



Metody symulacji fotoogniw - wykład

Eunika Zielony

Dane kontaktowe

dr inż. Eunika Zielony

Katedra Fizyki Doświadczalnej

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

p. 231a, bud. A1

e-mail: eunika.zielony@pwr.edu.pl

Strona www: <https://zielony.wppt.pwr.edu.pl>

Konsultacje: poniedziałki 12:00 – 14:00

TERMINY WYKŁADÓW

	MARZEC					KWIECIEŃ				MAJ				CZERWIEC				LIPIEC			
PN	2	9	16	23	30 Pt/N	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20
WT	3	10	17	24	31	7	14 Wt/P	21	28	5	12	19 Cz/P	26	2	9	16	23	30	7	14	21
ŚR	4	11	18	25	1 Cz/N	8 Śr/N	15	22	29 Pt/N	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22
CZ	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23
PT	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24
SO	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25
N	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26
P - PARZYSTY N - NIEPARZYSTY	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	

25. 06. 2026 – test zaliczeniowy !!!

Poprawa kolokwium – termin do ustalenia

Treści programowe wykładu

1. Wprowadzenie do kursu oraz omówienie zasad zaliczenia. Ogniwa fotowoltaiczne – przypomnienie. **(2 godz.)**
2. Podstawowe parametry półprzewodników samoistnych i domieszkowanych – m.in. przewodność, ruchliwość, w zależności od czynników zewnętrznych temperatury, oświetlenia. Poziom Fermiego i kwazi-poziomy Fermiego. Analiza wpływu czynników zewnętrznych na wybrane parametry półprzewodnika typu n i typu p. **(2 godz.)**
3. Generacja i rekombinacja nośników w półprzewodniku. Rekombinacja bezpośrednia, SRH, rekombinacja Augera i rekombinacja powierzchniowa. Symulacja tych procesów. **(2 godz.); K. Gałkowski**
4. Kontakt Schottky'ego. Równanie neutralności. Równanie Poissona i jego analityczne rozwiązanie. Diagram pasmowy w stanie równowagi. Analityczne i numeryczne rozwiązanie równania Poissona. **(2 godz.)**
5. Wyznaczanie profilu koncentracji półprzewodników z eksperymentu – porównanie rzeczywistych wyników z symulacją. **(2 godz.)**
6. Złącze p-n. Równanie neutralności. Równanie Poissona i jego rozwiązanie. Diagram pasmowy w stanie równowagi. Analityczne i numeryczne rozwiązanie równania Poissona dla złącza p-n i heterozłącza w stanie równowagi. **(2 godz.)**
7. Równanie ciągłości dla elektronów i dziur. Profil koncentracji nośników dla złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia i dla złącza oświetlonego, przy założeniu jednorodnej generacji światłem. Wpływ oświetlenia i przyłożonego pola elektrycznego na profil koncentracji nośników i diagram pasmowy dla złącza Schottky'ego oraz p-n. **(2 godz.)**

Treści programowe – c.d.

8. Warstwy antyrefleksyjne – używane materiały oraz sposób dobierania ich parametrów. Optymalizacja warstwy antyrefleksyjnej w celu zminimalizowania współczynnika odbicia. **(2 godz.)**
9. Model dwudiodowy ogniwa. **(2 godz.)**
10. Modyfikacja oświetlanej powierzchni w celu zmniejszenia strat związanych z odbiciem światła i z rekombinacją powierzchniową. Optymalizacja wymiarów kontaktów znajdujących się na powierzchni oświetlanej i tylnej ogniwa. Analiza wpływu warunków brzegowych (potencjał, rodzaj kontaktów metalicznych, rekombinacja powierzchniowa itp.) i parametrów materiałowych (grubość emitera i absorbera, długość drogi dyfuzji, czas życia nośników) oraz warunków oświetlenia na sprawność ogniwa. **(4 godz.); K. Gałkowski**
11. Moduły i systemy fotowoltaiczne – budowa, działanie, integracja wymagania. **(2 godz.); K. Gałkowski**
12. Projektowanie i modelowanie systemu fotowoltaicznego. **(2 godz.); K. Gałkowski**
13. Kolokwium – test zaliczeniowy. **(2 godz.)**

Liczba godzin w semestrze: 30 godz.
Liczba punktów ECTS: 2

Materiały / Literatura

Obowiązkowa

1. Płaczek-Popko, Ewa. Fizyka odnawialnych źródeł energii. Wrocław University of Technology, 2011. Print.
2. Smets, Arno H. M et al. Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. Cambridge: UIT Cambridge, 2016. Print.
3. Nelson, Jenny. The Physics of Solar Cells. London: Imperial College Press, 2004. Print.
4. Materiały do wykładu, laboratorium (prezentacje, listy zadań), udostępnione przez prowadzącego

Dodatkowa

1. Amos Gilat. MATLAB: An Introduction with Applications. 6th ed. Wiley, 2017. Print.
2. Fox, Mark. Optical Properties of Solids. 2nd ed. vol. 3. United Kingdom: Oxford University Press, 2010. Print.
3. Peter Würfel. Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts. Wiley, 2005. Web.

Zaczynamy!



WYKŁAD 1

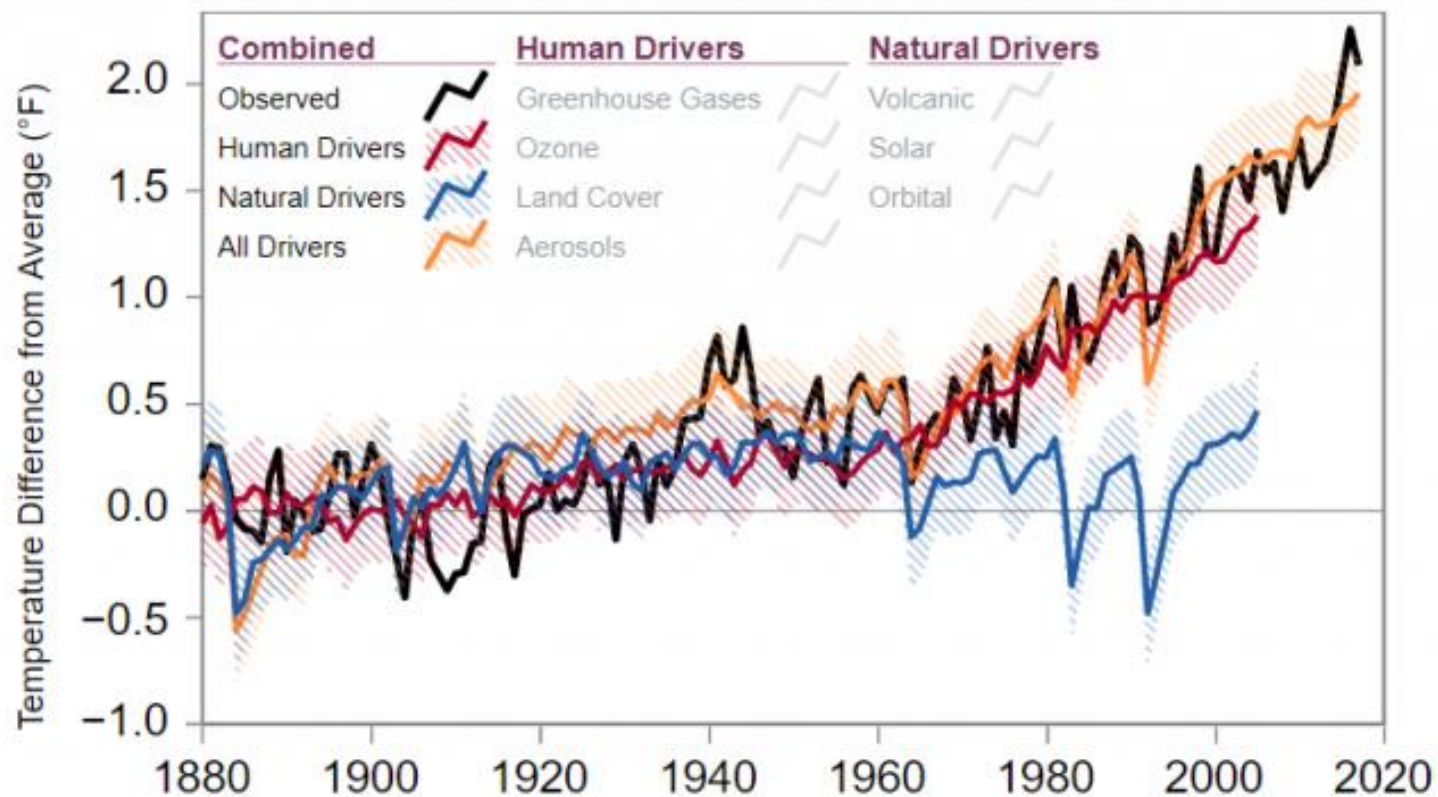
Wprowadzenie do kursu oraz omówienie zasad zaliczenia. **Ogniwa fotowoltaiczne – przypomnienie.**



United States
Environmental Protection
Agency

Przyczyny zmian klimatycznych

Human and Natural Influences on Global Temperature

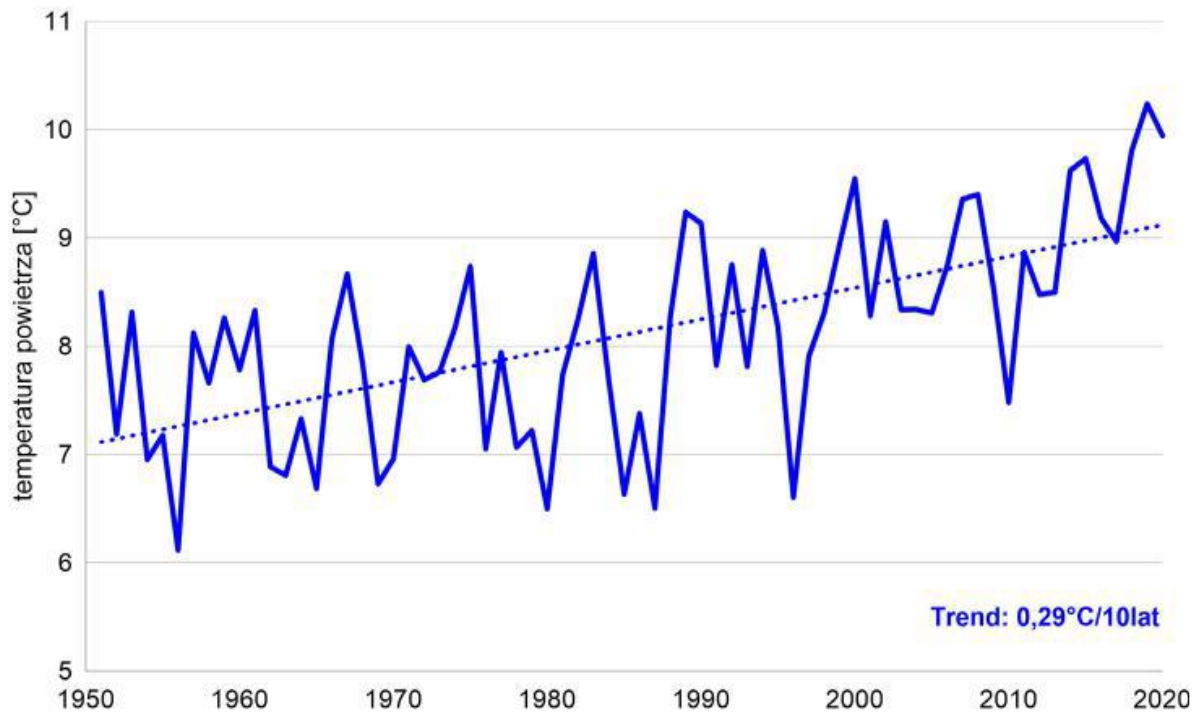


Wniosek: Zarówno czynniki naturalne, jak i działalność człowieka wpływają na globalną temperaturę, **jednak długoterminowy trend obserwowany w ciągu ostatniego stulecia można wyjaśnić wyłącznie wpływem działalności człowieka na klimat.**

Zmiany klimatyczne w Polsce

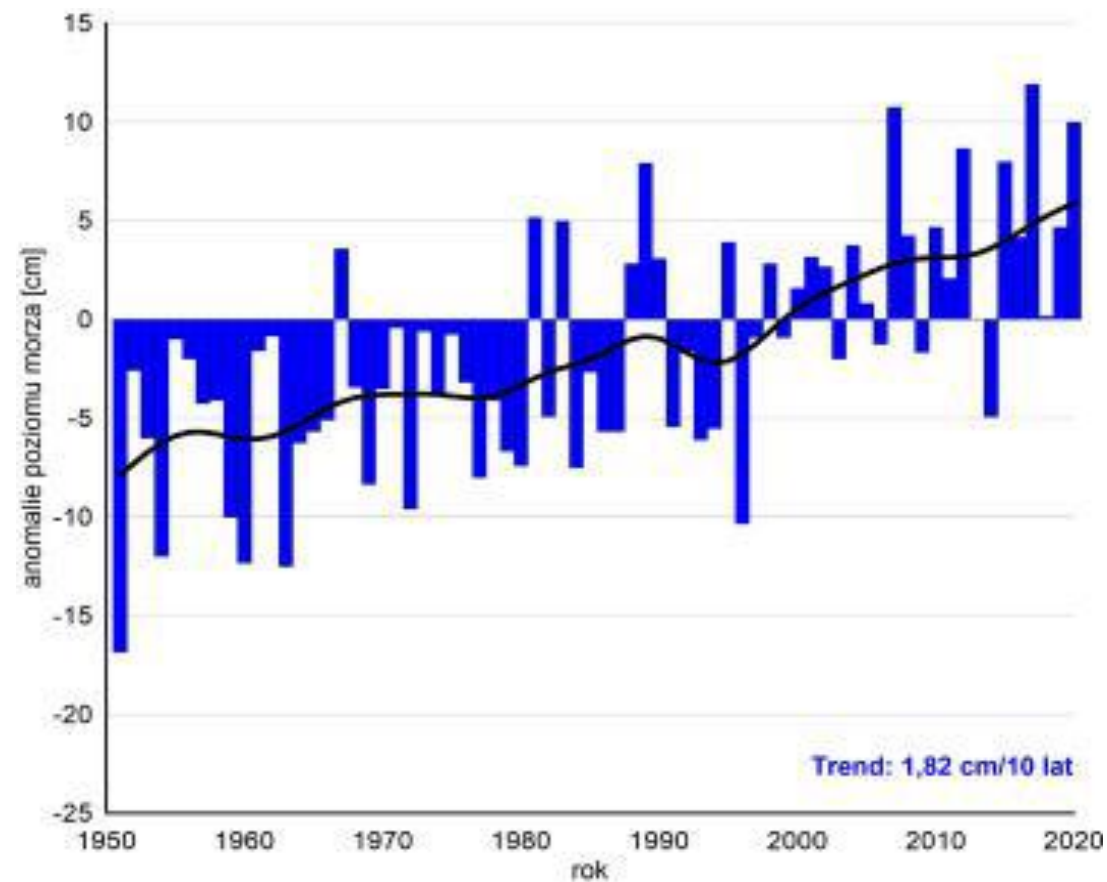
Niepokojące zmiany klimatyczne w Polsce to przede wszystkim:

- **ogólne ocieplenie powietrza i wód;**
- **przedłużające się okresy suszy;**
- **występowanie trąb powietrznych, nawałnic;**
- **podnoszenie poziomu wód, etc...**



Rys. Średnia temperatura powietrza w Polsce w skali roku w okresie 1950-2020.

Źródło: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW)



Rys. Średni poziom Morza Bałtyckiego w Świnoujściu w skali roku w okresie 1951-2020.

Źródło: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW)

Zmiany klimatyczne źle wpływają i będą wpływać m.in. na nasze zdrowie, rolnictwo czy turystykę. Skutkiem ocieplania się klimatu jest wzrost występowania groźnych zjawisk pogodowych.

Podsumowanie i wnioski

Za jedną z najgroźniejszych przyczyn zachodzących na świecie zmian klimatycznych uważa się **emisję do atmosfery szkodliwych gazów (substancji)**, np. CO₂.



To wynik działalności elektrowni, firm transportowych, przemysłu czy gospodarstw domowych korzystających z paliw kopalnych

WNIOSEK 1: To człowiek wywiera negatywny wpływ na środowisko ze względu na rewolucje technologiczno - przemysłowe



WNIOSEK 2: Człowiek też może wpłynąć pozytywnie na klimat dążąc do jego ochrony. To wyzwanie, przed którym stoi cały świat!



Ochrona środowiska - OZE

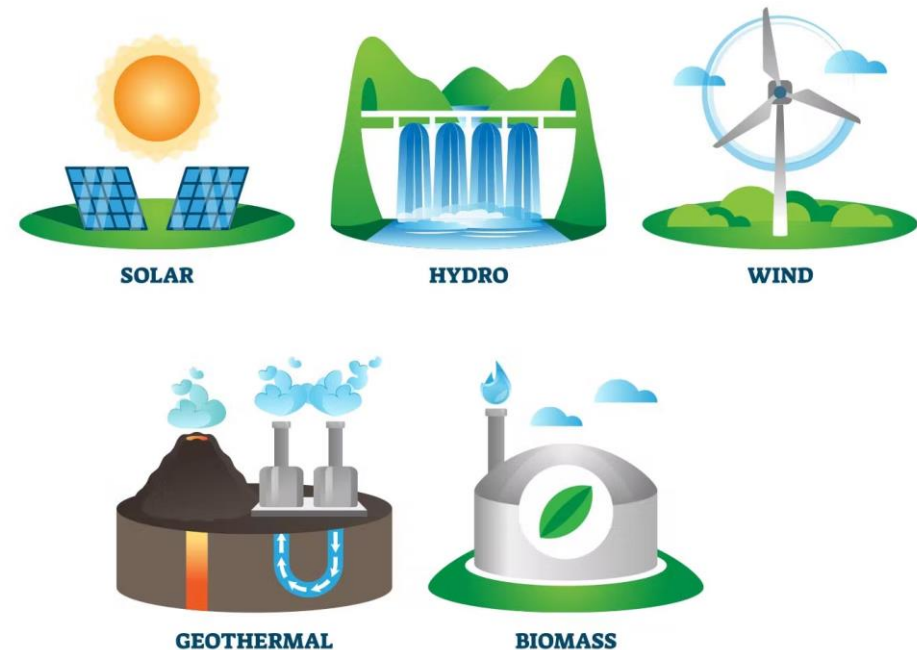
Polityka środowiskowa, rekomendowana między innymi przez Unię Europejską, dąży do ograniczania stosowania tradycyjnej energetyki.



Promowane są za to OZE - odnawialne źródła energii, czyli takie, których używanie nie szkodzi środowisku naturalnemu, a ich zasoby nie wyczerpują się w szybkim tempie.

Do OZE zaliczamy:

- **elektrownie wodne** - energia grawitacyjna wody (np.: prąd w rzekach);
- **elektrownie geotermalne** - energia ciepła Ziemi;
- **elektrownie wiatrowe** - energia (moc) wiatru;
- **biopaliwa** - energia z tzw. biomasy (np.: pochodzenia roślinnego);
- **elektrownie fotowoltaiczne** - energia słoneczna.

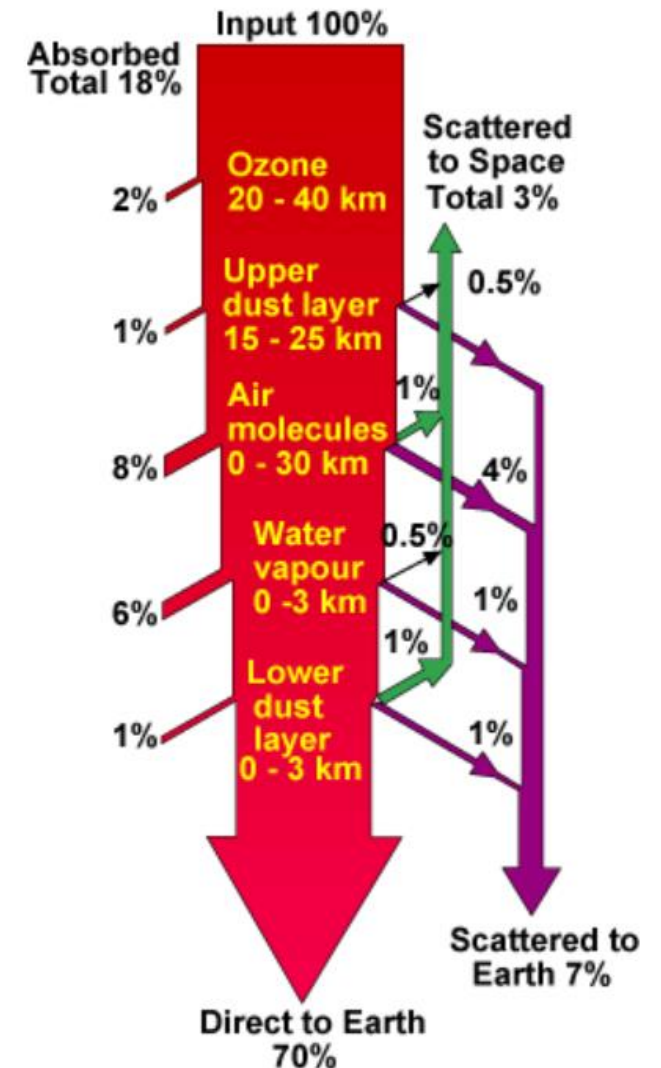
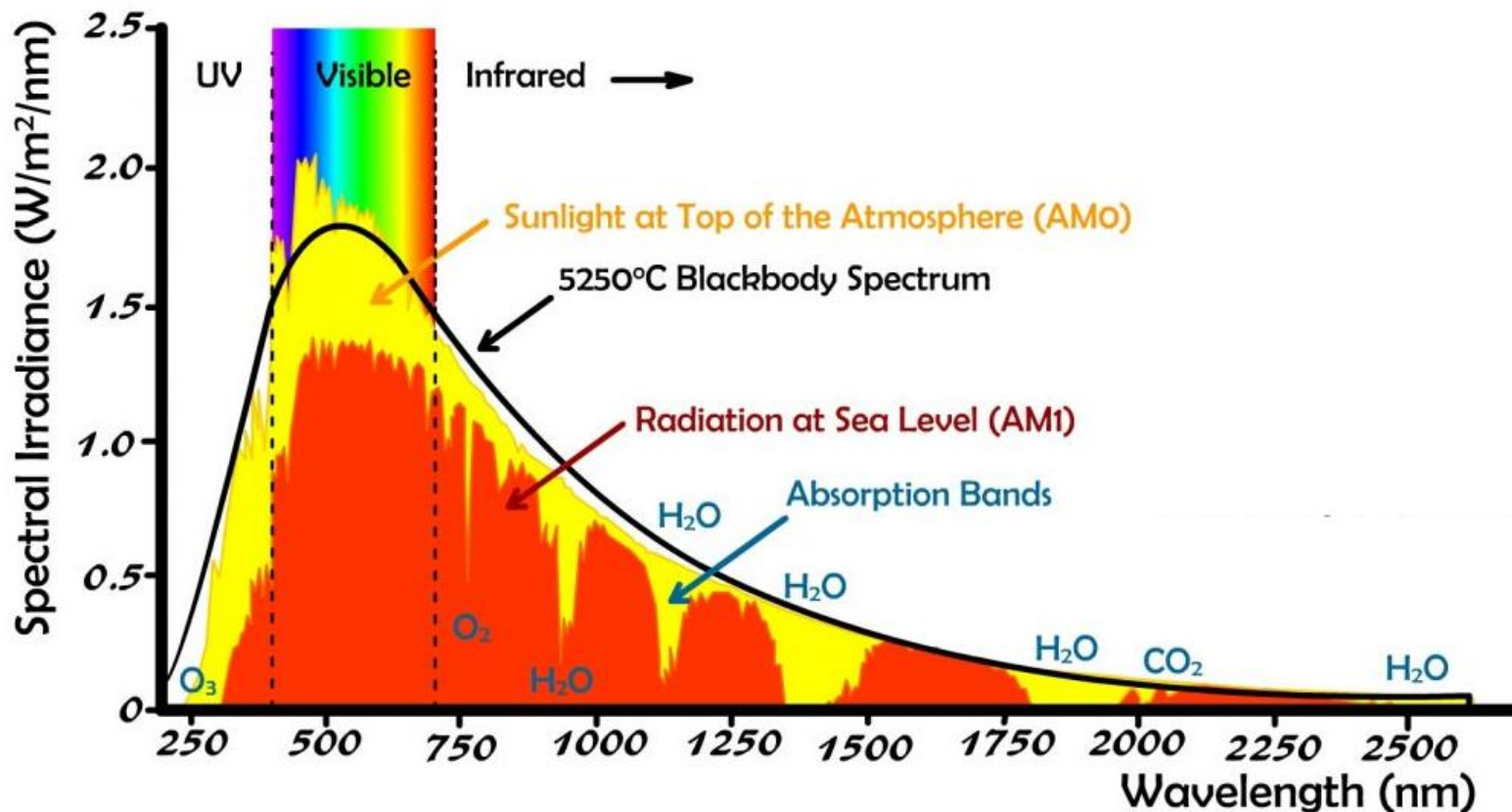


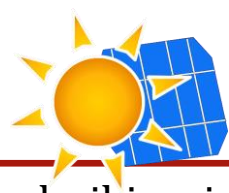
Promieniowanie słoneczne

1. Energia słoneczna jest **powszechnie dostępnym**, całkowicie czystym i najbardziej naturalnym źródłem energii

Solar Radiation Spectrum

Irradiance is the energy of sunlight





Fotowoltaika

Fotowoltaika – dziedzina nauki i techniki zajmująca się przetwarzaniem światła słonecznego na energię elektryczną → wytwarzanie prądu elektrycznego z promieniowania słonecznego przy wykorzystaniu **zjawiska fotowoltaicznego**.



Źródło: <https://stiloenergy.pl/farma-fotowoltaiczna-co-to-jest-i-jak-dziala/>



Źródło: <https://energia.rp.pl/nowa-energia/>



Źródło: <https://sunergo.pl/blog/panele-fotowoltaiczne/>

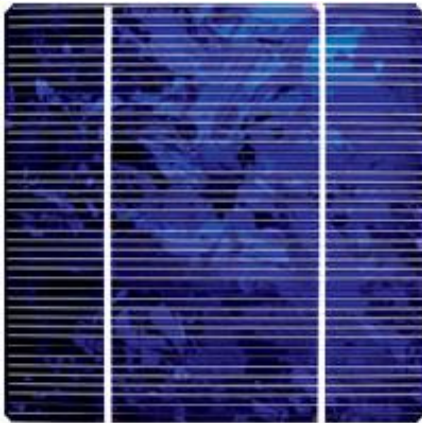


Źródło: <https://www.aurorasolarcar.com/>

Ogniwa (baterie) słoneczne

I Generacji - Krzemowe (Si)

- Monokrystaliczny Si
- Poli-(multi) krystaliczny Si



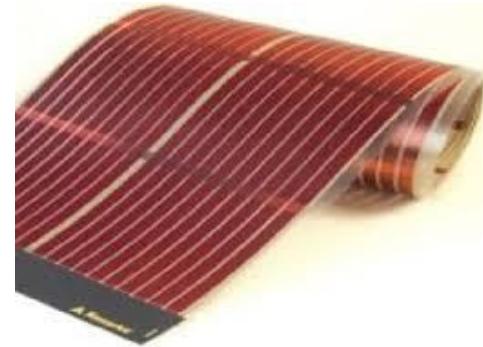
II Generacji - Cienkowarstwowe

- Tellurek kadmu (CdTe)
- CIGS (Cu-In-Ga-Se)
- Amorficzny Si



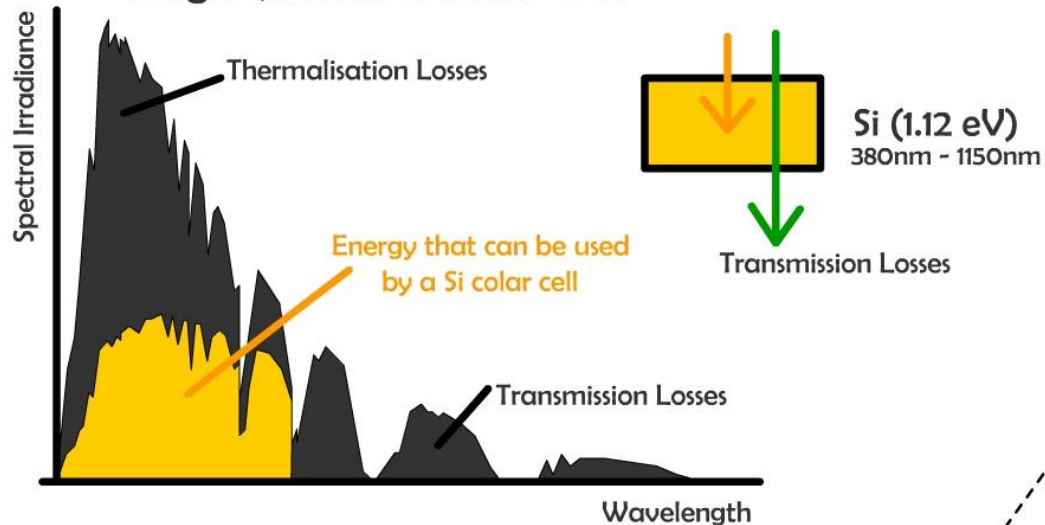
III Generacji

- Ogniwa wielozłączowe
- Ogniwa polimerowe, organiczne
- Ogniwa na nanorurkach węglowych
- Ogniwa z kropkami kwantowymi
- Ogniwa barwnikowe
- Ogniwa perowskitowe

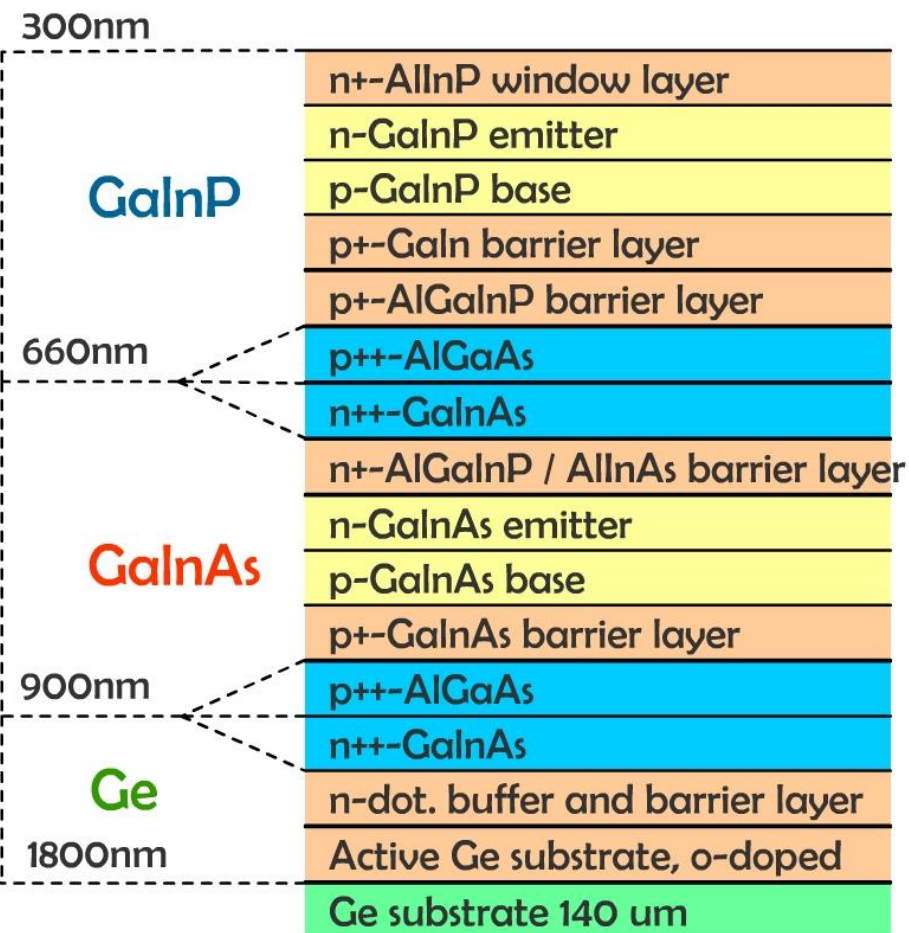
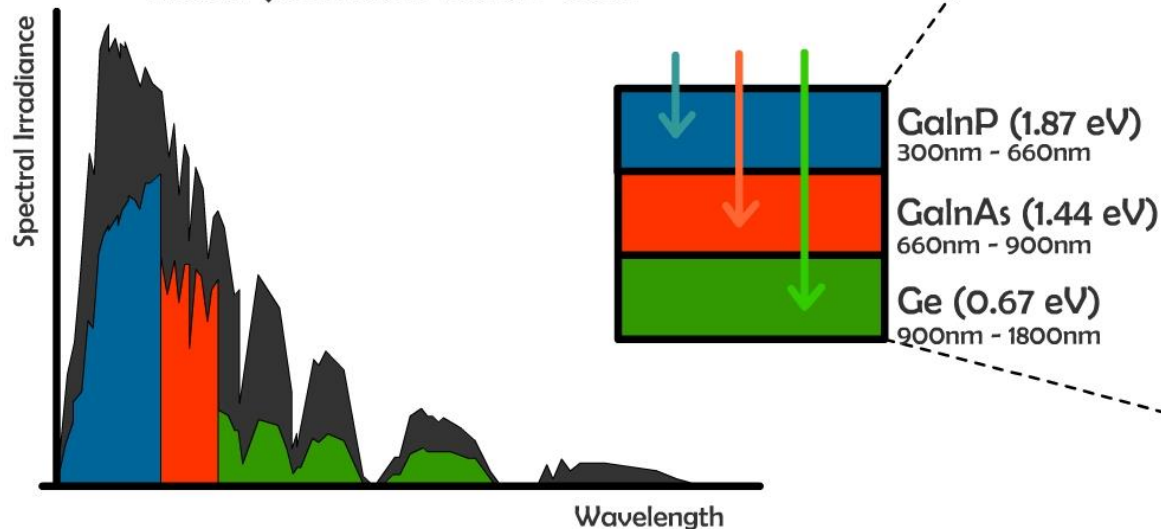


Złącze p-n w ogniwie słonecznym

Single Junction Solar Cell

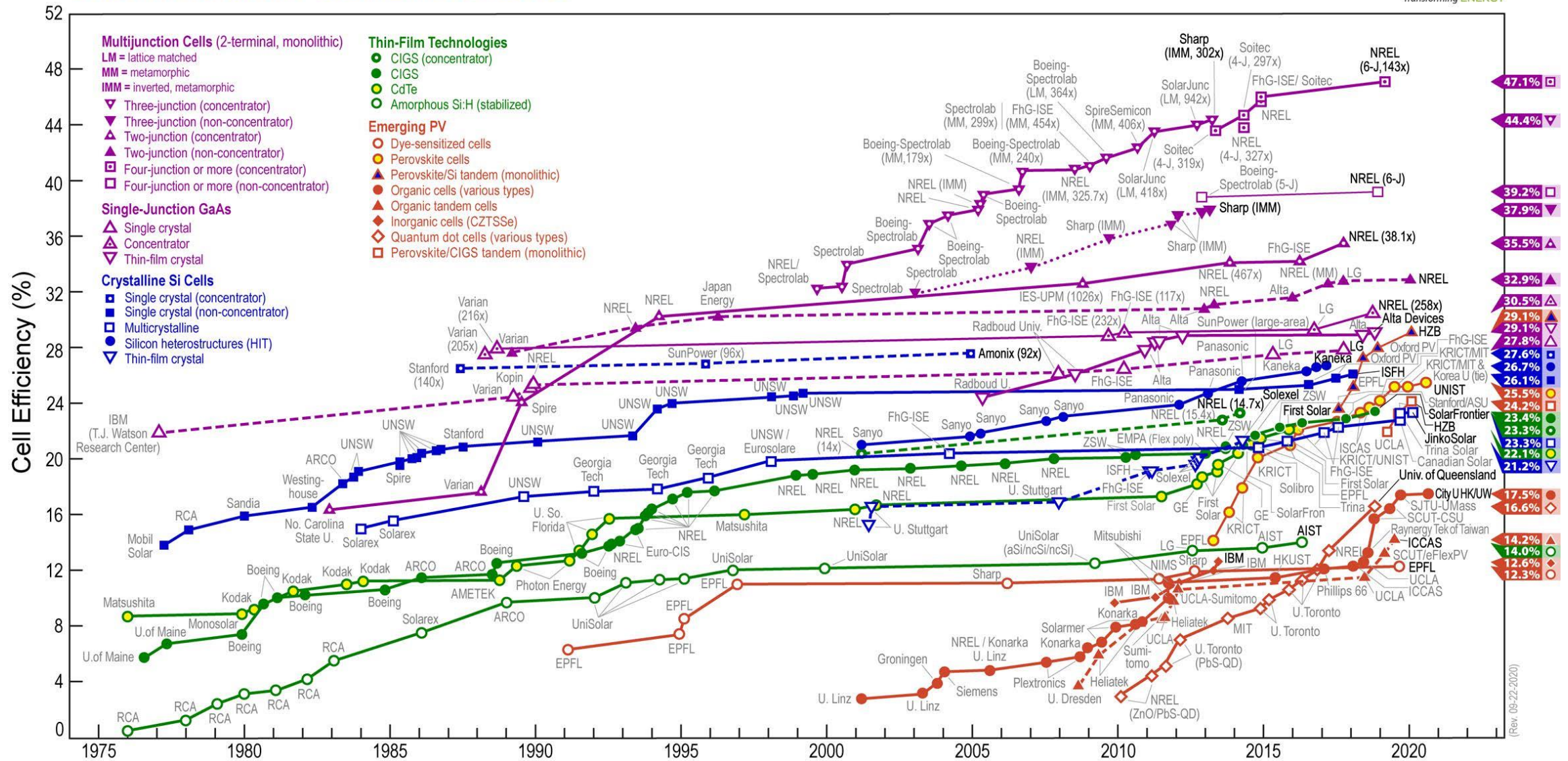


Multi Junction Solar Cell

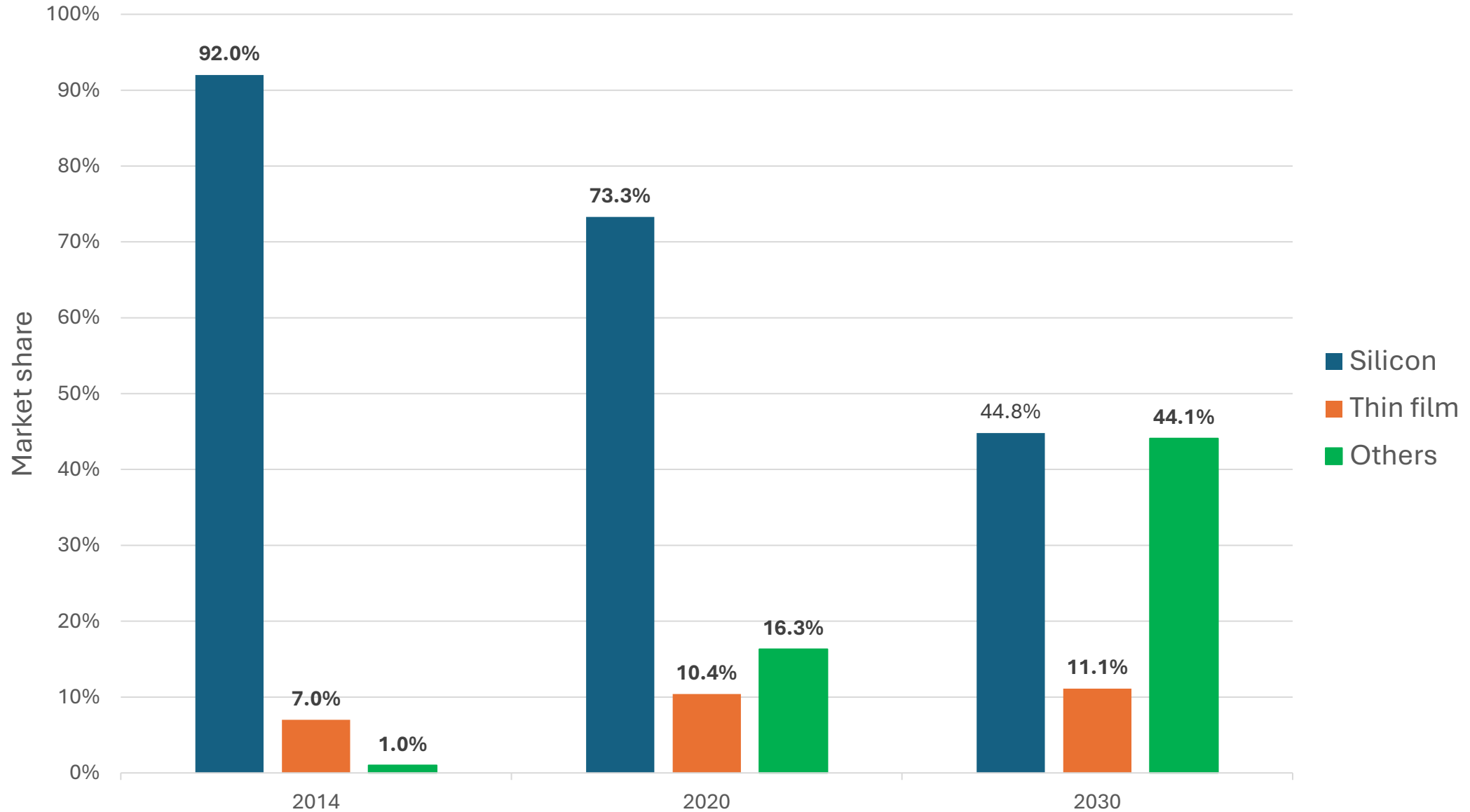


Rekordy sprawności baterii słonecznych

Best Research-Cell Efficiencies

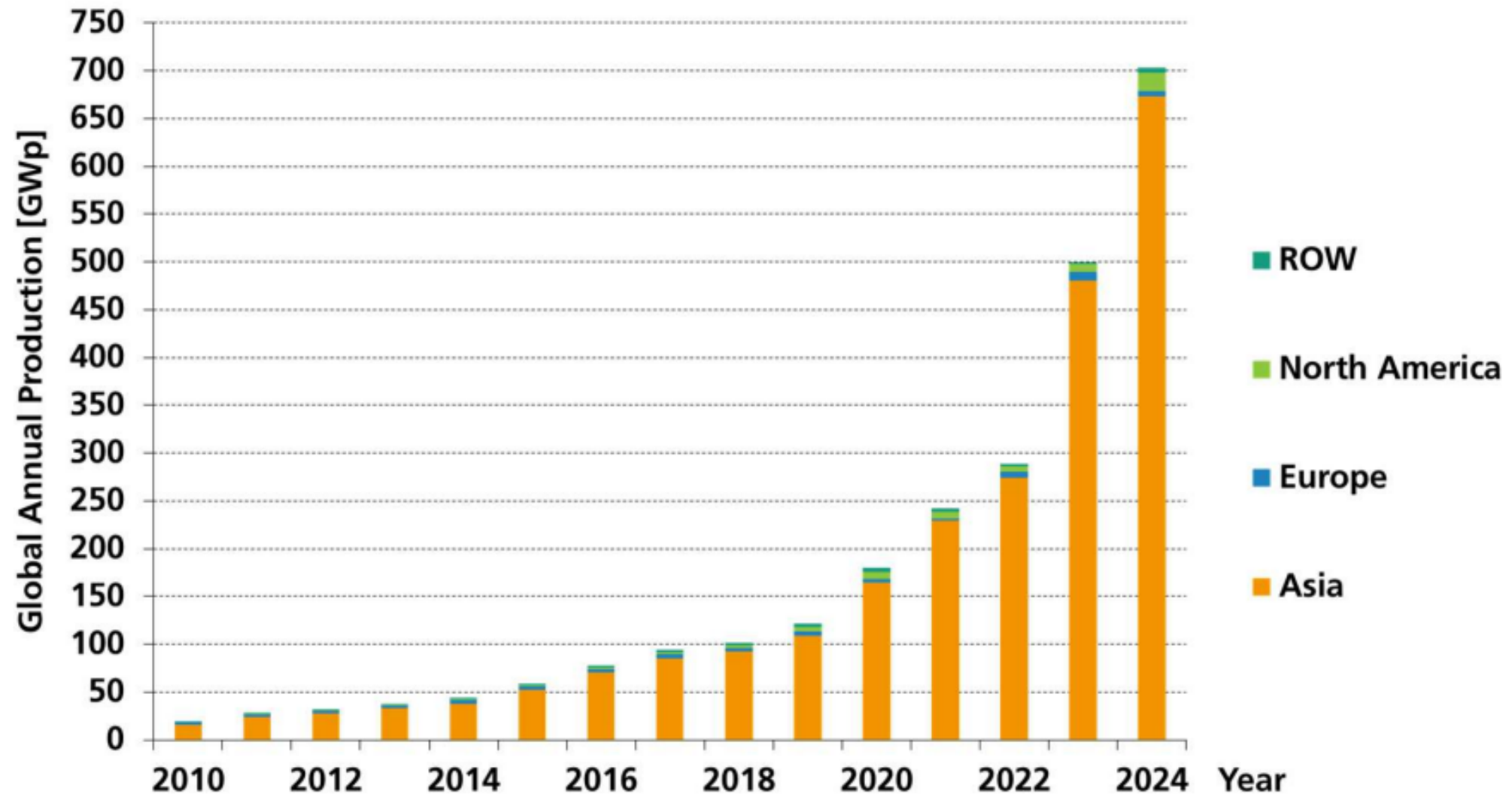


Ranking baterii słonecznych na świecie

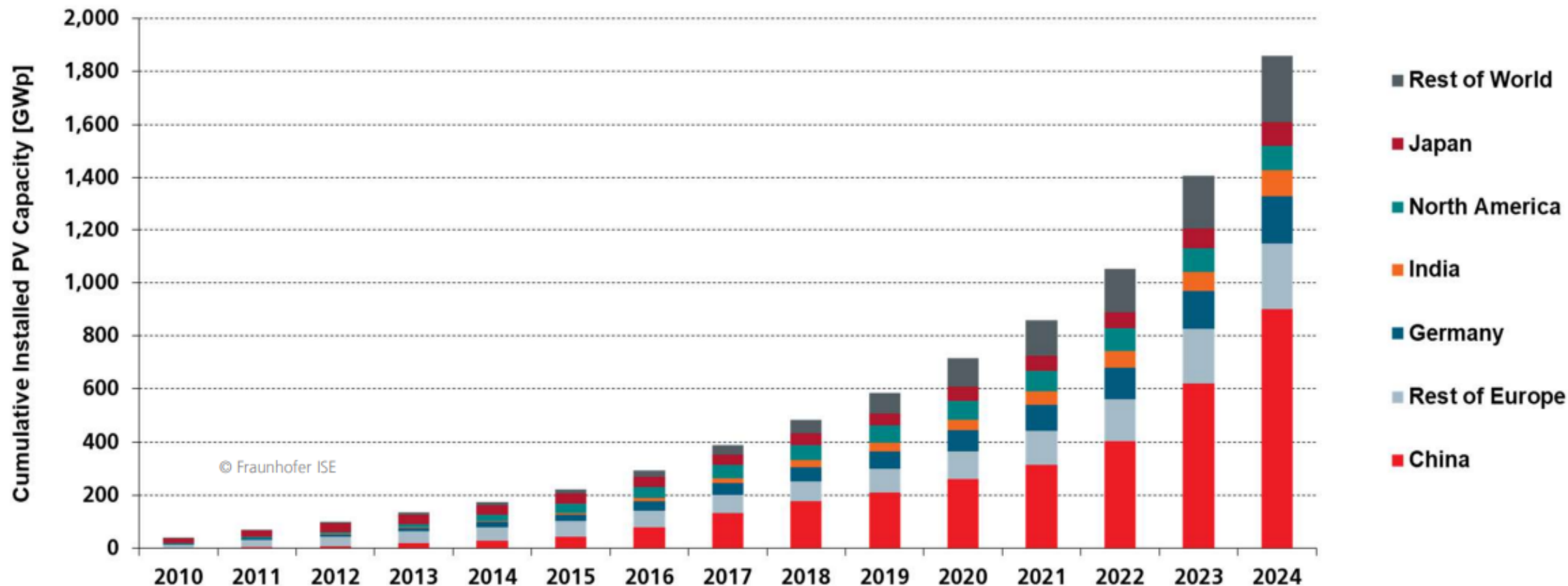


Źródło: M.S. Chowdhury, et al., An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling, Energy Strateg. Rev., 27 (2020), p. 100431.

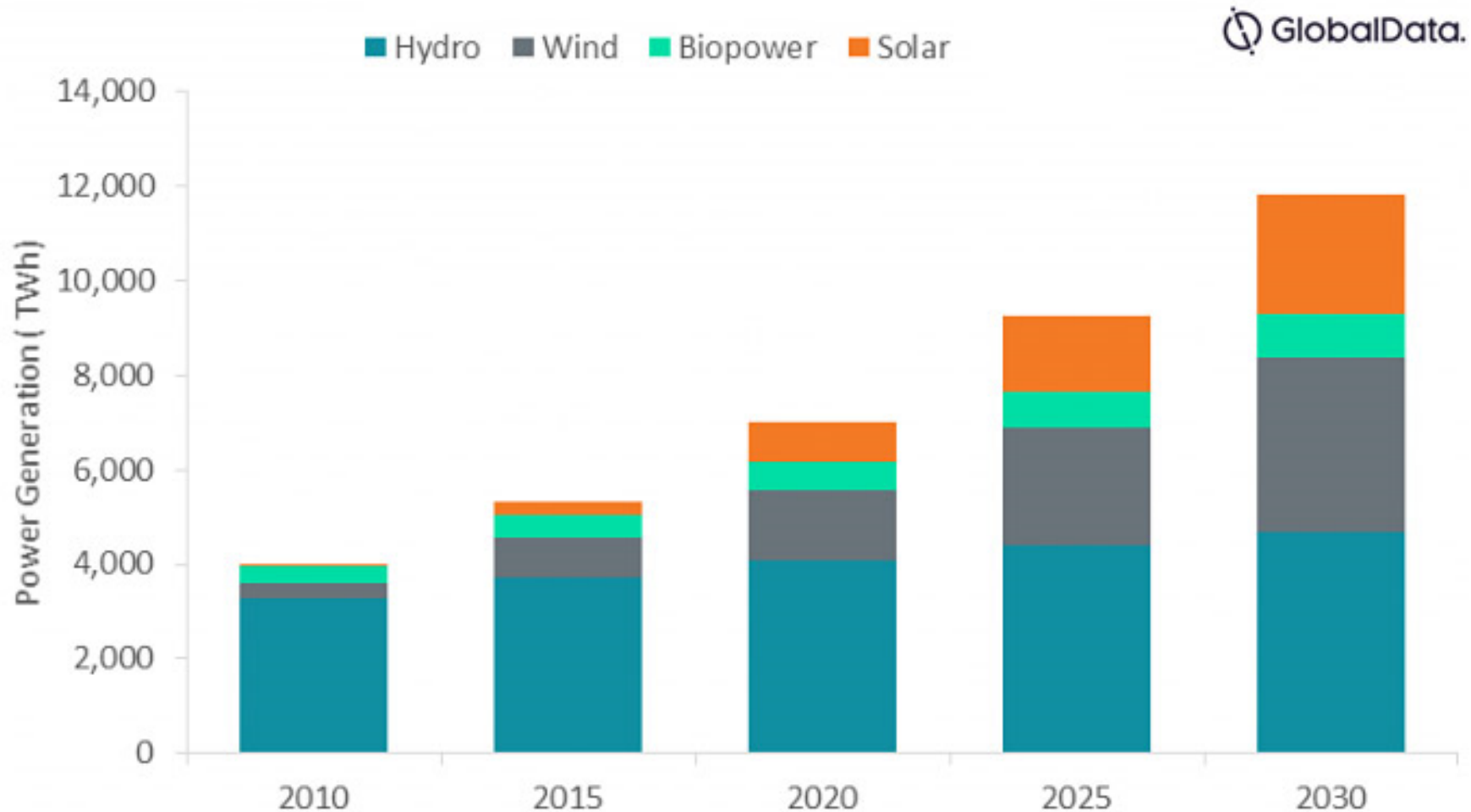
Produkcja modułów fotowoltaicznych na świecie



Instalacja modułów fotowoltaicznych na świecie



Globalna produkcja energii elektrycznej z OZE



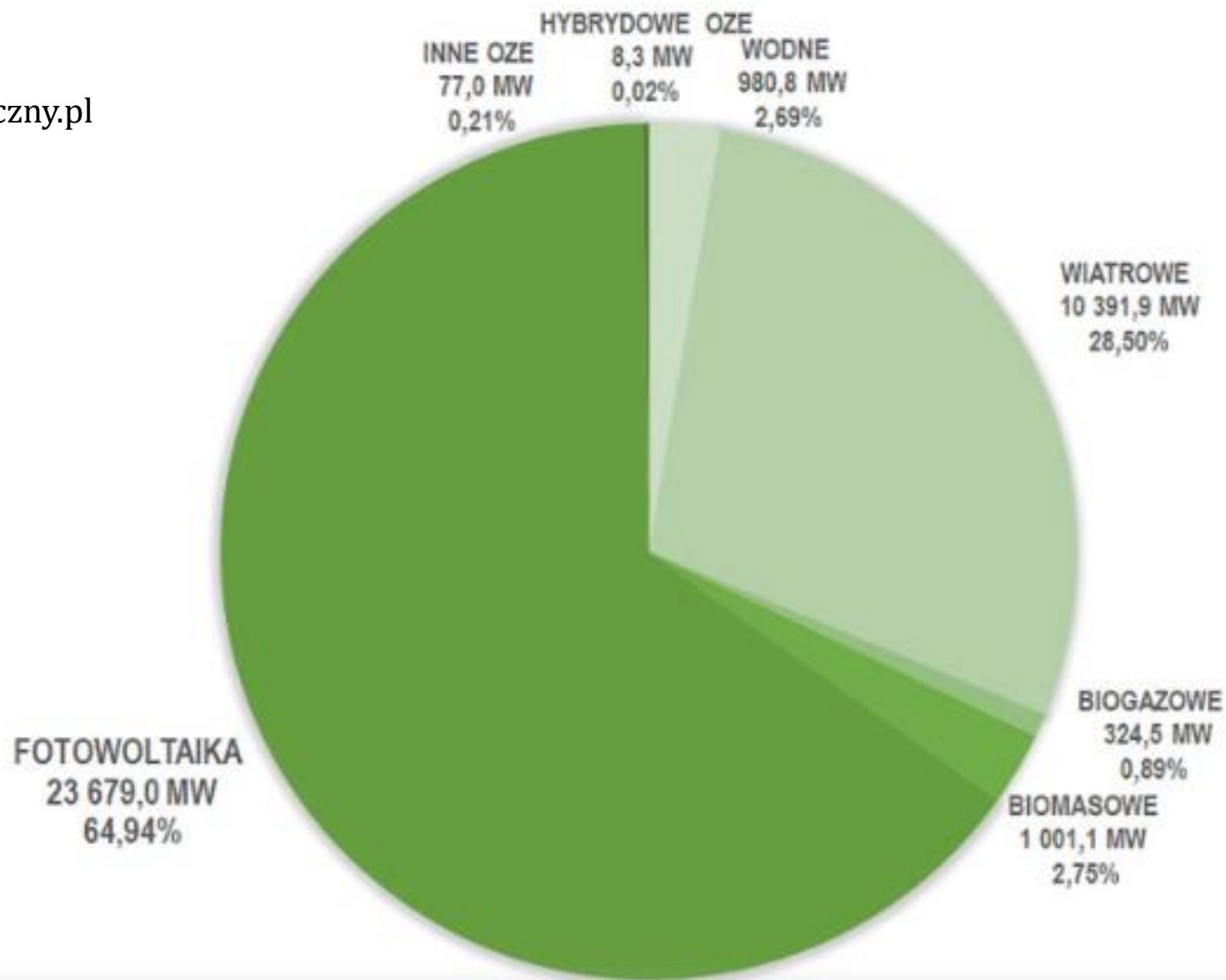
Źródło: GlobalData Oil & Gas Intelligence Center

Wnioski: W przypadku energetyki wodnej i z biomasy - wzrost jest umiarkowany i stabilny. Dynamiczny wzrost w przypadku energetyki wiatrowej i słonecznej → **widoczna transformacja OZE na świecie: od dominacji hydroenergetyki w kierunku systemów opartych na energetyce wiatrowej i słonecznej.**

Fotowoltaika na tle innych OZE w Polsce

Dane z sierpnia 2025

Źródło: www.rynekelektryczny.pl



Podsumowanie: korzyści z OZE

- **Bezpieczeństwo energetyczne** - korzystanie z OZE nie zmniejsza ich zasobów i nie stwarza ryzyka ich wyczerpania
- **Niezależność energetyczna** - dostęp do OZE w Polsce jest w każdym miejscu → brak konieczności importu surowców kopalnych z innych państw
- **Ograniczenie emisji CO₂** - poprawa stanu środowiska naturalnego



Instalacja fotowoltaiczna ~ 7000 kWh



Instalacja fotowoltaiczna ~ 8300 kWh

Ile prądu rocznie zużywają **AGD**? Przykłady: kuchenka indukcyjna (1100 kWh), bojler (1000 kWh), piekarnik elektryczny (400 kWh), lodówka (300 kWh), pralka (200 kWh), laptop (100 kWh).