 1420 – 1423, DOI: 10.1109/JRPROC.1952.273973
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?partnum=4050845&searchProductType=IEEE%20Journals>
13. W. van Roosbroek, Injected Current Carrier Transport in a Semi-Infinite Semiconductor and the Determination of Lifetimes and Surface Recombination Velocities , J. Appl. Phys. (1955) 26, 380
http://jap.aip.org/resource/1/japiau/v26/i4/p380_s1

Dodatek A: Zasada działania woltomierza fazoczułego (lock-in'a)

W wielu układach pomiarowych spotykamy się z problemem szumów, które czasami są porównywalne z sygnałem mierzonym. Jedną z metod oddzielenia słabego sygnału od szumu jest jego modulacja. Na przykład, możemy modulować strumień światła pobudzającego, zasłaniając i odsłaniając go przy pomocy wiatraczka (*chopera*). Spodziewamy się, że sygnał wzbudzany modulowanym światłem, również będzie modulowany. Jeżeli wykonamy pomiar w momencie czasu, gdy spodziewamy się sygnału, a następnie wykonamy pomiar w chwili, gdy jest sam szum, to różnica wyników tych pomiarów da nam liczbę znacznie mniej obciążoną błędem niż prosty pomiar. Aby dodatkowo poprawić jakość wyniku, należy powtórzyć pomiar wiele razy i uśrednić, a najlepiej wyciąkać dany pomiar po czasie.

Urządzeniem, które potrafi wykonać całkowanie w zadanych okresach czasu jest woltomierz fazoczuły. Do woltomierza dostarczany jest sygnał odniesienia (*reference*) odpowiadający modulacji i modulowany sygnał mierzony (*signal*). Woltomierz fazoczuły uśrednia sygnał mierzony ze znakiem plus w chwili, gdy sygnał odniesienia jest wysoki, a ze znakiem minus, gdy sygnał odniesienia jest niski. Dodatkowo woltomierz wyposażony jest we wzmacniacz pozwalający mierzyć sygnały na poziomie milionowych części wolta (μV) oraz filtry dolno-zaporowy i górno-zaporowy dodatkowo usuwające szum o częstościach znacznie różniących się od częstości modulacji.



Rys. A1. Przebiegi sygnałów w woltomierzu fazoczułym. Urządzenie pobudzające dostarcza sygnał odniesienia. Woltomierz fazoczuły uśrednia sygnał mierzony ze znakiem plus w chwili, gdy sygnał odniesienia jest wysoki, a ze znakiem minus, gdy sygnał odniesienia jest niski.