МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

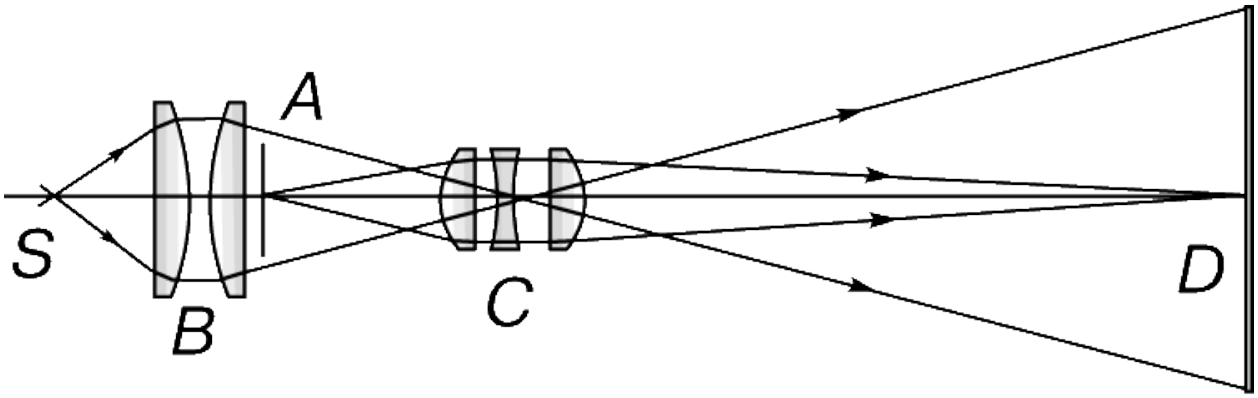
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

КАФЕДРА ФІЗИКИ

Лабораторний практикум з фізики

Оптика.
Фізика твердого тіла

для студентів інженерних спеціальностей денної та
заочної (дистанційної) форм навчання



Полтава 2016

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

При підготовці до виконання лабораторної роботи студент повинен: записати в робочий зошит назву роботи, мету, прилади та обладнання, виписати основні формули для обчислення, накреслити таблиці вимірювань.

На початку лабораторного заняття викладач перевіряє якість підготовки студентів. Якщо якість підготовки задовільна, студент одержує дозвіл виконувати лабораторну роботу. В протилежному випадку студент до лабораторного заняття не допускається.

Після виконання роботи результати вимірювань необхідно показати викладачеві з наведенням прикладу обчислень досліджуваної величини і одержати підпис викладача.

Якщо результати неправильні, то вимірювання або обчислення необхідно повторити, врахувавши зауваження викладача, і знову показати йому результати.

До кожної виконаної лабораторної роботи з фізики потрібно:

- скласти письмовий звіт;
- захистити його, відповівши на поставлені викладачем запитання;

Питання для захисту наведені в інструкціях до кожної лабораторної роботи.

Звіт з лабораторної роботи повинен включати:

- назву лабораторної роботи, її номер і дату виконання;
- список приладів та обладнання;
- малюнок або схема лабораторної установки;
- робочі формули;
- таблиці з результатами вимірювання та приклади розрахунків;
- графіки (за необхідності);
- відповідь з вказанням розмірності фізичної величини та похибки вимірювання;
- висновки.

Лабораторна робота № **303**

ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ФОТОМЕТРІЇ

Мета роботи: визначення сили світла, питомої потужності джерела струму та перевірка законів освітленості.

Прилади та обладнання: установка з джерелом струму, люксметр, амперметр, вольтметр.

Теоретичні відомості

Світло діє на тіла внаслідок того, що воно переносить енергію – енергію електромагнітних хвиль. Методи вимірювання світлової енергії становлять розділ оптики, який називають **фотометрією**.

Для сприймання світлової енергії особливе значення має око. Тому важливо практично знати не просто кількість світлової енергії, що реєструється відповідними вимірювальними приладами, а й величину, яка безпосередньо оцінюється нашим оком. Для такої оцінки світлової енергії використовують особливу фізичну величину – світловий потік.

Світловим потоком Φ називають променисту енергію, яка проходить через деяку поверхню за одиницю часу і яка оцінюється за зоровим відчуттям:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}, \text{ (лм)}.$$

Світловий потік утворюється джерелом світла і діє на предмети, тому відповідно вводяться характеристики: сила світла джерела та освітленість.

Точковим джерелом світла називають джерело, лінійними розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанню до тіл, на яких оцінюється дія цього джерела. Напрям поширення світлового потоку задається з допомогою тілесного кута.

Тілесним кутом називають частину простору, обмежену конічною поверхнею (рис. 303.1).

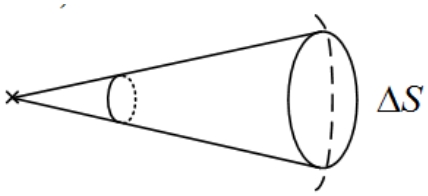


Рис. 303.1

Тілесний кут «вирізає» на поверхні сфери, центр якої у вершині кута, сферичний сегмент площею ΔS. **Величиною тілесного кута** ω називають відношення поверхні шарового сегмента ΔS до квадрата радіуса R сфери:

$$\omega = \frac{\Delta S}{R^2}, \text{ (ср)}.$$

Одиниця тілесного кута – *стерадіан* (ср) – тілесний кут, що вирізає на сферичній поверхні площу, яка за величиною дорівнює квадрату радіуса сфери. Повний тілесний кут, який охоплює весь простір навколо точки:

$$\omega = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi .$$

Силою світла J джерела називають величину, що чисельно дорівнює світловому потоку, який припадає на одиницю тілесного кута:

$$J = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \omega}, \text{ (кд)}.$$

Основною світловою одиницею в СІ є одиниця сили світла – *кандела* (кд). 1 кд дорівнює силі світла у заданому напрямку джерела, яке дає монохроматичне випромінювання з частотою $5.4 \cdot 10^{14}$ Гц, енергетична сила світла якого в цьому напрямку дорівнює 1/638 (Вт/ср).

Одиниця світлового потоку – 1 *люмен* (лм) – це світловий потік, що випромінюється точковим джерелом світла в 1 кд у тілесному куті в 1 ср.

Освітленість E – фізична величина, яка чисельно дорівнює світловому потоку, що падає на одиницю поверхні:

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S}, \text{ (лк)}.$$

Одиниця освітленості – 1 *люкс* (лк) – це освітленість поверхні, яка розміщена перпендикулярно до світла, що падає, на відстані 1 м від джерела світла силою в 1 кд.

Освітленість E, яку створює точкове джерело, можна визначити, знаючи силу світла I, відстань r від поверхні, на яку падає світло, й кут падіння. Причому кутом падіння α променя називають кут між променем, що падає, і перпендикуляром, який поставлено до поверхні в точці падіння променя (рис. 303.2). виходячи з того, що

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S} \text{ і } d\Phi = J \cdot d\omega,$$

а також

$$d\omega = \frac{dS_n}{r^2} = \frac{dS \cdot \cos\alpha}{r^2},$$

дістанемо

$$E = \frac{J}{r^2} \cdot \cos\alpha,$$

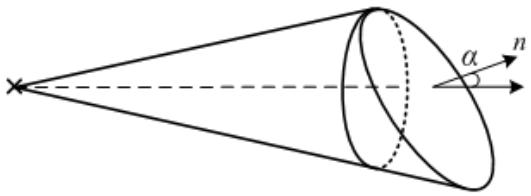


Рис. 303.2

що і є математичним записом **закону освітленості**: *освітленість поверхні прямо пропорційна силі світла джерела, косинусу кута падіння і обернено пропорційна квадрату відстані від джерела світла до поверхні*.

Економічність джерела світла характеризується кількістю електричної енергії, що припадає на одиницю сили світла за одиницю часу.

Потужність електричного струму, що припадає на одиницю сили випромінювального світла, називається **питомою потужністю електричної лампочки**:

$$\eta = \frac{P}{J},$$

де P – потужність (Вт); J – сила світла (кд), тобто $[\eta]$ = 1 Вт/кд. Питома потужність електричної лампочки залежить від матеріалу нитки, її конструкції й струму розжарювання (тобто від напруги на нитці).

Опис приладу

Прилад для фотометрування джерела світла (рис.303.3) – порожниста циліндрична труба, стінки якої для зменшення відбивання світла виготовлені з чорного матеріалу. Фотоелемент люксметра (приладу для вимірювання освітленості) нерухомо закріплений на одному з кінців труби. На протилежному кінці розташована електрична лампа розжарювання, яку можна переміщувати вздовж осі труби на задану викладачем відстань від фотоелемента. Відстань вимірюється з допомогою вимірювальної лінійки або шкали.

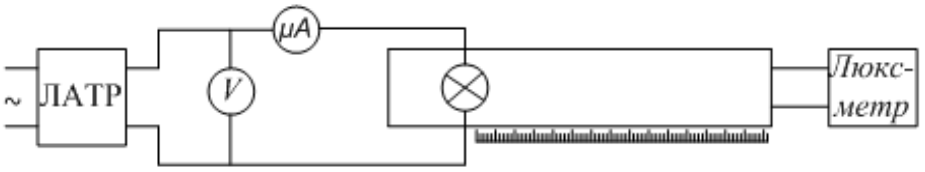


Рис. 303.3

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Визначення сили світла джерела світла.

1. Установити за допомогою кнопки на люксметрі межу вимірювання 0…100 лк.

2. Розташувати лампу розжарювання на відстані r = 10 см від люксметра, за допомогою ЛАТРа подати на неї таку напругу, щоб відхилення стрілки люксметра було максимальне (не більше ніж 100 лк). Виміряти освітленість E, що створює лампочка.

3. Збільшуючи відстань між лампочкою і фотоелементом, виміряти освітленість для 4-5 положень лампочки. Дані відстані лампочки від люксметра й освітленості записати в табл. 303.1.

Таблиця 303.1

Номер досліду	***r*, м**	***E*, лк**	***J*, кд**	**ΔJ, кд**	$\varepsilon = \frac{\Delta J_{сер}}{J_{сер}} \cdot 100\%$
1					
2					
3					
4					
5					
Сер.					

4. Обчислити силу світла J для кожного положення лампочки за формулою $J = E \cdot r^2$.

5. Обчислити середнє значення сили світла лампочки й відносну похибку вимірювання. Дані обчислень записати в таблицю.

Завдання 2. Визначити питому потужність електричної лампочки.

1. Розташувати лампочку на деякій відстані від люксметра (відстань вказує викладач).

2. Подати на лампочку максимальну напругу. Виміряти напругу вольтметром, силу струму I в колі амперметром, а також освітленість E. Дані вимірювань записати у табл. 303.2.

3. Змінюючи напругу на досліджуваній лампочці, виміряти силу струму, напругу й освітленість для 4-5 дослідів.

Таблиця 303.2

r = ____ м.

Номер досліду	***U*, В**	***I*, А**	***P*, Вт**	***E*, лк**	***J*, кд**	***η*, Вт/кд**
1						
2						
3						
4						
5						

4. Для кожного значення напруги обчислити силу світла ($J = E \cdot r^2$), потужність електричної лампочки ($P = I \cdot U$) й питому потужність ($\eta = P/J$). Дані обчислень записати в табл. 303.2.

5. На підставі дослідів побудувати графіки залежності:

а) сили світла від потужності $J = f(P)$;

б) питомої потужності від напруги на лампочці $\eta = f(U)$;

в) сили світла від прикладеної напруги $J = f(U)$.

Завдання 3. Перевірка законів освітленості.

1. За даними табл. 303.1 побудувати графік залежності освітленості, що створюється джерелом світла, від відстані до нього: $E = f(1/r^2)$.

2. За даними табл. 303.2 побудувати графік залежності освітленості від сили світла джерела $E = f(J)$.

Контрольні питання

1. Що називають точковим джерелом струму?
2. Дайте визначення світлового потоку, сили світла, освітленості. Назвіть їхні одиниці вимірювання.
3. Сформулюйте й запишіть математично закон освітленості.
4. Як визначити освітленість вашого робочого місця.

Лабораторна робота № **305**

ВИВЧЕННЯ ПРОЗОРОЇ ДИФРАКЦІЙНОЇ РЕШІТКИ

Мета роботи: ознайомитися з прозорою дифракційною решіткою, визначити сталу дифракційної решітки й довжину світлової хвилі.

Прилади та обладнання: дифракційна решітка, пристрій для вивчення дифракції.

Теоретичні відомості

Дифракцією світла називається явище відхилення світлових променів від прямолінійного поширення, якщо світло проходить через малі отвори, мимо непрозорого екрана (перешкод) або в оптично неоднорідному середовищі.

Дифракція світла практично спостерігається, якщо розміри перешкод чи отворів одного порядку з довжиною хвилі світла або місце спостереження дифракції знаходиться на великій відстані від перешкод.

Дифракцію поділяють на 2 види:

1. Перешкода чи отвір, на яких відбувається дифракція світла, перебуває на кінцевій відстані від екрана, де ведеться спостереження (**дифракція Френеля**). В цьому разі маємо дифракцію сферичних світлових хвиль.
2. Дифракція плоских світлових хвиль (**дифракція Фраунгофера**).

Закономірність дифракції можна пояснити на підставі принципу Гюйгенса-Френеля. Нехай на перешкоду – екран з отвором – падає плоска хвиля. Тоді за принципом Гюйгенса кожна точка отвору стає джерелом вторинних сферичних хвиль, які поширюються в однорідному середовищі. Обвідна цих сфер показує фронт хвиль у будь-який час і пояснює виникнення дифракції.

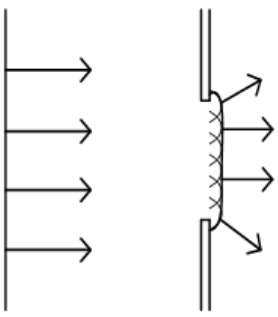


Рис. 305.1

Розглянемо дифракцію світла на дифракційній решітці (рис. 305.1).

Дифракційна решітка – це система паралельних щілин рівної ширини, які розділені непрозорими проміжками рівної ширини й лежать в одній площині. Найпростішою дифракційною решіткою є відполірована скляна пластинка, на поверхні якої за допомогою ділильної машини алмазним різцем нанесено ряд паралельних рівновіддалених непрозорих штрихів. Прозорі проміжки на склі між штрихами вільно пропускають світло і їх називають щілинами.

Сума ширини прозорого *в* й непрозорого *а* проміжків називається **періодом (сталою) дифракційної решітки**: $c = a + в$; $c = l / N$, де l – довжина решітки; N – кількість штрихів решітки.

Нехай на дифракційну решітку падає паралельний пучок світлових променів монохроматичного світла, який збирається у фокальній площині тонкої лінзи *L* (рис. 305.2). Світло падає по нормалі до решітки. Якби не було дифракції, то промені 1 і 2 сфокусувалися б у точці *D* на екрані. За рахунок

дифракції промені відхиляються від прямолінійного поширення на кут φ і фокусуються у точці K. Різниця ходу променів 1 і 2 від двох сусідніх щілин

$$\Delta = BC = (a + в)\cdot\sin\varphi$$

або

$$\Delta = c\cdot\sin\varphi. \qquad (1)$$

У фокальній площині ці промені інтерферують. Внаслідок інтерференції матимемо ряд головних максимумів, які виникають за умови

$$\Delta = \pm k\lambda \qquad (2)$$

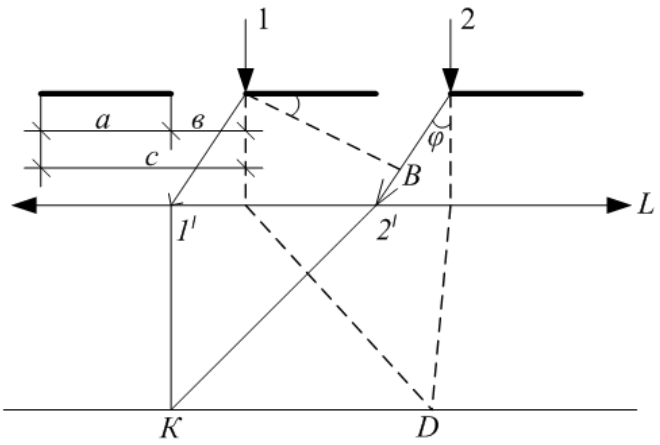


Рис. 305.2

З (1) і (2) випливає **умова дифракційного максимуму**: різниця ходу повинна дорівнювати цілому числу довжин хвиль ($\Delta = \pm k\lambda$):

$$c\cdot\sin\varphi = \pm k\lambda \qquad (3)$$

де $k = 0, 1, 2$ – порядок головного дифракційного максимуму.

При великій кількості щілин на дифракційній картині головні максимуми розділені темними проміжками – **дифракційними мінімумами**, умова яких визначається за формулою

$$c\cdot\sin\varphi = \pm (2k + 1)\cdot\lambda/2 \qquad (4)$$

З формули (3) видно, що положення максимумів залежить від довжини хвилі. Тому біле світло, що проходить через дифракційну решітку, розтягується в дифракційний спектр так, що внутрішнім його краєм є фіолетові, а зовнішнім – червоні промені. Схематичний вид дифракційних спектрів при освітленні решітки білим світлом наведено на рис. 305.3.

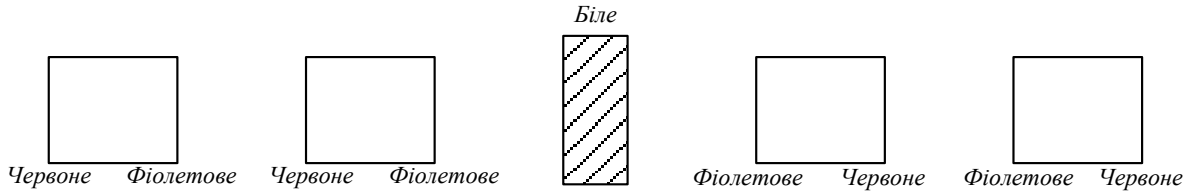


Рис. 305.3

При $k = 0$ умова максимуму (3) виконується для всіх довжин хвиль, тобто при $\varphi = 0$ в центрі картини утворюється біла смуга – нульовий максимум. При $k = 1$ по обидва боки від нього симетрично виникають максимуми першого, а при $k = 2$ – другого порядку і т.п. Слід зазначити, що для вищих порядків спектральні смуги різних довжин хвиль можуть накладатись одна на одну: для одного й того самого кута дифракції справедлива рівність $k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2$.

Основні характеристики дифракційної решітки – роздільна здатність і дисперсія. Роздільну здатність решітки можна визначити на основі критерію Релея, за яким дві монохроматичні спектральні лінії з довжинами хвиль λ і

$\lambda+d\lambda$ видно ще роздільно, коли головний максимум першої лінії попадає на найближчий до нього мінімум другої хвилі. Тоді **роздільна здатність решітки**

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = kN \tag{5}$$

де k – порядок спектра; N – кількість штрихів решітки.

Кутова дисперсія – це кутова відстань між двома спектральними лініями з різницею довжин хвиль $d\lambda$, тобто $D = d\varphi/d\lambda$. Диференціюючи (3), матимемо $c \cdot cos\varphi \; d\varphi = k \, d\lambda$, звідки

$$D = k / c \cdot cos\varphi \tag{6}$$

Опис установки

Схема установки, яка складається з дифракційної решітки, освітлювача з щілинами, екрана, наведена на рис. 305.4. Дивлячись на освітлювач через дифракційну решітку, побачимо на екрані різні порядки дифракційного спектра, які симетрично розташовані відносно центра екрана. На рисунку l – відстань від дифракційної решітки до екрана; x – відстань між спектральними лініями світла з однаковою довжиною хвилі в спектрі одного й того самого порядку, наприклад першого. Для використання формули (3) треба знати $sin\varphi$. Оскільки $l>>x$, то $\sin\varphi \approx tg\varphi \dfrac{x}{2l}$ (див. рис. 305.4). Підставивши це значення $sin\varphi$ в (3), матимемо формулу для підрахунку довжини хвилі світла:

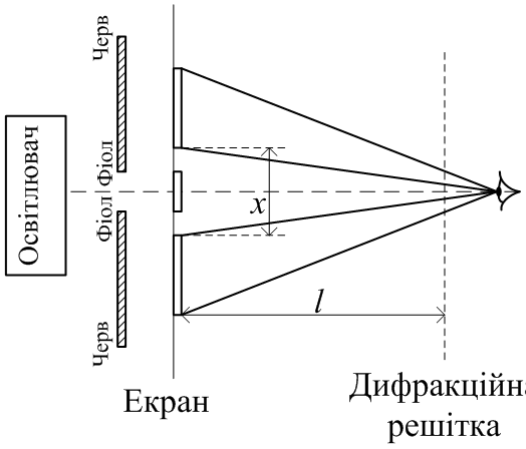


Рис.305.4

$$\lambda = \frac{x \cdot c}{2 \cdot k \cdot l}, \tag{7}$$

якщо відома стала c дифракційної решітки.

Порядок виконання роботи

1. Включити освітлювач у мережу та направити світло в напрямку екрану.
2. Спостерігаючи через дифракційну решітку і змінюючи відстань між решіткою й екраном, одержати чітку дифракційну картину на екрані. Виміряти відстань між решіткою й екраном. Дані вимірів записати у таблицю.
3. Виміряти лінійкою відстань між серединами смуг одного й того самого кольору (за вказівкою викладача) в спектрах першого й другого порядків. Дані вимірів записати у табл. 305.1.
4. Обчислити за формулою (7) довжину хвилі світла. Результати обчислень занести до таблиці 305.1.

Таблиця 305.1

c = _____ мм; колір – _____.

Порядок спектра	**Відстань *x* між серединами смуг, м**	***l*, м**	**$\lambda_{досл}$, м**	$\varepsilon = \frac{\lvert\lambda_{табл} - \lambda_{досл}\rvert}{\lambda_{табл}} \cdot 100\%$
Перший *k* = 1				
Другий *k* = 2				
Середнє				

5. Встановити дифракційну решітку з невідомою сталою c.
6. Виконати пп. 2 і 3 для іншого кольору.
7. Знайти значення сталої дифракційної решітки з формули (7), прийнявши довжину хвилі відповідного кольору за середнє табличне значення (додаток І). Дані вимірів та розрахунків записати у табл. 305.2.

Таблиця 305.1

Колір – _____.

Порядок спектра	**Відстань *x* між серединами смуг, м**	***l*, м**	***c*, мм**
Перший *k* = 1			
Другий *k* = 2			
Середнє			

8. Вимірявши довжину L дифракційної решітки, визначити число щілин на ній за формулою

$$N = L / c.$$

9. Обчислити роздільну здатність решітки для спектрів першого та другого порядків за формулою

$$R = k \cdot N.$$

Контрольні питання

1. Що називається дифракцією і коли вона виникає?
2. Записати умову дифракційного максимуму й мінімуму на решітці.
3. Яка відмінність між дифракційним і призматичним спектрами?
4. Що називається дифракційною решіткою та які її основні характеристики?

Лабораторна робота № **306**

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА

Мета роботи: вивчити інтерференційні смуги однакової товщини на прикладі кілець Ньютона, визначити довжину світлової хвилі.

Прилади та обладнання: система плоскоопукла лінза – плоскопаралельна пластинка, відліковий мікрометр, джерело світла.

Теоретичні відомості

Інтерференцією світла називається явище, яке здійснюється при накладанні двох або кількох когерентних хвиль і полягає у стійкому часі їхнього взаємного підсилення в одних точках простору й ослаблення в інших.

Хвилі називають **когерентними**, якщо вони мають однакову частоту, сталу різницю початкових фаз і однаковий напрям коливань. Внаслідок поперечності електромагнітних хвиль умова їхньої когерентності недостатня для утворення інтерференційної картини. Треба, щоб інтерферуючі хвилі були поляризовані в одній площині.

Когерентність – це узгоджене протікання у просторі й часі кількох коливань чи хвильових процесів, що проявляється при їх накладанні.

При експериментальному здійсненні когерентності треба враховувати просторову й часову когерентність. Часову когерентність зв’язують із ступенем монохроматичності хвиль чи коливань, а просторову – з розмірами джерела світла й геометрією інтерференційної схеми.

З повсякденного досліду видно, що при накладанні світла від двох незалежних джерел, навіть при застосуванні світлофільтрів для монохроматизації випромінювання, ніколи не вдається спостерігати явище інтерференції. Таким чином, хвилі, які випромінюють будь-які незалежні джерела світла завжди некогерентні, бо жодне реальне джерело не дає точно монохроматичного світла. Це пов’язано з тим, що атом випромінює світло протягом $\tau=10^{-8}$с, переходячи зі збудженого стану до нормального. Крім того, атоми випромінюють світло незалежно один від одного. Ось чому початкові фази різні. Група хвиль, що випромінює атом при цьому, називається **цугом хвиль**. Довжина цуга $L = \tau c = 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{8} = 3$ *м.*

Дістати систему когерентних світлових хвиль можна, якщо пучок світла, який виходить з джерела, яким-небудь способом розчленити на два пучки, а потім обидва пучки звести разом; при цьому світлові пучки проходять різні шляхи; цим створюється різниця ходу й при накладанні пучки інтерферують.

Якщо перша хвиля пройшла в середовищі з показником заломлення n_1 шлях l_1, а друга хвиля в середовищі з показником заломлення n_2 шлях l_2, то **оптична різниця ходу**

$$\Delta = n_2 l_2 - n_1 l_1 = L_2 - L_1,$$

де L_i – оптична довжина шляху.

Стаціонарна інтерференційна картина утворюється тоді, коли оптична різниця ходу менша довжини цуга хвиль: $\Delta < L$.

Умови інтерференційних максимумів і мінімумів такі:

$$\Delta = \pm m\lambda \text{ – максимум } (m = 0, 1, 2, 3, \ldots),$$
$$\Delta = \pm (2m + 1)\cdot\lambda/2 \text{ – мінімум } (m = 1, 2, 3, \ldots). \quad (1)$$

де m – порядок інтерференційного максимуму або мінімуму.

Інтерференція світла – досить поширене явище. Кожному доводилося спостерігати райдужне забарвлення мильних плівок, тонких плівок мінерального масла, кольори мінливості на поверхні загартованих деталей, вкритих тонким прозорим шаром окислів. Ці явища зумовлені інтерференцією світла в тонких плівках, яке виникає внаслідок накладання когерентних хвиль, що відбиваються від нижньої і верхньої поверхонь плівок.

Можливий випадок – інтерференція світла в тонких плівках змінної товщини. У цьому разі різниця ходу при освітленні паралельним пучком світла залежатиме від товщини плівки. Тому умови максимуму й мінімуму освітленості виконуватимуться при певних товщинах плівки. Такі інтерференційні смуги називають **смугами рівної (однакової) товщини.** Окремим випадком смуг рівної товщини є **кільця Ньютона**, які спостерігають у досліді, схема якого зображена на рис. 306.1.

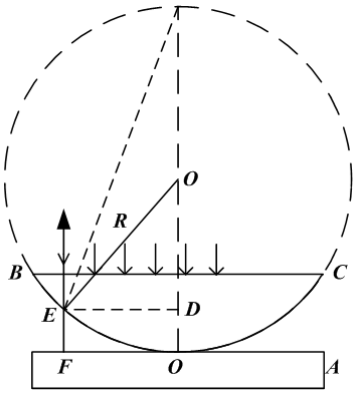


Рис. 306.1

Плоскоопукла лінза з великим радіусом R кривизни опуклої поверхні повернута цією поверхнею до плоскої пластини A і дотикається до неї в точці O. Паралельний пучок світла падає нормально на плоску поверхню BC лінзи й частково відбивається від верхньої (точка E) й нижньої (точка F) поверхонь повітряного проміжку між лінзою і пластиною. При накладанні відбитих хвиль виникає інтерференція в точці E. Оптична різниця ходу між променями, відбитими від верхньої і нижньої поверхонь повітряного зазора на відстані $DE = r$ від точки O,

$$\Delta = 2EF + \lambda/2$$

(член $\lambda/2$ враховує зсув за фазою на π при відбиванні світла від поверхні пластини). Оскільки $\frac{DO}{DE} = \frac{DE}{DM}$, де $DO = EF$, $DE = r$, $DM = 2R - EF \approx 2R$, бо $EF = \lambda/2 - \lambda/4 << 2R$, отже

$$EF = \frac{r^2}{R},\ \Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Геометричне місце точок однакової товщини EF – є коло. Зі співвідношення (2) і умов (1) випливає, що радіуси m світлого ($r_m^{св}$) й темного (r_m) кілець у відбитому світлі

$$r_m^{св} = \sqrt{(2m-1)\cdot R\cdot\frac{\lambda}{2}}\ , (m = 1, 2, 3, \ldots);$$

$$r_m = \sqrt{R \cdot \lambda \cdot m}\,,\ (m = 0, 1, 2, 3, \ldots);$$

Очевидно, в світлі, що проходить, $r_m^{св} = \sqrt{m \cdot R \cdot \lambda}$ ($m = 0, 1, 2, \ldots$) і $r_m = \sqrt{(2m-1) \cdot R \cdot \frac{\lambda}{2}}$ ($m = 1, 2, 3, \ldots$).

Радіуси кілець Ньютона зростають пропорційно кореню квадратному від їх номера, тобто чим далі від центра, тим менша різниця між радіусами сусідніх кілець.

Якщо прилад освітлювати білим світлом, для деяких довжин хвиль виконується умова максимуму відбивання, а для деяких – мінімуму. Тому кільця Ньютона будуть забарвлені.

Вимірюючи радіуси кілець та знаючи радіус кривизни лінзи, визначають довжину хвилі світла, що освітлює прилад. Через те, що сферична лінза не дотикається ідеально до плоскої поверхні пластинки через наявність пилинок, для визначення λ користуються такою формулою:

$$\lambda = \frac{(r_m - r_k)(r_m + r_k)}{R(m-k)},$$

де r_m, r_k – радіуси m- і k-го кілець, R – радіус кривизни лінзи.

Інтерференція світла широко використовується в техніці для вимірювання розмірів тіл, контролю якості шліфування пластин лінз, для просвітлювання оптики.

Опис установки

Основною частиною приладу для вимірювання довжини хвилі (рис. 306.2) є плоскоопукла лінза з паралельною пластиною і мікрометр, зв'язаний з рухомою дротинкою, переміщуючи яку мікрометричним гвинтом, вимірюємо радіуси кілець.

Джерелом світла є лампа розжарювання або сонячне світло.

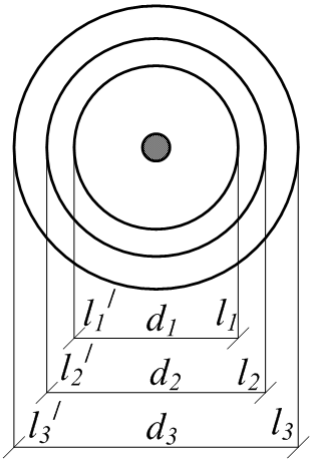


Рис. 306.2

Порядок виконання роботи

1. Підібрати таке положення пристрою відносно джерела світла, щоб кільця Ньютона були чіткими.

2. Розташувати з допомогою гвинта мікрометра пересувну дротину на третє кільце Ньютона якогось кольору (якщо в роботі не використовуються світлофільтри), наприклад зліва, потім на друге й перше. Виміряти по шкалі мікрометра її положення (l_3', l_2' і l_1'), а потім перемістити дротину й зробити такі самі виміри положень кілець справа (l_1, l_2, l_3). Зробити виміри у зворотному напрямку, тобто l_3, l_2, l_1, а потім l_1', l_2', l_3'. Дані вимірів записати в табл. 306.1.

3. Визначити радіус кілець Ньютона за формулою $r_i = \frac{\left| l_i - l_i' \right|}{2}$ і результати обчислень записати в табл. 306.1.

Таблиця 306.1

R = ____ м

Номер кільця	І відлік			ІІ відлік			Середній радіус кільця, *r*, мм
	ліве *l*, мм	праве *l'*, мм	Радіус кільця, мм	ліве *l*, мм	праве *l'*, мм	Радіус кільця, мм	
1							
2							
3							

4. Записати у табл. 306.2 середнє значення радіуса r_m та r_n (r_m, r_n – радіус відповідно більшого й меншого кільця), наприклад r_3 та r_2, й обчислити довжину хвилі світла за формулою

$$\lambda = \frac{(r_m - r_n)(r_m + r_n)}{R(m-n)}.$$

Таблиця 306.2

Номери кілець		Радіуси кілець, м		λ, м
m	***n***	r_m	r_n	
2	**1**			
3	**2**			
3	**1**			

Контрольні питання

1. Яке явище називають інтерференцією?
2. Назвати умови інтерференційного максимуму й мінімуму.
3. Записати геометричну й оптичну різницю ходу променів у тонкій плівці при утворенні кілець Ньютона.
4. Назвати умови когерентності хвиль.
5. Назвати умови інтерференції світлових хвиль.

Лабораторна робота №313
ВИВЧЕННЯ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА

Мета роботи: визначити вольт-амперні характеристики й параметри тунельного діода.

Прилади та обладнання: установка для вивчення тунельного діода, вольтметр, міліамперметр.

Теоретичні відомості

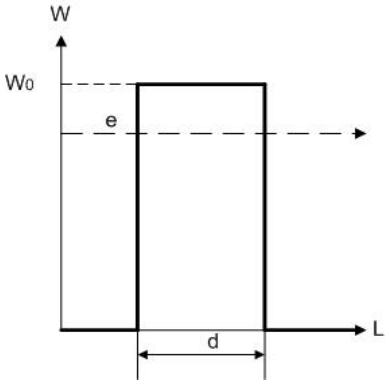


Рис. 313.1

Тунельним називається діод, в основі якого лежить тунельний механізм переносу електронів через p-n перехід. ***Тунельний ефект*** – це квантово-механічне явище, зумовлене хвильовими властивостями електронів, яке полягає в проникненні електронів через потенціальний бар'єр, висота якого перевищує енергію електрона (рис.313.1).

Імовірність тунельного переходу визначається за виразом

$$p = a \cdot e^{-\frac{b}{E} W_0^{3/2}}, \qquad (1)$$

де a і b – сталі; E – напруженість поля на переході; W_0 – висота потенціального бар'єра.

Із формули (1) видно, що чим більша напруженість поля й нижчий потенціальний бар'єр, тим більша ймовірність тунельних переходів електронів. Для германієвих діодів при $E = 10^7$ В/м через 1 см^2 проходить один електрон за секунду, а при $E = 10^8$ В/м – 10^{12} електронів.

Для здійснення тунельного ефекту в діоді необхідно виконати дві умови:

1) перехід повинен бути вузьким, його ширина d не повинна бути більшою ніж 10^{-8} м, бо тільки в такому випадку контактна різниця потенціалів може створити сильне електричне поле;

2) з обох боків переходу повинні існувати ізомерні енергетичні рівні – вільні й зайняті.

Тоді електрон переходить із зайнятого на вільний рівень іншої зони без зміни енергії.

Для отримання тунельного ефекту використовують напівпровідниковий матеріал (германій, арсенід галію) з дуже великою концентрацією домішок (до 10^{21} домішкових атомів в 1 см^3, тоді як у напівпровідниках концентрація домішок не перебільшує 10^{15} см$^{-3}$). Такі ***напівпровідники називають виродженими***, а їх властивості близькі до властивостей металу.

В наслідок високого вмісту домішок в обох областях напівпровідникового кристалу ширина p-n переходу дуже мала (не більше 0,1 мкм), що призводить до підвищення напруженості електричного поля на переході до $E \approx 10^8$ В/м. За таких умов існує імовірність того, що електрон, що рухається у бік вузького

бар'єру, перейде через нього і займе вільний стан по інший бік бар'єра з тією ж самою енергією.

Як відомо, збільшення концентрації донорних домішок зміщує рівень Фермі вгору, а збільшення акцепторних домішок – вниз відносно середини забороненої зони. Отже при великих концентраціях домішок рівень Фермі розташовується в зоні провідності у n-напівпровіднику, та в валентній зоні у p-напівпровіднику. При відсутності зовнішнього електричного поля рівні Фермі W_{Fn} та W_{Fp} співпадають (рис. 313.2а).

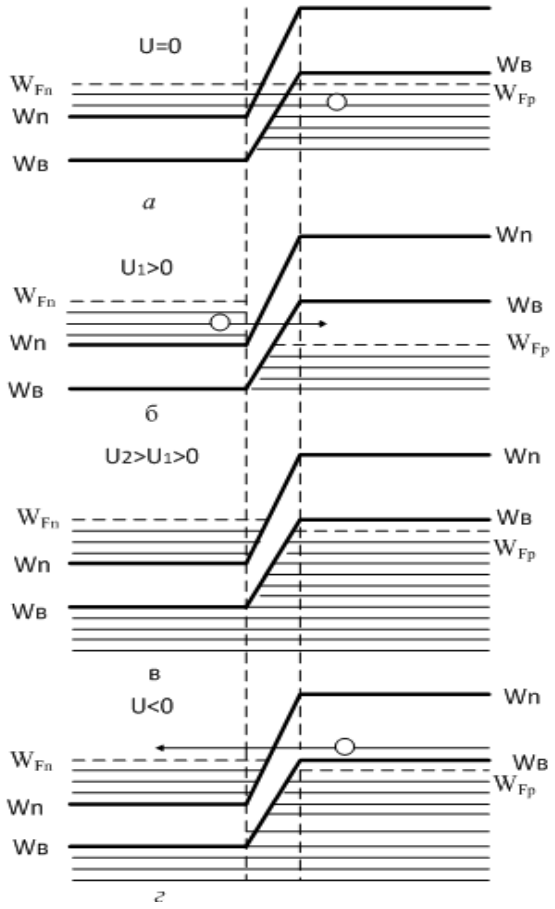


Рис. 313.2. Енергетичні діаграми *p-n*-переходу при тунельному ефекті

В середині p-n переходу межі електричних зон викривляються. У відсутності зовнішнього електричного поля ($U = 0$) проти зайнятих рівнів у зоні провідності n-напівпровідника розташовані також зайняті рівні у валентній зоні p-напівпровідника, тому тунельного переходу не відбувається.

Якщо на p-n перехід подати невелику напругу у прямому напрямку, то висота потенціального бар'єра і перекриття зон зменшиться (рис.313.2б). Енергетична діаграма n-напівпровідника підніметься вгору, а у напівпровіднику p-типу опуститься вниз. В цьому випадку виникне дифузійний рух електронів та дірок провідності, а також тунельний струм, бо виникли при цьому вільні рівні для електронів у валентній зоні p-напівпровідника.

Величина тунельного струму буде залежати від прикладеної напруги, а дифузійний струм в p-n переході, який обумовлений неосновними носіями, дуже малий.

Вольт-амперна характеристика p-n переходу з тунельним ефектом наведена на рис. 313.3.

Особливість вольт-амперної характеристики полягає в тому, що при прямій напрузі, яка перевищує напругу U_1, прямий тунельний струм різко зменшується. Це можна пояснити так. Збільшення прямої напруги призводить до зростання тунельного струму, і при цьому зменшується напруженість електричного поля в p-n переході. Тому при деякому значенні прямої напруги U_2 (рис. 313.2в) коли напруженість електричного поля в p-n переході різко зменшується, тунельний струм припиняється, а p-n перехід набуває звичайні

властивості і через нього проходить дифузійний струм (на рис. 313.3 показаний пунктирною лінією в інтервалі після U_2).

При подачі на p-n перехід зворотної напруги енергетична діаграма n-напівпровідника опускається вниз, а в p-напівпровіднику піднімається вгору (рис. 313.2г). Тому ширина зони перекриття збільшується, виникають умови для вільного тунельного переходу валентних електронів p-області в зону провідності n-напівпровідника. Це означає, що через діод проходить зворотній тунельний струм, величина якого також залежить від зворотної напруги, і одностороння провідність у тунельного діода відсутня.

До найважливіших параметрів тунельного діода належить диференціальний опір $R_Д = -\frac{\Delta U}{\Delta I}$, та інтегральний від'ємний опір $R_i = \frac{U_{max} - U_{min}}{I_{max} - I_{min}}$, які визначаються на ділянці (А-В) вольт-амперної характеристики (рис. 313.3).

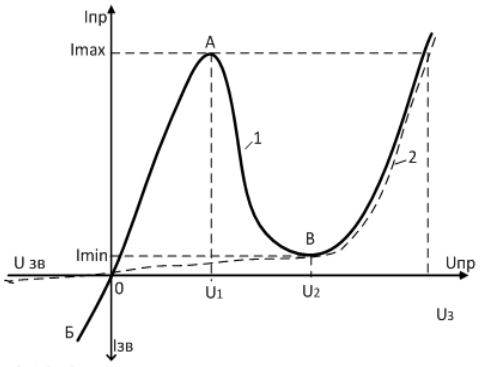


Рис. 313.3. Вольт-амперна характеристика тунельного діода

Тунельні діоди знайшли широке застосування в електричних обчислювальних та інших радіотехнічних пристроях. Таке використання тунельних діодів пояснюється їх надзвичайно малою інертністю (тунельний перехід електронів через потенціальний бар'єр проходить усього за 10^{-12}-10^{-14} с). Тунельні діоди застосовуються як швидкодіючі перемикачі. В електричному колі діод працює як вентиль, який при зменшенні напруги прямого зміщення відкривається, а при збільшенні – закривається.

Опис установки

Установка для вивчення тунельного діода виконана в закритій моделі. На лицьовій панелі корпуса розміщені міліамперметр, вольтметр, кнопки вмикання та навантажувальних опорів, регулятор напруги. Елементи схеми розташовані в середині корпусу. Електрична схема установки наведена на рис. 313.4, де *Б* – джерело постійного струму; *РН* – регулятор напруги; R_1 – обмежуючий опір; R_2', R_2'', R_2''' – навантажувальні опори; *В* – перемикач положень; *Д* – тунельний діод; *mA* – міліамперметр; *V* – вольтметр.

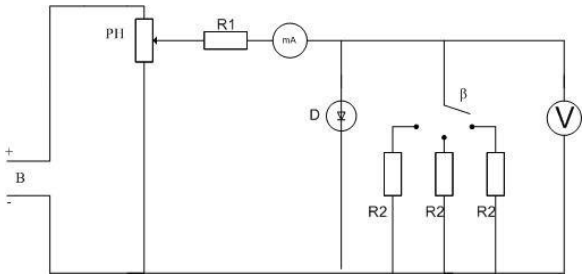


Рис. 313.4 Схема установки

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку в мережу змінного струму і подати напругу за допомогою червоної кнопки.

2. За допомогою чорної кнопки включити навантажувальний опір 10 Ом і регулятором напруги змінювати напругу на тунельному діоді через 0,04–0,05 В від 0 В до 0,8 В, вимірюючи значення сили струму за показами міліамперметра при кожному значенні поданої напруги. Результати вимірювань записати у таблицю.

3. Повторити п.2 для двох інших навантажувальних опорів.

Таблиця 313.1

№	R_2' = 10 Ом		R_2'' = 100 Ом		R_2''' = 200 Ом	
п/п	*U*, В	*I*, мА	*U*, В	*I*, мА	*U*, В	*I*, мА
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

4. За результатами дослідів побудувати на міліметрівці вольт-амперні характеристики $I = f(U)$ для різних значень опорів R_1, відкладаючи по осі абсцис напругу U, а по осі ординат – силу струму I.

5. Визначити диференціальний та інтегральний опори діода за формулами:

$$R_Д = -\frac{\Delta U}{\Delta I};\ R_i = \frac{U_{max} - U_{min}}{I_{max} - I_{min}},$$

де U_{max} і I_{max}; U_{min} і I_{min} – відповідно значення напруги та сили струму, що відповідають положенню екстремумів на вольт-амперній характеристиці; ΔU та ΔI –зміна напруги та сили струму на похилій ділянці вольт-амперної характеристики.

За формулою $S = \frac{I_{max}}{I_{min}}$ визначити крутизну вольт-амперної характеристики.

Контрольні запитання

1. Яка суттєва відмінність тунельного діода від звичайного напівпровідникового діода?
2. У чому суть явища тунельного ефекту?
3. Поясніть вольт-амперну характеристику тунельного діода.
4. Як визначити середній від'ємний опір тунельного діода?
5. Де застосовуються тунельні діоди?

Лабораторна робота №314
ВИВЧЕННЯ ФОТООПОРІВ

Мета роботи: вивчити вольт-амперні, світлові характеристики фотоопору, обчислити питому чутливість.

Прилади й обладнання: установка з досліджуваним фотоопором ФС-К2, джерело світла, джерело постійного струму, мікроамперметр, вольтметр, потенціометр.

Теоретичні відомості

Фотоелектричними називаються прилади, принцип дії яких оснований на явищах, що відбуваються при дії енергії світлових променів на напівпровідники.

Фотоелектричні прилади поділяються на дві основні групи: фоторезистори й напівпровідникові фотоелементи (фотогальванічні елементи). ***Фоторезистор***, або ***фотоопір***, являє собою напівпровідниковий прилад, електричний опір якого змінюється під дією світлового потоку. Це зумовлено тим, що в результаті поглинання напівпровідником променистої енергії в ньому виникають додаткові рухомі носії заряду (пари «електрон-дірка»), які створюють додаткову електропровідність. Додаткова провідність виникає тільки тоді, коли електрон валентної зони або домішкового донорного рівня, одержуючи енергію $h\nu$ фотона, може перейти в зону провідності; у напівпровіднику n-типу з донорного рівня в зону провідності або у p-напівпровіднику електрон з валентної зони переходить на рівень акцептора.

В наслідок цього провідність напівпровідника зростає на величину

$$\Delta\sigma = e(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$$

де e – заряд електрона, μ_n, μ_p – відповідно рухливість електронів і «дірок», Δn, Δp – відповідно концентрація електронів і «дірок», що виникають у напівпровіднику під дією світла. Додаткова провідність напівпровідника під дією світла називається *фотопровідністю*.

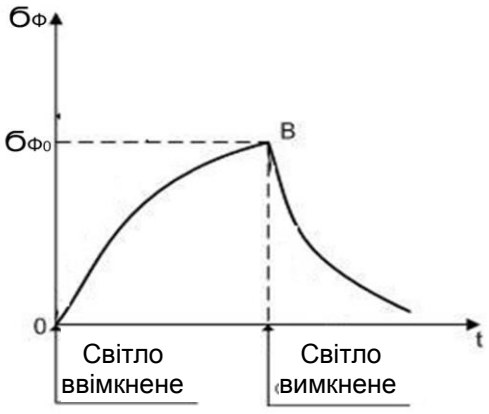


Рис. 314.1 Залежність провідності фоторезистора при включенні і виключенні світла.

Явище фотопровідності пояснюється внутрішнім фотоефектом – явищем перерозподілу електронів за енергетичними рівнями під дією електромагнітного випромінювання в напівпровідниках та діелектриках.

Умова внутрішнього фотоефекту

$$h\nu = \Delta E \qquad (1)$$

де $h\nu$ – енергія фотона, h – стала Планка, $\nu = \frac{c}{\lambda}$ – частота світла, ΔE – ширина забороненої зони власного напівпровідника або енергія активації для домішкового напівпровідника.

З цієї формули (1) можна визначити червону межу фотопровідності, тобто максимальну довжину хвилі, при якій світло ще є фотоелектрично активним

$$\lambda_{черв} = \frac{c}{\nu_{черв}} = \frac{c\mathrm{h}}{\Delta \mathrm{E}}$$

Для чистих напівпровідників червона межа фотопровідності припадає на видиму частину спектра, для домішкових – на інфрачервону ділянку.

В напівпровіднику, що знаходиться в темряві, при даній температурі існує деяка концентрація носіїв заряду за рахунок теплового збудження. Ці носії зумовлюють струм провідності, який називають струмом у темряві і позначають $i_т$. Світловий потік, що падає на напівпровідник, може генерувати додаткові носії заряду. Загальний ***струм*** провідності в цьому випадку називають ***світловий*** і позначають $i_{св}$; різницю між струмом при освітленні та в темряві називають ***фотострумом провідності***: $i_ф = i_{св} - i_т$.

На рис. 314.1 показано характер зростання (крива ОВ) і спаду (крива ВС) фотопровідності напівпровідника після вмикання й вимикання джерела світла. Зростання фотопровідності проходить поступово і досягає стаціонарного значення тільки після деякого проміжку часу. Розрахунок показує, що стаціонарна фотопровідність прямо пропорційна часу життя τ_n надлишкових носіїв заряду. З цієї точки зору вигідно прагнути до одержання максимально високих значень τ_n.

Але чим більший час τ_n, тим повільніше йде спад фотопровідності, тобто тим більш інерційним буде фотоприймач випромінювання.

При збудженні фотопровідності електрони з валентної зони перерозподіляються по енергетичним рівням і обумовлюють провідності. Залежність фотопровідності ряду напівпровідників від освітленості використовується в фотоопорах (фоторезисторах), які одержали широке застосування.

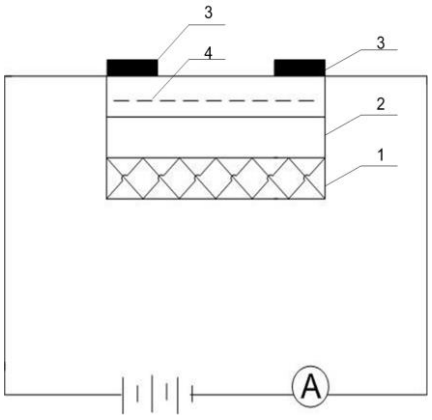


Рис. 314.2 Схема одного з типів фоторезистора

На рис. 314.2 показано схему одного з типів фоторезисторів. Він складається з тонкого напівпровідникового шару 2, нанесеного на ізолюючу підкладку 1, металевих електродів 3, за допомогою яких фоторезистор вмикається в електричне коло, і захисного лакового покриття

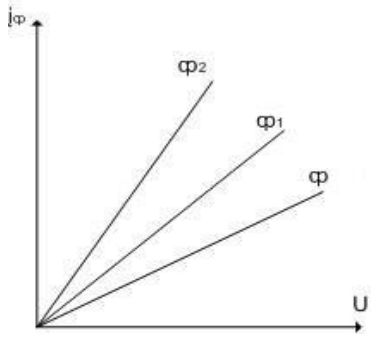


Рис. 314.3 Вольт-амперна характеристика фоторезистора (Ф<Ф1<Ф2)

4. Для виготовлення сучасних фотоопорів використовують найбільш фоточутливі напівпровідники (кремній, германій, селен), які мають чутливість в інфрачервоній ділянці спектра до λ=4 мкм.

Основні характеристики фоторезисторів

1. ***Вольт-амперна***, яка характеризує залежність фотоструму I_ϕ від прикладеної напруги U (при сталому світловому потоці Φ). Для фоторезисторів ця залежність практично лінійна і підпорядкована закону Ома. На рис. 314.3 зображені характеристики для значень світлового потоку Φ, Φ_1, Φ_2.

2. ***Світлова***, яка характеризує залежність фотоструму i_ϕ від падаючого світлового потоку Φ сталого спектрального складу. Напівпровідникові фоторезистори мають нелінійну світлову характеристику (рис. 314.4). Найбільша їх чутливість – при малих освітленнях. Це дозволяє рекомендувати фоторезистори для вимірів дуже малих інтенсивностей випромінювання.

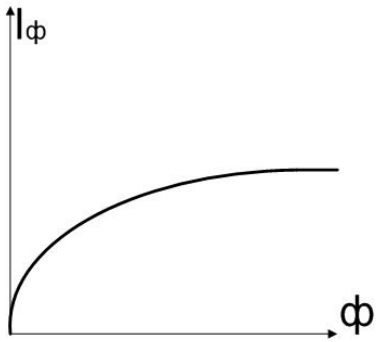


Рис. 314.4 Залежність фотоструму від падаючого світлового потоку

3. ***Спектральна,*** яка характеризує чутливість фоторезистора в процентах при дії на нього потоку випромінювання сталої потужності при заданій довжині хвилі λ. Спектральна характеристика визначається матеріалом, котрий використано для виготовлення фоточутливого елементу.

Важливі параметри фоторезисторів – питома γ_0 та інтегральна γ чутливості. ***Питома чутливість*** γ_0 – це відношення фотоструму до добутку падаючого на фоторезистор світлового потоку й прикладеної до нього напруги.

$$\gamma_0 = \frac{i_\phi}{\Phi \mathrm{U}},$$

де i_ϕ – фотострум, який дорівнює різниці струмів, що протікають по фоторезистору в темряві і при освітленні, мкА; Φ – падаючий світловий потік, лм; U – напруга, що прикладена до фоторезистора, В. ***Інтегральна чутливість*** γ – добуток питомої чутливості й граничної робочої напруги. Чутливість називають інтегральною, тому що вимірюють її при освітленні фоторезистора складним світлом.

Основна перевага фоторезистора порівняно з вакуумними фотоелементами – велика світлова чутливість, і їх можна використовувати в порівняно потужних колах, строк їх служби практично необмежений. Недоліки – їх інерційність (при зміні освітлення струм встановлюється через деякий час), чутливість до зміни температури, нелінійність світлової характеристики.

Опис установки

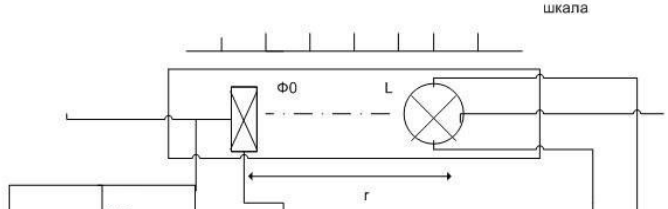


Рис.314.5 Електрична схема дослідження властивостей фотоопорів.

Установка для вивчення фотоопорів являє собою циліндричну трубу, внутрішні стінки якої поглинають світло. Лампа розжарювання L, яка є точковим джерелом світла, закріплюється з одного краю труби; на протилежному кінці труби знаходиться фоторезистор ФО, який можна переміщувати вздовж осі циліндра і закріплювати на бажаній відстані від джерела світла. Ця відстань вимірюється по шкалі, розміщеній на поверхні циліндричної труби. Напруга, що подається на фотоопір, регулюється потенціометром П і вимірюється вольтметром V. Лампа розжарювання вимикається безпосередньо в мережу. Сила струму вимірюється міліамперметром.

Виконання роботи

Таблиця 314.1. (*r* = ___ *см*)

№ п/п	**$U_Л$ = 4В**		**$U_Л$ = 4,5 В**	
	$U_Ф$, В	**I, мА**	**$U_Ф$, В**	**I, мА**
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Таблиця 314.2. (*r* = ___ *см;* $U_Ф$ = ___ *В*)

№ п/п	**$U_Л$ = 4В**		**$U_Л$ = 4,5В**	
	R, кОм	**I, мА**	**R, кОм**	**I, мА**
1				
2				

3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Контрольні запитання

1. У чому суть явища внутрішнього фотоефекту у власних і домішкових напівпровідниках з точки зору зонної теорії.
2. Пояснити умову червоної межі фотопровідності.
3. Як улаштований фотоопір?
4. Пояснити існування темного струму через фотоопір.
5. Чим зумовлена велика інерційність фотоопорів?
6. Назвіть основні характеристики фотоопорів, їх недоліки і переваги.
7. Де застосовують фотоопори?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 316
ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА

Мета роботи: визначення вольт-амперної характеристики германієвого діода та коефіцієнта випрямлення.

Прилади й обладнання: установка для дослідження напівпровідникового діода, мікроамперметр, вольтметр.

Теоретичні відомості

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий пристрій з одним p-n переходом. ***p-n перехід*** – це межа стикання двох напівпровідників, один з яких має електронну, а другий – діркову провідність.

Напівпровідник n-типу можна одержати, якщо в кристал з 4-валентних атомів (наприклад, германію) додати невелику кількість 5-валентної домішки (наприклад, фосфору). Чотири валентних електрона домішки обумовлять хімічний зв'язок з 4 сусідніми атомами германію. Один же валентний електрон атома домішки практично не приймає участі у хімічному зв’язку і його легко відірвати від атома домішки за рахунок енергії теплового руху. З точки зору зонної теорії це відповідає переходу електрона з донорного рівня в зону провідності. Цей перехід електрона більш імовірний, ніж з валентної зони в зону провідності, який супроводжується утворенням дірки в валентній зоні. Тому в напівпровіднику n-типу електронів більше, ніж дірок і вони є основними носіями заряду, а дірки – неосновними.

Напівпровідник p-типу можна одержати, якщо у кристал 4-валентного германію, наприклад, ввести невелику кількість 3-валентної домішки (індію, бору, тощо) тоді один хімічний зв’язок з атомом домішки не заповнений і для цього електрон позичається у сусіднього атома основного напівпровідника, у якого утворюється не скомпенсований позитивний заряд або дірка, яких у напівпровіднику більше ніж електронів і дірки є основними носіями електричних зарядів, а електрони – неосновними.

Розглянемо процеси, що відбуваються при стиканні напівпровідника n-типу і p-типу. За рахунок дифузії електрони, які є основними носіями струму в n-напівпровіднику, будуть дифундувати в напівпровідник p-типу. Дифузія ж дірок буде відбуватись у зворотному напрямі (рис. 316.1). При цьому в напівпровіднику n-типу поблизу межі стикання утворюється нескомпенсований позитивний об’ємний заряд іонізованих донорів. В p-напівпровіднику відповідно виникає від’ємний заряд акцепторних іонів. Ці об’ємні заряди створюють на межі стикання подвійний електричний шар, тобто виникає внутрішнє електричне поле, яке напрямлене з n-напівпровідника в p-напівпровідник (рис.316.1). Контактна

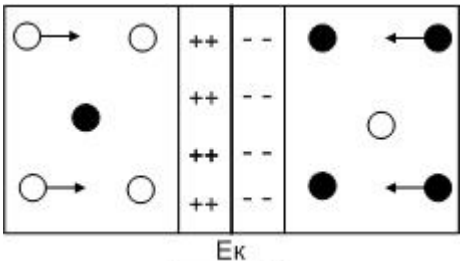


Рис. 316.1 p-n перехід в рівноважному стані.

різниця потенціалів становить приблизно кілька десятих вольта, товщина подвійного електричного шару порядку $10^{-7} – 10^{-6}$ м. Напруженість електричного поля в області переходу $E_к$ сягає 10^8 В/м. Рух основних носіїв заряду створює дифузійний струм.

Подвійний електричний шар є потенціальним бар'єром для основних носіїв струму. Неосновні ж носії струму будуть рухатись до межі розподілу під дією внутрішнього електричного поля, створюючи ***дрейфовий струм***.

В напівпровідниковому пристрої встановиться теплова рівновага, коли дифузійний струм основних носіїв заряду буде дорівнювати дрейфовому струму неосновних носіїв заряду, і струм через p-n перехід в цьому випадку не буде проходити.

Порушити рівновагу електронно-діркового переходу можна зовнішнім електричним полем. Характер проходження струму і його величина залежить не тільки від величини прикладеної напруги, а й від її полярності.

Розглянемо випадок, коли зовнішнє поле протилежне за знаком контактному електричному полю p-n переходу (рис. 316. 2), тобто зовнішнє поле напруженістю $\vec{E}$ напрямлено на зустріч власному полю $\vec{E}_к$. Таке ***включення*** називають ***прямим***. Воно призводить до зменшення висоти потенціального бар'єра для основних носіїв заряду і вони будуть рухатись до межі розподілу напівпровідників і компенсувати заряд домішок.

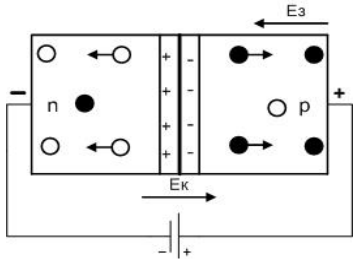


Рис.316.2 P-n перехід при прямому

Тому ширина p-n переходу зменшується. Частина основних носіїв заряду, що створюють дифузійний струм, можуть пройти через порівняно вузький і невисокий потенціальний бар'єр, який розділяє n- та p- напівпровідники, тобто порушується рівновага між дифузійним і дрейфовим струмом, і через перехід проходить прямий струм

$$I_{пр} = I_{диф} – I_{др} > 0$$

При збільшенні зовнішньої прямої напруги прямий струм через перехід зростає і може сягати великих значень, бо він обумовлений, в основному, рухом основних носіїв заряду, концентрація яких в обох областях велика.

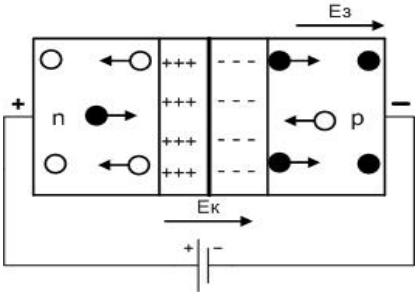


Рис.316.3 p-n перехід при зворотному включенні

Розглянемо тепер властивості p-n переходу, до якого підключене зовнішнє поле, яке за напрямом співпадає з внутрішнім контактним полем (рис. 316.3). В цьому випадку потенціальний бар'єр зростає, кількість основних носіїв, здатних його здолати, різко зменшується, бо вони тепер під дією зовнішнього поля будуть рухатись від межі розподілу, тобто товщина p-n переходу зростає.

Для неосновних носіїв (дірок в n-напівпровіднику та електронів в p-напівпровіднику) напрямок зовнішнього і внутрішнього поля сприяє

їх руху до межі стикання напівпровідників тобто для них потенціальний бар'єр відсутній. Отже при зворотному включенні переважну роль відіграє дрейфовий струм, тобто струм, обумовлений рухом зарядів під дією електричного поля. Оскільки концентрація неосновних зарядів у напівпровідниках в $\approx 10^6$ раз менша в порівнянні з концентрацією основних носіїв заряду, то вони створюють невеликий зворотній струм. ***Напрямок*** зовнішнього поля, при якому струм практично не проходить через p-n перехід називають ***зворотним (запірним)***.

Властивості p-n переходу наглядно ілюструються його вольт-амперною характеристикою (залежністю сили струму від напруги) яка наведена на рис. 316. 4 і показує, що величина струму через p-n перехід залежить від напряму прикладеної напруги та її величини. Аналітично вольтамперна характеристика p-n переходу визначається формулою

$$I = I_0\left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1\right),$$

де I_0 – зворотній струм насичення p-n переходу, який визначається фізичними властивостями напівпровідникового матеріалу, U – напруга, яка прикладена до p-n переходу (прямого напрямку $U > 0$; для зворотного $U < 0$), e – заряд електрона, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура.

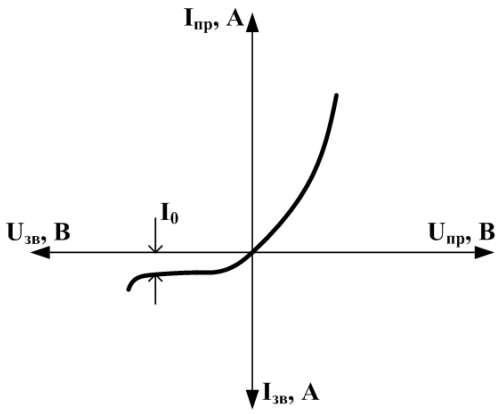


Рис.316.4 Вольтамперна характеристика напів-провідникового діоду

При збільшенні зворотної напруги відбувається пробій p-n переходу, при якому зворотний струм різко збільшується.

Розрізняють електричний (зворотний) і тепловий (незворотний) пробої. Отже, з аналізу вольт амперної характеристики слідує, що напівпровідниковий, як і звичайний діод має односторонню провідність.

Істотні переваги напівпровідникових діодів забезпечили їм значне поширення. Вони мають невеликі габарити, практично необмежений строк служби, високий ККД (до 99%), відсутність джерела для кола розжарювання, високу експлуатаційну надійність. Основна галузь застосування діодів – схема випрямляючих пристроїв. Крім того, вони широко використовуються в різних схемах автоматики, електроніки, радіотехніки. Сучасні діоди за типом матеріалу, з якого вони виготовлені поділяють на дві основні групи: германієві й кремнієві, а за конструктивно-технологічними ознаками – на площинні й точкові. Завдяки відносно великій площині p-n переходу, площинні ***діоди*** витримують значний струм, тому їх іноді називають ***силовими*** й використовують для випрямлення струму.

Випрямляючі властивості діодів характеризуються коефіцієнтом випрямлення α, який дорівнює відношенню прямого струму $I_{пр}$ до зворотного $I_{зв}$, що вимірюються при однакових значеннях прямої $U_{пр}$ і зворотної $U_{зв}$

напруг. Чим більше α, тим сильніше виявляється властивість однобічної провідності діода, та краще він працює у випрямляючих схемах.

Опис установки

Установка для дослідження властивостей напівпровідникового діода конструктивно виконана в закритій моделі (рис.316.5). На панелі корпуса розташовані амперметр, вольтметр, червона кнопка, за допомогою якої подається напруга на напівпровідниковий діод, дві кнопки чорного кольору для прямого та зворотного включення, регулятор напруги.

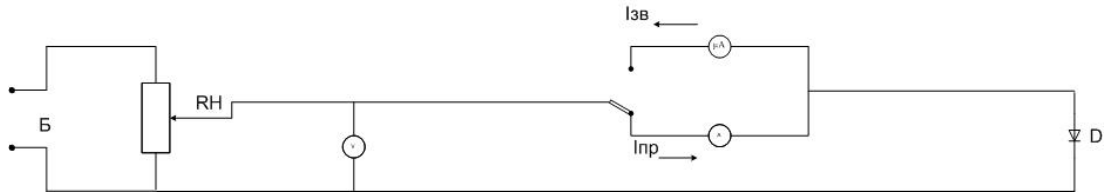


Рис.316.5 Вигляд установки та її електрична схема

Б – джерело постійного струму; *RH* – регулятор напруги; *ПНС* – перемикач напряму струму; μA – мікроамперметр; *V* – вольтметр; *A* – амперметр; *D* – досліджуваний діод.

Виконання роботи

1. Увімкнути установку в мережу змінного струму.
2. Поставити регулятор напруги у крайнє ліве положення і натиснути червону кнопку.
3. Кнопкою «прямий струм» увімкнути напівпровідниковий діод у прямому (пропускному) напрямі.
4. Регулятором напруги змінювати напругу, що подається на напівпровідниковий діод через 0,1 В до 0,7 В вимірюючи значення струму в мА по нижній шкалі амперметра. Результати вимірювань напруги і відповідного значення сили струму записати у таблицю.
5. Поставити регулятор напруги у крайнє ліве положення.
6. Кнопкою «зворотна напруга» подати напругу у зворотному напрямі.
7. Подати напругу 0,5 В і виміряти силу струму по верхній шкалі амперметра.
8. Повторити п.7 для напруг, рівних 10 В, 20 В, 30 В, 40 В. Результати вимірювань записати у таблицю і виключити установку.
9. Побудувати графік вольт-амперної характеристики для досліджуваного діода, відкладаючи на осі абсцис значення напруги, а на осі ординат силу

струму. Прямі напругу і струм відкладають на додатних півосях, а зворотні – на від'ємних.

Таблиця 316.1

№ п/п	$U_{пр}$, В	$I_{пр}$, мА	$U_{зв}$, В	$I_{зв}$, мкА
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

10. За формулою $K = I_{пр} / I_{зв}$ обчислити коефіцієнт випрямлення діода. При цьому треба мати на увазі, що прямий і зворотний струми повинні бути виміряні за однакових значень прямої і зворотної напруги.

Контрольні запитання

1. За якими ознаками поділяються речовини на провідники, напівпровідники й ізолятори?
2. Які напівпровідники називають напівпровідником n-типу і p-типу та як їх отримують?
3. Пояснити провідність n- та p- напівпровідників.
4. Поясніть механізм випрямляючої дії системи, яка має p-n перехід.
5. Що називається коефіцієнтом випрямлення?
6. Чому за великих зворотних напруг на діоді значення його зворотного струму зростає?
7. Які переваги напівпровідникових діодів порівняно з електронними?

Лабораторна робота №325
ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ В ЗАКОНІ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ОПТИЧНИМ ПІРОМЕТРОМ

Мета роботи: дослідити випромінювання нечорного тіла – нитки лампи розжарювання, навчитися вимірювати температуру оптичним пірометром.

Прилади й обладнання: оптичний пірометр із зникаючою ниткою, лампочка розжарювання, автотрансформатор, амперметр, вольтметр, реостат.

Теоретичні відомості

Тепловим випромінюванням називають електромагнітне випромінювання тіла, яке обумовлене збудженням атомів або молекул тіла внаслідок їхнього теплового руху. Спектральний склад випромінювання залежить від температури, хімічної природи й агрегатного стану нагрітого тіла.

Усі розжарені рідкі або тверді тіла випускають біле світло, яке має суцільний спектр частот. При зниженні температури тіла зменшується інтенсивність випромінювання й змінюється спектральний склад (спочатку переважають інфрачервоні й червоні хвилі, а потім тіло випромінює тільки невидимі оком ультрафіолетові промені).

Для характеристики теплового випромінювання вводять такі величини.

Випромінювальна здатність, яка чисельно дорівнює потужності випромінювання з одиниці площі поверхні тіла в інтервалі частот (довжин хвиль) одиничної ширини (довжини):

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{dtdSd\lambda} \text{ або } r_{\nu,T} = \frac{dW}{dtdSd\nu}, \tag{1}$$

Енергетична світність тіла або його **інтегральна випромінювальна здатність** – R_e – це повна потужність теплового випромінювання одиниці поверхні тіла в усьому інтервалі частот або довжин хвиль (від 0 до ∞).

Ці дві характеристики зв’язані між собою співвідношенням

$$R_e = \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu \tag{2}$$

Усі тіла тією чи іншою мірою поглинають енергію електромагнітних хвиль, які падають на них. Спектральною характеристикою є поглинальна здатність тіла:

$$a_{\lambda,T} = \frac{dW_{погл}}{dW} \tag{3}$$

Поглинальна здатність $a_{\lambda,T}$ показує, яка частка енергії електромагнітних хвиль, що падає на тіло, поглинається тілом.

Тіло називають **абсолютно чорним**, якщо воно при будь-якій температурі повністю поглинає всю енергію електромагнітних хвиль, які

падають на нього, незалежно від довжини хвилі. Для абсолютно чорного тіла $a_{\lambda,T} = 1$. Але в природі таких тіл не існує. Для всих тіл $a_{\lambda,T} < 1$.

Зв'язок між випромінювальною і поглинальною здатністю для будь-якого тіла виражається **законом Кірхгофа**: *відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності не залежить від матеріалу тіла й дорівнює випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла, яка є функцією тільки температури й частоти (довжини хвилі)*:

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f(\lambda, T). \tag{4}$$

Інтегральна випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла прямо пропорційна четвертому степеню його абсолютної температури:

$$R_e^{A\,ЧТ} = \sigma \cdot T^4, \tag{5}$$

де $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) – стала Стефана-Больцмана.

Формула (5) – математичний запис **закону Стефана-Больцмана**. Якщо тіло сіре, то його інтегральна випромінювальна здатність обчислюється за формулою

$$R_e^{A\,ЧТ} = a \cdot \sigma \cdot T^4, \tag{6}$$

де a – поглинальна здатність тіл. З (6) випливає, що при заданій температурі більше випромінюють сірі тіла, які мають більшу поглинальну здатність.

Експерименти показали, що енергія випромінювання абсолютно чорного тіла розподілена по його спектру нерівномірно: абсолютно чорне тіло майже не випромінює енергії в області дуже малих і дуже великих довжин хвиль.

Закони Віна:

1. Довжина хвилі, яка відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності $r_{\lambda,T}$ абсолютно чорного тіла, обернено пропорційна його абсолютній температурі:

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T}, \tag{7}$$

де $в_1$ – стала першого закону Віна;

2. Максимальна випромінювальна здатність $r_{\lambda,T}$ абсолютно чорного тіла пропорційна п’ятому степеню його абсолютної температури:

$$r_{\lambda,T} = b_2 T^5, \tag{8}$$

де $в_2$ – стала першого закону Віна.

Вперше теоретично обґрунтував спектральні закономірності випромінювання чорного тіла німецький фізик Макс Планк, який припустив, що атоми або молекули випромінюють не безперервно, а квантами, енергія яких

$$\varepsilon = h \cdot \nu,$$

де h – стала Планка; ν – частота випромінювання.

Планк на підставі квантової гіпотези запропонував формулу для визначення випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT} - 1\right)}. \qquad (9)$$

З формули Планка можна одержати закони теплового випромінювання: Стефана-Больцмана і Віна.

Сукупність методів вимірювання високих температур, які ґрунтуються на законах теплового випромінювання, називають **оптичною пірометрією**, а прилади, що для цього використовують, – **пірометрами** (вони бувають радіаційні й оптичні). У радіаційних пірометрах реєструється інтегральне теплове випромінювання досліджуваного тіла, а в оптичних – його випромінювання в будь-якій одній або двох вузьких ділянках спектра.

Опис установки

Температуру тіла в даній роботі вимірюють з допомогою оптичного пірометра зі зникаючою ниткою. Проміжок вимірюваної температури 700…2000 °С.

Вимір температури дослідного тіла (нитки лампи розжарювання) базується на порівнянні яскравості досліджуваного тіла з ниткою розжарювання еталонної лампочки, змінюючи її яскравість, поки не настане фотометрична рівновага. Оскільки закон залежності яскравості нитки розжарювання від температури добре відомий, то при рівності яскравостей випромінюваного тіла й нитки розжарювання можна вважати, що температура тіла така сама, як і температури нитки.

Оптичний пірометр є оптико-електричним приладом, його схема наведена на рис. 325.1.

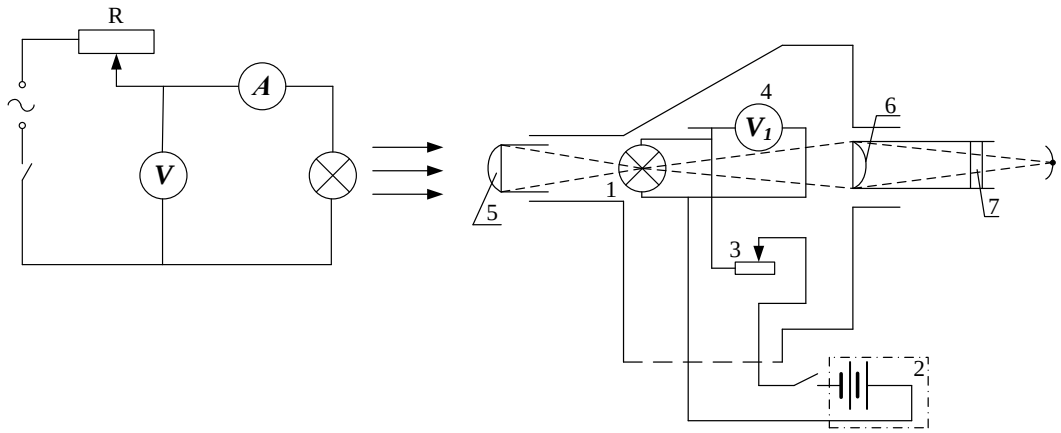


Рис. 325.1

Він складається з телескопа, всередині якого вмонтовано фотометричну лампу 1 (еталон). Лампа живиться від двох лужних акумуляторів 2. Струм живлення (відповідно й ступінь розжарювання нитки лампи) регулюється реостатом 3 за допомогою кільця 7. Температуру відлічують безпосередньо по шкалі вольтметра 4, підключеного до лампи 1. Шкала вольтметра проградуйована в градусах температури випромінюючого тіла.

Щоб підготувати оптичний пірометр до вимірювання, треба провести такі операції: ввімкнути живлення, за допомогою об'єктива 5 й окуляра 6 приладу домогтися того, щоб було видно поверхню вимірюваного тіла і нитки лампи. Для збільшення точності вимірювань виміри проводять у монохроматичних променях. Для цього треба ввести червоний світлофільтр (λ = 0,65 мкм). Оскільки нитка лампи розжарювання не чорна, для визначення дійсної температури треба ввести поправку, використовуючи для цього графік (рис. 325.2). Дійсна температура вимірюваного тіла

$$T_g = t_v + \Delta t + 273,$$

де t_v – температура, яку вимірюють пірометром; Δt – поправка з графіка, яка відповідає температурі t_v. Температуру дослідної лампи N змінюють за допомогою реостата R. Потужність, яка витрачається на розжарювання нитки лампи, визначають, вимірюючи силу струму амперметром, а напругу на лампі – вольтметром.

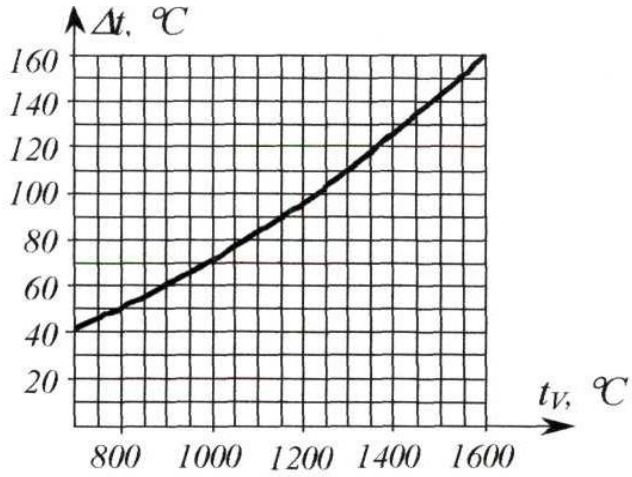


Рис. 325.2

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з основними деталями пірометра.
2. Включити живлення пірометра й лампочки розжарювання в мережу.
3. З допомогою об'єктива й окуляра приладу домогтися того, щоб було видно поверхню вимірюваного тіла й нитки еталонної лампи.
4. Подати на лампу розжарювання напругу, яку вкаже викладач.
5. Повільно обертаючи кільце реостата за годинниковою стрілкою, домогтись, щоб яскравість нитки розжарювання еталонної лампи й дослідної співпали (при цьому нитку лампи зовсім не видно на фоні розжареного тіла). Зняти відлік температури t_v по шкалі пірометра, сили струму I й напругу U на лампочці розжарювання. Дані вимірів записати в табл. 325.1.

Таблиця 325.1

№ п/п	T_0, К	t_v, °C	T_g, К	I, А	U, В	σ, Вт/(м^2·К^4)
1						
2						
3						
Сер.						

6. Повторити виміри згідно п. 5 для двох інших значень сили струму через дослідну лампу.

7. Підрахувати сталу в законі Стефана-Больцмана за формулою

$$\sigma = \frac{IU}{S\left(T_g^4 - T_0^4\right)},$$

де I – сила струму; U – напруга на лампі розжарювання; S – площа нитки розжарювання; T_g – дійсна температура дослідного тіла; T_0 – кімнатна температура (T_0 = 273+ t ^{o}C).

8. Визначити середнє значення сталої Стефана-Больцмана, та відносну похибку вимірювань за формулою $\varepsilon = \frac{|\sigma_{табл} - \sigma|}{\sigma_{табл}} \cdot 100\%$. Зробити висновок.

Контрольні питання

1. Яке тіло називають абсолютно чорним?
2. Дайте визначення поглинальної та випромінювальної здатності тіл.
3. Сформулюйте закони теплового випромінювання АЧТ.

ДОДАТОК І. Таблиця довжин кольорових хвиль

Колір	**Довжина хвилі, нм**
Червоний	625 – 740
Помаранчевий	590 – 625
Жовтий	565 – 590
Зелений	500 – 565
Блакитний	485 – 500
Синій	440 – 485
Фіолетовий	380 – 440