

---

# Fotowoltaika przyszłością energetyki

Marek Godlewski

Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

---

**Streszczenie.** W artykule nakreślono perspektywy dalszego rozwoju energetyki w skali świata, w tym najczystszej jej formy – energetyki słonecznej. Rozwój tzw. zielonej energetyki jest pilną koniecznością biorąc pod uwagę obecną skalę dewastacji środowiska naturalnego i wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii. To uzasadnia długi wstęp (Motywacja), w którym opisana jest obecna sytuacja w energetyce i skala zagrożeń wynikająca ze skażenia środowiska. Następnie omówione są dwa typy energetyki słonecznej, ich historia, zasady działania i, w przypadku fotowoltaiki, typy ogniw.

---

## Motywacja

Ogromny przyrost ludności Ziemi w XX wieku (z około 3,5 mld w połowie wieku do ponad 7 mld obecnie), towarzysząca temu gwałtowna industrializacja, ale i wzrost zamożności ludności w większości krajów świata, doprowadził do niebywałego zwiększenia zapotrzebowania na energię, w tym na energię elektryczną. Scenariusz na najbliższe dziesięciolecia jest zbliżony – do 2040 roku zapotrzebowanie na energię będzie rosło pomiędzy 1 a 1,3% każdego roku, a na energię elektryczną 2,1% rocznie. Według tych prognoz rośnie cały czas rola elektryczności osiągając ponad 30% całego zapotrzebowania na energię. Potwierdzają to dane o wzroście zapotrzebowania na energię elektryczną znacznie wyprzedzające wzrost ludności świata. W perspektywie ostatnich 100 lat ludność świata zwiększyła się 4-krotnie, a zapotrzebowanie na energię elektryczną aż 16-krotnie! Te dane są niepokojące. Uważa się, że deficyt energii (głównie elektrycznej) może limitować dalszy rozwój naszej cywilizacji.

W tych oszacowaniach musimy wziąć pod uwagę zacofanie cywilizacyjne całych kontynentów – Afryki i dużych obszarów Azji. Według danych WEO (World Energy Organization) dostępu do energii elektrycznej nie ma ciągle jeden miliard dwieście milionów ludzi na Ziemi, w tym około sześćset milionów mieszkańców Afryki. Mimo szybkiego postępu liczba ta spadnie poniżej jednego miliarda dopiero w 2030 roku, co po części wynika z przyczyn demograficznych. Na tych obszarach najszybciej rośnie zaludnienie. W konsekwencji w połowie XXI wieku nadal około pięćset mln mieszkańców Afryki będzie mieszkało na obszarach bez elektryczności.

Niestety zacofane kraje Afryki i Azji naśladowują złe wzorce industrializacji Europy z XIX i pierwszej połowy XX wieku. Na przykład, szacuje się, że zapotrzebowa-

nie na ropę naftową w Afryce w roku 2040 będzie większe niż w Chinach. Gwałtowny wzrost ludności Afryki i Azji generuje ponadto boom na budownictwo („energożerna” produkcja cementu i stali). Ponadto energetyka (nie tylko zresztą w Afryce czy też w Azji) ciągle oparta jest o kopaliny takie jak węgiel, ropa czy też gaz. Pomimo najlepszych warunków klimatycznych (nasłonecznienie) instalacje fotowoltaiczne w Afryce to obecnie około 5 GW, czyli mniej niż 1% globalnego zapotrzebowania na energię elektryczną.

Istniejące scenariusze wskazują na wyczerpywanie się nieodnawialnych źródeł energii, kopaliny takich jak węgiel, ropa i gaz. Te kopaliny – w energetyce jest to głównie węgiel (na świecie prawie 40% energii elektrycznej produkowane jest w elektrowniach spalających węgiel kamienny lub brunatny), a w transporcie dominuje ciągle ropa naftowa. Te dane stawiają pod znakiem zapytania dalszy postęp, który jest konieczny, jeśli weźmie się pod uwagę, że średnie światowe zużycie energii elektrycznej na obywatela jest w krajach zacofanych ponad dwukrotnie niższe niż w krajach wysoko rozwiniętych.

Gwałtowny wzrost ludności świata oraz industrializacja doprowadziły ponadto do niebywałego skażenia środowiska naturalnego i emisji gazów cieplarnianych; Dane o ich emisji (głównie CO<sub>2</sub> i metanu) są alarmujące! Nadwyżka CO<sub>2</sub> dodawana corocznie do atmosfery przekroczyła 9 mld ton. W konsekwencji ilość dwutlenku węgla w atmosferze wzrosła od 280 ppm (takie stężenie utrzymywało się przez wiele wieków), do 360 ppm w 2000 roku, a w roku 2013 przekroczyła 400 ppm i nadal rośnie. Jeśli ilość emitowanego CO<sub>2</sub> będzie nadal rosła, to średnia temperatura na Ziemi podniesie się nawet o 4-5°C do roku 2050. Szacuje się, że z powodu zmian klimatycznych w ciągu ostatnich 30 lat zmarło

na Ziemi około 150 000 ludzi! A przy dalszym wzroście temperatury ta liczba będzie zdecydowanie większa.

Energetyka jest jednym z głównych emiterów gazów cieplarnianych, a wśród elektrowni wykorzystujących nieodnawialne surowce, to te węglowe najbardziej dewastują nasze środowisko naturalne. 1 kWh wytworzona w elektrowniach węglowych, to 360 gramów węgla (jako składnika dwutlenku węgla) emitowanego do atmosfery! W przypadku elektrowni gazowych jest to dwukrotnie mniej.

Niestety na niechlubnej liście trucicieli środowiska naturalnego zaczynają dominować kraje nadrabiające zacofanie gospodarcze, w tym azjatyckie „tygrysy gospodarki”. W ciągu siedmiu lat ich gwałtownego rozwoju (2000-2007) emisja CO<sub>2</sub> w Chinach wzrosła o 100%, a w Indiach o 40%. Te dwa kraje, obok USA, są obecnie głównymi „trucicielami” świata. Przy tym nic nie wskazuje na szybką zmianę – według danych WEO (World Energy Organization) obecnie budowanych jest 170 GW instalacji energetycznych wykorzystujących spalanie węgla! Zapotrzebowanie na inne kopaliny rośnie również szybko. Według danych WEO zapotrzebowanie na gaz wzrosło w Azji (głównie w Chinach) o 70%.

Przemysł energetyczny (elektrownie węglowe) obok transportu i budownictwa to główni emiterzy. Potwierdzają to dane IEA (International Energy Association) dotyczące emisji CO<sub>2</sub>, która wynosi 14 502 Mt (mega ton) ze spalania węgla (z tego ponad połowa – 9 761 Mt przy produkcji elektryczności i w elektrociepłowniach), 11 377 Mt ze spalania ropy (głównie transport), 8 743 Mt ze spalania gazu, i tylko 218 Mt z innych źródeł.

W Europie to Polska ma obecnie najgorszą strukturę energetyki i nic nie wskazuje na szybką poprawę tej sytuacji. Według informacji prasowych ([www.eko.org.pl](http://www.eko.org.pl)) spółka PGE ubiega się o przedłużenie eksploatacji złoża węgla brunatnego z odkrywki Turów do 2044 roku i powiększenie jej z rocznym wydobywaniem 9–11,5 mln ton do 2030 roku. Ciekawe jest więc porównanie danych dotyczących emisji gazów cieplarnianych, które podają za IEA. Roczne zużycie energii elektrycznej wzrosło w Polsce w ciągu 27 lat (od 1990 do 2017) o 32%, a na świecie o 117%! Niestety oznacza to wzrost emisji CO<sub>2</sub> o 60% w skali świata, za to w Polsce emisja ta spadła o 10%, co wynika ze zmian struktury przemysłu. Ciekawe jest także porównanie danych dotyczących emisji CO<sub>2</sub> na jednego obywatela (per capita) za okres 1990-2017. Emisja ta w Polsce zmalała z 9,1 w 1990 do 8,1 tony na obywatela w 2017. Podobny trend obserwujemy w Unii Europejskiej – emisja spadła z 8,4 tony na obywatela do 6,3 w 2017. Różnie te dane wyglądają w wiodących gospodar-

kach europejskich – Niemcy: 11,8 t w 1990 i 8,2 t w 2017, Francja: 5,9 t w 1990 i 4,4 t w 2017, a UK: 9,6 t w 1990 i 5,3 t w 2017 – ten imponujący wynik UK zawdzięcza odejściu od energetyki węglowej. Niestety w skali świata emisja ta wrosła z 3,9 t do 4,4 t na obywatela. Do tych niepokojących danych główny wkład pochodzi z Chin i Indii (Chiny: 1,8 t w 1990 i 6,7 t w 2017, Indie: 0,6 t w 1990 i 1,6 t w 2017, na obywatela). Niewielki wzrost nastąpił także w Japonii i w całej Afryce.

### Zielona energetyka i energetyka odnawialna

Podane powyżej dane wskazują na pilną konieczność modyfikacji profilu energetyki wykorzystującej nieodnawialne źródła energii na bardziej ekologiczną, na przykład wykorzystującą energię słoneczną. Przede wszystkim powinniśmy dążyć do ograniczania energetyki węglowej, jak i do szerszego wprowadzania do transportu napędu gazowego lub elektrycznego. Aktualne prognozy mówią, że w roku 2040 ponad 50% energii elektrycznej powinno być otrzymywane ze źródeł o niskiej emisji CO<sub>2</sub>. Przewiduje się, że wiodącą rolę będą pełniły generatory wiatrowe, fotowoltaika, ale także hydroenergetyka (około 15% w skali światowej) i energetyka jądrowa (8%). Przy okazji warto podkreślić, że jeśli chcemy obniżyć skażenie radioaktywne powinniśmy budować elektrownie jądrowe, a nie węglowe. Węgiel zawiera także (oprócz na przykład siarki) metale ciężkie, w tym radioaktywne. Warto także zaznajomić się z danymi o emisji rtęci do powietrza przez elektrownię w Bełchatowie.

Jeśli chodzi o energetykę jądrową, to w 2018 roku na świecie działały 452 reaktory; uruchomiono wówczas instalacje o mocy 11,2 GW, co było największym przyrostem od roku 1989. W budowie były dalsze elektrownie jądrowe o mocy 6 GW. Jeśli utrzymają się obecne trendy to całkowita moc instalacji jądrowych w 2030 roku wyniesie 497 GW (bardziej optymistyczny scenariusz przewiduje 542 GW!). Z punktu widzenia emisji gazów cieplarnianych, dzięki energetyce jądrowej w ciągu ostatnich 50 lat ograniczono emisję CO<sub>2</sub> o 55 Gt (miliardów-ton). Dalszy rozwój tej energetyki ograniczy emisję o dodatkowe 4 Gt.

Energetyka jądrowa nie należy jednak do odnawialnych źródeł energii, do których zaliczamy energetykę słoneczną, wiatrową, energetykę wykorzystującą biomasę, czy też hydroenergetykę. Rola energetyki odnawialnej rośnie, jej całkowita produkcja w roku 2018 wzrosła o 450 TWh, czyli o 8%, co było wynikiem uruchomienia instalacji o mocy 180 GW, głównie wiatrowych i słonecznych. Do 2040 roku przybędzie instalacji związanych z energetyką odnawialną o mocy 8 500 GW. Szacuje się, że 50% dodatkowych instalacji do roku

2040, to będzie energetyka wiatrowa i słoneczna. Wiatraki wytwarzać będą wówczas 8 300 TWh, instalacje fotowoltaiczne 7 200 TWh, hydroenergetyka 6 950 TWh. 30% ciepła wytwarzane będzie w instalacjach wykorzystujących źródła odnawialne, w transporcie zaś źródła odnawialne pokryją 60% zapotrzebowania na energię. W sumie około 44% energii wyprodukowane zostanie z odnawialnych źródeł energii, w tym 37% energii elektrycznej, 60% w ciepłownictwie).

Udział źródeł odnawialnych w energetyce rośnie dynamicznie. Ocenia się, że docelowo 80% nowych instalacji energetycznych związanych będzie z energetyką odnawialną (w ciągu kilku ostatnich lat obserwujemy 50% dynamikę wzrostu). Energetyka słoneczna odpowiadać będzie za 60% tego wzrostu. W Chinach (obecnie największym emiterze gazów cieplarnianych) ta dynamika wzrostowa jest także bardzo duża, wynosi bowiem 40%. Część tego wzrostu pochodzi z rozproszonych instalacji fotowoltaicznych (niewielkie instalacje produkujące energię dla gospodarstw domowych). Chiny są liderem w tym obszarze energetyki.

### **Energetyka słoneczna**

Słońce jest podstawowym źródłem energii dla naszej planety. Do Ziemi dociera 174 PW (petawatów), z czego około 30% odbijane jest przez górne warstwy atmosfery, a resztę pochłania atmosfera, gleba, rośliny i woda, co w przeliczeniu na jednostkę powierzchni wynosi 3,5–7,0 kWh/m<sup>2</sup> dziennie. Te dane zależą oczywiście od położenia danego obszaru/kraju na kuli ziemskiej. Także w Polsce roczna gęstość promieniowania słonecznego jest wystarczająco duża (950–1250 kWh/m<sup>2</sup>), aby rozwijać energetykę słoneczną. Jest to praktycznie jedyne niewyczerpywalne dostępne nam źródło energii, które może pokryć nasze potrzeby nawet w dalekiej perspektywie. Wystarczy, jeśli nauczymy się korzystać z kilku procent tej energii, aby zaspokoić zapotrzebowanie całego świata.

Poniżej omawiam dwa podstawowe systemy energetyki słonecznej i perspektywy ich rozwoju. Zaczynam od tzw. termalnej energetyki słonecznej, która dominowała do czasu znaczącej obniżki ceny paneli fotowoltaicznych.

#### **Elektrownie CSP (Concentrated Solar Power)**

##### **– termalna energetyka słoneczna**

Pomysł takich instalacji jest stary. Pierwszy prototyp zbudowany został w roku 1897 przez Amerykanina F. Shumana. Tak naprawdę była to maszyna parowa, tyle że do grzania eteru w pierwotnym obiegu używano energii słonecznej. Pomysł ten został wdrożony w roku 1908, a w celu zwiększenia wydajności grzania zastosowano

lustra. To był prawzór dzisiejszych instalacji CSP. System opatentowano w roku 1912, a pierwsza instalacja zbudowana została w Egipcie i zasilala pompy do nawadniania pól.

Pomysł analogicznych instalacji powrócił w okresie tzw. kryzysu naftowego w latach 70. XX wieku. W najnowszych elektrowniach słonecznych typu CSP używa się nawet tysiące luster skupiających energię słoneczną, sterowanych systemem śledzenia Słońca. Zmieniono także płyn w obiegu pierwotnym na stopioną sól. Taki system może działać nawet kilka godzin po zachodzie słońca; jego zaletą jest także możliwość magazynowania energii. Stopioną i rozgrzaną sól można magazynować nawet tydzień i przepompować w okresie zwiększonego zapotrzebowania na energię. Tego typu systemy zbudowano w wielu miejscach na świecie, np. w Hiszpanii, w Stanach Zjednoczonych Ameryki, w Chile. Mogą one z powodzeniem konkurować z „klasyczną” energetyką. Według Międzynarodowej Agencji Energetyki Odnawialnej (International Renewable Energy Agency, IRENA), średnie ceny energii słonecznej, ze sterowanych elektrowni słonecznych typu CSP wynoszą, w nasłonecznionych częściach świata, 0,07 USD/kWh, czyli są niższe niż koszt energii w Polsce.

Wydaje się jednak, że technologia termalnej energetyki słonecznej CSP przegrywa obecnie z szybko taniejącą fotowoltaiką. Dlatego w dalszej części tego artykułu skupiam się na tej formie energetyki słonecznej.

### **Fotowoltaika**

Fotowoltaika (FW) przeżywa obecnie gwałtowny rozwój, co wynika z szybkiego spadku cen paneli FW (10-krotny spadek w ostatniej dekadzie), a cena za 1 kWh z dużych instalacji FW w nasłonecznionych obszarach świata spadła do 0,02 USD. Jest to nie tylko najtańsze źródło energii elektrycznej, ale także najczystsze, czyli najbardziej ekologiczne. Energia włożona w produkcję panelu FW zwraca się w ciągu dwóch lat, a wkrótce nawet w 1,5 roku. Te dane tłumaczą niebywały rozwój tej dziedziny energetyki. O ile na koniec 2006 roku była to ciągle niszowa energetyka – na całym świecie zainstalowano panele fotowoltaiczne o mocy 1 581 MW, a skumulowana moc przez nie wytwarzana wynosiła 6 890 MW, to już po pięciu latach (2011) moc zainstalowanych baterii słonecznych wyniosła aż 27 650 MW, a ich moc skumulowana wzrosła do 67 350 MW. Liderem mocy zainstalowanych paneli słonecznych są Niemcy (32 380 MW), a więc kraj o podobnym klimacie i nasłonecznieniu co Polska. Potencjał fotowoltaiki w Niemczech robi wrażenie, jeśli porówna się go z potencjałem polskich konwencjonalnych (czytaj węglowych) elektrowni, który wynosi około 38 000 MW.

Obecnie systemy FW to trzecie (po hydroenergetyce i energetyce wiatrowej) źródło energii odnawialnej. Według danych IEA potencjał FW wzrośnie o 700 – 880 GW pomiędzy rokiem 2019 a 2024. Całkowita moc w instalacjach FW w roku 2018 wyniosła 515 GW, a produkcja energii elektrycznej ponad 500 TWh, co stanowi około 2 % ogólnego zapotrzebowania na elektryczność. To jednak szybko się zmieni i moc w instalacjach FW wzrośnie do roku 2030 do 3000 GW lub nawet (optymistyczne szacunki) do 10000 GW. W roku 2050 20% energii elektrycznej produkować będą systemy FW.

### Historia badań i zastosowań fotowoltaiki

Pojęcie fotowoltaika, wprowadzone w roku 1849, pochodzi z języka greckiego ( $\phi\omega\varsigma$  (*phōs*) znaczy światło) i od nazwiska uczonego włoskiego Aleksandra Volty, wynalazcy pierwszych baterii elektrochemicznych. Zjawisko fotowoltaiczne odkryte zostało w roku 1839 przez Francuza Aleksandra Edmunda Becquerela. To niezwykle, że wynalazca miał wtedy tylko 19 lat! Zaobserwował, że możliwa jest generacja prądu elektrycznego poprzez oświetlenie danego obiektu (tj. elektrody zanurzonej w przewodzącym roztworze) światłem słonecznym. Na tym etapie ta ciekawa obserwacja nie miała żadnych zastosowań praktycznych. Obserwowany efekt był niewydajny.

Pierwsze praktyczne zastosowania związane były z fotografią. Wynikały one z obserwacji Smitha (1873) oraz Adamsa i Daya (1876), że oświetlona płytka selenu wytwarza prąd elektryczny. Efekt ten wykorzystywano do oceny intensywności oświetlenia (natężenia światła) w fotografii, a prekursorem użycia go w energetyce był Fritts, który skonstruował pierwsze ogniwa słoneczne (z wykorzystaniem płytek selenu). Po raz pierwszy opatentowano takie ogniwa dopiero w roku 1941. Autorem tego patentu był amerykański inżynier i badacz półprzewodników Russell S. Ohl. Konkluzja patentu Ohla była zgodna z poprzednimi obserwacjami – oświetlone płytki wybranych metali emitują elektrony.

Prawdziwa „rewolucja” w tej dziedzinie zaczęła się jednak w roku 1954. Trzej pracownicy laboratorium firmy Bell (Bell Labs, a propos tam też powstał pierwszy tranzystor i dlatego rozwinęto produkcję kryształów krzemu) Daryl Chapin, Calvin Fuller i Gerald Pearson skonstruowali pierwsze krzemowe ogniwo fotowoltaiczne. Pomimo że wydajność takiego ogniwa ciągle była dosyć niska (około 4%), to była już wystarczająca do zasilania wybranych urządzeń elektrycznych przez kilka godzin. Koszt takich paneli FW był bardzo wysoki – wynosił 286 USD za 1 W mocy.

Wkrótce motorem napędowym fotowoltaiki stała się eksploracja Kosmosu. Pierwszy panel poleciał w Ko-

smos w roku 1958 zasilając instalację radiową w satelicie Vanguard 1. Kolejne satelity zarówno amerykańskie, jak i radzieckie (Sputnik-3) również miały takie zasilanie. Moc paneli wysyłanych w Kosmos szybko rosła od 1 W w przypadku Vanguarda 1 do kilkuset watów w satelitach wysyłanych w pierwszej połowie lat 60. XX wieku.

Amerykanie stali się także pionierami użycia paneli słonecznych do zasilania budynków. W roku 1973 powstał pierwszy budynek (Solar One) zasilany w ten sposób w energię elektryczną. Nie wszyscy wiedzą, że instalacje fotowoltaiczne zasilają Biały Dom, siedzibę prezydentów USA. Powstały one w okresie prezydentury J. Cartera i następnie B. Obamy.

Dla tych zastosowań konieczny był postęp w wydajności paneli, która szybko rosła z pierwotnych 4% do 8% i 14% (1957 i 1960, odpowiednio), a następnie do 20% w roku 1985 (prace uczonych australijskich z uniwersytetu New South Wales, Sydney).

Dla szybkiego rozwoju tej dziedziny energetyki istotny był nie tylko stały wzrost wydajności paneli (komercyjne panele mają wydajności pomiędzy 14 a 22%), ale także ciągła redukcja ich kosztów – pod koniec 2011 cena spadła poniżej 1 USD/W z wyjściowej 286 USD/W, a w roku 2013 do 0,74 USD/W. Szacuje się, że w przyszłości będzie to 0,5 USD/W lub nawet blisko 0,3 USD/W. Ważne są także łatwość instalacji i obsługi paneli słonecznych, długi czas życia (ponad 20 lat), jak i fakt, że do ich konstrukcji używany jest krzem powszechnie występujący na Ziemi. Nie ma konieczności używania innych, rzadkich (czytaj drogich) surowców, np. szerszego zastosowania ogniwi wykorzystujących tellurek kadmu (CdTe).

Ceny za 1 kWh pochodzącą z instalacji FW w 2017 roku spadły do 0,03–0,05 USD/kWh, mogą więc już konkurować z cenami prądu wytwarzanego w „klasycznych” instalacjach energetycznych. Ponadto te ostanie będą nadal rosły, ponieważ rosną tzw. kary emisyjne za emisję CO<sub>2</sub> do 50 USD za tonę, co skutkuje wzrostem cen za 1 kWh o 0,005 USD.

### Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

W roku 2005 obchodziliśmy stulecie nowoczesnej fizyki. Związane to było z wyjaśnieniem przez Alberta Einsteina efektu fotoelektrycznego. Ta praca wprowadziła pojęcie kwantu promieniowania elektromagnetycznego (nazwanego później fotonem). To był początek „nowej fizyki” – mechaniki kwantowej. Dla zrozumienia zjawiska fotowoltaicznego istotny był także pomysł Wilsona – wprowadzenie pojęcia pasm energetycznych i przerwy wzbronionej. Tak wytłumaczono różnice pomiędzy izolatorem (niezerowa przerwa wzbroniona) i me-

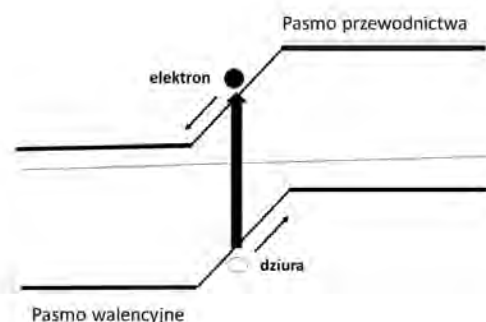
talem (brak przerwy wzbronionej). Według tej nomenklatury krzem jest izolatorem, ponieważ ma niezerową przerwę energetyczną pomiędzy tzw. pasmem walencyjnym i przewodnictwa.

Aby wzbudzić nośniki prądu, oprócz elektronów są to także dziury (puste miejsca po elektronach w paśmie walencyjnym – kwazicząstki o dodatnim ładunku elektrycznym), należy oświetlić dany materiał fotonami o energii większej od szerokości przerwy energetycznej (rys. 1). Fotony zostają zaabsorbowane przez elektrony



Rys. 1. Schemat procesu wzbudzenia pasmo-pasmo

walencyjne, które są wzbudzane do pasma przewodnictwa. Każdy z zaabsorbowanych fotonów wzbudza jedną parę nośników – elektron w paśmie przewodnictwa oraz dziurę w paśmie walencyjnym. Nośniki te następnie rekombinują (elektron wraca do pasma walencyjnego), a nadmiar energii jest wyemitowany w postaci fotonu lub zamieniony na ciepło. Aby przetworzyć promieniowanie na prąd (energię elektryczną) nośniki należy rozseparować wytwarzając w materiale pole elektryczne. Zablockowana jest wtedy szansa na ich wydajną rekombinację. W tym celu wytwarza się złącze p-n poprzez odpowiednie domieszkowanie jednego obszaru materiału (na przykład krzemu) centrami wprowadzającymi nadmiar elektronów (powstaje materiał typu n), a drugiego obszaru domieszkami wprowadzającymi nadmiar dziur (powstaje materiał typu p). Wspólną cechą różnego typu ogniw fotowoltaicznych jest więc obecność złącza p-n.



Rys. 2 Schemat wzbudzenia pasmo-pasmo w obszarze złącza p-n. Występujące pole elektryczne separuje nośniki prądu

W obszarze złącza działa pole elektryczne, konieczne do separacji par elektron-dziura. Powstanie pola elektrycznego można prosto wytłumaczyć przepływem elektronów z obszaru n (z nadmiarem elektronów) do obszaru p (z niedomiarem elektronów). W wyniku tego przepływu obszar typu p ładuje się ujemnie, a typu n dodatnio. Blokowany jest dalszy przepływ elektronów przez wytworzoną w ten sposób barierę potencjału (rys. 2). Do obszaru złącza przykładane jest pole elektryczne blokujące rekombinację par elektron-dziura generowanych oświetleniem i separujące te nośniki. Elektrony przepływają do obszaru typu n, a dziury do obszaru typu p. Powstaje różnica potencjałów – zjawisko to jest podstawą efektu fotowoltaicznego. Jeśli do obszarów typu n i p dodamy kontakty omowe i podłączymy obciążenie, to popłynie prąd – światło generuje prąd elektryczny.

### Typy ogniw fotowoltaicznych

Współczesna fotowoltaika wykorzystuje głównie ogniwa krzemowe. Typ ogniwa zależy jednak od formy użytego krzemu. W ogniwach FW pierwszej generacji wykorzystuje się monokrystaliczny krzem. Tego rodzaju ogniwa dostępne w sprzedaży mają wydajności rzędu 14-20%. Istnieje wiele odmian konstrukcji takich ogniw w zależności od sposobu strukturyzacji przedniej elektrody, użytej metalizacji i sposobu naniesienia warstw antyrefleksyjnych na przedniej i tylnej stronie ogniwa. Istotne jest, że takie ogniwa obniżają emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery. Szacuje się, że każda wytworzona kilowatogodzina ogranicza emisję tego gazu cieplarnianego o 37,3 do 72,2 gramów. Kolejne ogniwa krzemowe pierwszej generacji wykorzystują polikrystaliczny krzem. Choć ich wydajność jest niższa niż tych z monokrystalicznym krzemem, to są one znacząco tańsze.

Wadą ogniw pierwszej generacji jest niska wydajność generacji nośników światłem. Wynika to z właściwości krzemu. Jest to materiał o tzw. skośnej przerwie energetycznej. Aby zwiększyć wydajność generacji konieczne jest użycie grubszych warstw krzemu, co podnosi koszty ogniw.

Tę wadę wyeliminowano w ogniwach drugiej generacji, w których oprócz amorficznego krzemu wykorzystuje się materiały o prostej przerwie energetycznej. Do nich zalicza się głównie CdTe, CdS, CIGS (CuInGaSe<sub>2</sub>), a jako materiał przezroczystej elektrody stosuje się ITO (tlenek indowocynowy) lub ZnO. W tych ogniwach FW stosuje się cienkie warstwy materiałów, co obniża koszty. Do trzeciej generacji zaliczone są ogniwa wykorzystujące materiały organiczne, ogniwa perowskitowe, ale także ogniwa Graetza z nanocząstkami.

Osobną kategorią ogniw są ogniwa multizłączone, dla których osiągnęte są rekordowe wydajności. Ogniwa te są bardzo drogie, ale znajdują zastosowanie w astronautyce, gdzie wydajność ogniwa, a nie jego cena, jest kluczowa.

### Podsumowanie

Kiedy wytworzono pierwsze krzemowe ogniwa fotowoltaiczne nikt nie przewidział, co nastąpi po upływie kolejnych kilkudziesięciu lat. Jeszcze kilka lat temu energetyka fotowoltaiczna była niszowa i odpowiadała za promile wytwarzanej energii elektrycznej. Obecne prognozy przewidują dominację fotowoltaiki w energetyce wykorzystującej odnawialne źródła energii i powszechne użycie paneli FW do zasilania domostw, tzw.

rozproszona fotowoltaika. FW wykorzystuje niewyczerpywalne źródło energii – Słońce i należy do najczystszych źródeł energii. Powszechne użycie paneli FW w energetyce wymagać jednak będzie opracowania lepszych, wydajniejszych i tańszych metod magazynowania energii.

---

Przygotowując ten artykuł korzystałem z szeregu źródeł dostępnych w opracowaniach International Energy Association (IEA) ([www.iea.org](http://www.iea.org)), World Energy Organization (WEO), na stronie internetowej trendy w energetyce (<https://trendywenergetyce.pl>) i Międzynarodowej Agencji Energetyki Odnawialnej (International Renewable Energy Agency, IRENA).