

Lista tematów na kolokwium z wykładu

Lasery i ich wybrane zastosowania w fizyce, rok 2024

Podczas kolokwium należy opracować trzy zagadnienia wybrane z czterech podanych w otrzymanym zestawie. Każde zagadnienie będzie pochodziło z innego tematu.

Temat 1. Właściwości promieniowania laserowego

1. Wyjaśnić związek pomiędzy rozbieżnością kątową wiązki światła laserowego a rozmiarem otworu wynikający z teorii dyfrakcji Fraunhoffera.
2. Czym jest spójność światła i jak można ją opisać w sposób ilościowy (wyprowadzenia nie wymagane)?
3. Jak można powiązać drogę spójności światła z szerokością linii widmowej?

Temat 2. Klasyfikacja laserów

4. Rozważyć dwa lasery o pracy ciągłej, emitujące światło o długości fali 632 nm, o różnych mocach 1 mW oraz 15 mW. Czy klasy tych dwóch urządzeń oraz zagrożenia stwarzane dla użytkownika różnią się według polskiej normy PN-EN 60825-1:2010?
5. Podać warunek stabilności rezonatora złożonego z dwóch zwierciadeł płaskich lub sferycznych i naszkicować odpowiadający temu warunkowi diagram stabilności rezonatora. Zaznaczyć na diagramie punkt odpowiadający rezonatorowi konfokalnemu.

Temat 3. Fizyczne podstawy działania laserów

6. Jakie procesy promieniste przewiduje model Einsteina dla układu o dwóch poziomach energetycznych? Jakim równaniem opisana jest szybkość zmian obsadzenia poziomów (bez dalszych przekształceń)?
7. W jaki sposób można opisać prawdopodobieństwo absorpcji promieniowania o rozkładzie $\rho^\circ(\nu)$ z uwzględnieniem skończonej szerokości linii absorpcyjnej? Rozważyć przypadek ogólny oraz przypadek bardzo wąskiego rozkładu promieniowania w porównaniu do szerokości linii absorpcyjnej.
8. Z czego wynika naturalna szerokość linii spektralnej dla promieniowania emitowanego przez izolowane od otoczenia cząsteczki? Jakie mechanizmy są przyczyną poszerzenia linii spektralnych gazów złożonego z wielu molekuł?
9. Przedstawić diagram przejść dla ośrodka czynnego o wybranej liczbie poziomów energetycznych i wyjaśnić jakie warunki muszą być zapewnione aby otrzymać inwersję obsadzeń.
10. Natężenie światła I rozchodzącego się w ośrodku czynnym wzdłuż osi z jest opisane równaniem różniczkowym $dI/dz = \gamma(\nu) I$. Jakie są rozwiązania tego równania w przypadkach szczególnych: 1) dla małego natężenia światła, przy którym współczynnik wzmocnienia dla danej częstotliwości światła $\gamma(\nu) = \text{const.}$, oraz 2) dla dużego natężenia światła $I \gg I_s$, przy którym współczynnik wzmocnienia $\gamma(\nu) = \gamma_0(\nu)[1 + I/I_s]$, gdzie γ_0 oraz I_s są stałymi materiałowymi.
11. Zdefiniować pojęcia *dobroć rezonatora* oraz *czas życia fotonów τ_c we wnętrzu pasywnej rezonatora*. Jak te dwie wielkości są ze sobą powiązane (wyprowadzenia wzorów nie wymagane)?
12. Wyjaśnić czym są mody podłużne rezonatora. W jakich warunkach możliwa jest jednoczesna generacja wielu modów w laserze?
13. Wyjaśnić czym są mody poprzeczne rezonatora i jakie symbole stosuje się do ich opisu.
14. Rozważyć rezonator liniowy o długości L składający się z dwóch zwierciadeł o natężeniowych współczynnikach transmisji R_1 i R_2 , pomiędzy którymi znajduje się ośrodek czynny o współczynniku wzmocnienia γ i współczynniku strat χ . Jaki warunek progowy muszą spełniać wymienione wielkości aby możliwe było utrzymanie akcji laserowej?

Temat 4. Zasada działania i budowa wybranych laserów gazowych

15. Naszkicować i omówić krótko budowę rury lasera He-Ne zamkniętej płytkami Brewsterowskimi.
16. Przedstawić w sposób graficzny i/lub symboliczny sekwencję przejść pomiędzy poziomami energetycznymi prowadzącą w laserze He-Ne do emisji światła o co najmniej jednej wybranej długości fali.
17. Przedstawić w sposób graficzny i/lub symboliczny sekwencję przejść pomiędzy poziomami energetycznymi prowadzącą w laserze CO₂-N₂ do emisji światła o co najmniej jednej wybranej długości fali.

Temat 5. Płaska monochromatyczna fala świetlna

18. Zapisać równania Maxwella razem z tzw. *równaniami materiałowymi* i opisać użyte symbole. Jakie uproszczenia można przyjąć w przypadku pól o częstotliwościach optycznych w dielektryku?
19. Rozwiązanie układu równań Maxwella dla płaskiej fali świetlnej $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \exp[i\omega(t - n \mathbf{s} \cdot \mathbf{r}/c)]$ rozchodzącej się w kierunku jednostkowego wektora \mathbf{s} w jednorodnym anizotropowym dielektryku opisanym tensorem przenikalności $\boldsymbol{\varepsilon}$ prowadzi do następującego równania:

$$n^2 (\varepsilon_{0x} s_x + \varepsilon_{0y} s_y + \varepsilon_{0z} s_z) \mathbf{s} - n^2 \boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{\varepsilon}_0 = 0.$$

Zapisać powyższe równanie w postaci macierzowej, a następnie zaproponować transformację równania do takiego układu współrzędnych, w którym szczególnie łatwo widać, że jest to równanie o dwóch rozwiązaniach względem kwadratu współczynnika załamania światła n^2 .

20. Wyjaśnić czym jest *azyмут fali* oraz *kąt przekątnej* fali o dowolnej polaryzacji eliptycznej. W jakiej szczególnej sytuacji te dwie wielkości stają się równe, a w jakiej równe co do modułu lecz o przeciwnych znakach? W jakiej relacji pozostają kąty przekątnych fali szybszej i fali wolniejszej w ośrodku anizotropowym opisanym hermitowskim tensorem nieprzenikalności elektrycznej?
21. Wyjaśnić pojęcie *skrętność fali* w przypadku gdy fala biegnie wzdłuż $+z$ do obserwatora. Powiązać skrętność fali z różnicą faz $\delta = \delta_x - \delta_y$ pomiędzy składowymi wektora natężenia pola elektrycznego tej fali $\mathcal{E}_x = |\varepsilon_{0x}| \exp[i(\omega t - nz/c - \delta_x)]$ oraz $\mathcal{E}_y = |\varepsilon_{0y}| \exp[i(\omega t - nz/c - \delta_y)]$.

Temat 6. Tensorowy opis właściwości optycznych jednorodnych ośrodków anizotropowych

22. Wyjaśnić jaką szczególną postać przyjmują tensory nieprzenikalności oraz przenikalności elektrycznej dla częstotliwości optycznych w ośrodkach nieabsorbujących, w przypadkach: 1) dowolnej polaryzacji eliptycznej fal rozchodzących się w ośrodku, 2) dla ośrodka liniowo dwójłomnego, 3) dla ośrodka kołowo dwójłomnego.
23. Przedstawić dwa spotykane w literaturze podejścia do ilościowego opisu kwadratowego efektu elektrooptycznego (efektu Kerra). Wyprowadzenie związku pomiędzy stałymi wykorzystywanymi w tych dwóch podejściach nie jest wymagane.
24. Ośrodek o symetrii $\infty\infty m$ przy braku zewnętrznych oddziaływań jest ośrodkiem izotropowym. Zapisać składowe tensora nieprzenikalności elektrycznej B_{ij} opisującej ten ośrodek w polu elektrycznym $\mathbf{E} = [0, E, 0]$, wiedząc, że: współczynnik załamania światła przy braku zewnętrznego pola wynosi n_0 , liniowy efekt elektrooptyczny nie jest możliwy ze względu na symetrię ośrodka, a składowe tensora kwadratowego efektu elektrooptycznego zapisane przy wykorzystaniu skróconej formy indeksów są następujące:

$$[g_{ij}] = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{12} & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{11} & g_{12} & 0 & 0 & 0 \\ g_{12} & g_{12} & g_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \times \end{bmatrix}, \quad \text{gdzie } \times = 2(g_{11} - g_{12}).$$

25. Wyjaśnić w jaki sposób można zbudować tensor nieprzenikalności elektrycznej uwzględniający zjawiska naturalnej oraz indukowanej polem elektrycznym aktywności optycznej dla wiązki światła rozchodzącej się w kierunku danym przez wektor jednostkowy \mathbf{s} ?

Temat 7. Transformacja stanu polaryzacji światła przez płytki płasko-równoległe

26. Wyjaśnić w jaki sposób można obliczyć *natężenie światła* wyrażone w jednostkach $[m^2/V^2]$ oraz *gęstość strumienia energii* przenoszanej przez falę świetlną $[W/m^2]$ na podstawie znanych składowych wektora Jonesa $\boldsymbol{\mathcal{E}} = [\mathcal{E}_x, \mathcal{E}_y]$.
27. Wykorzystując rachunek Jonesa wykazać, że:
- plytkę ćwierćfalową można użyć do zamiany polaryzacji liniowej światła na polaryzację kołową,
 - plytkę ćwierćfalową można użyć do zamiany polaryzacji kołowej światła na polaryzację liniową,
 - plytkę półfalową można użyć do zamiany światła o polaryzacji kołowej prawoskrętnej na lewoskrętną,
 - plytkę półfalową można użyć do obrotu płaszczyzny światła spolaryzowanego liniowo.

Pytanie na kolokwium będzie zawierało tylko jeden z powyższych wariantów.

Wskazówka: ogólna postać macierzy Jonesa

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} T_f \cos^2 \beta_f + T_s \sin^2 \beta_f e^{-i\Gamma} & \sin \beta_f \cos \beta_f (T_f - T_s e^{-i\Gamma}) e^{-i\delta} \\ \sin \beta_f \cos \beta_f (T_f - T_s e^{-i\Gamma}) e^{i\delta} & T_f \sin^2 \beta_f + T_s \cos^2 \beta_f e^{-i\Gamma} \end{bmatrix},$$

gdzie:

- T_f i T_s – amplitudowe współczynniki transmisji fali szybszej (f) i wolniejszej (s),
- β_f – kąt przekątnej fali szybszej,
- δ – różnica fazy składowej x względem składowej y dla fali szybszej,
- Γ – różnica faz powstająca w płycie pomiędzy falą wolniejszą i szybszą.

Temat 8. Zastosowanie światła laserowego do pomiarów wybranych właściwości optycznych monokryształów i cieczy

28. Podać przykład konfiguracji układu odpowiedniego do pomiarów efektów elektrooptycznych. Zapisać rachunek Jonesa prowadzący do znalezienia wektora Jonesa opisującego światło przechodzące przez wybrany układ – bez wyznaczania macierzy i obliczeń natężenia światła.

Wskazówka: jak w pytaniu 27.

29. Zaproponować taką kombinację kierunku przyłożonego pola elektrycznego \mathbf{E} i kierunku światła s zapisaną w układzie osi krystalograficznych XYZ w kryształach o symetrii $\bar{4}2m$, dla których różnica faz Γ powstająca pomiędzy falą wolniejszą i szybszą w kryształach jest proporcjonalna do kwadratu przyłożonego pola elektrycznego E^2 i następującej kombinacji współczynników kwadratowego efektu elektrooptycznego:

- a) $n_o^3(q_{11} - q_{12})$,
- b) $n_o^3 q_{13} - n_e^3 q_{33}$,
- c) $n_o^3 q_{66}$,
- d) $n_o^3 q_{12} - n_e^3 q_{31} - \frac{n_o^3 + n_e^3}{n_o^3 - n_e^3} n_o^2 n_e^2 r_{41}$.

Pytanie na kolokwium będzie zawierało tylko jeden z powyższych wariantów.

Zapisać tensor nieprzenikalności elektrycznej $[B_{ij}]$ kryształu przy włączonym polu elektrycznym w układzie osi krystalograficznych XYZ oraz w układzie xyz stosowanym w rachunku Jonesa, w którym $s \parallel z$. Tensor naturalnej dwójłomności liniowej $[B_{ij}(E=0)]$ oraz tensory liniowego $[r_{ij}]$ i kwadratowego $[q_{ij}]$ efektu elektrooptycznego zapisane w układzie XYZ kryształu o symetrii $\bar{4}2m$ mają następującą postać:

$B_{ij}(E=0)$	r_{ij}	q_{ij}
$\begin{bmatrix} n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_e^2 \end{bmatrix},$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{bmatrix},$	$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{11} & q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ q_{31} & q_{31} & q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66} \end{bmatrix}.$

Wskazówka: różnica faz pomiędzy falą wolniejszą i szybszą powstająca na drodze L

$$\Gamma = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_s - n_f)$$

gdzie współczynniki załamania fali szybszej (n_f) i fali wolniejszej (n_s):

$$n_f = \sqrt{\frac{2}{B_{xx} + B_{yy} + \sqrt{(B_{xx} - B_{yy})^2 + 4B_{xy}B_{yx}}}}, \quad n_s = \sqrt{\frac{2}{B_{xx} + B_{yy} - \sqrt{(B_{xx} - B_{yy})^2 + 4B_{xy}B_{yx}}}}.$$

30. Wykorzystując rachunek Jonesa wykazać, że fala spolaryzowana liniowo w płaszczyźnie o dowolnym azymucie α , doznaje obrotu płaszczyzny polaryzacji o kąt $\Gamma/2$ przy zachowaniu polaryzacji liniowej podczas przejścia przez niedichroiczny lewoskrętny ośrodek kołowy ($T_f = T_s = T$, $\beta_f = 45^\circ$, $\delta_f = -90^\circ$) o różnicy faz Γ pomiędzy falą wolniejszą i falą szybszą.

Wskazówka: jak w pytaniu 27.