

то по колу проходив струм (мал. 176, а), який вимірювався гальванометром. Якщо ж цинкову пластинку приєднували до позитивного полюса джерела, то струму в колі не було (мал. 176, б). Отже, при фотоелектрі електрони покидають катод.

Струм, що виникає в колі, згодом отримав назву **фотоструму**, а цинкова (або інша) пластинка, приєднана до негативного полюса джерела, — **фотокатод**. О. Г. Столетов виявив, що фотон практично виникає одночасно з освітленням фотокатода.

Досліджуючи залежність фотоструму від прикладеної напруги, О. Г. Столетов установив, що фотострум не підкоряється закону Ома. На мал. 177 зображено графік залежності фотоструму від напруги між електродами при незмінному освітленні пластинки. З графіка видно, що фотострум спочатку зростає, а потім, при порівняно невеликій напрузі, перестає збільшуватися. Максимальне значення фотоструму набуло назви — **фотострум насичення**. Столетов установив, що **фотострум насичення (а отже, і число вирваних світлом фотоелектронів) прямо пропорційний освітленості цинкової пластинки (закон Столетова)**.

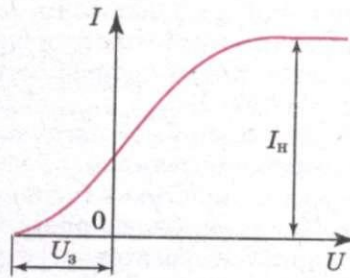
О. Г. Столетов виявив, що фотоелектр ефект спостерігається тільки тоді, коли цинк опромінюється світлом, довжина хвилі якого менша за деяку граничну довжину хвилі. Ця мінімальна довжина хвилі пізніше отримала назву — **червона межа фотоелектр ефекту**.

Фотострум існує і тоді, коли в колі немає джерела (мал. 178). Це можна пояснити тим, що електрони покидають катод зі швидкістю, відмінною від нуля, частина з них досягає анода і за відсутності напруги між електродами. Для того, щоб фотострум дорівнював нулю, потрібно прикласти деяку затримуючу негативну напругу — U_s (мал. 177). Вона повинна бути такою, щоб електрони, які мають при вильоті з катода навіть найбільшу швидкість v_{\max} , не могли подолати затримуюче електричне поле і долетіти до анода. Між максимальною початковою швидкістю електронів, що вилітають під дією світла з катода, і затримуючою напругою існує таке співвідношення:

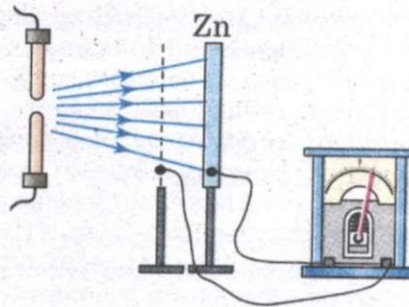
$$\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = eU_s,$$

де m_e — маса електрона. Таким чином, вимірявши затримуючу напругу U_s , можна визначити максимальне значення швидкості фотоелектронів:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eU_s}{m_e}}.$$



Мал. 177



Мал. 178

Дослідження показали, що максимальна швидкість фотоелектронів залежить тільки від частоти світла, яким освітлюється фотокатод.

Таким чином, експериментально були встановлені такі закономірності фотоелектру.

1. Для кожної речовини існує така гранична довжина хвилі, при якій фотоелектр ефект ще можливий, але при опроміненні хвилями більшої довжини фотоелектр ефект неможливий (червона межа фотоелектру).

2. Число фотоелектронів, що вириваються з фотокатода за одиницю часу, пропорційне освітленості фотокатода.

3. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою випромінювання і не залежить від освітленості фотокатода.

4. Фотоелектр ефект практично безінерційний.

Класична фізика не могла пояснити перерахованих вище закономірностей фотоелектру. Це пояснила квантова фізика.

А. Ейнштейн у 1905 р. довів, що всі закономірності фотоелектру легко пояснюються, якщо припустити, що світло поглинається речовиною такими ж порціями (квантами), якими воно випромінюється і поширюється. При поглинанні світла металом фотон передає цілком свою енергію одному електрону. Частина цієї енергії витрачається на те, щоб електрон міг покинути тіло, тобто на виконання роботи виходу A . Якщо електрон звільняється світлом не біля самої поверхні, а на деякій глибині, то частина енергії, яка дорівнює E' , може бути втрачена ним унаслідок випадкових зіткнень у речовині і піде на нагрівання речовини. Залишок енергії утворює кінетичну енергію E_k електрона, що покинув речовину. Енергія вильоту електрона буде максимальною, якщо електрон вибивається світлом з поверхні металу. Тоді $E' = 0$ і

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2}.$$

Це рівняння Ейнштейна для фотоелектру, яке дає змогу пояснити всі закони фотоелектру.

З нього випливає, що максимальна кінетична енергія фотоелектрона, а отже, і його максимальна початкова швидкість залежать від частоти світла ν і роботи виходу $A_{\text{вих}}$, але не залежать від інтенсивності світла:

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{m_e}(h\nu - A_{\text{вих}})}.$$

З рівняння Ейнштейна також випливає, що фотоелектр можливий лише при енергії фотона, яка більша за роботу виходу. Енергії фотона повинно щонайменше вистачити на те, щоб відірвати електрон від металевої пластини:

$$h\nu \geq A_{\text{вих}}.$$

Позначивши найменшу частоту світла ν_0 , за якої можливий фотоелектр ефект (червона межа фотоелектру), маємо

$$\nu_0 = \frac{A_{\text{вих}}}{h}.$$

Червона межа фотоелектру залежить тільки від роботи виходу електрона, тобто від хімічної природи металу.

2 ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Які властивості має фотон? Чи можна фотон зупинити?
2. Перерахуйте і поясніть основні закономірності фотоефекту.
3. Поясніть закономірності фотоефекту з позицій квантових уявлень.

§ 39. ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕФЕКТУ

Відкриття фотоефекту мало дуже велике значення для глибшого розуміння природи світла. Проте цінність науки не тільки в тому, що вона з'ясовує складну і багатогранну будову навколишнього світу, а й у тому, що вона надає людині засоби, за допомогою яких можна вдосконалювати виробництво, поліпшувати умови матеріального і культурного життя суспільства.

За допомогою фотоефекту «заговорило» кіно: можна передавати рухомі зображення (телебачення). Застосування фотоелектронних приладів дало можливість створити верстати, які без участі людини виготовляють деталі за кресленнями. Прилади, що ґрунтуються на фотоефекті, контролюють розміри виробів краще від людини, вчасно вмикають і вимикають маяки та вуличне освітлення і т. д.

Усе це стало можливим завдяки винайденню дуже досконалих пристроїв — **фотоелементів**, у яких світлова енергія керує енергією електричного струму або перетворюється в неї.

Вакуумний фотоелемент — це скляна колба, частина внутрішньої поверхні якої вкрита тонким шаром металу з малою роботою виходу (мал. 179), це — катод. Через прозоре «віконце» світло проникає в колбу. У центрі колби є дротяна петля або диск — анод. Він призначений для вловлювання фотоелектронів і приєднаний до позитивного полюса батареї.

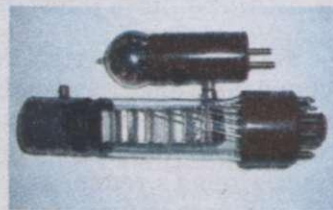
Фотоелементи здатні реагувати на видиме світло і навіть на інфрачервоне проміння.

Якщо світло потрапляє на катод фотоелемента, то в колі виникає електричний струм, який вмикає або вимикає те чи інше реле. Комбінація фотоелемента і реле дає можливість конструювати багато різних автоматів, що здатні «бачити». Один з них — автомат у метро. Він спрацьовує (висуває перегородку), коли людина перетинає світловий пучок, не опустивши монети, або жетона, або не приклавши проїзної картки.

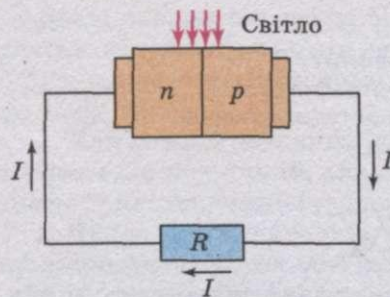
Подібні автомати можуть запобігати аварії. На заводі фотоелемент майже вмить зупиняє потужний прес, якщо рука людини потрапить у небезпечну зону.

За допомогою фотоелементів відтворюють записаний на кіноплівці звук.

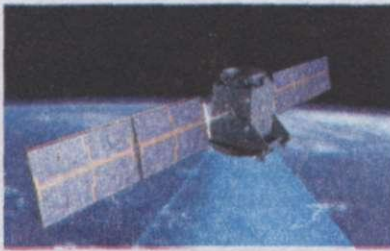
Крім розглянутого фотоефекту, який називають зовнішнім фотоефектом, різноманітне застосування знаходить внутрішній фотоефект у напівпровідниках. Це явище використовують у фоторезисторах — приладах, опір яких залежить від освітленості. Крім того, є напівпровідникові фотоелементи, які створюють ЕРС і безпосередньо



Мал. 179



Мал. 180



Мал. 181

перетворюють світлову енергію в енергію електричного струму. ЕРС, яку в цьому випадку називають фотоЕРС, що виникає в ділянці $p-n$ -переходу двох напівпровідників під час опромінення цієї ділянки світлом. Під впливом світла утворюються пари електрон—дірка. У ділянці $p-n$ -переходу є електричне поле. Воно примушує неосновні носії напівпровідників переміщатися через контакт. Дірки з напівпровідника n -типу переміщуються в напівпровідник p -типу, а електрони з напівпровідника p -типу — в ділянку n -типу, що створює накопичення основних носіїв у напівпровідниках n - і p -типів. Отже, потенціал напівпровідника p -типу збільшується, а n -типу зменшується. Це триває доти, поки струм неосновних носіїв через $p-n$ -перехід зрівняється зі струмом основних носіїв через той самий перехід. У цей момент між напівпровідниками встановлюється різниця потенціалів, що дорівнює фотоЕРС.

Якщо коло замкнути зовнішнім навантаженням, то в колі потече струм, який буде визначатися різницею струмів неосновних і основних носіїв через $p-n$ -перехід (мал. 180). Сила струму залежить від інтенсивності падаючого світла і опору навантаження.

Фотоелементи з $p-n$ -переходом створюють ЕРС близько 1—2 В. Їх вихідна потужність сягає сотень ват при коефіцієнті корисної дії до 20%. Фотоелементи малої потужності використовують у фотоекспонетрах. Особливо широко їх застосовують при виготовленні сонячних батарей, які встановлюють не тільки на космічних апаратах (мал. 181), а й на дахах будинків, автомобілів тощо.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Де застосовується явище фотоелементу?
2. Що таке фотоелемент? Яке його призначення?

§ 40. ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ

Усі без винятку тіла, температура яких не дорівнює абсолютному нулю, є джерелами електромагнітного випромінювання. Воно обумовлене тепловим рухом частинок речовини і тому називається тепловим. Інтенсивність теплового випромінювання дуже швидко зростає з підвищенням температури. Поряд з тепловим випромінюванням у природі існує випромінювання тіл, що не залежить від їх температури. Воно виникає за рахунок будь-якого виду енергії мимоволі.

Мимовільне (спонтанне) випромінювання, що відбувається за рахунок будь-якого виду енергії, крім теплової, називається люмінесценцією.

Залежно від процесів, при яких виникає холодне свічення, розрізняють кілька видів люмінесценції. Цілий ряд хімічних реакцій супроводжується холодним свіченням речовин, що беруть участь у них. Так, жовтий фосфор, поволі окиснюючись у повітрі, інтенсивно випускає холодне світло. Хімічні процеси викликають і холодне свічення багатьох біологічних об'єктів — біолюмінесценцію, що спостерігається у комах, морських риб і дрібних тварин, деяких сортів грибів, шматків гниючої деревини, багатьох бактерій.

Холодне свічення, що виникає при хімічних реакціях, називається хімічною люмінесценцією.

При проходженні струму через розріджені гази виникає яскраве холодне свічення різного кольору залежно від природи газу.

Холодне свічення, що спричинюється електричним струмом, називається електролюмінесценцією.

Люмінесценція виникає і при опроміненні багатьох речовин — сульфиду цинку, платиноціаната барію, гасу, ряду органічних барвників — рентгенівськими, ультрафіолетовими або видимими променями.

Холодне свічення, що викликається різними променями електромагнітного спектра, називається фотолюмінесценцією.

Розрізняють два види фотолюмінесценції: **флюоресценція і фосфоресценція**.

Флюоресценція — це свічення тіл, що відбувається тільки в процесі їх опромінення.

Фосфоресценція — це свічення тіл, що відбувається як під час опромінення, так і після його припинення.

Тривалість післясвічення при флюоресценції не перевищує 10^{-3} с, а при фосфоресценції післясвічення може продовжуватися годинами, цілодобово і навіть місяцями. Принципової відмінності між цими видами люмінесценції немає. Фосфоресценція відрізняється від флюоресценції тільки тривалістю післясвічення.

Речовини, здатні випускати світло при їх опроміненні, називаються люмінофорами.

Усі спроби пояснити холодне свічення тіл, виходячи з електромагнітної теорії світла, виявилися невдалими. Квантова теорія світла це явище пояснює таким чином.

Припустимо, що молекула або атом люмінофора має p енергетичних рівнів. При поглинанні фотона молекула переходить у збуджений стан. Проте цей стан нестійкий і молекула повертається в стійкіший стан, випромінюючи при цьому надлишок енергії у вигляді світлового кванта. Так виникає холодне свічення тіл.

Процес випромінювання холодного світла може відбуватися прямо: електрони відразу переходять із збудженого стану в нормальний. У цьому випадку молекула люмінофора випромінює такий же квант енергії, який вона поглинула. У деяких люмінофорів процес випромінювання може мати каскадний характер: електрони переходять з найбільш високого енергетичного рівня в нормальний стан через ряд проміжних рівнів. Тоді енергія ви-

проміньованих квантів буде меншою за енергію поглиненого кванта, але загальна сума енергій випромінюваних квантів (згідно з законом збереження енергії) може бути або меншою, або, в крайньому випадку, дорівнювати тій енергії, яку поглинає молекула: $\Delta E_{\text{в}} \leq \Delta E_{\text{п}}$ або $h\nu_{\text{в}} \leq h\nu_{\text{п}}$, звідки: $\nu_{\text{в}} \leq \nu_{\text{п}}$ або

$$\frac{c}{\lambda_{\text{в}}} = \frac{c}{\lambda_{\text{п}}}. \text{ Отже, } \lambda_{\text{в}} \geq \lambda_{\text{п}}.$$

Таким чином, довжина хвилі світла, що випускається люмінесцюючою речовиною, завжди більша або дорівнює довжині світлової хвилі, падаючої на речовину.

Цей закон був встановлений експериментально англійським фізиком Дж. Стоксом і носить його ім'я — закон Стокса. У більшості випадків деяка частина енергії квантів світла, що поглинаються, перетворюється на внутрішню енергію тіл і тому, як правило, атоми і молекули люмінофора випромінюють кванти світла меншої енергії, ніж поглинають.

Явище люмінесценції покладене в основу будови люмінесцентних ламп. Люмінесцентна лампа є скляною трубкою, в яку з обох кінців упаяні вольфрамові електроди у вигляді спіралей. Внутрішня поверхня трубки покрита тонким шаром люмінофора. З трубки ретельно відкачують повітря. Потім її наповнюють під невеликим тиском аргоном і вводять кілька крапельок ртуті.

При включенні лампи в мережу змінного струму вольфрамові електроди розжарюються і з них вилітають електрони. Під дією електричного поля електрони набувають великої швидкості і, стикаючись з нейтральними атомами Аргону, йонізують їх. У аргоні виникає тліючий розряд, при цьому газ нагрівається, ртуть випаровується і пара ртуті випускає ультрафіолетові промені. Ультрафіолетові промені поглинаються атомами люмінофора і він випромінює видиме світло. Експериментально добирають такий склад люмінофора, який випромінює світло, за спектральним складом близьке до денного.

Спектральний склад люмінесцентного випромінювання є характерним для кожної речовини, і тому явище люмінесценції використовується для визначення хімічного складу різних речовин (люмінесцентний аналіз). При вивченні складу речовини методом люмінесцентного аналізу речовину опромінюють ультрафіолетовими променями. Спектр холодного світла, що вивчається при цьому, вивчають за допомогою спеціального люмінесцентного мікроскопа (мікроаналіз) або просто спостерігають неозброєним оком (макроаналіз) залежно від розміру досліджуваного об'єкта. Люмінесцентний аналіз отримав широке застосування в медико-біологічних дослідженнях, у гігієні і судовій медичній експертизі.

Під дією ультрафіолетових променів люмінесцюють різні тканини (нігті, зуби, склера, кришталік і ін.) і багато мікроорганізмів (бактерії прокази, дифтерії, туберкульозна паличка і т. д.). Це дає змогу проводити за допомогою люмінесцентного аналізу ряд важливих мікробіологічних досліджень, якщо звичайна мікроскопія виявляється менш ефективною. За допомогою люмінесцентного аналізу визначають ступінь придатності багатьох харчових продуктів: овочів, фруктів, яєць, муки, масла, риби, м'яса і ін. Цим же методом визначають ступінь чистоти лікарських препаратів, наявність вітамінів або отрут у харчових продуктах.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Що таке люмінесценція?
2. Які види люмінесценції ви знаєте?
3. Які існують види фотолюмінесценції?
4. Яка природа люмінесценції?
5. Де застосовується люмінесцентний аналіз?

§ 41. КВАНТОВІ ГЕНЕРАТОРИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

На сьогодні є джерела світла, в яких атоми випромінюють світло однієї і тієї ж частоти, поляризованого в одній і тій же площині. Такі джерела когерентного світла отримали назву **лазерів**. Розглянемо їх принцип будови і роботи.

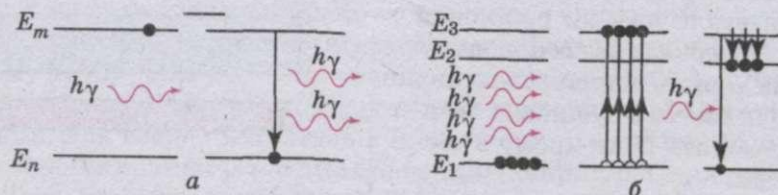
У 1917 р. **А. Ейнштейн** на основі теоретичного аналізу дійшов висновку, що перехід атомів із збудженого стану в незбуджений може бути не тільки спонтанним, а й вимушеним, індукованим. Він може відбутися під дією зовнішнього фотона, який проходить поблизу збудженого атома. При цьому атом (молекула, йон) випускає фотон, який абсолютно не відрізняється від того фотона, що викликав перехід атома із збудженого стану в незбуджений. Не змінюється при цьому і фотон, що викликав індуковане випромінювання (мал. 182, а).

Фотон, зустрічаючи на своєму шляху збуджений атом, нібито вибиває з останнього свого двійника. Обидва фотони мають однакові частоти, напрям руху, фази і площини поляризації.

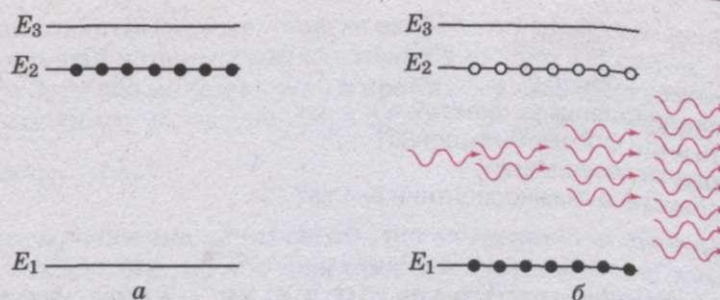
У 1940 р. **В. Фабрикант** запропонував метод посилення світла на основі використання явища індукованого випромінювання. Суть цього методу полягає в наступному. В атомів деяких речовин є такі збуджені стаціонарні стани, в яких атоми можуть знаходитися досить довго (до декількох секунд). Такі стани отримали назву — **метастабільні**. Приклад речовини, в атомів якої спостерігається метастабільний стан, — це рубін — оксид алюмінію, в якому частина атомів алюмінію замінена йонами хрому, що мають метастабільний стан.

Під час опромінення рубіна зеленим світлом йони хрому збуджуються і переходять у стаціонарний стан, якому відповідає енергетичний рівень E_3 (мал. 182, б). Через дуже малий інтервал часу (порядку 10^{-8} с) більшість збуджених атомів хрому переходять на метастабільний рівень E_2 .

Перехід з рівня E_3 на рівень E_2 не супроводжується випромінюванням; енергія, що звільняється при цьому переході, передається кристалічній ґратці, внаслідок чого підвищується температура кристала. Якщо кристал



Мал. 182



Мал. 183

рубіна тривалий час освітлювати, то відбудеться дуже щільне «заселення» метастабільного рівня йонів хрому (мал. 183, а). Якщо в рубіновий стержень через один його торець надходить слабкий пучок світла у напрямі осі стержня, то фотони, енергія яких $h\nu$ дорівнює різниці $E_2 - E_1$ енергій йона хрому в метастабільному й основному станах, викликають індуковані переходи цих йонів із стану E_2 в стан E_1 і випускання фотонів такої ж енергії:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

Число фотонів подвоюється. Підкреслимо, що фотони індукованого випромінювання не відрізняються від фотонів, що викликали індуковані переходи йонів хрому не тільки за енергією і частотою, а й за фазою, напрямом поширення і поляризацією.

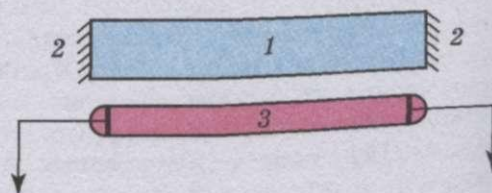
Подвоєні однакові фотони, рухаючись у рубіновому стержні, викликають індуковане випромінювання нових йонів хрому. При цьому число фотонів стає вже в 4 рази більше від їх початкового числа в підсилюваному пучку світла. Поки в рубіновому стержні є достатньо йонів хрому, що знаходяться в метастабільному стані, процес продовжується, і число фотонів, що рухаються до іншого торця стержня, збільшується лавиноподібно (мал. 183, б). Внаслідок цього з рубінового стержня виходить пучок когерентного світла, енергія якого значно більша за енергію пучка світла, що ввійшов до стержня, тобто відбувається посилення світлового пучка.

Проте важливий не тільки факт збільшення енергії світлового пучка. Ще важливіше те, що таким чином виходить пучок когерентного світла, в якому частота, фаза, поляризація і напрям руху в усіх фотонів однакові.

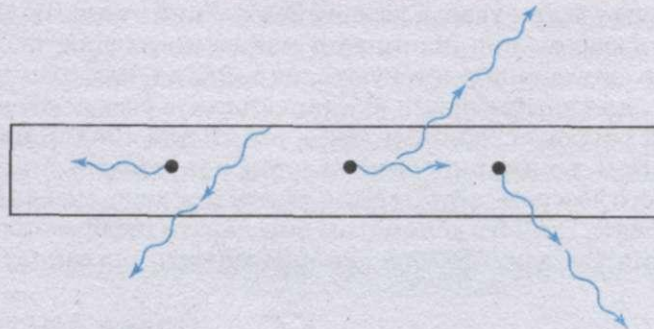
Від підсилення світла на основі використання принципу індукованого переведення атомів з метастабільного стану в стійкий один крок до генерування когерентного випромінювання. На мал. 184 показана спрощена схема рубінового лазера.

Основні вузли лазера: рубіновий стержень 1, дзеркала 2 і ксенонова газорозрядна лампа 3, випромінювання якої, потрапляючи в рубіновий стержень, переводить йони хрому в збуджений стан.

Якщо йони хрому збуджені і багато яких з них знаходиться в метаста-



Мал. 184



Мал. 185

більшому стані, то система буде нестійкою. У ній вірогідні спонтанні переходи йонів хрому з метастабільного в основний стан. Як ви вже знаєте, при таких переходах випромінюються фотони з енергією $h\nu = E_2 - E_1$. Напрямок руху фотона, що спонтанно випромінюється, передбачити не можна — він довільний. Різні фотони, що спонтанно випромінюються, рухаються за різними напрямками. Якщо фотон видетів у напрямі, не паралельному осі рубінового стержня, то він незабаром досягне бічної стінки і покине стержень (мал. 185).

Проте серед фотонів, що спонтанно вилітають, неодмінно будуть і такі, які рухаються паралельно осі рубінового стержня. На шляху свого руху вони викликають індуковані переходи атомів хрому, і кількість фотонів швидко збільшується, поки світло не досягне торця стержня. Відбившись від дзеркала (повністю і частково), фотони знову проходять по стержню і їх кількість продовжує збільшуватися.

Кожного разу при досягненні потоком фотонів напівпрозорого дзеркала велика його частина виходить назовні у вигляді червоного променя когерентного випромінювання. Оскільки всі фотони мають однакові напрями руху, то значна енергія випромінювання концентрується у вузькому пучку.

Генератори індукованого когерентного випромінювання називають **лазерами**.

Ця назва виправдана тим, що під час генерації основну роль відіграє процес посилення світла за рахунок індукованого випромінювання.

За фундаментальні роботи зі створення лазерів фізикам **М. Басову** і **О. Прохорову** в 1959 р. було присуджено Ленінську премію. У 1963 р. М. Басов, О. Прохоров і американський фізик **Ч. Таунс** за роботи в галузі лазерів були удостоєні Нобелівської премії.

Зі створенням лазерів виникли нові розділи оптики, що вивчають властивості і можливе практичне застосування когерентного світла.

Лазери знаходять дуже широке застосування в сучасній техніці.

Один із напрямів в практичному застосуванні лазерів зв'язаний з тим, що в лазерному пучку світла вдається сконцентрувати дуже велику потужність (до десятків мегават). Лазери застосовують для зварювання і різання тугоплавких матеріалів, для свердління отворів (наприклад, в алмазах); у медицині — для проведення тонких і складних операцій (наприклад, для приварювання сітківки ока, що відшарувалася). За допомогою лазерів здійснюється точкове зварювання при виробництві напівпровідникових приладів.

Інший напрям у застосуванні лазерів пов'язаний з тим, що світло, яке випромінюється лазером, при поширенні майже не розсіюється. Цю властивість лазерного світла використовують, наприклад, для прокладання ліній метрополітену, для вимірювання відстаней і кутів у геодезії, для визначення швидкостей і курсу кораблів, літаків, ракет, для локації планет.

Третій напрям у використанні лазерів пов'язаний з когерентністю випромінюваного лазером світла: світло лазера має дуже вузький спектр, його можна модулювати і за його допомогою передавати інформацію. На сьогодні діють лазерні лінії зв'язку. Лазери використовують для запису телевізійних зображень.

ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

1. Яке випромінювання називають індукованим?
2. У чому полягає посилення світла?
3. Намалюйте схему рубінового лазера і поясніть принцип його роботи.
4. Назвіть основні напрями в застосуванні лазерів.

§ 42. КОРПУСКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ СВІТЛА

Такі явища, як відбивання, заломлення, інтерференція, дифракція і поляризація світла, з великою переконливістю свідчать, що світло має хвильові властивості. Разом з тим, ряд інших явищ — стійкість атома, розподіл енергії в спектрі абсолютно чорного тіла, лінійчасті спектри атомів, люмінесценція, фотоелектрний ефект тощо — переконують нас у тому, що світлом є потік фотонів. *Так що ж насправді є світлом: потік електромагнітних хвиль чи потік фотонів?*

Якщо світло — це тільки сукупність електромагнітних хвиль, то абсолютно неможливо пояснити явища фотоелектрального ефекту і люмінесценції, лінійчасті спектри та інші факти. Проте всі ці явища стають абсолютно зрозумілими і легко з'ясовними, якщо відмовитися від хвильової точки зору і вважати, що світло — це потік фотонів. Але в цьому випадку нез'ясовними стають явища інтерференції, дифракції і поляризації світла.

Аналізуючи всю сукупність відомих нам властивостей світла, можна зробити єдино можливий висновок: світло одночасно має і властивості хвиль, і властивості частинок. Абсолютно неможливо протиставити хвильові властивості світла його квантовим властивостям або, навпаки, пояснювати всі оптичні явища, виходячи тільки з однієї — хвильової або квантової — точки зору. Всяка спроба віддати перевагу хвильовій або квантовій точці зору неминуче призводить до непереборних суперечностей з експериментально встановленими фактами. Світло одночасно має і хвильові, і квантові властивості. При цьому в одних явищах більшою мірою виявляються хвильові властивості світла, а в інших — квантові.

Світлові частинки — фотони — одночасно мають і властивості хвиль, і властивості частинок.

Фотон одночасно є і частинкою, і хвилею, тобто частинкою-хвилею, і об'єднує властивості обох.

Математично цей факт виражається знаменитою формулою Планка. З цієї формули видно, що, коли довжина хвилі електромагнітного випроміню-

вання велика, відповідні їй кванти настільки малі, що їх неможливо виявити на досліді. У міру зменшення довжини хвилі випромінювання хвильові властивості поступово ослаблюються, а квантові, навпаки, підсилюються і, нарешті, при вивченні рентгенівських і гамма-променів стають переважаючими. У певному інтервалі частот (довжин хвиль) хвильові і корпускулярні властивості випромінювання виявляються в однаковій мірі, і на досліді ми спостерігаємо їх єдність, яка вражає нашу уяву.

Задачі та вправи

Розв'язуємо разом

Для вольфраму червона межа фотоефекту $2,75 \cdot 10^{-5}$ см. Визначте роботу виходу електронів з вольфраму і швидкість вириваних фотоелектронів світлом, довжина хвилі якого $1,8 \cdot 10^{-5}$ см.

Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для червоної межі фотоефекту можна записати так:

$$h\nu_0 = A.$$

Звідси визначимо роботу виходу електрона з вольфраму: $A = h\nu_0 = h \frac{c}{\lambda_0}$. Підставляючи значення величин, отримаємо $A = 7,2 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тепер запишемо рівняння Ейнштейна для довжини хвилі $\lambda = 1,8 \cdot 10^{-7}$ м:

$$h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{mv^2}{2}, \text{ звідки } \frac{mv^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - A. \text{ Тоді } \frac{mv^2}{2} = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right).$$

Знаючи кінетичну енергію електрона, визначимо швидкість його вильоту:

$$v = \sqrt{\frac{2hc}{m} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)}.$$

Підставивши значення відомих фізичних величин, отримаємо

$$v = 0,91 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Рівень А

328. Як і чому освітленість поверхні металу впливає на фотоефект?
329. У чому відмінність між зовнішнім та внутрішнім фотоефектами?
330. Як і чому частота випромінювання впливає на фотоефект?
331. Довжина хвилі випромінювання, яка відповідає червоній межі фотоефекту для натрію, дорівнює 530 нм. Яка робота виходу електронів із натрію (результати подати в Дж і еВ)?
332. Визначте роботу виходу електрона з металу, якщо фотоефект починається, коли частота падаючого світла становить $6 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$.
333. Робота виходу електронів із вольфраму дорівнює 4,5 еВ. Яка мінімальна частота електромагнітного випромінювання, що здатне зумовити фотоефект під час опромінення ним поверхні вольфраму?
334. Яка максимальна довжина хвилі електромагнітного випромінювання, що здатне зумовити фотоефект при опроміненні ним цинкової пластини? Робота виходу з цинку становить 4,2 еВ.
335. У яких променів маса більша — у фотонів γ -проміння чи ультрафіолетового випромінювання?
336. Визначте енергію фотонів, які відповідають найдовшим ($\lambda = 0,75 \text{ мкм}$) і найкоротшим ($\lambda = 0,4 \text{ мкм}$) хвилям видимої частини спектра.

337. Який імпульс і яка довжина хвилі випромінювання, фотони якого мають масу $4 \cdot 10^{-36}$ кг?
338. Фотони рентгенівського випромінювання мають енергію 50 кеВ. Яка довжина їх хвилі та яка їх маса?
339. Які енергія та імпульс фотонів інфрачервоного випромінювання з частотою 30 ТГц?
340. Поясніть поняття тиску світла з точки зору квантової фізики.
341. Світло чинить на поверхню тим більший тиск, чим повніше вона його відбиває. Як це пояснити?
342. Порівняти тиск світла, який діє на ідеально білу та ідеально чорну поверхні за однакових умов.

Рівень В


343. Поясніть, як відбувається фотосинтез та яку роль він відіграє у природі.
344. Поясніть, яким чином отримується приховане зображення на фотоплівці у процесі фотографування.
345. Чому фотоплівку для чорно-білої фотозйомки можна проявляти при червоному освітленні?
346. Визначте кінетичну енергію і швидкість фотоелектронів, що їх вириває з поверхні цинку ультрафіолетове випромінювання, яке має довжину хвилі 0,2 мкм.
347. Електрон вилітає із цезію, маючи кінетичну енергію 2 еВ. Яку максимальну довжину має хвиля світла, що спричиняє фотоэффект, коли робота виходу дорівнює 1,8 еВ?
348. Срібну пластину опромінюють ультрафіолетовим випромінюванням хвилі 200 нм. З якою максимальною швидкістю електрони залишають поверхню срібла? Робота виходу електронів дорівнює 4,3 еВ.
349. На фотоелемент із цезієвим фотокатодом падає ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 100 нм. Яку зворотну напругу слід подати на фотоелемент, щоб електричний струм крізь нього припинився?
350. Максимальна швидкість електронів, які вилітають із поверхні рубідію під час її освітлення ультрафіолетовим випромінюванням з довжиною хвилі 400 нм, дорівнює $880 \frac{\text{км}}{\text{с}}$. Яка робота виходу електронів із рубідію?
351. Деякі речовини світяться, якщо на них потрапляє випромінювання. Чому довжина хвилі випромінювання такої речовини більша від довжини хвилі випромінювання, яке вона поглинула?
352. На залізну кульку, віддалену від інших тіл, падає ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 200 нм. До якого максимального потенціалу заряджається кулька внаслідок тривалого опромінення, якщо робота виходу електронів із заліза дорівнює 4,36 еВ?
353. Плоский алюмінієвий електрод освітлюється світлом із довжиною хвилі 83 нм. Поза електродом є затримуюче електричне поле напруженістю $750 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. На яку максимальну відстань від електрода може віддалитися електрон?
354. Яку максимальну кількість електронів може втратити металева дробинка радіусом 1 мм при опроміненні її світлом довжиною хвилі 200 нм? Червона межа фотоэффекту $\lambda_0 = 280$ нм.
355. Фотоэффект припиняється, якщо до фотоелемента прикласти зворотну напругу 2,4 В. З якою максимальною швидкістю досягатимуть електроди анода фотоелемента під час його прямого ввімкнення, якщо напруга на ньому становитиме 4,8 В?

356. Визначте частоту випромінювання, фотони якого мають енергію, що дорівнює кінетичній енергії протонів, які пройшли прискорювальну різницю потенціалів 10 кВ.
357. При якій температурі кінетична енергія поступального руху молекули Гідрогену дорівнює енергії фотона з довжиною хвилі 0,4 мкм?
358. Фотони, частота яких дорівнює 500 ТГц, падають на дзеркальну поверхню. Кут падіння випромінювання становить 60° . Яка зміна імпульсу фотонів внаслідок зіткнення з поверхнею?
359. На поверхню металу падають монохроматичні промені з довжиною хвилі 0,1 мкм. Червона межа фотоефекту 0,3 мкм. Яка частина енергії фотона витрачається на надання електрону кінетичної енергії?
360. Око людини реагує на зелене світло з довжиною хвилі 500 нм, якщо в зіницю ока потрапляє щосекунди не менше 53 фотонів. Із якої максимальної відстані могла б бути людиною помічена в темряві зелена лампочка, що споживає потужність 100 Вт і має ККД 1 %, якби не було поглинання світла в атмосфері? Діаметр зіниці ока в темряві вважати таким, що дорівнює 6 мм.

ПЕРЕВІРТЕ СВОЇ ЗНАННЯ

Контрольні запитання

1. Обґрунтуйте, виходячи із законів заломлення світла, чому промені, які падають перпендикулярно до межі розділу двох середовищ, не повинні заломлюватися.
2. Не звертаючись до дослідів, обґрунтуйте оборотність ходу променів при переході з одного середовища в інше.
3. Відхилення світлових променів у тонкій тригранній призмі пропорційне її заломному куту. З огляду на це, встановіть, що сильніше заломлює світло — краї чи середина лінзи.
4. Поясніть, чому явище інтерференції переконливо доводить, що світло — це типово хвильовий процес.
5. Чому колір одного і того ж самого місця мильної бульбашки, вертикально завислої на каркасі, безперервно змінюється? В якій послідовності? Як змінюватимуться від шару до шару кольори бульбашки, коли від цього місця почати дивитись угору?
6. Як впливає число штрихів дифракційної ґратки на відстань між світлими смугами і на їхні розміри в спектрі ґратки?
7. Як зміниться вигляд спектрів дифракційної ґратки, якщо її занурити у воду?
8. Призматичний спектр в інтервалі коротких хвиль, особливо на ділянці фіолетових променів, дуже витягнутий і розмитий. Про що це свідчить?
9. Коричневий колір відсутній у суцільному спектрі. Як виникає цей колір?
10. Чи буде повністю поляризованим заломлене в прозорому діелектрику світло, якщо встановлено, що відбитий промінь поляризується повністю, коли він із заломленим променем утворює кут 90° ?
11. Якби світло взаємодіяло з речовиною як хвиля, то не існувало б червоної межі фотоефекту. Доведіть це.
12. Фотон поглинається речовиною. Що стається з масою фотона?
13. Доведіть, що вільний електрон не може поглинути фотон.
14. Чи правильне твердження: в природі світла виявляється корпускулярно-хвильовий дуалізм? Поясніть чому.

 **Що я знаю і вмю робити**

Я знаю, як проводилися історичні досліді

1. В історичному досліді Фізо на визначення швидкості світла відстань між колесом, яке мало 720 зубців, і дзеркалом дорівнює 8633 м. Світло вперше зникло, коли частота обертання зубчастого колеса становила 12,67 Гц. Яке значення швидкості світла дістав Фізо?

2. У досліді Юнга фіолетовий світлофільтр ($\lambda_1 = 400$ нм) замінимо червоним ($\lambda_2 = 650$ нм). Як при цьому змінилась інтерференційна картина на екрані?

Я знаю, як застосовувати рівняння фотоефекту

3. Електрон вилітає з цезію з кінетичною енергією $3,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, а робота виходу із цезію $2,88 \cdot 10^{-19}$ Дж. Яка довжина хвилі, що визначає фотоефект?

4. Робота виходу електронів з цинку $5,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Чи відбуватиметься фотоефект, якщо на цинк падатимуть світлові промені з довжиною хвилі $4,5 \cdot 10^{-7}$ м?

5. Червона межа для фотоефекту калію $\lambda_c = 577$ нм, кінетична енергія вирваних фотоелектронів $4,2 \cdot 10^{-19}$ Дж. Яка частота світлової хвилі, що визначає фотоефект?

6. Робота виходу фотоелектронів із срібла становить $7,85 \cdot 10^{-19}$ Дж. Визначте довжину і частоту хвилі червоної межі фотоефекту для срібла.

Я вмю розв'язувати задачі і пояснювати їх розв'язки

7. Світло частотою 10^{15} Гц падає перпендикулярно до плоского дзеркала. Визначте зміну імпульсу фотона при відбиванні.

8. Фотоелектрони, що вириваються з металу червоним світлом з частотою $3,9 \cdot 10^{15}$ Гц, повністю затримуються напругою 5 В, а вирвані фіолетовим світлом з частотою $7,6 \cdot 10^{15}$ Гц — напругою 20 В. Визначте сталу Планка за цими даними.

Я вмю виконувати досліді

9. Закоптіть скло і голкою проведіть лінію завдовжки 1—2 см. Подивіться через отриману щілину на волосок електричної лампи, розташувавши щілину паралельно нитці лампи. Наближаючи і віддаляючи скло від ока, знайдіть таке його положення, при якому помітне явище дифракції. Щілину можна вирізувати гострою бритвою в чорному папері. Ширина щілини повинна бути близько 0,5 мм.

10. Змінюючи температуру нитки електричної лампи, спостерігайте за спектром випромінюваного нею світла.

Необхідне устаткування: спектроскоп, низьковольтна лампочка з ковпачком, джерело струму з ЕРС 4 В, реостат, ключ, з'єднувальні провідники.

Я знаю, як працюють фотоелементи

11. Катод фотоелемента освітлюється монохроматичним випромінюванням. При зворотній напрузі на фотоелементі 1,25 В струм через нього припиняється. Після зміни довжини хвилі випромінювання на 50 % для припинення фотоструму на фотоелемент довелось подати зворотну напругу 4 В. Яка довжина хвилі випромінювання, яким опромінювався катод? Яка червона межа фотоефекту для речовини катоду фотоелемента?

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

Варіант I

1. Світло — це
 - А. одночасно хвиля і потік частинок масою m .
 - Б. електромагнітна хвиля.
 - В. потік фотонів.
 - Г. одночасно електромагнітна хвиля і потік фотонів.
 - Д. потік частинок масою m .
2. Когерентні хвилі отримують шляхом
 - А. випромінювання від двох джерел різної частоти.
 - Б. від двох джерел однакової частоти із змінною різницею фаз.
 - В. розділом світлового фронту на два.
 - Г. випромінюванням двох джерел, нагрітих до різної температури.
 - Д. випромінювання двох різних лазерів.
3. Інтерференція світла — це
 - А. накладання хвиль, що поширюються від когерентних джерел.
 - Б. області накладання хвиль.
 - В. накладання хвиль, що поширюються від двох джерел, однакової частоти, але змінної різниці фаз.
 - Г. додавання коливань з розподілом амплітуди в часі.
 - Д. додавання коливань з розподілом амплітуди в просторі і часі.
4. Дифракційна ґратка має 40 штрихів на 1 мм. Четвертий максимум відхилений на 6° від точки центра екрана. Чому дорівнює довжина хвилі світла? Якому кольору відповідає така довжина хвилі?
 - А. 523 нм, зеленому. Б. 653 нм, жовтому.
 - В. 710 нм, червоному. Г. 1024 нм, червоному.
5. Дисперсія світла — це залежність
 - А. показника заломлення від швидкості світла.
 - Б. показника заломлення від частоти падаючого світла.
 - В. довжини хвилі від показника заломлення.
 - Г. швидкості поширення світла від показника заломлення.
 - Д. частоти світла від показника заломлення.
6. Швидкість поширення світла у вакуумі дорівнює
 - А. $3 \cdot 10^6$ м/с. Б. $3 \cdot 10^3$ м/с. В. $3 \cdot 10^5$ км/с. Г. $3 \cdot 10^7$ м/с. Д. $3 \cdot 10^4$ км/с.
7. Максимум інтерференційної картини спостерігається, якщо різниця ходу дорівнює
 - А. k . Б. $(k + \frac{1}{2})$. В. $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$. Г. $k \cdot \frac{\lambda}{2}$. Д. $3k \cdot \frac{\lambda}{2}$.
8. Визначте довжину світлової хвилі, що потрапляє на дифракційну ґратку, якщо її період 0,01 мм, а кут заломлення $0,05^\circ$.
 - А. $5 \cdot 10^{-6}$ м. Б. $4,5 \cdot 10^{-7}$ м. В. $6 \cdot 10^{-7}$ м. Г. $9 \cdot 10^{-6}$ м. Д. $5 \cdot 10^{-7}$ м.
9. Кут падіння променя 37° , визначте кут відбиття.
 - А. 37° . Б. 64° . В. 30° . Г. 45° . Д. 15° .
10. Визначте абсолютний показник заломлення середовища, якщо кут падіння променів у повітрі 45° , а кут заломлення в середовищі 30° .
 - А. 2. Б. $\frac{\sqrt{2}}{2}$. В. $\sqrt{2}$. Г. $\frac{2}{\sqrt{2}}$. Д. $2\sqrt{2}$.

11. Явище зовнішнього фотоелектричного ефекту — це виривання електронів
- під дією теплового поля.
 - із середини речовини під дією світла.
 - з поверхні речовини під дією світла.
 - із середини речовини за рахунок деформації.
 - випромінювання поверхнею речовини світла.
12. Закони фотоелектричного ефекту формулюються так.
- Фотострум насичення прямо пропорційний світловому потоку; максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається інтенсивністю.
 - Фотострум насичення пропорційний частоті падаючого світла; максимальна початкова швидкість фотоелектричних ефектів визначається інтенсивністю падаючого світла.
 - Фотострум насичення прямо пропорційний світловому потоку; максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою падаючого світла і не залежить від його інтенсивності.
 - Максимальна початкова швидкість фотоелектронів визначається частотою та інтенсивністю падаючого світла.
 - Фотострум насичення пропорційний світловому потоку і залежить від частоти падаючого світла.
13. Згідно з рівнянням Ейнштейна для фотоелектричного ефекту, енергія кванта, що визначає фотоелектричний ефект, повинна бути
- більшою за роботу виходу.
 - рівною роботі виходу.
 - більшою за роботу виходу або дорівнювати їй.
 - більшою за кінетичну енергію.
 - дорівнювати кінетичній енергії електрона, що вилітає.
14. Червона межа фотоелектричного ефекту визначається з умови:
- $h\nu = \frac{mv^2}{2}$.
 - $h\nu = eU$.
 - $h\nu = A_{\text{вих}} + eU$.
 - $h\nu = A_{\text{вих}}$.
 - $h\nu = 0$.
15. Якщо довжина хвилі падаючого світла дорівнює червоній межі, то швидкість фотоелектронів
- $v = 10^6$ м/с.
 - $v = 3 \cdot 10^8$ м/с.
 - $v = 1,5 \cdot 10^8$ м/с.
 - $v = 1000$ м/с.
 - $v = 0$.
16. Імпульс фотона визначається як
- $\frac{hc}{\lambda}$.
 - $\frac{h\lambda}{c}$.
 - $\frac{h\nu}{c}$.
 - mc^2 .
 - $\frac{hc}{v}$.
17. Визначте енергію фотона, якщо $\nu = 4 \cdot 10^{14}$ Гц.
- $26,56 \cdot 10^{-19}$ Дж.
 - $2,656 \cdot 10^{-19}$ Дж.
 - $265,6 \cdot 10^{-20}$ Дж.
 - $2,656 \cdot 10^{-20}$ Дж.
 - $2,656 \cdot 10^{-18}$ Дж.
18. Визначте імпульс фотона, якщо $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Гц.
- $6,64 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.
 - $6,64 \cdot 10^{-28}$ кг·м/с.
 - $1,328 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.
 - $13,28 \cdot 10^{-29}$ кг·м/с.
 - $13,28 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.
19. Установіть відповідність між одиницями фізичних величин і фізичними величинами.
- | | |
|--------------------|-----------------------|
| А. Маса фотона. | 1. Метр. |
| Б. Частота. | 2. Джоуль. |
| В. Довжина хвилі. | 3. Кілограм. |
| Г. Імпульс фотона. | 4. Герц. |
| Д. Енергія фотона. | 5. Ньютон на секунду. |

Варіант II

1. Когерентними називаються джерела світла, для яких
 - А. однакова частота і зсув фаз постійний у часі.
 - Б. однакова частота і зсув фаз змінний у часі.
 - В. різна частота і зсув фаз незмінний у часі.
 - Г. різна частота і зсув фаз дорівнює нулю.
 - Д. однакова частота.
2. Дифракція світла — це
 - А. огинання перешкод.
 - Б. інтерференція хвиль.
 - В. огинання перешкод співмірних з довжиною хвилі.
 - Г. відбивання від перешкод.
 - Д. проникнення через перешкоди.
3. Які з перерахованих нижче явищ пояснюються інтерференцією світла? 1. Кольорова плівка мильних бульбашок. 2. Відхилення світла в область геометричної тіні. 3. Кільця Ньютона. 4. Утворення напівтіні. 5. Розкладання світла в призмі.
 - А. 1 і 5. Б. 1 і 2. В. 3 і 4. Г. 1 і 3. Д. 1.
4. На основі принципу Гюйгенса — Френеля пояснюється
 - А. відбивання світла.
 - Б. заломлення світла.
 - В. прямолінійне поширення світла, дифракція.
 - Г. інтерференція.
 - Д. дисперсія.
5. Плоскополяризованим називається світло, якщо коливання вектора
 - А. \vec{E} відбуваються в одній площині.
 - Б. \vec{E} змінюються по колу.
 - В. \vec{B} відбуваються в різних площинах.
 - Г. \vec{E} відбуваються в різних площинах.
 - Д. \vec{E} і \vec{B} відбуваються в різних площинах.
6. Показник заломлення середовища $n = 2$, тоді швидкість поширення світла в ньому
 - А. $3 \cdot 10^8$ м/с. Б. $1,5 \cdot 10^8$ м/с. В. $1,5 \cdot 10^7$ км/с. Г. $2 \cdot 10^8$ м/с. Д. $1,5 \cdot 10^3$ км/с.
7. Мінімум інтерференційної картини спостерігається, якщо різниця ходу дорівнює
 - А. $k\lambda$. Б. $(k + \frac{1}{2})\lambda$. В. $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$. Г. $k \cdot \frac{\lambda}{2}$. Д. $\frac{3}{2} \cdot k\lambda$.
8. Визначте порядок максимуму інтерференційної картини, що її дає дифракційна ґратка періодом 0,02 мм, якщо кут заломлення 0,06, а довжина хвилі $6 \cdot 10^{-7}$ м.
 - А. 1. Б. 0. В. 2. Г. 3. Д. 20.
9. Визначте фокусну відстань лінзи, якщо її оптична сила 10 дптр.
 - А. 0,1 см. Б. 10 см. В. 1 м. Г. 0,01 м. Д. 0,15 м.
10. Робота виходу електрона дорівнює найменшій енергії, яку потрібно
 - А. надати електрону провідності, щоб він міг вийти у вакуумі.
 - Б. надати, щоб електрон став електроном провідності.
 - В. надати, щоб швидкість електрона зроста в 2,74 раза.

- Г. забрати, щоб електрон перейшов із зони провідності в зону валентності.
 Д. надати, щоб електрон перейшов із зони валентності в зону провідності.
11. Кінетична енергія вирваних електронів залежить від частоти
- А. прямо пропорційно.
 Б. лінійно.
 В. обернено пропорційно.
 Г. не залежить (стала).
 Д. квадратично.
12. Металева пластинка освітлюється ультрафіолетовим світлом. Заряд якого знаку буде мати ця пластинка в результаті фотоелектричного ефекту?
- А. Негативний. Б. Нейтральний. В. Позитивний. Г. Позитивний і негативний.
 Д. Знак заряду може бути різний залежно від інтенсивності світла.
13. Рівняння Ейнштейна для фотоелектричного ефекту записується так:
- А. $h\nu = \frac{mv^2}{2} + A_{\text{вих}}$. Б. $h\nu = \frac{mv^2}{2}$. В. $h\nu = eU_3$. Г. $h\nu = A_{\text{вих}}$. Д. $h \frac{c}{\lambda} = A_{\text{вих}}$.
14. Довжина хвилі, що відповідає червоній межі фотоелектричного ефекту визначається так:
- А. $\lambda = \frac{h}{v}$. Б. $\lambda = \frac{h\nu}{A_{\text{вих}}}$. В. $\lambda = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}$. Г. $\lambda = \frac{h\nu}{A_{\text{вих}}}$. Д. $\lambda = \frac{A_{\text{вих}}}{hc}$.
15. Енергія фотона визначається так:
- А. $\frac{h\nu}{c}$. Б. $\frac{hc}{\lambda}$. В. $\frac{h\lambda}{c}$. Г. $\frac{hc}{v}$. Д. mc .
16. Маса фотона визначається так:
- А. $\frac{h\nu}{c^2}$. Б. $\frac{hc}{v}$. В. $\frac{h\nu}{c}$. Г. $\frac{h\lambda}{c}$. Д. $\frac{hc}{\lambda}$.
17. Визначте енергію фотона, якщо $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м.
- А. $13,28 \cdot 10^{-20}$ Дж.
 Б. $6,64 \cdot 10^{-20}$ Дж.
 В. $6,64 \cdot 10^{-19}$ Дж.
 Г. $13,28 \cdot 10^{-19}$ Дж.
 Д. $19,92 \cdot 10^{-20}$ Дж.
18. Визначте масу фотона з частотою $\nu = 9 \cdot 10^{14}$ Гц.
- А. $6,64 \cdot 10^{-35}$ кг.
 Б. $6,64 \cdot 10^{-30}$ кг.
 В. $6,64 \cdot 10^{-34}$ кг.
 Г. $6,64 \cdot 10^{-36}$ кг.
 Д. $6,64 \cdot 10^{-37}$ кг.
19. Установіть відповідність між явищами і теоріями світла, що їх описують.
- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| А. Інтерференція. | 1. Хвильова теорія світла. |
| Б. Фотоелектричний ефект. | 2. Корпускулярна теорія світла. |
| В. Ефект Комптона. | 3. Класична механіка. |
| Г. Дифракція. | 4. Релятивістська механіка. |
| Д. Поляризація. | 5. Спеціальна теорія відносності. |