

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

С.С. Коваль, М.В. Ушкац

ХВИЛЬОВА ОПТИКА

*Збірник задач для індивідуальної роботи
з курсу фізики*

Під редакцією О.О. Мочалова

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2005

УДК 535(076.1)

Коваль С.С., Ушкац М.В. Хвильова оптика: Збірник задач для індивідуальної роботи з курсу фізики / Під ред. *О.О. Мочалова*. – Миколаїв: НУК, 2005. – 36 с.

Кафедра фізики

У збірнику наведені задачі з хвильової оптики для індивідуальної роботи протягом вивчення загального курсу фізики.

Збірник призначений для студентів усіх факультетів.

У підборі задач брали участь викладачі кафедри фізики: В.М. Шенкевич (розділ "Інтерференція світла"), М.В. Ушкац (розділ "Дифракція світла"), В.В. Кондратенко, С.С. Коваль (розділ "Поляризація світла").

Рецензент канд. фіз.-мат. наук А.М. Кузнецов

© Видавництво НУК, 2005

1. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА

Інтерференцією світла називається явище стійкого в часі перерозподілу світлового потоку в просторі, внаслідок чого в одних місцях виникають максимуми, а в інших – мінімуми інтенсивності, яке утворюється при накладанні когерентних світлових хвиль.

Умова інтерференційного максимуму:

$$\Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де k – порядок інтерференційного максимуму; λ – довжина хвилі світла.

Умова інтерференційного мінімуму:

$$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де k – порядок інтерференційного мінімуму.

Відстань між інтерференційними смугами на екрані, який розташовано паралельно двом когерентним джерелам світла (ширина інтерференційної смуги),

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda,$$

де l – відстань від екрану до джерел світла, які знаходяться на відстані d один від одного.

Результат інтерференції світла в плоскопаралельних пластинках (у відбитому світлі) визначається формулами:

$$\text{підсилення світла: } 2 h n_2 \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = 2 k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

$$\text{ослаблення світла: } 2 h n_2 \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = (2 k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де h – товщина пластинки; n_2 – абсолютний показник заломлення матеріалу пластинки; β – кут заломлення променя.

Задача 1. Перед одним із дзеркал інтерферометра Майкельсона поставили скляну пластинку, в результаті чого інтерференційна картина змістилась на 100 смуг. Знайти товщину пластинки, якщо показник заломлення скла $n = 1,5$, а довжина хвилі світла в досліді 0,5 мкм.

Розв'язок

Те, що картина змістилась на $N = 100$ смуг, означає, що в місці екрана, де знаходилась деяка k -та світла (або темна) інтерференційна смуга, після внесення пластинки знаходиться вже $(k + N)$ -а смуга. Оптична різниця ходу променів у точці, де знаходиться k -та світла смуга (k -й інтерференційний максимум),

$$\Delta_1 = k\lambda.$$

Після внесення пластинки оптична різниця ходу тих же променів стала іншою:

$$\Delta_2 = (k + N)\lambda.$$

Отже, процес внесення пластинки змінив різницю ходу променів на величину

$$\Delta = N\lambda.$$

Розглянемо, як саме це відбувалось (рис. 1).

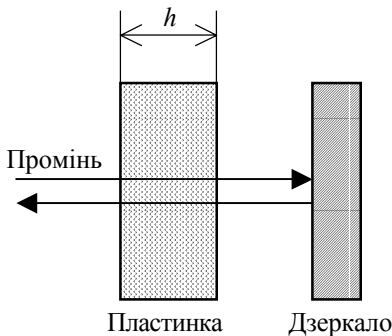


Рис. 1

По-перше, пластинка змінила шлях тільки одного з променів (того, що відбивається від дзеркала, перед яким поставили пластинку).

По-друге, пластинка змінює тільки оптичний шлях цього променя і не змінює його геометричний шлях. Причому змінюється оптичний шлях променя тільки в шарі повітря товщиною h , де розмістили пластинку. У цьому шарі оптичний шлях до внесення пластинки складав $L_1 = 2hn_1$

(промінь два рази проходить шар h повітря з показником заломлення повітря n_1), а після внесення $L_2 = 2hn_2$ (n_2 – показник заломлення скла).

Отже, оптична різниця ходу в інтерферометрі змінюється завдяки зміні оптичного шляху одного з променів:

$$\Delta = N\lambda = L_2 - L_1 \quad \text{або} \quad N\lambda = 2h(n_2 - n_1).$$

Звідки, враховуючи, що показник заломлення повітря $n_1 = 1$, а скла – $n_2 = n$ за умовою задачі, отримуємо

$$h = \frac{N\lambda}{2(n-1)} = \frac{100 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{2 \cdot (1,5 - 1)} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Задача 2. На об'єктив оптичного приладу наносять тонку плівку із прозорої речовини з показником заломлення 1,5. Яка повинна бути найменша товщина плівки, щоб при нормальному падінні променів на об'єктив світло з довжиною хвилі 600 нм відбивалося якомога слабше? Світло якої довжини хвилі видимого спектра буде мінімально відбиватися від цієї плівки під кутом 30° ?

Розв'язок

Умова мінімального відбивання світла довжиною хвилі λ від прозорого шару товщиною h з показником заломлення n при куті падіння α (рис. 2)

$$2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = k\lambda,$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$

При нормальному падінні світла ($\alpha_1 = 0$) довжиною хвилі λ_1 маємо умову

$$2hn = k\lambda_1.$$

Звідки

$$h = \frac{k\lambda_1}{2n}.$$

Мінімальна товщина буде при $k = 1$. Отже, у результаті маємо

$$h_{\min} = \frac{\lambda_1}{2n} = \frac{6 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{2 \cdot 1,5} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 20 \text{ нм}.$$

У другому випадку (кут падіння $\alpha_2 = 30^\circ$) мінімально буде відбиватися від прозорої плівки (товщина $h_{\min}$) хвиля з довжиною λ_2 , якщо

$$2h_{\min}\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_2} = k\lambda_2.$$

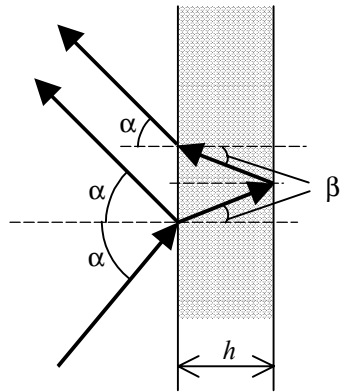


Рис. 2

Звідки

$$\lambda_2 = \frac{2h_{\min} \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_2}}{k},$$

або

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{k} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha_2}{n} \right)^2}.$$

При $k = 1$ маємо

$$\lambda_2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin 30^\circ}{1,5} \right)^2} = 5,657 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

При $k = 2, 3, \dots$ довжина хвилі, відповідно, вдвічі, втричі і т. д. зменшується і виходить за межі видимого спектру.

Задача 3. У приладі для спостереження кілець Ньютона простір між плоско-опуклою лінзою і пластинкою заповнили рідиною. Радіус третього темного кільця у відбитому світлі довжиною хвилі $5000 \text{ \AA}$ складає 1 мм . Знайдіть показник заломлення рідини, якщо радіус кривизни лінзи 1 м . Яке темне кільце було на місці третього до заповнення?

Розв'язок

Радіус k -го темного кільця Ньютона у світлі, відбитому від приладу з плоско-опуклою лінзою радіуса кривизни R (рис. 3),

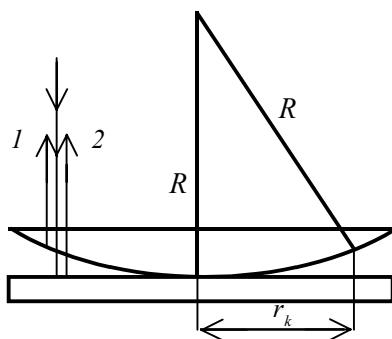


Рис. 3

$$r_k = \sqrt{\frac{R}{n} k \lambda},$$

де λ – довжина хвилі світла; n – показник заломлення речовини між лінзою і пластинкою; $k = 1, 2, 3, \dots$

Звідки

$$n = \frac{Rk\lambda}{r_k^2} = \frac{1 \text{ м} \cdot 3 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{(10^{-3} \text{ м})^2} = 1,5.$$

До заповнення рідиною показник заломлення речовини між лінзою та пластинкою був інший – n' (для повітря $n' = 1$)

і такий самий радіус був у іншого k' -го темного кільця –

$$\sqrt{\frac{R}{n'}} k' \lambda = \sqrt{\frac{R}{n}} k \lambda,$$

або

$$k' = \frac{n'}{n} k = \frac{1}{1,5} \cdot 3 = 2.$$

Отже, на місці третього темного кільця було друге.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

1. Плоско-опукла лінза радіусом кривизни 4 м опуклою стороною лежить на скляній пластинці. Визначити довжину хвилі світла, що падає на неї, якщо радіус п'ятого світлого кільця у відбитому світлі дорівнює 3 мм.

2. Промінь світла переходить зі скипидару в повітря. Граничний кут повного відбивання для цього променя $42^\circ 23'$. Чому дорівнює швидкість поширення світла у скипидарі?

3. Знайти зміщення променя при його проходженні крізь плоскопаралельну скляну пластинку завтовшки 3 см, якщо кут заломлення променя 40° . Показник заломлення скла пластинки $n = 1,51$.

4. Зміщення променя при його проходженні крізь плоскопаралельну скляну пластинку дорівнює 1,94 см, кут падіння променя 30° . Показник заломлення скла пластинки $n = 1,5$. Визначити товщину пластинки.

5. Водолаз перебуває на дні озера на глибині 15 м. На якій відстані від водолаза знаходяться ті частини дна, які він може бачити завдяки відбиванню променів світла від границі вода–повітря?

6. Знайти довжину відрізка l_1 , на якому укладається стільки довжин хвиль монохроматичного світла у вакуумі, скільки його міститься на відрізку $l_2 = 5$ мм у склі. Показник заломлення скла $n_2 = 1,5$.

7. У досліді Юнга відстань між щілинами $d = 1$ мм, а відстань від щілин до екрана $l = 3$ м. Знайти положення першої світлої смуги. Щілини освітлюються монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,5$ мкм.

8. У досліді Юнга відстань між щілинами $d = 2$ мм, а відстань від щілин до екрана $l = 2$ м. Визначити результат інтерференції в точці, яка лежить на перпендикулярі, опущеному з першої щілини. Щілини освітлюються монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 0,5$ мкм.

9. Відстань між щілинами у досліді Юнга $d = 0,5$ мм, $\lambda = 0,6$ мкм. Знайти відстань L від щілин до екрана, якщо ширина Δx інтерференційних смуг дорівнює 1,2 мм.

10. Якщо у досліді Юнга на шляху одного з інтерферуючих променів помістити перпендикулярно до цього променя тонку скляну пластинку ($n = 1,5$), то центральна світла смуга зміститься у положення, яке спочатку займала п'ята світла смуга. Довжина хвилі $\lambda = 0,5$ мкм. Знайти товщину пластинки.

11. На шляху променя, який розповсюджується у повітрі, поставили скляну пластинку завтовшки $h = 1$ мм. На скільки зміниться оптичний шлях променя, якщо промінь буде падати на пластинку нормально?

12. На шляху променя, який розповсюджується у повітрі, поставили скляну пластинку завтовшки $h = 4$ мм. На скільки зміниться оптичний шлях променя, якщо він буде падати на пластинку під кутом 30° ?

13. Різниця ходу двох інтерферуючих променів монохроматичного світла $\Delta = 0,3 \lambda$. Знайти різницю фаз коливань.

14. Пучок паралельних променів ($\lambda = 0,6$ мкм) падає під деяким кутом на мильну плівку. При якій найменшій товщині плівки відбиті промені будуть максимально послаблені внаслідок інтерференції. Кут заломлення дорівнює 30° . Показник заломлення плівки $n = 1,3$.

15. Пучок паралельних променів ($\lambda = 0,6$ мкм) падає під деяким кутом на мильну плівку. При якій найменшій товщині плівки відбиті промені найбільш підсилені внаслідок інтерференції. Кут падіння дорівнює 60° . Показник заломлення плівки $n = 1,3$.

16. Плоско-опукла лінза опуклою стороною лежить на склі. Знайти товщину шару повітря там, де у відбитому світлі ($\lambda = 0,536$ мкм) видно друге світле кільце Ньютона.

17. Плоско-опукла лінза опуклою стороною лежить на склі. Знайти товщину шару повітря там, де у відбитому світлі ($\lambda = 0,456$ мкм) видно четверте темне кільце Ньютона.

18. Знайти зміщення променя при його проходженні крізь плоско-паралельну скляну пластинку завтовшки 3 см, якщо кут падіння променя 60° . Показник заломлення скла пластинки $n = 1,51$.

19. Діаметр другого світлого кільця Ньютона під час спостереження у відбитому світлі ($\lambda = 0,6$ мкм) $d_2 = 1,2$ мм. Знайти оптичну силу плоско-опуклої лінзи.

20. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм, яке падає по нормалі до поверхні скла. Простір між лінзою та скляною пластинкою

заповнено рідиною. Знайти показник заломлення рідини, якщо товщина h шару рідини між лінзою та пластинкою у тому місці, де спостерігається третє світле кільце у відбитому світлі, дорівнює 470 нм.

21. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм, яке падає по нормалі до поверхні скла. Простір між лінзою та скляною пластинкою заповнено водою ($n = 1,48$). Знайти товщину h шару води між лінзою та пластинкою у тому місці, де спостерігається третє світле кільце.

22. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм, яке падає по нормалі до поверхні скла. Простір між лінзою та скляною пластинкою заповнено рідиною. Спостереження проводиться у світлі, що проходить. Радіус кривизни лінзи 10 м. Довжина хвилі світла 589 нм. Знайти показник заломлення рідини.

23. Діаметри двох світлих кілець Ньютона $d_i = 4,0$ мм, $d_k = 4,8$ мм. Порядкові номери кілець не визначались, але відомо, що між двома вимірними кільцями розташовано три темних кільця. Кільця спостерігались у відбитому світлі ($\lambda = 500$ нм). Знайти радіус кривизни плоскоопуклої лінзи.

24. Установка для спостереження кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом, що падає нормально. При заповненні простору між лінзою та скляною пластинкою прозорою рідиною радіуси темних кілець у відбитому світлі зменшились у 1,21 раза. Знайти показник заломлення рідини.

25. Довжина хвилі зелених променів світла в повітрі 500 нм. Яка довжина хвилі цих променів у сірководні?

26. Довжина хвилі червоних променів світла в повітрі 700 нм. На скільки зміниться довжина хвилі цих променів у воді?

27. Яка товщина мильної плівки, якщо при її спостереженні у відбитому світлі вона здається зеленою ($\lambda = 0,5$ мкм) тоді, коли кут між нормаллю і напрямком зору складає 35° ? Показник заломлення плівки $n = 1,33$.

28. Яка товщина мильної плівки, якщо вона при спостереженні у світлі, що проходить, здається зеленою (500 нм) тоді, коли кут між нормаллю і напрямком зору складає 47° ? Показник заломлення плівки $n = 1,42$.

29. Яка товщина скляної пластинки, якщо при її спостереженні у відбитому світлі вона здається жовтою ($\lambda = 0,6$ мкм)? Світло падає на пластинку нормально. Показник заломлення скла $n = 1,5$.

30. У досліді Юнга отвори освітлювались монохроматичним світ-

лом, довжина хвилі якого $\lambda = 600$ нм. Відстань між отворами 1 мм, відстань від отворів до екрана 3 м. Визначити положення третьої та сьомої перших світлих смуг.

31. На мильну плівку ($n = 1,33$) падає біле світло під кутом 45° . При якій найменшій товщині плівки відбиті промені будуть мати жовтий колір ($\lambda = 600$ нм)?

32. На поверхню скляного об'єктива ($n_1 = 1,5$) нанесено тонку плівку, показник заломлення якої $n_2 = 1,2$. При якій найменшій товщині цієї плівки відбите світло, що належить середній частині видимого спектра, буде максимально ослаблене.

33. На скляний клин падає нормально пучок світла ($\lambda = 543$ нм). Визначити кут між поверхнями клина, якщо відстань між сусідніми інтерференційними мінімумами у відбитому світлі дорівнює 42 мм. Показник заломлення скла 1,47.

34. На скляний клин падає нормально пучок світла ($\lambda = 582$ нм). Кут клина дорівнює $20''$. Яке число темних інтерференційних смуг припадає на одиницю довжини клина? Показник заломлення скла дорівнює 1,5.

35. Між двома плоскопаралельними скляними пластинками розміщена дуже тонка мідна дротина на відстані 75 мм від лінії дотику пластинок і паралельна їй. У відбитому світлі ($\lambda = 567$ нм) на верхній пластинці помітні інтерференційні смуги. На відстані 30 мм нараховується 16 світлих смуг. Визначити масу дротини, якщо її довжина 10 см.

36. Монохроматичне світло падає нормально на бокову поверхню призми і виходить з неї відхиленням на 25° . Показник заломлення матеріалу призми для цього променя складає 1,7. Визначити заломний кут призми.

37. Біле світло падає на бічну поверхню рівнобічної призми так, що червоний промінь виходить з неї перпендикулярно до другої грані. Знайти відхилення червоного і фіолетового променів від початкового напрямку, якщо заломний кут призми дорівнює 45° . Показник заломлення матеріалу призми для червоного і фіолетового променів відповідно дорівнює 1,37 і 1,42.

38. Знайти відстань між третім і шістнадцятим темними кільцями Ньютона, якщо відстань між другим і двадцятим дорівнює 4,8 мм. Спостереження проводиться у відбитому світлі.

39. У досліді з інтерферометром Майкельсона для зсуву інтерференційної картини на 500 смуг необхідно перемістити дзеркало на відстань 0,161 мм. Знайти довжину хвилі світла, що падає.

40. У досліді Юнга скляна пластинка товщиною 2 см розміщена на

шляху одного з інтерферуючих променів перпендикулярно до променя. На скільки можуть відрізнятися один від одного значення показника заломлення в різних місцях пластинки, щоб зміна різниці ходу від цієї неоднорідності не перевищувала 1 мкм?

41. Установка для одержання кілець Ньютона освітлюється монохроматичним світлом. Спостереження ведеться у відбитому світлі. Радіуси двох сусідніх темних кілець дорівнюють відповідно 4,0 мм і 4,38 мм. Радіус кривизни лінзи складає 6,4 м. Знайти порядкові номери кілець і довжину хвилі світла, що падає.

42. Кільця Ньютона утворюються між плоским склом і лінзою з радіусом кривизни 8,6 м. Монохроматичне світло падає нормально. Вимірами встановлено, що діаметр четвертого темного кільця (вважаючи центральну темну пляму за нульове) дорівнює 9 мм. Знайти довжину хвилі світла, що падає.

43. Плоска монохроматична світлова хвиля падає нормально на діафрагму з двома вузькими щілинами, що розміщені одна від одної на відстані $d = 2,5$ мм. На екрані, розташованому за діафрагмою на відстані $l = 100$ см, утвориться система інтерференційних смуг. На яку відстань і в яку сторону змістяться ці смуги, якщо одну з щілин перекрити скляною пластинкою товщиною $h = 10$ мкм?

44. Знайти мінімальну товщину плівки з показником заломлення $n = 1,33$, при якій світло з довжиною хвилі 0,64 мкм відбивається максимально, а світло з довжиною хвилі 0,40 мкм не відбивається зовсім. Кут падіння променів світла дорівнює 30° .

45. У скільки разів збільшиться відстань між сусідніми інтерференційними смугами на екрані в досліді Юнга, якщо зелений світлофільтр ($\lambda_1 = 500$ нм) замінити червоним ($\lambda_1 = 650$ нм)?

46. У досліді з дзеркалами Френеля відстань між уявними зображеннями джерела світла дорівнює 0,5 мм, відстань до екрана 5 м. У зеленому світлі інтерференційні смуги розміщуються на відстані 5 мм одна від одної. Знайти довжину хвилі зеленого світла.

47. Мильна плівка, розташована вертикально, утворює клин. Інтерференція спостерігається у відбитому світлі крізь червоне скло ($\lambda_1 = 631$ нм). Відстань між сусідніми червоними смугами при цьому дорівнює 3 мм. Потім ця ж плівка спостерігається через синє скло ($\lambda_1 = 400$ нм). Знайти відстань між сусідніми синіми смугами. Вважати, що за час вимірів форма плівки не змінюється і світло падає на плівку нормально.

48. Відстань між п'ятим і двадцять п'ятим світлими кільцями Ньютона дорівнює 9 мм. Радіус кривизни лінзи 15 м. Знайти довжину хвилі

монохроматичного світла, що падає нормально на установку. Спостереження проводиться у відбитому світлі.

49. Установка для одержання кілець Ньютонa висвітлюється світлом від ртутної дуги, що падає нормально. Спостереження виконуються в світлі, що проходить. Світле кільце k -го порядку, яке відповідає лінії ($\lambda_1 = 579,1$ нм), збігається з наступним світлим кільцем, що відповідає лінії ($\lambda_2 = 577,0$ нм). Визначити порядок кільця.

50. Для вимірювання показника заломлення аміаку в одне з плечей інтерферометра Майкельсона помістили вакуумну трубку довжиною $\lambda = 14$ см. Кінці трубки закриті плоскопаралельними пластинками скла. При заповненні трубки аміаком інтерференційна картина для довжини хвилі $\lambda = 590$ нм змістилася на 180 смуг. Знайти показник заломлення аміаку.

51. На поверхню скляної пластинки з обох боків нанесена плівка прозорої речовини. Для світла довжиною хвилі $\lambda = 0,48$ мкм показник заломлення пластинки $n_{\text{скл}} = 1,44$, показник заломлення плівки $n_{\text{пл}} = 1,2$. При якій мінімальній товщині плівок a світло вказаної довжини хвилі буде проходити крізь пластинку без втрат на відбиття?

2. ДИФРАКЦІЯ СВІТЛА

Дифракцією світла називається сукупність явищ, які обумовлені хвильовою природою світла, та спостерігається при його поширенні в середовищі з різко вираженою оптичною неоднорідністю (наприклад, при проходженні крізь отвори в екранах, поблизу границь непрозорих тіл тощо).

Розрізняють два випадки дифракції світла:

дифракція Френеля має місце у випадках, коли на перешкоду падає сферична або плоска хвиля; дифракційна картина спостерігається на екрані, розташованому позаду перешкоди на кінцевій відстані від неї;

дифракція Фраунгофера має місце у випадках, коли на перешкоду падає плоска хвиля; дифракційна картина спостерігається на екрані, який знаходиться у фокальній площині збиральної лінзи, що встановлена на шляху світла, яке пройшло крізь перешкоду.

Положення мінімумів освітленості при дифракції від щілини, на яку нормально падає пучок паралельних променів, визначається умовою

$$a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де a – ширина щілини; φ – кут дифракції; λ – довжина хвилі світла.

У дифракційній решітці максимуми світла спостерігаються в напрямках, що утворюють з нормаллю до решітки кут φ і задовольняють співвідношенню (за умов, що світло падає на решітку нормально)

$$d \sin \varphi = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots),$$

де d – стала дифракційної решітки.

Роздільна здатність дифракційної решітки визначається формулою

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN,$$

де N – загальна кількість щілин решітки; k – порядок спектру.

Задача 1. На діафрагму з круглим отвором падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла ($\lambda = 600$ нм). На екрані спостерігається дифракційна картина. При якій найбільшій відстані між діафрагмою та екраном у центрі дифракційної картини ще буде спостерігатися темна пляма? Діаметр отвору 1,96 мм.

Розв'язок

Інтенсивність світла в центрі дифракційних кілець залежить від того, скільки зон Френеля відкриває діафрагма для цієї центральної точки на екрані (рис. 4). Радіус k -ї зони Френеля при нормальному падінні плоскої хвилі

$$r_k = \sqrt{bk\lambda},$$

де b – відстань від хвильової поверхні (діафрагми) до точки спостереження (центра дифракційної картини); λ – довжина хвилі світла.

Виражаючи відстань, отримуємо

$$b = \frac{r_k^2}{k\lambda}.$$

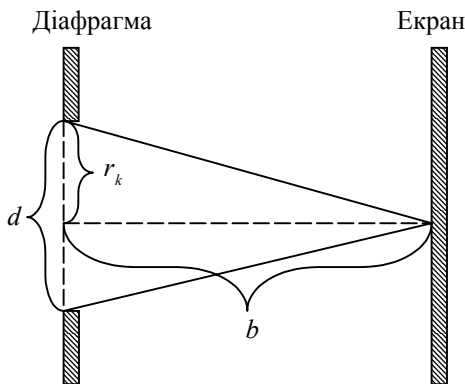


Рис. 4

Якщо діафрагма відкриває парне число зон Френеля, то в точці спостереження буде мінімум інтенсивності, а якщо непарне – максимум. Згідно з умовою задачі треба підібрати найбільшу відстань b , при якій діафрагма відкриває натуральне парне число зон k . Відповідно до формули (1) відстань b зростає при

зменшенні k і буде найбільшою при $k = 2$ (мінімальне натуральне парне число), тобто коли в отвір діафрагми уміщується тільки дві зони Френеля. Отже, підставляючи у формулу (1) замість радіуса другої зони Френеля половину діаметру діафрагми ($r_k = d/2$), отримуємо результат розв'язання задачі:

$$b_{\max} = \frac{d^2}{8\lambda} = \frac{1,96^2 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 600 \cdot 10^{-9}} = 0,8 \text{ м.}$$

Перевіримо розмірність результату:

$$[b_{\max}] = \frac{1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ м.}$$

Задача 2. На щілину шириною 10 мкм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла. На екрані, віддаленому від щілини на $L = 1$ м, спостерігається дифракційне зображення щілини. Ширина центрального максимуму (відстань між першими дифракційними мінімумами по обидва боки від центрального максимуму) дорівнює 12 см. Знайти довжину хвилі світла, що падає на щілину.

Розв'язок

Дифракційні мінімуми інтенсивності світла I від однієї вузької щілини спостерігаються під кутами φ_m (рис. 5), що відповідають умові

$$b \cdot \sin \varphi_m = m\lambda,$$

де b – ширина щілини; λ – довжина хвилі падаючого на щілину світла; $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – ціле число. Звідки довжина хвилі

$$\lambda = d \cdot \sin \varphi_1, \quad (1)$$

оскільки $m = 1$.

Залишається знайти кут φ_1 або його синус.

І спосіб. На рис. 5 видно, що кут φ_1 , під яким спостерігається перший мінімум, зв'язує між собою відстань L та половину ширини ($h/2$) центральної світлої смуги

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{h}{2L}.$$

Виражаючи із останньої формули φ_1 і підставляючи у формулу (1), отримуємо результат:

$$\lambda = d \sin \left(\arctg \left(\frac{h}{2L} \right) \right) = 10^{-5} \cdot \sin \left(\arctg \left(\frac{0,12}{2} \right) \right) = 5,99 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

II спосіб. Відстань від щілини до екрана L та половина ширини $(h/2)$ центральної світлої смуги є катетами прямокутного трикутника ABC (див. рис. 5). Його гіпотенуза

$$AB = \sqrt{BC^2 + AC^2} = \sqrt{\frac{h^2}{4} + L^2}.$$

Синус кута φ_1

$$\begin{aligned} \sin \varphi_1 &= \frac{BC}{AB} = \frac{\frac{h}{2}}{\sqrt{\frac{h^2}{4} + L^2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4L^2}{h^2}}}. \end{aligned}$$

Підставляючи синус у формулу (1), отримуємо результат:

$$\lambda = \frac{d}{\sqrt{1 + \frac{4L^2}{h^2}}} = \frac{10^{-5} \text{ м}}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot 1 \text{ м}^2}{0,12^2 \text{ м}^2}}} = 5,99 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

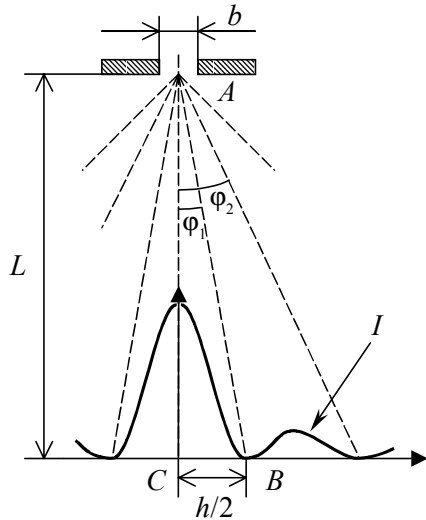


Рис. 5

Задача 3. Яку фокусну відстань повинна мати лінза, що проектує на екран спектр, отриманий за допомогою дифракційної решітки, щоб відстань між двома лініями калію 404,4 і 404,7 нм у спектрі першого порядку дорівнювала 0,1 мм? Стала дифракційної решітки 2 мкм.

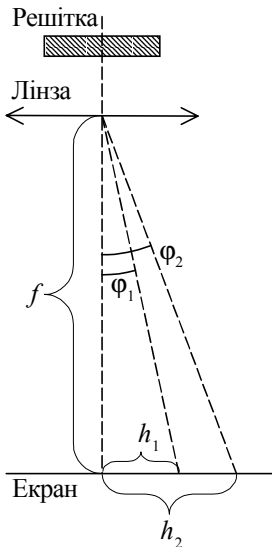
Розв'язок

I спосіб. Кут відхилення від оптичної осі лінзи k -го головного максимуму для довжини хвилі λ (рис. 6)

$$d \cdot \sin \varphi = k \lambda,$$

де d – стала дифракційної решітки.

За умовою спостерігаються головні максимуми першого порядку ($k = 1$) для двох довжин хвиль λ_1 і λ_2 . Відповідні кути φ_1 і φ_2 для цих максимумів:



$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{\lambda_1}{d}\right); \quad \varphi_2 = \arcsin\left(\frac{\lambda_2}{d}\right)$$

Положення h_1 і h_2 максимумів на екрані залежить від кутів φ_1 , φ_2 та фокусної відстані лінзи f , яку і треба знайти:

$$h_1 = f \cdot \operatorname{tg} \varphi_1; \quad h_2 = f \cdot \operatorname{tg} \varphi_2,$$

або

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= f \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{\lambda_1}{d} \right) \right); \\ h_2 &= f \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{\lambda_2}{d} \right) \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Рис. 6

Лінійну відстань між максимумами, яка відома з умови задачі, можна зв'язати з фокусною відстанню, якщо відняти перше рівняння із другого у формулу (1):

$$\Delta h = h_2 - h_1 = f \cdot \left(\operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{\lambda_2}{d} \right) \right) - \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{\lambda_1}{d} \right) \right) \right)$$

Звідки отримуємо результат:

$$\begin{aligned} f &= \frac{\Delta h}{\operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{\lambda_2}{d} \right) \right) - \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{\lambda_1}{d} \right) \right)} = \\ &= \frac{10^{-4} \text{ м}}{\operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{404,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{2 \cdot 10^{-6} \text{ м}} \right) \right) - \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{404,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{2 \cdot 10^{-6} \text{ м}} \right) \right)} = 0,626 \text{ м.} \end{aligned}$$

II спосіб. Лінійна дисперсія спектрального приладу

$$D = \frac{\delta l}{\delta \lambda},$$

де δl – лінійна відстань між лініями спектру, довжини хвиль яких відрізняються на малу величину $\delta \lambda$. За умовою довжини хвиль λ_1 і λ_2 дуже близькі, тому $\delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Відстань Δh між лініями на екрані теж мала і $\delta l = \Delta h$. Звідки

$$\Delta h = D(\lambda_2 - \lambda_1). \quad (1)$$

Лінійна дисперсія дифракційної решітки зв'язана з її кутовою дисперсією D_ϕ і фокусною відстанню лінзи f :

$$D = f D_\phi. \quad (2)$$

Кутова дисперсія дифракційної решітки в спектрі k -го порядку ($k = 1$)

$$D_\phi = \frac{k}{d \cos \phi} = \frac{k}{d \sqrt{1 - \sin^2 \phi}}. \quad (3)$$

Синус кута, під яким спостерігаються лінії (вони дуже близькі), знайдемо з умови головних максимумів дифракційної решітки:

$$d \sin \phi = k \lambda_2,$$

або

$$\sin \phi = \frac{k \lambda_2}{d}.$$

З урахуванням цього із формули (3) виражаємо кутову дисперсію дифракційної решітки:

$$D_\phi = \frac{k}{\sqrt{d^2 - k^2 \lambda_2^2}}.$$

Підставляючи останній вираз у формулу (2), а потім у формулу (1), отримаємо

$$\Delta h = f \frac{k(\lambda_2 - \lambda_1)}{\sqrt{d^2 - k^2 \lambda_2^2}}.$$

Звідки знаходимо результат:

$$f = \Delta h \frac{\sqrt{d^2 - k^2 \lambda_2^2}}{k(\lambda_2 - \lambda_1)} = 10^{-4} \text{ м} \cdot \frac{\sqrt{(2^2 - 0,4047^2) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2}}{(404,7 - 404,4) \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 0,653 \text{ м}.$$

ЗАДАЧІ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

52. Світло від монохроматичного джерела ($\lambda = 650 \text{ нм}$) падає нормально на діафрагму з круглим отвором. Діаметр отвору 6 мм. За діафрагмою на відстані 3 м від неї знаходиться екран. Скільки зон Френеля укладається в отворі діафрагми? Яким буде центр дифракційної картини на екрані: темним або світлим?

53. Обчислити радіуси перших п'яти зон Френеля, якщо відстань від джерела світла до хвильової поверхні дорівнює 2 м, відстань від хвильової поверхні до точки спостереження складає 1 м і $\lambda = 500 \text{ нм}$.

54. Обчислити радіуси перших п'яти зон Френеля для випадку плоскої хвилі. Відстань від хвильової поверхні до точки спостереження дорівнює 1 м. Довжина хвилі $\lambda = 500 \text{ нм}$.

55. Дифракційна картина спостерігається на відстані l від точкового джерела монохроматичного світла ($\lambda = 600 \text{ нм}$). На відстані $0,5l$ від джерела розміщена кругла непрозора перешкода діаметром 1 см. Чому дорівнює відстань l , якщо перешкода закриває тільки центральну зону Френеля?

56. Дифракційна картина спостерігається на відстані 4 м від точкового джерела монохроматичного світла ($\lambda = 500 \text{ нм}$). Посередині між екраном і джерелом світла розміщена діафрагма з круглим отвором. При якому максимальному радіусі отвору центр дифракційних кілець, що спостерігаються на екрані, буде темним?

57. При нормальному падінні плоскої монохроматичної хвилі на діафрагму з отвором, радіус якого 1,5 мм, на екрані, що стоїть за діафрагмою на відстані 2 м, спостерігається дифракційна картина. Знайдіть довжину хвилі світла, якщо в центрі дифракційних кілець інтенсивність світла мінімальна.

58. При нормальному падінні плоскої монохроматичної хвилі ($\lambda = 500 \text{ нм}$) на діафрагму з отвором, радіус якого 1 мм, на екрані, що стоїть за діафрагмою, спостерігається дифракційна картина. Знайдіть відстань від діафрагми до екрана, якщо в центрі дифракційних кілець інтенсивність світла максимальна.

59. Світло від монохроматичного джерела ($\lambda = 600 \text{ нм}$) падає на ді-

афрагму з круглим отвором на відстані 2 м від джерела. За діафрагмою на відстані 3 м знаходиться екран. Знайдіть діаметр отвору, якщо в центрі дифракційної картини спостерігається світла пляма, яка стає темною тільки при наближенні екрана до діафрагми.

60. На відстані 2,5 м від точкового джерела монохроматичного світла ($\lambda = 500$ нм) розташована діафрагма з круглим отвором, діаметр якого 2 мм. На який відстані за діафрагмою в центрі дифракційної картини буде максимальна інтенсивність світла?

61. Світло від монохроматичного джерела падає на діафрагму з круглим отвором на відстані 2 м від джерела. За діафрагмою знаходиться екран, де спостерігається система дифракційних кілець. Екран розташовують таким чином, щоб інтенсивність світла в центрі дифракційної картини була максимально можливою. При цьому відстань між екраном і діафрагмою 3 м. На якій найменшій відстані від діафрагми треба розташувати екран, щоб у центрі дифракційної картини інтенсивність, навпаки, була мінімально можливою?

62. Світло від монохроматичного джерела ($\lambda = 600$ нм) падає на діафрагму з круглим отвором, за якою на відстані 4 м знаходиться екран, де спостерігається система дифракційних кілець. Яка повинна бути відстань від джерела до екрана, щоб в центрі дифракційної картини спостерігалась мінімально можлива інтенсивність світла? Діаметр отвору 3 мм.

63. На діафрагму з круглим отвором радіусом 1 мм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла ($\lambda = 650$ нм). На екрані спостерігається дифракційна картина. При якій відстані між діафрагмою та екраном у центрі дифракційної картини ще буде спостерігатися максимально можлива інтенсивність світла?

64. На діафрагму з круглим отвором радіусом 1,5 мм падає нормально плоска монохроматична світлова хвиля. На екрані за діафрагмою спостерігаються дифракційні кільця, в центрі яких інтенсивність світла максимально можлива. Як треба змінити радіус отвору, щоб у центрі, навпаки, була мінімально можлива інтенсивність світла?

65. Плоска монохроматична світлова хвиля нормально падає на діафрагму з круглим отвором. На відстані 1,5 м за діафрагмою спостерігаються дифракційні кільця, в центрі яких мінімальна інтенсивність світла. Як необхідно змінити відстань від екрану з дифракційною картиною до діафрагми, щоб у центрі, навпаки, була максимально можлива інтенсивність світла?

66. На діафрагму з круглим отвором падає нормально паралельний

пучок монохроматичного світла ($\lambda = 600$ нм). На екрані спостерігається дифракційна картина. При якій найбільшій відстані між діафрагмою та екраном у центрі дифракційної картини ще буде спостерігатися темна пляма? Діаметр отвору 1,96 мм.

67. На щілину шириною 2 мкм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 589$ нм. Знайти кути, у напрямку яких будуть спостерігатися мінімуми світла.

68. На щілину шириною 6 мкм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла. Другий дифракційний мінімум спостерігається під кутом 10° до нормалі. Знайти довжину хвилі світла.

69. На вузьку щілину падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 600$ нм. Третій дифракційний мінімум спостерігається під кутом 12° від нормалі. Знайти ширину щілини.

70. У скільки разів ширина центрального максимуму при дифракції на вузькій щілині для світла довжиною хвилі 0,7 мкм буде більшою, ніж для світла довжиною хвилі 0,4 мкм?

71. Скільки всього мінімумів буде спостерігатись при дифракції монохроматичного світла ($\lambda = 600$ нм) на щілині шириною 4 мкм?

72. У скільки разів ширина вузької щілини більша за довжину хвилі світла, що падає на неї нормально, якщо другий дифракційний мінімум спостерігається під кутом 5° до нормалі?

73. На щілину падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі λ . Ширина щілини дорівнює 6λ . Під яким кутом буде спостерігатися третій дифракційний мінімум світла?

74. На щілину шириною 20 мкм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 500$ нм. Знайти ширину зображення щілини на екрані, віддаленому від щілини на відстань 1 м. Шириною зображення вважати відстань між першими дифракційними мінімумами, розташованими по обидва боки від головного максимуму освітленості.

75. На щілину шириною 10 мкм падає нормально паралельний пучок монохроматичного світла. На екрані, віддаленому від щілини на відстань 1 м, спостерігається дифракційне зображення щілини. Ширина центрального максимуму (відстань між першими дифракційними мінімумами по обидва боки від центрального максимуму) дорівнює 12 см. Знайти довжину хвилі світла, що падає на щілину.

76. На щілину шириною 5 мкм нормально падає паралельний пучок монохроматичного світла з довжиною хвилі $\lambda = 600$ нм. Знайти положен-

ня перших трьох дифракційних мінімумів на екрані, розташованому у фокальній площині опуклої лінзи за щілиною. Фокусна відстань лінзи 20 см.

77. Чому дорівнює стала дифракційної решітки, якщо, для того щоб побачити червону лінію ($\lambda = 700$ нм) у спектрі другого порядку, зорув трубу довелося встановити під кутом 30° до осі коліматора? Яке число штрихів нанесене на 1 см довжини цієї решітки? Світло падає на решітку нормально.

78. Скільки штрихів на 1 мм довжини має дифракційна решітка, якщо зелена лінія ртуті ($\lambda = 546,1$ нм) у спектрі першого порядку спостерігається під кутом $19^\circ 8'$?

79. Знайти кутове положення відносно нульового максимуму червоної лінії ($\lambda = 700$ нм) у спектрі третього порядку при дифракції на решітці з періодом 6 мкм.

80. На дифракційну решітку з періодом 0,01 мм нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 0,45 мкм. Знайдіть відстань між другим і третім головними дифракційними максимумами на екрані, розташованому в фокальній площині опуклої лінзи за решіткою. Фокусна відстань лінзи складає 15 см.

81. На дифракційну решітку нормально падає монохроматичне світло з довжиною хвилі 0,65 мкм. Знайдіть період решітки, якщо відстань між першим та другим головними дифракційними максимумами на екрані, розташованому у фокальній площині опуклої лінзи за решіткою, дорівнює 1,5 см. Фокусна відстань лінзи складає 18 см.

82. На дифракційну решітку з періодом 0,005 мм нормально падає монохроматичне світло. Знайдіть довжину хвилі світла, якщо відстань між третім і четвертим головними дифракційними максимумами на екрані, розташованому у фокальній площині опуклої лінзи за решіткою, дорівнює 2 см. Фокусна відстань лінзи складає 20 см.

83. На дифракційну решітку з періодом 0,008 мм нормально падає біле світло. Знайдіть відстань між другими головними дифракційними максимумами для зеленого ($\lambda_1 = 550$ нм) та червоного світла ($\lambda_2 = 700$ нм) на екрані, розташованому у фокальній площині опуклої лінзи за решіткою. Фокусна відстань лінзи складає 10 см.

84. Скільки щілин міститься у дифракційній решітці довжиною 3 см, якщо кутова відстань між жовтими лініями ($\lambda = 590$ нм) у спектрах другого і четвертого порядку складає 30° ?

85. Дифракційна решітка довжиною 4 см містить 5000 штрихів. Знайдіть кутову ширину видимого спектра другого порядку. Вважати,

що видимому спектру відповідають частоти коливань $\nu = (0,39...0,75) \cdot 10^{15}$ Гц.

86. На дифракційну решітку довжиною 3 см, що містить 6000 штрихів, падає нормально біле світло. У скільки разів ширина видимого спектра першого порядку більша за ширину темного проміжку між спектрами першого і другого порядку на екрані, розташованому у фокальній площині опуклої лінзи за решіткою? Вважати, що видимому спектру відповідають довжини хвиль від 400 нм до 760 нм.

87. У скільки разів кутова ширина видимого спектру третього порядку більша за ширину спектра другого порядку на дифракційній решітці з періодом $5 \cdot 10^{-4}$ см? Вважати, що видимому спектру відповідають частоти коливань $\nu = (0,39...0,75) \cdot 10^{15}$ Гц.

88. За дифракційною решіткою, стала якої дорівнює 5 мкм, знаходиться опукла лінза. У скільки разів ширина видимого спектра третього порядку в фокальній площині лінзи більша від ширини спектра другого порядку? Вважати, що видимому спектру відповідають довжини хвиль від 400 нм до 760 нм.

89. Ширина видимого спектра ($\lambda = 0,4...0,76$ мкм) третього порядку у фокальній площині опуклої лінзи, що розташована за дифракційної решіткою, складає 5 см. Чому дорівнює стала дифракційної решітки, якщо фокусна відстань лінзи 20 см?

90. За дифракційною решіткою, стала якої дорівнює 6 мкм, знаходиться опукла лінза з фокусною відстанню 25 см. Відстань між зеленою та червоною лініями в спектрі другого порядку у фокальній площині лінзи складає 1,25 см. Знайти довжину хвилі λ_2 , що відповідає червоній лінії, якщо для зеленої лінії $\lambda_1 = 560$ нм.

91. Стала дифракційної решітки 0,01 мм. У скільки разів кутова відстань між червоними лініями ($\lambda_1 = 700$ нм) у спектрах другого і третього порядків більша, ніж кутова відстань між жовтими лініями ($\lambda_2 = 600$ нм) у цих же спектрах.

92. На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Кут дифракції для зеленої лінії ($\lambda_1 = 540$ нм) у спектрі другого порядку складає 27° . Знайти кут дифракції для жовтої лінії ($\lambda_2 = 620$ нм) у спектрі третього порядку.

93. На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Кут дифракції для натрієвої лінії ($\lambda = 589$ нм) у спектрі першого порядку дорівнює $17^\circ 8'$. Деяка лінія дає в спектрі другого порядку кут дифракції $24^\circ 12'$. Знайти довжину хвилі цієї лінії і число штрихів на 1 мм решітки.

94. На дифракційну решітку нормально падає пучок світла від роз-

рядної трубки. Чому повинна дорівнювати стала дифракційної решітки, щоб у напрямку $\varphi = 41^\circ$ збігалися максимуми двох ліній: $\lambda_1 = 656,3 \text{ нм}$ і $\lambda_2 = 410,2 \text{ нм}$?

95. Період дифракційної решітки $0,02 \text{ мкм}$. Знайдіть довжину хвилі лінії у спектрі четвертого порядку, яка співпадає з лінією $\lambda = 640 \text{ нм}$ у спектрі третього порядку.

96. На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. При повороті труби гоніометра на кут φ у полі зору знаходиться лінія $\lambda = 440 \text{ нм}$ у спектрі третього порядку. Чи будуть знаходитись під цим же кутом інші спектральні лінії, які відповідають довжинам хвиль, що лежать у межах видимого спектра (від 400 до 700 нм)?

97. На дифракційну решітку нормально падає пучок світла від розрядної трубки, наповненої гелієм. На яку лінію у спектрі третього порядку накладається червона лінія гелію ($\lambda = 670 \text{ нм}$) спектра другого порядку?

98. На дифракційну решітку нормально падає світло від розрядної трубки, наповненої гелієм. Спочатку зорова труба встановлюється на фіолетові лінії ($\lambda = 389 \text{ нм}$) у спектрі першого порядку по обидві сторони від центральної смуги. Відлік по лімбу направо від нульового максимуму показує відповідно $27^\circ 33'$ і $36^\circ 27'$. Після цього зорова труба встановлюється на червоні лінії в спектрі першого порядку по обидві сторони від центральної смуги. Відлік по лімбу направо від нульового максимуму показує відповідно $23^\circ 54'$ і $40^\circ 6'$. Знайти довжину хвилі червоної лінії спектра гелію.

99. Знайти найбільший порядок спектра для жовтої лінії натрію $\lambda = 589 \text{ нм}$, якщо стала дифракційної решітки дорівнює 2 мкм .

100. У яких межах повинен лежати період дифракційної решітки для того, щоб видимий спектр ($\lambda = 400 \dots 760 \text{ нм}$) четвертого порядку мав фіолетовий, а не червоний кінець.

101. На дифракційну решітку нормально падає пучок монохроматичного світла. Максимум третього порядку спостерігається під кутом $36^\circ 48'$ до нормалі. Знайти сталу решітки, виражену у довжинах хвиль світла, що падає.

102. Скільки штрихів на 1 мм містить дифракційна решітка, якщо вона може розділити в другому порядку лінії спектра калію $\lambda_1 = 404,4 \text{ нм}$ і $\lambda_2 = 404,7 \text{ нм}$? Ширина решітки 3 см .

103. Чому повинна дорівнювати постійна дифракційної решітки шириною $2,5 \text{ см}$, щоб у першому порядку був розділений дублет натрію $\lambda_1 = 589 \text{ нм}$ і $\lambda_2 = 589,6 \text{ нм}$?

104. Стала дифракційної решітки шириною 2,5 см дорівнює 2 мкм. Яку різницю довжин хвиль може розділити ця решітка в області жовтих променів ($\lambda = 600$ нм) у спектрі другого порядку?

105. Визначити кутову дисперсію дифракційної решітки для $\lambda = 589$ нм у спектрі першого порядку. Стала решітки дорівнює 2,5 мкм.

106. Кутова дисперсія дифракційної решітки для $\lambda = 668$ нм у спектрі першого порядку дорівнює $2,02 \cdot 10^5$ рад/м. Знайти період дифракційної решітки.

107. Для лінії $\lambda = 530$ нм у спектрі третього порядку кутова дисперсія дифракційної решітки дорівнює $4,5 \cdot 10^5$ рад/м. Скільки штрихів містить решітка, якщо її ширина 2,5 см?

108. Знайти лінійну дисперсію (мкм/Å) дифракційної решітки з періодом 0,004 мм для світла $\lambda = 668$ нм, якщо фокусна відстань лінзи, що проектує спектр на екран, дорівнює 40 см.

109. Скільки штрихів містить дифракційна решітка, якщо вона може розділити в спектрі першого порядку лінії $\lambda_1 = 466$ нм і $\lambda_2 = 464,7$ нм?

110. Знайдіть найменший порядок спектру, в якому дифракційна решітка з 3000 штрихами може розділити лінії $\lambda_1 = 577$ нм і $\lambda_2 = 578,1$ нм?

111. На якій відстані одна від одної будуть знаходитися на екрані дві лінії ртутної дуги ($\lambda_1 = 577$ нм і $\lambda_2 = 579,1$ нм) у спектрі першого порядку, отриманому за допомогою дифракційної решітки з періодом 2 мкм? Фокусна відстань лінзи, що проектує спектр на екран, дорівнює 0,6 м.

112. Знайдіть ширину дифракційної решітки, що розділяє лінії $\lambda_1 = 577$ нм і $\lambda_2 = 579,1$ нм у спектрі першого порядку, а її кутова дисперсія для цих ліній в тому ж спектрі $2,5 \cdot 10^5$ рад/м.

113. Знайдіть відстань на екрані між лініями $\lambda_1 = 466$ нм і $\lambda_2 = 464,7$ нм у спектрі першого порядку, отриманому за допомогою дифракційної решітки шириною 2 см. Решітка містить 800 штрихів, а фокусна відстань лінзи, що проектує спектр на екран, дорівнює 0,5 м.

114. На дифракційну решітку нормально падає пучок світла. Червона лінія ($\lambda = 630$ нм) спостерігається у спектрі третього порядку під кутом $\varphi = 60^\circ$. Яку спектральну лінію видно під цим же кутом у спектрі четвертого порядку? Яке число штрихів на 1 мм довжини має дифракційна решітка? Чому дорівнює кутова дисперсія цієї решітки для лінії $\lambda_1 = 630$ нм у спектрі третього порядку? Яка роздільна здатність решітки у спектрі четвертого порядку, якщо її ширина 4 см?

115. Для якої довжини хвилі дифракційна решітка зі сталою $d = 5$ мкм має кутову дисперсію $D_\varphi = 6,3 \cdot 10^5$ рад/м у спектрі третього

порядку? Знайти ширину решітки, якщо її роздільна здатність у спектрі третього порядку 3 мкм/А.

116. Яку фокусну відстань повинна мати лінза, що проектує на екран спектр, отриманий за допомогою дифракційної решітки, щоб відстань між двома лініями калію 404,4 і 404,7 нм у спектрі першого порядку дорівнювала 0,1 мм? Стала дифракційної решітки 2 мкм.

3. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА

Поляризацією світла називається виділення лінійно поляризованого світла з природного або частково поляризованого. Із цією метою використовують спеціальні пристрої – поляризатори. Їх дія ґрунтується на поляризації світла при його відбитті і заломленні на границі розділу двох діелектричних середовищ, а також на явищах подвійного променезаломлення та дихроїзму. Ці ж пристрої можна використовувати і як аналізатори для визначення характеру та ступеня поляризації світла.

При відбитті природного світла інтенсивністю I_0 від діелектричного дзеркала мають місце формули Френеля:

$$I'_{\perp} = 0,5I_0 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad I'_{\parallel} = 0,5I_0 \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)},$$

де $I'_{\perp}$ – інтенсивність світлових коливань у відбитому промені, що здійснюються в напрямку, перпендикулярному площині падіння світла;

$I'_{\parallel}$ – інтенсивність світлових коливань у відбитому промені, що здійснюються в напрямку, паралельному площині падіння світла; α та β – кути падіння і заломлення відповідно.

Закон Брюстера. Якщо $\alpha + \beta = 90^\circ$, то $I'_{\parallel} = 0$. У цьому випадку кут падіння α_B та показник заломлення n діелектричного променя зв'язані співвідношенням

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n.$$

Закон Малюса. Інтенсивність світла, яке пройшло крізь поляризатор і аналізатор,

$$I_a = I_p \cos^2 \varphi,$$

де I_p – інтенсивність світла, що пройшло крізь поляризатор; φ – кут між головними площинами поляризатора та аналізатора.

Задача 1. У скільки разів послаблює природне світло система із двох однакових неідеальних поляризаторів, якщо кожен з них окремо при падінні природного світла створює частково плоскополяризоване зі ступенем поляризації P ?

Розв'язок

Позначимо інтенсивність природного світла до поляризаторів I_0 (рис. 7), інтенсивність після проходження першого I_1 , а інтенсивність на виході I_2 . Згідно з умовою, потрібно знайти, у скільки разів зменшується інтенсивність світла при проходженні всієї системи поляризаторів, тобто відношення

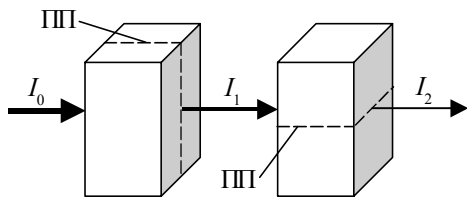


Рис. 7

Світлові коливання на виході з поляризатору I_1 можна вважати сумою коливань, паралельних площині поляризації (ПП) інтенсивністю $I_{1\parallel}$, та коливань, перпендикулярних до площини поляризації $I_{1\perp}$. Ступінь поляризації

$$P = \frac{I_{1\parallel} - I_{1\perp}}{I_{1\parallel} + I_{1\perp}}.$$

Неідеальний поляризатор з усіх світлових коливань, що падають на нього без перешкод, пропускає складові коливань, паралельні його площині, а перпендикулярні складові послаблює в деяке число η разів:

$$I_{1\parallel} = I_{0\parallel}; \quad I_{1\perp} = I_{0\perp}/\eta.$$

Причому $I_{0\perp} = I_{0\parallel} = \frac{1}{2} I_0$, оскільки світло I_0 природне.

Знайдемо зв'язок між ступенем поляризації і послабленням перпендикулярних коливань η . Із формули (1)

$$I_{1\perp} = \frac{1-P}{1+P} I_{1\parallel} = \frac{1-P}{1+P} I_{0\parallel}.$$

Звідки

$$\eta = \frac{I_{0\perp}}{I_{1\perp}} = \frac{I_{0\parallel}}{I_{1\perp}} = \frac{1+P}{1-P}.$$

Отже, інтенсивність коливань, перпендикулярних до площини поляризації, на виході першого поляризатора

$$I_{1\perp} = \frac{1-P}{1+P} \frac{I_0}{2}.$$

Оскільки поляризатори схрещені, то інтенсивність коливань, паралельних площині другого поляризатора, у світлі, що падає на нього, $I_{1\perp}$, а перпендикулярних, навпаки, $I_{1\parallel}$. Другий поляризатор без перешкод пропускає паралельні і послаблює в η разів перпендикулярні коливання:

$$I_{2\parallel} = I_{1\perp} = \frac{1-P}{1+P} \frac{I_0}{2}; \quad I_{2\perp} = \eta I_{1\parallel} = \frac{1-P}{1+P} \frac{I_0}{2}.$$

Інтенсивність усього світла на виході з другого поляризатора

$$I_2 = I_{2\perp} + I_{2\parallel} = \frac{1-P}{1+P} \cdot I_0.$$

У результаті маємо, що світло послаблюється у відношенні

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{1+P}{1-P}.$$

Задача 2. Визначити коефіцієнт відбиття природного світла при нормальному падінні на скло ($n = 1,5$).

Розв'язок

Коефіцієнт відбивання

$$\rho = \frac{I'}{I},$$

де I – інтенсивність світла, що падає; I' – інтенсивність відбитого світла.

У загальному випадку паралельні і перпендикулярні площині падіння коливання відбиваються по-різному.

Інтенсивності перпендикулярних коливань $I_{\perp}$ у світлі, що падає, та $I'_{\perp}$ у відбитому світлі, а також паралельних коливань $I_{\parallel}$ у світлі, що падає, й $I'_{\parallel}$ у відбитому світлі зв'язані формулами Френеля:

$$I'_{\perp} = I_{\perp} \frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)}; \quad I'_{\parallel} = I_{\parallel} \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)},$$

де i_1 та i_2 – кути падіння і заломлення відповідно.

Світло, що падає, природне, тобто

$$I_{\perp} = I_{\parallel} = \frac{1}{2} I.$$

За умовою світ падає нормально ($i_1 = i_2 = 0$) і для того, щоб уникнути невизначеності (ділення нуля на нуль), розпишемо синуси і тангенси сум кутів:

$$I'_{\perp} = I_{\perp} \left(\frac{\sin i_1 \cos i_2 - \sin i_2 \cos i_1}{\sin i_1 \cos i_2 + \sin i_2 \cos i_1} \right)^2;$$

$$I'_{\parallel} = I_{\parallel} \left(\frac{\sin i_1 \cos i_2 - \sin i_2 \cos i_1}{\sin i_1 \cos i_2 + \sin i_2 \cos i_1} \right)^2 \left(\frac{\cos i_1 \cos i_2 - \sin i_2 \sin i_1}{\cos i_1 \cos i_2 + \sin i_2 \sin i_1} \right)^2.$$

Враховуючи зв'язок між синусами кутів падіння і заломлення $\sin i_1 / \sin i_2 = n$, а також те, що в нашому випадку $\cos i_1 = \cos i_2 = \cos 0 = 1$, отримаємо:

$$I'_{\perp} = I_{\perp} \left(\frac{\sin i_2 (n-1)}{\sin i_2 (n+1)} \right)^2; \quad I'_{\parallel} = I_{\parallel} \left(\frac{\sin i_2 (n-1)}{\sin i_2 (n+1)} \right)^2,$$

або

$$I'_{\parallel} = I'_{\perp} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \frac{I}{2}.$$

Звідки отримуємо коефіцієнт відбиття

$$I' = I'_{\parallel} + I'_{\perp} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 I.$$

Повна інтенсивність відбитого світла

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \left(\frac{1,5-1}{1,5+1} \right)^2 = 0,04.$$

Задача 3. Між двома схрещеними ніколями розміщена трубка довжиною 40 см з водним розчином цукру. Питоме повертання для цукру

$\alpha = 6,65 \text{ град}\cdot\text{см}^2/\text{г}$. Яка повинна бути концентрація цукру у розчині, щоб ніколи пропускали максимум світла?

Розв'язок

Схрещені ніколи як ідеальні поляризатори взагалі не пропускають світла. Для того, щоб вони пропускали максимум світла, площина поляризації (пп) між ніколями повинна повернутись на кут $\varphi = 90^\circ$ (рис. 8). Саме розчин цукру і повертає плоскість поляризації світла на цей кут.

Кут повороту φ пропорційний довжині шляху світла (довжина трубки l) і концентрації цукру C :

$$\varphi = \alpha Cl,$$

де α – питома стала поворотання (відома з умови).

Знаходимо концентрацію:

$$C = \frac{\varphi}{\alpha l} = \frac{90^\circ}{6,65^\circ \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{кг} \cdot 0,4 \text{ м}} = 338 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

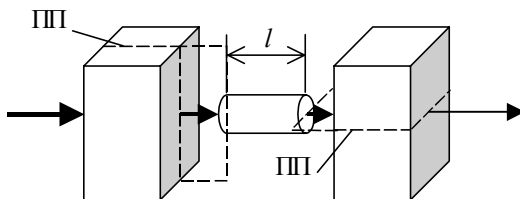


Рис. 8

ЗАДАЧІ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

117. Кут падіння променя на поверхню рідини $\alpha = 50^\circ$. Відображений промінь максимально поляризований. Визначити кут заломлення променя.

118. Промінь світла, що поширюється у скляній посудині з водою, відбивається від дна посудини. При якому куті падіння відбитий промінь максимально поляризований?

119. При проходженні світла крізь трубку довжиною $l_1 = 15 \text{ см}$, що містить десятипроцентний розчин цукру, площина поляризації світла повернулась на кут $\varphi_1 = 12^\circ 9'$. Визначити концентрацію C_2 в іншому розчині цукру, що налитий у трубку довжиною $l_2 = 7 \text{ см}$.

120. Між схрещеними ніколями помістили пластинку кварцу товщиною $d = 3 \text{ мм}$, внаслідок чого поле зору поляриметра стало максимально світлим. Визначити сталу обертання кварцу для монохроматичного світла, що використовувалося у досліді.

121. Пластинку кварцу товщиною $d_1 = 1,5 \text{ мм}$ помістили між пара-

лельними ніколями, внаслідок чого площина поляризації монохроматичного світла повернулась на кут $\varphi = 27^\circ$. Якої найменшої товщини d_2 треба взяти пластинку, щоб поле зору поляриметра стало зовсім чорним?

122. Знайти кут α_B повної поляризації при відбитті світла від скла, показник заломлення якого $n = 1,57$.

123. Граничний кут повного внутрішнього відбиття для деякої речовини $i = 45^\circ$. Знайти для цієї речовини кут α_B повної поляризації.

124. Знайти показник заломлення скла, якщо при відбитті від нього світла відбитий промінь буде повністю поляризований при куті заломлення $\beta = 30^\circ$.

125. Промінь світла проходить крізь рідину, налиту в скляну ($n = 1,5$) посудину, і відбивається від дна. Відбитий промінь повністю поляризований при його падінні на дно під кутом $42^\circ 37'$. Знайти показник заломлення рідини.

126. Промінь світла проходить крізь рідину, налиту в скляну ($n = 1,5$) посудину, і відбивається від дна. Відбитий промінь повністю поляризований при його падінні на дно під кутом i_B $42^\circ 37'$. Під яким кутом має падати на дно посудини промінь світла, що поширюється в цій рідині, щоб відбулось повне внутрішнє відбиття?

127. Пучок плоскополяризованого світла ($\lambda = 589$ нм) падає на пластинку ісландського шпату перпендикулярно до його оптичної осі. Знайти довжини хвиль звичайного та незвичайного променів у кристалі, якщо показники заломлення ісландського шпату для звичайного та незвичайного променів відповідно дорівнюють $n_1 = 1,66$ і $n_2 = 1,49$.

128. Знайти кут φ між головними площинами поляризатора і аналізатора, якщо інтенсивність природного світла, що проходить крізь поляризатор і аналізатор, зменшується в чотири рази.

129. Природне світло проходить крізь поляризатор і аналізатор, розташовані так, що кут між їх головними площинами дорівнює φ . Як поляризатор, так і аналізатор поглинають і відбивають 8 % світла, що падає на них. Знайти кут φ .

130. Знайти коефіцієнт відбиття природного світла, що падає на скло ($n = 1,54$) під кутом α_B повної поляризації. Знайти ступінь поляризації P променів, що пройшли крізь скло.

131. Промені природного світла проходять крізь плоскопаралельну скляну пластинку ($n = 1,54$), падаючи на неї під кутом α_B повної поляризації. Знайти ступінь поляризації P променів, що пройшли крізь пластинку.

132. Знайти коефіцієнт відбиття ρ і ступінь поляризації P_1 відбитих променів при падінні природного світла на скло ($n = 1,54$) під кутом $\alpha = 45^\circ$. Який ступінь поляризації P_2 заломлених променів?

133. Визначити кут повної поляризації при переході променя з повітря в алмаз. Показник заломлення алмазу $n = 2,42$.

134. Кут повної поляризації при падінні променя на поверхню деякої рідини дорівнює 53° . Що це за рідина?

135. Кут повної поляризації при падінні променя на грань топазу дорівнює $50^\circ 30'$. Визначити показник заломлення топазу.

136. За якої умови відбувається повна поляризація променя, відбитого від поверхні прозорої речовини? Визначити кут падіння і заломлення при повній поляризації відбитого променя від поверхні гліцерину ($n = 1,47$).

137. Визначити кут падіння і заломлення при повній поляризації відбитого променя від поверхні гвоздичної олії ($n = 1,532$).

138. Дві поляроїдні пластинки розташовані під прямим кутом, а третя розташована між ними так, що її вісь складає кут θ з віссю першого поляроїда. Яка інтенсивність світла, що проходить крізь такий пристрій, якщо всі поляроїди ідеальні (втрат немає)?

139. Припустимо, що коли пучок плоскополяризованого світла падає на поляроїдну пластинку, частина його $\epsilon^2 I_0$ (I_0 – інтенсивність світла, що падає) проходить крізь пластинку, якщо вісь поляроїда паралельна напрямку поляризації. Якщо ж ці осі утворюють прямий кут, то крізь пластинку проходить тільки частина світла, що падає, $\epsilon^2 I_0$. (Якщо поляроїд ідеальний, то ϵ^2 має дорівнювати одиниці, а ϵ^2 – нулю.) Неполаризоване світло інтенсивності I_0 проходить через пару поляроїдних пластинок, осі яких утворюють кут θ . Яка інтенсивність світла, що пройшло крізь систему? (Знехтувати ефектами відбиття.)

140. Покажіть, що для кута Брюстера справедливе відношення $\tan i = n$.

141. Оцінити інтенсивність і поляризацію випромінювання електрона, що рухається з постійною швидкістю по коловій орбіті, для точок, розташованих на вісі, що проходить крізь центр кола.

142. Оцініть інтенсивність і поляризацію випромінювання електрона, що рухається з постійною швидкістю по коловій орбіті, для точок, розташованих у площині кола.

143. Показники заломлення кристалічного кварцу для світла з довжиною хвилі 600 нм дорівнюють $n_1 = 1,544$ і $n_2 = 1,553$ для звичайного і незвичайного променів відповідно. У кристалі кварцу, що вирізали паралельно оптичній осі, можна отримати максимальну різницю швидко-

стей звичайного і незвичайного променів, якщо вони нормально падають на поверхню кристала. Яка має бути товщина кристала, щоб виник зсув фаз цих променів на 90° , якщо використовується світло вказаної довжини хвилі?

144. Студент другого курсу НУК на прогулянці з дівчиною бачить Місяць під кутом 10° над горизонтом і його відбиття в спокійному ставку. З сумом згадуючи курс лекцій з фізики, він робить спробу розрахувати яскравість зображення порівняно з яскравістю самого Місяця, вважаючи, що випромінювання від Місяця не поляризоване (майже), і забуваючи, що ображена супутниця піде. Який результат він отримає? Покажіть, що інтенсивність відбитих дотичних променів досягає 100 %.

145. Чому дорівнює ступінь поляризації світла, яке є сумішшю природного світла з плоскополяризованим, якщо відношення інтенсивності поляризованого світла до інтенсивності природного дорівнює 10.

146. Світло падає перпендикулярно до площини однієї з граней алмазу ($n = 2,4$). Яка частка випромінювання, що падає, відбивається?

147. Світло падає перпендикулярно до площини однієї із граней алмазу ($n = 2,4$). Чому дорівнює кут Брюстера для алмазу?

148. Як дослідним шляхом визначити показник заломлення матеріалу відполірованої пластинки? Описати та обґрунтувати послідовність дій.

149. Показники заломлення кристалічного кварцу для світла з довжиною хвилі $\lambda_1 = 410$ нм дорівнюють $n_1 = 1,557$ і $n_2 = 1,567$ для звичайного і незвичайного променів відповідно. Кристал кварцу – чверть хвильова пластинка для світла з довжиною хвилі $\lambda_2 = 600$ нм. У кристалі кварцу, вирізаному паралельно оптичній осі, можна отримати максимальну різницю швидкостей звичайного і незвичайного променів, якщо вони нормально падають на поверхню кристала. Детально опишіть стан поляризованого світла з довжиною хвилі λ_1 , що пройшло через кристал, якщо промені, що падали, були лінійно поляризовані.

150. На ідеальний поляризатор падає поляризоване по колу світло, інтенсивність якого I_0 . Яка інтенсивність I світла за поляризатором?

151. На систему, яка складається з двох поляроїдів, у яких кут між оптичними осями складає 45° , падає природне світло. У скільки разів зменшиться інтенсивність світлового пучка? Втрати світла в кожному поляроїді складають 10 %. Втратами на відбиття світла знехтувати.

152. Розчин глюкози з концентрацією $2,8 \cdot 10^2$ кг/м³, налитий в скляну трубку, повертає площину поляризації світла, що проходить крізь розчин, на кут 64° . Інший розчин, налитий у цю саму трубку, обертає площину поляризації на 48° . Знайти концентрацію другого розчину.

153. Ступінь поляризації частково поляризованого світла $P = 0,25$. Знайти відношення інтенсивності поляризованої складової цього світла до інтенсивності природної складової.

154. На шляху частково поляризованого пучка світла розмістили ніколь. При повороті ніколя на кут $i = 60^\circ$ з положення, що відповідає максимальному пропусканню світла, інтенсивність світла, що пройшло, зменшилась утричі. Знайти ступінь поляризації світла, що падає.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1989.

2. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Справочник по физике. – М.: Наука, 1985.

3. *Зисман Г.А., Тодес О.М.* Курс общей физики: Учеб. пособие для вузов: В 3 т. – 3-е изд. – М.: Наука, 1967. – Т. 3.

4. *Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик Л.П.* Загальний курс фізики: Навч. посібник: В 3 т. – К.: Техніка, 1999. – Т. 3: Оптика. Квантова фізика.

5. *Савельев И.В.* Курс физики: Учебник: В 3 т. – М.: Наука, 1989. – Т. 3: Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц.

6. *Трофимова Т.И.* Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1990.

7. Элементарный учебник физики: Учебное пособие: В 3 т. / Под ред. *Г.С. Ландсберга*. – 10-е изд. – М.: Наука, 1984. – Т. 3: Оптика и атомная физика.

Навчальне видання

КОВАЛЬ Сергій Станіславович
УШКАЦ Михайло Вікторович

ХВИЛЬОВА ОПТИКА

*Збірник задач для індивідуальної роботи
з курсу фізики*

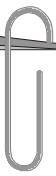
Під редакцією О.О. Мочалова
(українською мовою)

Редактор *О.Г. Тулузакова*
Комп'ютерна правка та верстка *О.М. Черевата*
Коректор *Н.О. Шайкіна*

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Підписано до друку 26.09.05. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Друк офсетний. Гарнітура "Таймс". Ум. друк. арк. 2,0. Обл.-вид. арк. 2,1.
Тираж 600 прим. Вид. № 26. Зам. № 245. Ціна договірна.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5



ДЛЯ НОТАТОК



ВИДАВНИЦТВО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника у повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі IBM PC, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублікатором фірми "Duplo" формату A3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати ***підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки***, – ми до Ваших послуг.

© Національний університет кораблебудування
✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,
видавництво НУК

☎ 8(0512) 47-83-86; 39-81-41; 39-73-39; fax 8(0512) 39-73-26;