



VI. Efekt fotowoltaiczny na kontakcie metal - półprzewodnik

Wstęp teoretyczny.

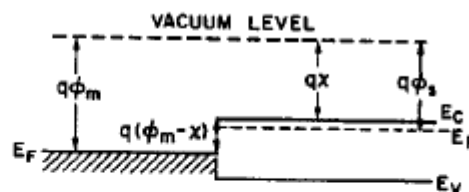
Pierwsze urządzenie półprzewodnikowe zostało wynalezione w roku 1904. Był to prostujący kontakt metal - półprzewodnik, który został wykonany w prosty sposób: ostrze metalowe zostało dociśnięte do powierzchni półprzewodnika. Urządzenie to od chwili wynalezienia znalazło wiele zastosowań. W r. 1938 Schottky zasugerował, że prostujące właściwości takiego złącza wynikają z pojawienia się bariery potencjału w obszarze przypowierzchniowym półprzewodnika, związanej z obecnością ładunku przestrzennego w tym materiale. Od tego czasu prostujące złącze metal - półprzewodnik zwane jest złączem Schottky'ego i do dzisiaj wszystkie modele opisujące fizykę zjawisk występujących w takim złączu stanowią jedynie modyfikację modelu stworzonego przez Schottky'ego.

Poniżej przedstawiony zostanie model Schottky'ego. Na rys.1a pokazano przykładowy schemat pasm energetycznych dla metalu i półprzewodnika, gdy są odizolowane od siebie. Po lewej stronie pokazano ten schemat dla metalu a po prawej - dla półprzewodnika typu **n**. E_C i E_V oznaczają odpowiednio krawędzie pasm przewodnictwa i walencyjnego, E_F - energię poziomu Fermiego, $q\Phi_m$ i $q\Phi_s$ - prace wyjścia dla metalu i półprzewodnika oraz $q\chi$ - powinowactwo elektronowe dla półprzewodnika. Jak wynika z rysunku, jest to stan nierównowagowy, bo poziom Fermiego dla półprzewodnika jest wyżej niż dla metalu. Oznacza to, że po połączeniu elektrony z półprzewodnika spłyną do metalu aż poziom Fermiego w obydwu materiałach wyrówna się. W związku z tym po połączeniu, w obszarze złącza półprzewodnik naładuje się dodatnio a metal - ujemnie i pomiędzy obydwo materialami pojawi się różnica potencjałów i pole elektryczne E_0 . Na schemacie energetycznym odpowiadać jej będzie bariera potencjału, której wysokość widziana od strony metalu jest równa $q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi)$, zaś od strony półprzewodnika $qV_{bi} = q(\Phi_m - \Phi_s)$. Potencjał V_{bi} nazywa się potencjałem wbudowanym. Jak wynika z rys. 1b:

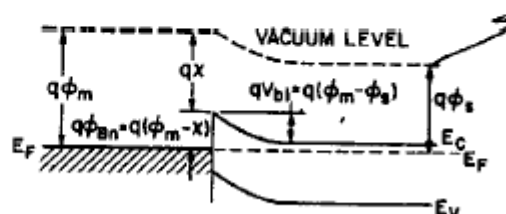
$$qV_{bi} = q(\Phi_{Bn} - V_n) , \quad (1)$$

gdzie V_n jest różnicą potencjałów między położeniem poziomu Fermiego a E_C . Dla kontaktu Schottky'ego z półprzewodnikiem typu **p**, sytuacja będzie analogiczna, ale oczywiście należy zmienić wówczas odpowiednio rysunki i symbole oznaczeń.

Rys. 1a



Rys. 1b



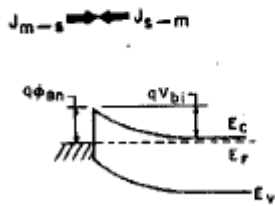
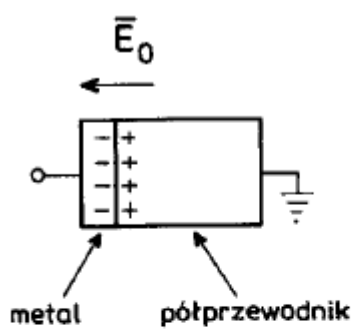
Jeśli złącze Schottky'ego spolaryzować napięciem, to w zależności od kierunku polaryzacji przez złącze będzie przepływać bardzo duży lub bardzo mały prąd. Zatem złącze metal - półprzewodnik będzie się zachowywać jak złącze **p-n**.



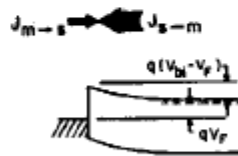
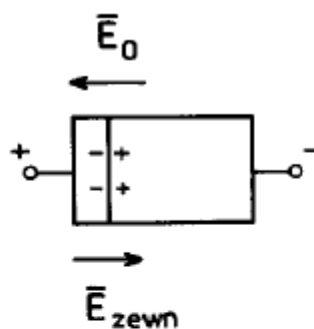
Laboratorium Fotowoltaiki

1a) Charakterystyka prądowo- napięciowa kontaktu M-S.

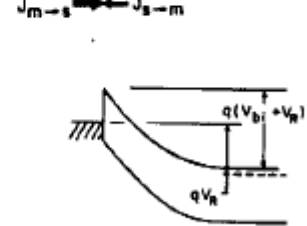
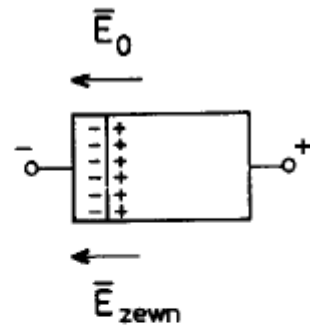
Na rys.2a przedstawiono jeszcze raz złącze M-S w stanie równowagi termodynamicznej. Przez złącze płynie stale prąd elektronowy z metalu do półprzewodnika, J_{m-s} i równoważący go prąd elektronowy płynący od półprzewodnika do metalu, J_{s-m} . Jeśli spolaryzujemy złącze tak, jak to pokazano na rys.2b, to pole elektryczne zewnętrzne będzie miało zwrot przeciwny do E_0 i w efekcie bariera potencjału obniży się i będzie równa $V_{bi} - V$. Przez złącze popłynie duży prąd J_{s-m} - mówimy, że złącze jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Jeśli złącze spolaryzujemy tak jak na rys.2c, to pole elektryczne zewnętrzne będzie miało zwrot taki sam jak E_0 i bariera potencjału wzrośnie do wartości $V_{bi} + V$. Prąd J_{s-m} wówczas bardzo mały, wypadkowy prąd też ma małą wartość - mówimy, że złącze jest spolaryzowane w kierunku zaporowym.



Rys. 2a



Rys.2b



Rys.2c

Można pokazać, że wypadkowy prąd płynący przez złącze metal - półprzewodnik zmienia się w funkcji napięcia polaryzującego następująco:

$$J = J_s \left(e^{qV/kT} - 1 \right), \quad (2)$$

gdzie

$$J_s = A^* T^2 e^{-q\Phi_{Bn}/kT}, \quad (3)$$

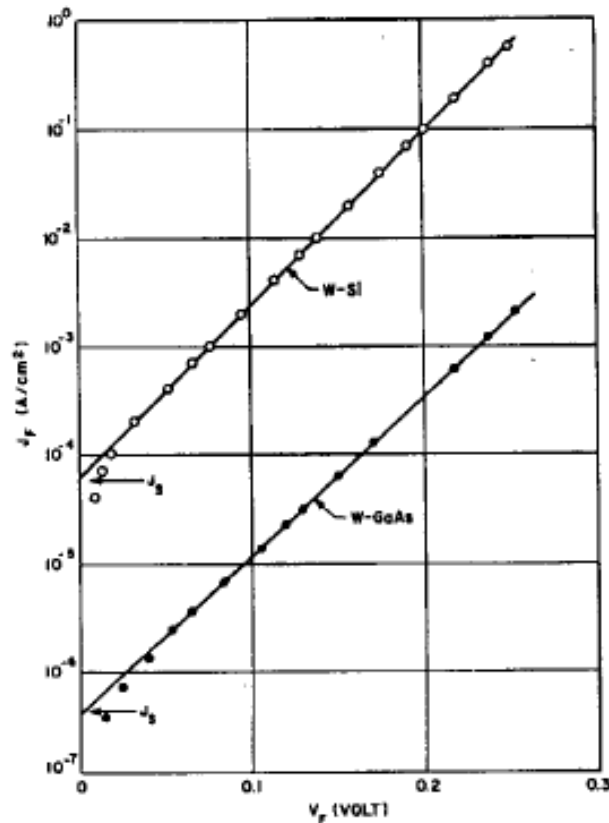
jest nazywany prądem nasycenia, A^* jest efektywną stałą Richardsona, k - stałą Boltzmanna i T - temperaturą. Mierzac w stałej temperaturze charakterystykę prądowo - napięciową kontaktu M-S dla napięć w kierunku przewodzenia takich, że $qV \gg 3kT$ a następnie rysując ją w skali $\ln(J) = f(V)$, otrzymuje się wykres w postaci linii prostej. Ekstrapolacja tej prostej do przecięcia z osią rzędnych pozwala na wyznaczenie wartości J_s . Znajac tę wartość można skorzystać ze wzoru (3) i wyznaczyć barierę potencjału $q\Phi_{Bn}$. Niezbędna jest znajomość



Laboratorium Fotowoltaiki

stałej Richardsona: $A^* = 120 m^*/m_0 [A/(cm^2K^2)]$ gdzie m^*/m_0 jest stosunkiem masy efektywnej elektronu na dnie pasma przewodnictwa do masy elektronu swobodnego. Np. dla CdTe typu **n** można przyjąć $m^*/m_0 \cong 0,1$ i wówczas $A^* = 12[A/(cm^2K^2)]$.

Na rys.3. przedstawiono w skali półlogarytmicznej przykładowe charakterystyki $J - V$ dla złączy M-S : W-Si oraz W-GaAs. Na rysunkach zaznaczono prądy nasycenia J_s .



Rys.3.

Rzeczywista charakterystyka I-V dla złącza M-S ma postać:

$$J = J_s \left(e^{qV/nkT} - 1 \right), \quad (4)$$

gdzie n jest współczynnikiem idealności. Nadal jednak obowiązuje wzór (3) pozwalający na wyznaczenie bariery z wartości prądu nasycenia otrzymanego z ekstrapolacji linii prostej na wykresie $\ln(J) = f(V)$.

1b) Pojemność złącza M-S.

Rozważmy złącze M-S w stanie równowagi termodynamicznej. W obszarze złącza po stronie półprzewodnika, istnieje dodatni ładunek przestrzenny zjonizowanych donorów który rozprzestrzenia się na pewien obszar W , zwany obszarem zubożonym. Ten dodatni ładunek $qN_D W$ (q - ładunek elementarny, N_D - koncentracja donorów) równoważony jest przez ujemny ładunek jonów metalu. A więc w obszarze złącza mamy do czynienia z obecnością nieruchomego ładunku przestrzennego, podobnie jak w obszarze między okładkami naładowanego kondensatora. Jeśli potraktujemy złącze M-S jako kondensator, w którym



Laboratorium Fotowoltaiki

odległość W między okładkami, równa jest szerokości warstwy tego ładunku przestrzennego, to można pokazać, że zależność między W a potencjałem wbudowanym V_{bi} jest następująca:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{qN_D} V_{bi}}. \quad (5)$$

Ze względu na znacznie mniejszą koncentrację elektronów w półprzewodniku w stosunku do koncentracji elektronów w metalu, obszar ładunku przestrzennego zjonizowanych donorów jest znacznie szerszy od ujemnego obszaru w metalu. Dlatego praktycznie cała szerokość takiego kondensatora przypada na obszar półprzewodnika i dlatego ε_s występujące we wzorze (5) jest przenikalnością dielektryczną półprzewodnika. Jeśli złącze zostanie spolaryzowane napięciem V , to wzór (5) wygląda następująco:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{qN_D} (V_{bi} \pm V)}, \quad (6)$$

przy czym znak $(-)$ pod pierwiastkiem odnosi się do polaryzacji w kierunku przewodzenia a $(+)$ - do polaryzacji w kierunku zaporowym. Pojemność złącza C przypadająca na jednostkę powierzchni s wyrażać się będzie wzorem:

$$\frac{C}{s} = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{W} = \sqrt{\frac{qN_D\varepsilon_s\varepsilon_0}{2(V_{bi}\pm V)}}. \quad (7)$$

Jeśli podnieść obydwie strony równania (7) do kwadratu i policzyć s^2/C^2 to otrzymamy następujące równanie:

$$\frac{s^2}{C^2} = \frac{2}{qN_D\varepsilon_s\varepsilon_0} (V_{bi} \pm V). \quad (8)$$

Jak wynika z powyższego równania zależność $\frac{s^2}{C^2} = f(V)$ jest linią prostą o współczynniku nachylenia $\frac{2}{qN_D\varepsilon_s\varepsilon_0}$, przecinającą oś odciętych w punkcie o współrzędnych $V = V_{bi}$. Tak więc z pomiarów charakterystyki $C - V$ złącza M-S można wyznaczyć koncentrację donorów N_D oraz potencjał wbudowany V_{bi} .

Znając koncentrację donorów N_D można wyznaczyć V_n :

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right), \quad (9)$$

gdzie N_c jest efektywną gęstością stanów na dnie pasma przewodnictwa w półprzewodniku, i wyraża się wzorem:

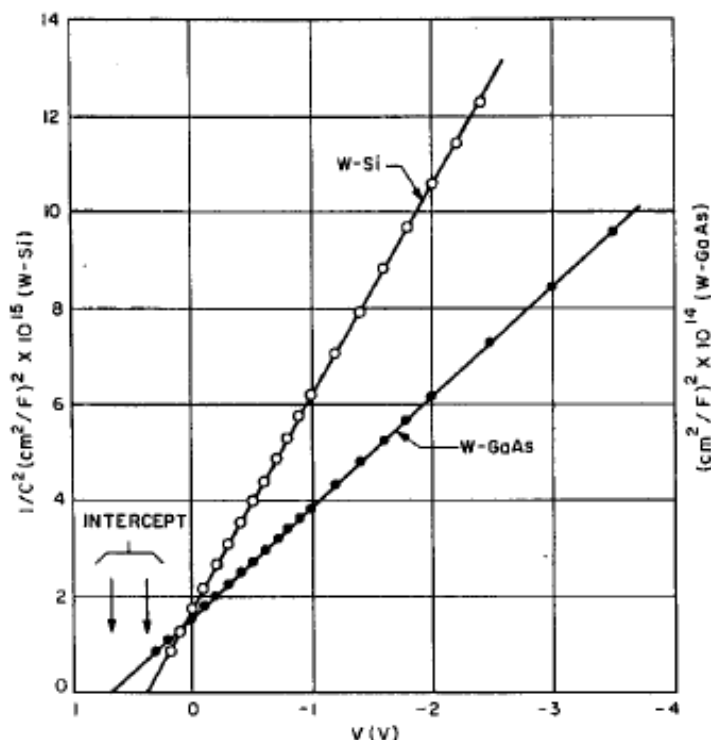
$$N_c = 4,83 \cdot 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{3/2} [\text{cm}^{-3}]. \quad (10)$$

Jeśli znamy V_n i potencjał wbudowany, możemy, korzystając ze wzoru (1) wyznaczyć wysokość bariery potencjału na kontakcie metal-półprzewodnik $q\Phi_{Bn}$



Laboratorium Fotowoltaiki

Zwykle pomiary $C - V$ wykonuje się polaryzując złącze w kierunku zaporowym, ponieważ wówczas omawiany model jest słuszny w szerokim zakresie napięć. Na rys.4 przedstawiono przykładowe charakterystyki $\frac{s^2}{c^2} = f(V)$ dla kontaktów W - Si i W - GaAs. Zaznaczono również strzałkami przecięcia z osią odciętych, czyli odpowiednie potencjały wbudowane.



Rys.4.

1c) efekt fotowoltaiczny na kontakcie M-S.

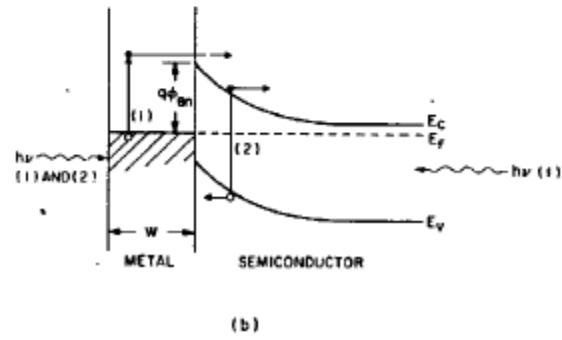
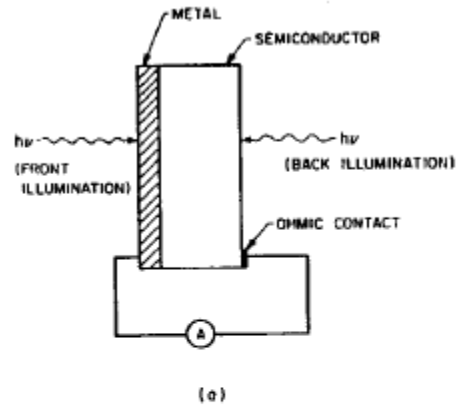
Podobnie jak w przypadku złącza **p-n**, po oświetleniu złącza M-S obserwować można efekt fotowoltaiczny. Na rys.5 przedstawiono schematycznie oświetlany kontakt M-S. Jeśli kontakt zostanie oświetlony fotonami o energii $h\nu > q\Phi_{Bn}$, wówczas elektrony mogą przejść z metalu do pasma przewodnictwa półprzewodnika i jeśli złącze jest zwarte - popłynie fotoprąd I_{ph} . Wg. teorii Fowlera, dla $h\nu - q\Phi_{Bn} \gg 3kT$, fotoprąd/foton jest proporcjonalny do kwadratu energii fotonów padających na kontakt:

$$\frac{I_{ph}}{h\nu} \sim [h(\nu - \nu_0)]^2 \quad , \quad (11)$$

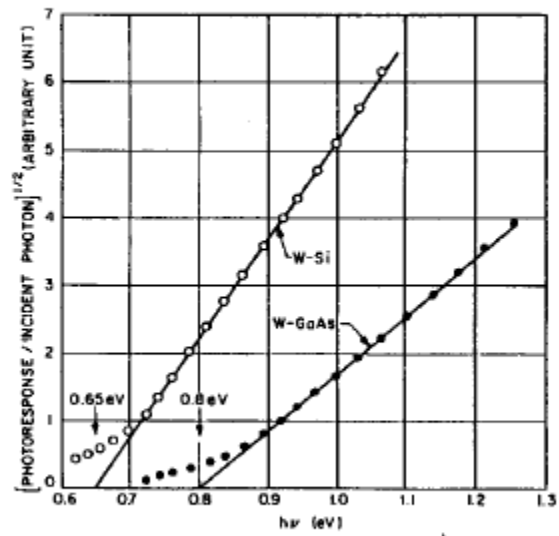
Wykres $\sqrt{\frac{I_{ph}}{h\nu}} = f(h\nu)$ jest linią prostą. Przedłużenie tej prostej do przecięcia z osią odciętych pozwala na wyznaczenie granicznej energii fotonów powyżej której obserwuje się fotoefekt a zatem i bariery potencjału, zgodnie z relacją $h\nu_0 = q\Phi_{Bn}$. Na rys.6 przedstawiono wykres pierwiastka z ftoodpowiedzi przypadającej na foton w funkcji energii fotonów oświetlających złącze dla kontaktu W-Si oraz W-GaAs. Ekstrapolacja prostych do przecięcia z osią $h\nu$ wyznacza wartości barier potencjału $q\Phi_{Bn}$.



Laboratorium Fotowoltaiki



Rys.5



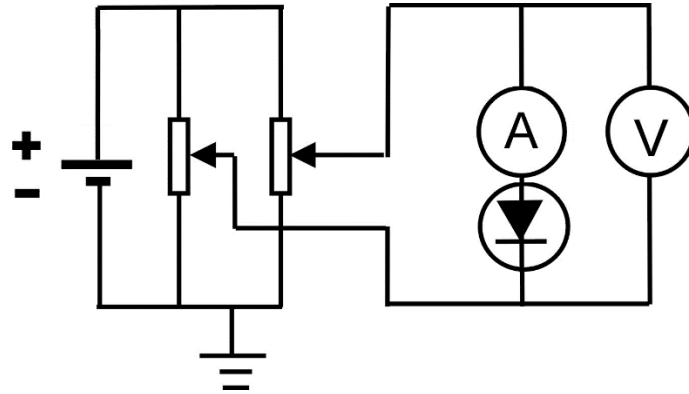
Rys.6



Przebieg ćwiczenia

I. Wyznaczenie wysokości bariery potencjału z pomiarów charakterystyki I-V

1. Połączyć układ wg. schematu przedstawionego na Rys.1.

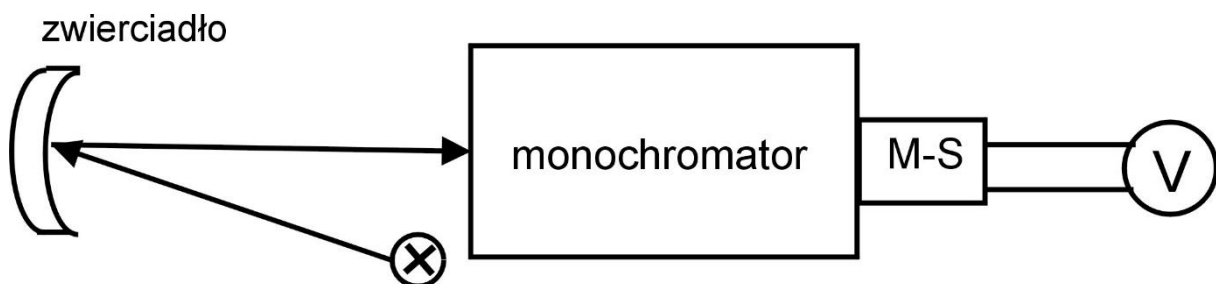


Rys.1. Schemat makiety układu polaryzacji diody. Amperomierz – miernik analogowy V 623 klasy 2, woltomierz – miernik cyfrowy

2. Zmieniając napięcie przy pomocy odpowiednich potencjometrów w makiety zmierzyć charakterystykę $I - V$ badanego kontaktu w kierunku przewodzenia, nie przekraczając wartości prądu $I = 1$ [mA] zaś w kierunku zaporowym aż do napięcia 0,8[V]. W kierunku przewodzenia wykonywać pomiary napięcia ustawiając kolejne wartości prądu równe 1nA, 1.5nA, 2nA, 5nA, 10nA, 15nA, 20nA i dalej analogicznie aż do wartości 1mA.

II. Wyznaczenie wysokości bariery potencjału z pomiarów efektu fotowoltaicznego.

1. Połączyć układ wg. schematu przedstawionego na Rys.2, lub ustawiając kontakt M-S naprzeciw szczeliny wyjściowej monochromatora.



Rys.2. Schemat układu do pomiaru charakterystyki widmowej fotodiody



Laboratorium Fotowoltaiki

2. Sprawdzić kalibrację monochromatora.

W tym celu należy:

- zastosować jako źródło promieniowania laser półprzewodnikowy.
- otworzyć szczeliny monochromatora.
- ustawić na skali monochromatora długość fali odpowiadającą długości fali emitowanej przez laser
- ustawić badany detektor naprzeciw szczeliny wyjściowej monochromatora, tak, aby optymalnie go oświetlić
- połączyć wyjście detektora z wejściem miernika V623. Wybrać przycisk μA (pomiar prądu)
- regulując pokrętką służącą do wyboru długości fali znaleźć takie położenie, przy którym fotoprąd detektora jest maksymalny.
- za pomocą śruby służącej do kalibracji monochromatora ustawić na skali długość fali równą długości fali emitowanej przez laser.

3. Zmierzyć charakterystykę widmową fotoprądu badanego kontaktu M-S.

W tym celu należy:

- a) zmierzyć zależność fotoprądu I_{ph} na wyjściu badanego kontaktu M-S od długości fali w zakresie od 500nm do długości fali, przy której sygnał spadnie do poziomu tła.
- b) zmierzyć zależność spektralną fotonapięcia U_T na wyjściu detektora odniesienia. Fotonapięcie to jest mierzone przy pomocy nanowoltomierza selektywnego 233-7. Aby wykonać pomiar przy pomocy tego nanowoltomierza, należy włączyć modulator, który jest ustawiony przed szczeliną wejściową monochromatora. Modulator uruchamia się popychając skrzydełka tarczy modulatora zgodnie z kierunkiem strzałki zaznaczonej na jego obudowie. Zanim wykonamy pomiary, ustawiamy pokrętkę czułości nanowoltomierza na maksymalnym zakresie i kolejno zmniejszamy zakres pomiarowy aż do osiągnięcia wychylenia wskazówki ok. $1/3$ skali.
- c) Podzielić fotoprąd na wyjściu detektora M-S przez fotonapięcie z detektora odniesienia. Tak otrzymana wielkość jest wielkością proporcjonalną do czułości R fotodetektora M-S (w jednostkach względnych).

III. Wyznaczenie wysokości bariery z pomiarów $C - V$.



Zmierzyć charakterystykę $C - V$ nieoświetlonego kontaktu M-S

1. Pomiaru charakterystyki $C - V$ należy dokonywać przy użyciu układu zasilającego, podobnego jak ten przedstawiający na rys. 1. makietę do pomiarów I-V oraz mostka pojemności BOONTON 72BD (odczyt pojemności). Napięcie z tego układu zasilającego jest podawane na mostek pojemności do gniazd znajdujących się na tylnej płycie mostka. Woltomierz podłączony do tych gniazd umożliwia odczyt ustawianego napięcia polaryzującego kontakt M-S.
 - a) Ustawić zakres mostka pojemności na AUTO, oraz podłączyć przewody rozgałęziacza do wyjść TEST HI (czerwony przewód) i LO (zielony przewód). Następnie do rozgałęziacza podłączyć kabel koncentryczny (Uwaga: nie podłączać detektora!)
 - b) Za pomocą pokrętki ZERO ustawić początkową wartość pojemności przewodów doprowadzających i zanotować wartość.
 - c) Podłączyć kabel koncentryczny do gniazda BNC badanego detektora.
 - d) Sprawdzić, czy dioda jest podłączona w kierunku zaporowym. W tym celu należy zmierzyć pojemność diody bez polaryzacji i po spolaryzowaniu napięciem 0,1[V]. Dioda spolaryzowana w kierunku zaporowym ma pojemność mniejszą niż bez polaryzacji.
 - e) Wykonać pomiary charakterystyki $C - V$ dla polaryzacji zaporowej zmieniając napięcie od 0 do 2V co 0,1V.

Opracowanie wyników

ad.I

1. Na podstawie wykonanych pomiarów narysować charakterystykę $I - V$ w skali półlogarytmicznej.
2. Wyznaczyć na jej podstawie współczynnik idealności n oraz prąd nasycenia I_s .
3. Wyliczyć gęstość prądu nasycenia a na podstawie wyznaczonej wartości J_s wyliczyć wysokość bariery $q\Phi_{Bn}$ przekształcając odpowiednio wzór (3). Przyjąć wartość powierzchni złącza i stałej Richardsona w zależności od badanego detektora odpowiednio:

- dla fotodiody GaAsP/Au

$$s = 2,26 \cdot 2,26[\text{mm}^2] \text{ (półprzewodnik typu n),}$$

$$A^* = 2,5[\text{A}/(\text{cm}^2\text{K}^2)]$$

$$E_g(300\text{K}) = 1.812[\text{eV}]$$

$$q\Phi_{Bn} = (0,5 \div 0,7)E_g = (0,9 \div 1,29)[\text{eV}]$$



Laboratorium Fotowoltaiki

$$\lambda_{max} = 610[\text{nm}]$$
$$\Delta\lambda = (190 \div 680)[\text{nm}]$$
$$\varepsilon_s = 13$$

- dla fotodiody Si/Au; $s = 0,875[\text{mm}^2]$ (półprzewodnik typu p), $A^* = 32[\text{A}/(\text{cm}^2\text{K}^2)]$.

ad.II

- Na podstawie wykonanych pomiarów narysować wykres $\sqrt{\frac{I_{ph}}{U_T h\nu}} = f(h\nu)$.
- Wyznaczyć przy pomocy wykresu wysokość bariery $q\Phi_{Bn}$.
- Porównać tę wysokość bariery z wysokością otrzymaną metodą I. Przedyskutować możliwe źródła rozbieżności uzyskanych wyników.

ad III.

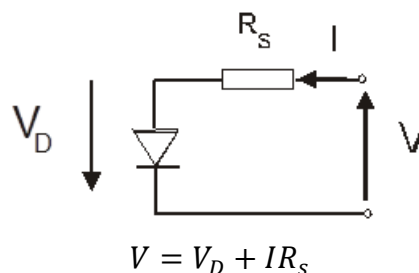
- Na podstawie wykonanych pomiarów narysować charakterystykę $\frac{s^2}{c^2} = f(V)$ (pamiętać, że napięcie jest ujemne, ponieważ pomiar był wykonywany przy polaryzacji zaporowej).
- Z nachylenia prostoliniowej części charakterystyki wyznaczyć koncentrację płytkich domieszek (donorów) N_D przy wykorzystaniu wzoru (8) zaś z przecięcia z osią napięcia - potencjał wbudowany V_{bi} .
- Korzystając ze wzorów (9) i (10) obliczyć V_n , N_c a następnie korzystając ze wzoru (1) - $q\Phi_{Bn}$. Przyjąć $T = 300[\text{K}]$.

Nie zapominać o wyliczeniu niepewności!

Dodatkowe wzory do wykonania sprawozdania.

Wyznaczenie oporności szeregowej złącza półprzewodnikowego i współczynnika idealności.

Obwód zastępczy dla rzeczywistego złącza p-n z opornością szeregową przedstawia rys.3:



Rys.3



Laboratorium Fotowoltaiki

Prąd płynący przez złącze :

$$I = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (\text{I})$$

gdzie n -współczynnik idealności złącza, I_0 prąd nasycenia.

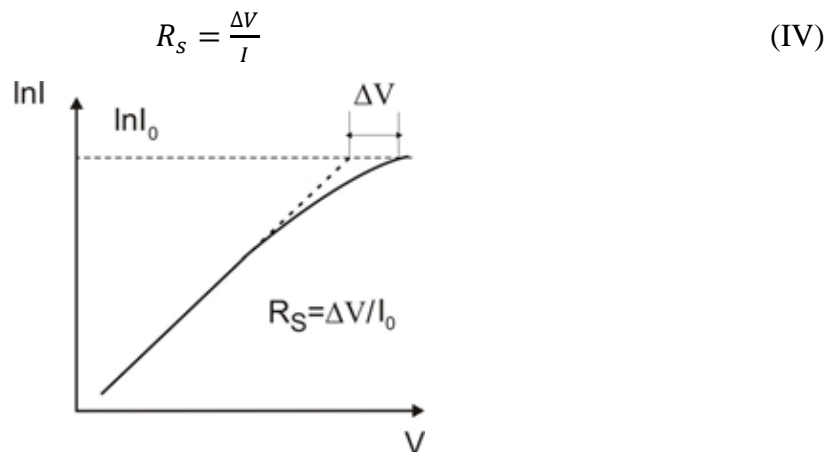
Współczynnik n obliczamy korzystając z wykresu $\ln(I) = f(V)$ (dla $V > 3kT/q$):

$$n = \frac{q}{kT \frac{d \ln(I)}{dV}} \quad (\text{II})$$

lub jeśli rysujemy wykres $\lg(I) = f(V)$

$$n = \frac{q}{2,303kT \frac{d \lg(I)}{dV}} \quad (\text{III})$$

Oporność szeregową obliczamy korzystając z wykresu $\ln(I) = f(V)$ lub $\lg(I) = f(V)$ dla dużych napięć w kierunku przewodzenia. Z odchylenia tego wykresu od linii prostej dla dużego prądu I mamy (patrz rys.4) :



Rys. 4. Sposób wyznaczenia oporności szeregowej z charakterystyki $\ln(I) - V$.

Pytania kontrolne:

1. Kontakt metal-półprzewodnik (M-S)– diagram pasmowy.
2. Efekt fotowoltaiczny na kontakcie metal – półprzewodnik.
3. Pojemność kontaktu metal – półprzewodnik.
4. Metody wyznaczania bariery na złączu M-S.