

## Wielozłączowe ogniwa słoneczne

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono przegląd różnych technologii ogniw słonecznych. W dalszej części pracy skoncentrowano się na ogniwach wytwarzanych z materiałów AIII-BV – wielozłączowych ogniwach słonecznych. Technologia takich ogniw jest rozwijana w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych. Wytworzono struktury wielozłączowych ogniw słonecznych oraz gotowe przyrządy.

**Abstract.** In this work a variety of solar cell technologies have been presented. AIII-BV multijunction solar cells have been subsequently described. The methodology of their production has been developed at the Institute of Electronic Materials Technology. So far the epi structures of multijunction solar cells and solar cells have been manufactured. **Multijunction solar cells**

**Słowa kluczowe:** ogniwa słoneczne, epitaksja, materiały AIII-BV, fotowoltaika.

**Keywords:** solar cell, epitaxy, III-V, photovoltaics.

doi:10.12915/pe.2014.05.49

### Wstęp

Jeszcze niedawno energia słoneczna stanowiła obszar zainteresowania tylko niewielkich firm, obecnie rynek fotowoltaiczny przekształcił się w dojrzały przemysł o zasięgu globalnym, zdominowany przez zdecydowanie mniejszą liczbę producentów. Firmy zajmujące się wytwarzaniem ogniw pracują nad znalezieniem sposobu na przekształcanie energii słonecznej w energię elektryczną możliwie jak najniższym kosztem całkowitym za kilowatogodzinę. Wartość światowego rynku energii słonecznej (włączając w to: moduły, komponenty systemowe oraz instalacje) wzrosła z 2,5 miliarda dolarów w roku 2000 do 71,2 miliarda dolarów w roku 2010 [1].

**Pierwsza generacja ogniw słonecznych**, określana również mianem **krzemowych ogniw fotowoltaicznych**, jest obecnie technologią najczęściej wybieraną w przypadku zastosowań naziemnych, stanowiąc więcej niż 85% rynku ogniw słonecznych. Rekordowe sprawności dla ogniw monokrystalicznych wynoszą obecnie 25%, jednakże komercyjnie dostępne mają sprawności poniżej 23%.

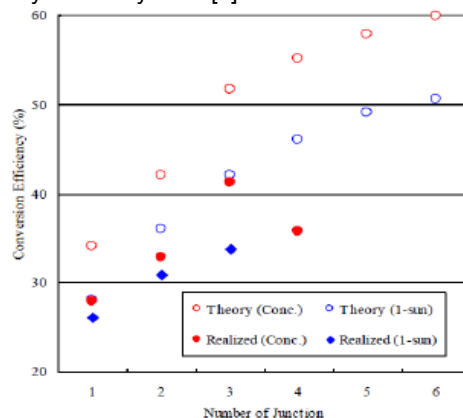
**Druga generacja materiałów fotowoltaicznych** opiera się na osadzonych cienkowarstwowo półprzewodnikach, takich jak: krzem amorficzny, tellurek kadmu, mieszanina selenu, galu, indu i miedzi czy siarczek miedzi i indu. Sprawności cienkowarstwowych ogniw słonecznych są niższe w porównaniu z konwencjonalnymi ogniwami słonecznymi i wahają się pomiędzy 6% a 13%, jednak koszt ich produkcji jest również niższy, a co za tym idzie koszt wytworzenia mocy elektrycznej może zostać zmniejszony do 0,7\$/wat [2].

**Trzecia generacja ogniw fotowoltaicznych** sama w sobie stanowi cel badawczy, którym jest osiągnięcie diametralnej poprawy sprawności przy jednoczesnym zachowaniu przewagi cenowej materiałów drugiej generacji. Takie podejście dotyczy ogniw fotochemicznych DSSC, ogniw nanokrystalicznych lub ogniw barwnikowych Gratzel'a, polimerowych ogniw organicznych, ogniw tandemowych (wielozłączowych), ogniw słonecznych z gorącymi nośnikami, ogniw wielopasmowych oraz termofotowoltaicznych [3].

**Wielozłączowe ogniwa słoneczne**, ze względu na wysoką sprawność przetwarzania energii elektrycznej, niski ciężar oraz odporność na promieniowanie, znajdują zastosowania w przemyśle lotniczym i kosmonautycznym. Jednakże, wysoki koszt produkcji do tej pory uniemożliwił ich naziemne zastosowanie w obszarze wytwarzania energii. Wraz z rozwojem epitaksji i koncentratorów słonecznych, **wielozłączowe** ogniwa stały się najbardziej obiecującą technologią umożliwiającą wytwarzanie elektryczności na szeroką skalę, co potwierdzają instalacje

CPV (concentrated photovoltaics) o łącznej mocy 23MW i planowane o mocach do 50MW. W ich przypadku, wysokie koszty produkcji może rekompensować wysoka sprawność oraz minimalne zużycie materiału. Rekordowe sprawności rzędu 44% odnotowano w przypadku metamorficznych oraz dopasowanych sieciowo trójzłączowych ogniw słonecznych przy 400-500 krotnym skoncentrowanym natężeniu światła. Dla porównania, aby wytworzyć podobną moc w przypadku fotowoltaicznych ogniw krzemowych o sprawności 20%, należałoby użyć ogniw o powierzchni około 1000 razy większej [4].

Wielozłączowe ogniwa słoneczne składają się z wielu warstw półprzewodników o różnych wartościach energii pasma wzbronionego, wykazując możliwość otrzymywania wysokich sprawności przetwarzania, rzędu ponad 50%. Rysunek 1 przedstawia sprawności przetwarzania rzeczywistych jednozłączowych i wielozłączowych ogniw słonecznych w porównaniu ze sprawnościami wyznaczonymi teoretycznie [5].



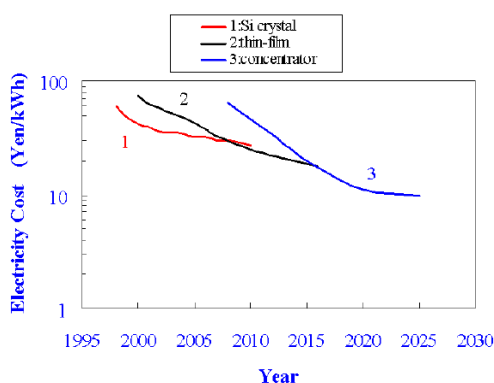
Rys. 1. Sprawności przetwarzania w przypadku jednozłączowych i wielozłączowych ogniw słonecznych w porównaniu ze sprawnościami wyznaczonymi [3].

Ogniwa wytwarzane są za pomocą metody MOCVD na podłożach germanowych o średnicy 4 lub 6 cali, a następnie są przycinane do wymiarów 70x40mm dla zastosowań w kosmosie, lub też 10x10mm dla zastosowań w fotowoltaice koncentrowanej.

W pierwszym przypadku, gdy ogniwo zasila satelitę w przestrzeni kosmicznej, maksymalne natężenie promieniowania słonecznego padającego na jego powierzchnię wynosi 1367W/m<sup>2</sup>. Stosunek ceny do osiągniętej mocy jest w tym przypadku bardzo duży i wynosi ok. 200euro/wat. Nie ma to jednak aż tak istotnego znaczenia, ponieważ najważniejszymi parametrami

układów zasilających pojazdy kosmiczne jest współczynnik mocy do masy ogniw oraz małe wymiary, co można osiągnąć tylko w ogniwach wielozłączowych o wysokiej sprawności [5].

Cztero- lub pięcioletkowe koncentrujące ogniwa słoneczne mają duży potencjał osiągnięcia sprawności przekraczającej nawet 50%. W Strategicznym Programie Badawczym dla Technologii Fotowoltaicznej, przytaczającym opinie ekspertów w dziedzinie fotowoltaiki Komisji Europejskiej przewiduje się, że w roku 2030 fotowoltaika skoncentrowana stanie się metodą produkcji modułów ogniw słonecznych wykorzystywaną w jednej trzeciej przypadków (40GW), obok krzemowej fotowoltaiki krystalicznej oraz fotowoltaicznych technologii cienkowarstwowych. Systemy CPV już obecnie produkują energię w cenie 0,09\$/kWh porównywalnej do typowych modułów krzemowych [7,8].



Rys. 2. Scenariusz zmniejszenia kosztów energii elektrycznej poprzez rozwój koncentrujących ogniw słonecznych [9].

Struktury wielozłączowych ogniw słonecznych wykonuje się techniką epitaksji odpowiednich warstw półprzewodnikowych. Najbardziej predysponowaną do zastosowań przemysłowych jest w tym przypadku metoda osadzania ze związków metaloorganicznych z fazy gazowej MOCVD (*ang. Metal Organic Chemical Vapor Deposition*).

Dostępne komercyjnie ogniwa słoneczne składają się najczęściej z trzech złączy InGaP/InGaAs/Ge, połączonych ze sobą szeregowo za pomocą złącz tunelowych. Każde ze złączy jest czułe na inny zakres promieniowania, zaczynając od fal krótszych a na dłuższych kończąc. Oznacza to, że materiały szerokoprzerwowe (najczęściej warstwa aktywna wykonana jest z InGaP) używane są jako warstwy górne, ponieważ absorbują krótsze fale i pozwalają na dostanie się dłuższych fal do niższych warstw struktury (kolejno InGaAs oraz Ge), gdzie są one konwertowane na prąd elektryczny. Każde ze złączy połączone jest z następnym za pomocą złącz tunelowych [10,11,12].

Bariera BSF (*back-surface field*) ma za zadanie pasywować interfejs pomiędzy bazą kolejnych ogniw oraz złączami tunelowymi łączącymi ze sobą kolejne złącza. W niektórych przypadkach pomaga ona również zahamować ucieczkę domieszek ze złącz tunelowych. Wyższa szybkość rekombinacji na interfejsie wpływa zarówno na foto-odpowiedź ogniwa jak i  $V_{oc}$  (napięcie obwodu otwartego). Najlepszej jakości BSF otrzymuje się stosując następujące parametry:

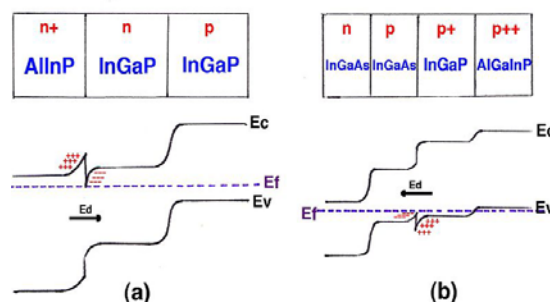
- stała sieci zbliżona do Ge,
- przerwa energetyczna  $E_g$  większa od  $E_g$  materiału bazy i emitera,
- wysoka koncentracja dziur (rzędu  $p=1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ),
- dobre właściwości transportowe nośników mniejszościowych,
- wysoka przezroczystość dla fotonów mających dostać się do poniżej leżącego złącza [13].

W przypadku dostępnych komercyjnie ogniw słonecznych, jako warstwę BSF stosuje się InAlP domieszkowaną cynkiem dopasowaną do Ge w przypadku złącza InGaP oraz InGaP domieszkowane cynkiem dopasowane do Ge w przypadku złącza InGaAs [13].

Warstwy okna mają za zadanie pasywować stany powierzchniowe nośników mniejszościowych. Stany te są pułapkami nośników mniejszościowych. Efekt ten charakteryzuje wielkość zwana szybkością rekombinacji  $S$ . Wielkość ta może wahać się od  $10^7$  cm/s dla emitera bez pasywacji do mniej niż  $10^3$  cm/s dla dobrej jakości interfejsu InAlP/InGaP. Duża wartość szybkości rekombinacji redukuje foto-odpowiedź ogniwa InGaP, głównie w obszarze długości fali o barwie niebieskiej. Materiał okna powinien charakteryzować się następującymi cechami:

- stała sieci bliska stałej sieci Ge,
- przerwa energetyczna dużo większa od przerwy energetycznej emitera,
- stosunkowo wysoka koncentracja elektronów (rzędu  $n \geq 18/\text{cm}^3$ ),
- jakość materiału wystarczająca do otrzymania niskiej szybkości rekombinacji.

Jako warstwy „window” w większości ogniw wytwarzanych komercyjnie stosuje się warstwę InAlP domieszkowaną krzemem dopasowaną krystalograficznie do Ge w przypadku złącza InGaP oraz InGaP domieszkowane krzemem dopasowane do Ge w przypadku złącza InGaAs. Na rysunku nr 3 pokazano schemat pasm energetycznych przykładowych warstw BSF oraz warstw okna. Warstwa okna powoduje zmniejszenie rekombinacji powierzchniowej, natomiast warstwa BSF osłabia proces rozpraszania nośników [12].



Rys. 3. Schemat pasm energetycznych a) warstwy okna i b) warstwy BSF [14].

### Konstrukcje ogniw słonecznych

Wykonanie każdego ze złączy ogniwa słonecznego o jak najwyższej sprawności wymaga spełnienia kilku zasadniczych reguł niezależnie od zastosowanego materiału:

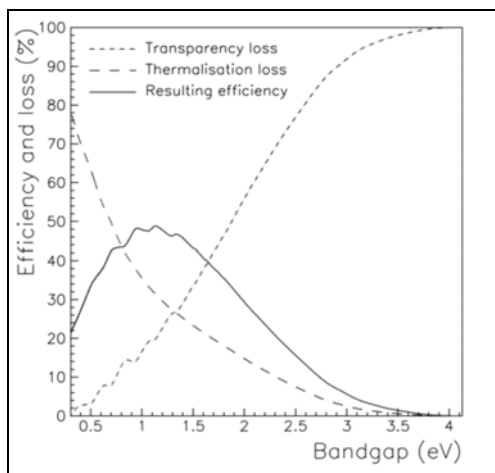
- grubość materiału, który będzie odpowiedzialny za absorbowanie światła powinien przekroczyć drogę, jaką będzie ono potrzebowało, aby jak największa jego część została zaabsorbowana [15];
- złącze powinno być płytke zarówno ze względu na drogę dyfuzji w emiterze jak i głębokość absorpcji światła, aby uniknąć tzw. martwej warstwy, na powierzchni ogniwa, gdzie światło będzie absorbowane nieproduktywnie [15];
- emiter powinien być mocno domieszkowany, w celu poprawy przewodnictwa do metalicznych kontaktów znajdujących się na krawędziach ogniwa; mocne domieszkowanie emitera pozwala również na lekkie domieszkowanie bazy, co przyczynia się do bardziej efektywnego zbierania nośników w jej neutralnym obszarze, nie powodując spadku napięcia układu otwartego ogniwa [15];

- odbicie światła od powierzchni powinno być zminimalizowane, w tym celu stosuje się specjalne warstwy antyrefleksyjne; są to warstwy składające się z materiału o współczynniku załamania światła o wartości pomiędzy tą, która charakteryzuje półprzewodnik, a współczynniku załamania powietrza; warstwy antyrefleksyjne dobiera się w taki sposób, aby zwiększyć generację fotoprądu dla określonego spektrum słonecznego [15].

W przypadku złącz wykonanych z GaAs oraz innych materiałów AIII BV, powinno doprowadzić się do zmniejszenia rekombinacji powierzchniowej, rekombinacji złącza oraz możliwie zminimalizować rezystancję szeregową.

Niezależnie od konstrukcji ogniwa słonecznego, maksymalna sprawność mocy ogniwa ograniczona jest stratami materiałowymi. W przypadku oświetlanego ogniwa słonecznego należą do nich straty zewnętrzne oraz straty wewnętrzne. Straty zewnętrzne związane są z odbiciem światła od powierzchni płytki oraz rezystancją zewnętrzną natomiast do strat wewnętrznych zalicza się te, które związane są z transportem elektrycznym oraz straty optyczne [16].

Straty optyczne spowodowane są słabym oddziaływaniem pomiędzy światłem i materiałem, a przede wszystkim niewydajną absorpcją światła. Straty transportowe spowodowane są niewystarczającym czasem życia nośników mniejszościowych oraz kilkoma rodzajami rekombinacji [16]. Do strat optycznych można przede wszystkim zaliczyć te spowodowane przezroczystością ogniwa dla fotonów posiadających energię mniejszą niż ich przerwa energetyczna. Wartość tej straty jest niska dla materiałów niskoprzerwowych oraz zwiększa się wraz ze zwiększaniem się ich przerwy energetycznej. Kolejną stratą optyczną związana jest z termalizacją elektronów, podczas której wzbudzone światłem nośniki o energii większej niż przerwa energetyczna  $E_g$  ulegają szybkiej termalizacji do krawędzi pasma, głównie poprzez kolizję z siecią krystaliczną. Tracona w ten sposób energia zamieniana jest w głównej mierze na ciepło. Największe straty energii obserwuje się w tym przypadku dla materiałów niskoprzerwowych. Straty spowodowane termalizacją oraz przezroczystością materiału powodują, że maksymalna wartość sprawności, jaka jest możliwa do otrzymania wynosi np. w przypadku InP 46.7 %. Rysunek 4 [16] pokazuje, jak straty optyczne te wpływają na sprawność uzyskiwaną w przypadku różnych materiałów (inne straty w tym przypadku zostały zignorowane).



Rys. 4. Wpływ termalizacji oraz przezroczystości materiału na sprawność ogniwa jednozłączowego w funkcji przerwy energetycznej [16].

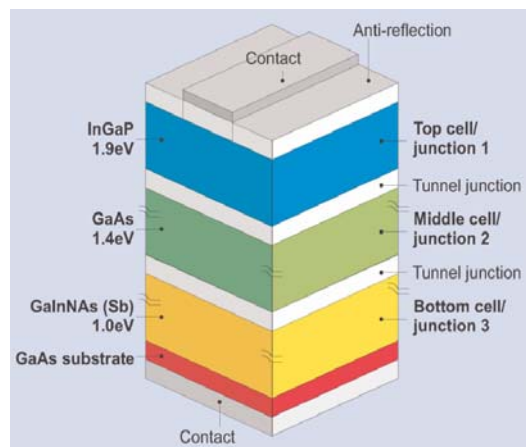
Straty związane z rekombinacją oraz transportem nośników mniejszościowych powodują, że maksymalna sprawność mocy, jaką można otrzymać z jednego złącza p-n bez koncentracji światła wynosi około 31 %. Gdy światło zostanie skoncentrowane na powierzchni ogniwa 1000 razy, wydajności dla 1, 2, 3 oraz 36 złącz wynoszą 37, 50, 56 oraz 72 % odpowiednio. Ostatnia wartość otrzymana jest dla ogniwa, które jest idealnie dopasowane do spektrum słonecznego [17].

#### Ogniwa słoneczne osiągające rekordowe sprawności

Większość ogniw słonecznych dostępnych komercyjnie składa się z trzech złączy p-n (InGaP, InGaAs oraz Ge) połączonych ze sobą za pomocą złącz tunelowych. Takie ogniwa charakteryzują się sprawnością mocy wynoszącą około 27-30 % i sprzedawane są przez firmy takie jak: CESI, Spectrolab, Azur Space.

Sprawności ogniw słonecznych mogą się dramatycznie poprawić, jeżeli uda się podzielić spektrum słoneczne na mniejsze części, z których każde będzie przetwarzane bardziej wydajnie poprzez kolejne złącza. Wydajności powyżej 59 % stają się możliwe do osiągnięcia dla ogniw 4-złączowych, natomiast dla 5 i 6-złączowych możliwe jest osiągnięcie sprawności powyżej 60 % [18].

W październiku 2012 roku firma Solar Junction ogłosiła, że udało im się otrzymać trój złączowe ogniwo słoneczne posiadające sprawność wynoszącą 44 % przy 947-krotnym skoncentrowaniu światła. Struktura składa się ze złączy InGaP (1,9 eV), GaAs (1,4 eV) oraz InGaAsN (Sb) (1 eV) połączonych ze sobą za pomocą złączy tunelowych i została osadzona na podłożu GaAs. Dzięki takiemu dobru kolejnych złączy udało się otrzymać ogniwo słoneczne bardziej dopasowane do widma słonecznego. Struktura epitaksjalna została wykonana za pomocą metody MBE, ponieważ dużo łatwiej jest otrzymać warstwę InGaAsN o wystarczająco wysokiej jakości krystalicznej, żeby mogła być wykorzystana w ogniwie słonecznym. Na rysunku 5 pokazano strukturę epitaksjalną wytworzoną przez firmę Solar Junction. „Sercem” struktury według autorów jest właśnie warstwa InGaAsN domieszkowana antymonem, ponieważ odpowiada ona za jakość krystaliczną warstw znajdujących się nad nią [semiconductor-14].

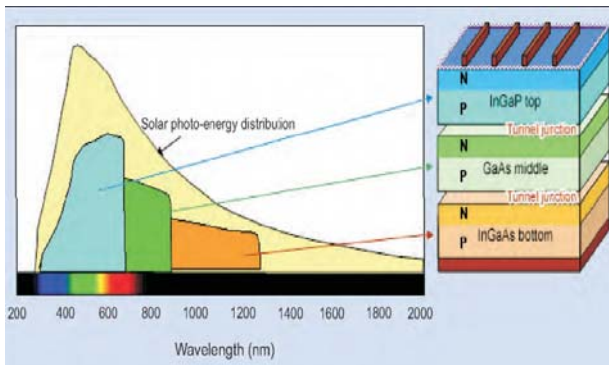


Rys. 5. Struktura epitaksjalna trój złączowego ogniwa słonecznego wytworzonego przez firmę Solar Junction [17].

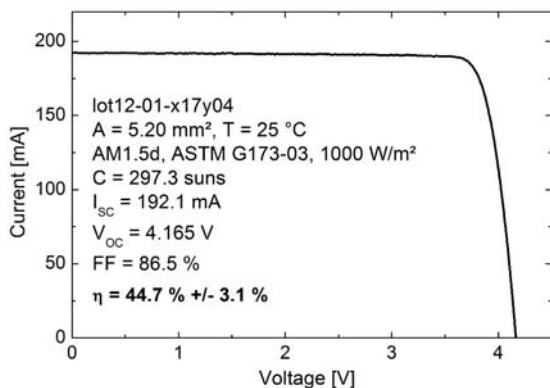
W Japonii firma Sharp otrzymała w grudniu 2012 roku trój złączowe ogniwo słoneczne, które charakteryzuje się sprawnością wynoszącą 37,7 % bez koncentracji światła. 360-krotne skoncentrowanie światła spowodowało podniesienie otrzymanej sprawności do 43,5 %. W strukturze epitaksjalnej wykonanej przez firmę Sharp, górne



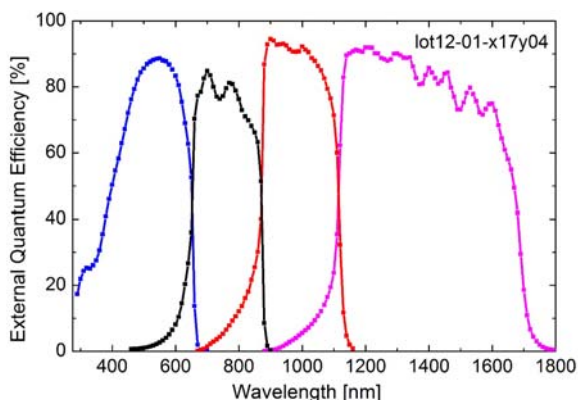
ogniwo wykonane było z InGaP, środkowe z GaAs a dolne z InGaAs. Połączenie kolejnych złącz nastąpiło dzięki zastosowaniu złącz tunelowych. Sharp zamierza sprzedawać ogniwa do zastosowań zarówno w kosmosie jak i w fotowoltaice koncentrowanej [17]. Na rysunku 6 pokazano strukturę epitaksjalną ogniwa wykonanego przez firmę Sharp oraz widmo słoneczne będące wykorzystywane przez kolejne złącza [semiconductor-14].



Rys. 6. Struktura epitaksjalna ogniwa słonecznego oraz fragment wykorzystywanego przez nią widma słonecznego [17].



Rys. 7. Charakterystyka I-V czterozłączowego ogniwa słonecznego wytworzonego we współpracy Instytutu Fraunhofera oraz firmy Soitec [17].



Rys. 8. Charakterystyka spektralna czterozłączowego ogniwa słonecznego wytworzonego we współpracy Instytutu Fraunhofera oraz firmy Soitec [17].

Na początku września 2013 roku Instytut Fraunhofera przy współpracy z firmą Soitec ogłosił pobicie światowego rekordu sprawności. Ogniwo zostało otrzymane dzięki dodaniu do typowo przez nich wytwarzanego trójzłączowego ogniwa słonecznego czwartego złącza. W tym celu zastosowano procedurę bondingu, która to pozwoliła na połączenie ze sobą dwóch struktur półprzewodnikowych składających się z dwóch złącz

idealnie dopasowanych do widma słonecznego. Według autorów nie byłoby możliwe wytworzenie takiej struktury o wysokiej jakości podczas jednego procesu epitaksji. Na rysunku 7 i 8 pokazano charakterystykę I-V oraz charakterystykę spektralną otrzymanego w ten sposób ogniwa słonecznego [17].

### Złącza tunelowe

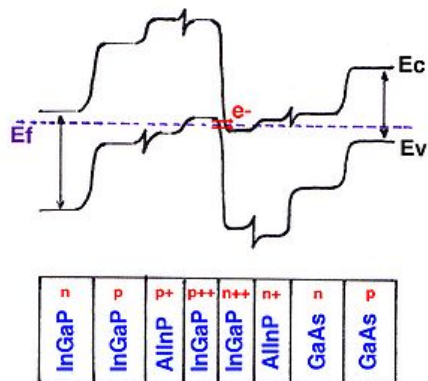
Żeby ogniwo działało optymalnie, dwa kolejne złącza są ze sobą połączone za pomocą złącz tunelowych. Gdyby ich nie było, jedno ze złącz p-n produkowałoby fotonapięcie, które miałyby przeciwny znak niż fotonapięcie wytwarzane przez drugie złącze p-n. Wypadkowe fotonapięcie byłoby w takim wypadku znacznie mniejsze. Złącze tunelowe składa się z bardzo silnie domieszkowanych warstw p++ oraz n++. Wytworzenie optymalnie działającego złącza tunelowego jest bardzo trudne, ponieważ musi się ono charakteryzować ściśle określonymi parametrami. Są to a) niska absorpcja optyczna, b) niski spadek napięcia oraz c) wysoka wartość szczytowa prądu. W przypadku fotowoltaiki skoncentrowanej (CPV) wysoka wartość szczytowej prądu ma szczególne znaczenie ze względu na znacznie podniesioną wartość wygenerowanego fotoprądu wyprodukowanego przez ogniwo słoneczne przy skoncentrowanym świetle [6].

Dodatkowo obszar ładunku przestrzennego dla złącza p++-n++ powinien być bardzo wąski i wynosić około 10 nm. Gdy złącze jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, charakterystyka złącza p-n jest „skrótowa” poprzez tunelowanie przez ten wąski obszar. Stąd taka charakterystyka złącza tunelowego zachowuje się bardziej jak rezystor dla gęstości prądu mniejszych niż wartość krytyczna, nazywana szczytową wartością prądu tunelowania, J<sub>p</sub>. Wartość prądu J<sub>p</sub> jest proporcjonalna do:

$$J_p \propto \exp\left(-\frac{E_g}{3kT}\right)$$

gdzie E<sub>g</sub> oznacza przerwę energetyczną i N<sup>\*</sup> = N<sub>A</sub>N<sub>D</sub>/(N<sub>A</sub>+N<sub>D</sub>) jest efektywną koncentracją domieszki [12].

Wartość J<sub>p</sub> musi być wyższa niż fotoprąd generowany przez ogniwo. Dla ogniw pracujących przy koncentracji 1000-krotnej, wartość ta wynosi około, J<sub>sc</sub>~14 A/cm<sup>2</sup>. Jeśli J<sub>p</sub><J<sub>sc</sub>, spadek napięcia znacznie wzrasta i staje się taki, jak w przypadku typowego złącza p-n [12]. W kilku ośrodkach na świecie udało się otrzymać wartości J<sub>p</sub> wynoszące więcej niż 1000 A/cm<sup>2</sup>. Tak wysokie szczytowe wartości prądu są możliwe do otrzymania jedynie w przypadku zastosowania bardzo wysokiej koncentracji domieszki na poziomie 10<sup>19</sup>-10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> [6].



Rys.9 Schemat pasm energetycznych złącza tunelowego [14].

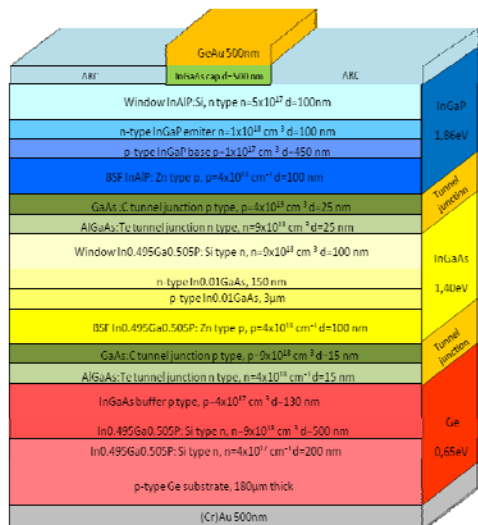
Wszystkie opisane wymogi dotyczące złącz tunelowych przysparzają problemów ze znalezieniem odpowiedniego materiału. Najbardziej odpowiednie do tego celu są

materiały szerokoprzemowe z domieszkowaniem których na odpowiednio wysokim poziomie jest duży problem, ponieważ energia aktywacji domieszek w półprzewodnikach szerokopasmowych jest typowo znacznie wyższa od analogicznych wartości parametrów dla półprzewodników wąskoprzemowych. Wysokie domieszkowanie jest w tym przypadku absolutnie niezbędne, ponieważ zależy od niego wartość prądu tunelowego. Rysunek 9 pokazuje schemat pasm energetycznych przykładowego złącza tunelowego. Ponieważ obszar zubożony jest wąski, elektrony mogą przez niego bez problemu tunelować.

### Struktury epitaksjalne ogniwa słonecznego

Od 2010 roku ITME uczestniczy w projekcie strategicznym POIG 01.01.02-00-015/09-00 pt. "Zaawansowane materiały i technologie ich wytwarzania", którego jednym z celów jest opracowanie technologii materiałów fotowoltaicznych wykorzystywanych w wysokowydajnych ogniwach wielozłączowych (Ge/GaAs/InGaP). W ramach projektu opracowano technologię wytwarzania struktury ogniwa słonecznych Ge/InGaP [18], Ge/InGaAs oraz Ge/GaAs/InGaP [19].

Wszystkie procesy wzrostu struktur epitaksjalnych ogniwa słonecznych wykonano na urządzeniu AIX 200/4 firmy AIXTRON. Gazami źródłowymi pierwiastków grupy V był fosforowodór (PH<sub>3</sub>) oraz arsenowodor (AsH<sub>3</sub>) natomiast grupy III trójmetylek galu (TMGa), trójmetylek aluminium (TMAI) oraz trójmetylek indu (TMIn). Jako gazu domieszkującego warstwy na typ n użyto silanu SiH<sub>4</sub>, dietylu teluru (DETE) natomiast na typ p dietylu cynku (DEZn) oraz bromku węgla (CBr<sub>4</sub>). Gazem nośnym był wodor. Na rys. 10 pokazano zdjęcie przykładowej struktury ogniwa słonecznego wytwarzanego w ITME.



Rys. 10. Struktura ogniwa słonecznego wykonanego w ITME

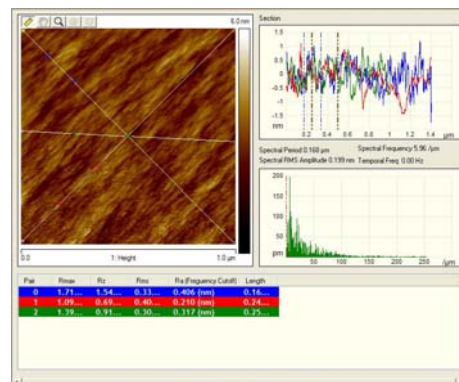
Wytworzenie ogniwa słonecznego charakteryzującego się możliwie najwyższą sprawnością wymaga zoptymalizowania technologii wytwarzania zarówno struktury epitaksjalnej jak i kolejnych kroków technologii processingu. Struktura epitaksjalna ogniwa wielozłączowego składa się z wielu warstw, z których każda ma ściśle określone zadanie.

Złącza tunelowe składają się z warstw p i n bardzo silnie domieszkowanych, aby uzyskać efekt tunelowania. Jako warstwę typu n stosuje się GaAs o koncentracji około  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [20] domieszkowaną telurem (źródłem domieszki jest dieetylu teluru), natomiast warstwa typu p wykonana jest z AlGaAs domieszkowany węglem (źródłem domieszki jest bromek węgla CBr<sub>4</sub>) o koncentracji około  $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  [21].

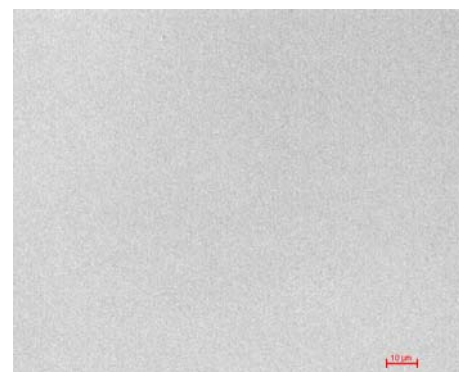
Koncentracja aktywnej domieszki została sprawdzona zarówno za pomocą pomiaru efektu Halla jak i metody C-V.

Na rysunku 11 pokazano obraz powierzchni struktury epitaksjalnej ogniwa otrzymany za pomocą mikroskopu sił atomowych oraz mikroskopu optycznego z kontrastem Nomarskiego. Wszystkie z warstw składowych struktury epitaksjalnej charakteryzują się chropowatością poniżej 0,3 nm, a cała struktura epitaksjalna chropowatością około 0,4 nm.

a)



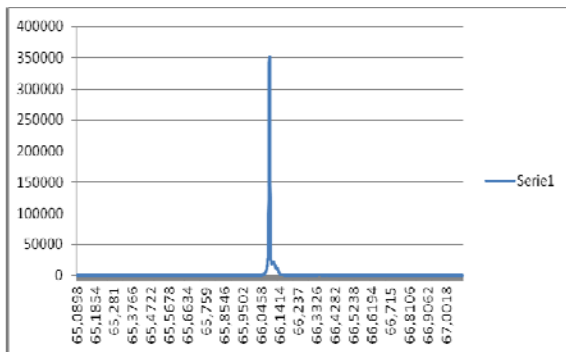
b)



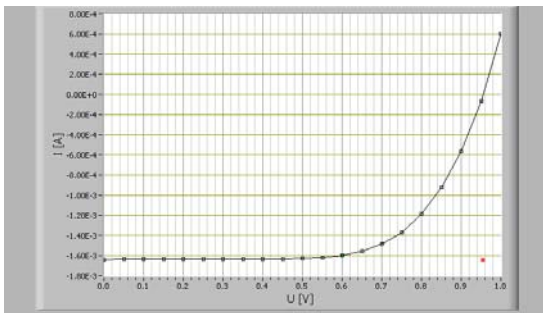
Rys. 11 a) Obraz powierzchni struktury epitaksjalnej dwuzłączowego ogniwa słonecznego uzyskany za pomocą mikroskopu sił atomowych, b) mikroskopu optycznego z kontrastem Nomarskiego.

Wszystkie warstwy struktury epitaksjalnej powinny charakteryzować się taką samą stałą sieci. Powoduje to zminimalizowanie zdefektowania struktury epitaksjalnej i co za tym idzie zmniejszenie prawdopodobieństwa rozpraszania nośników mniejszościowych. Na rysunku 12 pokazano przykładowy dyfraktogram rentgenowski warstwy InAlP dopasowanej sieciowo do podłoża Ge.

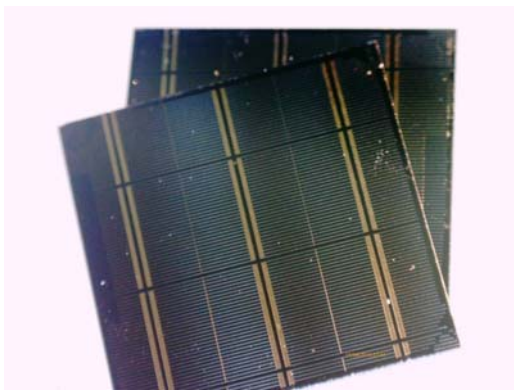
Wykonane prace optymalizacyjne doprowadziły do wykrycia struktury epitaksjalnej ogniwa dwu- oraz trójzłączowego, w których kolejne złącza zostały ze sobą połączone za pomocą złączy tunelowych AlGaAs:C/GaAs:Te. Struktury zostały poddane procesowi nałożenia kontaktów. Jako przednią elektrodę naniesiono stop Au-Ge, natomiast jako tylną tylko Au. Otrzymano ogniwo dwuzłączowe o sprawności mocy wynoszącej 12,8 %. Na rysunku 13 pokazano charakterystykę prądowo-napięciową ogniwa dwuzłączowego InGaAs/Ge. Ogniwo charakteryzuje się bardzo niską rezystancją szeregową oraz wysokim współczynnikiem wypełnienia wynoszącym 0,7. Rysunek 14 pokazuje zdjęcie ogniwa wykonanego w ITME.



Rys. 12. Dyfraktogram rentgenowski warstwy InAlP dopasowanej sieciowo do podłoża Ge



Rys. 13. Charakterystyka I-V ogniwa dwuzłączowego InGaAs/Ge.

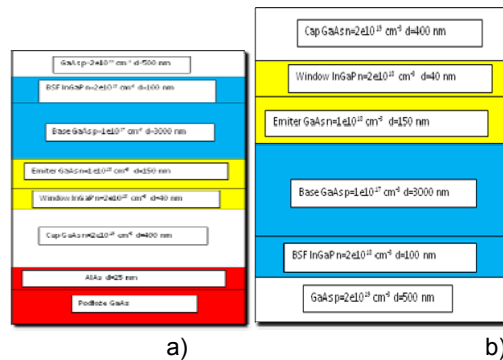


Rys. 14. Ogniwa dwuzłączowe wytworzone w ITME.

**Elastyczne ogniwa słoneczne wykonane z materiałów AIIIBV**

Jednym z głównych kosztów ogniw AIIIBV jest cena podłoża GaAs oraz Ge. W celu obniżenia wydatków, oprócz użycia koncentratorów, stosuje się metody polegające na odzyskiwaniu podłoża. Proces odrywania struktury epitaksjalnej od podłoża (ELO) wykonuje się poprzez chemiczne odtrawienie specjalnie do tego celu przeznaczonych warstwy przejściowej. Jako materiał na takie warstwy najczęściej stosuje się AlAs [22]. Metoda ELO pozwala na wytworzenie odwróconej struktury ogniwa i otrzymanie struktury metamorficznej na szczycie dopasowanych do siebie sieciowo złącz. Dodatkowo na tylnej stronie struktury można zastosować warstwę lustra, która spowoduje odbicie niezaabsorbowanych fotonów i ponadto pozwoli na zmniejszenie grubości warstwy bazy o około 50 %, co znacznie obniży koszty wykonanej struktury [23].

Rysunki 15 a i b pokazują struktury epitaksjalne jednozłączowego ogniwa słonecznego przed oraz po procesie odstawiania warstwy przejściowej AlAs.



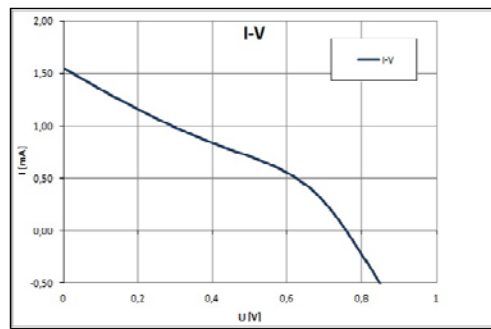
Rys.15. Struktura epitaksjalna ogniwa jednozłączowego GaAs a) przed odtrawieniem i b) po odtrawianiu warstwy przejściowej.

Processing tak wykonanej struktury jest trudniejszy w porównaniu z tym wykonywanym na strukturze epitaksjalnej ogniwa trójzłączowego, ale zastosowanie tylnej warstwy lustra i uzyskane dzięki temu uwięzienie fotonów rekompensuje tą różnicę. Dodatkowo można na takim podłożu kilkakrotnie wykonywać wzrost struktury epitaksjalnej. Otrzymane w ten sposób ogniwo słoneczne charakteryzuje się bardzo dużą elastycznością i może być użyte w wielu zastosowaniach.

Struktura epitaksjalna jednozłączowego ogniwa GaAs została wykrystalizowana za pomocą epitaksji z fazy gazowej z wykorzystaniem związków metaloorganicznych (MOVPE) na podłożu GaAs. Warstwą odtrawianą chemicznie była warstwa AlAs o grubości około 20 nm. Na rysunku 16 i 17 pokazano jednozłączowe ogniwo elastyczne GaAs wykonane w ITME oraz jego charakterystykę prądowo-napięciową. Sprawność otrzymanego ogniwa wynosi niecałe 2 %, jest to spowodowane niedoskonałą jeszcze technologią wykonywania kontaktów, nieodtrawioną warstwą podkontaktową oraz ich wysoką rezystancją.



Rys. 16. Elastyczne ogniwo słoneczne wykonane w ITME.



Rys. 17. Charakterystyka I-V elastycznego ogniwa słonecznego wykonanego w ITME.



## LITERATURA

- [1] K. Tanabe, *Energies* 2009,2.
- [2] M. Rita Narayan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 208-215.
- [3] Martin A. Green, *J Mater Sci: Mater Electron* (2007) 18:S15–S19.
- [4] P.Kumar and S. Chand, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2012; 20:377-415.
- [5] H. Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon and N. Karam *Energy Environ. Sci.*, 2009, 2, 174–192
- [6] I Garcia *et al* , *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** (2012) 045101.
- [7] Global Concentrated Photovoltaic Market Growth and Investments : Gitika Chanchlani, GlobalData <http://www.renewableenergyworld.com>
- [8] 50MW CPV Project Golmud, Qinghai. <http://suncorepv.com>
- [9] M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, M. Imaizumi, N. Kojima and Y. Ohshita, Present and Future of High Efficiency Multi-Junction Solar Cells, OSA/CLEO 2011.
- [10] M. Yamaguchi, T. Takamoto, A. Khan, M. Imaizumi, S. Matsuda and N. J. Ekins-Daukes, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2005; 13:125–132.
- [11] M. Yamaguchi *et al.*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 3068–3077.
- [12] A.B. Cristobal *et al.*, (eds), *Next Generation of Photovoltaics*, Springer Series in Optical Sciences 165, DOI 10.1007/978-3-642-23369-2\_1.
- [13] Friedman D, Kurtz S, Kibbler A, Olson J., *Proc. 22<sup>nd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 358-360 (1991). [14][http://en.wikipedia.org/wiki/Multijunction\\_photovoltaic\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Multijunction_photovoltaic_cell).
- [15] Jenny Nelson, *The physics of solar cells*, Imperial Collage Press 2009.
- [16] L. C. Hirst and N. J. Ekins-Daukes, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* (2010) [http://www.semiconductor-today.com/features/SemiconductorToday\\_Mar2013\\_Moving\\_forward.pdf](http://www.semiconductor-today.com/features/SemiconductorToday_Mar2013_Moving_forward.pdf)
- [18] E.Dumiszewska, P. Knyps, M. Wesolowski, M. Teodorczyk and W. Strupinski, *Acta Physica Polonica A*, Vol 120, No. 6-A (2011).
- [19] P. Knyps, E. Dumiszewska, M. Wesolowski, W. Strupiński, J. Kalbarczyk, M. Teodorczyk, „Pomiary elektryczne i optyczne ogniw fotowoltaicznych Ge/InGaAs/InGaP”, *Elektronika – konstrukcje, technologie, zastosowania* 2013/5.
- [20] E.Dumiszewska, P. Knyps, M. Wesolowski, W.Strupiński - EMRS Warsaw 2012, *Proceeding* 9 (2012)
- [21] E. Dumiszewska, P. Knyps, P. Caban, D. Teklińska, M. Wesolowski and W. Strupinski, 15th European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy (EWMOVPE XV), June 2nd – 5th, 2013, Aachen, Germany, *Extended Abstracts*, P-C-06, ISBN 978-3-89336-870-9.
- [22] A. T. J. von Nevtrik *et al.*, A diffusion and reaction related model of the epitaxial lift-off process, *J. Electrochem. Soc.* 154 (2007) D629-D635.
- [23] J. J. Shermer, G. J. *et al.*, Photon confinement in high-efficiency, thin film III-V solar cells obtained by epitaxial lift-off, *Thin Solid Films*, 511-512 (2006) 645-653.

---

**Autorzy:** dr inż. Ewa Dumiszewska, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [ewa.dumiszewska@itme.edu.pl](mailto:ewa.dumiszewska@itme.edu.pl); mgr inż. Piotr Knyps, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [piotr.knyps@itme.edu.pl](mailto:piotr.knyps@itme.edu.pl); dr Marek Wesolowski, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [marek.wesolowski@itme.edu.pl](mailto:marek.wesolowski@itme.edu.pl); dr inż. Włodzimierz Strupiński, Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [wlodek.strupinski@itme.edu.pl](mailto:wlodek.strupinski@itme.edu.pl)