

Własności optyczne półprzewodników

Andrzej Wysmołek

Wykład przygotowany w oparciu o wykłady prowadzone
na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
przez
prof. Mariana Grynberga
oraz
prof. Romana Stępniewskiego

„Właściwości optyczne półprzewodników”

- transmisja i absorpcja optyczna, odbicie światła, luminescencja, rozpraszanie światła, zespolony współczynnik załamania,
- współczynnik absorpcji, współczynnik odbicia, współczynnik ekstynkcji, zastosowanie równań Maxwella do opisu propagacji fal w materii skondensowanej, Dynamiczna Funkcja Dielektryczna,
- opis kwantowy zjawisk optycznych, koncepcja siły oscylatora,
- zjawiska optyczne związane ze swobodnymi nośnikami, plazmony,
- drgania sieci, fonony akustyczne, fonony optyczne, dyspersja, polariton fononowy,
- oddziaływanie elektron-fonon, mody sprzężone plazmon-fonon,
- przejścia międzypasmowe, osobliwości van Hoofta, podstawowa krawędź absorpcji,
- model wodoropodobny w ciele stałym, ekscytony swobodne, polariton ekscytonowy, ekscytony związane, widma emisyjne par donor-akceptor,
- spektroskopia stanów domieszkowych,
- zewnętrzne pole magnetyczne oraz ciśnienia osiowe i hydrostatyczne w zastosowaniu do badań optycznych półprzewodników,
- techniki modulacyjne, fotoodbicie, elektroodbicie,
- elektronowy rezonans paramagnetyczny (EPR),
- elastyczne i nieelastyczne rozpraszanie światła, efekt Ramana,
- podstawowe własności optyczne nanobiektów półprzewodnikowych (studnie kwantowe, druty kwantowe, kropki kwantowe) i metamateriałów.

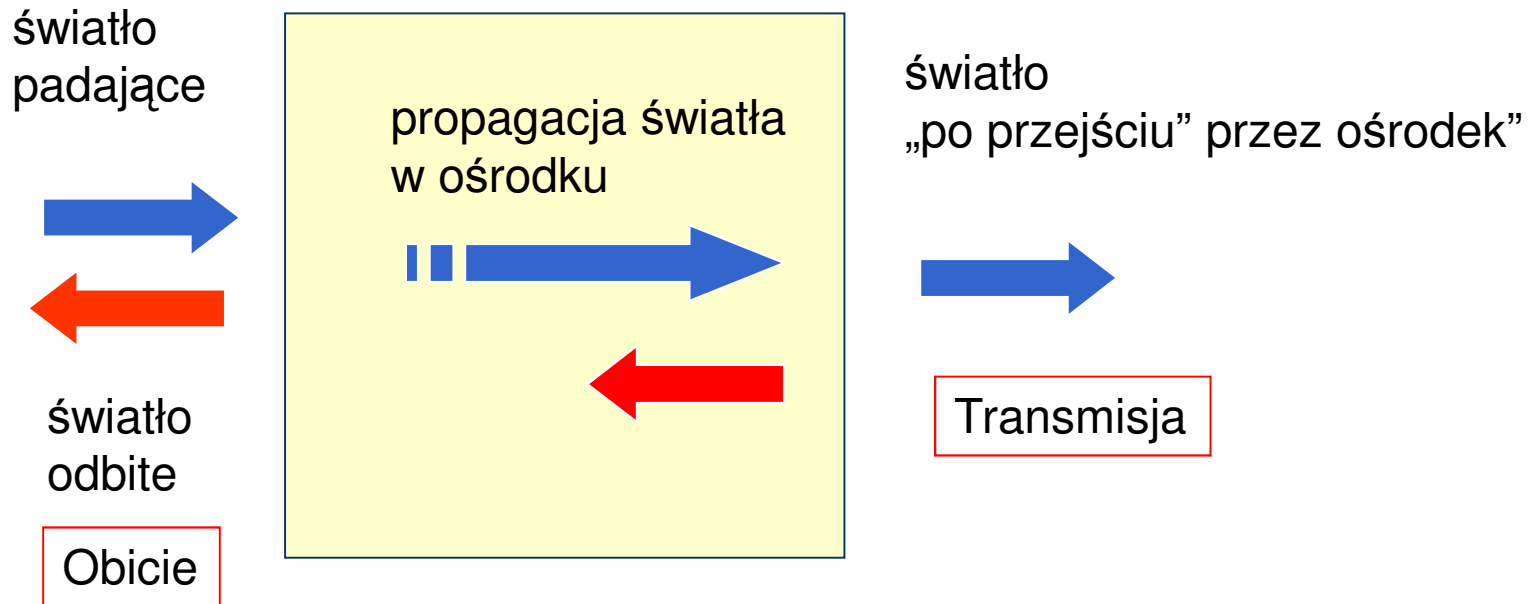
Warunki zaliczenia:

egzamin ustny (termin ustalany indywidualnie)

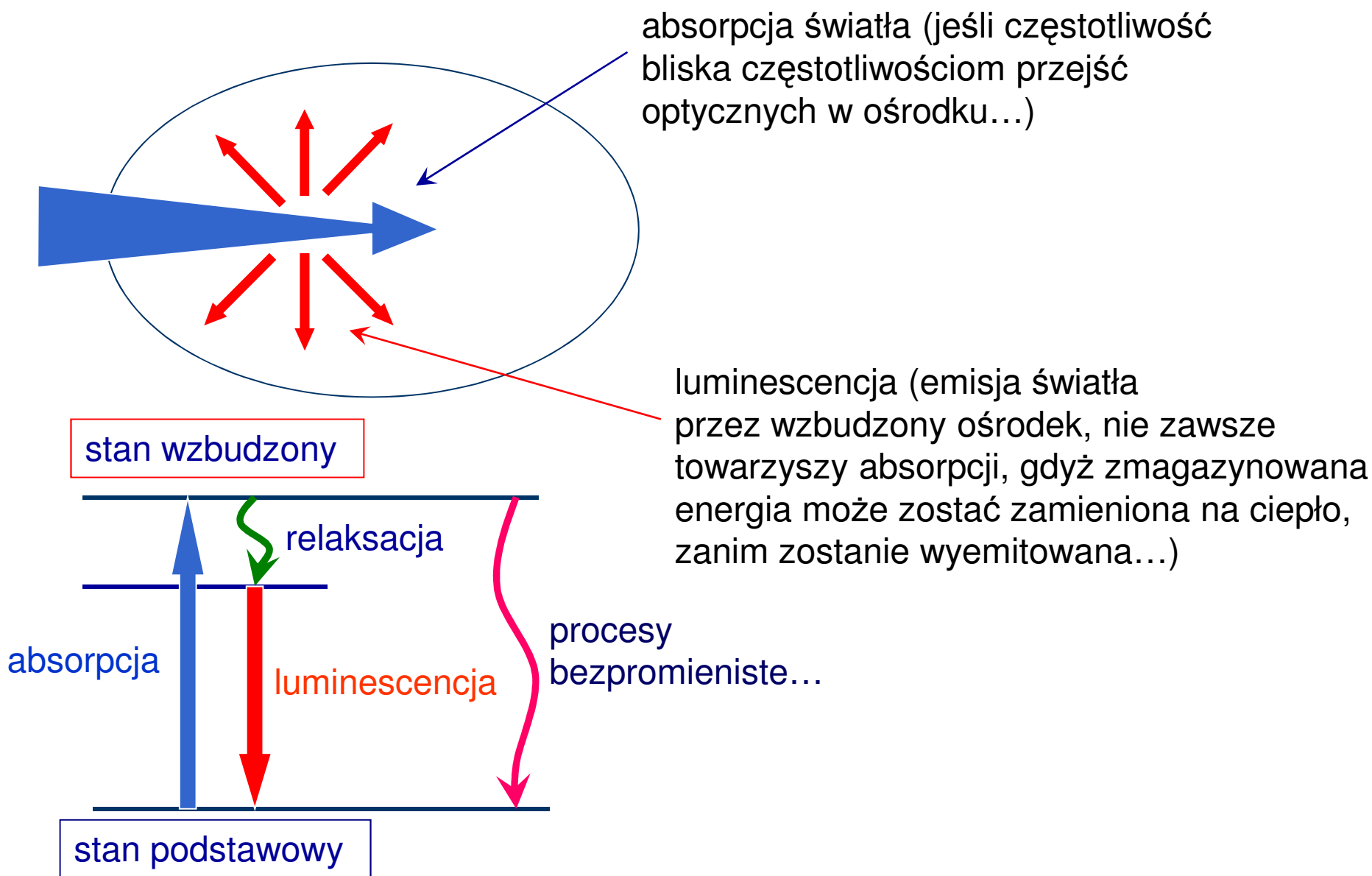
Literatura

1. P. Yu, M. Cardona, Fundamentals of Semiconductors
2. J.M. Ziman, Wstęp do teorii Ciała Stałego.
3. K. Sierański, M. Kubisa, J. Szatkowski, J. Misiewicz,
Półprzewodniki i struktury półprzewodnikowe.
4. Mark Fox, Optical properties of solids
5. N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, Fizyka ciała stałego.
6. Ch. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego.

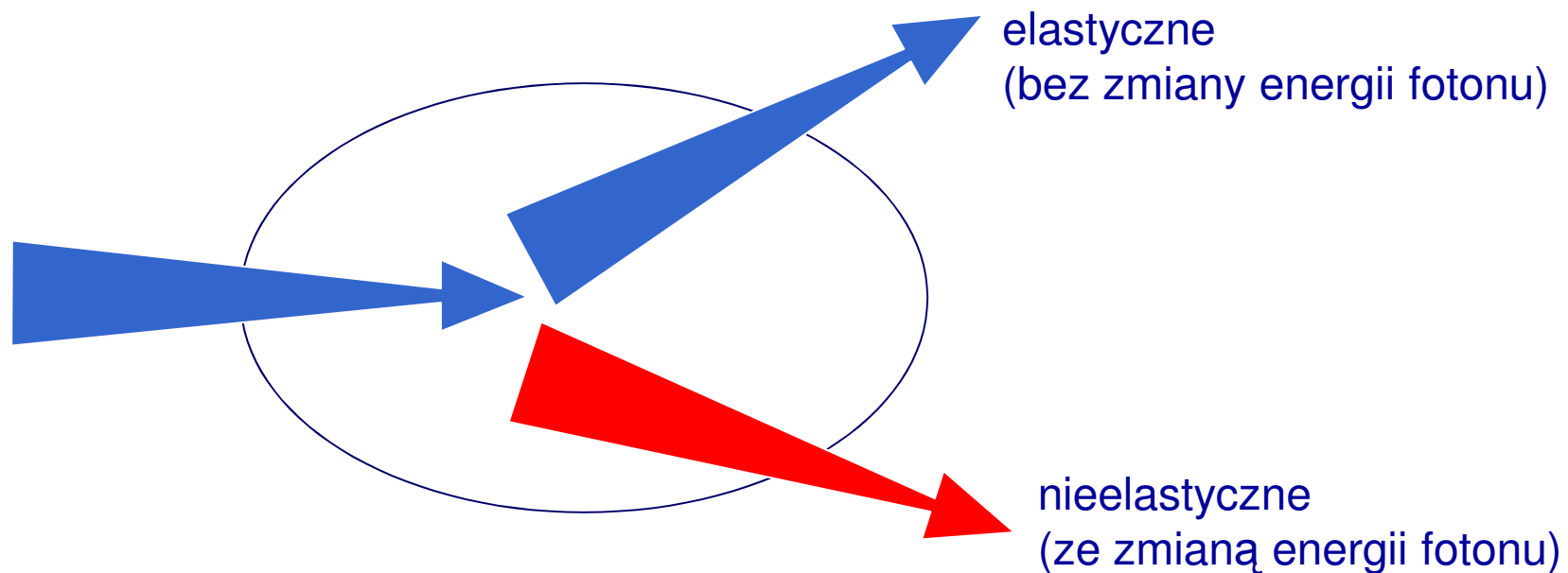
Klasyfikacja procesów optycznych



Absorpcja, luminescencja, rozpraszanie...



Rozpraszanie światła



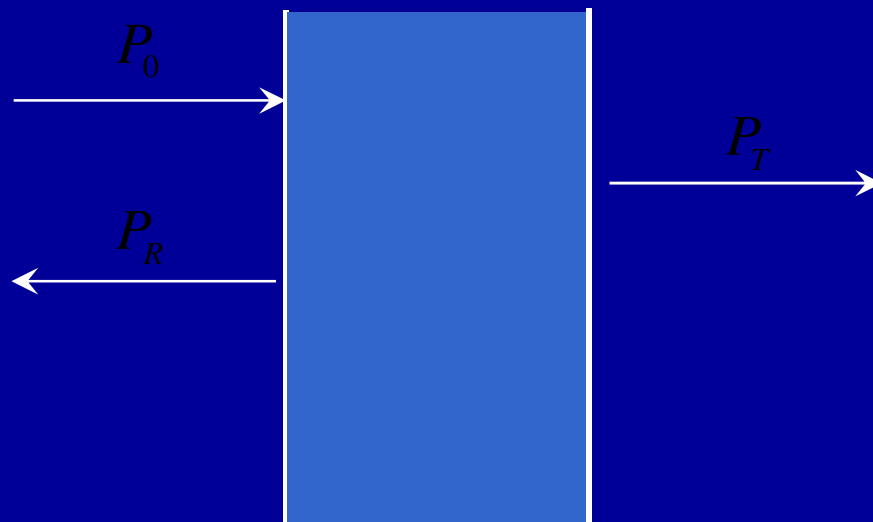
Procesy nieliniowe... (wymagana duża intensywność światła)

Stałe optyczne

Odbicie na granicy ośrodków.
Współczynnik odbicia:

$$R = \frac{P_R}{P_0}$$

P_R – moc odbita
 P_0 – moc padająca



Współczynnik transmisji

$$T = \frac{P_T}{P_0}$$

Sposób dokładnego pomiaru: przyrządy dwuwiazkowe np.. Cary



Gdyby nie było absorpcji, rozpraszania...

$$T + R = 1$$

Propagacja światła poprzez przezroczyste medium, rządzona jest przez współczynnik załamania...

W rzeczywistości współczynnik załamania zależy od częstości fali świetlnej (dyspersja)...

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

Absorpcja

Współczynnik absorpcji α :

Moc na jednostkę powierzchni - natężenie światła $I = \frac{P}{S}$

Zmiana natężenia światła w warstwie o grubości dz $dI = -\alpha I(z) dz$

Po scałkowaniu: $I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$ Prawo Beer'a

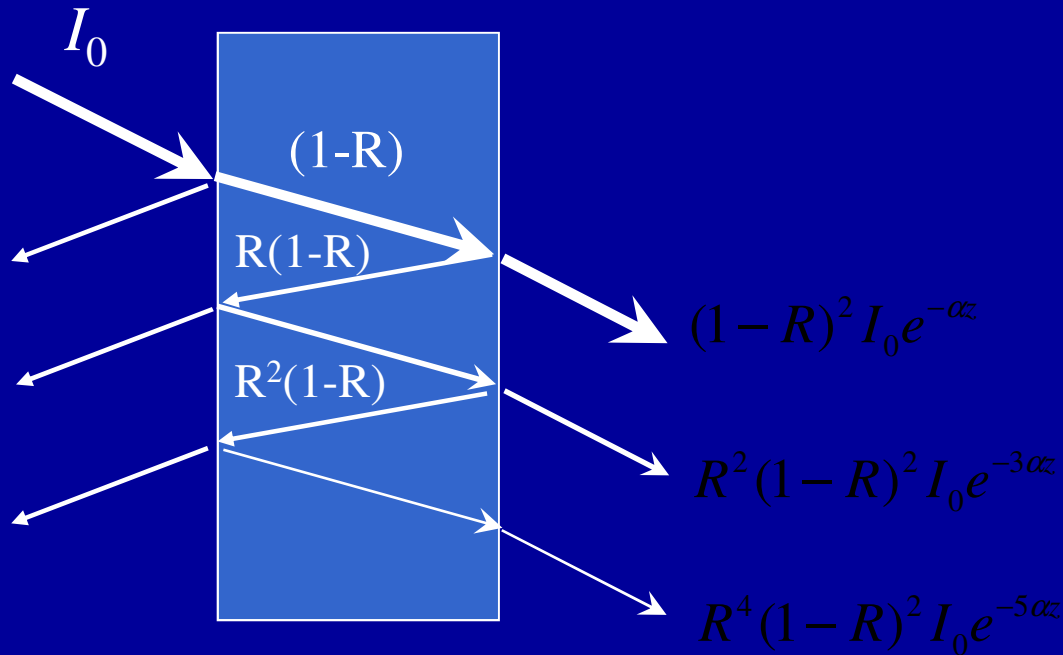
Współczynnik absorpcji zależy od częstości światła propagującego się w ośrodku, stąd dany materiał optyczny może absorbować jakieś barwy a inne nie...

Gęstość optyczna
absorbancja:

$$\text{O.D.} = -\log\left(\frac{I(d)}{I_0}\right) = \frac{\alpha d}{\ln(10)} = 0.434\alpha d$$

Przydatne w laboratorium przy wyborze filtrów optycznych...

Wielokrotne odbicia...



Suma ciągu
geometrycznego:

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2}{1-R^2} e^{-\alpha d}$$

Gdy α duże
tylko dwa odbicia:

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

Gdy $\alpha \rightarrow 0$ (bardzo
małe

$$T = \frac{(1-R)^2}{1-R^2}$$

$$R = \frac{1-T}{1+T}$$

Transmisja warstwy krzemu

Zbadajmy transmisję i gęstość optyczną warstwy krzemu o grubości $10\mu\text{m}$, dla długości fali 632.8nm (laser He-Ne). Współczynnik absorpcji dla tej długości fali wynosi $\alpha=3.8\cdot 10^3\text{ cm}^{-1}$, natomiast współczynnik odbicia krzemu $R=0.35$.

$$\alpha d = 3.8 \times 10^3 \times 10^2 \times 10 \times 10^{-6} = 3.8$$

Iloczyn αd jest duży, możemy więc zaniedbać wielokrotne odbicia, zatem:

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} = (1 - 0.35)^2 e^{-3.8} = 0.0095$$

$$\text{O.D.} = 0.434 \alpha d = 0.434 \times 3.8 = 1.65$$

Absorpcja i rozpraszanie

Rozpraszanie światła spowodowane jest obecnością zmian współczynnika załamania na obszarach mniejszych niż długość fali – może być spowodowane obecnością domieszek, defektów czy też innych niejednorodności w kryształach...

Intensywność wiązki propagującej się (w danym kierunku) przez rozpraszające medium zanika wykładniczo:

$$I(z) = I_0 \exp(-N\sigma_s z)$$

Gdzie N – liczba centrów rozpraszających w jednostce objętości, σ_s – przekrój czynny na rozpraszanie (wymiar powierzchni).

Wzór identyczny jak dla absorpcji jeśli $\alpha \equiv N\sigma_s$

Jakie są różnice pomiędzy rozpraszaniem a absorpcją?

Dla rozpraszania elastycznego (rozpraszanie Rayleigh'a) mamy zależność:

$$\sigma_s(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Uwaga praktyczna: Wykonując pomiary optyczne w UV należy dokładać większych starań by eliminować efekty rozpraszania światła laserowego...(filtry, przesłony, itp...)

Niebieskie niebo



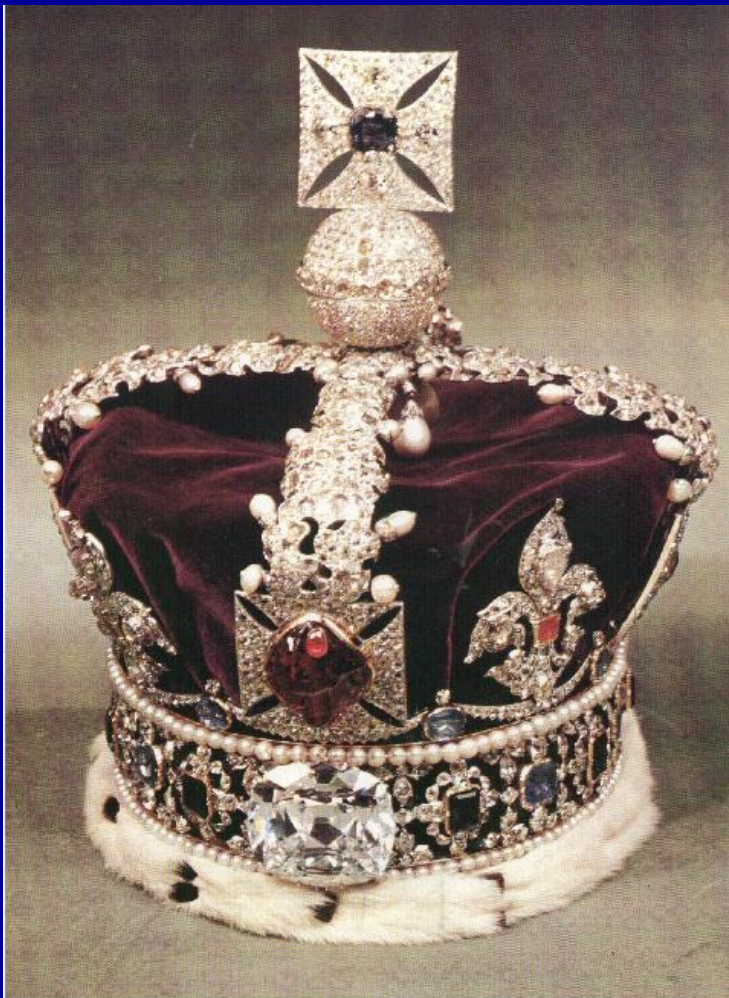
Zachód słońca

foto © Dariusz Pawłowski

Dolny Śląsk - zachód słońca

Polska.pl

Sławne rubiny i szafiry



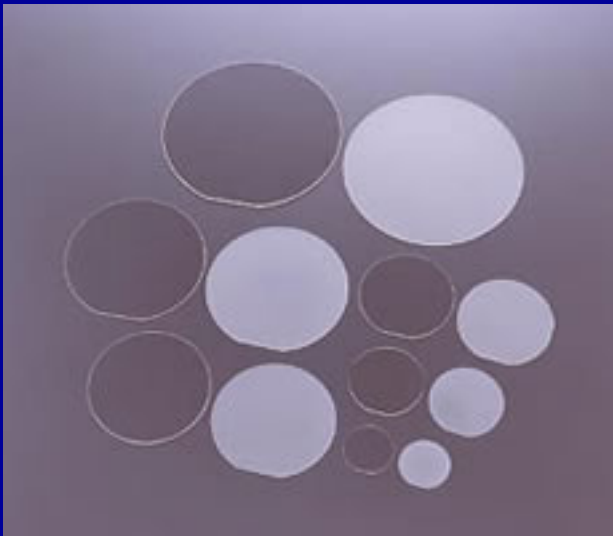
Coś dla zwykłych ludzi...



Al_2O_3 (korund)



- $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr} \rightarrow$ rubin



- $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti} \rightarrow$ szafir

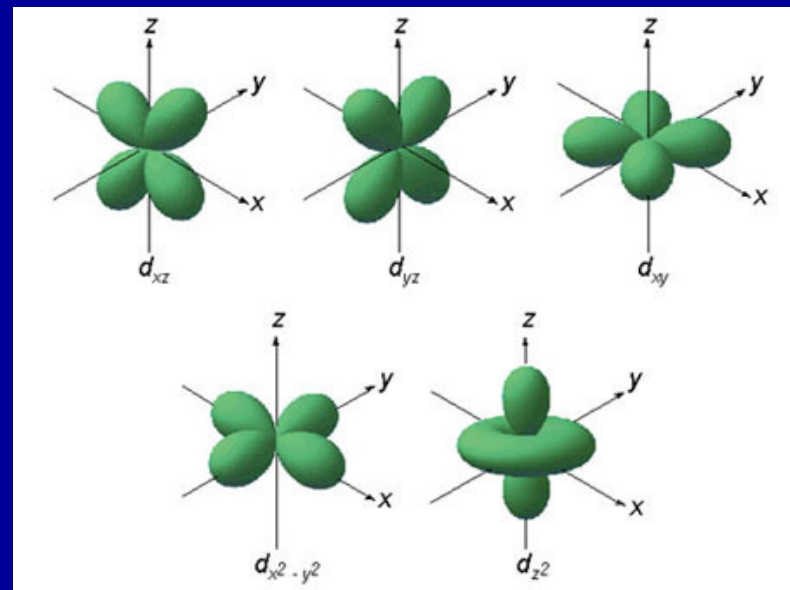


Skąd te kolory?

Cr – [Ar]



Ti - [Ar]



Po wbudowaniu do Al_2O_3

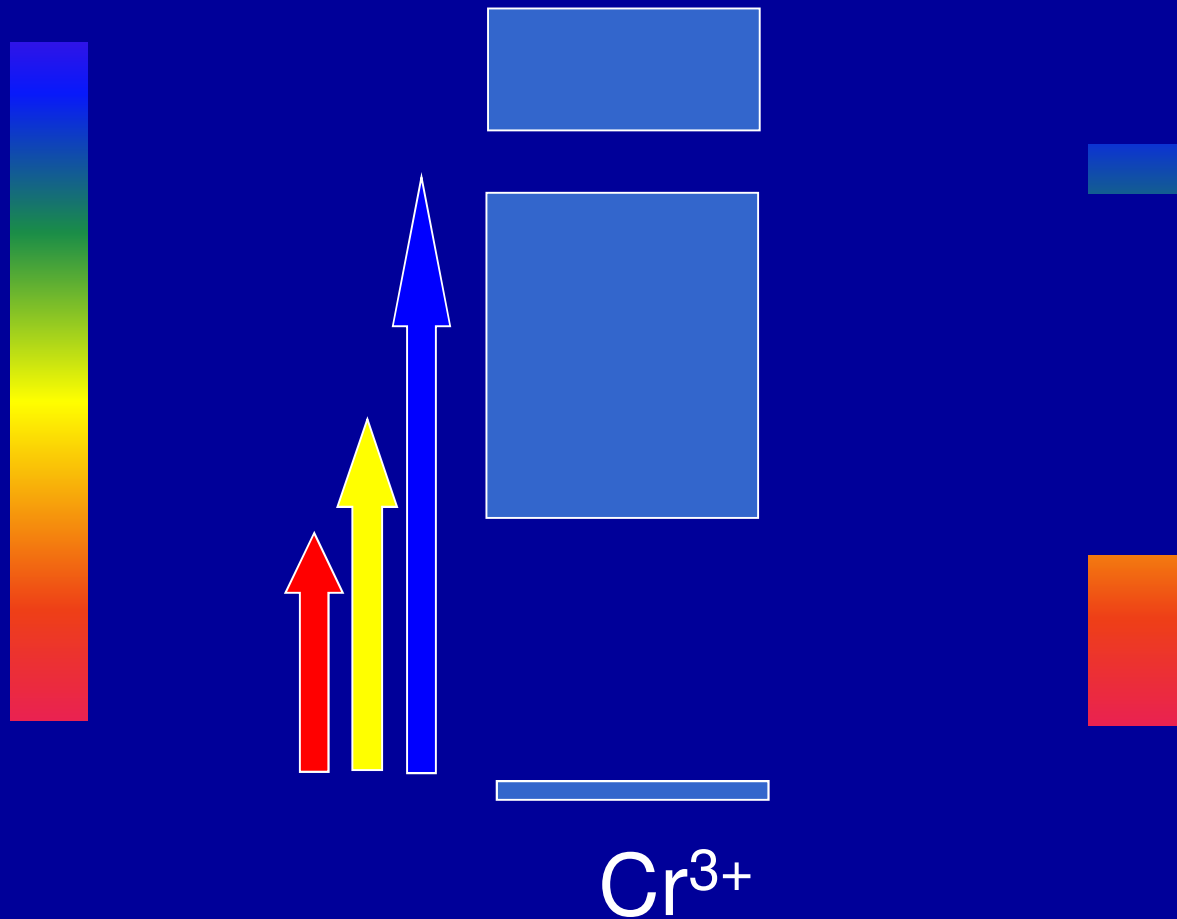


Metale przejściowe:

Chrom, tytan, żelazo, mangan, kobalt, nikiel....

Orbitale d zachowują swój atomowy charakter!

Charakterystyczne widmo absorpcji



Domieszki – centra barwne

Niewielka liczba atomów chromu zmienia bezbarwny korund na rubin...

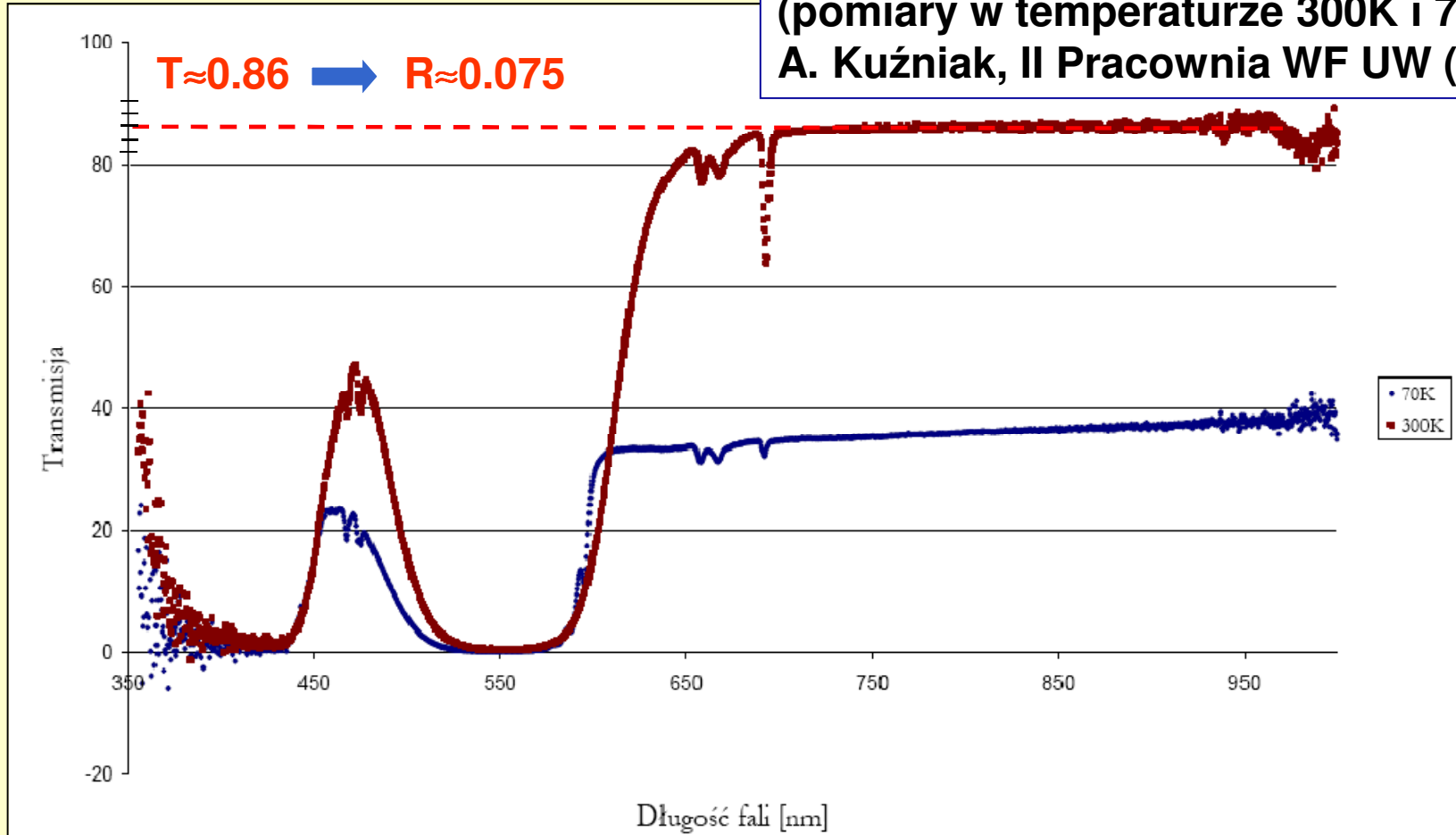
Badanie absorpcji, luminescencji jest więc dobrą metodą wykrywania domieszek!

W trakcie wykładu okaże się, że metody te są bardzo przydatne do badania różnego rodzaju wzbudzeń w półprzewodnikach i strukturach półprzewodnikowych...

Widmo transmisji dostarcza też informacji

o współczynniku odbicia...

Przykład - widma rubinu
(pomiary w temperaturze 300K i 77K)
A. Kuźniak, II Pracownia WF UW (2006)



Odbicie wynika z różnicy współczynników załamania na granicy ośrodków!
Pokażemy niedługo, że z powyższych pomiarów można uzyskać informacje o współczynniku załamania Al_2O_3

$$n = \frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \cong 1,76$$

Skąd to wynika? Rozważmy równania Maxwella...