

Wykład XI

Technologie PV

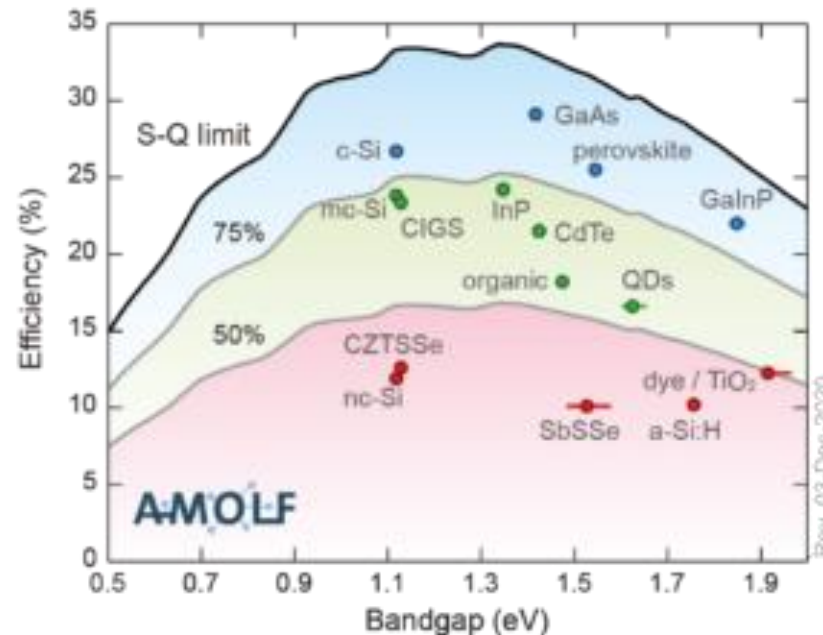
W wykładzie wykorzystano rysunki z opracowania:

https://courses.edx.org/c4x/DelftX/ET.3034TU/asset/solar_energy_v1.1.pdf

Strategia poprawy wydajności ogniw

- Eliminacja strat związanych z niedopasowaniem spektralnym fotoodpowiedzi ogniwa do widma Słońca.

Jak wynika z granicy Shockley'a-Queissera, optymalna przerwa energetyczna półprzewodnika, który ma być absorberem w ogniwie przypada na ok. 1,45eV. Pasuje tu GaAs lub CdTe, Si trochę mniej. Ogniwa wielozłączowe są projektowane tak, aby przekroczyć limit S-Q.



Strategia poprawy wydajności ogniw

- Wzrost efektywnego wykorzystania światła padającego na ogniwo

Zgodnie z prawem Lamberta-Beera natężenie światła spada w głąb materiału zgodnie z zależnością:

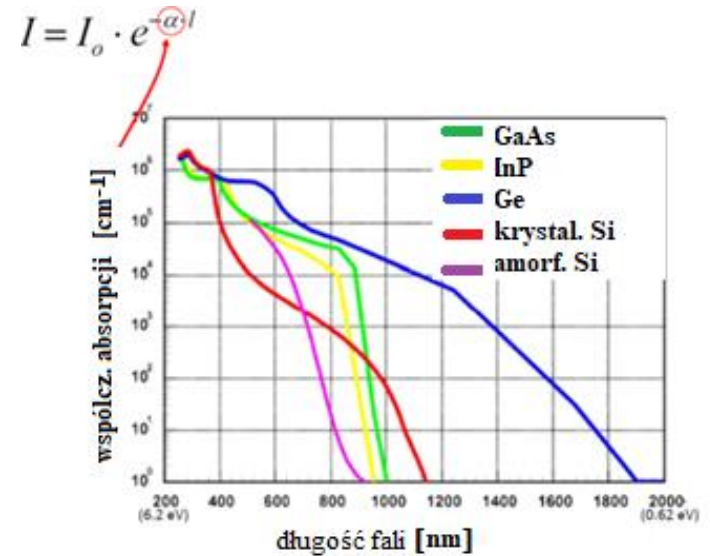
$$I = I_0 \exp(-\alpha d)$$

Ilość światła, która zostanie zaabsorbowana

$$I^{abs} = I_0 [1 - \exp(-\alpha d)].$$

Aby ilość światła zaabsorbowanego I^{abs} była jak największa, współczynnik absorpcji powinien być jak największy i absorber możliwie gruby.

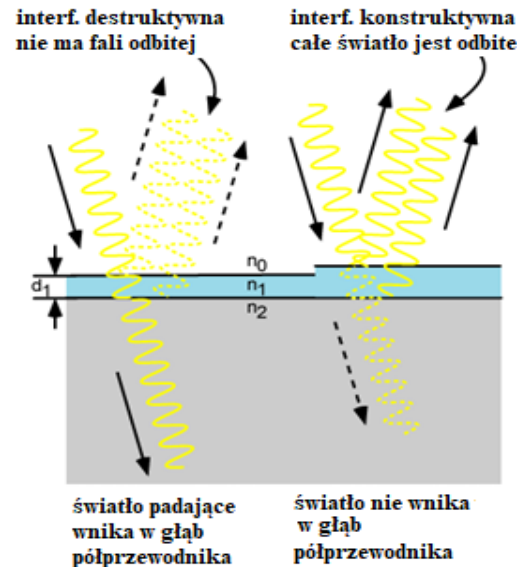
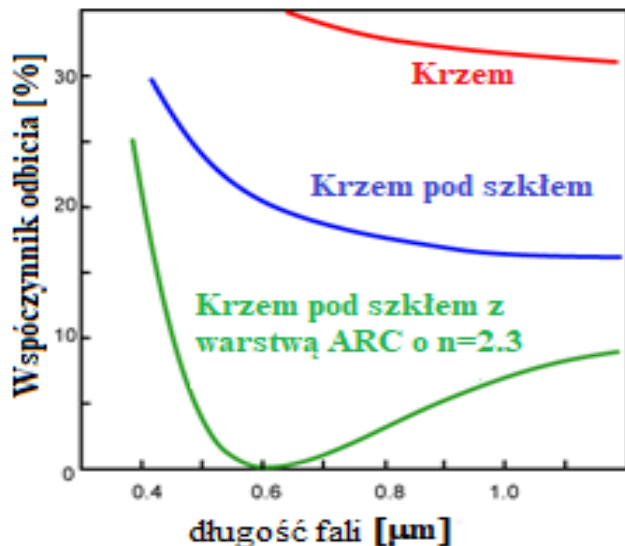
$$E(eV) = \frac{1,24}{\lambda(\mu m)}$$



Strategia poprawy wydajności ogniw

- Eliminacja strat związanych ze światłem, które ulega odbiciu.
- Aby zmniejszyć te straty, stosuje się m.in. warstwy antyrefleksyjne, ARC (ang. anti-reflective coatings, ARC).

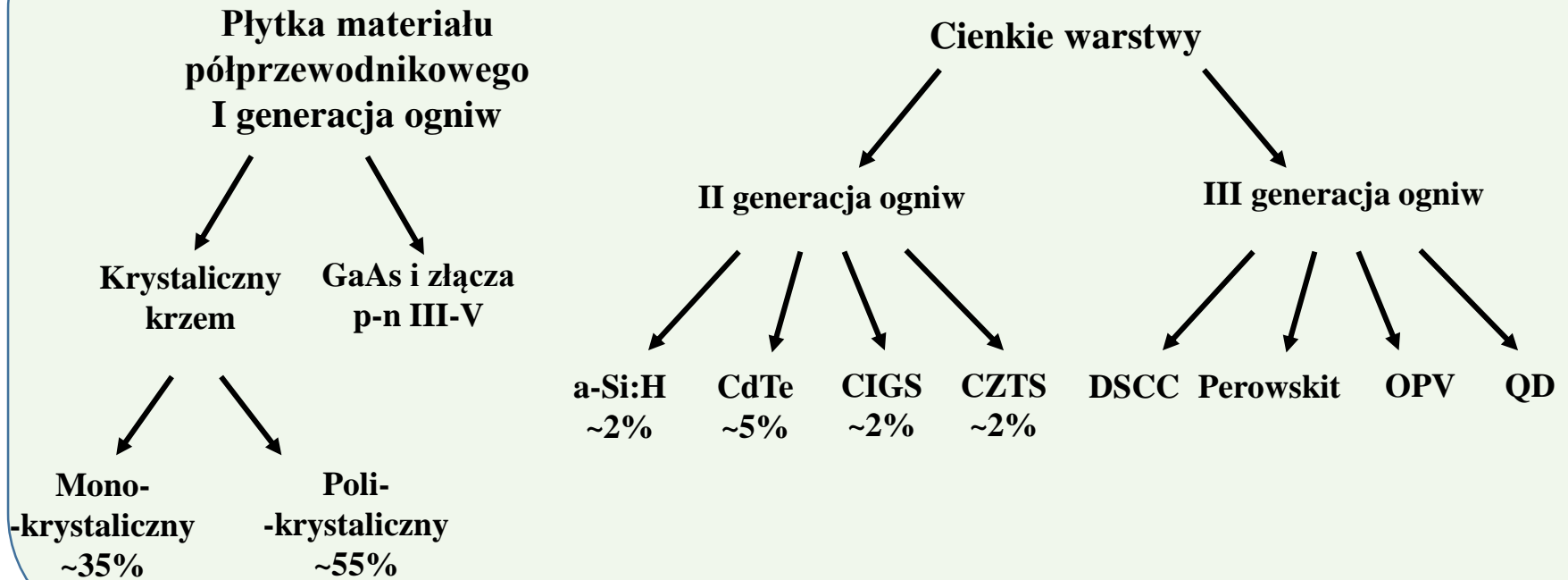
Współczynnik odbicia może być istotnie zmniejszony, jeśli warstwę półprzewodnika pokryje się cienką warstwą materiału o współczynniku załamania $n_1 = \sqrt{n_o n_s}$ lub jeśli wykorzysta się zjawisko interferencji czy teksturyzację powierzchni.



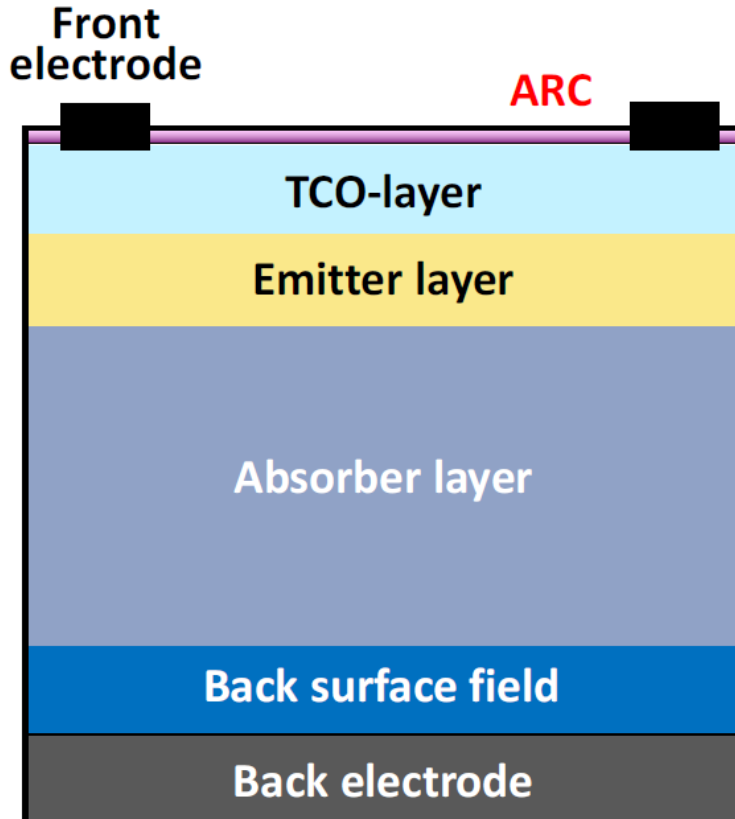
$$n_o = 1, n_s = 4.3$$

Technologie PV

Technologie PV



Budowa ogniwa



Absorber – generacja par elektron-dziura

Emiter – selekcja nośników mniejszościowych (dla absorbera typu p – emiter typu n – przepuszcza tylko elektrony do elektrody przedniej).

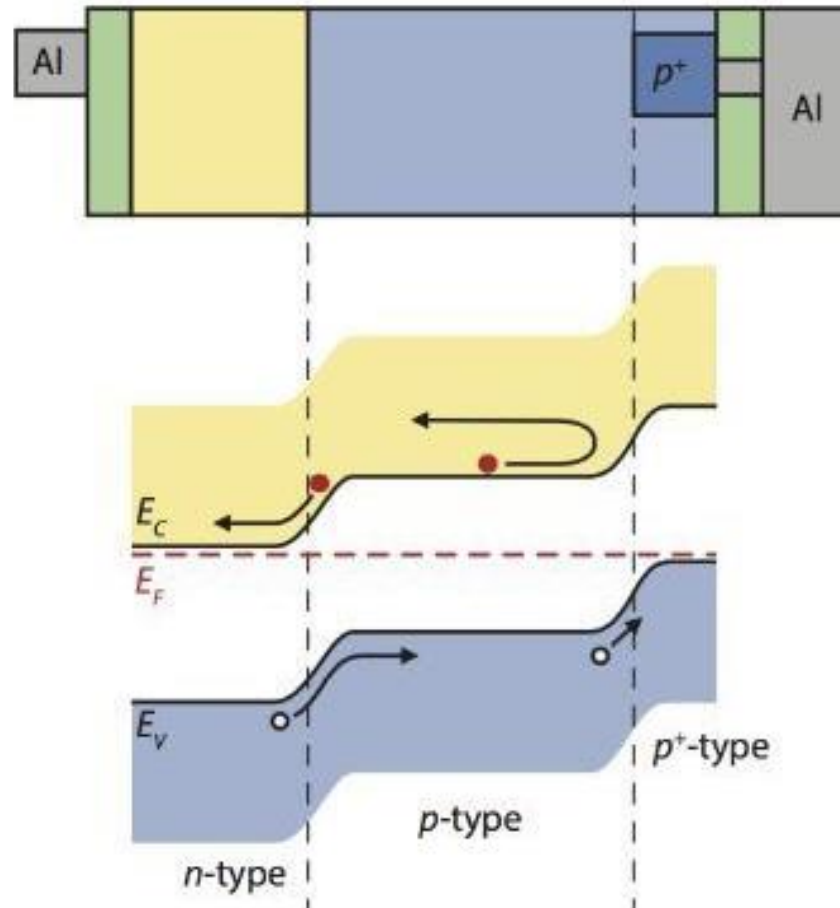
TCO – przewodzący i transparentny tlenek – umożliwia transport nośników między elektrodami

Back Surface field – selekcja nośników większościowych (dla absorbera typu p – przepuszcza tylko dziury do elektrody tylnej).

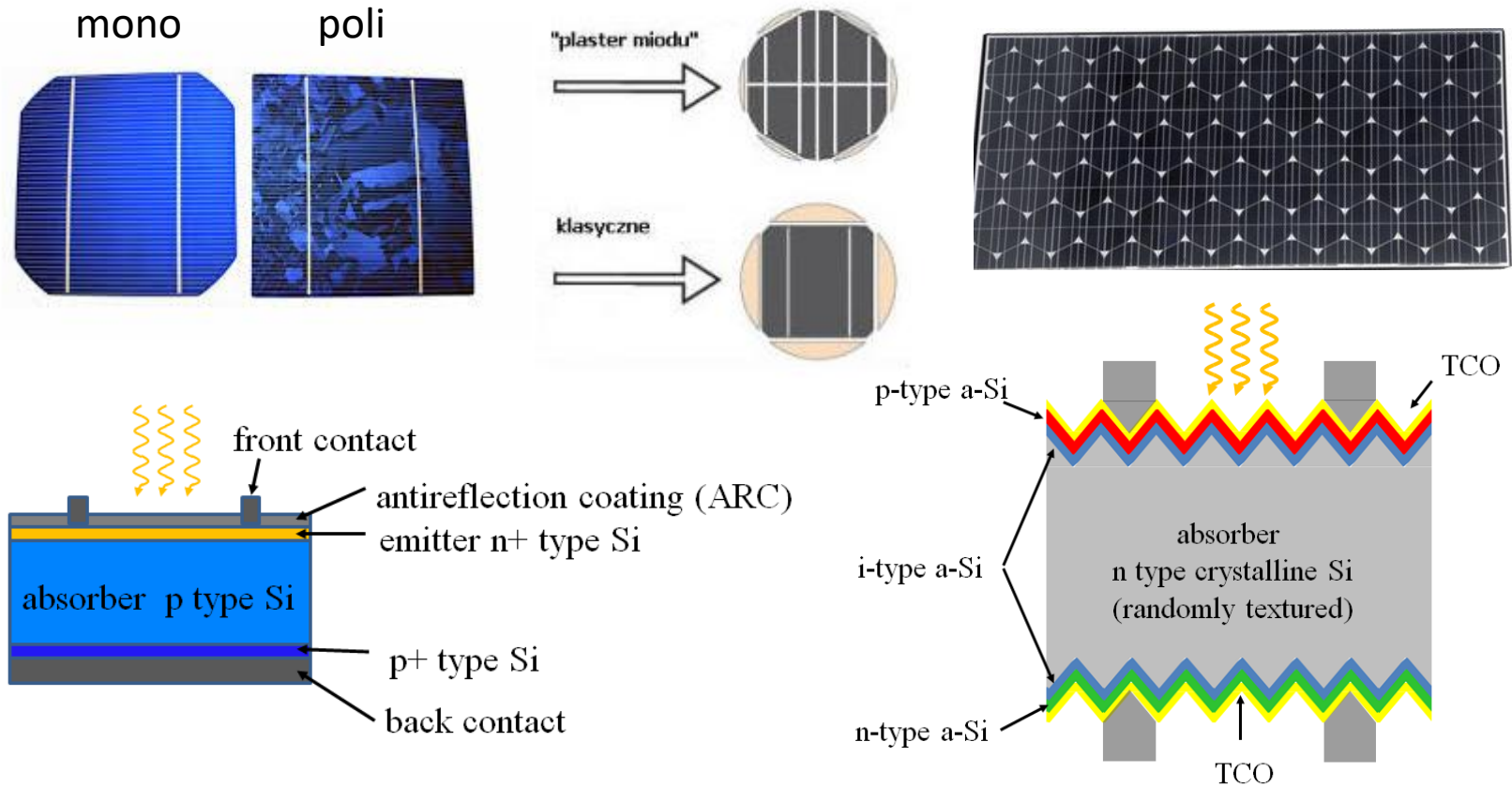
Elektrody – łączą ogniwo z zewnętrznym obwodem elektrycznym.

ARC – warstwa antyrefleksyjna

Back Surface field



Ogniwa nieorganiczne Si



Ogniwo produkowane do r. 1999

Gruba warstwa Si

Drogie

Sztywne

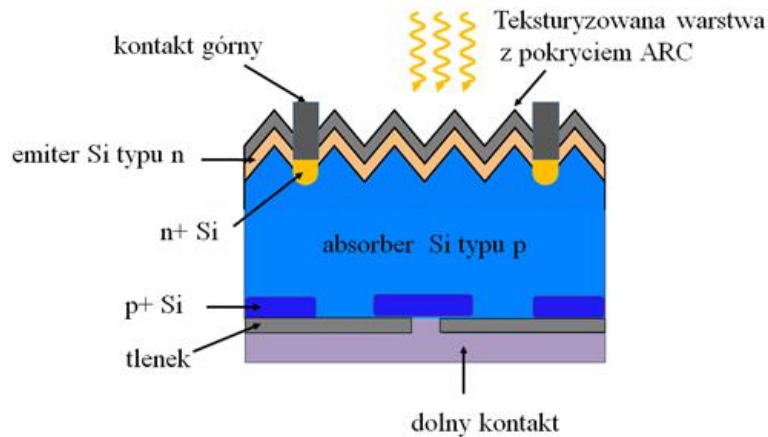
Dziś - ogniwo HIT

Cienkie! (98 μ m) - tanie

Stabilne

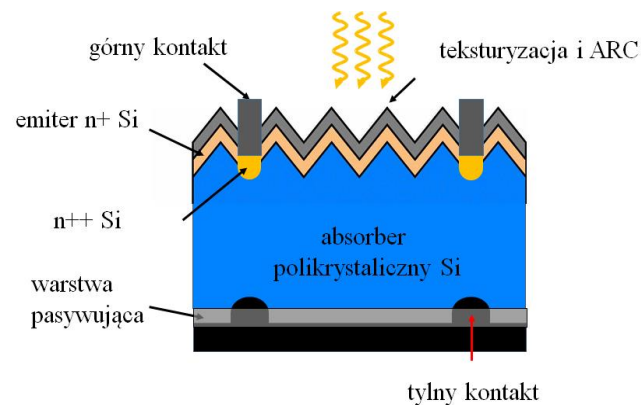
Zaawansowana technologia

Ogniwa krzemowe I generacji



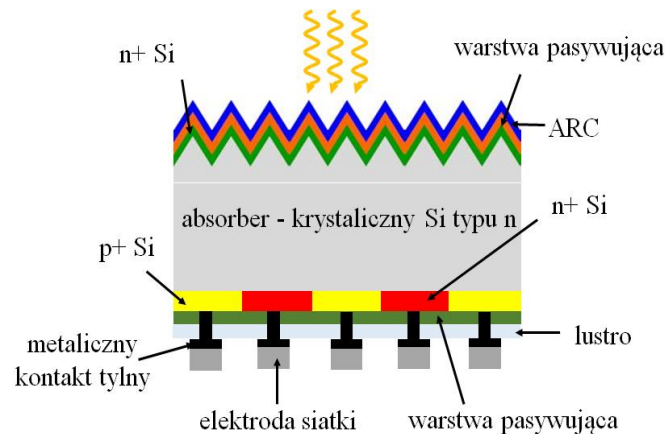
Ogniwo PERL (25%)

ang. Passivated Emitter Rear Locally diffused



Ogniwo PERC (20.6%)

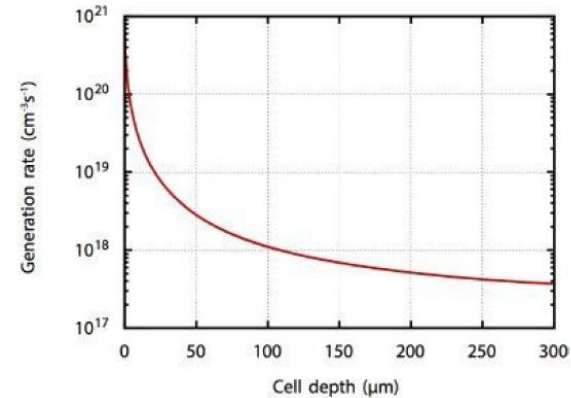
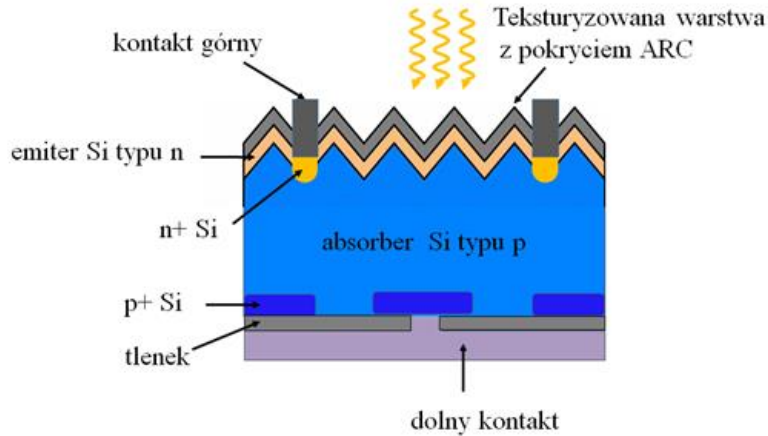
ang. Passivated Emitter and Rear Contact



Ogniwo IBC (24.2%)

ang. Interdigitated Back Contact

Ogniwo PERL (25%)

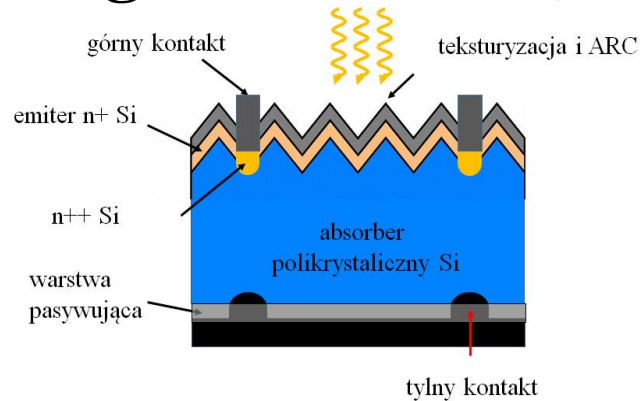


ang. Passivated Emitter Rear Locally diffused

Profil generacji nośników w C:Si pod wpływem oświetlenia AM1.5.

- 1. Teksturyzacja – odwrócone piramidy**
- 2. Podwójna warstwa ARC (MgF₂ lub ZnS)**
- 3. Precyzyjne elektrody metalowe wykonane techniką fotolitografii**
- 4. Emiter jest silnie domieszkowany tylko pod kontaktem metalicznym. Pozostała warstwa jest słabiej domieszkowana. Dzięki temu długość drogi dyfuzji nośników mniejszościowych (dziur) jest większa a to zapewnia dobrą fotoodpowiedź dla fal krótkich (niebieskie) – por. profil generacji.**
- 5. Na górze emitera (pod warstwą ARC) jest warstwa SiO_x zapewniająca spadek rekombinacji powierzchniowej.**
- 6. Tlenek nad dolnym kontaktem pasywuje absorber (poza obszarem samego kontaktu).**

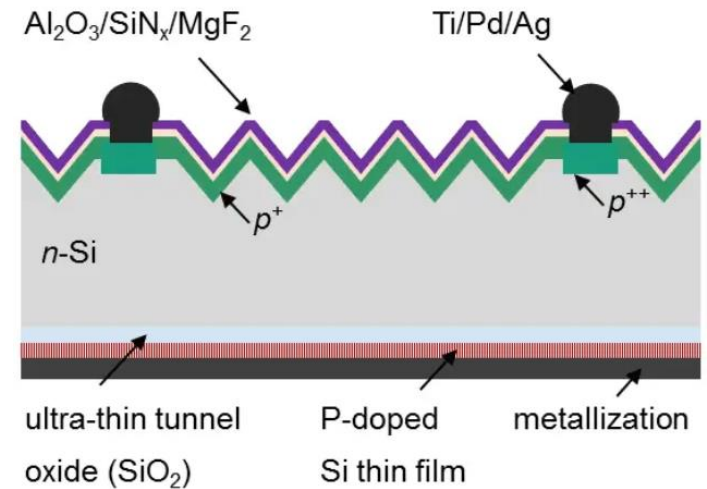
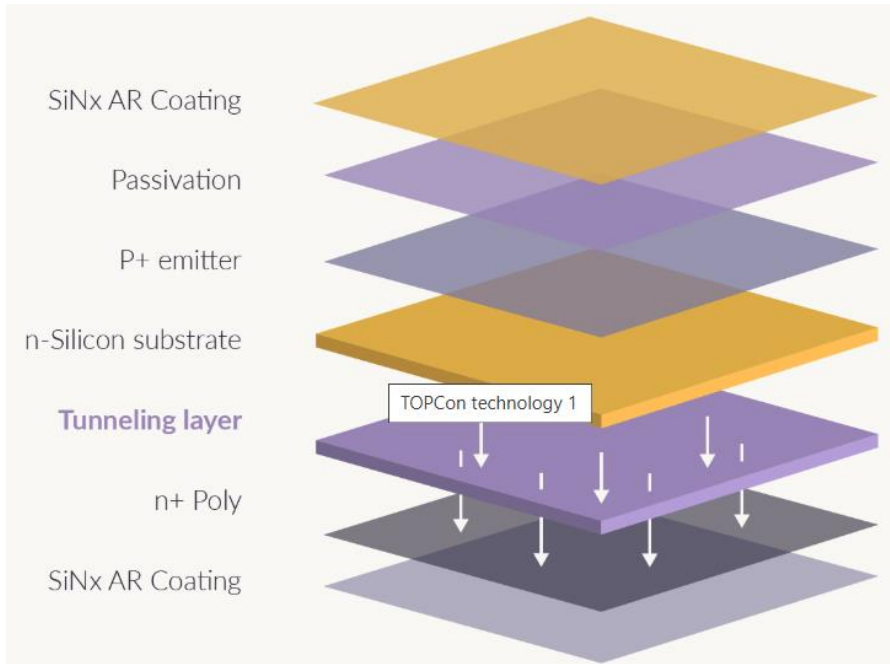
Ogniwo PERC (20.6%)



ang. *Passivated Emitter and Rear Contact*

Fotoogniwa PERC stanowią obecnie ok. 70% wszystkich produkowanych modułów fotowoltaicznych. Ogniwa PERC posiadają dodatkową warstwę pasywującą umożliwiającą odbicie światła w dolnej części ogniwka. Dzięki temu światło ponownie generuje pary nośników. Wykorzystanie efektywne fotonów powoduje niższą temperaturę pracy.

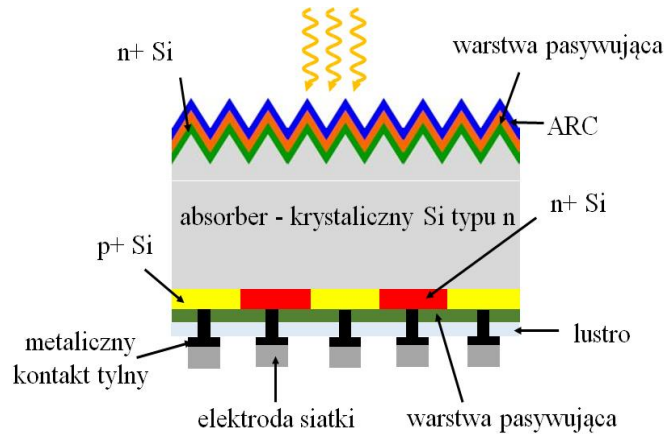
Ogniwo TOPCon



ang. Tunnel Oxide Passivated Contact

Nowa technologia - ogniwa TOPCon (Fraunhofer Solar Energy Institute). Ogniwa wykonane w technologii TOPCon do pewnego momentu zbudowane są jak PERC. Różnica polega na tym, że dodaje się dodatkowo jeszcze dwie warstwy – krzemu polikrystalicznego i ditlenku krzemu. Kluczowym składnikiem w technologii TOPCon jest ultracienka warstwa ditlenku krzemu, której grubość wynosi jedynie 1,5 nm, dzięki której możliwy jest selektywny przepływ elektronów przez tę warstwę przy pomocy zjawiska tunelowania (stąd nazwa technologii). Warstwa zapewnia doskonałe przewodzenie elektronów, które są nośnikami ładunku ujemnego, jednocześnie blokując dziury.

Ogniwo IBC (24.2%)



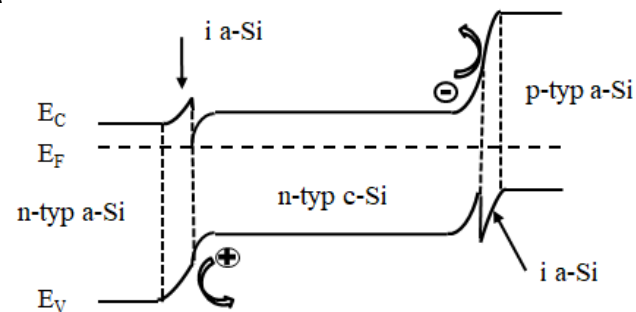
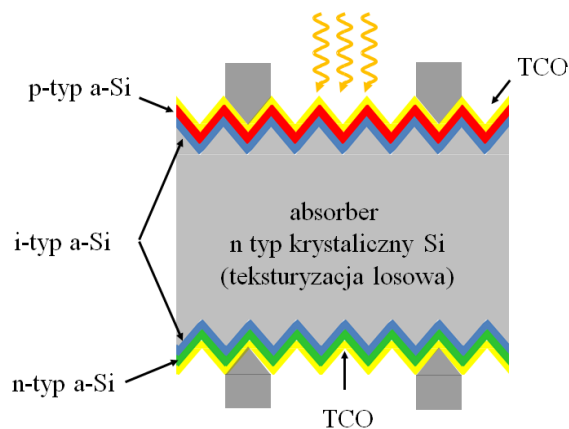
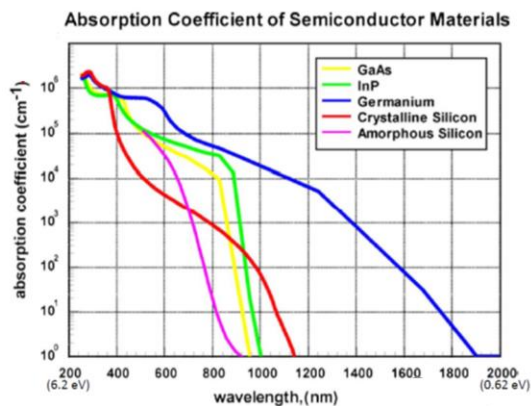
ang. Interdigitated Back Contact

- 1. Brak elektrod od frontu ogniwka; elektrody są z tyłu ogniwka – mogą mieć większe rozmiary (mniejsze straty na rezystancji)**
- 1. Absorber Si typu n – nie obserwuje się degradacji pod wpływem oświetlenia (w Si typu p tworzą się defekty – kompleksy B-O powodujące rekombinację i spadek wydajności)**
- 3. W strukturze IBC zamiast jednego jest szereg małych ogniw.**

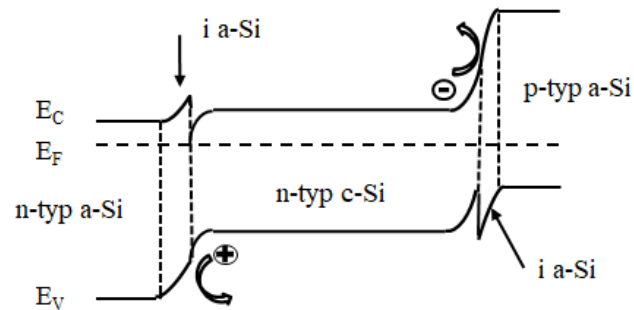
IBC to LG i SunPower. Sprawność paneli fotowoltaicznych IBC produkcji LG wynoszą od 19,5 do 22%, natomiast firmy SunPower 22,5%

Ogniwo HIT (HJT)

Najbardziej popularne są ogniwa HIT, w których warstwa monokrystalicznego krzemu typu n jest umieszczona pomiędzy dwiema warstwami samoistnego krzemu amorficznego. Na tej warstwie z kolei z jednej strony osadzona jest warstwa p-typu a-Si:H a z drugiej – n typu a-Si:H. Heterozłącze p-n formuje się między Si typu n i krzemem amorficznym typu p. Energia wzbroniona krzemu amorficznego wynosi 1.6-1.8eV, w zależności od zawartości wodoru. W odróżnieniu od krzemu, jest to półprzewodnik z prostą przerwą wzbronioną, zatem znacznie lepiej absorbuje światło niż krzem krystaliczny. Istotną korzyścią wynikającą z zastosowania amorficznego krzemu, materiału o szerszej przerwie wzbronionej niż krzem, jest niższa koncentracja nośników mniejszościowych, co prowadzi do mniejszej szybkości rekombinacji.



Ogniwo HIT (HJT)



Energie wzbronione a-Si:H i c-Si różnią się od siebie o 0.5 - 0.7 eV, przy czym wiadomo, że band-offset w pasmie walencyjnym jest ok. 2-3 razy większy niż dla pasma przewodnictwa. Nośniki mniejszościowe – dziury są zbierane przez elektrodę przednią, większościowe – elektrony, przez elektrodę tylną. Niewielka grubość warstwy (i) a-Si:H umożliwia tunelowanie dziur do emitera (p) a-Si:H. Duży band offset w pasmie walencyjnym odpycha dziury uniemożliwiając rekombinację powierzchniową. To samo dotyczy elektronów od strony przedniego kontaktu (strzałki na Rys.).

Technologia HJT pozwoliła na produkcję ogniw słonecznych o wysokiej wydajności dwustronnej, zwanych Bifacial. Są one w stanie przetwarzać na energię elektryczną nie tylko bezpośrednie promienie słoneczne, ale także światło odbite od ziemi i padające na panele od spodu. W przypadku tradycyjnych monokrystalicznych ogniw dwustronność paneli pozwalała na uzyskanie współczynnika bifacjalności rzędu 60-70%. Natomiast nowoczesne panele HJT firmy SunProPower osiągają wartość aż 85%, co umożliwia jeszcze bardziej skuteczne wykorzystanie światła odbitego. To dlatego moduły bifacjalne najlepiej sprawdzają się w instalacjach gruntowych.

T. F. Schulze, L. Korte, F. Ruske, and B. Rech: “Band lineup in amorphous/crystalline silicon heterojunctions and the impact of hydrogen microstructure and topological disorder”, *Physical Review B* 83, 165314-1 – 165314-11(2011).

Ogniwa krzemowe – porównanie

	PERC	TOPCON	HJT	IBC
Efficiency in mass production	23,50%	24,80%	25.80%	25.00%
Efficiency in laboratory	24.50%	26.40%	26.81%	25.20%
Efficiency limit	24.50%	28.70%	28.50%	--
Maturity of production	Very mature	Mass production is available, has higher difficulty on production technology	Mass production is available, has higher difficulty on production technology	Mass production is available, has higher difficulty on production technology

Best Research-Cell Efficiencies

III-V Multijunction Cells

(2-terminal, monolithic)

LM = lattice matched

MM = metamorphic

IMM = inverted, metamorphic

▽ Two-, three-, and four-junction (concentrator)

▼ Three-junction or more (non-concentrator)

▲ Two-junction (non-concentrator)

Single-Junction GaAs

△ Single crystal

▲ Concentrator

▽ Thin-film crystal

Crystalline Si Cells

■ Single crystal (concentrator)

■ Single crystal (non-concentrator)

□ Multicrystalline

● Silicon heterostructures (HIT)

▽ Thin-film crystal

Thin-Film Technologies

● CIGS (concentrator)

● CIGS

● CdTe

○ Amorphous Si:H (stabilized)

Emerging PV

○ Dye-sensitized cells

● Perovskite cells

● Organic cells

▲ Organic tandem cells

◆ CZTSSe cells

◇ Quantum dot cells

◆ Perovskite tandem cells

Hybrid Tandems (2-terminal)

▲ Perovskite/Si

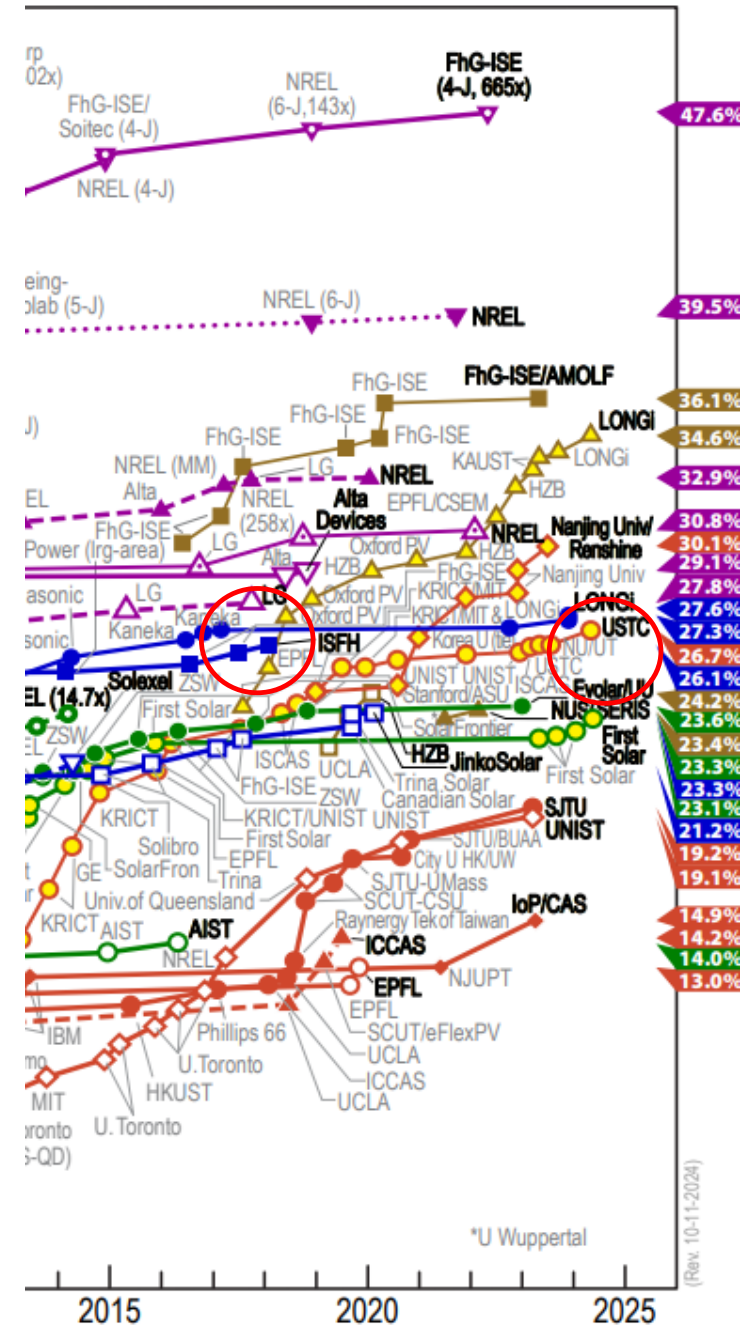
▲ Perovskite/organic

■ Perovskite/CIGS

■ III-V/Si

The Institute for Solar Energy Research
Hamelin (ISFH) -Germany

LONGi (Chiny)



NAJWIĘKSI PRODUCENCI MODUŁÓW PV W 2023

WG ILOŚCI SPRZEDANYCH SZTUK



1

Jinko

2

Longi / Trina

4

JA Solar

5

Tongwei / Canadian Solar

7

Astronergy

8

Risen

9

DAS Solar

10

First Solar / GCL / Yingli / DMEGC

Przykład

Instalacje PV w Europie w r. 2024 – 65.5 GW.

Roczne zużycie energii w Europie w r. 2024 – 2405 TWh.

Jaki jest procentowy wkład PV w całkowite zapotrzebowanie energetyczne w Europie w r. 2024 ?

Założyć, że stosunek mocy dostarczonej przez instalacje PV do mocy przez nie wytworzonej wynosi 15%.

Rzeczywista roczna moc uzyskana z fotowoltaiki:

$$65.5GW \cdot 0,15 = 9.86GW$$

Energia, która odpowiada tej mocy:

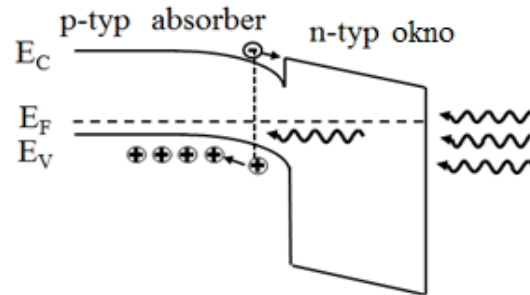
$$9.86GW \cdot 8760h (365dni \cdot 24h) = 86TWh$$

Procentowy wkład PV w całkowite zapotrzebowanie energetyczne w Europie w r. 2024:

$$x = \frac{86TWh}{2405TWh} \cdot 100\% = 3.5\%$$

Ogniwa na heterozłączach

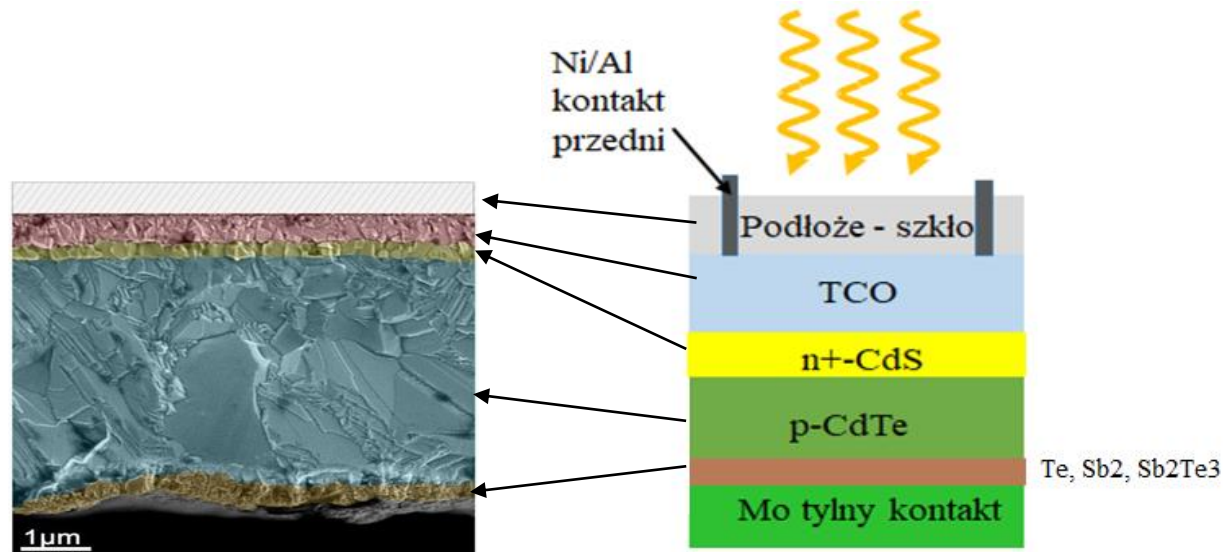
Ogniwa heterozłączowe są zbudowane zwykle z materiału o szerszej przerwie wzbronionej, który pełni rolę okna oraz materiału o węższej przerwie, który jest absorberem.



Główną korzyścią wynikającą z zastosowania heterozłącza, jest eliminacja rekombinacji powierzchniowej. Obszar “okna” jest przezroczysty dla fotonów wysokoenergetycznych o energii większej od przerwy wzbronionej absorbera a mniejszej od energii wzbronionej “okna”. Wadą ogniw heterozłączowych jest tworzenie się defektów na interfejsie absorber-okno.

Ogniwa CdTe
Ogniwa CIGS

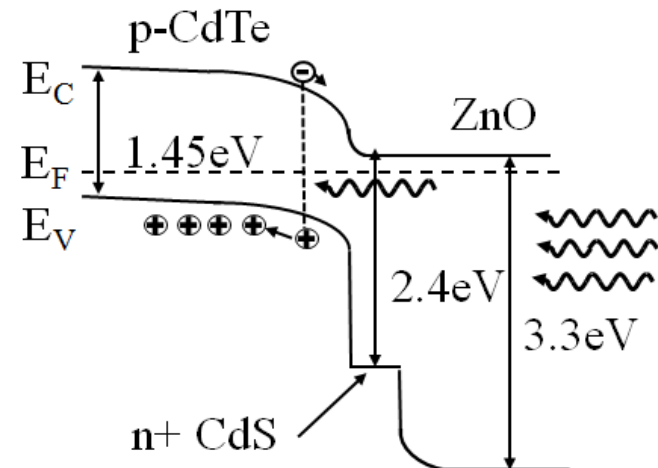
Ogniwa cienkowarstwowe CdTe



Noufi et al., WCPEC-4, (2006)

Grubość warstwy n-CdS 100–300 nm. Grubość warstwy CdTe ~ 10 μm.

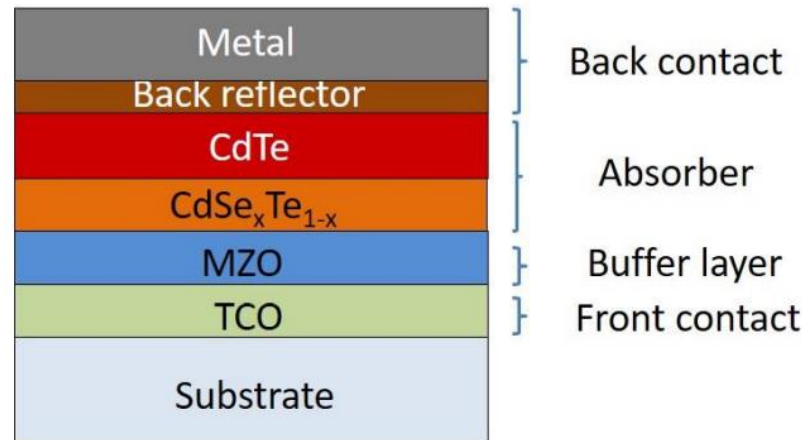
Koncentracja elektronów w CdS jest 3 rzędy większa niż koncentracje dziur w CdTe. Zatem pole elektryczne wnika głównie w obszar CdTe. Dlatego nośniki generowane światłem są separowane w tym obszarze.



Współczesne ogniwa CdTe

W ostatnich latach sprawność ogniw CdTe wzrosła z 16% do 22%, dzięki :

- opracowaniu nowego kontaktu tylnego, który służy również jako reflektor,
- przestrajalnej przerwie wzbronionej, dzięki wprowadzeniu do absorbera CdTe warstwy $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$
- zastąpieniu CdS transparentną warstwą buforową MZO.
- Domieszkowaniem As zamiast Cu



Alessandro Romeo * and Elisa Artegiani Energies 2021, 14, 1684

Zalety:

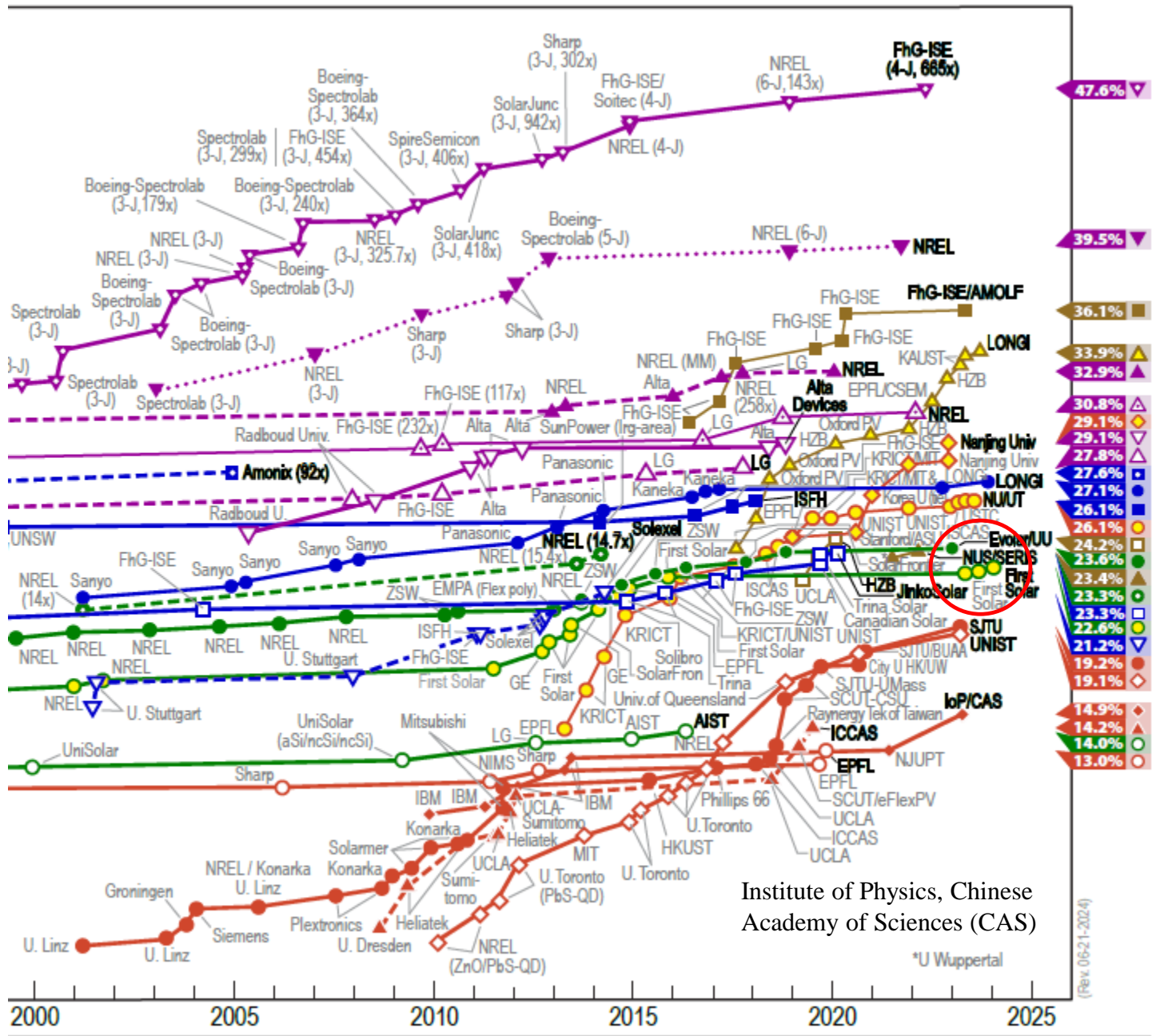
V_{oc} dla ogniw CdTe nie spada ze wzrostem temperatury tak jak dla ogniw Si czy CIGS.

Niewielki negatywny wpływ na środowisko.

Możliwość recyklingu.

- Thin-Film Technologies**
- CIGS (concentrator)
 - CIGS
 - CdTe
 - Amorphous Si:H (stabilized)

- Emerging PV**
- Dye-sensitized cells
 - Perovskite cells
 - Organic cells
 - ▲ Organic tandem cells
 - ◆ CZTSSe cells
 - ◆ Quantum dot cells
 - ◆ Perovskite tandem cells



Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS)

*U Wuppertal

(Rev. 06-21-2024)

CIGS

Związek półprzewodnikowy I-III-VI₂

Wiązanie tetraedryczne

Struktura chalkopiryty

Przerwa wzbroniona i powinowactwo elektronowe:

$$E_g = 1.040 + 0.391 X + 0.262 X^2$$

$$X_e = 4.610 - 1.162 X + 0.034 X^2$$

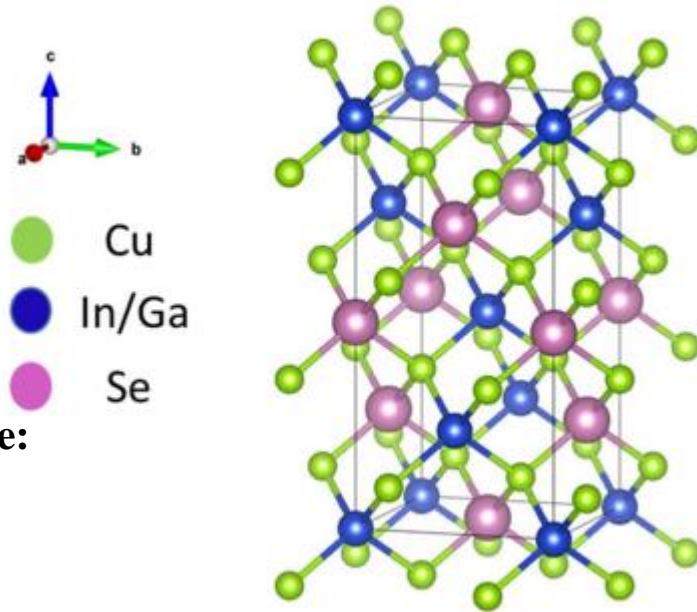
Gdzie $X = \text{Ga} / (\text{In} + \text{Ga})$

CuInSe_2 $E_g = 1.04$ eV, CuGaSe_2 $E_g = 1.67$ eV.

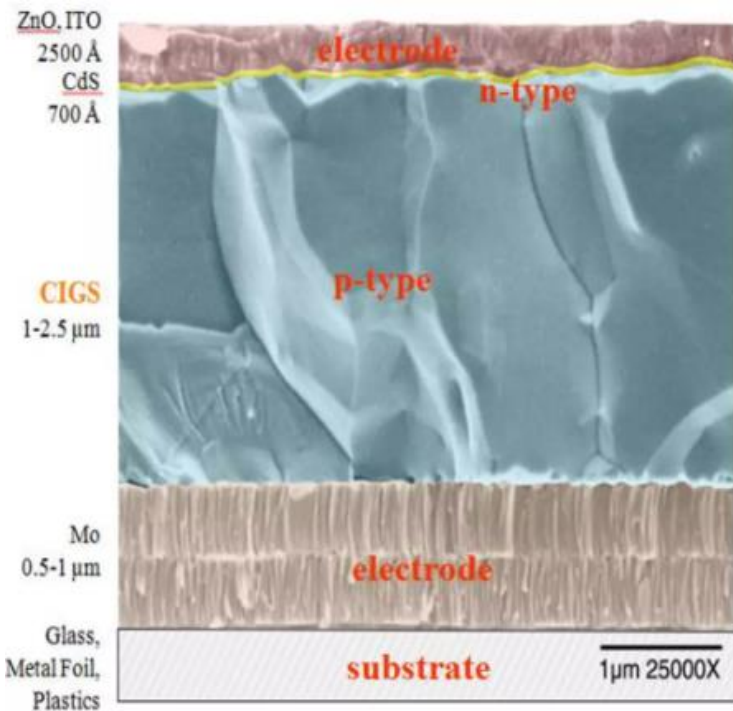
Optymalna sprawność ogniwa zależy od przerwy wzbronionej. Optymalna przerwa wzbroniona ogniwa jest równa ok. 1,4eV. To odpowiada $X = \text{Ga} / (\text{In} + \text{Ga}) = 0,643$

Współczesne ogniwa CIGS nie zawierają dużej ilości Cu, aby zapobiec formowaniu się selenku miedzi Cu_{2-x}Se , który ma dużą przewodność i powoduje zwarcie przedniego i tylnego kontaktu.

Warstwy CIGS są typu p, ze względu na V_{Cu} , który jest akceptorem.



G. Regmi et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics (2020) 31:7286–7314



Technologia ogniwa CIGS

- Podłoże szklane stanowi zwykle szkło sodowe. Dyfuzja Na do warstwy CIGS skutkuje wzrostem V_{oc} , FF i η . Ponadto współczynnik rozszerzalności cieplnej jest podobny do wsp. rozszerzalności CIGS.
- Mo jest odporny na korozję, co jest ważne bo proces wzrostu CIGS odbywa się w atmosferze Se/S i w wysokiej temperaturze (500°C). Podczas osadzania CIGS na Mo, tworzy się warstwa MoSe_2 , która poprawia adhezję i dyfuzję Na.

- **Warstwa buforowa:**

Musi być typu n, aby tworzyć złącze p-n z CIGS, które jest typu p,

Musi być przezroczysta dla fotonów, które mają zostać zaabsorbowane przez absorber

Musi charakteryzować się niską rekombinacją.

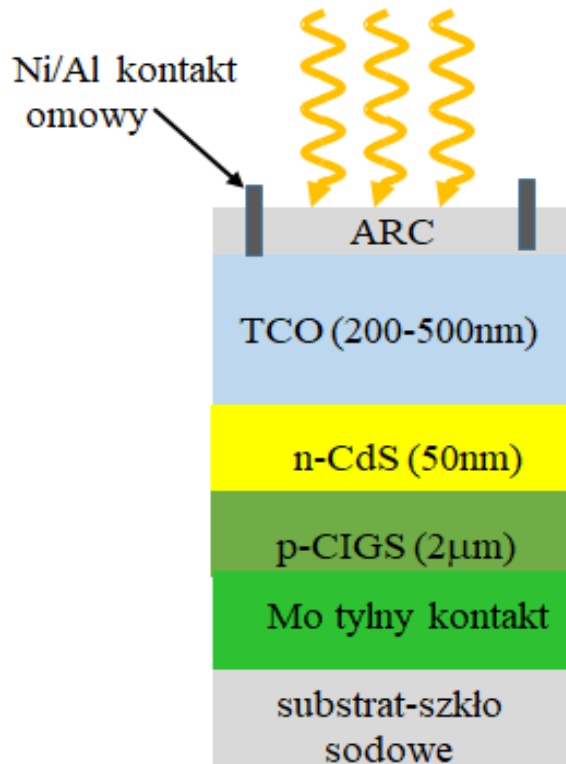
Zwykle tj. CdS lub ZnS.

- **TCO**

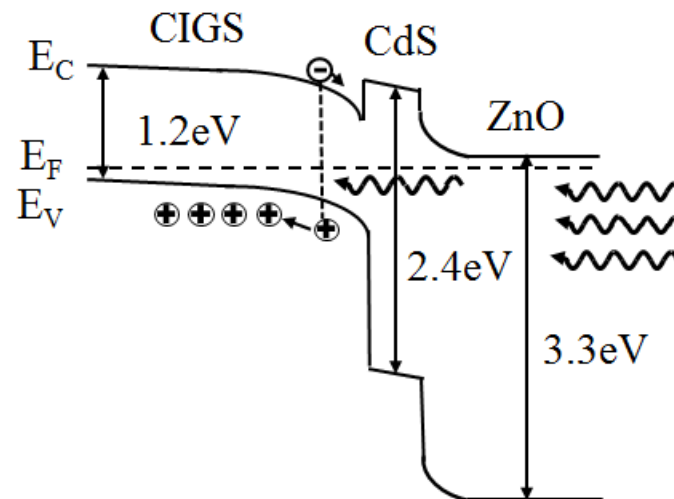
Samoistny ZnO oraz ZnO:Al – przewodzący tlenek, przezroczysty dla fotonów, które mają zostać zaabsorbowane przez absorber. Zwykle otrzymany metodą sputteringu.

Ogniwa cienkowarstwowe CIGS

Osadzanie warstw CIGS na podłożu odbywa się w próżni, przy użyciu techniki naparowania bądź sputteringu. Miedź, gal i ind są kolejno osadzone i wygrzewane w parach selenu, w wyniku czego otrzymuje się warstwy CIGS. Stosowane są również techniki drukowania. Najpierw drukarka nakłada krople pierwszego półprzewodnikowego atramentu na folię aluminiową, potem następuje depozycja kolejnych półprzewodników i kontaktów przednich na górze wydrukowanej warstwy CIGS.

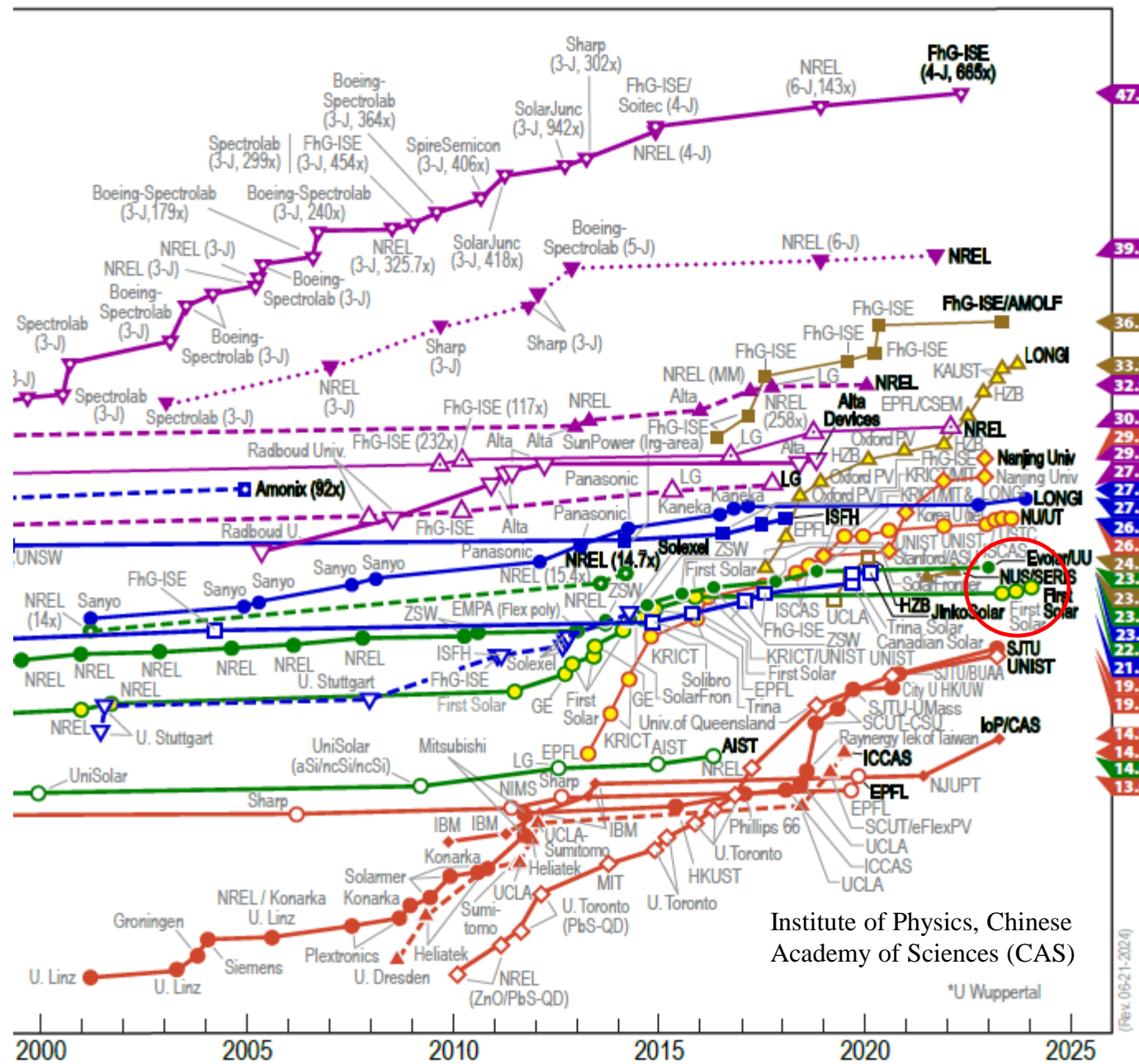


$$x \cong 0,3 \quad E_g = 1,1 - 1,2\text{eV}$$

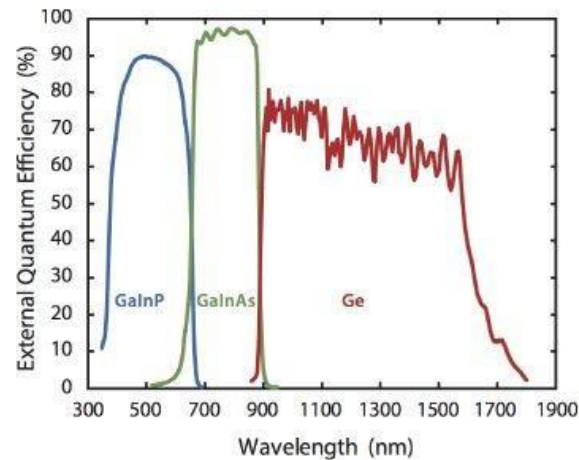
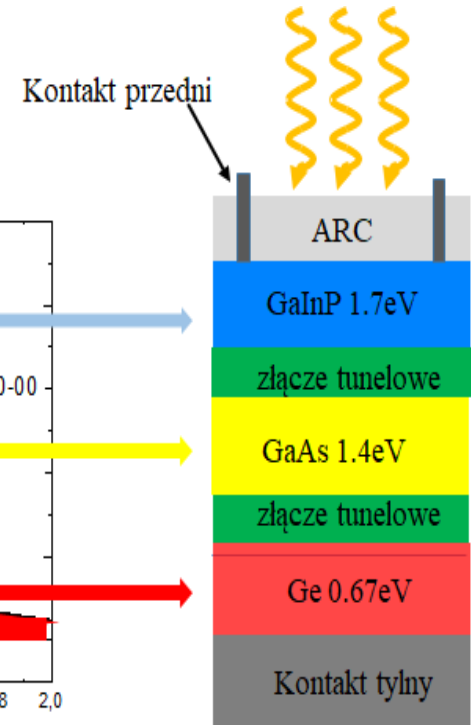
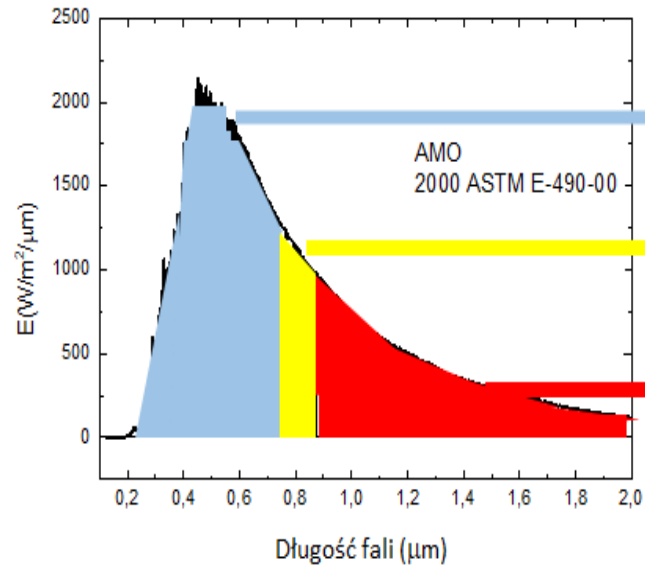
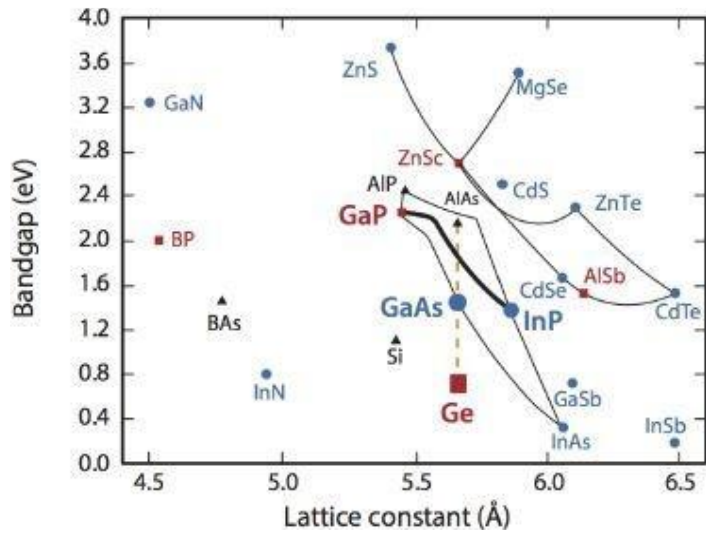


- Thin-Film Technologies**
- CIGS (concentrator)
- CIGS
- CdTe
- Amorphous Si:H (stabilized)
- Emerging PV**
- Dye-sensitized cells
- Perovskite cells
- Organic cells
- ▲ Organic tandem cells
- ◆ CZTSSe cells
- ◆ Quantum dot cells
- ◆ Perovskite tandem cells

First Solar
University Uppsala



Ogniwa wielozłączone



III-V Multijunction Cells

(2-terminal, monolithic)

LM = lattice matched

MM = metamorphic

IMM = inverted, metamorphic

▽ Two-, three-, and four-junction (concentrator)

▼ Three-junction or more (non-concentrator)

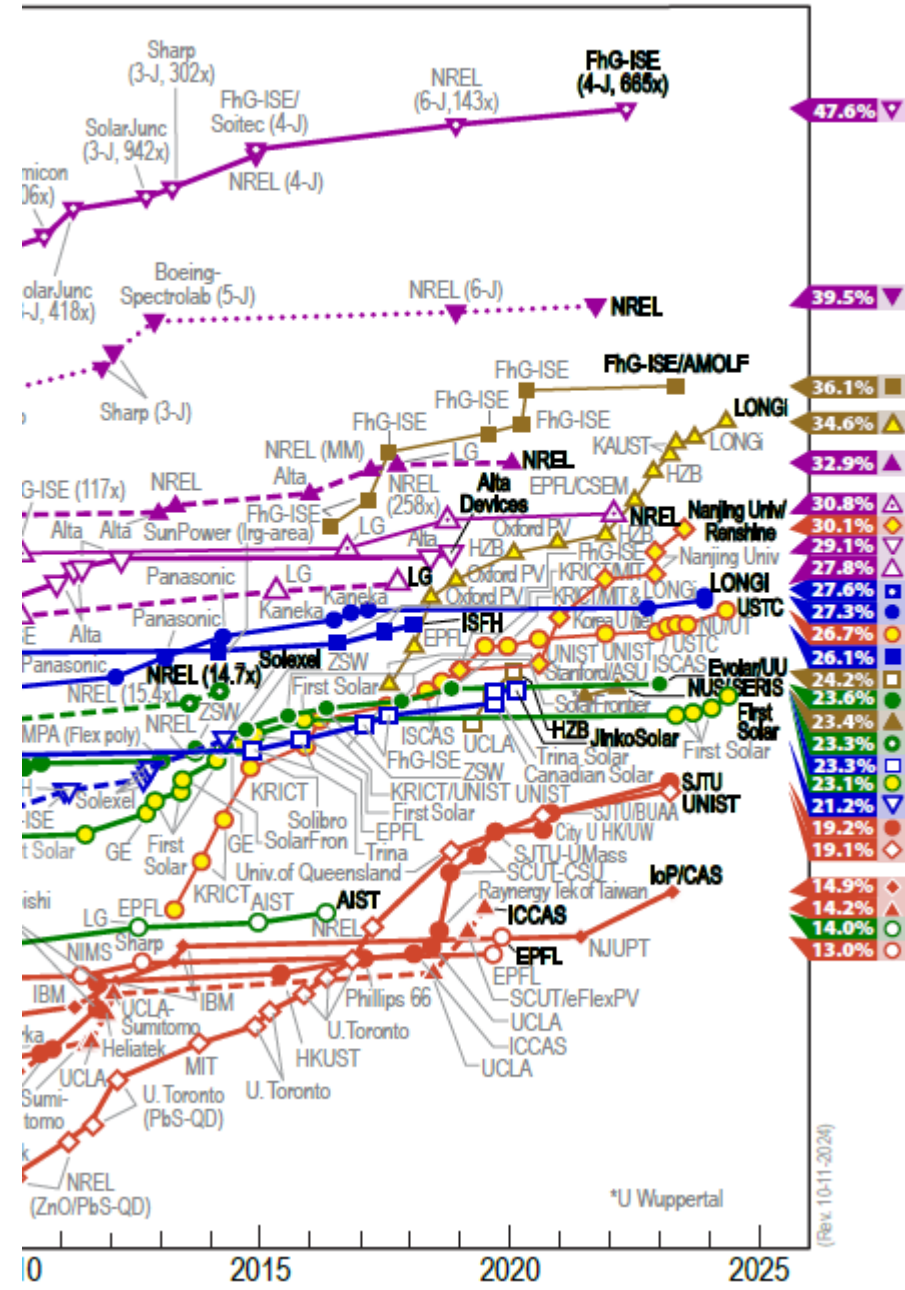
▲ Two-junction (non-concentrator)

Single-Junction GaAs

△ Single crystal

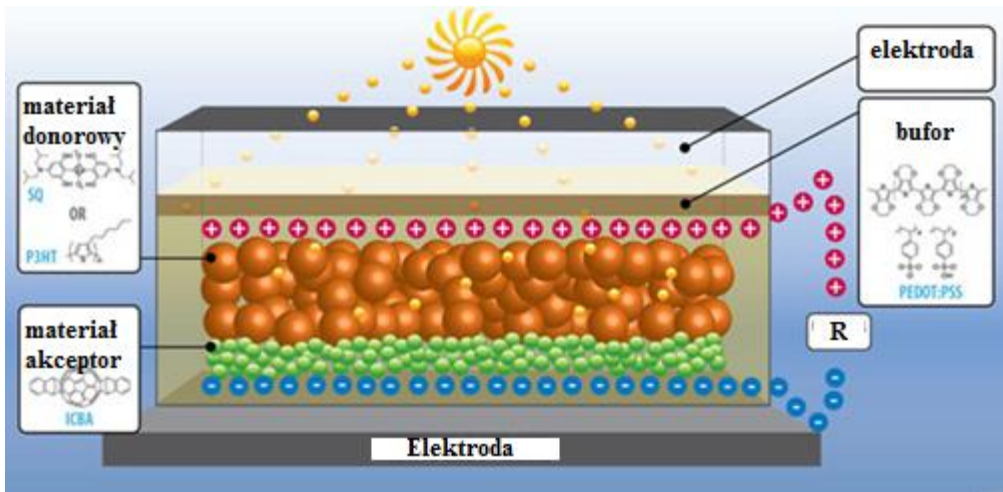
▲ Concentrator

▽ Thin-film crystal



(Rev. 10-11-2024)

Ogniwa organiczne



Oparte są na organicznych półprzewodnikach (polimerach, oligomerach, dendrymerach).

Zalety

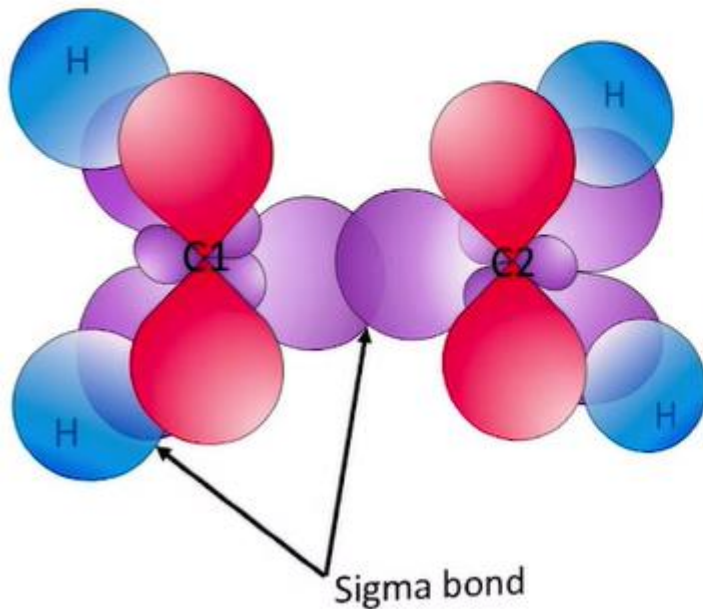
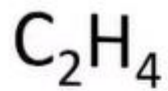
- **B. duża absorpcja (90%)**
- **Elastyczne**
- **Duża powierzchnia**
- **Tanie**

Wady

- **Niska wydajność (kilkna %)**
- **Krótki czas życia (5 lat)**
- **Wrażliwość na wysokie temperatury**

Węglowodorki nienasycone

Hybrydyzacja sp^2



Ten orbital nie uległ hybrydyzacji

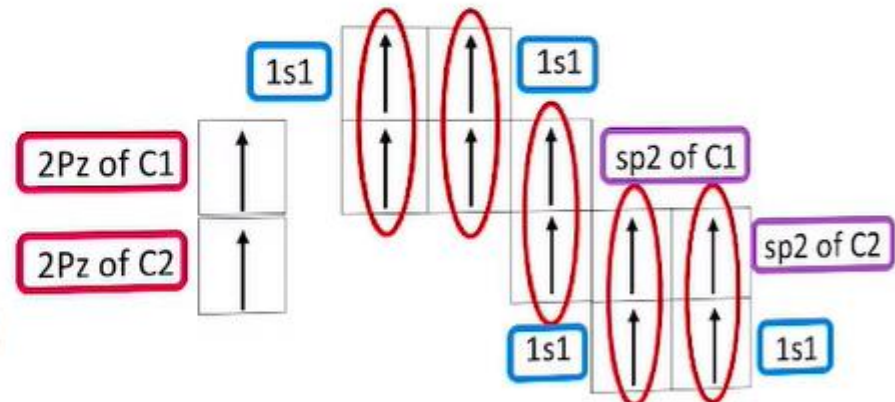


C*

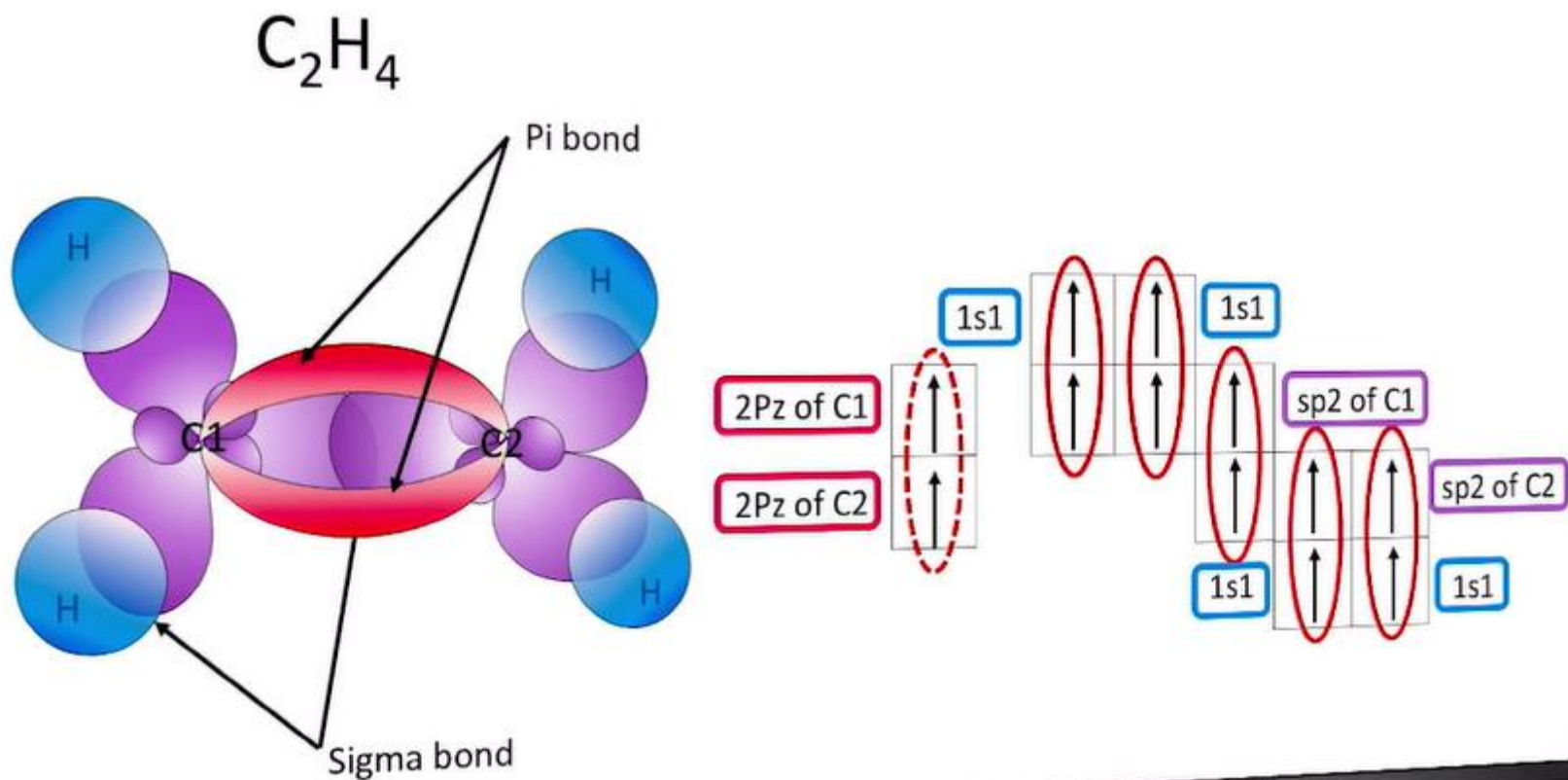


$2s^2$

$2p^1$

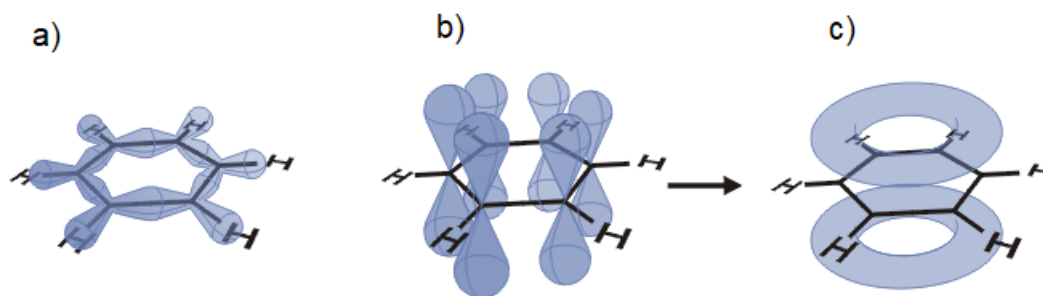


Węglowodorki nienasycone



Ogniwa organiczne

W ogniwach organicznych wykorzystuje się albo przewodzące organiczne polimery albo organiczne cząsteczki, które zawierają węgiel, tworząc bądź to cykliczną, bądź niecykliczną, albo liniową strukturę czy wreszcie strukturę złożoną z ich różnych kombinacji. Są to tzw. związki skoniugowane, zawierające układ naprzemiennych wiązań podwójnych i pojedynczych. Należy do nich np. benzen (C_6H_6).



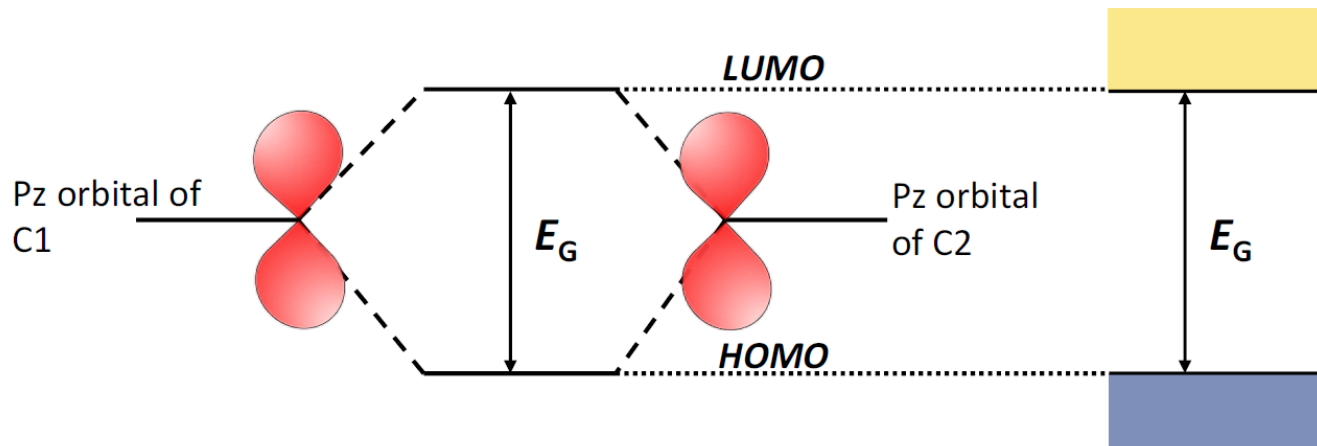
Benzen a) orbitale sp_2 , b) orbitale $6p_z$ c) zdelokalizowany orbital π .

Benzen ma wzór ogólny C_6H_6 . Każdy z sześciu atomów węgla wykazuje hybrydyzację sp^2 - orbitale przekrywają się czółowo tworząc wiązanie kowalencyjne σ . Wiązanie to jest bardzo silne. Pozostałych sześć niezhybrydowanych orbitali atomowych p_z przekrywa się bocznie i tworzy orbital zdelokalizowany π , obejmujący swym zasięgiem wszystkie sześć atomów węgla.

Walencyjny elektron z oryginalnego orbitala p_z w zdelokalizowanym orbitalu jest jednocześnie przypisany do 6 atomów węgla. Jest to równoznaczne ze zdolnością do udziału w transporcie prądu.

Formowanie poziomów energetycznych w molekuie organicznej

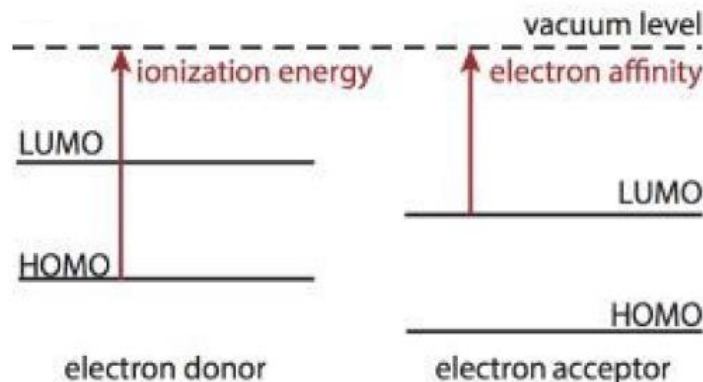
Podobnie jak w przypadku orbitala zhybrydyzowanego sp^3 w półprzewodniku, orbitale zhybrydyzowane π mogą tworzyć stany wiążące (o niższej energii) i antywiązące – o wyższej energii. Tak jest, ponieważ mieszanie się orbitali p_z może być konstruktywne i destruktywne. Konstruktywnemu odpowiada orbital wiążący o niższej energii. Ten orbital nazywa się orbitalem HOMO (ang. Highest Occupied Molecular Orbital) zaś orbital antywiązący – odpowiadający mieszaniu destruktywnemu - o wyższej energii – LUMO (ang. Lowest Unoccupied Orbital).



Materiał organiczny typu p i typu n

Energia jonizacji – energia potrzebna do wzbudzenia elektronu z pasma walencyjnego (lub z poziomu HOMO) do poziomu próżni.

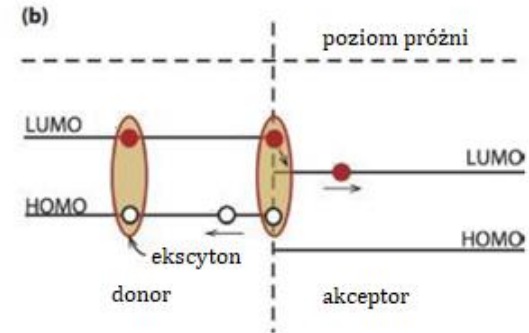
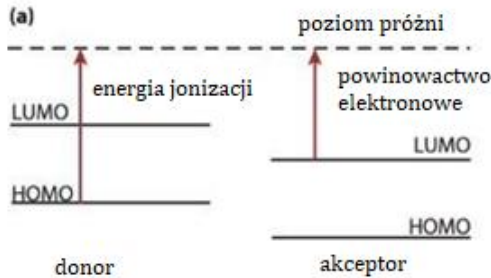
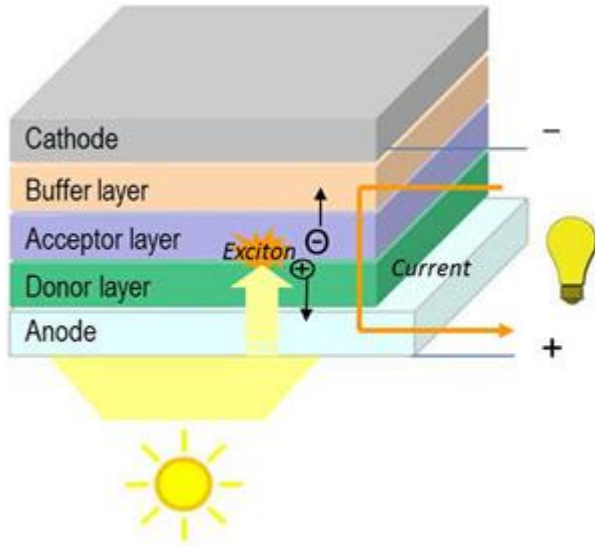
Powinowactwo elektronowe – energia, którą otrzymujemy, gdy elektron przechodzi z poziomu próżni do pasma przewodnictwa (lub do poziomu LUMO)



Materiał donorowy – posiada niską energię jonizacji – łatwo oddaje elektron

Materiał akceptorowy – posiada wysokie powinowactwo elektronowe – może łatwo przyjąć elektron

Ogniwo organiczne dwuwarstwowe



Jeśli półprzewodnik nieorganiczny zostanie oświetlony światłem o energii fotonów większej od przerwy wzbronionej, powstaje para nośników elektron- dziura, które łatwo zostają rozdzielone w polu elektrycznym złącza p-n, ponieważ nośniki mają wystarczająco długą drogę dyfuzji aby dotrzeć do obszaru zubożonego złącza. W materiałach organicznych powstaje para związanych oddziaływaniem Coulomba nośników – ekscyton. Rozdzielenie ładunków jest tu dużo mniej prawdopodobne, bo długość drogi dyfuzji ekscytonu jest rzędu kilku dziesiątek nanometrów. Na interfejsie złącza akceptor-donor, tworzy się pole elektryczne. Jeśli to pole będzie dostatecznie duże, to ekscyton ulegnie rozpadowi na elektron i dziurę. Elektron podąży do obszaru akceptora i do katody a dziura do obszaru donora i do anody.

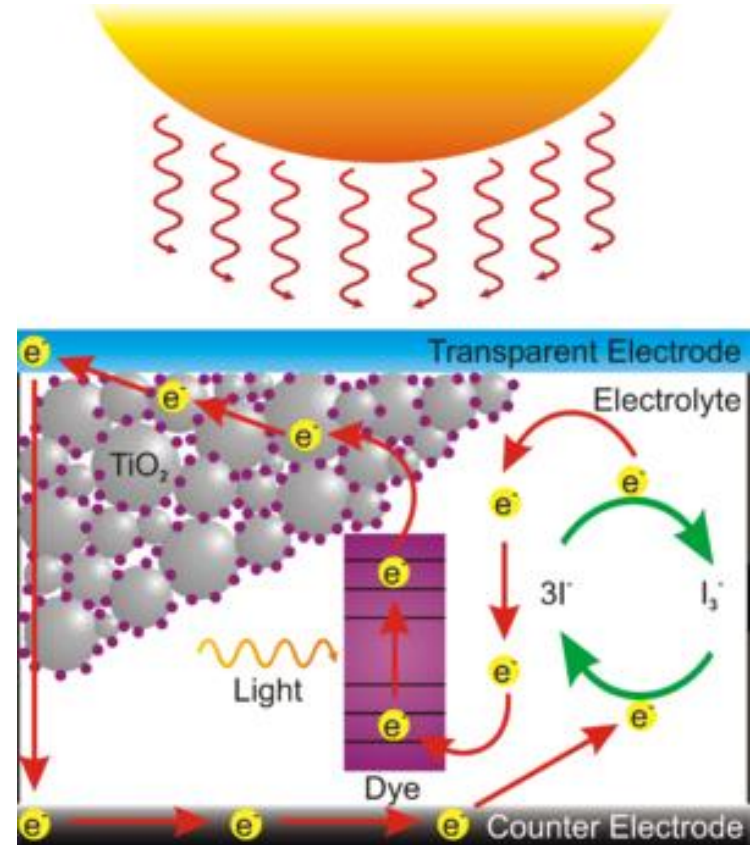
Ogniwo barwnikowe

Zalety

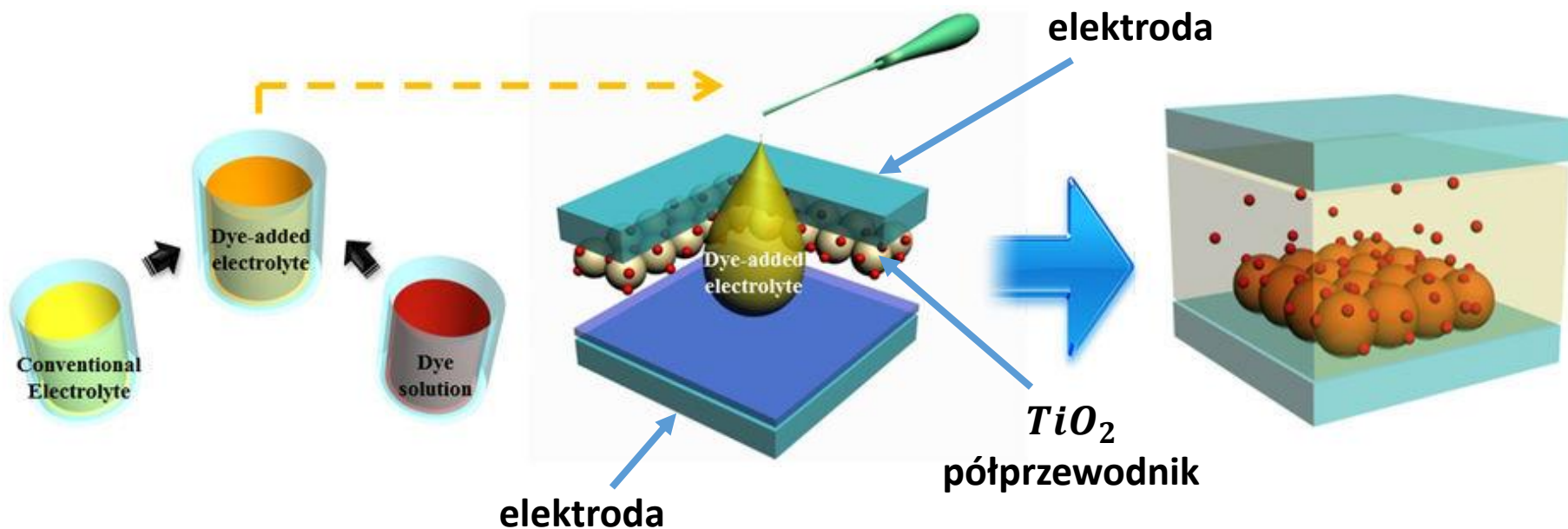
- Tanie odnawialne materiały
- Elastyczne
- Duża powierzchnia
- Niewielka wrażliwość na zmiany temperatury
- Zastosowanie – transparentne okna

Wady

- Niska wydajność (kilkanaście %)
- Ciekły elektrolit
- Krótki czas życia (5 lat)

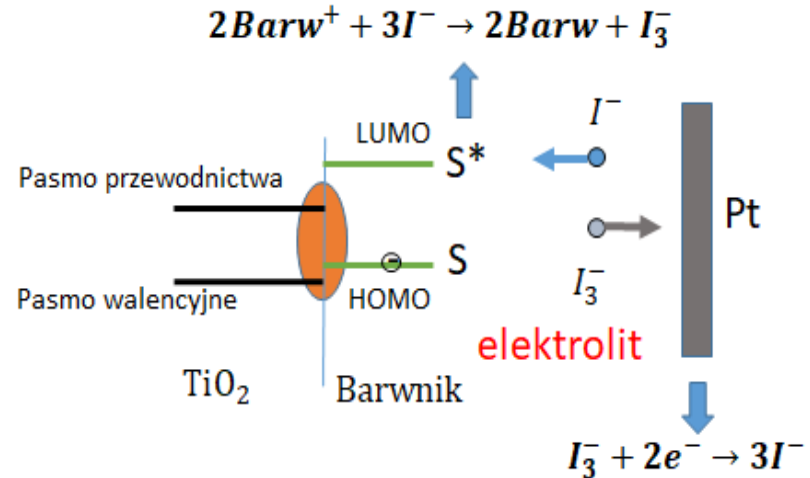
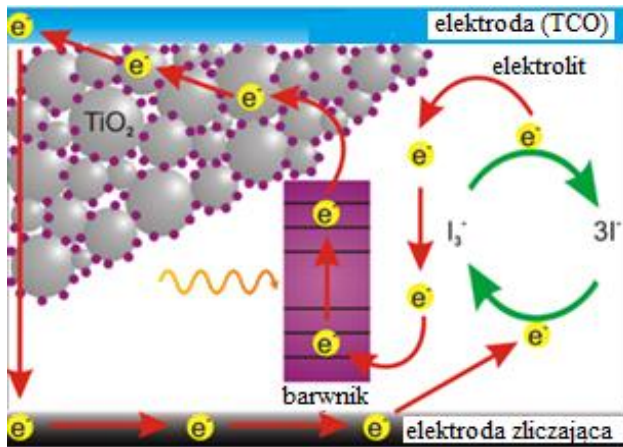


Ogniwo barwnikowe. Technologia

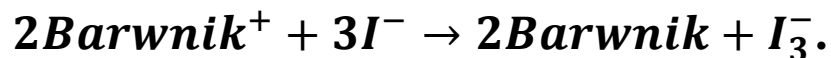


Roztwór TiO_2 jest nakładany na szkło pokryte transparentną elektrodą (TCO) i wygrzewany aby utworzyć pory. Następnie kropla elektrolitu z barwnikiem jest wpuszczana w pory warstwy TiO_2 , elektrolit dyfunduje. Zwykle elektrolitem jest bezwodny rozpuszczalnik z parą redokсовą oraz substancjami wspomagającymi ruchliwość jonów. Najczęściej wykorzystywaną parą redokсовą jest I^-/I_3^- . Barwnik zostaje zaadsorbowany przez nanocząstkę TiO_2 . Na wierzchu nakładana jest platynowa elektroda zliczająca. Barwnik (fotouczulacz) pełni rolę donora a TiO_2 pełni rolę akceptora. Tu donory i akceptory są wymieszane w całej objętości.

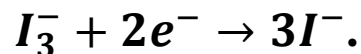
Ogniwo barwnikowe DSSC (ang. Dye-Sensitized Solar Cell).



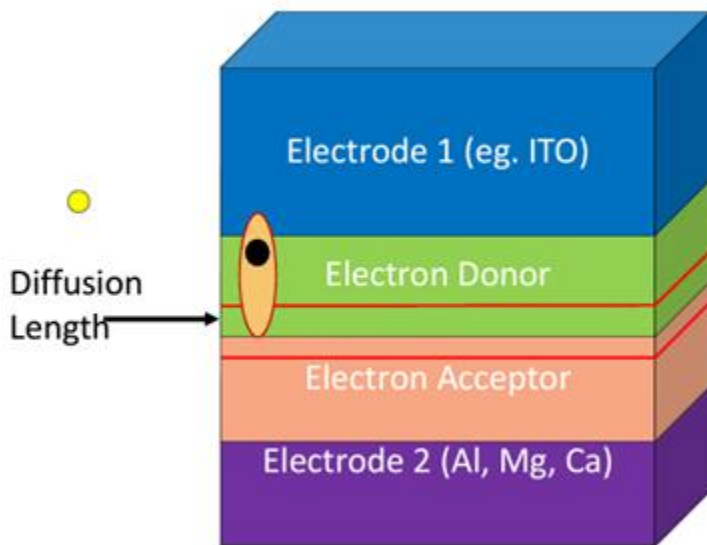
Jeśli foton zostanie zaabsorbowany przez fotouczulacz, to elektron zostaje wzbudzony ze stanu podstawowego S (HOMO) do stanu wzbudzonego S* (LUMO), który znajduje się powyżej poziomu LUMO TiO_2 . W efekcie elektrony są wstrzykiwane do TiO_2 a barwnik zyskuje ładunek dodatni. Elektrony dyfundują do transparentnej elektrody i dalej przez zewnętrzny obwód elektryczny do elektrody zliczającej, która jest w kontakcie elektrycznym z barwnikiem poprzez elektrolit. Następuje reakcja utleniania: trzy ujemnie naładowane jony jodu neutralizują dwie molekuly barwnika i wytwarza się jeden ujemnie naładowany trójjodek:



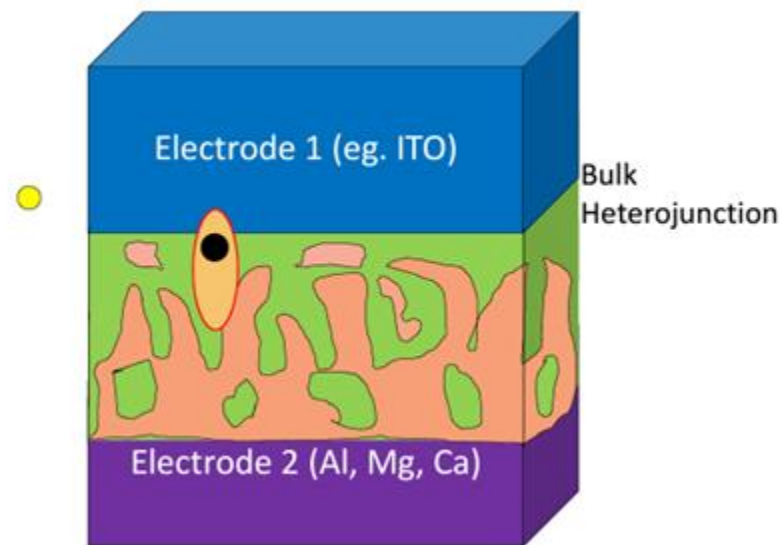
Trójjodek przemieszcza się do elektrody zliczającej, gdzie ulega redukcji poprzez oddziaływanie z dwoma elektronami do trzech ujemnie naładowanych jonów jodu I^- :



Struktura OPV

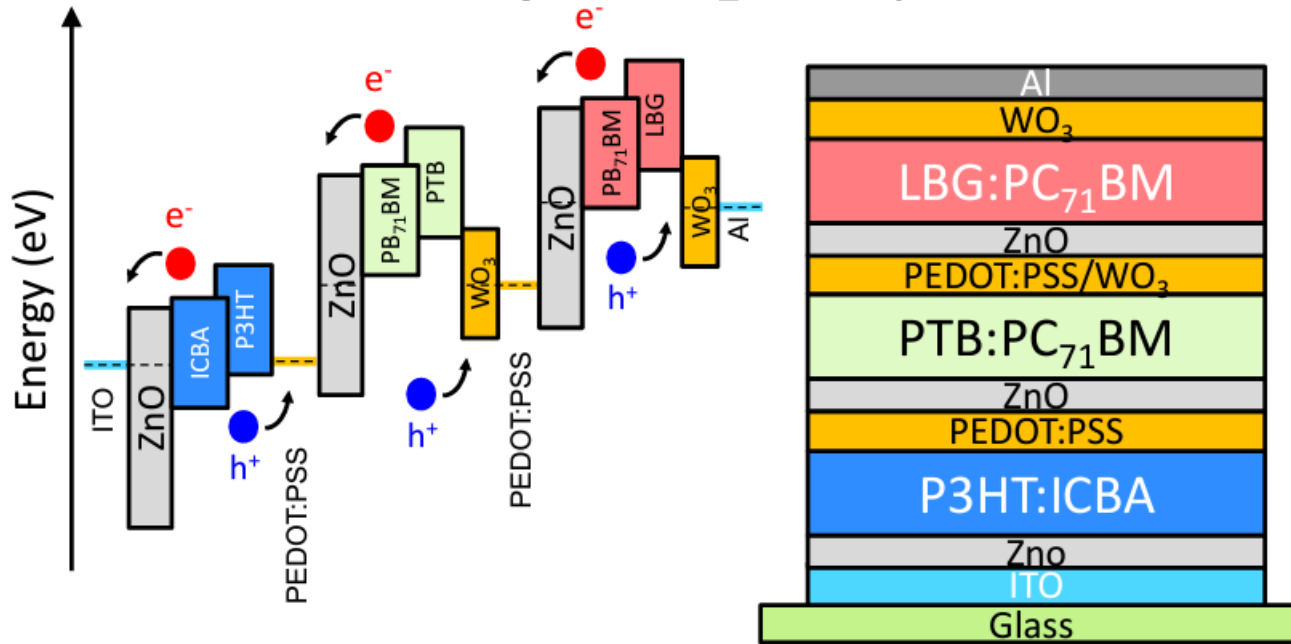


Droga dyfuzji ekscytanu jest dużo mniejsza od grubości absorbera.



Rozwiązaniem jest blenda.

Ogniwo potrójne



C.C. Chen et al. Adv. Mater. 26, 5670 (2014)

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) – mieszanina polimerów; HCL ICBA – Indene-C₆₀ bisadduct was designed to increase the open circuit of P3HT solar cells due to the higher lying LUMO level (0.17 eV higher than PCBM); akceptor

Górne ogniwo:

P3HT: ICBA – P3HT – donor; ICBA - akceptor

Środkowe ogniwo:

PTB: PC71BM – PTB – donor; PC71BM - akceptor

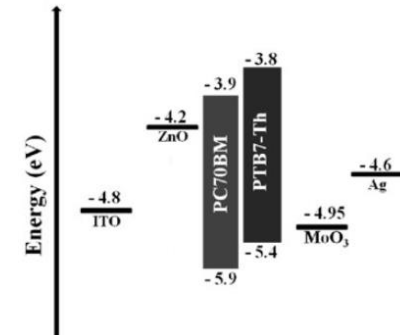
Dolne ogniwo:

LBG:PC71BM – LBG low band gap polimer – donor; PC 71 BM akceptor, pochodna fullereny

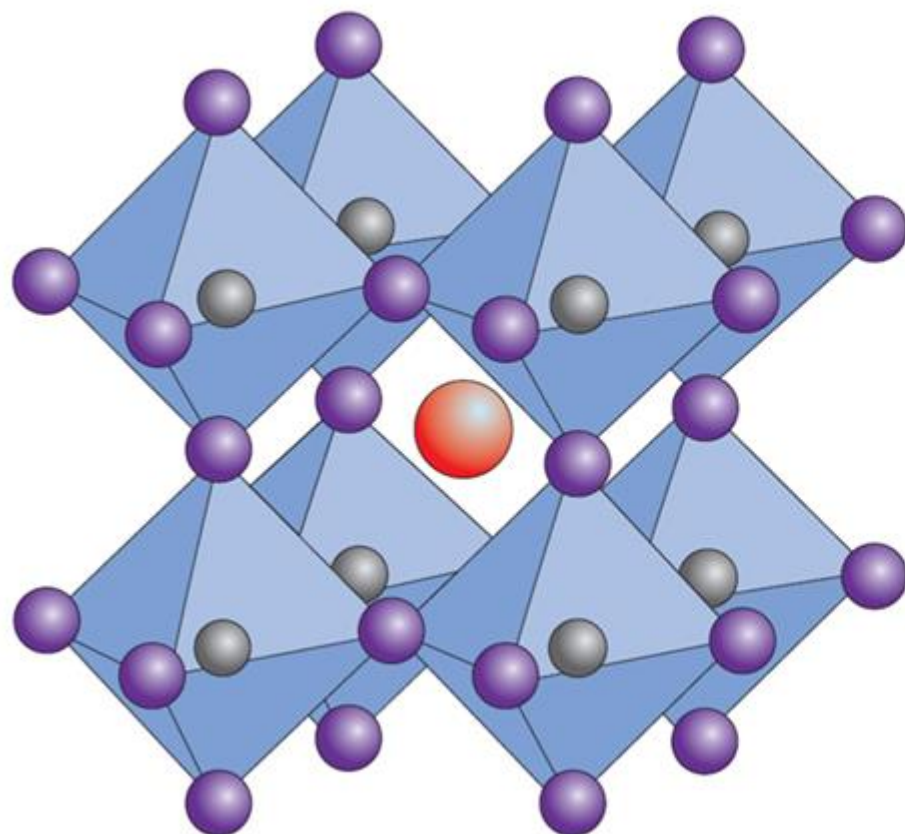
PEDOT:PSS i PEDOT:PSS/WO₃ – hole collecting interlayer

ZnO – electron collecting layer

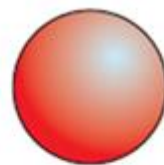
Interfejs PEDOT:PSS - ZnO – złącze tunelowe



Struktura perowskitu w ogniwach

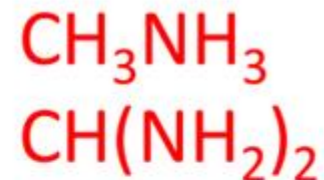


+ (kation)



A

methylammonium



+ (kation)



B

formamidinium

Pb, Sn



X

I, Cl, Br

- (anion)

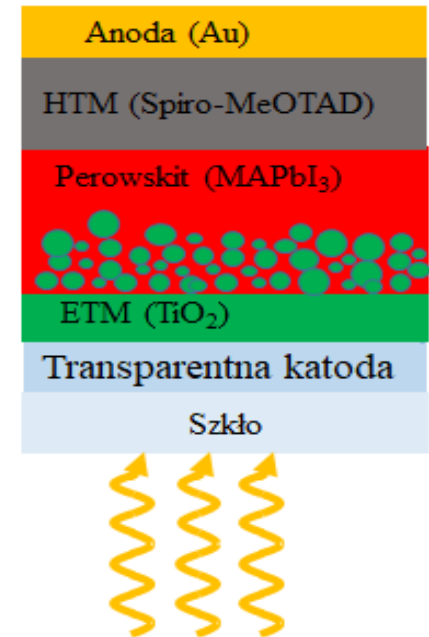
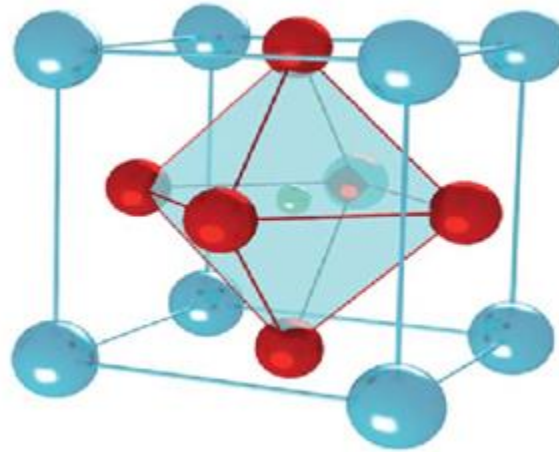
ABX_3

Struktura ABX_3

Stwierdzono, że kationy o promieniach od 1,60 Å do 2,50 Å tworzą strukturę perowskitu.

Ogniwo perowskitowe

kation  A
anion  X
kation  B



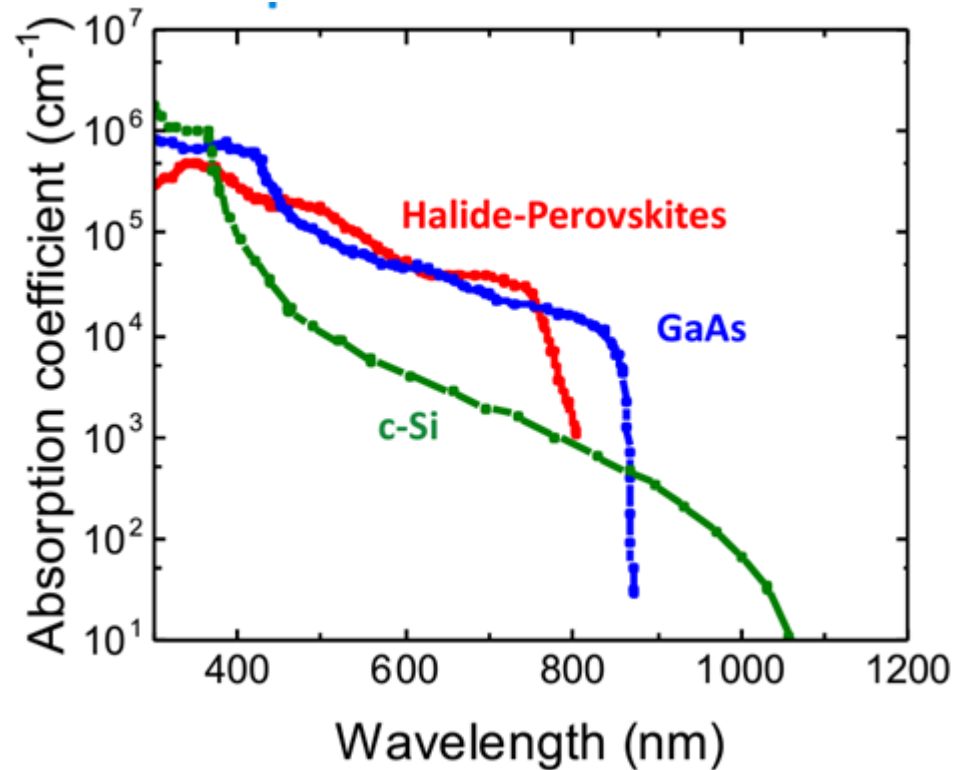
Struktura krystaliczna perowskitu: ABX_3 , gdzie X to anion zaś A oraz B są kationami. W ogniwach fotowoltaicznych, zwykle kation A jest organiczny ($CH_3NH_3^+$), kation B zwykle zawiera Pb. X jest halogenkiem, jest to np. jodek chloru lub bromek chloru.

W ogniwie słonecznym warstwa perowskitu znajduje się pomiędzy dwoma kontaktami – materiałem transportującym dziury i materiałem transportującym elektrony. Absorpcja światła o energii większej od przerwy wzbronionej perowskitu powoduje przejście elektronu do pasma przewodnictwa, kreowana jest równocześnie dziura w pasmie walencyjnym. W ten sposób powstaje ekscyton, ale ponieważ jego energia wiązania jest niewielka (rzędu kilku meV), rozdziela się na swobodny elektron i swobodną dziurę. Nośniki podążają do odpowiednich kontaktów, które je transportują do obwodu zewnętrznego.

Współczynnik absorpcji

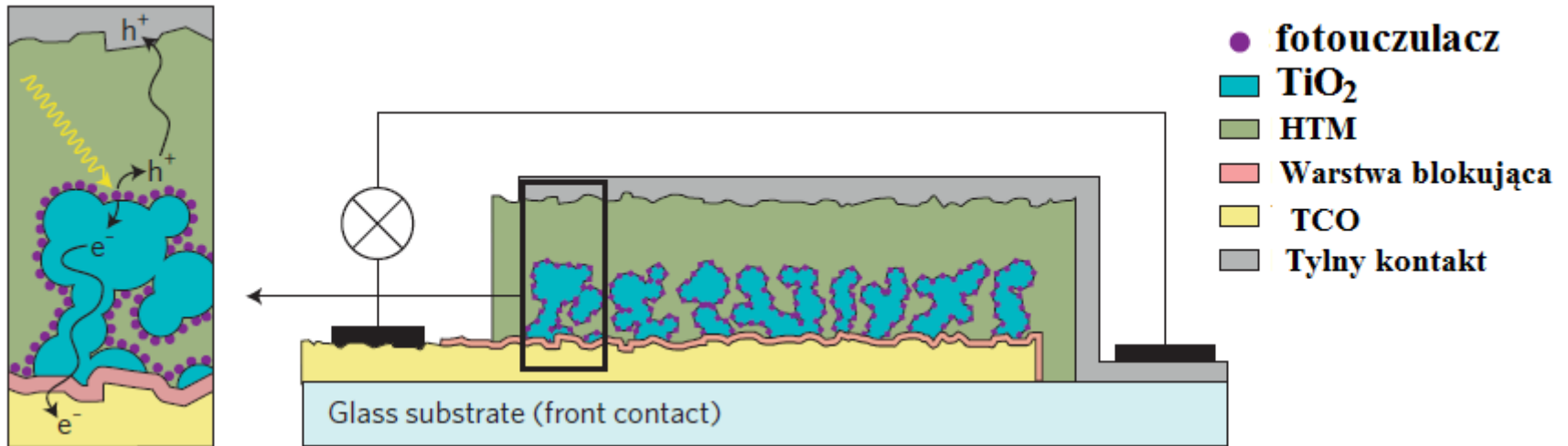
Jodek metyloamonowo-olowiowy:

- Przerwa wzbroniona prosta, wysoki współczynnik absorpcji w zakresie widzialnym.
- Niska koncentracja defektów.
- Długa droga dyfuzji oraz długi czas życia na rekombinację.
- Brak zależności dysocjacji ekscytonu od pola elektrycznego.



Perowskity halogenkowe

Ogniwo perowskitowe



Światło pada na nanocząstki fotouczulacza (perowskit), generuje pary elektron – dziura, które są transportowane odpowiednio przez warstwę TiO_2 i HTM. Warstwa blokująca przepuszcza tylko elektrony.

Polska, Wrocław - Saule Technologies założona przez Olgę Malinkiewicz

Hybrid Tandems (2-terminal)

- ▲ Perovskite/Si
- ▲ Perovskite/organic
- Perovskite/CIGS
- III-V/Si

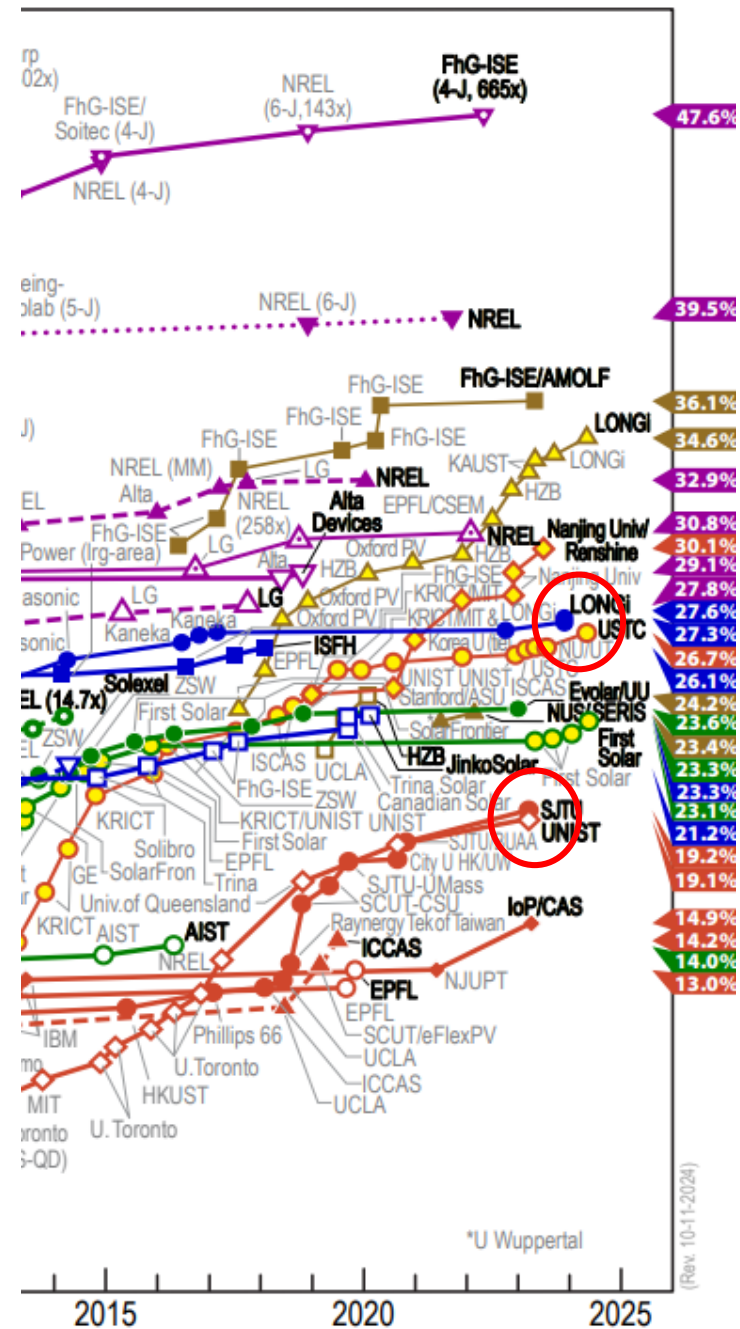
Thin-Film Technologies

- CIGS (concentrator)
- CIGS
- CdTe
- Amorphous Si:H (stabilized)

Emerging PV

- Dye-sensitized cells
- Perovskite cells
- Organic cells
- ▲ Organic tandem cells
- ◆ CZTSSe cells
- ◇ Quantum dot cells
- ◆ Perovskite tandem cells

SJTU - Shanghai Jiao Tong University



(Rev. 10-11-2024)