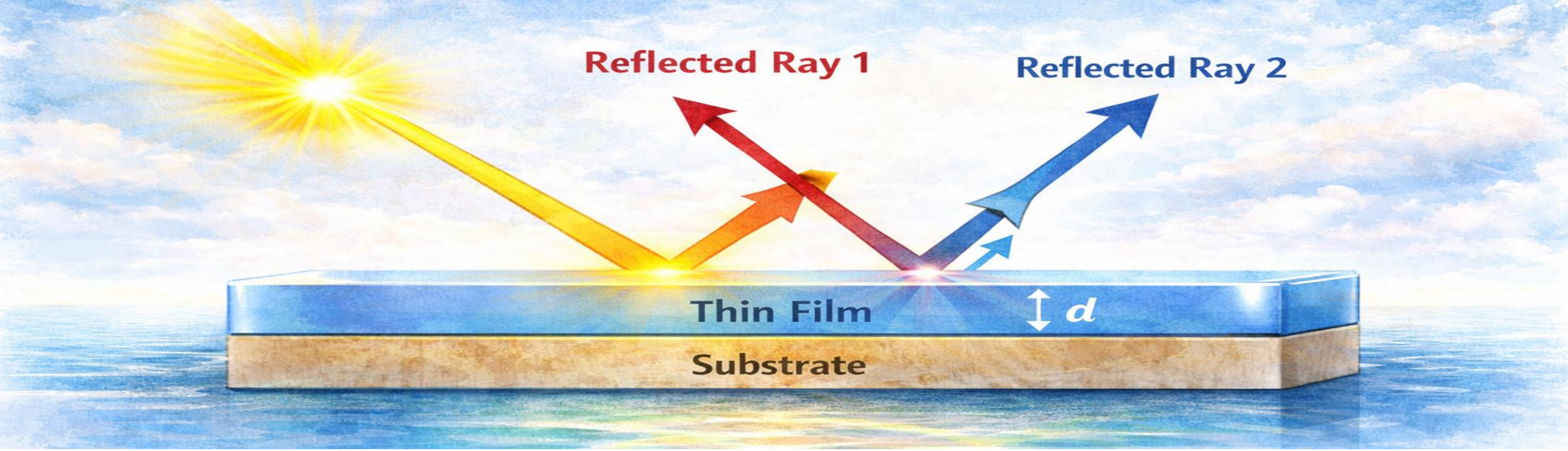


WYKŁAD 8

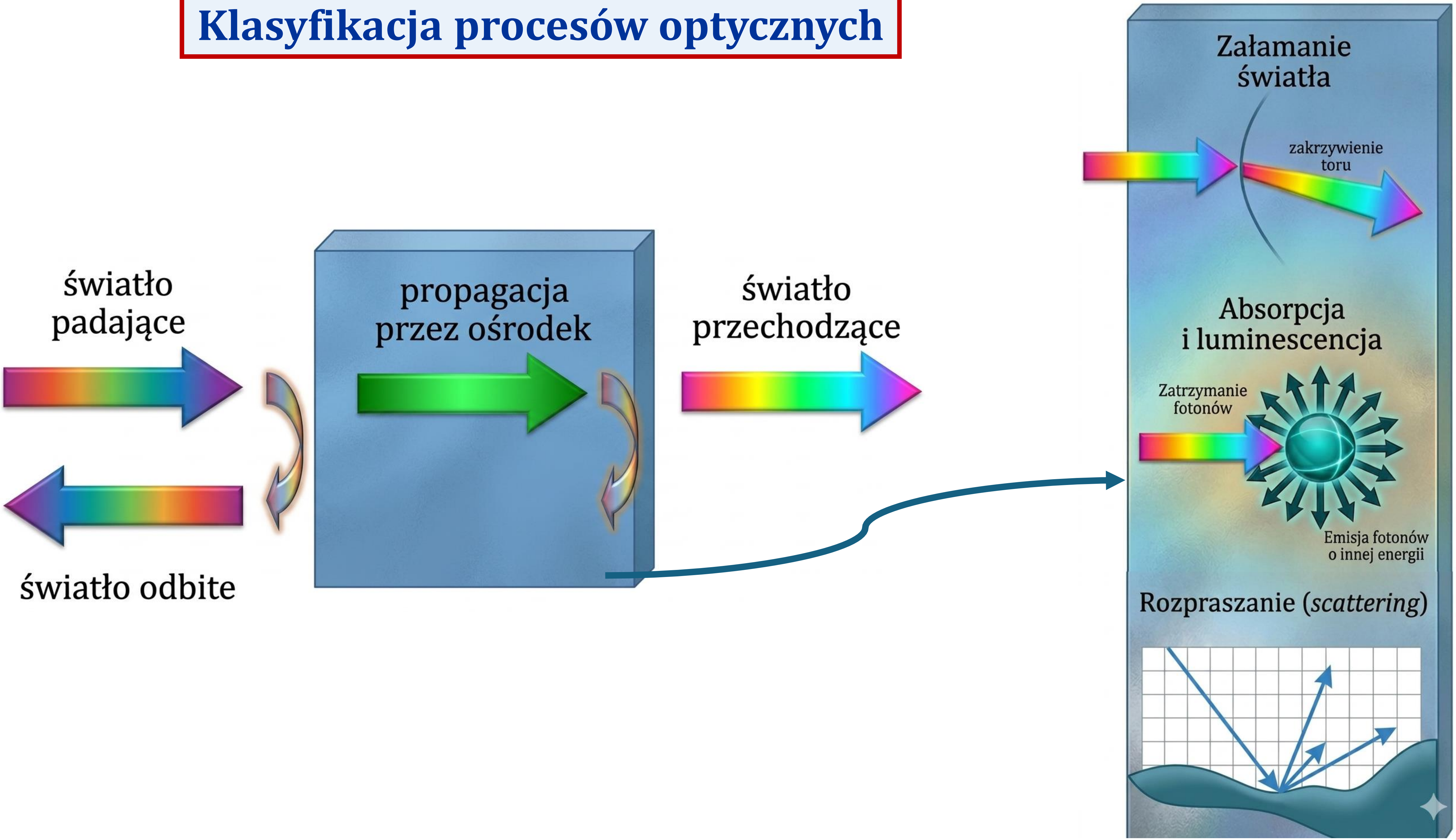
Zjawiska optyczne. Współczynniki odbicia, transmisji i absorpcji.
Interferencja w cienkich warstwach. Grubość cienkiej warstwy.
Warstwy antyrefleksyjne w ogniwach słonecznych.

Eunika Zielony

Wykład na podstawie:

1. **Mark Fox,** „*Optical Properties of Solids*”, 2nd edition vol. 3, wyd.: Oxford University Press, United Kingdom, 2010.
2. **Donald A. Neamen**, „*Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*”, 4th edition, wyd.: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, 2012.
3. **Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs**, podręcznik „*Fizyka dla szkół wyższych*” tom3, wyd.: OpenStax Polska, 2018
4. Materiały / artykuły z Internetu dot. warstw antyrefleksyjnych w ogniwach

Klasyfikacja procesów optycznych



Współczynniki optyczne

Odbicie światła na powierzchniach jest opisywane przez współczynnik odbicia *R* (ang. *reflection* lub *reflectivity*)**, czyli stosunek mocy światła odbitego do mocy światła padającego na powierzchnię.** *R* jest wielkością bezwymiarową z przedziału [0, 1]; często podaje się go również w procentach: np. *R* = 0.5 oznacza 50% odbicia.

Współczynnik transmisji *T* (ang. *transmission* lub *transmissivity*) **opisuje stosunek mocy światła przechodzącego przez ośrodek do mocy światła padającego na jego powierzchnię. W idealnym przypadku (bez rozpraszania) możemy zapisać:**

$$\boxed{R + T = 1}$$

Jeśli ośrodek dodatkowo pochłania światło, dodajemy współczynnik absorpcji *A*:

$$\boxed{R + T + A = 1}$$

Propagację światła w danym ośrodku można opisać również przez współczynnik załamania *n*, który jest definiowany jako stosunek prędkości światła w próżni *c* do prędkości światła w ośrodku *v* :

$$\boxed{n = \frac{c}{v}}$$

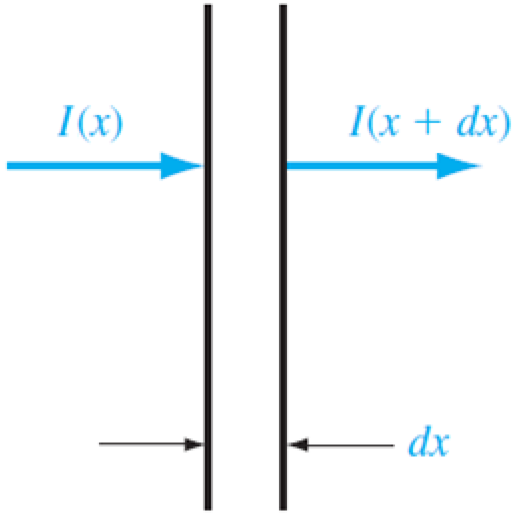
Uwaga: *n* zależy od częstotliwości (długości fali) **padającego światła → tę własność nazywamy dyspersją**

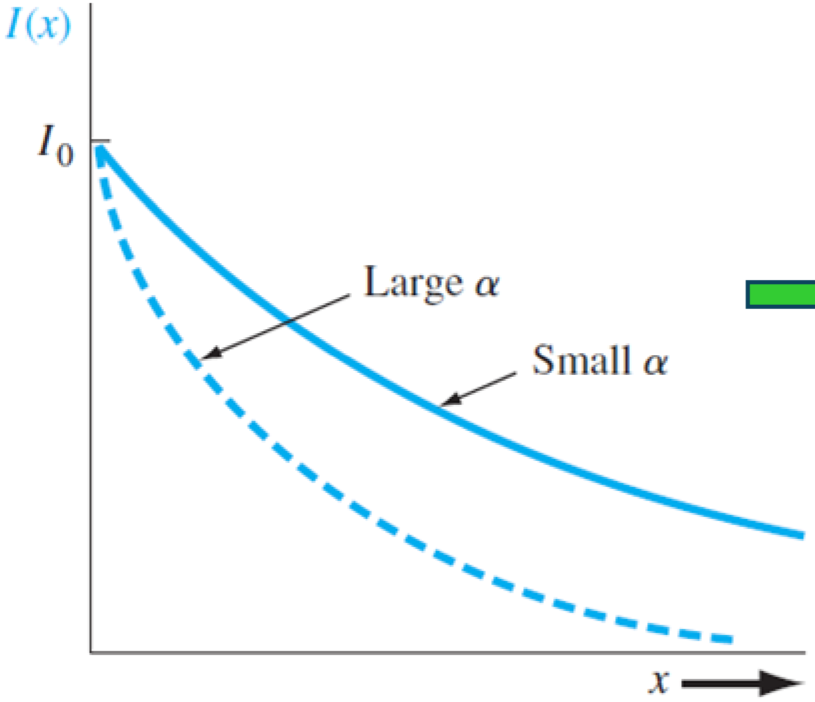
Współczynniki optyczne – c.d.

Absorpcja (pochłanianie) **światła przez ośrodek optyczny jest określana ilościowo przez jego współczynnik absorpcji α – czyli ułamek mocy pochłoniętej na jednostkę długości ośrodka. Jeśli wiązka światła rozchodzi się w kierunku *x*, a jego natężenie** (moc optyczna na jednostkę powierzchni) **w położeniu *x* wynosi $I(x)$, wówczas spadek natężenia światła w przyrostowej warstwie o grubości *dx* jest wyrażony wzorem:**

$$\boxed{\frac{dI}{dx} = -\alpha \cdot I(x)} \rightarrow \boxed{I(x) = I_0 e^{-\alpha \cdot x}}$$

Prawo Lamberta-Beera
I_0 jest natężeniem światła padającego na ośrodek (kiedy *x=0*)



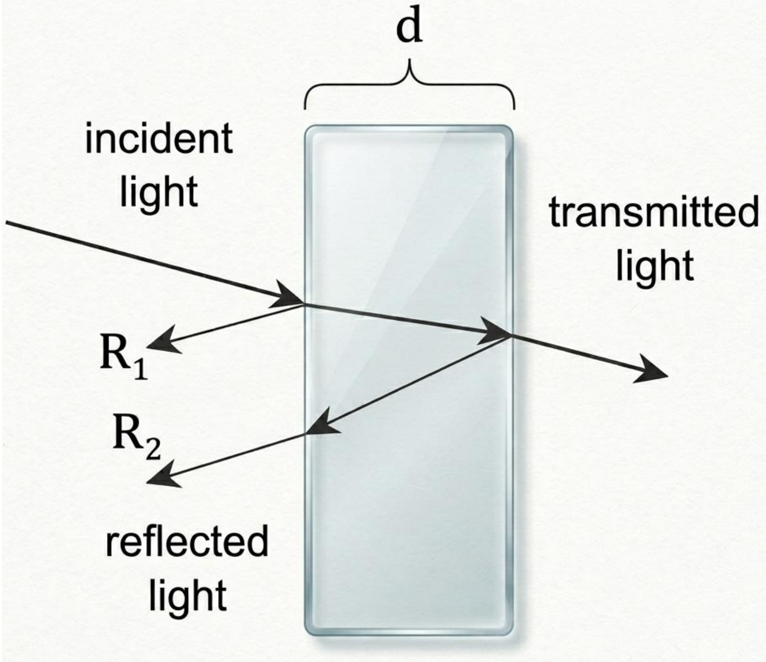


Uwaga: Jeśli współczynnik absorpcji jest duży → fotony są pochłaniane na stosunkowo krótkim dystansie.

Współczynniki optyczne – c.d.

Natężenie światła przechodzącego przez ośrodek o grubości *d*:

$$\boldsymbol{I = I_0 e^{-\alpha \cdot d}}$$



Transmisja światła przez ośrodek o grubości *d*:

$$\boldsymbol{T = (1 - R_1)\, e^{-\alpha \cdot d} (1 - R_2)}$$

Jeśli $\boldsymbol{R_1 = R_2}$**:**

$$\boldsymbol{T = (1 - R)^2\, e^{-\alpha \cdot d}}$$

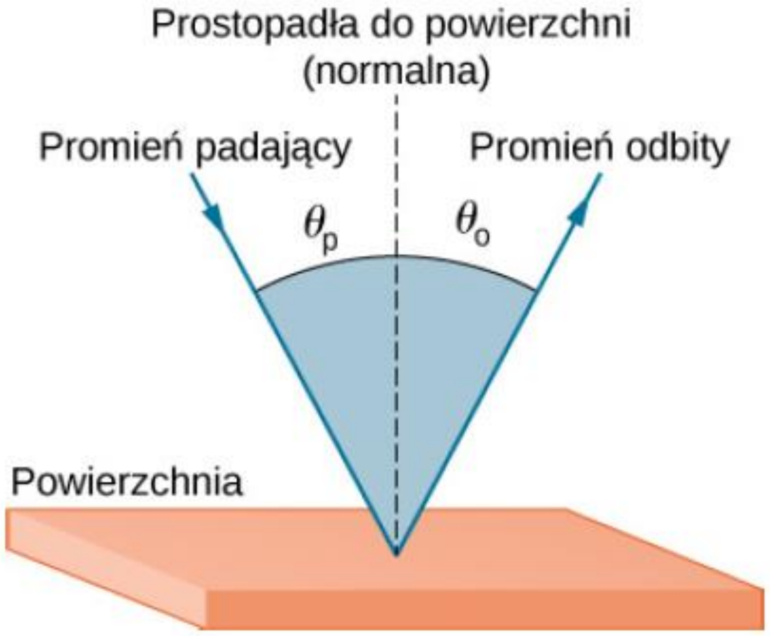
Gęstość optyczna *O.D.* (z ang. *optical density*) **zwana często absorbancją:**

$$\boldsymbol{O.D. = -log_{10}\left(\frac{I(d)}{I_0}\right)} \Longrightarrow \boldsymbol{O.D. = \alpha \cdot d \cdot log_{10}(e) = 0.434\, \alpha \cdot d}$$

Prawo odbicia światła

Kąt odbicia jest równy kątowi padania

$$\boxed{\theta_p = \theta_o}$$



Współczynnik odbicia R zależy od zespolonego współczynnika załamania $\tilde{n}$ według wzoru:

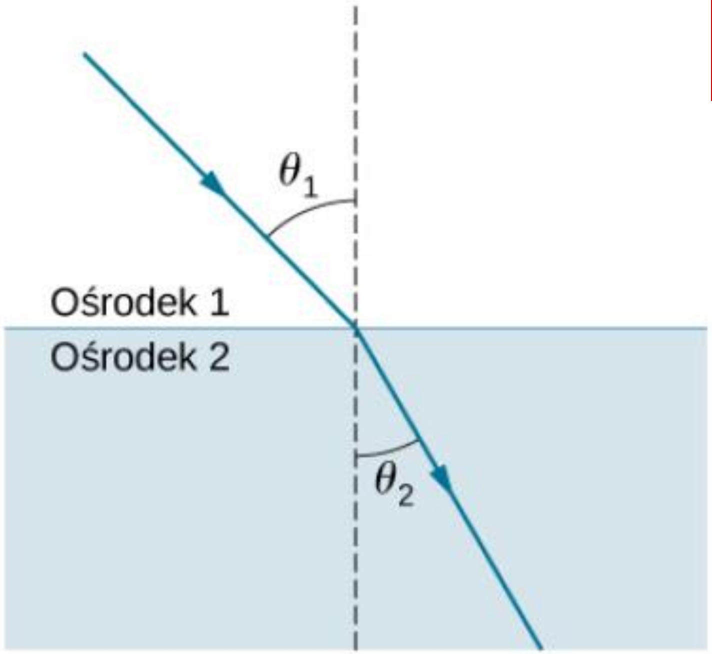
$$\boxed{R = \left|\frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1}\right|^2}$$

Po podstawieniu za $\tilde{n} = n + i\kappa$, gdzie κ to współczynnik ekstynkcji, otrzymujemy (prawo Fresnela):

$$\boxed{R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}}$$

$$\boxed{\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}}$$

- ✓ ze wzrostem α wzrasta odbicie
- ✓ odbicie występuje także przy braku absorpcji ($R \neq 0$ dla $\alpha = 0$)



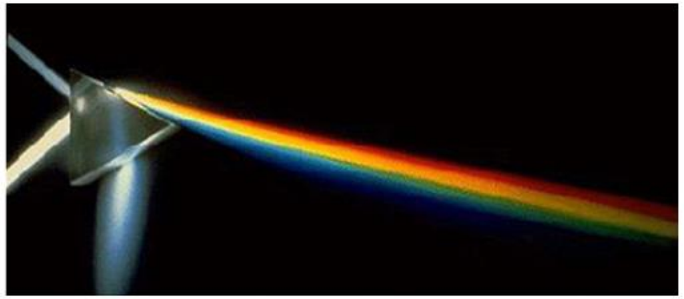
Załamanie i rozszczepienie światła

Prawo załamania światła (prawo Snella):

$$\boldsymbol{n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2}$$

n_1, n_2 - współczynniki załamania ośrodka 1 i ośrodka 2

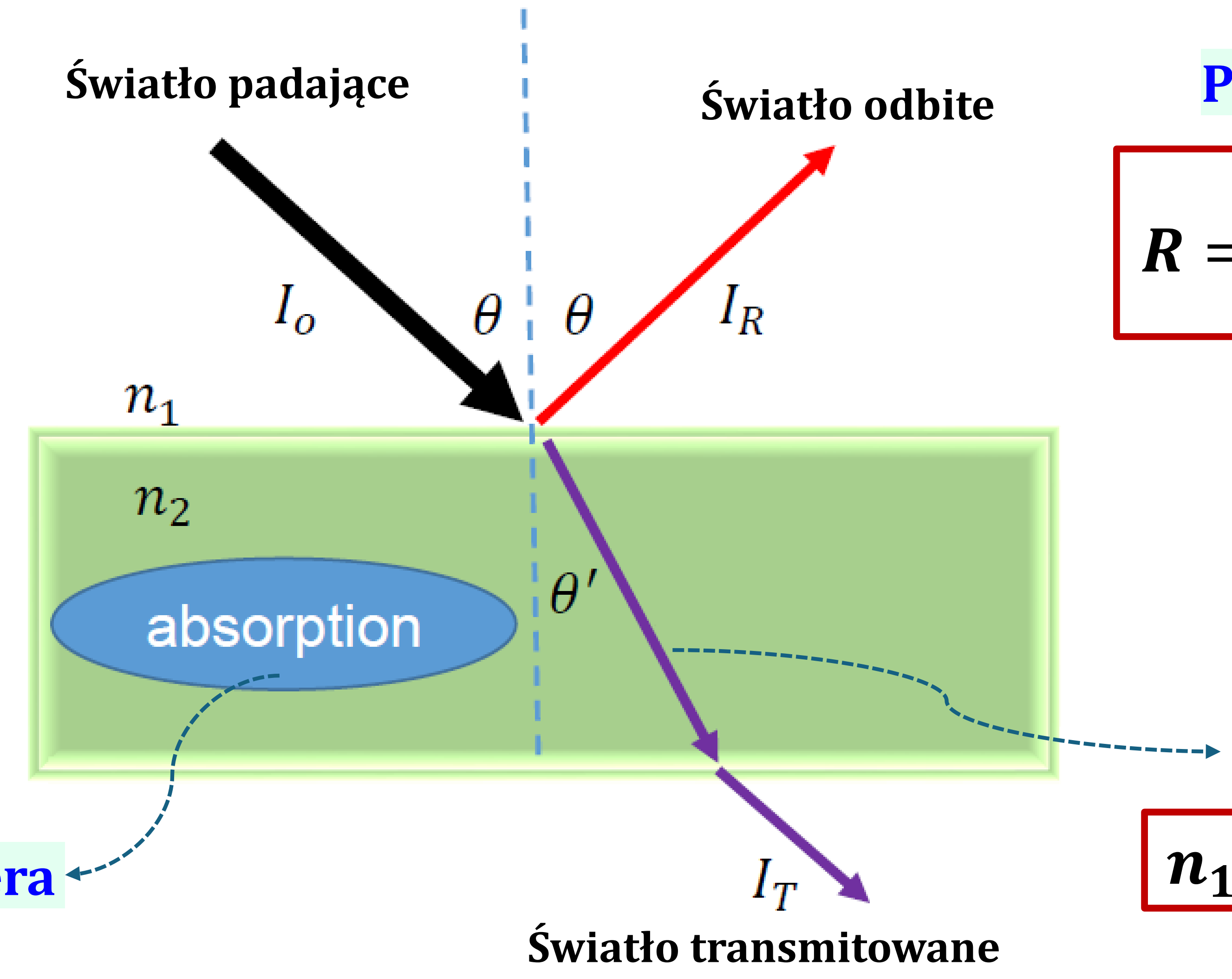
Rozszczepienie światła



Rozszczepienie światła (dyspersję) definiujemy jako rozkład światła białego (polichromatycznego) na jego składowe, dający pełne widmo długości fal. Ujmując to bardziej technicznie, powiemy, że dyspersja występuje zawsze wtedy, gdy prędkość propagacji światła w różnych ośrodkach zależy od długości fali.

Uwaga: nie mylić z rozpraszaniem światła → zjawiskiem, które polega na "odbijaniu się" światła w wielu różnych kierunkach po uderzeniu w małe cząsteczki lub nierówności powierzchni.

Oddziaływanie światło-ciało stałe → podsumowanie



Prawo Fresnela

$$\boldsymbol{R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}}$$

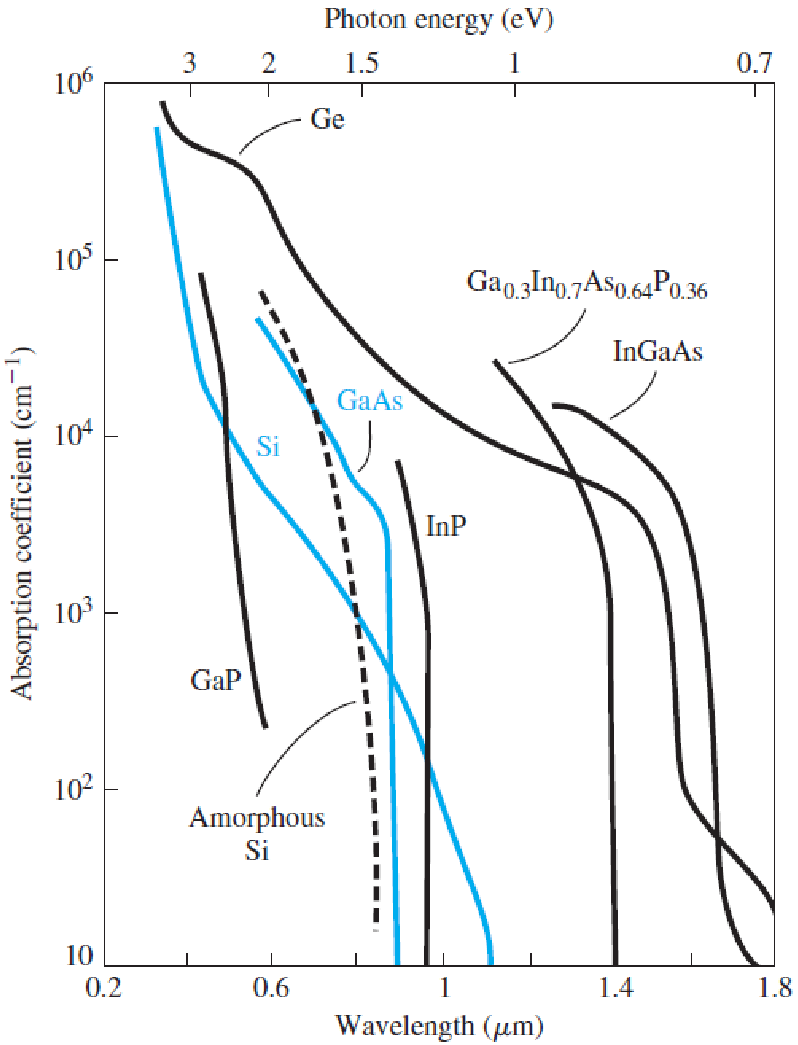
Prawo Snella

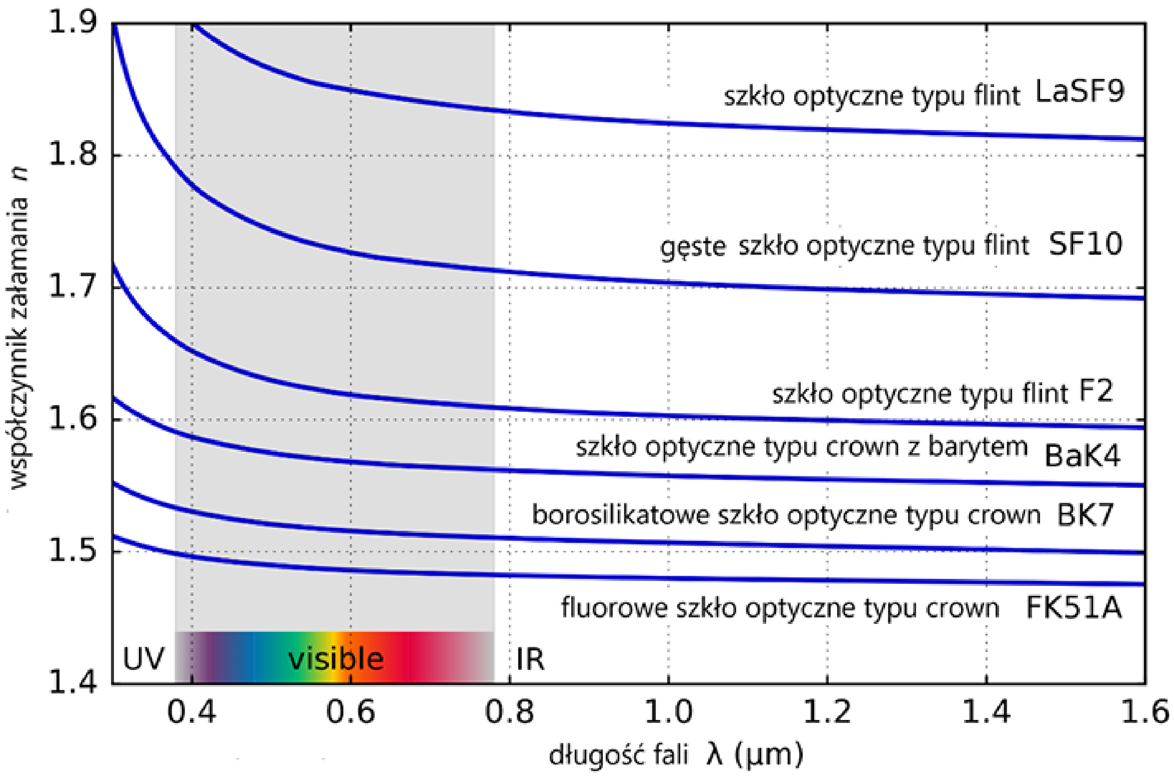
$$\boldsymbol{n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2}$$

Prawo Lamberta-Beera

$$\boldsymbol{I = I_0 e^{-\alpha \cdot d}}$$

Zależności dyspersyjne współczynników załamania światła i absorpcji



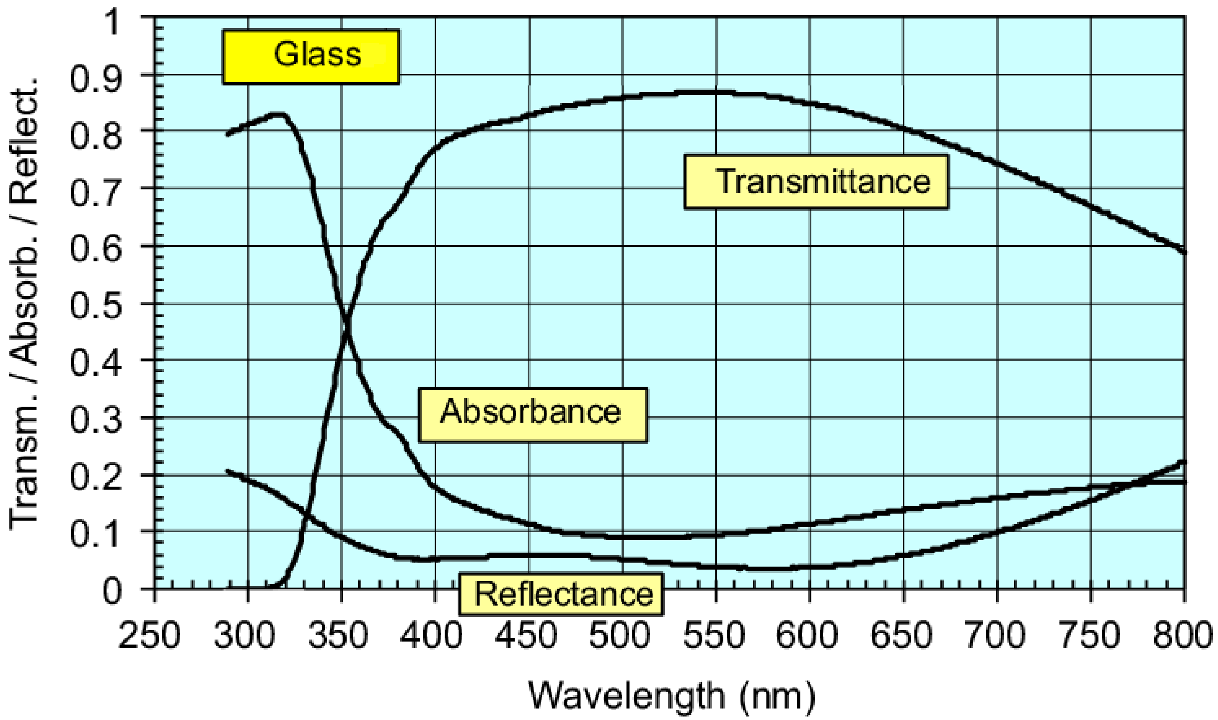


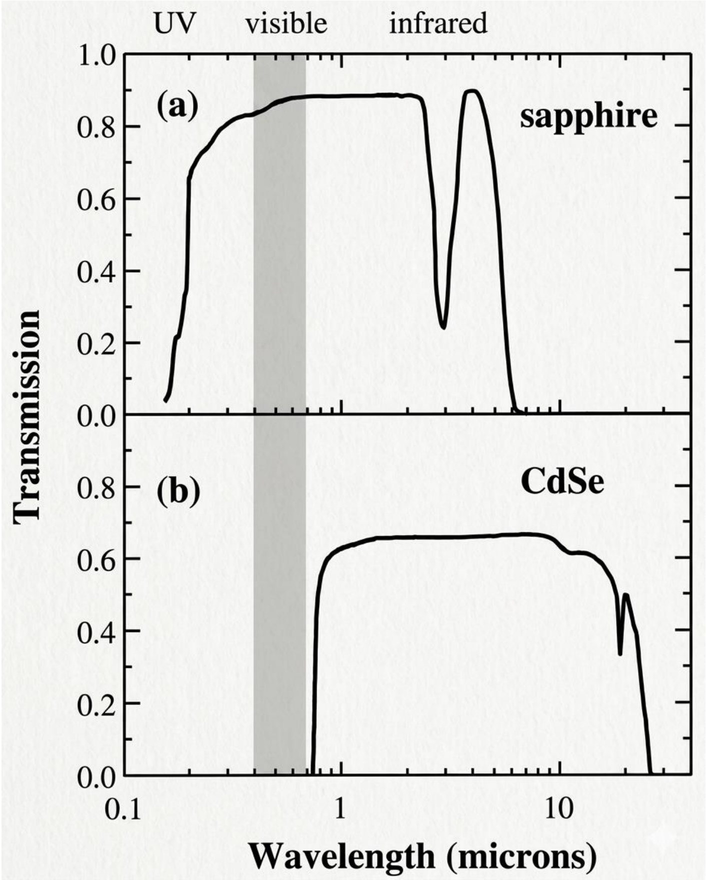
$$\boldsymbol{\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}}$$

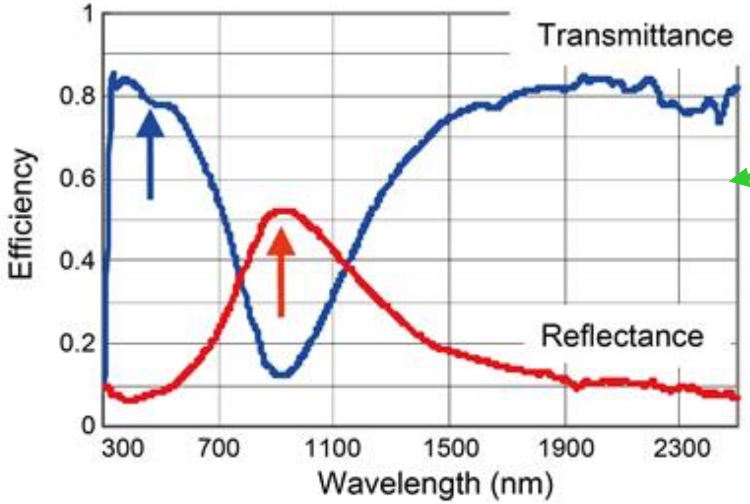
$$\boldsymbol{n = A + \frac{B}{\lambda^2}}$$

Wzór Cauchy'ego, w którym **A, B, C – stałe materiałowe** (wyznaczane eksperymentalnie dla konkretnego szkła cieczy, materiału).

Zależności współczynników R i T od długości fali







Dla nanocząstek srebra

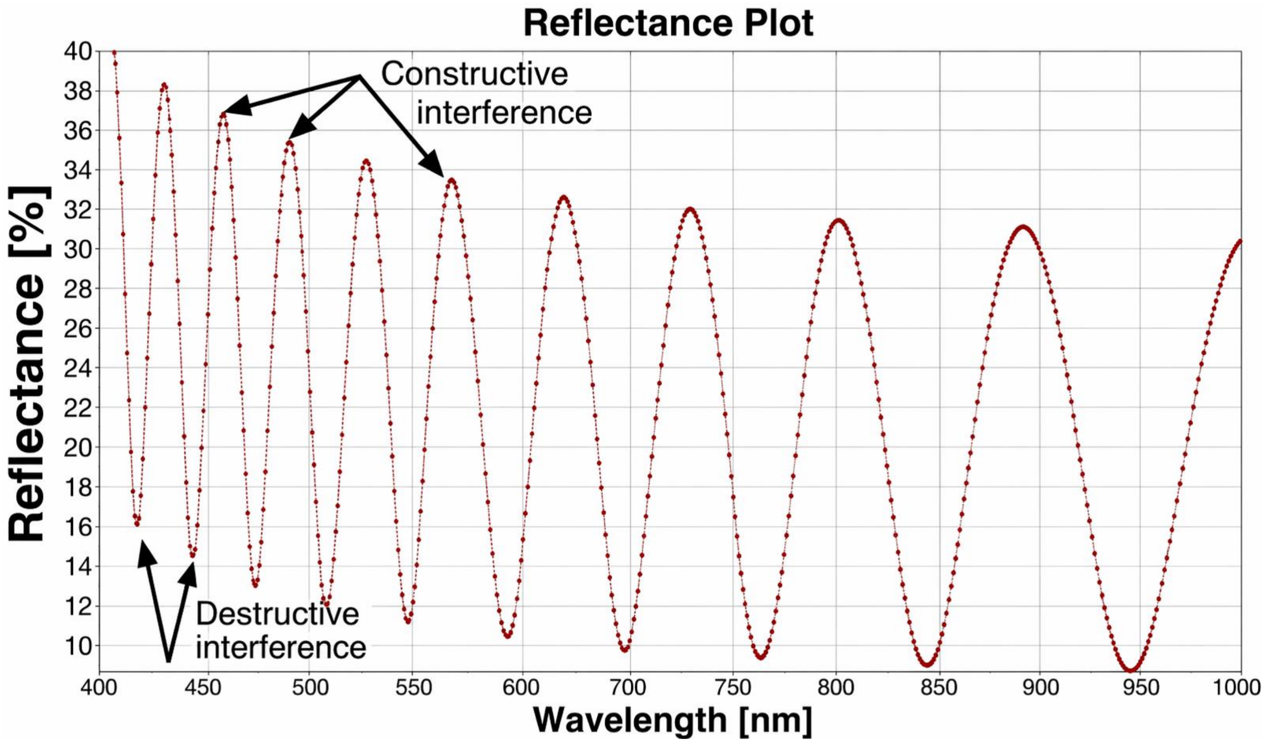
$$\boxed{R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}}$$

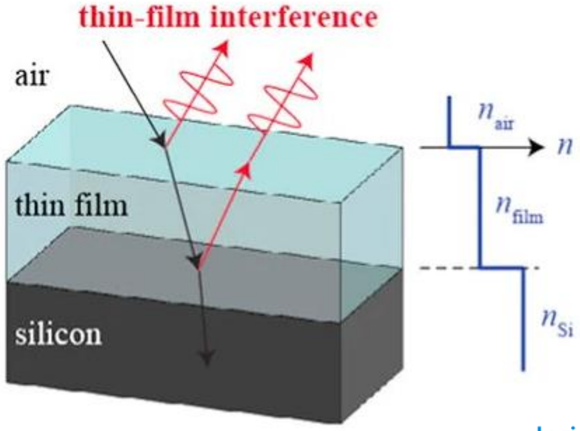
$$\boxed{\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}}$$

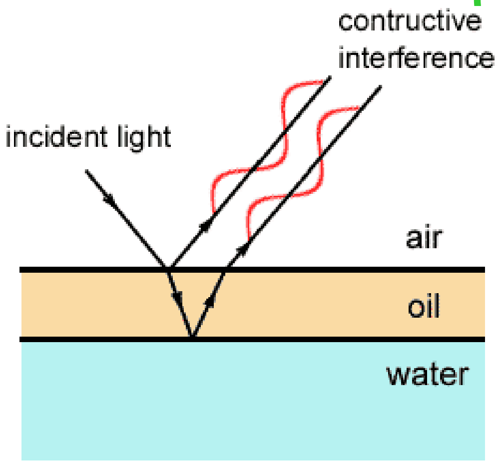
- ✓ **Szafir:** wysoka transmisja w zakresie 0.2-6 μm → zakres transparencji materiału (okno przezroczystości)
- ✓ w zakresie 0.2-6 μm α jest bardzo mały, **n = 1.77** i jest w tym zakresie stały
- ✓ ***R* = *0.077*** dla ***n* = 1.77** → **T = (1-R)^2 = 0.85**
- ✓ gwałtowny spadek w zakresie ~3 μm → absorpcja na fononach (*ang. phonon absorption / lattice absorption*)
- ✓ krawędź absorpcji dla **λ < 0.2 μm**

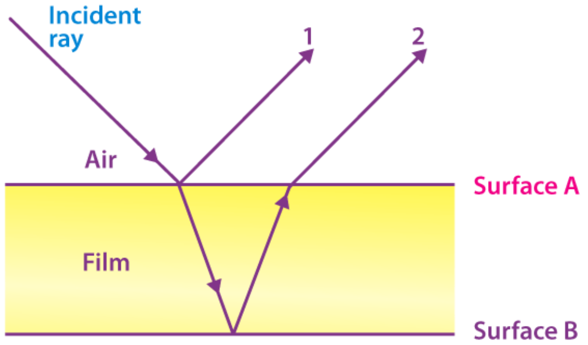
Cienkie warstwy. Współczynnik odbicia

- ✓ **Intensywność światła odbitego od struktury jest mierzona w ściśle określonym zakresie spektralnym**
- ✓ **Współczynnik odbicia:** $R = \frac{(n-1)^2+\kappa^2}{(n+1)^2+\kappa^2}$, $\alpha = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$
- ✓ **Współczynnik załamania n oraz współczynnik ekstynkcji κ zależą od długości fali; ponadto κ zależy od współczynnika absorpcji**
- ✓ **Obserwujemy oscylacje w amplitudzie współczynnika odbicia w funkcji długości fali**



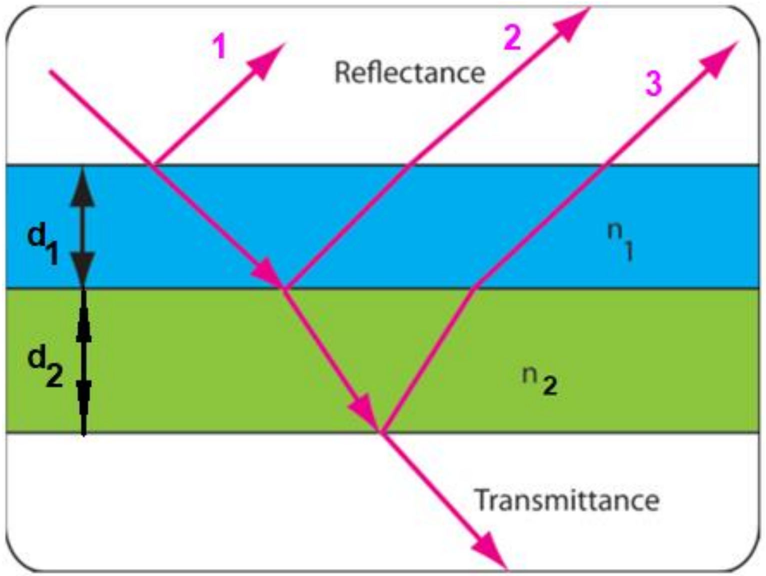






Droga optyczna. Różnica dróg optycznych

Dla dwóch promieni, z których jeden przebył drogę d_1 w ośrodku n_1, a drugi drogę d_2 w ośrodku n_2, różnica dróg optycznych Δ wynosi (przy czym promień 3, który czterokrotnie przeszedł przez cienkie warstwy, ma do pokonania dłuższą drogę)**:**



$$\Delta = d_2 n_2 - d_1 n_1$$

Różnica dróg optycznych między promieniem 1 odbitym od wierzchu warstwy 1 a promieniem 2 odbitym od spodu tej warstwy (znając grubość d_1 oraz współczynnik załamania n_1) to:

$$\Delta = 2 d_1 n_1 \cos \phi$$

gdzie ϕ to kąt załamania wewnątrz warstwy o współczynniku załamania n_1

Bardzo ważne: Zmiana fazy o π ⟹

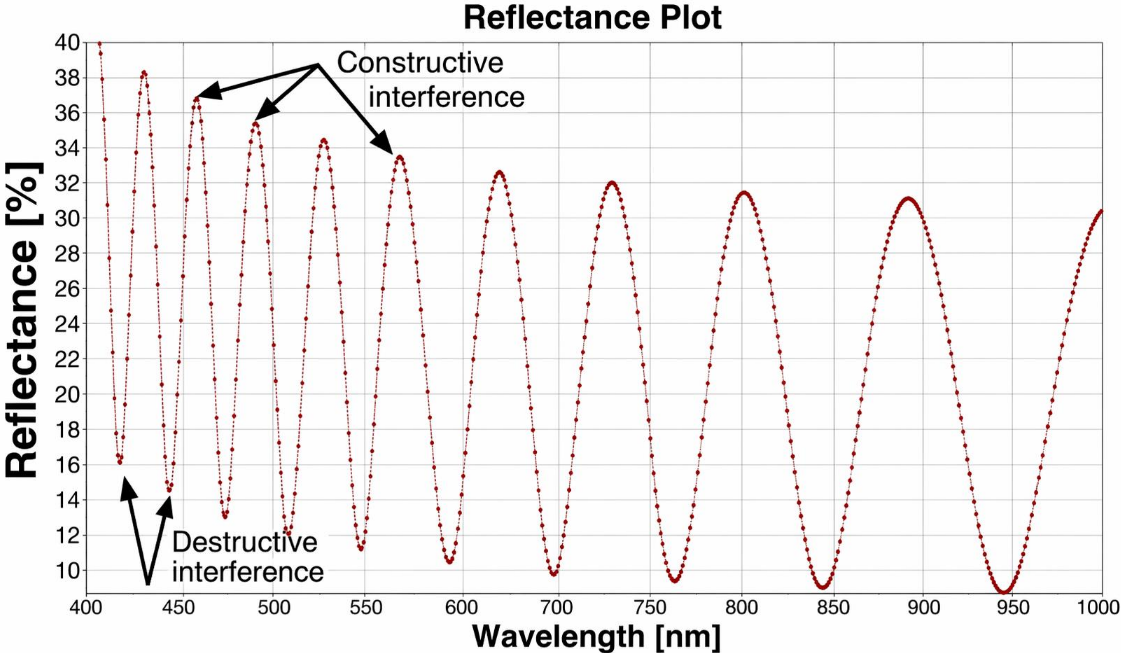
Jeśli światło odbija się od ośrodka o wyższym współczynniku załamania (np. powietrze → szkło), następuje skok fazy o π, co matematycznie odpowiada dodaniu pół długości fali ($\lambda/2$) do drogi optycznej:

$$\Delta = 2 d_1 n_1 \cos \phi + \frac{\lambda}{2}$$

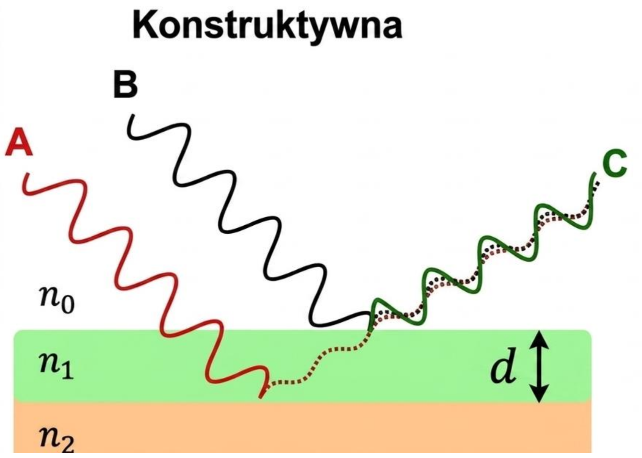
Interferencja w cienkich warstwach

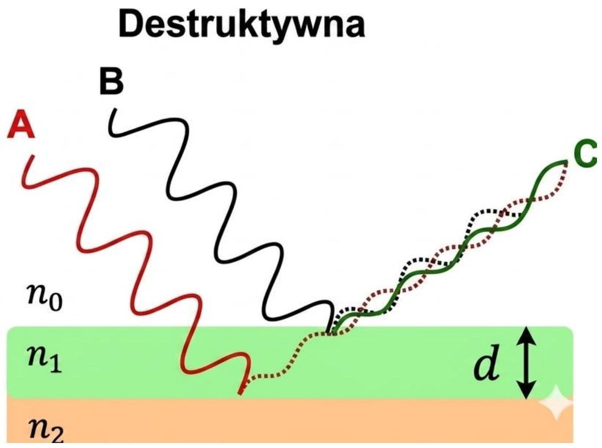
To właśnie różnica dróg optycznych decyduje o tym, że na wykresie zależności $R = f(\lambda)$ widzimy maksimum czy minimum interferencyjne:

- ✓ **Interferencja konstruktywna (maksimum):** $\Delta = m \cdot \lambda$
  (fale nakładają się gdyż są w fazie)
- ✓ **Interferencja destruktywna (minimum):** $\Delta = m \cdot \frac{\lambda}{2}$
  (fale się wygaszają gdyż są w przeciwfazie)



W odniesieniu do rysunków pod spodem: fala B jest odpowiednio w fazie (lewy rys.) i przeciwfazie (prawy rys.) w stosunku do fali A bezpośrednio odbitej od górnej powierzchni warstwy → stąd interferencja konstruktywna w pierwszym przypadku i destruktywna w drugim.



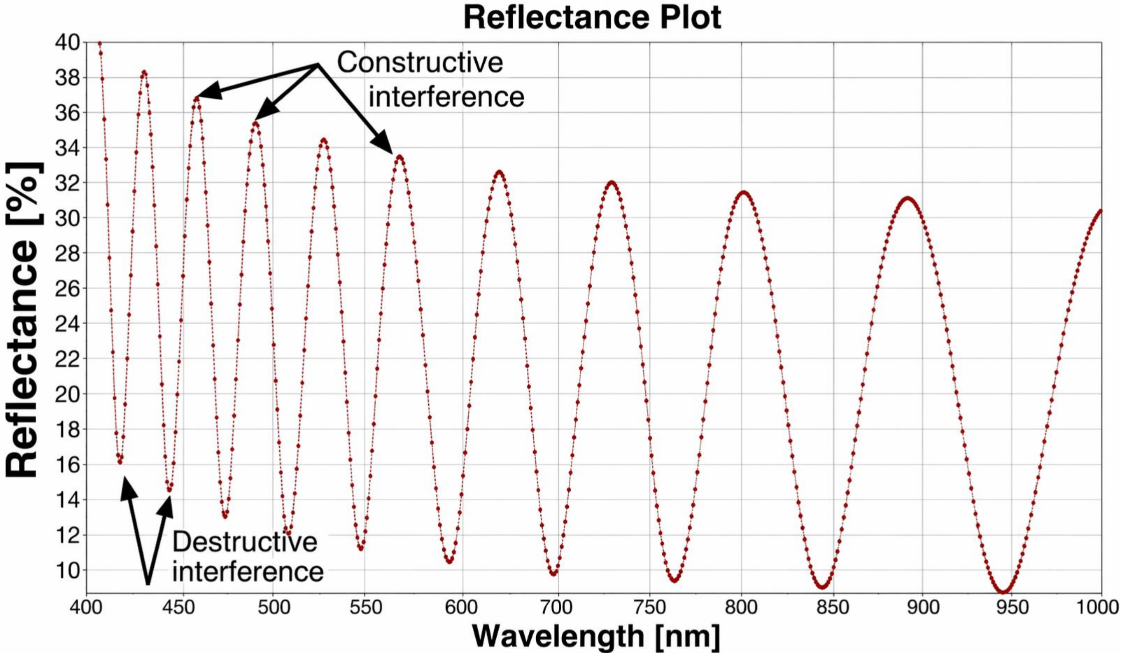


Dla fal padających prostopadle oraz $n_0 < n_1 < n_2$

$$\begin{cases} 2dn_1 = m \cdot \lambda \rightarrow \text{konstruktywna} \\ 2dn_1 = m \cdot \frac{\lambda}{2} \Longrightarrow \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \rightarrow \text{destruktywna} \end{cases}$$

Δ = całkowitej wielokrotności λ → konstruktywna
Δ = nieparzystej wielokrotności połowy λ → destruktywna

Grubość cienkiej warstwy



Konstruktywna **Destruktywna**

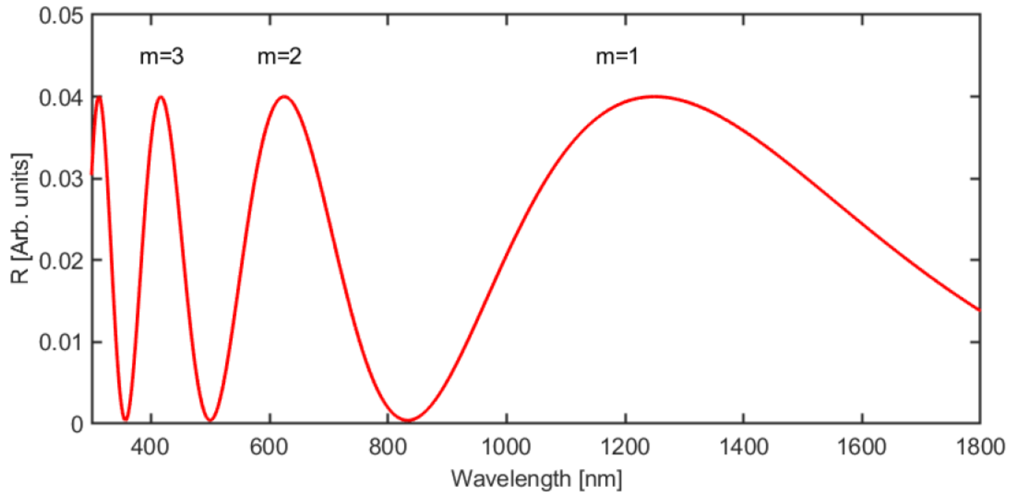
$$2dn_1 = m \cdot \lambda_{max}$$

$$\boxed{d = \frac{m \cdot \lambda_{max}}{2n_1}}$$

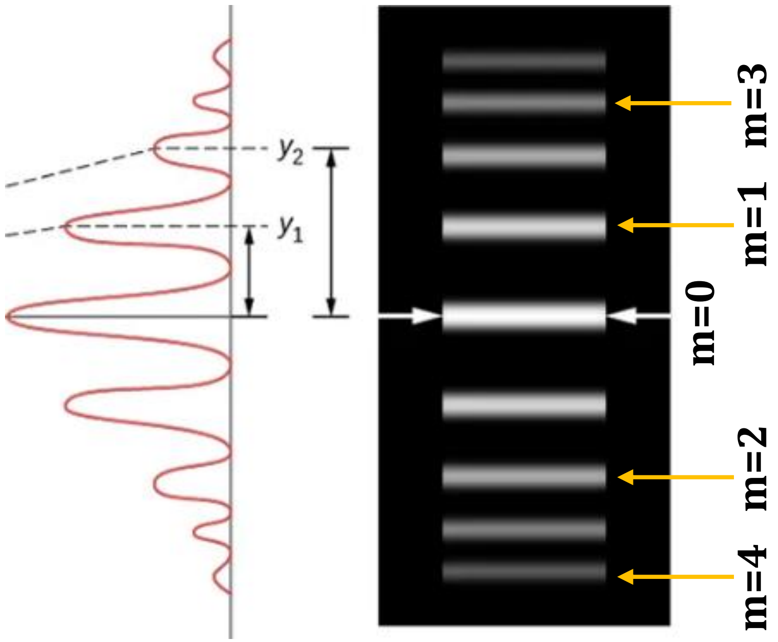
$$2dn_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_{min}$$

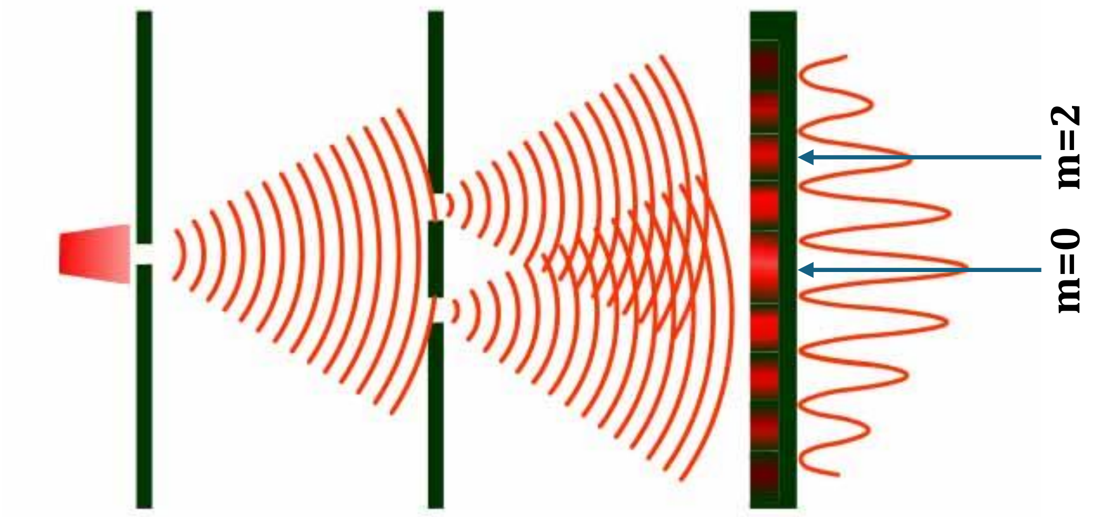
$$\boxed{d = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_{min}}{2n_1}}$$

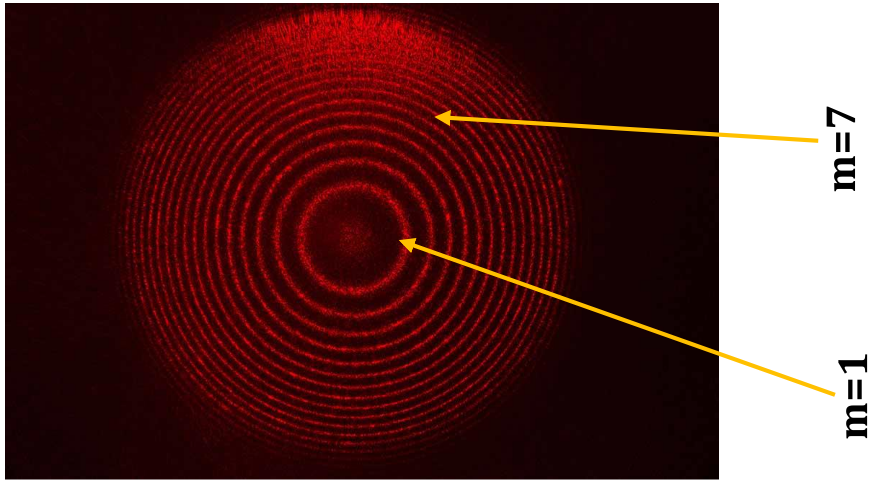
$$\begin{cases} 2dn_1 = m \cdot \lambda \rightarrow \text{konstruktywna} \\ 2dn_1 = m \cdot \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \rightarrow \text{destruktywna} \end{cases}$$



Przykłady obrazów interferencyjnych. Rząd interferencji

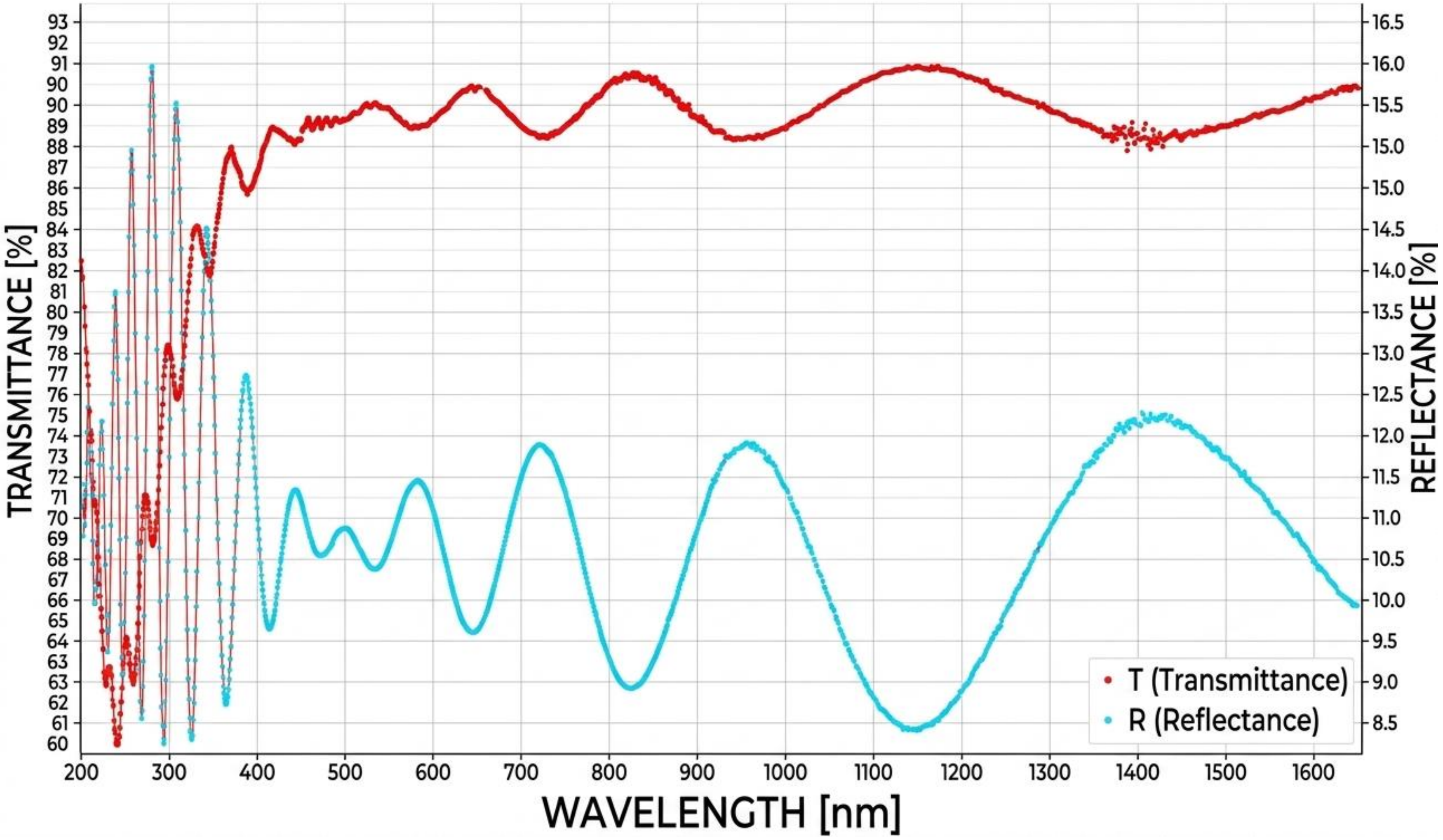






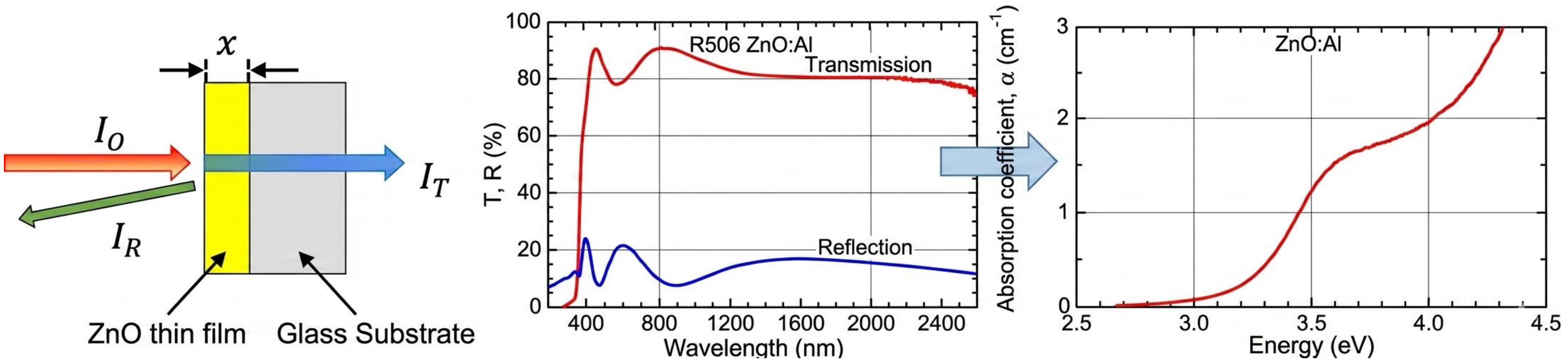
- ✓ Im bliżej zerowego rzędu tym większa intensywność linii / prążków / pierścieni
- ✓ Im dalej od *m=0* tym większe zagęszczenie linii / prążków / pierścieni → bo większy rząd interferencji (dyfrakcji)

Widma transmisji i odbicia cienkich warstw



$$\boldsymbol{T = 1 - R}$$ **oraz** $$\boldsymbol{R = 1 - T}$$

Widma transmisji, odbicia i absorpcji dla cienkich warstw

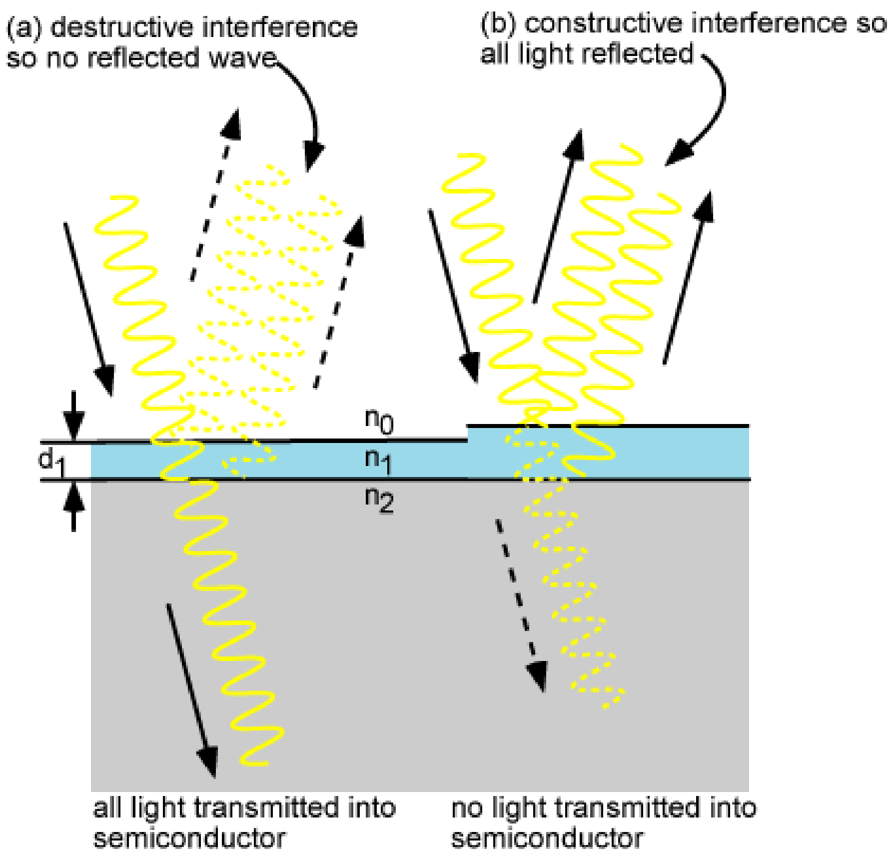


$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{x} ln\left(\frac{I_0(\lambda) - I_R(\lambda)}{I_T(\lambda)}\right)$$

$$I = I_0 e^{-\alpha \cdot x}$$

I_0 - natężenie światła padającego na warstwę o grubości x
I_R - natężenie światła odbitego od warstwy o grubości x
I_T - natężenie światła przechodzącego przez warstwę o grubości x

Cienkie warstwy antyrefleksyjne w ogniwach słonecznych - funkcje



- ✓ **Warstwę antyrefleksyjną w ogniwie dobiera się tak, aby zminimalizować współczynnik odbicia a i zmaksymalizować transmisję → polega to na wykorzystaniu interferencji destruktywnej dla światła odbitego**

- ✓ **Warstwy antyrefleksyjne mogą być wykonane z dielektryków – np. SiN_x, TiO_2, Al_2O_3 ; lub warstw przewodzących - takich jak ITO - tlenek indu (In_2O_3) domieszkowany cyną (Sn)**

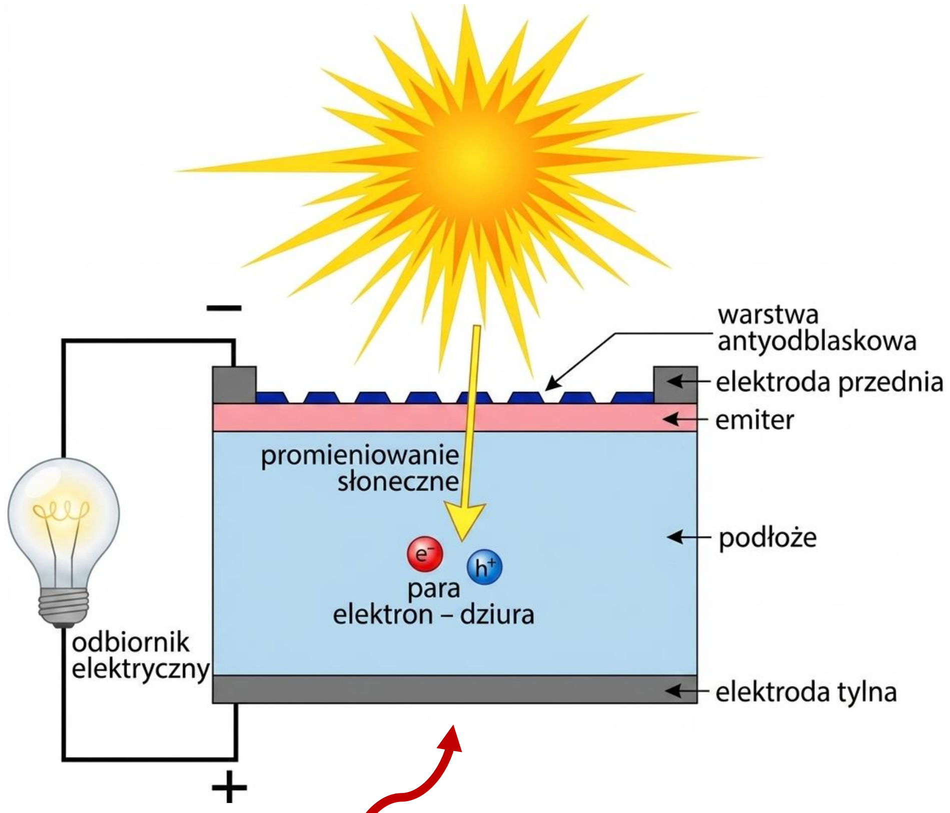
- ✓ **Grubość powłoki antyrefleksyjnej zależy od jej współczynnika załamania (n) oraz długości fali światła padającego na ogniwo (λ_0). Dla najcieńszej stosowanej warstwy przyjmujemy rząd interferencji *m=0*, wówczas:**

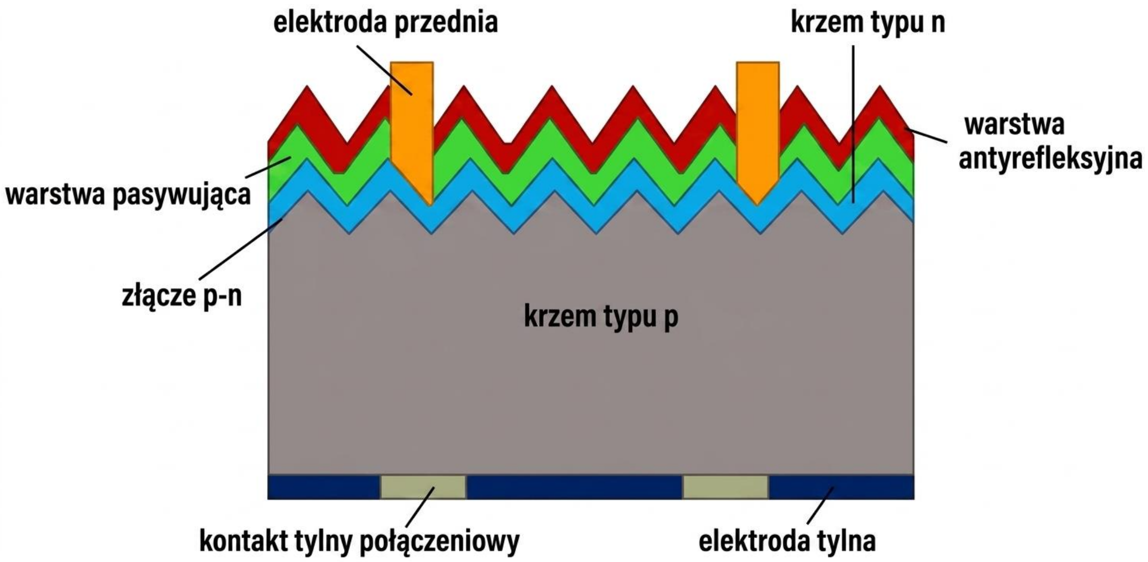
$$\boxed{d = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_0}{2n_1} \Longrightarrow \quad d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1}}$$

Odbicie jest dodatkowo minimalizowane, jeśli współczynnik załamania światła powłoki antyrefleksyjnej jest średnią geometryczną współczynników materiałów po obu jej stronach, czyli szkła lub powietrza oraz półprzewodnika. Wyraża się to wzorem: $n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$

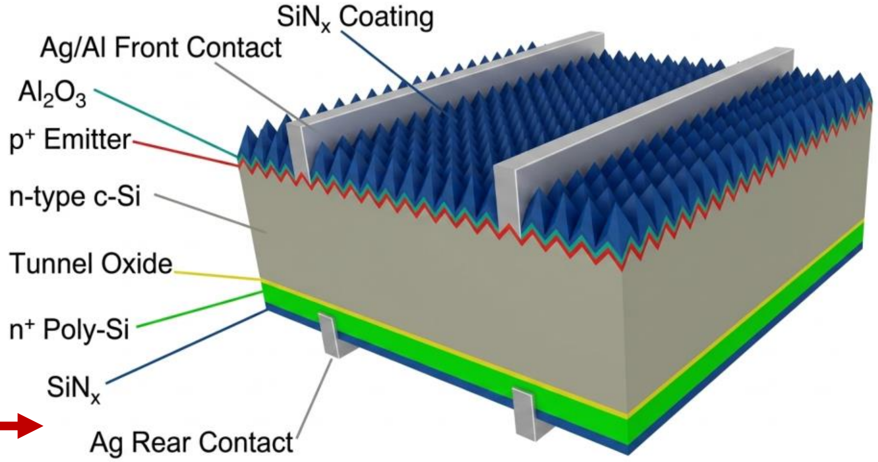
Źródło: https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/anti-reflection-coatings

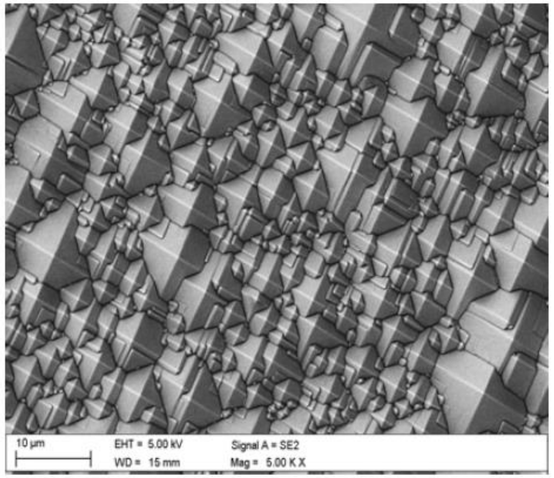
Warstwy antyrefleksyjne w ogniwach słonecznych





Standardowa konstrukcja ogniwa krzemowego.

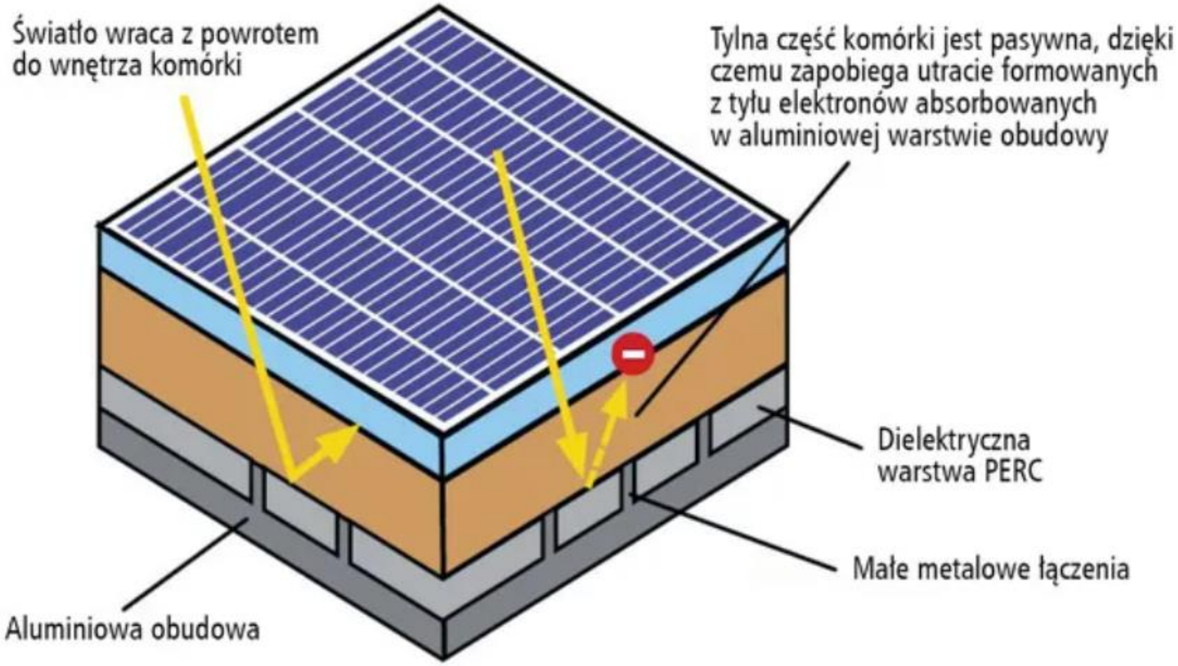


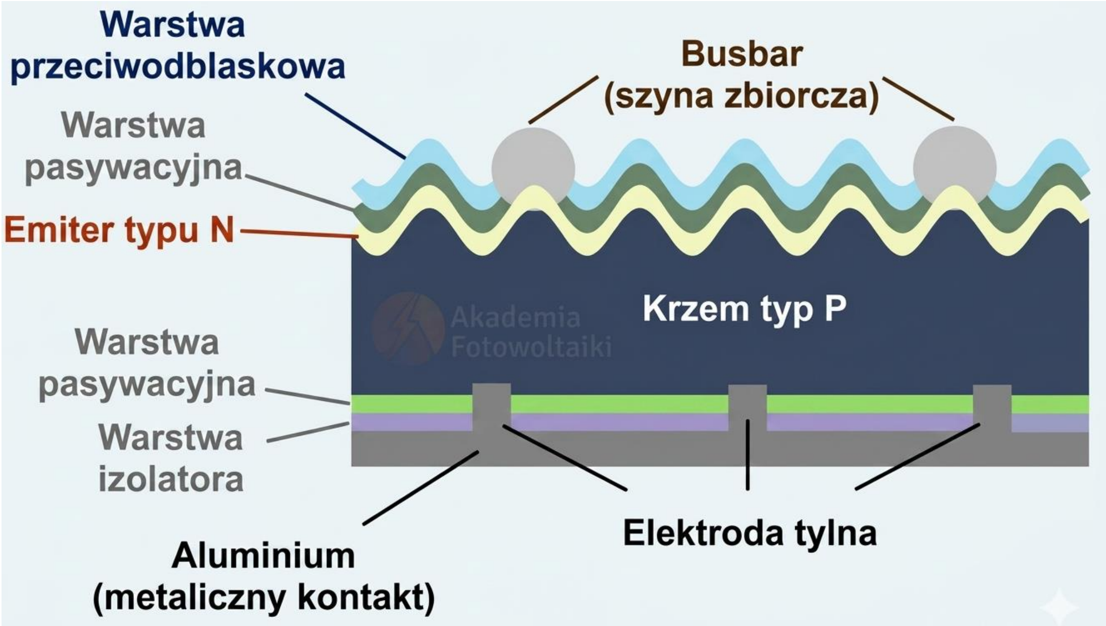


Ogniwa z teksturowaną powierzchnią emitera → struktura piramidalna.

Źródła: https://akademia-fotowoltaiki.pl/ogniwo-fotowoltaiczne/
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pimib.polsl.pl/pdf/26/262.pdf

Warstwy antyrefleksyjne w ogniwach słonecznych typu PERC





Ogniwo typu PERC (*ang. Passivated Emitter and Rear Cell* - z pasywacją emitera i tylnej strony) ma dodatkową warstwę dielektryka, zwiększającą efektywność ogniwa. Odbija on światło docierające do dolnej warstwy płytki i poprzez to odbicie fotony mają drugą szansę absorpcję i na wytworzenie prądu.

Źródła: https://akademia-fotowoltaiki.pl/ogniwo-fotowoltaiczne/
https://www.muratorplus.pl/technika/oze/postep-technologiczny-w-budowie-ogniw-pv-przeglad-nowoczesnych-rozwiazan-aa-DEMf-SxwV-S9hv.html