

Ćwiczenie G1: Badanie własności krzemowego modułu fotowoltaicznego

1. Półprzewodnik typu p i typu n. Energetyczny model pasmowy półprzewodnika.

W ogniwach słonecznych wykorzystuje się tzw. *zjawisko fotowoltaiczne*, polegające na bezpośredniej przemianie energii fotonów promieniowania elektromagnetycznego w energię elektryczną. Materiałami, z których wykonuje się ogniwa słoneczne są półprzewodniki krystaliczne, polikrystaliczne lub amorficzne. Często stosuje się krzem (Si). Dzięki regularnej lub quasi-regularnej budowie sieci krystalicznej (półprzewodniki krystaliczne i polikrystaliczne), mamy do czynienia z pasmową strukturą energetyczną. Z punktu widzenia własności fotoelektrycznych, spośród dozwolonych pasm energii elektronu, istotną rolę odgrywają pasma walencyjne i przewodnictwa, oddzielone przerwą energetyczną o szerokości E_g . W przypadku krzemu $E_g = 1,12$ eV. Rozmieszczenie elektronów na poszczególnych poziomach energetycznych określone jest przez funkcję Fermiego-Diraca:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T} + 1}} \quad (1)$$

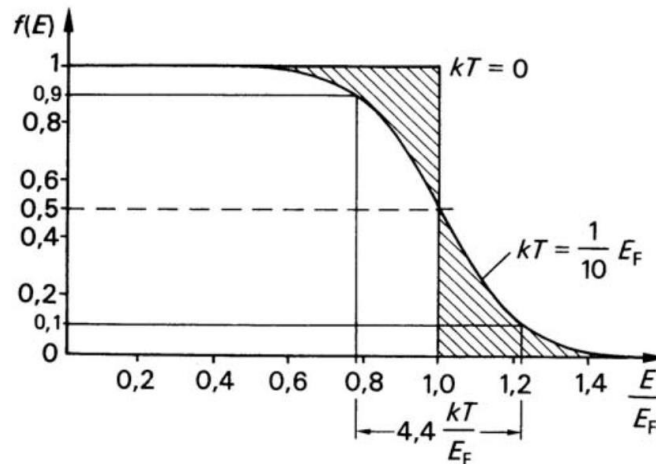
gdzie: $f(E)$ jest prawdopodobieństwem obsadzenia stanu o energii E , T – temperaturą bezwzględną, k_B - stałą Boltzmanna. Poziom E_F jest tzw. *Poziomem Fermiego*, dla którego $f(E_F) = 1/2$.

W temperaturze $T = 0$ wszystkie stany energetyczne pasma walencyjnego o energii $E < E_F$ są zajęte; dla wszystkich stanów wyższych niż E_F otrzymamy $f = 0$, a więc wszystkie stany pasma przewodnictwa są wolne. W temperaturze pokojowej $k_B T \approx 0,025$ eV co oznacza, że istnieje niezerowe prawdopodobieństwo zajęcia przez elektrony poziomów energetycznych w paśmie przewodnictwa – rys. 1. Ponieważ energie w paśmie przewodnictwa spełniają zależność $E - E_F \gg k_B T$, rozkład (1) redukuje się do postaci

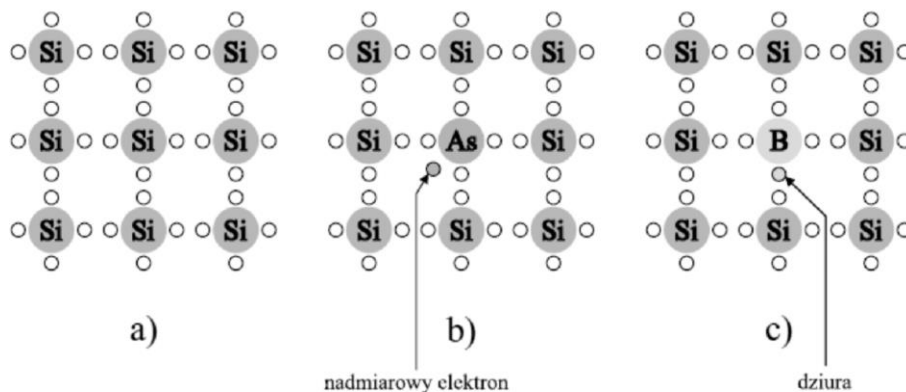
$$f(E) \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}} \quad (2)$$

analogicznej do rozkładu Boltzmanna. Wskutek ruchów termicznych niektóre elektrony zyskują energię wystarczającą do pokonania przerwy energetycznej i stają się swobodne. Każdy ze swobodnych elektronów pozostawia po sobie w paśmie walencyjnym *dziurę*, która może

zostać zajęta przez inny elektron walencyjny, a jego miejsce – jeszcze inny. Dziura porusza się więc swobodnie, zachowując się jak elektron o ładunku dodatnim. Mamy zatem do czynienia z *parami* elektron - dziura, przy czym ich koncentracja jest rzędu 10^{12} razy mniejsza niż elektronów walencyjnych – jest więc bardzo mała.

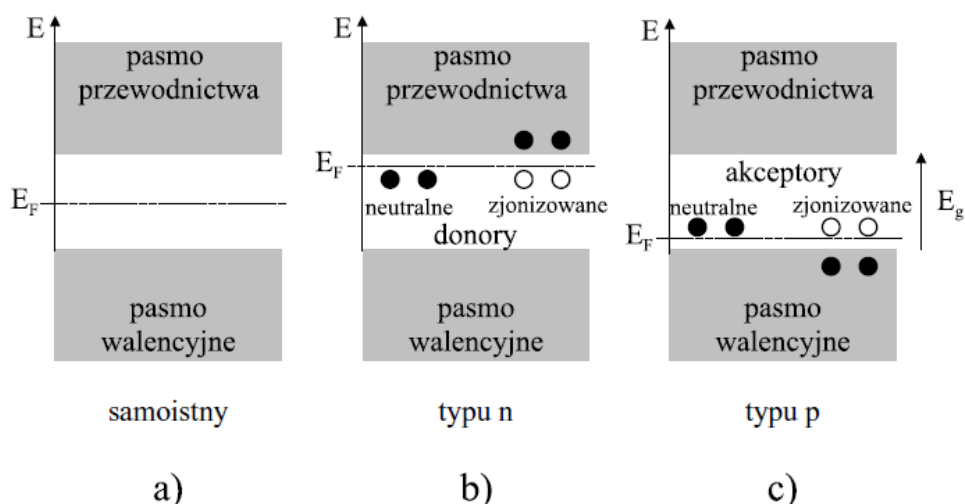


Rysunek 1. Funkcja rozkładu Fermiego - Diraca dla temperatury $T = 0\text{K}$ i temperatury $T > 0\text{K}$. Zakresowano przedział energii, w którym prawdopodobieństwo obsadzenia stanów obniża się z 0.9 do 0.1



Rysunek 2. Dwuwymiarowa struktura kryształu krzemu: (a) bez domieszek, (b) z atomem donorowym, (c) z atomem akceptorowym

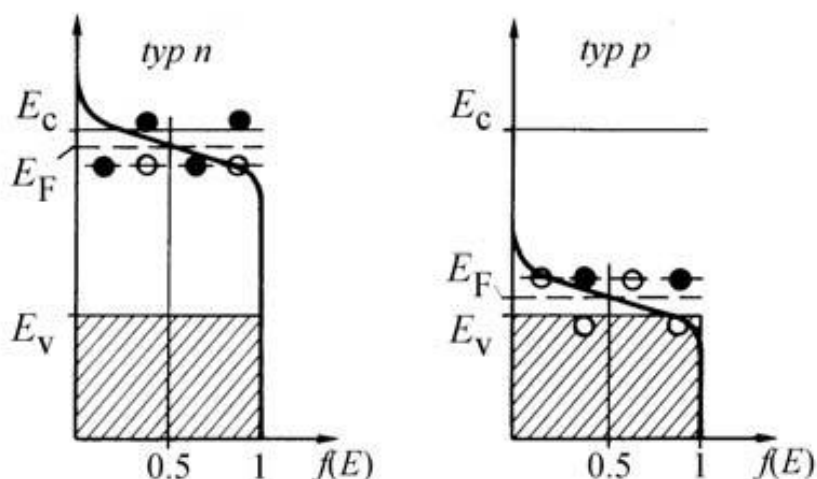
W widocznym na rysunku 2(a) szkicu fragmentu kryształu Si (zwanego półprzewodnikiem *samoistnym*) widzimy cztery elektrony walencyjne każdego atomu, tworzącymi kowalencyjne wiązania z pozostałymi atomami (w trzech wymiarach kryształ ma strukturę tetraedryczną – każdy atom znajduje się w tej samej odległości od atomów sąsiednich). Na rysunku 2(b) zamiast jednego atomu Si w strukturze umieszczony jest atom o pięciu elektronach walencyjnych (np. antymon Sb, fosfor P czy arsen As). W rezultacie powstał jeden nadmiarowy elektron.



Rysunek 3. Rozmieszczenie poziomów Fermiego w różnych typach półprzewodników. Energia mierzona jest od wierzchołka pasma walencyjnego

Nadmiarowy elektron jest bardzo słabo związany (jego energia wiązania wynosi ok. 0,05 eV), więc może poruszać się prawie swobodnie w objętości kryształu – atom z pięcioma elektronami walencyjnymi nazywa się *donorem*.

Jeżeli atom krzemu zastąpić atomem z trzema elektronami walencyjnymi (np. boru B, glinu Al, galu Ga), powstanie struktura z niedoborem jednego elektronu – rys. 2(c). Z kolei dziurę może wypełnić dowolny elektron walencyjny, co prowadzi do pozornego, swobodnego jej ruchu (atom z trzema elektronami walencyjnymi nazywa się *akceptorem*). Krzem można domieszkować donorem bądź akceptorem, uzyskując półprzewodnik *typu n* lub półprzewodnik *typu p*. Przewodnictwo w półprzewodniku *typu n* jest więc elektronowe, w półprzewodniku *typu p* – dziurowe (dominujące nośniki ładunku nazywamy nośnikami *większościowymi*). Wskutek wzbudzenia termicznego w półprzewodnikach obu typów występują również małe koncentracje nośniki o przeciwnych znakach, zwanych *mniejszościowymi*. W rezultacie domieszkowania następują przesunięcia poziomu Fermiego. W półprzewodniku samoistnym leży on w środku przerwy energetycznej. W półprzewodniku *typu n* poziom Fermiego znajduje się poniżej poziomu donorowego, w półprzewodniku *typu p* – powyżej poziomu akceptorowego (rys. 3(a) - (c)). W półprzewodnikach domieszkowanych w temperaturze zera bezwzględnej wszystkie donory oraz akceptory są neutralne. Opór właściwy półprzewodników – podobnie jak półprzewodnika samoistnego – jest wówczas nieskończenie wielki. Wraz ze wzrostem temperatury następuje ich jonizacja, co powoduje gwałtowny wzrost gęstości nośników przewodnictwa. Gęstości te są – jak w przypadku półprzewodnika samoistnego – opisane funkcją rozkładu Fermiego - Diraca (rys. 4).



Rysunek 4. Rozkłady Fermiego - Diraca w półprzewodnikach typu n i p w niskich temperaturach

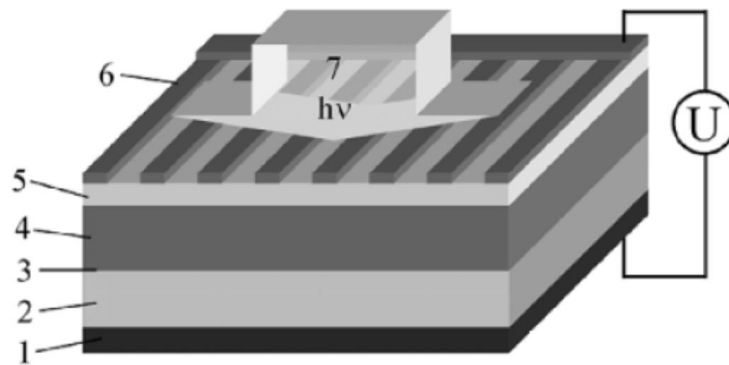
2. Efekt fotowoltaiczny w złączu p-n, ogniwo słoneczne.

Ogniwo fotowoltaiczne jest to przyrząd półprzewodnikowy, którego zasada działania jest oparta na wykorzystaniu złącza *p-n*.

Schemat budowy pojedynczego ogniwa pokazano na rys. 5. Składa się ono ze złącza *p-n*, dwóch elektrod oraz warstwy przeciwdrobnoczącej. Elektroda metalowa, która jest oświetlana ma odpowiedni kształt, tak aby powierzchnia czynna ogniwa była jak największa. Złącze *p-n* powstaje poprzez zetknięcie półprzewodnika typu *p* z półprzewodnikiem typu *n*. W wyniku dyfuzji elektronów z obszaru *n* do obszaru *p* i dziur z obszaru *p* do obszaru *n* powstaje ładunek przestrzenny, który wytwarza wewnętrzne pole elektryczne w obszarze złącza.

Jeżeli złącze zostanie oświetlone, fotony generują pary nośników ładunku: dziury i elektrony. Dziury unoszone w wewnętrznym polu elektrycznym podążają w kierunku półprzewodnika typu *p*, a elektrony w kierunku półprzewodnika typu *n*. Schemat działania baterii słonecznej przedstawiono na rys. 6.

Gdy elektrody nie są ze sobą połączone, to w wyniku oświetlenia w półprzewodniku typu *n* gromadzą się ładunki ujemne, a w typu *p* dodatnie. Taki rozkład ładunku wytwarza różnicę potencjału nazywaną napięciem obwodu otwartego U_{OC} (ang. *open circuit voltage*).

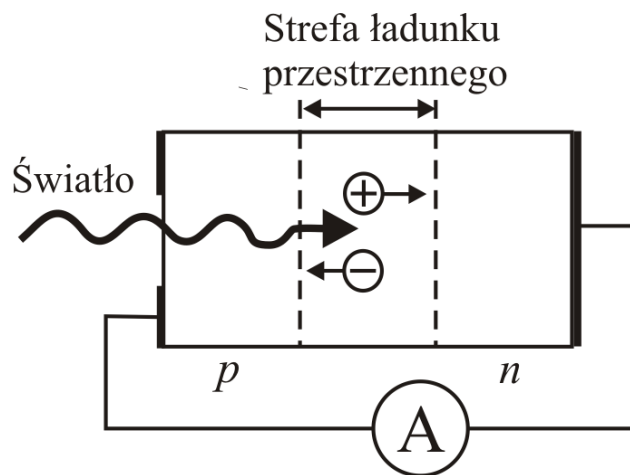


Rysunek 5. Schemat ogniwa słonecznego: 1 – nieoświetlona elektroda; 2 – półprzewodnik typu n; 3 – złącze p-n; 4 – półprzewodnik typu p; 5 – warstwa przeciwodblasiwa; 6 – oświetlana elektroda; 7 – fotony o energii $h\nu$ padające na ogniwo.

Gdy elektrody ogniwa są zwarte przez amperomierz, tak jak na Rys. 6, wówczas napięcie jest równe zero ($U = 0 \text{ V}$) i przez ogniwo przepływa prąd zwarcia I_{SC} (ang. *short circuit current*) generowany światłem. Gęstości prądu zwarcia jest zdefiniowana wzorem:

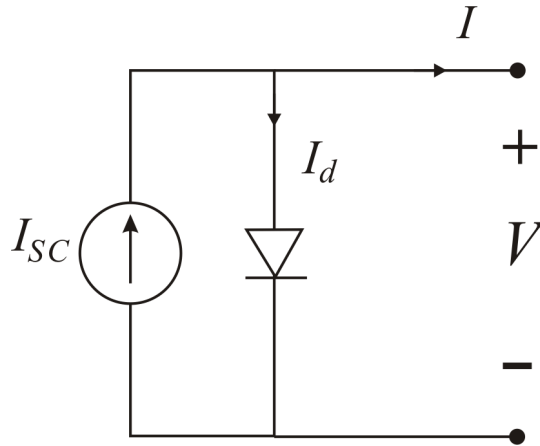
$$E_{sc} = \frac{I_{sc}}{A} \quad (3)$$

gdzie A jest powierzchnią aktywną fotoogniwa. Prąd ten jest zależny od parametrów materiałowych półprzewodnika i konstrukcji ogniwa.



Rysunek 6. Schemat działania złącza p-n jako fotoogniwa.

Natomiast gdy elektrody fotoogniwa są rozwarne ładunek równoważny ładunkowi mniejszościowych nośników ładunku, które przepłyną na drugą stronę złącza i zrekombinują z nośnikami przeciwnego znaku, spowoduje powstanie różnicy potencjałów zwanej napięciem otwartego obwodu U_{OC} (ang. *open circuit voltage*).



Rysunek 7. Układ zastępczy fotoogniwa.

W sytuacji, gdy oświetlenie produkuje dodatkowe nośniki, ale nie zmienia nic w mechanizmie transportu, charakterystyka prądowo-napięciowa oświetlonego złącza ma postać (zasada superpozycji):

$$I = I_{sc} - I_d \quad (4)$$

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{eV}{Ak_B T}} - 1 \right) \quad (5)$$

gdzie: A – współczynnik idealności złącza i I_d – prąd płynący przez diodę I_0 – prąd nasycenia (zależą od dominującego mechanizmu transportu w złączu).

Z tej zależności wynika relacja między napięciem otwartego obwodu a prądem zwarcia, gdyż dla $I=0$, $V=U_{oc}$ i stąd:

$$U_{oc} = \frac{Ak_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \cong \frac{Ak_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (6)$$

Ze wzrostem I_{sc} wzrasta SEM (wg prawa logarytmicznego). Jednocześnie maleje wysokość bariery potencjału w złączu $p-n$. Kiedy bariera jest rzędu $k_B T$, wzrost SEM ustaje. Wynika stąd, że SEM nie może przewyższać stykowej różnicy potencjałów pomiędzy obszarami p i n .

Dla najkorzystniejszego przypadku (bez oświetlenia) poziom Fermiego położony jest w pobliżu krawędzi pasm energetycznych:

$$U_{0,max} \approx E_g/e,$$

Np. german Ge: $V_{0,max} \approx 0,6$ V, krzem Si: $U_{0,max} \approx IV$

Absorpcja fotonów w ogniwach słonecznych wywołuje przejścia elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa (absorpcja podstawowa). Energia E_{ph} zaabsorbowanego fotonu musi być większa od przerwy energetycznej E_g półprzewodnika:

$$E_{ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} > E_g \quad (7)$$

gdzie: ν jest częstością drgań fali elektro-magnetycznej, λ długością fali świetlnej, a c jest topredkość światła w próżni.

Po przejściu elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa powstaje para nośników ładunku: elektron i dziura.

3. Charakterystyka prądowo-napięciowa.

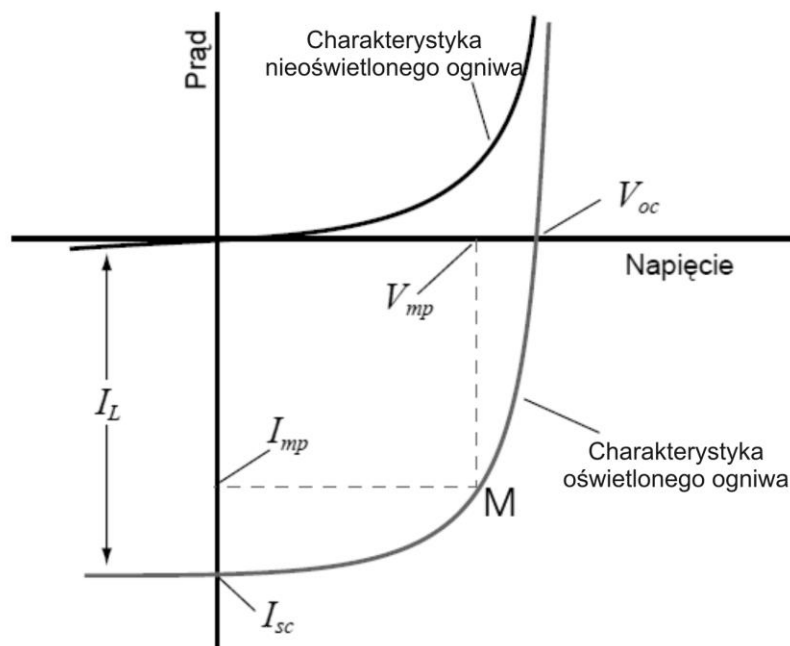
Określenie podstawowych parametrów ogniwa fotowoltaicznego uzyskuje się poprzez badanie charakterystyki prądowo-napięciowej. O właściwościach fotowoltaicznych ogniwa decyduje kształt charakterystyki prądowo-napięciowej $I(V)$ w IV ćwiartce układu współrzędnych.

Charakterystyka prądowo-napięciowa dla idealnego fotoogniwa powinna mieć kształt prostokąta o bokach I_{sc} i U_{oc} . W praktyce nie spotykamy idealnych fotoogniw. Maksymalna moc rzeczywistego ogniwa jest zawsze mniejsza od mocy idealnego ogniwa $P_{id}=I_{sc}U_{oc}$, gdyż praktycznie nigdy nie można osiągnąć charakterystyki prostokątnej. Współrzędne punktu M (rys. 9) pozwalają wyznaczyć moc maksymalną:

$$\text{Moc maksymalna. ogniwa: } P_{max} = I_{mp}U_{mp} \quad (8)$$

$$\text{Moc idealna: } P_{id} = I_{sc}U_{oc} \quad (9)$$

I_{sc} – prąd zwarciovyy (**SC** – *short circuit current*), U_{oc} – napięcie otwartego obwodu (**OC** – *open circuit voltage*)



Rysunek 8. Jasna i ciemna charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa i parametry określające wydajność ogniwa.

4. Moc i sprawność ogniwa słonecznego, współczynnik wypełnienia FF.

Od wartości parametrów I_{sc} i U_{oc} zależy wydajność ogniwa. Zauważmy bowiem, że wydajność konwersji fotowoltaicznej określa stosunek maksymalnej mocy wytwarzanej w ogniwie do mocy promieniowania padającego na to ogniwo:

$$\eta = \frac{I_{mp}U_{mp}}{E \cdot A} * 100 \% \quad (10)$$

gdzie: η – sprawność ogniwa, E – natężenie promieniowania padającego na ogniwo [W/m^2],
 A – pole powierzchni ogniwa

Przyjęto, że maksymalną moc wyraża się poprzez tzw. współczynnik wypełnienia FF (rys. 8)

$$FF = \frac{I_{mp}U_{mp}}{I_{sc}U_{oc}} \quad (11)$$

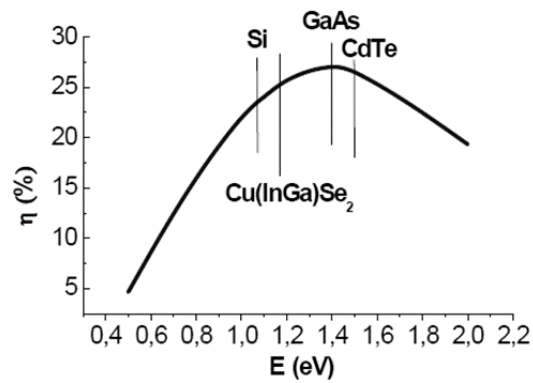
skąd wynika, że:

$$\eta = \frac{I_{sc}U_{oc}FF}{E \cdot A} * 100 \% \quad (12)$$

Wyrażenie (12) określa nominalną wydajność konwersji ogniwa.

Najważniejsze czynniki, które wpływają na wydajność ogniwa. Wartość prądu zwarcia zależy od tego, ile fotonów zostanie zaabsorbowanych w ogniwie, czyli od natężenia światła, a także

od wartości przerwy energetycznej materiału. Zauważmy, że im mniejsza jest przerwa energetyczna, tym więcej fotonów ma szansę wytworzyć pary elektron-dziura, więc I_{sc} rośnie, gdy E_g maleje. Z drugiej strony, U_{oc} nie może być wyższe niż bariera na złączu, a więc jego maksymalna wartość jest ograniczona wartością przerwy energetycznej materiału absorbującego światło. Wynika stąd optymalna wartość przerwy energetycznej absorbera równa ok. 1,5 eV. Na rys. 9. przedstawiono teoretycznie obliczoną zależność maksymalnej wydajności ogniwa od przerwy absorbera, otrzymaną przy założeniu, że jedynym źródłem strat jest rekombinacja radiacyjna.



Rysunek 9. Maksymalna wydajność jednozłączowego ogniwa w funkcji E_g absorbera. Zaznaczono wartości przerwy różnych materiałów fotowoltaicznych