

## Лабораторна робота №10 СПЕКТРАЛЬНА ЧУТЛИВІСТЬ ФОТОПРИЙМАЧІВ

*Мета роботи:* вивчити принципи реєстрування електромагнітного випромінювання фотоелектронним помножувачем (ФЕП), фоторезистором (ФР) та фотодіодом (ФД); визначити області найвищої спектральної чутливості ФЕП і двох ФД.

*Обладнання:* ФЕП, германієвий і кремнієвий ФД, пристрої реєстрації (вольтметри, амперметри або мультиметри), джерело випромінювання видимого світла, монохроматор.

### 1. Вступ

*Приймач оптичного випромінювання* – це пристрій, призначений для виявлення оптичного випромінювання та вимірювання його характеристик шляхом перетворення енергії випромінювання на інші види енергії (теплову, механічну, електричну тощо). Приймачі оптичного випромінювання можна поділити на групи, основні з яких – *теплові, фотоелектронні та фотохімічні*. У цій лабораторній роботі студенти ознайомлюються лише з фотоелектронними приймачами.

*Фотоелектронний приймач* – це електровакуумний або (найчастіше) напівпровідниковий пристрій, електричні характеристики якого (сила струму, електричний опір або електрорушійна сила) змінюються під дією електромагнітного випромінювання. Фотоелектронні приймачі широко використовують у різних галузях техніки. Особливе місце вони займають у схемах електронної автоматики для контролю та управління різноманітними процесами й явищами.

Фотоелектронні приймачі працюють на основі *зовнішнього фотоефекту* (фотоеlementи, ФЕП, електронно-оптичні перетворювачі тощо) або *внутрішнього фотоефекту* (ФР, ФД, фототранзистори тощо). *Фотоефект* – це повне або часткове звільнення електрона від зв'язку з ядрами атомів речовини внаслідок дії електромагнітного випромінювання. При *зовнішньому фотоефекті* (або *фотоелектронній емісії*) освітлена речовина поглинає фотон і випускає електрон, тобто електрон покидає межі цієї речовини. При *внутрішньому фотоефекті* освітлена речовина поглинає фотон, унаслідок чого електрон може брати участь у струмі, не покидаючи меж речовини. Як уже зазначено, ФЕП працює на зовнішньому фотоефекті, а напівпровідникові ФР і ФД – на внутрішньому.

### 2. Фотоелектронні помножувачі

#### 2.1. Будова фотоелектронного помножувача

*ФЕП* – це електровакуумний пристрій, призначений для підсилення слабкого світлового сигналу та перетворення його на електричний сигнал. Для перетворення світлового потоку в потік електронів у ФЕП використовують зовнішній фотоефект. Оскільки кількість фотоелектронів дещо замала для надійної реєстрації, кількість електронів додатково помножують за допомогою вторинної емісії. Оскільки ФЕП застосовують для реєстрації слабких світлових потоків, то його чутливість дуже висока. Фактично, він здатний зареєструвати навіть декілька квантів світла.

Розглянемо будову ФЕП (рис. 1). У циліндричному скляному балоні, де створено високий вакуум, розміщено електроди. Першим електродом є фотокатод ФК,

який конструктивно розміщений на внутрішній поверхні балона. Це тонкий шар напівпрозорої речовини, яка легко випускає електрони під дією світла. Найчастіше в ФЕП застосовують сурм'яно-цезієвий фотокатод, який забезпечує високий відсоток виходу фотоелектронів. За фотокатодом розміщений фокусувальний електрод ФЕ, який фокусує електрони. Це пластинка з круглим отвором. Після ФЕ маємо електроди, що підсилюють світловий потік, – т. зв. *диноди*  $D_1, D_2, \dots$ . Нарешті, останнім електродом є анод А. Електричні потенціали різних електродів ФЕП різні. Найнижчий потенціал у фотокатода. Зазвичай напруга на ньому становить від  $-1000$  до  $-1500$  В (на рис. 1 потенціал фотокатода дорівнює  $-1200$  В). Потенціал фокусувального електрода дещо вищий ( $-1100$  В на рис. 1). Ще вищі потенціали мають диноди (наприклад, потенціали динодів  $D_1$  і  $D_2$  дорівнюють відповідно  $-1000$  і  $-900$  В). Отже, потенціали наступних динодів зростають, а анод має найвищий потенціал. Тому електрон, заряд якого від'ємний, прискорюється електричним полем і обов'язково потрапляє на диноди, а потім на анод.

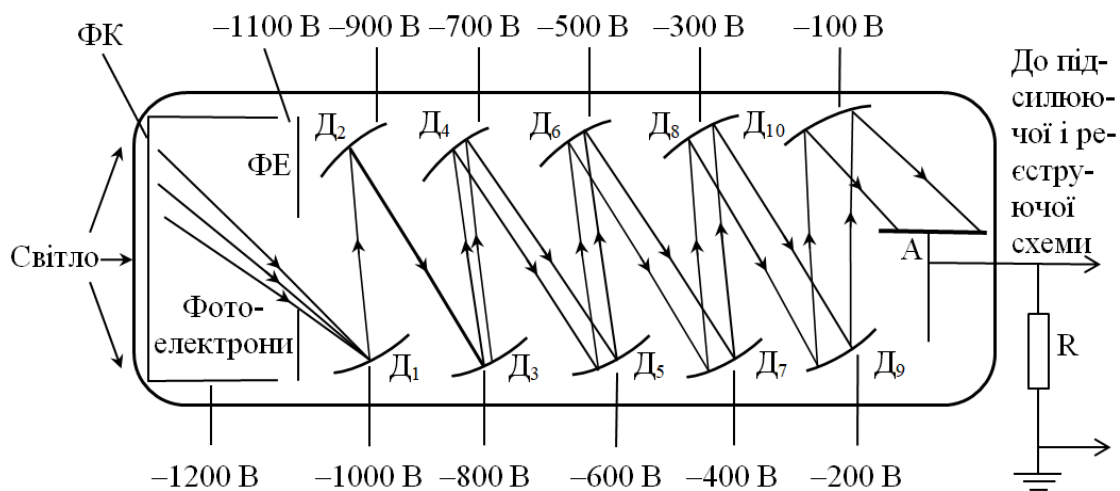


Рис. 1. Будова ФЕП: ФК – фотокатод; ФЕ – фокусувальний електрод;  $D_1, D_2, \dots, D_{10}$  – диноди; А – анод, R – зовнішній опір.

## 2.2. Принцип роботи фотоелектронного помножувача

Світлові кванти потрапляють на фотокатод. Під дією світла з катода вилітають фотоелектрони (явище зовнішнього фотоефекту). Кількість фотоелектронів, які вилітають з фотокатода при потраплянні на нього світла, невелика і типово не перевищує тисячі. Сумарний заряд цих електронів за порядком величини малий,  $\sim 10^{-16}$  Кл. Безпосереднє виявлення таких малих зарядів – це складна задача. Однак завдяки будові ФЕП, на його виході одержують набагато більше електронів, ніж їх вилітає з фотокатода.

Принцип роботи ФЕП такий: фотоелектрони, звільнені світлом із різних ділянок фотокатода, прискорюються електричним полем і за допомогою фокусувального електрода збираються на першому диноді  $D_1$ . Електрони, вдаряючись у поверхню динода, вибивають із нього нові електрони. Таке явище повторного вибивання електронів називають *вторинною електронною емісією*. Кількість вторинних електронів у декілька разів перевищує кількість електронів, які потрапили на динод.

Вторинні електрони, які вилетіли з динода  $D_1$ , прискорюються електричним полем, яке виникає між першим і другим динодами, до такої швидкості, за якої вони

можуть вибити нові електрони з другого динода  $D_2$ . Тому кількість електронів знову зростає. У результаті проходження крізь усі диноди потік електронів багатократно зростає. *Коефіцієнт електронного підсилення*, який дорівнює відношенню сили струму на виході помножувача до первинного фотоструму, створеного світловим випромінюванням, досягає великих значень  $10^5$ – $10^6$ .

Отже, на появу світлового пучка ФЕП відповідає короткочасним електричним сигналом, достатньо сильним для реєстрації за допомогою підсилювальних схем і порівняно простих вимірювальних пристроїв.

### 2.3. Сумарний електричний заряд на аноді фотоелектронного помножувача

Електричний заряд, що виникає на аноді ФЕП під дією спалаху світла, визначається властивостями двох основних складових ФЕП: фотокатода і системи електронного помноження.\*

Як вже згадували, у ФЕП застосовують сурм'яно-цезієві фотокатоди. Найважливішою характеристикою фотокатода є його *квантовий вихід*  $\eta$ . Він визначає кількість фотоелектронів  $N_e$ , випущених у середньому катодом при потраплянні на нього  $N$  світлових квантів певної довжини хвилі ( $\eta = N_e/N \leq 1$ ). У сурм'яно-цезієвого фотокатода максимум квантового виходу  $\eta$  лежить у синій області спектра ( $\sim 450$  нм). Висока чутливість цього катода простягається в обидва боки від максимуму більш ніж на 50 нм. Абсолютна величина квантового виходу сурм'яно-цезієвого катода поблизу максимуму досягає значення приблизно 30% (катод випускає один фотоелектрон при потраплянні на нього трьох фотонів).

Величина заряду, який виникає на аноді ФЕП, залежить від *коефіцієнта підсилення*  $K$ . Останній визначається в основному *коефіцієнтом підсилення динодів*  $\sigma$  і кількістю динодів  $n$ . У сучасних ФЕП коефіцієнт підсилення динодів при різниці потенціалів між сусідніми динодами  $\sim 100$  В приблизно дорівнює 4. Тому ФЕП, який містить 10 динодів у нормальному режимі роботи, має коефіцієнт підсилення  $K = \sigma^n = 4^{10} \approx 10^6$ . Отже, 150 електронів, які вилетіли з фотокатода, внаслідок дії механізму помноження приведуть до появи на аноді ФЕП  $150 \cdot 10^6 = 1,5 \cdot 10^8$  електронів, або заряду  $1,5 \cdot 10^8 \cdot 1,9 \cdot 10^{-19} = 2,85 \cdot 10^{-11}$  Кл. Це дає змогу полічити кількість фотонів чи йонізуючих частинок або розрахувати потік радіоактивного випромінювання за допомогою порівняно простих підсилювальних і вимірювальних приладів.

### 2.4. Шуми в фотоелектронних помножувачах

Окрім корисного сигналу, у ФЕП спостерігають шкідливі *шуми*. Через шуми ФЕП реєструє деякий шумовий сигнал навіть в умовах темряви. Цей сигнал можна помилково сприйняти як результат освітлення ФЕП.

Шуми в ФЕП зумовлені двома явищами:

1. *Термоелектронна емісія з фотокатода і перших динодів*. При нагріванні цих електродів вивільнюється деяка кількість електронів, незалежно від того, чи освітлений ФЕП світлом, чи ні. Ці електрони прискорюються, спричиняють появу вторинних електронів і створюють шкідливий імпульс напруги.

2. *Йонний зворотний зв'язок*. Суть його полягає в тому, що електрони можуть вилетіти з верхньої фотокатода не через освітлення, а внаслідок т. зв. *явища термоелектронної емісії* (фактично через те, що температура катода не дорівнює нулеві за Кельвіном). Ці електрони йонізують атоми залишкового газу в трубці ФЕП. Утворені позитивні йони прямують назустріч потокові електронів, частково доходять до фотокатода і, зіткнувшись з ним, вибивають електрони. Своєю чергою, ці електрони породжують імпульси т. зв. *темнового струму* в ФЕП.

---

\* Текст дрібним шрифтом відповідає поглибленому опису явищ і приладів напівпровідникової електроніки. При побіжному ознайомленні його можна пропустити.

Унаслідок явищ (1) і (2) в умовах темряви ФЕП зареєструє деякий шумовий сигнал, що не має зв'язку зі світлом, яке падає на ФЕП. Зазначимо, що паразитний ефект (2) переважно сильніший за паразитний ефект (1).

Абсолютні і відносні величини шуму і корисного сигналу лічильника істотно залежать від напруги на динодах ФЕП. Зрозуміло, що зі зростанням напруги на динодах зростає й кількість вторинних електронів, вибитих із поверхні динодів. Тому й коефіцієнт підсилення ФЕП і амплітуда імпульсів струму, спричинених освітленням фотокатода, теж зростають. Разом з тим, зростає й амплітуда шумових імпульсів, зумовлених термоелектронною емісією з фотокатода і перших динодів. А за ще вищих напруг починає виявлятися й інше джерело шуму ФЕП – йонний зворотний зв'язок. Тому зі зміною напруги сумарний темновий струм змінюється за іншим законом, аніж струм, спричинений світлом. Для раціонального вибору робочих напруг, який забезпечує велике відношення сигналу до шуму, потрібно кількісно знати залежності коефіцієнта підсилення сигналу і шуму від напруги на динодах. У хороших ФЕП при напрузі  $\sim 1200$  В темновий струм не перевищує  $10^{-9}$  А. Наприклад, у серійному ФЕП-106 за напруги  $\sim 2500$  В він становить  $\sim 6 \cdot 10^{-8}$  А.

### 3. Напівпровідникові фоторезистори

#### 3.1. Напівпровідники

Багато речовин у кристалічному стані не є такими хорошими провідниками струму, як метали. Проте ці речовини не можна віднести й до діелектриків. Речовини, які за електричною провідністю відрізняються і від металів, і від діелектриків, але займають особливе місце за величиною і механізмами цієї провідності, називають напівпровідниками. *Напівпровідники* – це матеріали, електропровідність яких має проміжне значення між провідностями провідників і діелектриків. Електропровідність напівпровідників помітно залежить від концентрації домішок, температури та зовнішнього опромінення.

Зазвичай до напівпровідників відносять матеріали, в яких для вивільнення електронів потрібна відносна невелика енергія – не більше за 1,5–2,0 еВ. Навіть за кімнатної температури окремі електрони цілком можуть мати енергію, достатню для їхнього відривання від ядер атомів. Тому внаслідок теплового руху атоми напівпровідника можуть позбутися одного або кількох електронів і перетворитися на позитивно заряджені йони, що можуть потім нейтралізуватися, захоплюючи електрони в сусідніх атомах. Унаслідок переходу електрона від одного атома до іншого звільнене електронном місце (вакансія електрона) переміщується в просторі. Цей процес сприймають як переміщення умовного позитивного електричного заряду, який називають *діркою*. В *ідеальному напівпровіднику* електричний струм створюється рухом однакових кількостей електронів і дірок. Такий тип провідності називають *власною провідністю* напівпровідника.

#### 3.2. Принцип роботи та класифікація фоторезисторів

*ФР* – це найпростіший напівпровідниковий приймач електромагнітного випромінювання, з яким студентам корисно ознайомитися. Під дією світла ФР змінює свій електричний опір. Дія ФР заснована на явищі внутрішнього фотоефекту у напівпровідниках. При падінні світла на робочу поверхню ФР його *опір зменшується* внаслідок утворення пар вільних носіїв заряду. У напівпровіднику такими носіями є *електрони* та вакансії електронів – т. зв. *дірки* з негативним і позитивним зарядом відповідно. Через індуковане світлом утворення носіїв заряду електрична провідність напівпровідника зростає.

Конструктивно ФР становить собою шар напівпровідникового матеріалу на підкладці (або без неї), з електродами, за допомогою яких прилад вмикають в електричне коло.

Розрізняють три групи ФР: плівкові, монокристалічні та леговані. До плівкових відносять ФР на основі свинцевих сполук сірки (PbS), селену (PbSe) і телуру (PbTe). Монокристалічні ФР

виготовляють з антимоніду індію (InSb), телуридів кадмію і ртуті ( $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ ), сульфідів (CdS) і селенідів (CdSe) кадмію. Леговані ФР (із германію, легованого різними домішками) працюють лише за низьких температур.

ФР на основі кадмію чутливі до випромінювання у видимій (380÷740 нм) і ближній інфрачервоній (740÷2500 нм) областях, а ФР на основі свинцю – на довжинах хвиль 1000÷5000 нм.

### 3.3. Характеристики фоторезисторів

Коротко опишемо основні характеристики ФР.

*Світлова характеристика  $I(\Phi)$*  – це залежність фотоструму  $I$  від світлового потоку  $\Phi$ . Звісно, що на практиці зручно, аби залежність  $I(\Phi)$  була лінійною (струм прямо пропорційний до потоку світла). Проте світлова характеристика ФР наближено лінійна лише в деякому діапазоні світлових потоків  $\Phi$ .

*Інтегральна чутливість  $S$*  – відношення зміни опору ФР до зміни його освітленості. Цю чутливість називають «інтегральною», оскільки її вимірюють за умов освітлення ФР білим світлом зі складним спектральним складом (див. лабораторну роботу №6).

*Поріг чутливості  $\Phi_n$*  – це мінімальний рівень світлового потоку, який спричиняє на виході фотоприймача сигнал, що дорівнює напрузі шумів або дещо перевищує її. Якщо  $\Phi < \Phi_n$ , ми не можемо надійно зареєструвати світло, оскільки не певні, чи сигнал ФР не породжений шумами.

*Діапазон світлових потоків  $\Delta\Phi$*  – це деякий діапазон  $\Phi_1 \div \Phi_2$ , у якому спостерігаємо лінійну світлову характеристику  $I(\Phi)$ .

*Темновий опір  $R_T$*  – це опір чутливого шару ФР за відсутності випромінювання.

*Постійна часу  $\tau$*  – це час, протягом якого фотострум ФР зростає на 63% від моменту початку його освітлення або спадає після моменту припинення освітлення ФР на таку ж величину. Зазначимо, що величина змін на 63% аналогічна множникові  $1 - e^{-1}$  у перехідному процесі.

*Вольт-амперна характеристика* – це залежність фотоструму  $I$  від прикладеної до ФР напруги  $U$  за умови сталого світлового потоку  $\Phi$ . Ця характеристика ФР зазвичай лінійна (див. рис. 2).

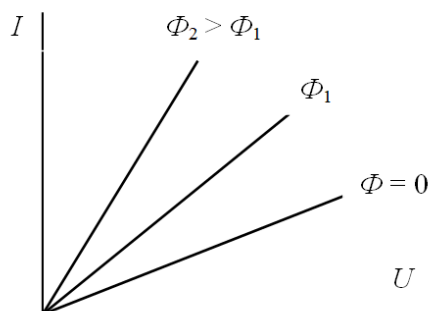


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика  $I(U)$  для ФР за різних значень світлового потоку  $\Phi$ .

### 3.4. Переваги та недоліки фоторезисторів

*Переваги* ФР такі:

- невисокі напруги живлення, порівняно з ФЕП;
- практично необмежений термін використання;
- малі розміри та простота виготовлення;
- можливість створення робочих поверхонь різних площ і довжин;

– висока чутливість і надійність у роботі.

До *недоліків* ФР можна віднести такі ознаки:

- високу інерційність (велику постійну часу);
- значну залежність характеристик від температури;
- малу лінійну ділянку світлової характеристики (малий діапазон світлових потоків);
- залежність вихідного сигналу від площі чутливого шару ФР, на яку впало світло.

### 3.5. Використання фоторезисторів

ФР широко використовують у різних автоматичних пристроях. Вони дають змогу на відстані керувати виробничими процесами, автоматично встановлювати факти порушення нормального ходу процесів та зупиняти ці процеси. Як приклад, згадаємо використання ФР для контролю переміщень об'єктів у діапазоні декількох міліметрів (зокрема, в системах спостереження за положенням краю паперового полотна в рулонних машинах друку). В автоматичних лініях підрахунку і сортування виробів масової продукції за їхніми розміром і кольором, а також для освітлення об'єктів у вечірній і нічний час також застосовують реле на ФР. Удень сонячне світло освітлює ФР, тому його опір незначний. За цих умов в електричному колі проходить струм значної сили, а якір реле притягується до осердя котушки. Тому коло освітлювальної лампи розімкнуте. З настанням сутінок опір ФР різко зростає, сила струму в його колі зменшується майже до нуля, а тому якір відходить від осердя і замикає коло освітлювальної лампи.

## 4. Напівпровідникові фотодіоди

*ФД* – це приймач оптичного випромінювання, який перетворює світло, що падає на нього, на електричний сигнал. Це відбувається завдяки впливові світла на процеси в т. зв. *p-n-переході* у ФД. По суті, ФД – це особливий напівпровідниковий діод, а саме: це фоточутливий напівпровідниковий діод, вольт-амперна характеристики якого залежить від освітленості.

Оскільки ФД є напівпровідниковим пристроєм, а принцип його роботи базується на процесах у *p-n* переході, коротко розглянемо особливості напівпровідників, механізми утворення *p-n* переходів і процеси, які в них відбуваються.

### 4.1. Формування *p-n-переходу* в напівпровідниках

*p-n-перехід* (електронно-дірковий перехід) – це область контакту між напівпровідниками різного типу провідності: напівпровідником *p*-типу із *дірковою провідністю* і напівпровідником *n*-типу із *електронною провідністю*. Провідність *n*-типу створюють завдяки введенню спеціальних *донорних домішок*, а провідність *p*-типу забезпечують т. зв. *акцепторними домішками*.

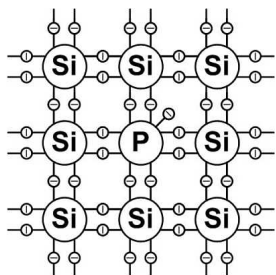


Рис. 3. Пояснення провідності *n*-типу напівпровідника на прикладі додавання донорної домішки п'ятивалентного фосфору (P) до чотиривалентного кремнію (Si).

Атоми донорних домішок мають вищу валентність, аніж атоми самого напівпровідника (рис. 3). Тому при з'єднанні атомів цих двох типів у домішці вивільняються електрони, і домішко-

ві атоми перетворюються на позитивно заряджені йони. При введенні в напівпровідник донорної домішки кількість електронів значно перевищує кількість дірок. Отже, електрони будуть основними (проте не єдиними) носіями струму – адже деяка кількість власних атомів напівпровідника вже йонізована внаслідок їхнього теплового руху (див. попередній текст), а деяка частка струму створюється й дірками.

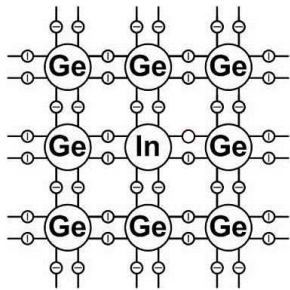


Рис. 4. Пояснення провідності  $p$ -типу у напівпровіднику на прикладі додавання акцепторної домішки тривалентного індію (In) до чотиривалентного германію (Ge).

Валентність атомів акцепторних домішок нижча за валентність основних атомів напівпровідника (рис. 4), тому при їхньому з'єднанні атом домішки захоплює електрон в атома напівпровідника. Тоді замість захопленого електрона виникає вільне місце – дірка з позитивним зарядом, а домішка перетворюється на негативно заряджений йон. Отже, у напівпровіднику  $p$ -типу кількість дірок набагато перевищує кількість електронів.

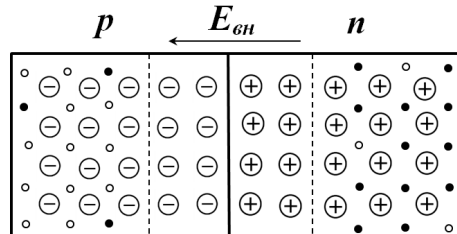


Рис. 5. Розподіл носіїв заряду в  $p$ - і  $n$ -областях напівпровідника за відсутності зовнішнього електричного поля. Тут  $\ominus$  – негативно заряджені йони акцепторної домішки,  $\bullet$  – електрони,  $\circ$  – дірки,  $\oplus$  – позитивно заряджені йони донорної домішки,  $E_{вн}$  – внутрішнє (замикаюче) електричне поле, що виникає в  $p$ - $n$ -переході між областями просторових некомпенсованих зарядів. На рисунку не позначені нейтральні атоми напівпровідника та позитивно заряджені йони, на які перетворюються атоми, коли електрони відриваються від ядер унаслідок теплового руху.

Область контакту між напівпровідниками  $p$ -типу та  $n$ -типу характеризується однобічним пропусканням електричного струму. Як це відбувається? Під час контакту між напівпровідниками  $p$ -типу і  $n$ -типу виникає *дифузійний струм* основних носіїв заряду, спричинений їхньою неоднорідністю розподілу. Тоді електрони та дірки переходять із тієї області, де їх більше, в область, де їх менше, і *рекомбінують* (з'єднуються) між собою. Внаслідок рекомбінації поблизу межі між областями практично не буде вільних носіїв заряду, але залишаться йони домішок із некомпенсованими зарядами: додатним зарядом донорних домішок у напівпровіднику  $n$ -типу і від'ємним зарядом акцепторних домішок у напівпровіднику  $p$ -типу. Отже, межа між напівпровідниками  $p$ -типу і  $n$ -типу оточена двома областями просторового заряду протилежного знака, між якими виникає внутрішнє електричне поле  $E_{вн}$  (рис. 5). Це поле перешкоджає переміщенню основних носіїв заряду: електронів із  $n$ -області в  $p$ -область і дірок із  $p$ -області в  $n$ -область. Це поле називають *замикаючим*.

Область напівпровідника, де знижена концентрація основних носіїв заряду, і, як наслідок, виникає замикаюче поле, називають *електронно-дірковим*, або  *$p$ - $n$ -переходом*. Замикаюче електричне поле перешкоджає переміщенню основних носіїв заряду крізь  $p$ - $n$ -перехід і одночасно сприяє переміщенню крізь перехід неосновних носіїв. Тому *дрейфовий струм* неосновних носіїв заряду протікає в напрямку, протилежному до напрямку дифузійного струму. Врешті-решт, між дифузійним і дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага. Тоді перетікання зарядів припиняється, а  $p$ - $n$ -перехід перетворюється на область із нерухомими просторовими зарядами.

## 4.2. Пряме та зворотне прикладання напруги до $p$ - $n$ -переходу

Якщо зовнішня напруга  $E_{зовн}$  прикладена знаком «плюс» до області діркової провідності  $p$ -типу, а знаком «мінус» до області електронної провідності  $n$ -типу (рис. 6), то зовнішнє електричне поле спрямоване протилежно до електричного поля, створеного просторовими зарядами. Оскільки зовнішнє поле послаблює замикаюче внутрішнє поле, то переходи основних носіїв крізь  $p$ - $n$ -перехід полегшаються. Отже, динамічна рівновага порушиться і дифузійний струм переважатиме дрейфовий, швидко наростаючи з підвищенням напруги. Таке під'єднання напруги до  $p$ -переходу називають *прямим*.

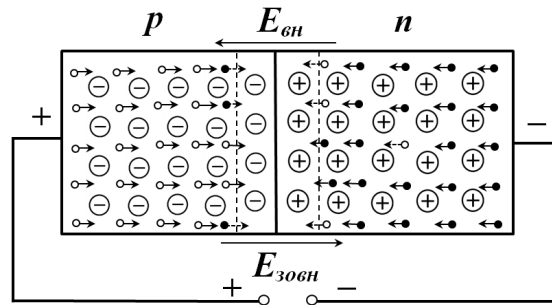


Рис. 6. Розподіл носіїв заряду в  $p$ - і  $n$ -областях напівпровідника за умови прямого прикладання зовнішньої напруги  $E_{зовн}$ . За такої полярності напруги  $p$ - $n$ -перехід буде *відкритий* і крізь нього протікатиме істотний *прямий* струм (суцільними стрілками позначено рух основних носіїв заряду, а пунктирними стрілками – неосновних носіїв).

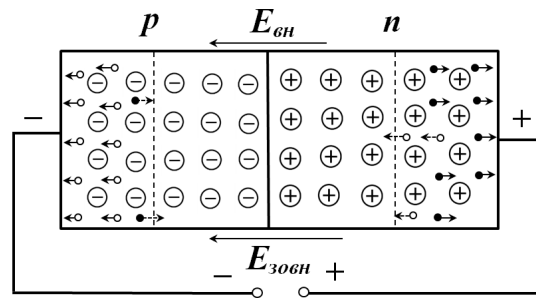


Рис. 7. Розподіл носіїв заряду в  $p$ - і  $n$ -областях напівпровідника за умови зворотного прикладання зовнішньої напруги  $E_{зовн}$ . За такої полярності напруги  $p$ - $n$ -перехід буде *закритий* і крізь нього протікатиме незначний *зворотний* струм, який визначатиметься дрейфовим рухом неосновних носіїв заряду крізь  $p$ - $n$ -перехід (суцільними стрілками позначений рух основних носіїв заряду, а пунктирними стрілками – неосновних).

Якщо прикласти зовнішню напругу знаком «плюс» до області електронної провідності  $n$ -типу, а знаком «мінус» до області діркової провідності  $p$ -типу (рис. 7), то створене нею зовнішнє електричне поле матиме такий же напрям, як і електричне поле між областями просторового заряду. Тоді зовнішнє поле буде підсилювати внутрішнє, яке є замикаючим для основних носіїв заряду. Електрони в напівпровіднику  $n$ -типу і дірки в напівпровіднику  $p$ -типу віддалятимуться від  $p$ - $n$ -переходу в різні боки, збільшуючи товщину областей просторового заряду. Дифузійний струм основних носіїв зменшиться настільки, що переважаючим стане невеликий дрейфовий струм неосновних носіїв. Таке прикладання напруги називають *зворотним*.

Оскільки концентрація неосновних носіїв у тисячі разів менша за концентрацію основних носіїв, дрейфовий струм за умови зворотного прикладання напруги буде набагато менший від дифузійного струму за умови прямого прикладання. Тому можна сказати, що при зворотному включенні напруги  $p$ - $n$ -перехід майже не пропускає струму.

## 4.3. Принцип роботи фотодіода

За своєю конструкцією ФД аналогічний до звичайного напівпровідникового діода. Напругу живлення до нього прикладають у зворотному напрямку (див. по-



пер. текст). Коли ФД не освітлений, то в колі проходить невеликий зворотний (темновий) струм  $I_T$ . Типово це  $10 \div 20$  мкА для германієвих ФД і  $1 \div 2$  мкА для кремнієвих ФД. На рис. 8 зображено конструкцію ФД. Його  $p$ - $n$ -перехід одним боком повернутий до скляного вікна, крізь яке падає світло, і захищений від потрапляння світла з інших боків.

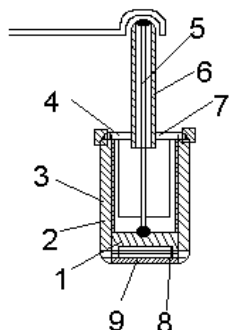


Рис. 8. Конструкція ФД: 1 – кристал германію з  $p$ - $n$ -переходом; 2 – тримач напівпровідникового кристала; 3 – металевий корпус; 4 – кільце; 5 – вивід; 6 – металева трубка; 7 – скляний ізолятор; 8 – свинцеве кільце; 9 – скляне вікно.

Нехай до світла повернута  $n$ -область ФД. Коли світло потрапляє на ФД у площині, перпендикулярній до  $p$ - $n$ -переходу, в результаті поглинання фотонів у  $n$ -області виникають електронно-діркові пари. Оскільки їхня поява пов'язана з випромінюванням, то ці носії заряду називають *фотоносіями*. Під час дифузії фотоносіїв у глибину  $n$ -області основна частина електронів і дірок не встигає рекомбінувати між собою і доходить до межі  $p$ - $n$ -переходу. Там вони розділяються електричним полем  $p$ - $n$ -переходу: дірки переходять у  $p$ -область, а електрони не можуть здолати електричного поля й тому збираються близько межі  $n$ -області та  $p$ - $n$ -переходу. Отже, струм ФД (або *фотострум*) – це дрейфовий струм неосновних носіїв заряду крізь  $p$ - $n$ -перехід за умови зворотного прикладання напруги. Сам же ФД за означенням становить собою напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від освітленості  $p$ - $n$ -переходу.

#### 4.4. Режими роботи фотодіодів

ФД можна включати в електричне коло зі зовнішнім джерелом живлення або без нього. Режим роботи ФД із зовнішнім джерелом живлення називають *фотодіодним*, а без нього – *фотогальванічним*. У фотогальванічному режимі ФД перетворює енергію випромінювання на електричну, тобто ФД працює як генератор е. р. с. ФД, які перетворюють сонячну енергію на електричну, називаються *сонячними елементами*. Вони входять, зокрема, до складу сонячних батарей на космічних кораблях.

#### 4.5. Переваги фотодіодів та їхнє застосування

ФД виявляють усі переваги напівпровідникових пристроїв: малі маса та габарити, значний термін служби, низькі напруги живлення та висока економічність. Крім того, ФД мають вищу чутливість, порівняно з ФР. Однак за своєю чутливістю ФД програють таким приладам, як ФЕП.

Завдяки простоті та мініатюрності конструкції, широкій спектральній чутливості, високій швидкодії, можливості автономного (власного) живлення та варіативності схем під'єднання, ФД широко застосовують у промисловості. Зокрема, ФД часто використовують для точного вимірювання інтенсивності світла, визначення прозорості речовин, автоматичного регулювання і контролю температури та інших параметрів речовини, зміна яких впливає на зміну оптичних властивостей цієї речовини. В оптичних лініях зв'язку ФД застосовують як високочастотні перетворювачі світлових сигналів на електричні. ФД також входять до складу пристроїв уведення та виведення інформації в комп'ютерах.

#### 4.6. Характеристики фотодіодів

Основними характеристиками ФД є вольт-амперна, світлова і спектральна. Вольт-амперна характеристика  $I=f(U)$  описує залежність струму  $I$  крізь ФД від напруги  $U$  на ньому за умови постійного світлового потоку  $\Phi = \text{const}$ . Якщо ФД повністю затемнений ( $\Phi = 0$ ), то крізь нього протікає лише темновий струм  $I_T$ .

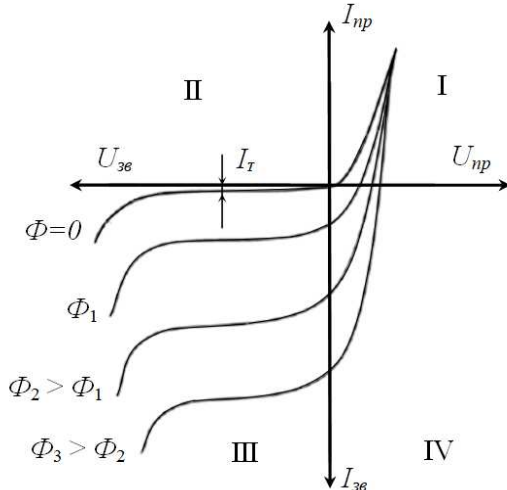


Рис. 9. Вольт-амперна характеристика  $I(U)$  ФД для різних значень потоку випромінювання  $\Phi$ :  $U_{np}$  і  $U_{zs}$  – це відповідно пряма та зворотна зовнішні напруги;  $I_{np}$  і  $I_{zs}$  – прямий і зворотний струми;  $I_T$  – темновий струм.

Квадрант I на рис. 9 – це неробоча область ФД, коли до  $p$ - $n$ -переходу прикладено пряму зовнішню напругу. Тоді дифузійний струм основних носіїв заряду «затіняє» фотострум, який є дрейфовим струмом неосновних носіїв. У такому разі світлове керування діодом неможливе.

Квадрант III на рис. 9 відповідає фотодіодному режимові роботи ФД, коли до  $p$ - $n$ -переходу прикладено зворотну зовнішню напругу. Зазначимо, що в робочому діапазоні зворотних напруг фотострум практично не залежить від прикладеної напруги. Такий режим має місце за умови зворотних напруг на ФД  $\sim 1$  В. Якщо зворотна напруга перевищує деяке максимально допустиме значення, то в  $p$ - $n$ -переході виникає ефект лавиноподібного помноження носіїв заряду. Це може призвести до виходу ФД з ладу. Лавиноподібне помноження носіїв заряду супроводжується різким зростанням зворотного струму на кривих вольт-амперної характеристики, зображених на рис. 9.

Нарешті, квадрант IV на рис. 9 – це фотогальванічний режим роботи ФД.

Світлова характеристика  $I = f(\Phi)$  ФД – це залежність струму ФД від величини світлового потоку за умови постійної напруги  $U = \text{const}$  на ФД. У широкому діапазоні змін світлового потоку світлова характеристика ФД виявляється лінійною. Це значна перевага цього пристрою.

Спектральна характеристика ФД – це залежність його спектральної чутливості від довжини хвилі світла, що падає на ФД.

#### 4.7. Види фотодіодів

ФД виготовляють з використанням гомопереходу ( $p$ - $n$ -переходу на основі одного матеріалу); гетеропереходу, утвореного на межі двох областей різних матеріалів з домішками протилежного типу; контактного бар'єра, що виникає на межі метал- $n$ -напівпровідник або метал- $p$ -напівпровідник; різних структур метал-діелектрик-напівпровідник, а також низки інших схем.

Різні модифікації будови ФД дають змогу досягнути особливих і навіть екстремальних параметрів і характеристик, наприклад надвисоких чутливості або швидкодії. Прикладом може слу-

гувати т. зв. *p-i-n*-ФД. Він складається з тонкої сильно легованої *n*-області, товстішої слабо легованої *i*-області та сильно легованої *p*-області. Окрім високої швидкодії, такий ФД досягає, по суті, теоретичної межі чутливості на довжині хвилі  $\lambda = 900$  нм.

ФД зі структурою *метал-напівпровідник* (т. зв. *ФД Шоткі*) дають змогу підвищити швидкодню до  $10^{-10}$  с або й вище! *ФД з гетероструктурою* є одним із найперспективніших типів фотоприймачів. Насправді наявність гетероструктури в ФД відкриває принципову можливість досягнення к. к. д., близької до 100%.

Ще одним шляхом розроблення швидкодіючих фотоприймачів із високою чутливістю є використання явища *лавинного пробою* напівпровідника. На цьому працюють т. зв. *лавинні ФД*. Ці ФД перспективні передусім для виявлення надзвичайно слабких оптичних сигналів.

#### 4.8. Кремнієві та германієві фотодіоди

Германій та кремній – це матеріали, які найчастіше використовують для виготовлення ФД. Спектральна чутливість германієвих ФД припадає на діапазон 500÷1800 нм, а максимум чутливості типово має місце на довжинах хвиль 1200÷1600 нм. Кремнієві ФД чутливі в діапазоні довжин хвиль 600÷1000 нм, із максимумом чутливості приблизно при 800÷1000 нм.

Мета лабораторної роботи – вивчення спектральних характеристик ФЕП і германієвого та кремнієвого напівпровідникових ФД, а також визначення діапазонів найкращої спектральної чутливості цих фотоелектронних приймачів світла.

### 5. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

#### І. Визначити діапазон найвищої спектральної чутливості фотоелектронного помножувача

1. Ознайомитися з установкою, схему якої подано на рис. 10. Принцип дії установки такий. Світлові промені фокусуються лінзою 2 і направляються на монохроматор 3. Монохроматор виділяє з неперервного спектра світлові хвилі з певними довжинами. Ці хвилі потрапляють на ФЕП 4, який перетворює світлову енергію на електричні сигнали. Далі ці електричні сигнали фіксують пристроєм реєстрації.

2. Увімкнути установку та прогріти її протягом 10 хвилин.

3. Установити задану викладачем напругу на аноді ФЕП (у межах робочих напруг ФЕП  $U = 700\text{--}1200$  В).

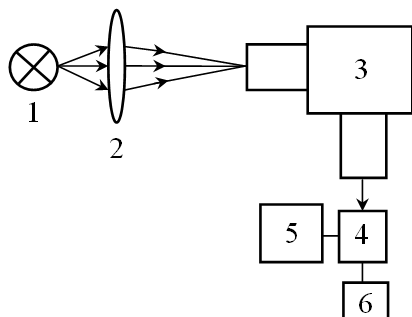


Рис. 10. Схема установки для вимірювання спектральної характеристики ФЕП:

- 1 – джерело світла;
- 2 – фокусувальна лінза;
- 3 – монохроматор;
- 4 – ФЕП;
- 5 – блок живлення;
- 6 – пристрій реєстрації.

4. Виміряти спектральну характеристику ФЕП. Для цього за допомогою вольтметра виміряти залежність інтенсивності світла  $I$  на виході ФЕП (точніше, напруги у вольтах на виході ФЕП, яка пропорційна до інтенсивності світла) від його

довжини хвилі  $\lambda$  (нм), змінюючи величину  $\lambda$  від 400 до 1230 нм із кроком 10 нм (або з іншим кроком, заданим викладачем).

5. Дані вимірювань занести в таблицю програмного пакета Origin.

6. Побудувати графік залежності  $I(\lambda)$ . На графіку обов'язково відобразити всі експериментальні точки! Приклад графіка залежності інтенсивності світла  $I$  (В) від довжини хвилі  $\lambda$  (нм) за умови напруги  $U = 1100$  В на аноді ФЕП подано на рис. 11.

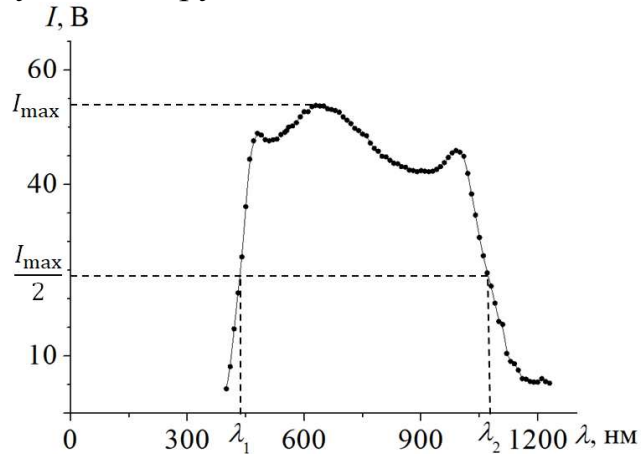


Рис. 11. Визначення діапазону найкращої спектральної чутливості ФЕП за допомогою графіка залежності інтенсивності світла  $I$  (В) від довжини хвилі  $\lambda$  (нм) за напруги  $U = 1100$  В на аноді ФЕП. Графік побудовано в програмному пакеті Origin. Дані експерименту позначено точками.

7. Визначити довжини хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , які обмежують «ширину» функції  $I(\lambda)$  на половині висоти її максимуму  $I_{\max}$  (див. рис. 11). Інтервал довжин хвиль від  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  – це діапазон найвищої спектральної чутливості ФЕП.

## II. Визначити діапазон найвищої спектральної чутливості кремнієвого фотодіода

1. Скласти й увімкнути установку на рис. 12, аналогічну до установки на рис. 10.

2. Виміряти спектральну характеристику кремнієвого ФД. Для цього за допомогою амперметра виміряти залежність інтенсивності світла на виході ФД (точніше, сили струму  $I$  (мкА) на ФД, яка пропорційна до інтенсивності світла) від довжини хвилі  $\lambda$  (нм), змінюючи величину  $\lambda$  від 400 до 1630 нм із кроком 10 нм (або з іншим кроком, заданим викладачем).

3. Дані вимірювань занести в таблицю програмного пакета Origin.

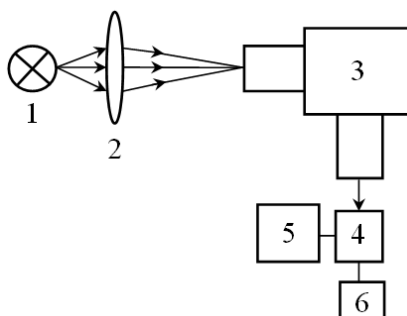


Рис. 12. Схема установки для вимірювання спектральної характеристики ФД: 1 – джерело світла; 2 – фокусувальна лінза; 3 – монохроматор; 4 – ФД; 5 – блок живлення; 6 – пристрій реєстрації.

4. Побудувати графік залежності  $I(\lambda)$ . Приклад графіка залежності інтенсивності світла  $I$  (мкА) від довжини хвилі  $\lambda$  (нм) для кремнієвого ФД подано на рис. 13.

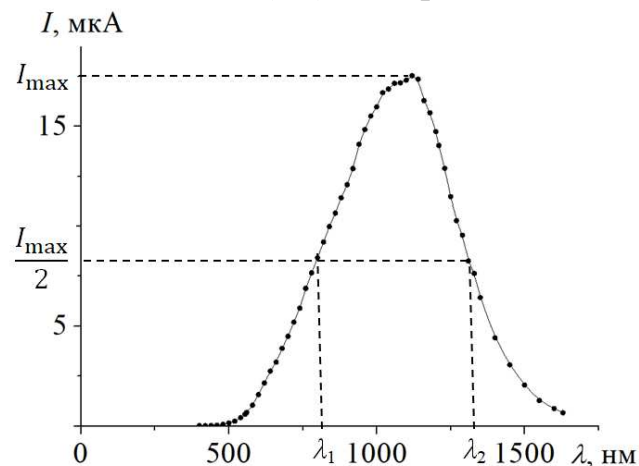


Рис. 13. Визначення діапазону найвищої спектральної чутливості кремнієвого ФД за допомогою графіка залежності інтенсивності світла  $I$  (мкА) на виході ФД від довжини хвилі  $\lambda$  (нм). Графік побудовано в програмному пакеті Origin, а дані експерименту позначено точками.

5. Визначити довжини хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , які обмежують ширину контуру кривої  $I(\lambda)$  на половині висоти  $I_{\max}$  (рис. 13). Інтервал довжин хвиль від  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$  – це діапазон найвищої спектральної чутливості кремнієвого ФД.

## II. Визначити діапазон найвищої спектральної чутливості германієвого фотодіода

1. Виміряти спектральну характеристику германієвого ФД. Для цього за допомогою амперметра виміряти залежність інтенсивності світла на виході ФД (точніше, сили струму  $I$  (мкА) на ФД, яка буде прямо пропорційна інтенсивності світла) від довжини хвилі  $\lambda$  (нм), змінюючи  $\lambda$  від 400 до 1630 нм із кроком 10 нм (або з іншим кроком, заданим викладачем).

*Примітка.* У разі германієвого ФД ми одержуємо не всю спектральну характеристику, а лише її частину. Причина полягає в тому, що германієвий ФД типово чутливий у діапазоні довжин хвиль 500÷1800 нм (із максимумом приблизно при 1200÷1600 нм), а максимальна довжина хвилі, яку можна виділити монохроматором УМ-2, обмежується значенням  $\lambda \approx 1630$  нм (докладніше див. лабораторну роботу №6). Більше того, світло з довжинами хвиль порядку 1600 нм на виході монохроматора стає дуже слабким через низьке пропускання оптичних складових монохроматора. Тому експериментально можна одержати лише нижню межу  $\lambda_1$  діапазону чутливості германієвого ФД, але не його верхню межу  $\lambda_2$ .

2. Дані вимірювань занести в таблицю програмного пакета Origin.

3. Побудувати графік залежності  $I(\lambda)$ . Приклад графіка залежності інтенсивності світла  $I$  (мкА) від довжини хвилі  $\lambda$  (нм) для германієвого ФД подано на рис. 14.

4. На графіку  $I(\lambda)$  визначити максимальне значення інтенсивності  $I_{\max}$  і прийняти його за максимум чутливості ФД.

5. Знайти довжину хвилі  $\lambda_1$ , яка обмежує зліва ширину частини контуру  $I(\lambda)$  на половині висоти його максимуму  $I_{\max}$  (рис. 14). Знайти довжину хвилі  $\lambda_{\max}$ , яка відповідає значенню  $I_{\max}$ .

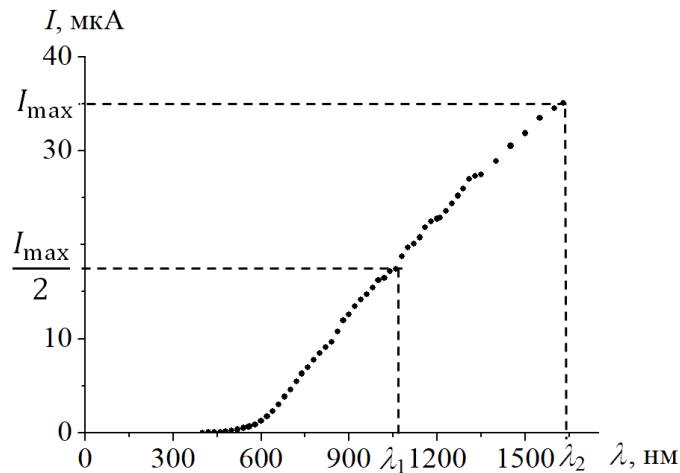


Рис. 14. Визначення діапазону найвищої спектральної чутливості германієвого ФД за допомогою графіка залежності інтенсивності світла  $I$  (мкА) на виході ФД від довжини хвилі  $\lambda$  (нм). Графік побудовано в програмному пакеті Origin, а дані експерименту позначено точками.

Зауважмо, що, на відміну від кремнієвого ФД, тут довжина хвилі  $\lambda_2$  не обмежує зверху контур кривої  $I(\lambda)$  на половині висоти  $I_{\max}$ , а тому й не визначає безпосередньо верхню межу діапазону спектральної чутливості германієвого ФД (див. примітку). Насправді цю верхню межу взагалі неможливо одержати безпосередньо з наших вимірювань, оскільки діапазон чутливості монохроматора УМ-2 обмежений зверху довжиною хвилі приблизно 1600 нм, а діапазон чутливості германієвого ФД простягається до ще більших довжин хвиль (див. рис. 14 і дані з п.4.6).

6. Унаслідок цих міркувань, ми будемо вимушено (хоча це й неточно) вважати, що одержаний нами діапазон від  $\lambda_1$  до  $\lambda_{\max}$  є половиною контуру спектральної чутливості германієвого ФД., тобто ми вважаємо, що половина діапазону спектральної чутливості ФД дорівнює різниці довжин хвиль  $\lambda_{\max} - \lambda_1$ .

7. Визначити повний діапазон найвищої спектральної чутливості германієвого ФД як  $2(\lambda_{\max} - \lambda_1)$ .

8. Порівняти діапазони найвищої спектральної чутливості, одержані для германієвого та кремнієвого ФД, а також для ФЕП.