



Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет

**4858 Методичні вказівки**  
до практичних занять та самостійної роботи  
з курсу «**Прилади та пристрої оптоелектроніки і спінтроніки**»  
для студентів спеціальності 171 «*Електроніка*» освітнього  
ступеня «бакалавр» денної форми навчання

Суми  
Сумський державний університет  
2020

Методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи з курсу «Прилади та пристрої оптоелектроніки і спінтроніки» / укладачі : Л. В. Однорець, Ю. М. Шабельник. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 30 с.

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

## ЗМІСТ

	С.
<b>Розділ 1. ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ...</b>	<b>4</b>
Тема 1. Фізичні процеси й ефекти в матеріалах оптоелектроніки.....	4
Задачі до теми 1.....	6
Тема 2. Джерела і приймачі випромінювання.....	8
Задачі до теми 2.....	13
Тема 3. Оптрони.....	14
Задачі до теми 3.....	19
<b>Розділ 2. ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ СПІНТРОНІКИ.....</b>	<b>22</b>
Тема 4. Спінові транзистори і датчики на основі ефекту гігантського магнітоопору (ГМО).....	22
Питання до семінарських занять із теми 4.....	26
Тема 5. Застосування ГМО-матеріалів.....	27
Питання до семінарських занять із теми 5.....	28
Список використаної літератури.....	29

## Розділ 1. ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИБАДИ ТА СИСТЕМИ

### Тема 1. Фізичні процеси й ефекти в матеріалах оптоелектроніки

#### Теоретичні відомості

Оптоелектронні прилади (ОЕП) – це прилади, принцип дії яких побудований на використанні електромагнітного випромінювання оптичного діапазону. До їх складу входять джерело і приймач випромінювання.

До основних груп ОЕП відносять: оптовипромінювачі (світловипромінювальні діоди та лазери), фотоелектричні приймачі випромінювання (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристри та фотоприймачі з *p-n*-переходом), прилади для керування випромінюванням (модулятори, дефлектори та ін.), прилади для відображення інформації (індикатори, дисплеї, табло), прилади для оптичної ізоляції (оптрони), волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ).

ОЕП здійснюють генерацію, перетворення, передавання і збереження інформації. Носіями інформації в оптоелектроніці є нейтральні в електричному розумінні частинки – фотони, нечутливі до впливу електричних і електромагнітних полів, що не взаємодіють між собою і забезпечують односпрямоване передавання сигналу. Оптоелектронні прилади приймають, перетворюють і генерують випромінювання у видимій, інфрачервоній та ультрафіолетовій областях спектра.

Принцип дії ОЕП побудований на явищах фотоэффекту і люмінесценції. *Зовнішній фотоэффект* – вихід вільних електронів із поверхневого шару фотокатода в зовнішнє середовище під дією світла. *Внутрішній фотоэффект* – вільне переміщення всередині речовини електронів, звільнених від зв'язків в атомах під дією світла, які змінюють його

електропровідність або спричиняють появу ЕРС на межі двох речовин або на *p-n*-переході.

ОЕП набули широкого використання в автоматичних контрольних і вимірювальних системах, обчислювальній техніці, фототелеграфії, звуковідтворювальній апаратурі, кінематографії, спектрофотометрії, для перетворення світлової енергії на електричну, в автоматичні для розв'язання електричних ланцюгів.

До матеріалів оптоелектроніки ставлять такі вимоги. Вони повинні мати: високий коефіцієнт заломлення ( $n \geq 1,4$ ), високий питомий опір ( $\rho = 10^{14} - 10^{16}$  Ом · м), хорошу адгезію з кристалами Si та GaAs, еластичність, механічну міцність і стабільні властивості в температурному інтервалі  $\Delta t = (-60) - (+120)$  °С.

**Електрооптичні матеріали** – це органічні або неорганічні діелектрики, в яких виникає електрооптичний ефект, тобто показник заломлення таких матеріалів залежить від прикладеної напруги, причому ці залежності бувають лінійними або квадратичними. *Лінійний електрооптичний ефект* (ефект Погкельса) спостерігається у твердих кристалах, які не мають центра симетрії: в сегнетоелектрику (наприклад, у ніобіті літію LiNb і танталаті літію LiTa); в кристалічних солях групи дигідрофосфату калію  $\text{KN}_2\text{PO}_4$  та перовскитах (титанаті барію  $\text{BaTiO}_3$ ). *Квадратичний електрооптичний ефект* (ефект Керра) характерний для кристалів, які мають центр симетрії, а також для ізотропних рідин (наприклад, для нітробензолу або сірковуглецю).

**Магнітооптичні матеріали** – це матеріали, здатні обертати площину поляризації світла, що пройшло через зразок або відбилося від нього (магнітооптичний ефект). До магнітооптичних матеріалів відносять: прозорі ферит-гранати ( $(\text{YBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ), ферит-шпінелі ( $\text{MeFe}_2\text{O}_4$ , де Me –  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ).

**Акустооптичний ефект** – ефект розсіювання світла в середовищі, модульованому акустичною хвилею.

**П'єзооптичний ефект (фотопружний ефект)** – зміна показника заломлення оптичного середовища під дією механічного напруження.

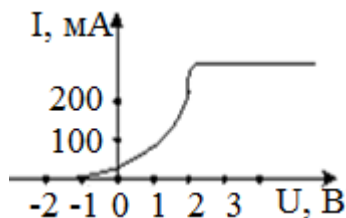
### Задачі до теми 1

**Задача 1.** Якої швидкості отримують вирвані з калію електрони внаслідок опромінювання його фіолетовим світлом із довжиною хвилі  $\lambda = 0,42$  мкм, якщо робота виходу електронів із калію  $A_{\text{вих}} = 2$  еВ?

**Задача 2.** Найбільша довжина світлової хвилі, при якій може мати місце фотоефект для вольфраму,  $\lambda = 2,75 \cdot 10^{-7}$  м. Визначити роботу виходу електронів із вольфраму; найбільшу швидкість електронів, що вибиваються з вольфраму світлом із довжиною хвилі, яка дорівнює  $1,8 \cdot 10^{-7}$  м.

**Задача 3.** Червона межа фотоефекту для деякого металу дорівнює  $0,5$  мкм. За якої частоти світла електрони, що відірвалися від його поверхні, повністю затримуються зворотним потенціалом  $3,0$  В?

**Задача 4.** На рисунку наведено вольт-амперну характеристику фотоелемента. Катод освітлюється світлом, довжина хвилі якого  $\lambda = 3,3 \cdot 10^{-7}$  м. Обчислити роботу виходу електрона з катода.



**Задача 5.** Внаслідок переходу атома водню з одного стаціонарного стану в інший випромінюється фотон із довжиною хвилі 0,486 мкм. Визначити, на скільки зменшиться енергія атома. Відповідь навести в електрон-вольтах?

**Задача 6.** Яка максимальна швидкість електронів, що вибиваються з металеві пластини світлом із довжиною хвилі  $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$  м, якщо червона межа фотоефекту  $\lambda_{\text{кр}} = 540$  нм?

**Задача 7.** Фотони, що мають енергію 5 еВ, вибивають електрони з поверхні металу. Робота виходу електронів із металу дорівнює 4,7 еВ. Якого імпульсу набуває електрон у разі вильоту з поверхні металу?

**Задача 8.** Значення енергії електрона в атомі водню задаються формулою  $E_n = -13,6 \text{ еВ}/n^2$ , де  $n = 1, 2, 3, \dots$  При переході атома зі стану  $E_2$  в стан  $E_1$  атом випускає фотон. Потрапивши на поверхню фотокатода, цей фотон вибиває фотоелектрон. Частота світла, що відповідає червоній межі фотоефекту для матеріалу поверхні фотокатода,  $n_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^{14}$  Гц. Чому дорівнює максимально можливий імпульс фотоелектрона?

**Задача 9.** Електрон з енергією  $E = 4,9$  еВ рухається в напрямку осі Ох. Висота потенціального бар'єра  $U = 5$  еВ. За якої ширини  $d$  бар'єра ймовірність  $W$  проходження електрона через нього буде дорівнювати 0,2?

## Тема 2. Джерела і приймачі випромінювання

### Теоретичні відомості

**Фоторезистори** – це напівпровідникові резистори, що змінюють свій опір у результаті впливу світлового потоку (рис. 2.1). Залежно від спектральної чутливості фоторезистори поділяють на дві групи: для видимої частини спектра і для інфрачервоної частини спектра.

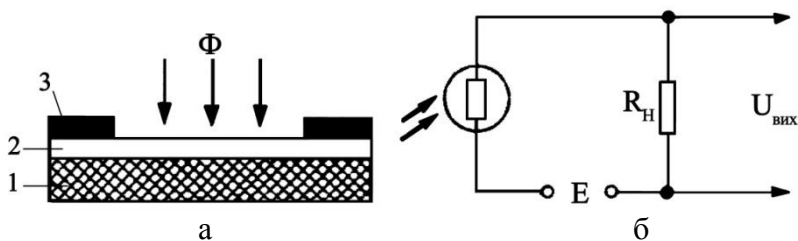


Рисунок 2.1 – Принцип будови (а) та схема ввімкнення (б) фоторезистора

Для фоторезисторів використовують сполуки Cd і Pb. Чутливі елементи виготовляють із моно- або полікристалів цих сполук.

Фоторезистори мають високу стабільність параметрів. Зміна фотоструму є достатньо точною характеристикою його стану. У разі тривалої експлуатації спостерігається стабілізація фотоструму, водночас його величина може змінюватися на 20–30 %. Фоторезистори є чутливими до швидкої зміни температур. Зберігати їх варто за температури 5–35 °С та вологості, не більшої за 80 %.

Вольт-амперна характеристика фоторезистора ФСК-2 наведена на рисунку 2.2.



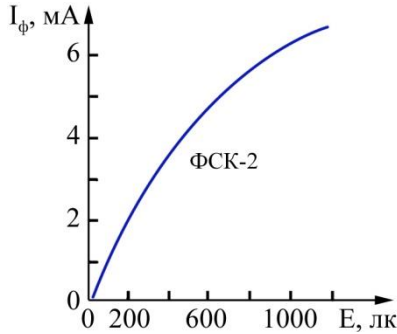


Рисунок 2.2 – Вольт-амперна характеристика фоторезистора ФСК-2

Основні недоліки фоторезисторів – їх інерційність і значний вплив температури, що призводить до великого розкиду характеристик.

**Фотодіоди** – це напівпровідникові діоди, в яких використовується внутрішній фотоэффект. Світловий потік керує зворотним струмом фотодіодів. У результаті дії світла на електронно-дірковий перехід генеруються пари носіїв заряду, провідність діода зростає й збільшується зворотний струм. Такий режим функціонування називається фотодіодним (фотоперетворювальним) режимом. Другий режим – вентильний (фотогенераторний). На відміну від останнього для фотодіодного режиму необхідним є зовнішнє джерело живлення. Схема ввімкнення фотодіода для функціонування у фотодіодному режимі зображена на рисунку 2.3.

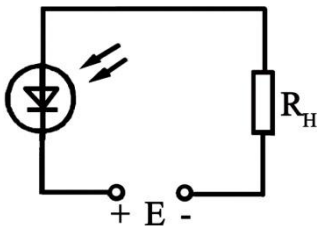


Рисунок 2.3 – Схема ввімкнення фотодіода для функціонування у фотодіодному режимі

Основні характеристики фотодіодів:

1) вольт-амперна ( $I = f(U)$ ) – залежність світлового, темнового або фотоструму (при  $\Phi = \text{const}$ ) від прикладеної напруги (рис. 2.4 а);

2) енергетична ( $I_{\Phi} = f(\Phi)$ ) – залежність фотоструму від світлового потоку (при  $U = \text{const}$ ) – лінійна, на неї мало впливає напруга (рис. 2.4 б).

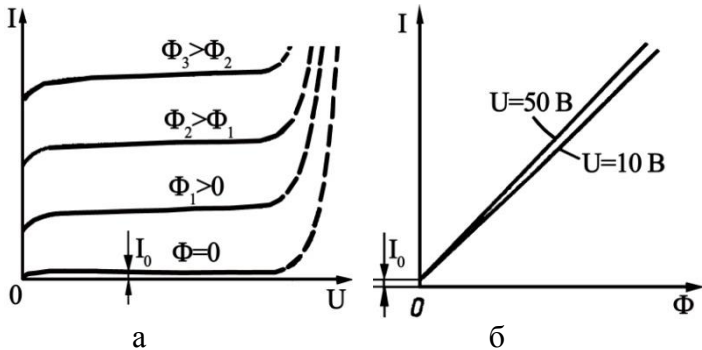


Рисунок 2.4 – Вольт-амперні характеристики для фотодіодного режиму (а) та енергетичні характеристики фотодіода (б)

**Фототранзистори** – це напівпровідникові прилади з двома  $p$ - $n$ -переходами, призначеними для перетворення світлового потоку на електричний струм. Від звичайного біполярного транзистора фототранзистор конструктивно відрізняється тим, що в його корпусі передбачене прозоре вікно, через яке світло може потрапляти на область бази.

Напруга живлення подається на емітер і колектор, його колекторний перехід є закритим, а емітерний – відкритим. База залишається вільною (рис. 2.5). Упродовж освітлення фототранзистора в його базі генеруються електрони й дірки. У колекторному переході розподіляються електронно-діркові, що утворилися способом дифузії, межі переходу. Дірки (неосновні

носії зарядів у напівпровіднику) перекидаються полем переходу в колектор, збільшуючи його власний струм, а електрони (основні носії зарядів) залишаються в базі, знижуючи її потенціал. Зниження потенціалу бази приводить до утворення додаткової прямої напруги на емітерному переході й підсилення інжекції дірок з емітера в базу. Інжектвані в базу дірки, досягаючи колекторного переходу, додатково збільшують струм колектора. Навіть невелика зміна прямої напруги емітера значно змінює струм колектора, тобто фототранзистор є підсилювачем.

**Фототиристор** – це напівпровідниковий прилад із чотиришаровою *p-n-p-n*-структурою, що поєднує в собі властивості тиристора й фотоприймача та перетворює світлову енергію на електричну (рис. 2.5).

Опір фототиристорів змінюється в межах від 0,1 Ом (у відкритому стані) до  $10^8$  Ом (у закритому), час перемикання становить  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  с.

Зі світлової характеристики  $I_{пр} = f(\Phi)$  при  $U_{пр} = \text{const}$  (рис. 2.6 а) можна зробити висновок, що після ввімкнення фототиристора струм через нього зростає до  $I_{пр} = E_{пр}/R_{нагр}$  і більше не змінюється, тобто має два стабільних стани й може бути використаним як елемент пам'яті. Вольт-амперна

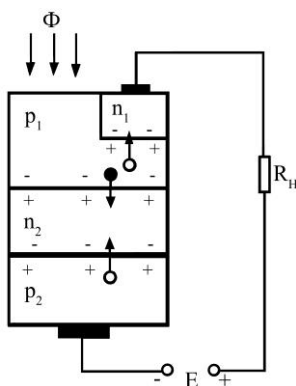


Рисунок 2.5 – Структура фототиристора

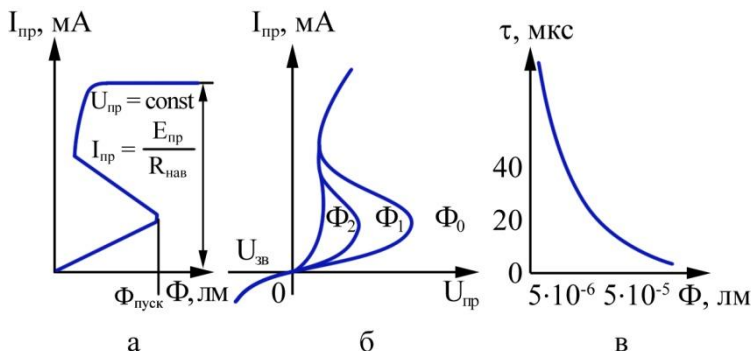


Рисунок 2.6 – Характеристики фототиристора: а – світлова; б – вольт-амперна; в – залежність часу від світлового потоку

характеристика  $I_{пр} = f(U_{пр.})$  при  $\Phi = \text{const}$  ( $\Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0$ ) свідчить про те, що зі збільшенням світлового потоку напруга та час увімкнення зменшуються.

**Світловипромінювальний діод (світлодіод)** – напівпровідниковий пристрій, що випромінює некогерентне світло з пропусканням через нього електричного струму (ефект, відомий як електролюмінесценція).

Випромінюване світло традиційних світлодіодів розміщене у вузькій ділянці спектра, а його колір залежить від хімічного складу напівпровідника. Світлодіоди – це малоінерційні джерела випромінювання, що функціонують під прямою напругою.

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони, більшу за 1,7 еВ. Германій і кремній не придатні для цього, тому що ширина забороненої зони в них значно менша. Для сучасних світлодіодів використовують здебільшого арсенід галію GaAs, фосфід галію GaP та карбід кремнію SiC. Додавання до напівпровідника домішок дозволяє одержувати світіння різних кольорів. Використовують також світлодіоди змінного кольору з двома випромінювальними переходами, перший із яких має максимум спектральної

характеристики в червоній частині спектра, а другий – у зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи. Сучасні світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі від інфрачервоної до близького ультрафіолету.

Коефіцієнт відбиття розраховують за формулою:

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2,$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – показники заломлення середовищ, через які проходить світло.

Частку світла, випромінювану через поверхню світлодіода, визначають таким чином:

$$F = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \right].$$

Зовнішня  $P_0$  і внутрішня  $P_i$  потужності світлодіода відповідно дорівнюють:  $P_0 = F \cdot P_i = \eta \cdot I \cdot U$ .

## Задачі до теми 2

**Задача 1.** Ефективність перетворення зовнішньої (електричної) потужності планарного GaAs світлодіода  $\eta$  дорівнює 1,5 % при прямому струмі  $I = 50$  мА і різниці потенціалів  $U = 2$  В. Оцінити оптичну потужність  $P_i$ , що генерується приладом, якщо коефіцієнт заломлення GaAs  $n = 3,6$ .

**Задача 2.** Оцінити ефективність перетворення зовнішньої потужності планарного GaAs світлодіода  $\eta$ , якщо внутрішня

оптична потужність  $P_i$  становить 30 % від прикладеної електричної потужності. Коефіцієнт заломлення GaAs  $n = 3,6$ .

**Задача 3.** На ідеальний фотодіод (тобто з квантовим виходом, що дорівнює 1) падає випромінювання потужністю  $P = 10$  мВт за довжини хвилі 0,8 мкм. Розрахувати струм і напругу на виході приладу, коли детектор використовують у режимі фотоструму і фотоЕРС відповідно. Струм витоку при зворотному зміщенні  $I_0 = 10$  нА, робоча температура  $T = 300$  К.

**Задача 4.** Фотодіод на основі  $p$ - $n$ -переходу має квантовий вихід 50 % на довжині хвилі 0,9 мкм. Розрахувати чутливість  $R$ , поглинену оптичну потужність  $P$  ( $I_{ph} = 1$  мкА) і число фотонів, поглинутих за 1 секунду цієї довжиною хвилі  $r_{ph}$ .

**Задача 5.** Розрахувати квантовий вихід і вихідний фотострум лавинного фотодіода з коефіцієнтом множення  $M = 20$ , що працює на довжині хвилі  $\lambda = 1,5$  мкм. Розрахувати квантовий вихід  $\eta$  і вихідний фотострум  $I$ .

## Тема 3. Оптрони

### Теоретичні відомості

За ступенем складності й типом оптичного каналу виділяють три групи оптронів: оптопари, оптоелектронні інтегральні мікросхеми, спеціальні оптрони.

Оптопари (або елементарні оптрони) – це оптоелектронні напівпровідникові прилади, які складаються з випромінювального та фотоприймального елементів, між якими є оптичний зв'язок, що забезпечує електричну ізоляцію між входом і виходом.

Як елемент електричного кола оптопара описується чотирма групами параметрів або характеристик:

- **вхідними** (номінальний струм  $I_{\text{вх ном}}$ , напруга  $U_{\text{вх}}$ , ємність  $C_{\text{вх}}$ );
- **вихідними** (максимально допустима пряма  $U_{\text{вих max}}$  і зворотна  $U_{\text{вих зв max}}$  напруги, струм  $I_{\text{вих max}}$ , залишкова напруга  $U_{\text{зал}}$ , ємність  $C_{\text{вих}}$ );
- **передатними** (коефіцієнт передачі за струмом  $K_I = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$ , час зростання вихідного струму  $t_{\text{зр}}$ , затримки  $t_{\text{зат}}$ , швидкодія оптрона  $t$ );
- **параметрами, що характеризують ізоляцію** (максимально допустима напруга між входом та виходом  $U_{\text{із}}$ , опір ізоляції  $R_{\text{із}}$  і прохідна ємність  $C_{\text{пр}}$ ).

Оптопари класифікують на чотири групи: резисторні (фоторезистор – світлодіод), тиристорні (фототиристор – світлодіод), транзисторні (фототранзистор – світлодіод), діодні (фотодіод – світлодіод).

Елементну основу оптронів складають фотоприймачі й випромінювачі та оптичне середовище між ними.

**Резисторні оптопари.** Джерелом випромінювання в резисторній оптопарі є світлодіод, або електролюмінесцентна комірка. Приймачем – фоторезистор (рис. 3.1) із селеніду кадмію (CdSe) для видимого випромінювання, із селеніду або сульфїду свинцю (PbSe, PbS) – для інфрачервоного. Резисторна оптопара може працювати як при постійному, так і при змінному струмі за доброї узгодженості джерела випромінювання та фоторезистора за спектральними характеристиками. Як джерело світла в ньому використовується світлодіод 1, як фотоприймач – фоторезистор 3 у вигляді спресованої пігулки. Для зменшення ємнісного зв'язку між джерелом світла та фотоприймачем розміщений прозорий електростатичний екран 4. Внутрішню частину оптрона заливають оргсклом або епоксидною смолою, які захищають прилад від впливу зовнішнього середовища і відіграють роль світловода. Герметичний металевий корпус 2 зовні нагадує корпус транзистора.

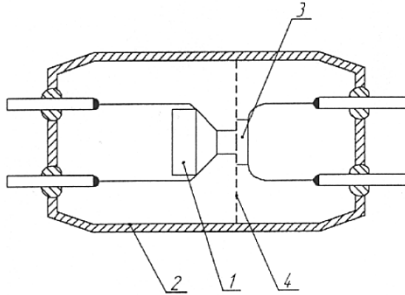


Рисунок 3.1 – Будова резисторного оптрона: 1 – світлодіод; 2 – металевий корпус; 3 – фоторезистор; 4 – електростатичний екран

Проте оптичне середовище в оптроні може створюватися не лише з прозорого компаунда на основі полімерів. Для одержання високої розв'язки виходу і входу використовують волоконні світловоди у вигляді нитки з прозорого діелектрика. Світловий промінь від джерела випромінювання потрапляє в торець світловода, і після багаторазового відбиття від бічних стінок він виходить з іншого кінця світловода, зазнавши незначного загасання. За допомогою волоконного світловода можливе передавання сигналу керування на великі відстані з високою електричною розв'язкою і завадостійкістю.

Резисторні оптопари застосовують: для автоматичного регулювання підсилення, керування безконтактними подільниками напруги, модуляції сигналів, формування різноманітних сигналів, для слабкострумових схем комутації в складних пристроях візуального відображення інформації, виконаних на електролюмінесцентних (порошкових) індикаторах, мнемосхемах, екранах.

**Діодні оптопари.** У діодній оптопарі як фотоприймальний елемент використовують фотодіод на основі кремнію, а випромінювачем служить інфрачервоний випромінювальний діод. Максимум спектральної характеристики випромінювання діода припадає на довжину



хвилі близько 1 мкм. При опроміненні оптронного фотодіода світлом такої довжини хвилі в ньому виникає генерація пар носіїв зарядів – електронів і дірок. Інтенсивність генерації пропорційна силі світла, а отже, вхідному струму. Вільні електрони й дірки розподіляються електричним полем переходу фотодіода і заряджають *p*-область позитивно, а *n*-область – негативно.

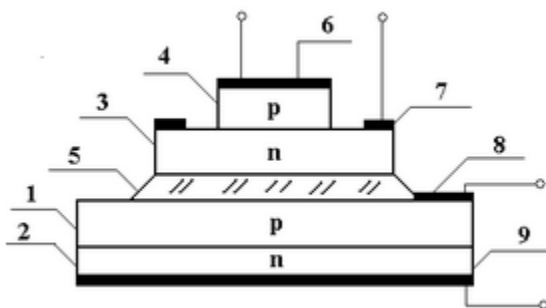


Рисунок 3.2 – Діодна оптопара: 1, 2 – *p*- та *n*-області фотодіода; 3, 4 – *n*- та *p*- області СД; 5 – світловод на основі селенового скла; 6, 7 – контакти СД; 8, 9 – контакти фотодіода

Основні параметри діодних оптопар: статистичний коефіцієнт передавання струму  $K$  – відношення різниці вихідного і вихідного темнового струмів до вхідного, виражене у відсотках:  $K = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}} = (1-2,5) \%$ ; фотоЕРС = 0,7–0,8 В; вхідна зворотна напруга 0,5 В.

**Транзисторні оптопари.** Транзисторну оптопару виконують із фотоприймальним елементом на основі фототранзистора. Зазвичай в оптопарах використовують фототранзистори зі структурою *n-p-n* на основі кремнію, чутливі до випромінювання з довжиною хвилі близько 1 мкм. Випромінювачами є зазвичай арсенідогалієві чи діоди на потрійному з'єднанні, максимум спектрального випромінювання яких лежить поблизу області найбільшої чутливості фототранзистора.

**Тиристорні оптопари.** У тиристорних оптопарах за приймальний елемент використовують кремнієвий фототиристор. За відсутності вхідного сигналу, що відповідає неопромінену стану базової  $n$ -області, через фототиристор проходить невеликий струм витоку (темновий струм). Темновий струм сильно залежить від температури. У разі підвищення температури на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  струм приблизно подвоюється. За деякого значення вхідного струму відбувається «випрямлення» характеристики, що відповідає ввімкненому стану фототиристора. Час увімкнення оптопари залежить від вхідного струму. Для зменшення часу ввімкнення вхідний струм необхідно збільшувати (однак він не повинний перевищувати максимально припустимого імпульсного вхідного струму).

### **Застосування оптронів**

1. Для зв'язку блоків апаратури, між якими є значна різниця потенціалів; для захисту вхідних ланцюгів вимірвальних пристроїв від перешкод і наведень.

2. Оптичне, безконтактне керування потужнострумивим і високовольтними ланцюгами. Запуск потужних тиристорів, триаків, симісторів, керування електромеханічними релейними пристроями.

3. «Довгі» оптрони з протяжним гнучким волоконно-оптичним світловодом, що відкрили новий напрямок застосування виробів оптронів техніки – зв'язок на коротких відстанях.

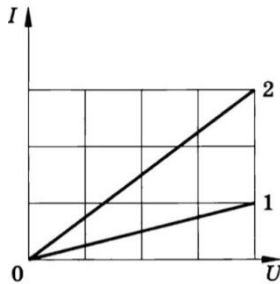
4. Оptrонні датчики: вологості й газові, датчики визначення чистоти оброблення поверхні предмета, швидкості його переміщення.

5. Обчислювальна техніка, автоматика, зв'язкова і радіотехнічна апаратура, автоматизовані системи керування, вимірвальна техніка, системи контролю і регулювання, медична електроніка, пристрої візуального відображення інформації.

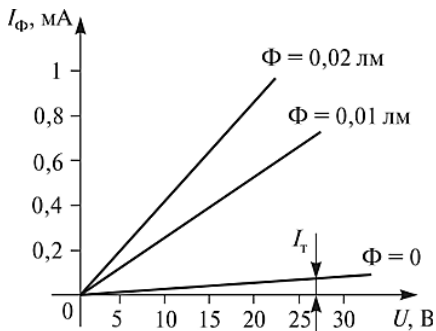
### Задачі до теми 3

**Задача 1.** Фоторезистор, що в темряві має опір 25 кОм, увімкнули послідовно з резистором опором 5 кОм. Коли фоторезистор освітили, сила струму в ланцюзі (при тому самому напрямку) збільшилася в 4 рази. Яким став опір фоторезистора?

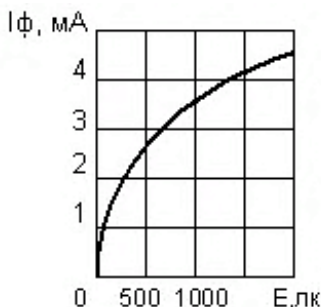
**Задача 2.** На рисунку наведено графіки залежності сили струму, що проходить через фоторезистор, від прикладеної напруги. Який графік належить до освітленого фоторезистора і який – до затемненого? У скільки разів опір освітленого фоторезистора менший від затемненого?



**Задача 3.** Визначити питому чутливість  $K$  фоторезистора при світловому потоці 0,01 лм та 0,02 лм і робочій напрузі 20 В, вольт-амперна характеристика якого зображена на рисунку. Порівняти одержані дані.



**Задача 4.** Знайти світловий потік  $\Phi$  при освітленості  $E = 500$  лк та площі поверхні фоторезистора  $S = 1,5 \text{ мм}^2$  і розрахувати робочий струм, якщо темновий струм  $I_T = 30 \text{ мкА}$ . Під час проведення розрахунків використовувати світлову характеристику фоторезистора ФСК-1.



**Задача 5.** Визначити світловий струм фоторезистора, світлова характеристика якого наведена в задачі 4, що працює за освітленості  $E = 200$  лк і темнового струму  $I_T = 15 \text{ мкА}$ .

**Задача 6.** Питома чутливість фоторезистора  $K_0 = 300 \text{ мкА / мВ} \cdot \text{лм}$  за напруги  $U = 15 \text{ В}$ . Визначити його інтегральну чутливість.

**Задача 7.** Лавинний фотодіод із коефіцієнтом множення  $M = 20$  працює на довжині хвилі  $\lambda$ . Розрахувати квантовий вихід  $\eta$  і вихідний фотострум  $I_\phi$ , якщо його чутливість  $R$  на цій довжині хвилі дорівнює  $0,6 \text{ А/Вт}$  при потоці  $N$  фотонів/с.

Номер варіанта	$\lambda$ , мкм	$N$ , фотонів/с
1	1,5	$10^{10}$
2	2,0	$10^{10}$
3	2,5	$10^{10}$
4	1,5	$10^{12}$
5	2,0	$10^{12}$

**Задача 8.** Ідеальний фотодіод (квантовий вихід дорівнює 1) освічується випромінюванням потужністю  $P$  за довжини хвилі  $\lambda$ . Розрахувати струм і напругу на виході приладу, коли детектор використовується в режимі фотоструму і фотоЕРС відповідно. Струм втрат при зворотному зміщенні  $I_0 = 10$  нА, робоча температура  $T = 300$  К.

Номер варіанта	$\lambda$ , мкм	$P$ , мВт
1	0,9	12
2	1,2	15
3	1,5	10
4	1,7	8
5	2,0	15

**Задача 9.** Кремнієвий лавинний фотодіод має коефіцієнт множення  $M = 20$  на довжині хвилі  $0,82$  мкм, при цьому квантовий вихід  $50\%$  і темновий струм  $1$  нА. Визначити число падаючих фотонів  $r_\phi$  на цій довжині хвилі за  $1$  секунду, що забезпечує вихідний струм приладу (після підсилення), більший від рівня темнового струму, та знайти  $R$ .

**Задача 10.** Визначити фотострум діода, якщо на нього падає світловий потік  $\Phi = 0,02$  лм, а інтегральна чутливість  $K_\phi = 15\,000$  мкА/лм.

## Розділ 2. ПРИЛАДИ І ПРИСТРОЇ СПІНТРОНІКИ

### Тема 4. Спінові транзистори і датчики на основі ефекту гігантського магнітоопору (ГМО)

#### Теоретичні відомості

У металах і сплавах за кімнатної температури збільшення електричного опору при дії магнітного поля не перевищує 1 %. У феромагнетиках величина опору залежить від орієнтації вектора намагніченості  $\mathbf{M}$  відносно напрямку електричного струму в матеріалі. Цей різновид магнітоопору (МО) називають *анізотропним магнітоопором* (АМО).

Кількісною характеристикою АМО є т. зв. магніто-резистивний коефіцієнт  $\Delta\rho/\rho$ , який можна визначити таким чином:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = \frac{\rho_l - \rho_t}{\frac{1}{3}\rho_l + \frac{2}{3}\rho_t},$$

де  $\bar{\rho}$  – середнє значення питомого опору розмагніченого зразка.

У магнітних матеріалах також виявлено ефект гігантського магнітоопору (ГМО), який уперше спостерігався в надгратках (мультишар) Fe/Cr, виготовлених методом молекулярно-променевої епітаксії, – періодичних структурах із чергуванням шарів Fe товщиною 3 нм і Cr – 4 нм (рис. 4.1).

Великі значення, незалежність від орієнтації магнітного поля і значне зростання  $\Delta R/R$  при збільшенні числа періодів структури, а також зменшення опору в разі накладання магнітного поля (геометрії вимірювання) свідчать про новий механізм формування магнітоопору, що одержав назву ГМО-ефекту і був виявлений у надгратках Co/Cu, Co/Ru, Co/Cr, Fe/Cu, Co/Au, NiFe/Ag та ін. Характерною рисою цього класу матеріалів із сильною антиферомагнітною взаємодією є необхідність достатньо сильних магнітних полів насичення

(0,8–1,6 MA/m). Іншою особливістю таких надграток є підвищена чутливість  $\Delta R/R$  до технологічних параметрів і товщини шарів.

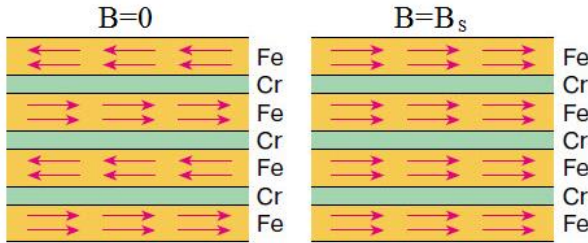


Рисунок 4.1 – Схематична будова мультишару Fe/Cr. Стрілки показують напрямки магнітних моментів атомів Fe

Магніторезистивний запам'ятовувальний елемент (ЗЕ) повинен забезпечувати запис, зберігання і зчитування інформації. В усіх типах магніторезистивних ЗЕ для виконання цих функцій використовують багатошарові смужки, що містять феромагнітні плівки. Використовують два варіанти запису інформації в МР-елементах – перпендикулярний і поздовжній (рис. 4.2). Метод перпендикулярного запису – це технологія, за якої біти інформації зберігаються у вертикальних доменах, що дозволяє використовувати більш сильні магнітні поля та зменшувати площу матеріалу, необхідну для записування 1 біта інформації. У 2009 році була досягнута щільність запису дисків 0,62 Гбіт/мм<sup>2</sup>, що майже втричі більше, ніж при використанні методу поздовжнього запису інформації (0,23 Гбіт/мм<sup>2</sup>), який повністю витіснений у 2010 році методом перпендикулярного запису.

Для запам'ятовування інформації використовують два стійкі стани магнітних плівок, що приймаються за «0» та «1». Ці стани визначаються гістерезисом, і під час записування інформації створюються прикладанням до феромагнітної структури ЗЕ – магнітних полів, що генеруються струмами в

спеціальних керувальних провідниках ( $I_c$ ) або сенсорним ( $I_s$ ) струмом через магнітні плівки. При зчитуванні використовується різниця електричних опорів для двох станів, що визначається під час або після дії зчитувальних магнітних полів. Магнітні поля створюються керувальними струмами зчитування, що проходять через магнітну структуру і по керувальних провідниках.

На рисунку 4.2 схематично зображений ЗЕ у вигляді смужки з двох феромагнітних плівок 1, через який проходить сенсорний струм, що створює в сусідніх плівках антипаралельні магнітні поля. Між плівками розміщений немагнітний роздільний шар 2. Для СТМР (спін-тунельних магніторезистивних) елементів, у яких сенсорний струм проходить перпендикулярно до площини плівок, структура інша, хоча основний елемент – сендвіч із роздільним шаром – залишається.

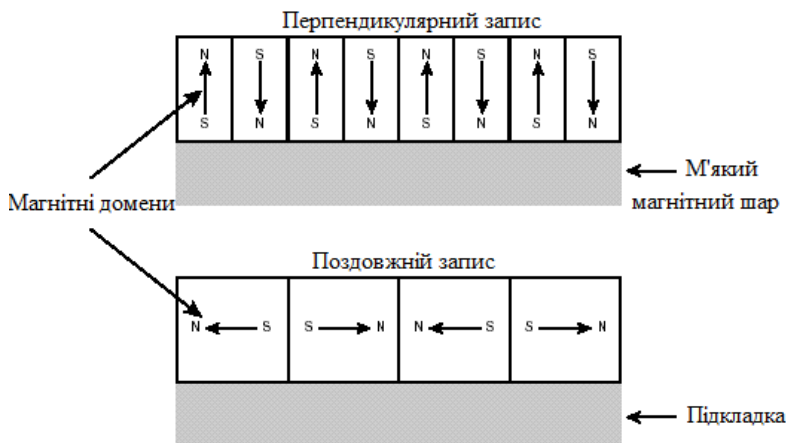


Рисунок 4.2 – Схема перпендикулярного і поздовжнього записів інформації

Запам'ятовувальний елемент – це пороговий елемент із гістерезисною характеристикою, що входить до



запам'ятовувальної матриці пристрою. На його основі проектують енергозалежні репрограмувальні мікросхеми пам'яті зі щільністю зберігання інформації до  $10^7$  біт/мм<sup>2</sup>, з неруйнівним зчитуванням, із довільною вибіркою та необмеженим числом циклів перезапису інформації.

Основні переваги приладів на основі ГМО: висока чутливість навіть до незначних змін зовнішнього магнітного поля, малі габарити, мала споживана потужність, простота об'єднання з електронними пристроями. До того ж завдяки інтенсивному електричному сигналу, який формує ГМО-структура, знижується чутливість до завад. Ці властивості й призвели до того, що елементи на основі ефекту ГМО насамперед набули застосування в зчитувальних головках жорстких дисків. Це дозволило приблизно за десятиріччя збільшити щільність запису жорстких дисків із 4,1 до більше ніж 1 Тбіт/дюйм<sup>2</sup>.

Пам'ять MRAM є енергонезалежною пам'яттю. Час вибірки даних у MRAM може становити менше ніж 10 нс, що в п'ять разів менше, ніж у флеш-пам'яті, а час запису – порядку 2 нс (на три порядки менший, ніж у флеш-пам'яті). Водночас енергоспоживання магніторезистивної пам'яті вдвічі менше, ніж у флеш- та динамічної пам'яті DRAM (Dynamic Random Access Memory).

Під час записування струм, що проходить по розрядній і числовій шинах, наводить перехресне магнітне поле, яке змінює магнітний стан вільного шару. Під час зчитування через комірку пропускають струм, величина якого залежить від орієнтації векторів намагнічування магнітних шарів структури: при паралельній конфігурації опір переходу мінімальний (логічний «0»), при антипаралельній орієнтації намагніченостей опір великий (логічна «1»).

Структура спінового транзистора на «гарячих» електронах складається з кремнієвих емітера і колектора та бази на основі плівки Co/Cu. Між емітером і базою виникає струм, за якого

електрони інжектуються в базу перпендикулярно до шарів спінового заслону. Оскільки інжектвані електрони проходять через бар'єр Шотткі, то вони входять у базу як нерівноважні «гарячі» електрони. Коли вони перетинають базу, то починають пружно або непружно розсіюватися. Електрони лише тоді потрапляють у колектор, коли вони накопичили достатню енергію для подолання енергетичного бар'єра з боку колектора. Колекторний струм залежить від спін-залежного розсіювання електронів у базі. Важливою перевагою спін-вентильного транзистора на «гарячих» електронах є відносно великий магнітний ефект за кімнатної температури при незначних магнітних полях.

#### **Питання до семінарських занять із теми 4**

1. Фізичні процеси в спінових транзисторах.
2. Типи спінових транзисторів, їх параметри.
3. Конструкція та принцип дії спін-транзисторної МПДД.
4. Спіновий польовий транзистор. Спін-вольтаїчний ефект.
5. Принцип дії магнітодіода.
6. Будова та принцип дії спінового світловипромінювального діода.
7. Спін-залежне розсіювання електронів.
8. Анізотропний, тунельний, колосальний магнітоопір.
9. Спін-вентильні структури.
10. Класифікація датчиків на основі ГМО-ефекту.
11. Фізичні принципи магнітного записування інформації.
12. Магніторезистивна оперативна пам'ять.

## Тема 5. Застосування ГМО-матеріалів

### Теоретичні відомості

На сучасному етапі розвитку мікро- і наноелектроніки спостерігається значний інтерес до багатошарових магнітних матеріалів, у яких спостерігається ефект ГМО, з точки зору їх практичного застосування в галузях обчислювальної та сенсорної техніки. Багатошарові плівкові магніторезистивні матеріали мають енергозалежність у режимі зберігання і необмежену кількість перезаписів інформації, високу радіаційну стійкість та широкий температурний діапазон. Їх широко використовують у космічній та автомобільній промисловості, сенсорній електроніці, медицині та інших галузях виробництва.

Об'єднання ГМО-матеріалів із напівпровідниковими транзисторами призвело до істотного збільшення щільності запису інформації, чутливості сенсорів і дало можливість розроблення радіаційно стійких логічних мікросхем.

Кількість ГМО-матеріалів та варіанти їх використання на практиці досить різноманітні. Один з очевидних напрямів застосування таких матеріалів – створення високочутливих головок для зчитування інформації з магнітних носіїв. Головка «розпізнає» інформацію, збережену на носіях, за допомогою детектування крайових полів, що виникають на межах доменів із протилежною орієнтацією магнітних моментів. Ці поля детектуються робочим матеріалом головки, для якого характерний магнітоопір, тобто опір чутливого елемента змінюється пропорційно зміні магнітного поля. Перемагнічення ферромагнітного матеріалу відбувається за рахунок руху доменних стінок. На основі ГМО-матеріалів розроблені високочутливі магнітні реле та нанометрові комірки пам'яті.

Гранульовані ізотропні матеріали можна використовувати як надчутливі датчики температури та чутливі датчики поля. Однак необхідно пам'ятати про сильну

температурну залежність їх опору і необхідність забезпечення якісної термостабілізації датчиків.

На основі манганітів лантану створено телефонну мембрану. Плівку манганіту наносять на мембрану, розміщену в неоднорідному магнітному полі електромагніту. Навіть без підсилювачів електричний відгук на звук становить значну величину – кілька мілівольт.

Таким чином, використання ГМО-матеріалів у вигляді багат шарових плівок, мультишарів, гранульованих плівкових сплавів, спінових клапанів на основі металів та напівпровідників як чутливих елементів приладів різного функціонального призначення та інформаційних матеріалів із високою щільністю запису інформації є вигідним і перспективним напрямом спінової електроніки.

### **Питання до семінарських занять із теми 5**

1. Галузі застосування ГМО-матеріалів.
2. Явища магнітострикції та термострикції.
3. Властивості феромагнітних матеріалів.
4. Антиферомагнетизм та феримагнетизм.
5. Магнітні напівпровідники.
6. Феромагнітні рідини.

## Список використаної літератури

1. Однодворець Л. В. Матеріали і компоненти функціональної електроніки : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
2. Основи спінтроніки: матеріали, прилади та пристрої: навчальний посібник / Ю. А. Куницький, В. В. Курилюк, Л. В. Однодворець, І. Ю. Проценко. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 127 с.
3. Осадчук В. С. Фізична наноелектроніка : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 146 с.
4. Фізичні основи спінтроніки : навчальний посібник / О. І. Товстолиткін, М. О. Боровий, В. В. Курилюк, Ю. А. Куницький. Вінниця : Вид-во «Нілан-ЛТД», 2014. – 464 с.
5. Третьяк О. В. Фізичні основи спінової електроніки / О. В. Третьяк, В. А. Львов, О. В. Барабанов. – Київ : ВПЦ «Київський університет», 2002. – 314 с.
6. Поплавко Ю. М. Магнетики в електроніці : навчальний посібник / Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 366 с.

Навчальне видання

**Методичні вказівки**  
до практичних занять та самостійної роботи  
з курсу «**Прилади та пристрої оптоелектроніки і спінтроніки**»  
для студентів спеціальності 171 «*Електроніка*» освітнього  
ступеня «бакалавр» денної форми навчання

Відповідальний за випуск І. Ю. Проценко  
Редактор С. М. Симоненко  
Комп'ютерне верстання Ю. М. Шабельника

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1,86. Обл.-вид. арк. 1,94.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.