

Ogniwa fotowoltaiczne różnych typów

Obecnie rozróżnianych jest co najmniej kilkadziesiąt typów konstrukcji ogniw słonecznych. W związku z tym istnieje także kilka różnych kryteriów ich podziału i klasyfikacji, np. według zastosowanego materiału bazowego, jego struktury, grubości lub rodzaju złącza półprzewodnikowego. Od typu zastosowanych ogniw zależą bezpośrednio parametry techniczne modułów PV, a w konsekwencji całej instalacji. Występujące obecnie rodzaje ogniw fotowoltaicznych posiadają też różne parametry ekonomiczne, co wpływa na opłacalność inwestycji w instalacje fotowoltaiczne

Klasyfikacja i kryteria podziału ogniw słonecznych

Ze względu na rodzaj materiału półprzewodnikowego ogniwa fotowoltaiczne można podzielić na takie, które są zbudowane z pierwiastków elementarnych oraz ze związków półprzewodnikowych. Do ogniw bazujących na półprzewodnikach elementarnych, czyli pierwiastkach IV grupy okresowej, zaliczają się najpopularniejsze ogniwa krzemowe (Si) – monokrystaliczne, polikrystaliczne czy amorficzne – a także rzadziej stosowane ogniwa germanowe (Ge). Półprzewodniki złożone to związki atomów grup III i V, takie jak arsenek galu (GaAs) czy fosforek indu (InP), oraz pewne kombinacje grup II i VI. Z tych ostatnich najczęściej wykorzystywane do produkcji ogniw słonecznych to tellurek kadmu (CdTe) i siarczek kadmu (CdS), które często są stosowane jednocześnie, tworząc odpowiednio bazę i emiter ogniwa PV. Godnymi uwagi są także niektóre związki półprzewodnikowe składające się z atomów grup I, III i VI, tak zwane chalkopiryty, do których zalicza się diselenek indowo-miedziowy (CuInSe₂). Materiał ten, jak również jego stop z pierwiastkiem galu (Ga), dobrze sprawdzają się jako podłoża ogniw słonecznych.

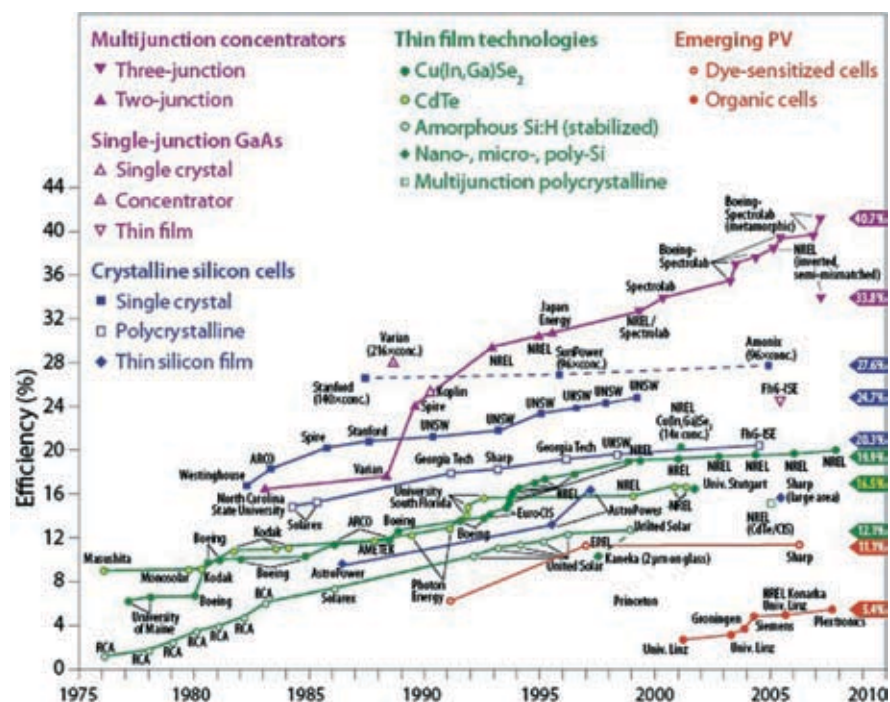
Zarówno dla ogniw zbudowanych z półprzewodników elementarnych, jak i związków półprzewodnikowych obowiązuje kolejny podział charakteryzujący typ złącza p-n. Możemy tu wyróżnić ogniwa homio- i heterozłączowe oraz te oparte na złączach p-i-n (przeważnie z krzemu amorficznego), a także na metal-półprzewodnik, czyli tzw. złączach Schottky'ego. Homiozłącze p-n złożone jest z dwóch odpowiednio domieszkowanych obszarów tego samego materiału, czyli szerokości przerwy energetycznych warstw typu p i typu n są tu jednakowe. W heterozłączu na-

tomiast mamy do czynienia z połączeniem dwóch różnych materiałów półprzewodnikowych o różnych wartościach szerokości przerwy energetycznych [1]. Do utworzenia heterozłącza półprzewodnikowego, które można wykorzystać w konstrukcji ogniw, niezbędne jest połączenie materiałów o określonych właściwościach. Półprzewodniki wchodzące w skład heterozłącza muszą mieć odpowiednio dobrane wartości przerwy energetycznych oraz współczynniki absorpcji. Warstwa wierzchnia ogniwa heterozłączowego (obszar emitera) powinna mieć szeroką przerwę energetyczną i niewielki współczynnik absorpcji dla

określonych długości fali, dzięki czemu światło może przedostać się do dolnej części (obszaru bazy). Obszar bazy natomiast, powinien charakteryzować się węższą przerwą energetyczną oraz dużą zdolnością absorpcji fotonów. Dlatego też w ogniwach heterozłączowych jako emiter często stosowany jest siarczek kadmu CdS o przerwie energetycznej równej 2,42 eV. Do prawidłowej budowy heterozłącza konieczne jest również aby wybrane dwa materiały, z których się składa, miały podobną strukturę krystaliczną i stałe sieciowe, a także jednakowe współczynniki rozszerzalności cieplnej [2].

Za kolejne kryterium podziału można przyjąć organizację struktury materiału, z którego wykonane zostało ogniwo słoneczne. Wyróżniane są tu trzy główne, podstawowe grupy z działu półprzewodników, a mianowicie: ogniwa monokrystaliczne, polikrystaliczne i amorficzne. Spośród materiałów polikrystalicznych wyróżniane są ponadto, ze względu na wielkość ziaren, struktury: mikrokrystaliczna, polikrystaliczna i multikrystaliczna.

Ostatnim kryterium podziału ogniw fotowoltaicznych jest ich grubość. Wyróżniane są ogniwa cienko-



Rys. 1. Szczytowe sprawności ogniw słonecznych różnych typów [4].

i grubowarstwowe. Minimalna grubość, konieczna do prawidłowej pracy ogniwa, zależy od wartości współczynnika absorpcji [3]. Dzięki wysokiemu współczynnikowi absorpcji danego materiału można otrzymać poprawnie działające ogniwa już przy grubościach kilku lub kilkunastu mikrometrów. Dla materiałów będących słabszymi absorbentami grubość konieczna jest większa. Przyjmuje się, że ogniwa cienkowarstwowe to te o grubości nieprzekraczającej $20\ \mu\text{m}$. Takie rozwiązanie w przypadku krzemu polikrystalicznego zapewnia absorpcję ponad 90% fotonów padających na powierzchnię ogniwa, podczas gdy w przypadku konstrukcji monokrystalicznej do osiągnięcia podobnego wyniku niezbędna jest grubość ogniwa od $200\text{--}300\ \mu\text{m}$. Niewielka grubość zastosowanych warstw oraz ich polikrystaliczna struktura zmieniają również właściwości fizyczne ogniwa, np. zwiększając znacznie ich plastyczność. Należy podkreślić, iż klasyfikacja ta nie zależy od technologii wytwarzania przyrządów.

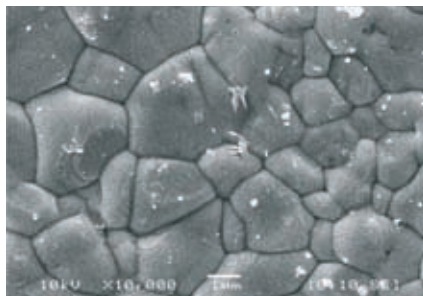
Rys. 1 [4] prezentuje maksymalne, uzyskane laboratoryjnie sprawności, ogniwa słoneczne różnych typów na przestrzeni ostatnich 30 lat.

Ogniwa polikrystaliczne i amorficzne

Mimo, iż ogniwa monokrystaliczne (Si, GaAs) charakteryzują się największą sprawnością, za wykorzystaniem polikrystalicznych przemawia tańsza technologia wytwarzania oraz możliwość nakładania warstw na różnorodne, tanie podłoża, co poszerza obszar ich zastosowań. Do najważniejszych ogniwa polikrystalicznych zaliczamy ogniwa wykonane z krzemu polikrystalicznego, z polikrystalicznego arsenku galu, ogniwa CIS ($\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$) i CIGS (CIS z dodatkiem galu), a także ogniwa kadmowo-tellurowe (CdTe/CdS).

Krzem polikrystaliczny

Krzem polikrystaliczny składa się z kilku mniejszych kryształów lub dużych ziaren (rys. 2). Tego typu budowa wprowadza do struktury obszary graniczne między ziarnami i kryształami, które hamują przepływ elektronów i powodują ich rekombinację z dziurami (rys. 3). Istnienie strefy ładunku buforowego na granicy ziaren powoduje, że wewnątrz struktury występuje wyłącznie pionowy przepływ ładunku, co upodabnia ją do połączenia równoległego wielkiej ilości ogniwa monokrystalicznych. W ten sposób ogniwo wytwarza napięcie V_{oc} równe napięciu pojedynczej komórki zaś prąd I_{sc} ogniwa jest sumą prądów wszystkich mikroogniw. Pozwala to na osiągnięcie stosunkowo wysokiej sprawności przyrządu przy obniżeniu wymagań odnośnie jakości



Rys. 2. Zdjęcie mikroskopowe struktury polikrystalicznej.

zastosowanego materiału. W zależności od wielkości tych ziaren i kryształów wyróżniane są trzy rodzaje takiej struktury [5]:

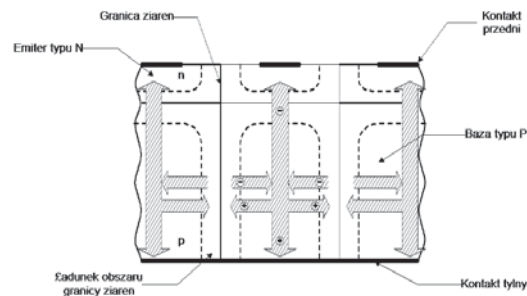
- mikrokryształiczna ($\mu\text{c-Si}$) – wielkość ziaren nie przekracza od $1\ \mu\text{m}$,
- polikryształiczna (pc-Si) – wielkość ziaren waha się od $1\ \mu\text{m}$ do $1\ \text{mm}$,
- multikryształiczna (mc-Si) – wielkość ziaren zawiera się od $1\ \text{mm}$ do $10\ \text{cm}$.

Krzem polikrystaliczny może być produkowany na różne sposoby. Najbardziej popularne metody komercyjne wykorzystują proces odlewania (ang. *cast*) czy też krzepnięcia kierunkowego (ang. *directional solidification*) oraz techniki wzrostu wstęgowego (ang. *ribbon growth*). W tych ostatnich wyeliminowane zostały straty materiału, związane z koniecznością cięcia go na płytki, które istnieją w pozostałych metodach. Mniej popularną metodą jest ciągłe odlewanie elektromagnetyczne (ang. *electromagnetic continuous casting - EMC*).

Tellurek kadmu i diselenek indowomiedziowy

Tellurek kadmu jest znakomitym, cienkowarstwowym materiałem polikrystalicznym o niemal idealnej wartości przerwy energetycznej równej $1,45\ \text{eV}$ i bardzo wysokim współczynniku absorpcji. Ogniwa kadmowo-tellurowe wykonane są na bazie CdTe, czyli półprzewodnika z grupy II-VI, którego wytwarzanie jest stosunkowo proste i niepociągające za sobą wysokich kosztów.

Znanych jest kilka metod otrzymywania tellurku kadmu, takich jak: osadzanie chemiczne z fazy gazowej CVD, osadzanie elektrolityczne, sitodruk czy technika bliskiej sublimacji. Najbardziej popularną z nich jest ta ostatnia. Tellurek kadmu osadzany jest w postaci cieniutkiej, kilku- mikrometrowej warstwy polikrystalicznej. W efekcie otrzymywane jest ogniwo będące heterozłączeniem tellurku kadmu CdTe i siarczku kadmu CdS. W praktyce preferowana jest grubość ogniwa tego rodzaju od 3 do $7\ \mu\text{m}$. Typową



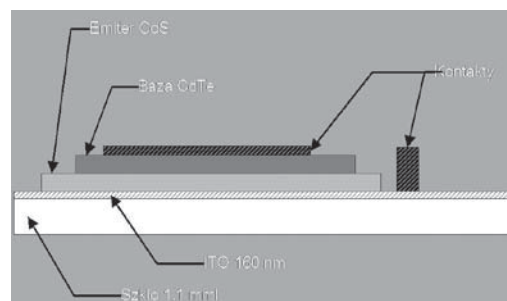
Rys. 3. Przekrój poprzeczny przez strukturę polikrystalicznego ogniwa PV.

konstrukcję ogniwa CdS/CdTe przedstawia schematycznie rys. 4.

Diselenek indowo-miedziowy ($\text{CuInSe}_2 - \text{CIS}$) jest materiałem charakteryzującym się bardzo wysokim współczynnikiem absorpcji, dzięki czemu aż 99% światła padającego na ten materiał jest absorbowane w pierwszym mikrometrze powierzchni [5]. Należy on do grupy związków o podstawowym składzie I-III-VI₂, gdzie I oznacza pierwiastek z pierwszej grupy (np. Cu, Ag), III jest pierwiastkiem z grupy trzeciej (np. Al, Ga, In), zaś VI to chalcogenek (np. Se, S). Wszystkie tego typu związki można zaliczyć do półprzewodnikowych, a kilka z nich dobrze sprawdza się w przemyśle fotowoltaicznym [6]. Ogniwa słoneczne tego typu wykonywane są głównie na bazach polikrystalicznych warstw CIS, jak również na podłożach ze stopów CuInSe_2 z zawartością galu (CIGS), który zwiększa przerwę energetyczną materiału.

Krzem amorficzny

Pomimo tego, że krzem amorficzny nie tworzy struktury krystalicznej i zawiera znaczną ilość defektów strukturalnych, za jego stosowaniem w przemyśle fotowoltaicznym przemawiają aspekty ekonomiczne. Materiał ten absorbuje promieniowanie słoneczne z czterdziestokrotnie większą sprawnością w porównaniu do krzemu monokrystalicznego. W związku z tym warstwa o grubości zaledwie jed-



Rys. 4. Typowa konstrukcja ogniwa polikrystalicznego na przykładzie ogniwa CdS/CdTe .

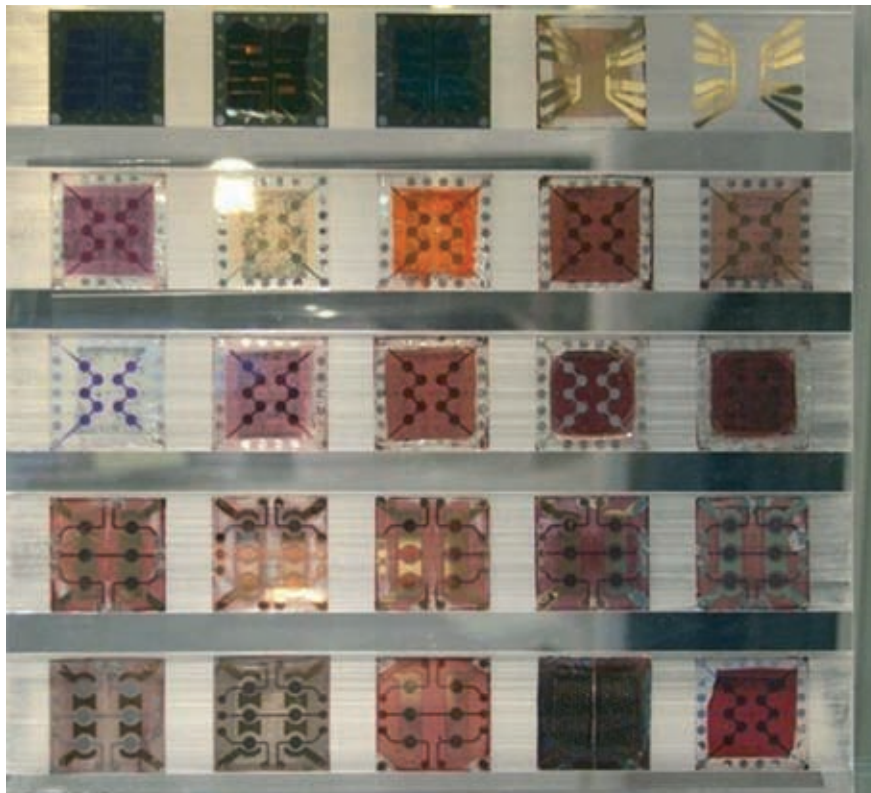
nego mikrometra wystarcza do zaabsorbowania ponad 90% energii słonecznej padającej na ogniwo, co jest jedną z głównych przyczyn obniżających koszty produkcji ogniwo tego typu. Ponadto, wytwarzanie krzemu amorficznego może odbywać się w dużo niższych temperaturach, a warstwy mogą być osadzone na taniach podłożach, takich jak szkło, plastik czy metal. Dlatego też krzem amorficzny idealnie nadaje się do zastosowań w systemach fotowoltaicznych zintegrowanych z budownictwem [7]. Ze względu na wyjątkowe właściwości, ogniwa na bazie krzemu amorficznego są budowane w specjalny sposób. Struktura p-i-n, o którą zazwyczaj oparta jest ich budowa, polega na tym, że pomiędzy warstwami półprzewodników typu p oraz n istnieje jeszcze warstwa półprzewodnika samoistnego.

W ogniwach tego typu występuje jednak tzw. efekt Staeblera-Wrońskiego, polegający na tym, że długotrwałe naświetlanie wywołuje znaczny wzrost konduktywności materiału. Efekt ten jest całkowicie odwracalny więc możliwa jest regeneracja poprzez wygrzewanie w ciemności [2].

Alternatywne konstrukcje ogniwo fotowoltaicznych

Istnieje bardzo wiele alternatywnych rozwiązań fotowoltaicznych. Do jednego z nich można zaliczyć ogniwa organiczne (fot. 1). Mechanizm fotogeneracji w ogniwach tego typu jest inny niż w klasycznych ogniwach półprzewodnikowych, a zasada działania opiera się na procesach spowodowanych przez ekscytory. Ogniwa te zbudowane są z materiałów organicznych o małym ciężarze cząsteczkowym lub z polimerów aktywnie uczestniczących w konwersji energii słonecznej na energię elektryczną. Konstrukcja organicznych ogniwo fotowoltaicznych oparta jest o połączenie sieci półprzewodnikowej z metaloorganiczną lub organiczną warstwą barwnika (ang. *dye-sensitized*). Występują tu struktury z heterozłączami płaskimi (dwuwymiarowa geometria złącza) i z heterozłączami o geometrii trójwymiarowej (molekularne, ciekłokrystaliczne, polimerowe, hybrydowe). Ogniwa organiczne posiadają także pewne nietypowe właściwości. Mianowicie, nigdy nie osiągają one 100% absorpcji w zakresie światła widzialnego – typowe wartości maksymalne to 80%-90%. Ponadto, niektóre typy ogniwo organicznych wykazują większą sprawność przy zmniejszonym natężeniu oświetlenia (np. zwiększenie sprawności z 4% do 6%).

W ostatnich latach w Japonii powstały alternatywne ogniwa słoneczne wykorzystujące, jako materiał bazowy krzem. Innowacja polega tu na stworzeniu układu stanowiącego multikrystaliczną kulkę krzemową (o średnicy 1 mm) umieszczoną w ognisku sześciokątnego odbłyśnika koncentrującego



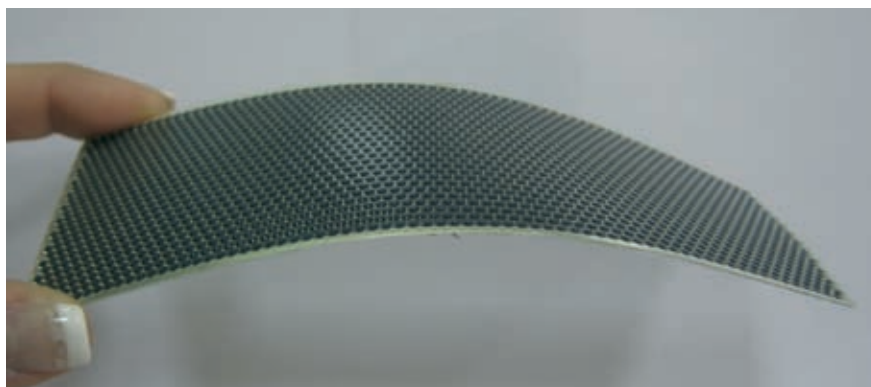
Fot. 1. Wygląd różnego rodzaju fotowoltaicznych ogniwo organicznych.

światło. Połączone ze sobą minireflektry pokrywają powierzchnię tworząc strukturę podobną do plastra miodu, dzięki czemu tworzą ogniwa lub całe moduły PV. Ogniwa fotowoltaiczne tego typu osiągają sprawności zbliżone do obecnie stosowanych multikrystalicznych krzemowych przyrządów fotowoltaicznych, przy dużo niższych kosztach produkcji. Istotną zaletą tego rozwiązania, w stosunku do konwencjonalnej technologii krzemowej, jest niewątpliwie elastyczność nowej konstrukcji. Podłoże jest tu wykonane z cienkiej blachy aluminiowej (stanowiącej tylny kontakt), a ponieważ kuleczka wraz z reflektorem ma

średnicę niespełna 3 mm, ogniwo tego typu może być w pewnym zakresie wyginane bez obawy o złamanie lub uszkodzenie (fot. 2) [8].

Zastosowania ogniwo słonecznych różnych typów

Moduły fotowoltaiczne mają zastosowanie wszędzie tam, gdzie jest zapotrzebowanie na energię elektryczną. Różne typy ogniwo słonecznych stosowane są w różnych warunkach, w zależności od wymagań i potrzeb.



Fot. 2. Ogniwo PV wykonane z kuleczek krzemowych.

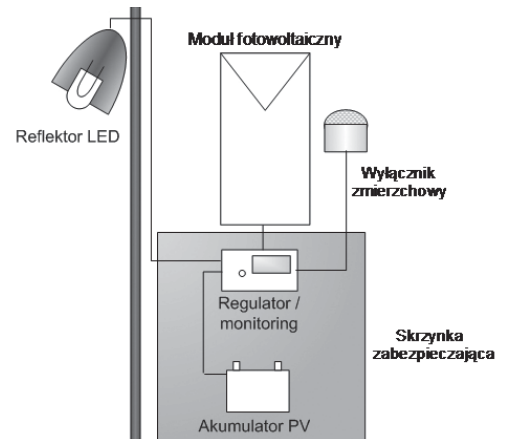
Drogie, wysokosprawne moduły monokrystaliczne, wykonane z krzemu bądź arsenku galu, stosowane są głównie jako źródło zasilania stacji kosmicznych, sond lub sztucznych satelitów. Przykładowa kosmiczna stacja badawcza ISS (dawniej ALFA) posiada obecnie zestaw ogniw słonecznych o łącznej powierzchni 892 m² i mocy ok. 30 kW.

Do zasilania obiektów „naziemnych”, oddalonych od sieci energetycznej stosowane są z reguły tańsze rozwiązania. W szczególności wykorzystywane są ogniwa polikrystaliczne, cienkowarstwowe lub amorficzne. Są one montowane najczęściej na budynkach mieszkalnych lub gospodarczych i obiektach komercyjnych. Jednakże znajdują także zastosowanie jako źródło energii elektrycznej na przykład dla: latarni morskich, stacji przekaźnikowych lub meteorologicznych, pomp wodnych, a także jako sygnalizacja drogowa, oświetlenie dróg i parkingów czy też do zasilania innych przydrożnych urządzeń (np. parkometrów). Schematyczną budowę fotowol-

taicznego systemu oświetlenia ulicznego przedstawia rys. 5. Ogniwa słoneczne wykonane z krzemu amorficznego stosowane są bardzo często do zasilania urządzeń o niewielkim zapotrzebowaniu na moc, takich jak zegarki, kalkulatory czy ładowarki telefonów komórkowych.

W ostatnim czasie dużą popularnością cieszą się moduły elastyczne, posiadające lepszą możliwość integracji z elementem podłożowym, niż ogniwa sztywne. Na rynku dostępne są torby i plecaki z wmontowanymi elastycznymi elementami PV, służącymi do zasilania urządzeń mobilnych, takich jak telefon czy komputer. Zastosowaniem tego typu rozwiązania jest także moduł fotowoltaiczny zintegrowany z żaglem jachtu bądź dachem namiotu (fot. 3), a także jako zasilanie pojazdów i urządzeń o dowolnych kształtach.

**Katarzyna Znajdek
Maciej Sibiński**



Rys. 5. Schemat budowy latarni ulicznej zasilanej modułem PV.

Bibliografia

- [1] Milnes A. G., Feucht D. L.: *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions*, Academic Press, New York 1972.
- [2] Jarzębski Z. M.: *Energia słoneczna, konwersja fotowoltaiczna*, PWN, Warszawa 1990.
- [3] Mocny W.: *Ekologiczne Źródła Energii*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Ekologia w Elektronice” Warszawa 2002.
- [4] <http://www.nrel.gov/>
- [5] <http://www.eere.energy.gov/>
- [6] Żelazny J., Ciach R.: *Materiały i Technologie Fotowoltaiczne*, FRNM Kraków 2005.
- [7] Sibiński M., Znajdek K.: *Krzemowe ogniwa w instalacjach fotowoltaicznych*, „Czysta Energia” 4/2009.
- [8] Znajdek K., Sibiński M.: *Charakterystyka elektryczna i temperaturowa elastycznych ogniw słonecznych wykonanych z mikrokulek krzemowych*, „Elektronika – Konstrukcje, Technologie, Zastosowania” 1/2011.
- [9] <http://www.iowathinfilm.com>



Fot. 3. Zasilanie dla wojskowego namiotu polowego w USA [9].