Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

Wykład 1

wykład: Jacek Szczytko
(wsparcie w zakresie optyki: Piotr Fita)
ćwiczenia: Paweł Kowalczyk,
Barbara Piętka, Maciej Molas

Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

2019/20

Plan

O czym będzie ten wykład?

1. Oddziaływanie światła z materią (J. Szczytko)
   - Absorpcja i emisja światła
   - Podstawy spektroskopii
   - Struktura energetyczna atomów
   - Wpływ zewnętrznych pól na energie poziomów atomowych
   - Wiązanie chemiczne i struktura energetyczna cząsteczek
2. Fizyka materii skondensowanej (J. Szczytko)
3. Optyka doświadczalna (P. Fita)
   - Laserowe chłodzenie atomów
   - Rozpraszanie światła
   - Wzmacnianie światła i lasery
   - Optyczne zjawiska nieliniowe

O czym nie będzie ten wykład?

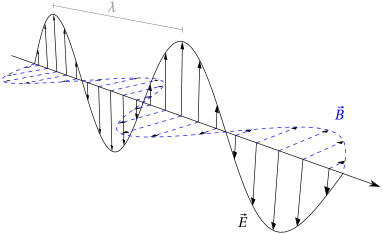
O własnościach samego światła:

- Dyfrakcja
- Interferencja
- Spójność
- Statystyka światła
- Stany kwantowe światła

Co trzeba wiedzieć?

- Niewiele z zakresu optyki
  (tyle, ile na kilku kolejnych slajdach)
- Nieco z zakresu budowy materii:
  - Podstawy mechaniki kwantowej
  - Struktura atomu
- Podstawy termodynamiki
- Adres strony wykładu:
  http://www.fuw.edu.pl/wiki/WdOiFMS
  - zasady zaliczenia
  - polecana literatura
  - terminy
  - materiały z wykładów i ćwiczeń

Pole elektryczne i wektor Poyntinga



Fala płaska w kierunku z:

$$\overrightarrow{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)\widehat{x}$$

$$\overrightarrow{B}(z,t) = \frac{1}{c} E_0 \cos(kz - \omega t)\widehat{y}$$

Gęstość energii:

$$u = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2\right)$$

$$u = \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t)$$

Strumień energii
(wektor Poyntinga):

$$\overrightarrow{S} = \frac{1}{\mu_0}(\overrightarrow{E} \times \overrightarrow{B})$$

$$\overrightarrow{S} = cu\widehat{z}$$

Natężenie światła

Interesuje nas uśredniona po okresie wartość wektora Poyntinga:

$$\langle u \rangle = \epsilon_0 E_0^2 \langle \cos^2(kz - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \hat{z}$$

Natężenie światła I:

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

(uśredniona po okresie moc fali na jednostkę powierzchni)

Notacja zespolona

Korzystamy ze wzoru Eulera:

$$\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi} = \cos\phi + \mathrm{i}\sin\phi$$

Dla fali o wektorze falowym $\overrightarrow{k}$:
(Część urojoną pomijamy "w pamięci")

$$\overrightarrow{E} = E_0 \mathrm{e}^{-i(\overrightarrow{k}\cdot\overrightarrow{r}-\omega t)}\widehat{n}$$

Tu E_0 może być zespolone, wtedy zawiera informacę o fazie:
$E_0 = |E_0|\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}$

$$\overrightarrow{B} = \frac{1}{c}E_0 \mathrm{e}^{-i(\overrightarrow{k}\cdot\overrightarrow{r}-\omega t)}(\widehat{k}\times\widehat{n})$$

Natężenie światła:

$$I = \frac{1}{2}c\epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2}c\epsilon_0|\overrightarrow{E}|^2 \sim |\overrightarrow{E}|^2$$

Zmienne w czasie natężenie światła

Pole elektryczne fali E-M:

$$E(t) = E_0(t)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_0 t}$$

- $E_0(t)$ – wolnozmienne
- $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_0 t}$ – szybkozmienne

Natężenie światła:

$$I(t) = \frac{1}{2}c\epsilon_0|E(t)|^2 = \frac{1}{2}c\epsilon_0|E_0(t)|^2$$

Energia (na jednostkę powierzchni):

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{2}c\epsilon_0\int_{-\infty}^{\infty}|E_0(t)|^2\mathrm{d}t$$

$I(t)$ takie, żeby $\mathcal{E}$ – skończone (włączamy i wyłączamy żarówkę...)

Widmo światła

Rozkład pola elektrycznego na fale płaskie:

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\omega) \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t} \mathrm{d}\omega$$

Amplitudy spektralne:

$$\tilde{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \mathrm{d}t$$

Skorzystamy z twierdzenia Parsevala:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2 \mathrm{d}t = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}(\omega)|^2 \mathrm{d}\omega$$

I policzymy energię (na jednostkę powierzchni):

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} c\epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2 \mathrm{d}t = \frac{1}{4\pi} c\epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}(\omega)|^2 \mathrm{d}\omega \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(\omega) \mathrm{d}\omega$$

Widmo światła

Energia:

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)\mathrm{d}t$$

Natężenie światła:

$$I(t) = \frac{1}{2} c\epsilon_0 |E(t)|^2$$

lub

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(\omega)\mathrm{d}\omega$$

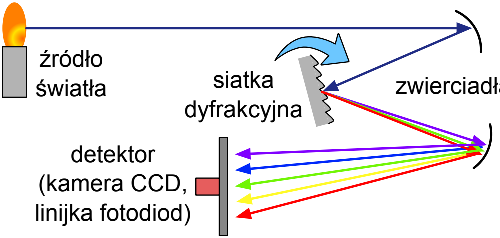
Widmo światła (natężenie spektralne):

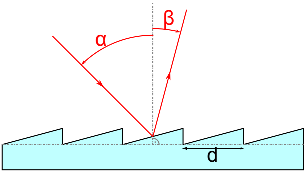
$$\tilde{I}(\omega) = \frac{1}{4\pi} c\epsilon_0 |\tilde{E}(\omega)|^2$$

Widmo = ile energii przypada na przedział częstości $\mathrm{d}\omega$ w okolicy częstości ω

Pomiar widma światła

Spektrometr siatkowy





[Wikimedia Commons]

Interferencja konstruktywna:

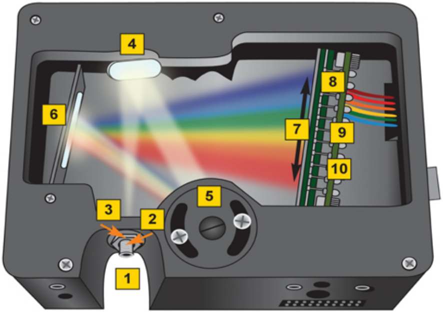
$$d(\sin\alpha - \sin\beta) = m\lambda$$

m - rząd interferencji

Pomiar widma światła

Spektrometr siatkowy

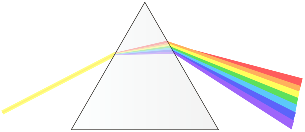
Praktyczna realizacja miniaturowego spektrometru (Ocean Optics)

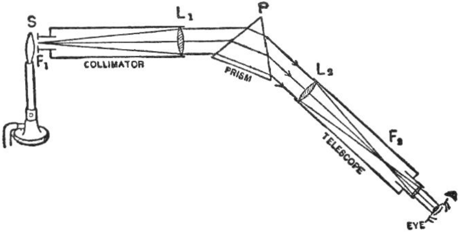


[Ocean Optics]

Pomiar widma światła

Spektrometr pryzmatyczny





[Wikimedia Commons]

Współczynnik załamania pryzmatu zależy od długości fali

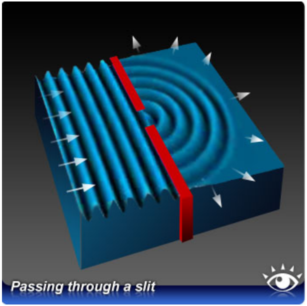
$$n = n(\lambda)$$

Dlaczego? O tym na kolejnych wykładach

[http://vuihocly.freevnn.com]

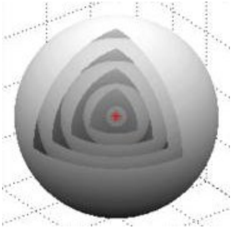
Fale płaskie a sferyczne

Fale ze źródła punktowego:



[media.learn.udi.edu]

W trzech wymiarach:



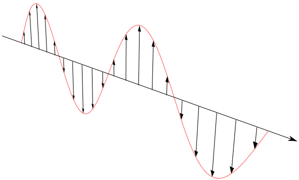
[ipodphysics.com]

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{\vec{E}_0}{r} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(kr \pm \omega t)}$$

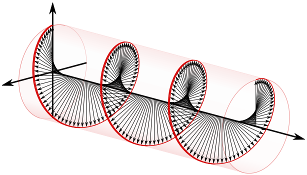
$$I(\vec{r}) \sim \frac{1}{r^2}$$

Polaryzacja światła

polaryzacja liniowa



polaryzacja kołowa

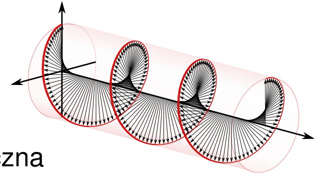


Dowolny stan polaryzacji światła może być uzyskany jako kombinacja liniowa (z odpowiednimi amplitudami i fazami):

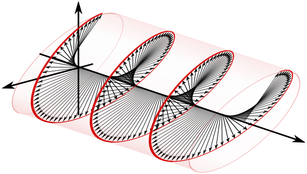
- Dwóch prostopadłych polaryzacji liniowych
- Dwóch przeciwnych polaryzacji kołowych

Polaryzacja światła

- polaryzacja kołowa



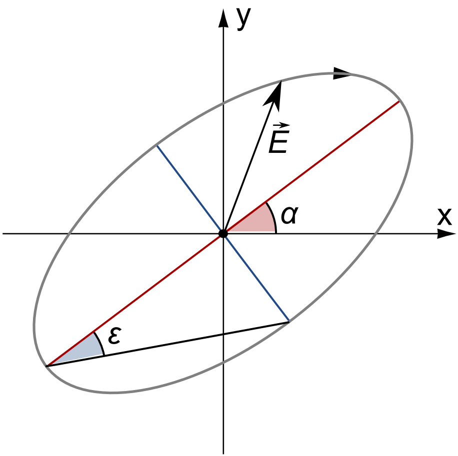
- polaryzacja eliptyczna



Kierunek wektora $\vec{E}$ nie zależy od położenia w kierunku poprzecznym do kierunku propagacji

Polaryzacja eliptyczna

Opis polaryzacji eliptycznej



Prawo promieniowania ciała doskonale czarnego

Gestość energii promieniowana będącego w równowadze termicznej z otoczeniem:

- Klasycznie (prawo Rayleigha-Jeansa):

$$\rho(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \mathrm{d}\nu$$

(Działa w podczerwieni, ale "katastrofa w nadfiolecie")

- Kwantowo (prawo Plancka)

$$\rho(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\mathrm{e}^{h\nu/kT} - 1} \mathrm{d}\nu$$

To są wyrażenia na **Gęstość energii** w przedziale częstości $\mathrm{d}\nu$, nie na natężenie światła, czy moc wypromieniowaną

Prawo Stefana-Boltzmanna

Gęstość energii w całym zakresie częstości (u):

$$u = \int_0^\infty \rho(\nu)\mathrm{d}\nu$$

Gęstość energii $\rightarrow$ zdolność emisyjna ($\rho(\nu) \cdot \frac{c}{4}$) $\rightarrow$ całkowanie $\rightarrow$ moc promieniowania ciała doskonale czarnego na jednostkę powierzchni **(prawo Stefana-Boltzmanna)**

$$P = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}$$

(*Wyprowadzenie na ćwiczeniach*)

Prawo Wiena

Długość fali, przy której gęstość energii osiąga maksimum w temp. T **(prawo Wiena)**:

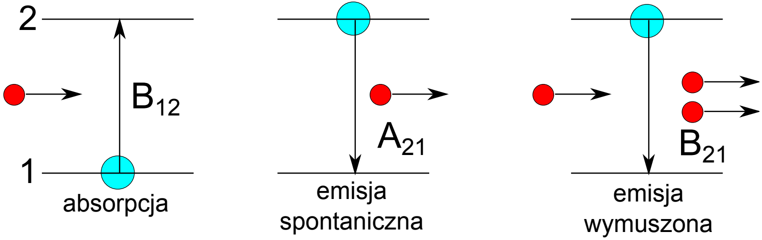
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

$$b \approx 2.9 \cdot 10^{-3} \mathrm{mK}$$

Dla Słońca $T \approx 5800$ K $\rightarrow \lambda_{max} \approx 500$ nm (zielony)

(*Wyprowadzenie na ćwiczeniach*)

Absorpcja i emisja światła



- Liczba aktów absorpcji w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N_{12} = B_{12}\rho(\nu)N_1\mathrm{d}t$$

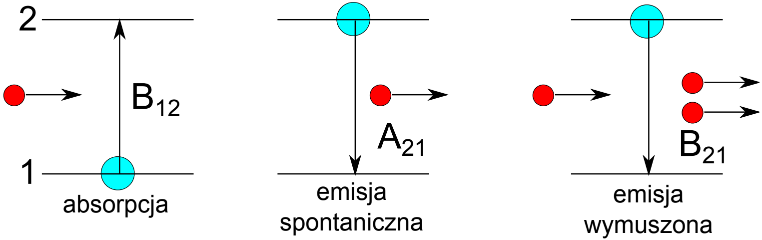
- Liczba aktów emisji spontanicznej w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N'_{21} = A_{21}N_2\mathrm{d}t$$

- Liczba aktów emisji wymuszonej w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N''_{21} = B_{21}\rho(\nu)N_2\mathrm{d}t$$

Absorpcja i emisja światła



Relacje między współczynnikami Einsteina:

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

(Wyprowadzenie - na ćwiczeniach)