

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних та самостійних робіт з дисципліни

"Проектування комп'ютерних мереж"

для студентів спеціальностей 8.05010203 "Спеціалізовані
комп'ютерні системи" та 8.05010201 "Комп'ютерні системи та
мережі", усіх форм навчання.

Частина 2

Методичні вказівки до виконання практичних та самостійних робіт з дисципліни "Проектування комп'ютерних мереж" для студентів спеціальностей 8.05010203 "Спеціалізовані комп'ютерні системи" та 8.05010201 "Комп'ютерні системи та мережі", усіх форм навчання. Частина 2 / Укл. Г.Г.Киричек, М.П. Проскурін, О.В.Щекотіхін.– Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 54 с.

Укладачі: Г.Г. Киричек, к.т.н., доцент
М.П. Проскурін, к.т.н., доцент
О.В. Щекотіхін, к.т.н., доцент

Рецензент: Р.К. Кудерметов, к.т.н., доцент

Відповідальний
за випуск: Г.Г. Киричек, к.т.н., доцент

Затверджено:
на засіданні кафедри
"Комп'ютерні системи та мережі"
Протокол № 3
від 05 жовтня 2015 року

ЗМІСТ

1 Практична робота №5 <i>Джерела випромінювання</i>	4
1.1 Фізичні основи джерел випромінювання	4
1.2 Ватт-Амперні характеристики ДВ	6
1.3 СД, СЛД, ЛД: особливості конструкції	8
1.4 Інші характеристики ДВ	15
1.5 Завдання до ПР	17
1.6 Контрольні питання	18
1.7 Техніка безпеки	18
1.8 Обладнання і опис лабораторного стенду	19
1.9 Порядок проведення ПР.....	20
1.10 Зміст звіту	20
2 Практична робота №6 <i>Фотоприймачі. Приймальні оптоелектронні модулі</i>	21
2.1 Загальні відомості.....	21
2.2 Технічні характеристики ФП.....	37
2.3 Конструкції ФД	41
2.4 ФП у ВОСПІ, ВОЛЗ	41
2.5 Приймальні оптоелектронні модулі (ПрОМ)	43
2.6 Серійні ФП.....	48
2.7 Завдання до ПР	50
2.8 Контрольні питання	51
2.9 Порядок проведення ПР.....	52
2.10 Зміст звіту	52
2.11 Загальні рекомендації при проектуванні	53
Література	54

1 ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

Джерела випромінювання

Мета роботи - дослідження основних характеристик напівпровідникових (НП) джерел оптичного випромінювання, які використовуються у ВОЛЗ, вивчення устрою, принципу дії, конструкції, технічних характеристик і схемотехнічних рішень побудови передавальних оптичних модулів (ПОМ).

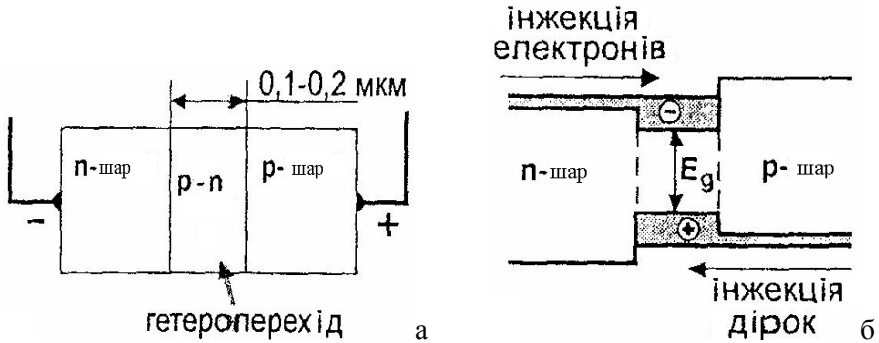
1.1 Фізичні основи джерел випромінювання

У ВОЛЗ використовуються НП джерела випромінювання (ДВ) трьох типів: світловипромінювальні діоди (СД), суперлюмінесцентні діоди (СЛД) та інжекційні лазерні діоди (ЛД).

Основою цих ДВ є Н/П (наприклад, арсенід галію – GaAs, або арсенід галію-алюмінію – GaAsAl та ін.) з підведеними до нього металевими електродами. НП містить *p-n* перехід, в якому при прямому зміщенні електрони інжектуються з *n*-області до *p*-області. В останній виникає випромінювальна рекомбінація носіїв, в результаті якої виникають кванти світла в діапазоні довжин хвиль, що залежить від складу НП матеріалу.

Принцип роботи СД, СЛД, ЛД заснований на випромінювальній рекомбінації носіїв заряду в активній області НП гетерогенної структури при пропущенні через неї струму (рис.1.1а). Носії заряду (електрони і дірки) проникають в активний шар (гетероперехід – НП з різним хімічним складом і фізичними характеристиками *p* і *n* шарів) із прилягаючих пасивних шарів унаслідок подачі напруги на *p-n* структуру і зазнають спонтанну рекомбінацію, яка супроводжується випромінюванням світла.

Довжина хвилі випромінювання λ (мкм) пов'язана із шириною забороненої зони активного шару E_g , (eV) законом збереження енергії $\lambda = 1,24/E_g$ (рис.1.1б).



а) ескіз гетероструктури; б) енергетична діаграма при прямому зсуві р-п переходу

Рисунок 1.1 - Подвійна НП гетероструктура

Завдяки своїй простоті і низкій вартості, світлодіоди (СД) поширені значно ширше, ніж інжекційні лазерні діоди (ЛД). Проміжною конструкцією між ними виступають СЛД, які можна розглядати як ЛД з незадовільною якістю резонатора.

Показник заломлення (ПЗ) активного шару вище ПЗ обмежуючих пасивних шарів структури, завдяки чому рекомбінаційне випромінювання може поширюватися в межах активного шару, випробуючи багаторазове відображення, що значно підвищує КПД ДВ.

Гетерогенні структури можуть створюватися на основі різних НП матеріалів. Звичайно (як підкладку) використовують GaAs і InP. Відповідний композиційний склад активного матеріалу вибирається в залежності від довжини хвилі випромінювання і створюється за допомогою напилювання на підкладку (табл. 1.1).

Довжину хвилі випромінювання λ_0 визначають як значення, що відповідає максимуму спектрального розподілу потужності, а ширину спектра випромінювання $\Delta\lambda_{0,5}$ - як інтервал довжин хвиль, у якому спектральна щільність потужності складає половину максимальної.

Таблиця 1.1 – Композиційні матеріали, які використовуються для створення джерел випромінювання різних довжин хвиль λ

Активний матеріал	Підкладка	Діапазон можливих значень E , eV	Діапазон випромінюваних довжин хвиль λ , нм
Ga(1-x)Al _x As	GaAs	2,02...1,42	610...870
In(1-x)Ga _x As _y P(1-y)	InP	0,95	1100...1700
In _{0.73} Ga _{0.27} As _{0.58} P _{0.42}	InP	0,95	1310
In _{0.58} Ga _{0.42} As _{0.9} P _{0.1}	InP	0,80	1550

1.2 Ватт-Амперні характеристики ДВ

Типові Ватт-Амперні характеристики (ВтАХ) трьох типів ДВ представлені на рисунку 1.2а. ВтАХ являє собою залежність потужності випромінювання P від струму накачування I_n . ВтАХ СД та СЛД порівняно лінійні, тому їх доцільно використовувати для аналогової передачі.

У ЛД ця характеристика істотно нелінійна і має чітко виражену порогову залежність потужності випромінювання від струму накачування. При перевищенні струму накачування вище порогового I_n ЛД працює в режимі вимушеного випромінювання, а в протилежному випадку – в режимі спонтанного випромінювання.

Струм, який модулює, не повинен бути менше за I_n , бо перехід до режиму спонтанного випромінювання призводить до зниження швидкодії пристрою (затримка при вмиканні) та до розширення спектру випромінювання. З метою забезпечення високої швидкодії та вузького спектру випромінювання при модуляції ЛД створюють початкове зміщення постійним струмом, що приблизно дорівнює пороговому.

При цьому слід мати на увазі сильну температурну залежність ВтАХ ЛД (рис.1.2а). Характеристики СД та СЛД мають набагато меншу температурну нестабільність.

Принцип здійснення імпульсної модуляції інтенсивності випромінювання ДВ наведено на рисунку 1.2б.

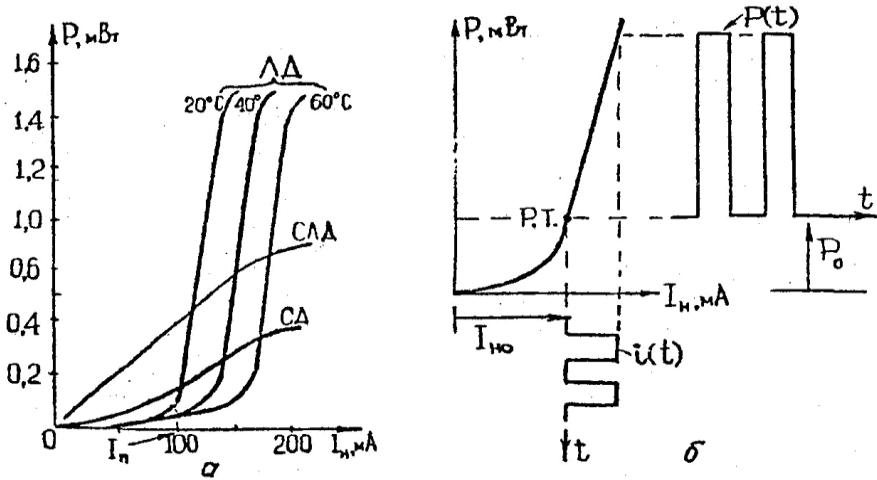


Рисунок 1.2 – Ватт-Амперні характеристики ДВ.

Основні параметри ДВ наступні: тип випромінювача, довжина хвилі випромінювання і потужність, струм накачування, максимальна частота модуляції, ширина обвідної оптичного спектру випромінювання, тип оптичного елемента стикування з ОВ, геометричні розміри, ресурс роботи, діапазон робочих температур. Порівняльні параметри двох ДВ, що досліджуються в цій лабораторній роботі, наведені в таблиці 1.2. Вибір джерела оптичного випромінювання диктується особливостями ВОЛЗ, що проектується. Теоретично, ЛД найкращим чином підходять для ВОЛЗ, маючи малі габарити і масу, достатні ККД та швидкодію. За малих апертурних кутів вони дозволяють вводити до одно- та багатомодових ОВ потужність у декілька десятків міліватт, що дозволяє передавати інформацію на відстань у декілька десятків і сотень км без ретрансляції. Швидкість передачі може перевищувати 10 Гбіт/с. Недоліком ЛД є невеликий ресурс роботи (біля 10^5 годин), а також сильна температурна і часова нестабільність рівню потужності випромінювання, що вимагає використання схем по її стабілізації.

СД та СЛД простіше та дешевші за ЛД, мають практично лінійну ВтАХ, більший ресурс роботи (більш 10^6 годин), кращу температурну та часову стабільність. Однак для СД і СЛД характерні менша швидкодія (1...2 Гбіт/с) та більше розходження

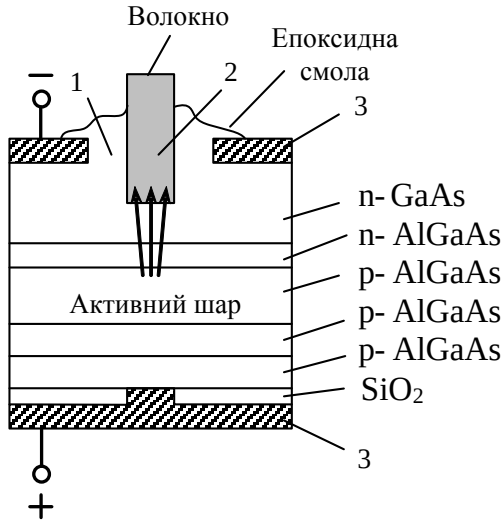
випромінювання (ніж для ЛД), що дозволяє вводити навіть у багатомодове ОВ лише декілька процентів потужності випромінювання. За цих причин СД та СЛД доцільно використовувати в аналогових, а також в цифрових ВОЛЗ невеликої протяжності (без регенераторів) зі швидкостями передачі інформації до 1...2 Гбіт/с, наприклад, для з'єднувальних ліній між АТС у міській телефонній мережі.

Таблиця 1.2 - Типові характеристики ДВ

Марка пристрою	Тип випромінювача	Довжина хвилі випромінювання λ , мкм	Потужність випромінювання, P , мВт	Струм накачки, I , мА	Максимальна частота модуляції, f , МГц	Ширина огинаючої спектра, $\Delta\lambda$, нм	Діаметр волокна на виході пристрою, що узгоджується, мкм
ИЛПН-110	СЛД	0,85	0,1	0,1	15	40	60
ИЛПН-206	ЛД	1,3	1	0,15	200	2	50

1.3 СД, СЛД, ЛД: особливості конструкції

Випромінювання СД є некогерентним (несинхронізовано по фазі часу і напрямку) та слабоспрямованим (у потрібному напрямку). Для ефективного передавання енергії від СД необхідно використовувати багатомодові ОВ з великою чисельної апертурою. Типова конструкція інтегрального СД з поверхневим виходом випромінювання (ПВВ) наведена на рисунку 1.3.



1-епоксидна смола; 2-ОВ; 3-металеві контакти (електроди)

Рисунок 1.3 – Структура СД з ПВВ

У СЛД генерація світла зумовлена як спонтанним, так і вимушеним випромінюванням. Вони, як і ЛД, містять резонатор, однак величина позитивного зворотного зв'язку недостатня для виникнення генерації світла, як в ЛД. В результаті СЛД мають більшу ніж у СД потужність випромінювання, звужену діаграму спрямованості і кращу швидкодію.

ЛД мають вбудований оптичний резонатор, який дозволяє в результаті процесу вимушеного (стимульованого) випромінювання, виникаючого за умови перевищення струмом накачки деякого порогового значення I_n , суттєво збільшити інтенсивність випромінювання на одній чи деяких модах резонатора. Завдяки високій спрямованості випромінювання ЛД забезпечують ефективний ввід потужності не тільки до багатомодового, але й до одномодового ОВ. Типова конструкція інтегрального ЛД (також СД і СЛД) з торцевим виходом випромінювання (ТВВ) наведена на рис. Основною особливістю у відмінності конструкції ЛД від СД і СЛД є наявність резонатору.

ЛД з резонатором Фабрі-Перо (FP лазери, Fabry-Perot). Резонатор у такому ЛД утворюється торцевими поверхнями, які оточують з обох боків гетерогенний перехід. Одна з поверхонь відбиває світло з коефіцієнтом відбиття, близьким до 100%, інша є напівпрозорою, забезпечуючи вихід випромінювання назовні (рис.1.4).

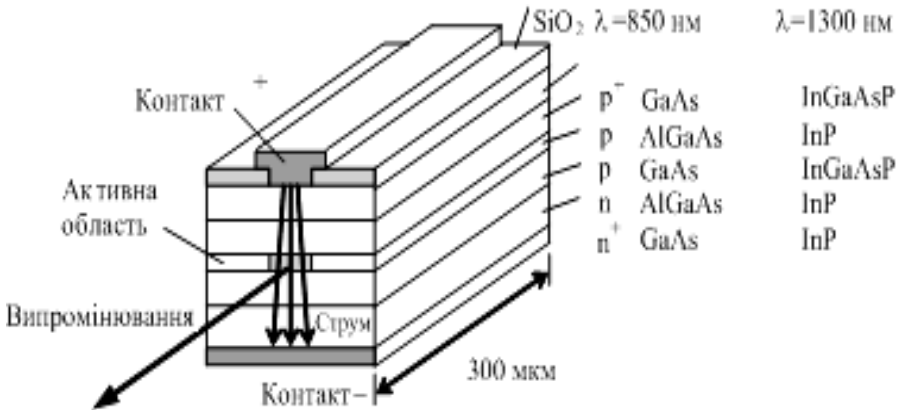
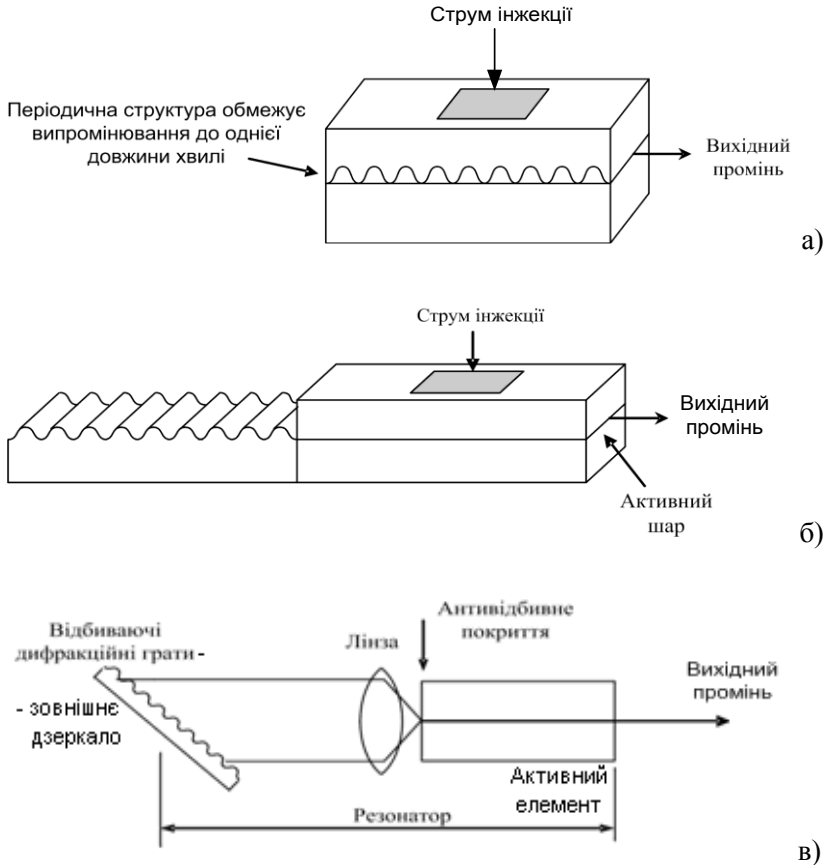


Рисунок 1.4 – Типова конструкція СД, СЛД, ЛД з ТВВ

ЛД з розподіленим зворотним зв'язком (РЗЗ або DFB лазер (рис.1.5а) і з **розподіленим бреггівським відбиттям** (РБВ або DBR лазер (рис. 1.5б). Резонатори у цих двох досить схожих типів лазерів являють собою модифікацію плоского резонатора Фабрі-Перо, у який додана періодична просторова модуляційна структура.

У DFB лазерах періодична просторова структура з'єднана з активною областю, а в DBR лазерах вона винесена за межі активної області. Періодична структура впливає на умови поширення і характеристики випромінювання. Так, перевагами DFB і DBR лазерів у порівнянні з FP лазером є зменшення залежності довжини хвилі лазера від струму інжекції і температури, висока стабільність одномодовості і практично 100% глибина модуляції. Температурний коефіцієнт $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T}$ для FP лазера складає близько 0,5...1 нм/°C (для DFB лазера ~ 0,07...0...0,09 нм/°C). Їх недолік – складність технології.



- а) з розподіленим зворотним зв'язком, РЗЗ або DFB лазер;
 б) з розподіленим брегівським відбиттям, РБВ або DBR лазер;
 в) з зовнішнім резонатором, ЗР або ЕС лазер

Рисунок 1.5 – Типи ЛД

ЛД із зовнішнім резонатором (ЗР або ЕС лазер). У ЕС лазерах один чи обидва торці покриваються спеціальним шаром, що зменшує відбиття, і, відповідно, одне чи два дзеркала ставляться навколо активної області напівпровідникової структури. На рисунку 1.5в зображено ЕС ЛД з зовнішнім резонатором. Антивідбивне покриття

зменшує коефіцієнт відбиття приблизно на чотири порядки, у той час як інший торець активного шару відбиває до 30% світлового потоку завдяки френелевському відбиттю. Зовнішнє дзеркало, як правило, виконує функцію дифракційних решіток. Для поліпшення зворотного зв'язку між дзеркалом і активним елементом встановлюється лінза. Збільшуючи чи зменшуючи відстань до дзеркала, а також одночасно розвертаючи дзеркало-решітку, що еквівалентно зміні кроку решітки – можна плавно змінювати довжину хвилі випромінювання, причому діапазон змін досягає 30 нм. У силу цього, ЕС ЛД є незамінними при розробці апаратури хвильового ущільнення і вимірювальної апаратури для ВОЛЗ (по характеристиках вони схожі з DFB і DBR).

Напівпровідникові лазери VCSEL. В останні роки в оптичних мережах зв'язку і мережах доступу активно впроваджуються напівпровідникові лазери з вертикальним випромінюючим резонатором, точніше: лазери поверхневого випромінювання з вертикальним об'ємним резонатором – VCSEL (vertical cavity surface – emitting Lasers (рис.1.6). Особливість лазерів цього типу полягає в наступному. Стосовно площини переходу подвійної гетероструктури вісь цього резонатора розташовується вертикально. Звідси й назва лазера. В якості кожного з дзеркал використовується декілька шарів з НП матеріалу, кількість, товщина і склад яких визначають довжину хвилі випромінювання лазерного діода. Основна особливість випромінювання таких лазерів полягає в тому, що у поперечному перерізі це випромінювання близьке до кругового. Така властивість дає можливість ефективного узгодження VCSEL лазерів з оптичним волокном без будь-яких погоджувачих пристроїв і тим самим різко знизити вартість лазера. Лазерами VCSEL зацікавилися розробники апаратури для високошвидкісних ВОЛЗ, що працюють у діапазонах С та L, тобто у 1528-1625 нм. На рисунку 1.6 подано схему поперечного перерізу напівпровідникової структури лазера VCSEL. На європейських і американських конференціях з ВОЛЗ і елементів ЕСОС і OFC за 2001-2012р. спостерігається зростання кількості доповідей, які присвячено лазерам VCSEL. Це свідчить про перспективність застосування лазерів такого типу як в оптичних мережах доступу, так і в магістральних волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП).

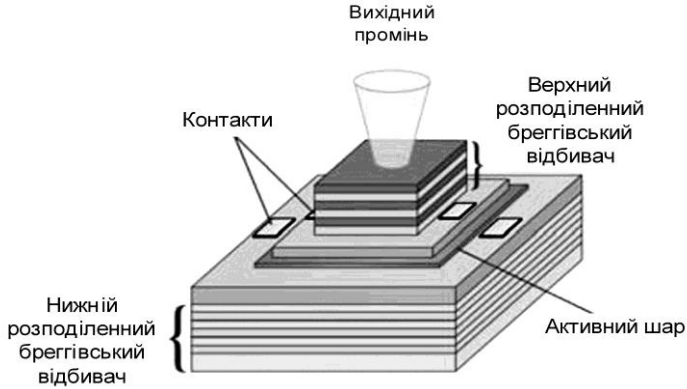


Рисунок 1.6 – Поперечний переріз НП структури лазера VCSEL

Таким чином порівняння СД, СЛД і ЛД доводить, що в них мають місце дві головних конструктивних відмінності. По-перше, ЛД має вбудований оптичний резонатор. По-друге, ЛД працює при значно більших значеннях струмів накачування, чим СД і СЛД, що дозволяє при перевищенні деякого граничного значення одержати режим індукційованого випромінювання. Саме таке випромінювання характеризується високою когерентністю, завдяки чому ЛД мають значно меншу ширину спектра випромінювання: СД- 30...50 нм; СЛД 1-3 нм і 0,1 -0,4 нм для одномодових ЛД (рис.1.7).

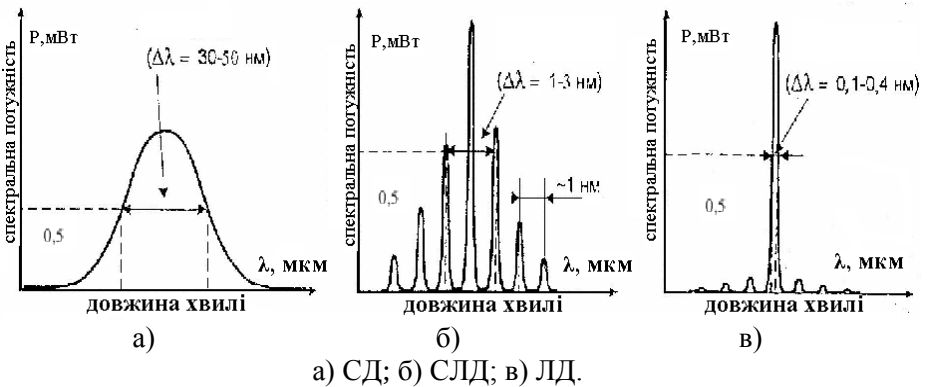


Рисунок 1.7 - Спектри випромінювання

Відзначемо, що усі НП ДВ мають цінну для ВОЛЗ практичну властивість – можливість безпосередньої (внутрішньої) модуляції (тобто зовнішній модулятор для цих ДВ не потрібний). Змінюючи величину струму інжекції (струму накачування), можна керувати інтенсивністю (потужністю) випромінювання і модулювати вихідне випромінювання. Потужність вихідного випромінювання $P_{\text{вих}}$, чи вихідна потужність випромінювання світлодіода (output power) відбиває потужність. Поряд із традиційною одиницею виміру Вт вона може вимірюватися в дБм. Потужності $P_{\text{вих}}$, вимірюваної в мВт (10^{-3} Вт), буде відповідати потужність $P_{\text{вих}} = 10 \lg P_{\text{вих}}$ (дБм).

Використання одиниці виміру дБм спрощує енергетичний розрахунок бюджету ліній. Потужність випромінювання, що приводиться в характеристиках оптичного передавача, може варіюватися в деякому діапазоні.

У таких випадках указують діапазон потужності випромінювання (output power range). Наприклад, $-19 \dots -14$ дБм означає, що $P_{\text{вих min}} = -19$ дБм, а $P_{\text{вих max}} = -14$ дБм.

У магістральних ВОЛЗ використовуються два вікна 1,3 і 1,55 мкм. Оскільки найменше загасання у ОВ досягається у вікні 1,55 мкм, на надпротягнених безретрансляційних ділянках ($L = 100$ км) ефективніше використовувати оптичні передавачі саме з цією довжиною хвилі. У той же час на багатьох магістральних ВОЛЗ до складу ВОК входять тільки східчасті одномодові ОВ, що мають мінімум хроматичної дисперсії в околиці 1,3 мкм (волокон зі зміщеною дисперсією немає).

На довжині хвилі 1,55 мкм питома хроматична дисперсія в SMF складає 17 пс/нм·км. А оскільки смуга пропущення зворотно пропорційна ширині спектра випромінювання, то збільшити смугу пропущення можна тільки зменшуючи ширину спектра випромінювання лазера.

При ширині спектра $\Delta\lambda = 4$ нм смуга пропущення на 100 км складає 63 МГц, а при $\Delta\lambda = 0,2$ нм відповідно 1260 МГц. Отже, для того щоб оптичні передавачі на довжині хвилі 1,55 мкм могли в однаковій мірі використовуватися на протяжній лінії не тільки з одномодовим ОВ зі зміщеною дисперсією (DSF), але і зі східчастим волокном (SMF), необхідно робити ширину спектру випромінювання передавачів найменшою.

1.4 Інші характеристики ДВ

Важливими характеристиками ДВ є швидкодія, деградація і час наробіток на відмовлення функціонування ДВ.

Швидкодія ДВ. Експериментально вимірюваним параметром, що відображує швидкодію джерела випромінювання, є максимальна частота модуляції. Попередньо встановлюються пороги 0,1 і 0,9 від сталого значення потужності світлового випромінювання при низькочастотній модуляції прямокутними імпульсами струму. В міру зростання частоти модуляції, тобто при переході на менші масштаби по тимчасовій шкалі, форма світлових фронтів стає більш пологою. Для опису фронтів вводять часи наростання τ_{rise} і спаду τ_{fall} потужності випромінювання, обумовлені як тимчасові інтервали, за які відбувається зростання від 0,1 до 0,9 і, навпаки, спад світлового сигналу від 0,9 до 0,1. Максимальна частота модуляції визначається як частота вхідних електричних імпульсів, при яких вихідний оптичний сигнал перестає перетинати граничні значення 0,1 і 0,9, залишаючись при цьому у внутрішній області. Для СД ця частота може досягати до 0,2...0,5 ГГц, а в ЛД - значно більше (декілько десятків ГГц). Часи наростання і спаду надають інформацію про смугу пропущення W . Якщо припустити, що вони рівні між собою (а це не завжди так), то смугу пропущення можна визначити по формулі:

$$W = 0,35/\tau \quad (1.1)$$

Деградація і час наробітку на відмовлення. В міру експлуатації оптичного передавача його характеристика поступово погіршуються: падає потужність випромінювання, і, зрештою, він виходить з ладу. Це зв'язано з деградацією НП шару. Надійність НП ДВ визначається середнім наробітком на відмовлення чи інтенсивністю відмовлень. ЛД, які випускалися десять років тому, мали значно меншу надійність у порівнянні зі СД. Однак у даний час, завдяки удосконаленню конструкцій і технології виготовлення, вдалося значно підвищити надійність лазерних діодів і наблизити їх до СД за часом наробітку на відмовлення, що складає до 100000 годин і більш (7-10 років).

Передавальні оптоелектронні модулі. Передавальні оптоелектронні модулі (ПОМ), застосовують у ВОЛЗ для

перетворення електричних сигналів в оптичні. Останні повинні бути введені у оптоволокно з мінімальними втратами. Виробляються дуже різноманітні ПОМ, які відрізняються по конструкції, а також по типу джерела випромінювання. Одні працюють на комп'ютерних швидкостях з максимальною відстанню у декілька метрів, інші передають сотні і навіть тисячі мегабіт у секунду на відстані в кілька десятків і сотень кілометрів. Головним елементом ПОМ є ДВ. Основні вимоги, яким повинні задовольняти ДВ для ПОМ:

- випромінювання повинне вестися на довжині хвилі одного з вікон прозорості ОВ. У ОВ існує три вікна, у яких досягаються менші втрати світла при поширенні: 850 нм, 1300 нм, 1550 нм;
- ДВ повинне підтримувати необхідну частоту модуляції для забезпечення передачі інформації на необхідній швидкості;
- ДВ повинно бути ефективним, у тому значенні, що велика частина випромінювання джерела попадає у ОВ з мінімальними втратами;
- ДВ повинне мати досить велику потужність, щоб сигнал можна було передавати на великі відстані, але не на стільки, щоб випромінювання привело до нелінійних ефектів або могло пошкодити волокно чи оптичний приймач;
- варіації температур не повинні чинити вплив на функціонування ДВ;
- вартість виробництва ДВ повинна бути не надто високою.

Є три основних типу ДВ, що задовольняють означеним вимогам і широко використовуються в наш час: СД, СЛД і ЛД.

Основні елементи ПОМ. Для організації передачі оптичних сигналів у ВОЛЗ недостатньо мати тільки ДВ, а потрібно ще ряд оптичних і електронних компонентів, у сукупності складаючих ПОМ.

До складу ПОМ звичайно входять наступні елементи:

- джерело випромінювання;
- вузол електричного інтерфейсу;
- ланцюг струму накачування;
- система контролю температури;
- вузол вихідного контролю оптичного сигналу.

В будь-якій конструкції ПОМ є спеціальний утримувач (housing), що дозволяє закріпити і захистити складені елементи передавача: ДВ, вузол електричного інтерфейсу і місце сполучення з

ОВ. Іноді вимагаються додаткові внутрішні елементи для оптимального його приєднання. Важливим елементом СД, СЛД, і ЛД є ланцюг струму накачування і система контролю температури. Для складних лазерних систем додають вихідний моніторинг оптичного сигналу. Загальна схема конструкції ПОМ, в якій не всі елементи є обов'язковими, показана на рисунку 1.8.

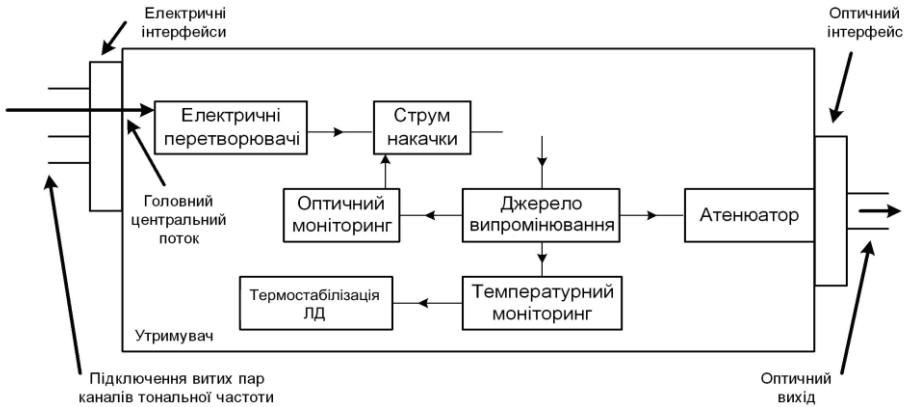


Рисунок 1.8 - Складові елементи ПОМ

1.5 Завдання до ПР

Ознайомитись з принципом дії та характеристиками ДВ для ВОЛЗ, використовуючи рекомендовану літературу та матеріал лекцій.

Розрахувати в діапазоні змін струмів I_n 0...100 мА залежність потужності ДВ за формулою: $P = aI_n - bI_n^2$, де коефіцієнти апроксимації a та b наведено в таблиці 1.3. Номери варіантів (0...9) - остання цифра номера студентського квитка.

Таблиця 1.3 - Значення коефіцієнтів a та b

№ вар.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a, Вт/А	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,01	0,011	0,012	0,013	0,014
b, А⁻¹	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0

За результатами розрахунку побудувати Ватт-Амперну характеристику ДВ в координатах P , мВт і I_n , мА. Визначити і пояснити, якому типу ДВ (СД, СЛД або ЛД) вона відповідає.

Вивчити методи, схеми перетворення електричних сигналів в оптичне випромінювання і типи перетворювачів, які використовуються в ВОЛЗ.

1.6 Контрольні питання

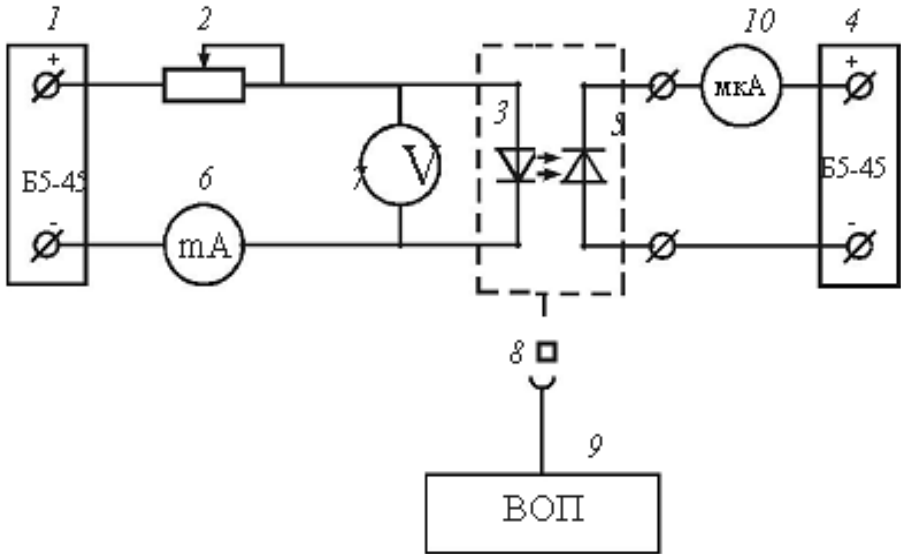
1. Які типи джерел випромінювання використовують в ВОЛЗ?
2. На яких фізичних явищах побудована робота СД, СЛД та ЛД?
3. Приведіть ВТХ СД, СЛД, ЛД і поясніть їх хід та їх відмінності.
4. Назвіть переваги та недоліки некогерентних та когерентних ДВ.
5. Поясніть призначення елементів типової структурної схеми макету для вимірювання характеристик ДВ.
6. Які функції виконує ПОМ та його призначення у схемі ВОЛЗ?
7. Перелічить функціональний склад вузлів ПОМ.
8. Накреслить функціональну схему ПОМ та пояснити призначення його вузлів.
9. Які три типи випромінювачів використовуються в ВОЛЗ і їх головні відмінні риси?
10. Поясніть, що таке швидкодія ДВ і чим вона обумовлена.
11. Чим обумовлена деградація ДВ?

1.7 Техніка безпеки

УВАГА! При роботі з СД, СЛД, ЛД і ПОМ у разі їх вмикання забороняється заглядати в торець оптичного з'єднувача, з якого може випромінюватися ІЧ випромінювання. Спектр випромінювання знаходиться поза оптичним діапазоном, який сприймає людське око, але може привести до незворотних пошкоджень органів зору. Це небезпечно для здоров'я і органів зору!

1.8 Обладнання і опис лабораторного стенду

Схема макету для вимірювання характеристик ДВ приведена на рисунку 1.9. Струм накачки від джерела живлення 1 типу Б5-45 через реостат 2, яким регулюється значення струму, подається на ДВ 3 та контролюється міліамперметром 6 з межами вимірювання 0 – 150 мА. Коннектор 8 ДВ за допомогою відрізка ОК з'єднується з вимірювачем оптичної потужності 9. Виводи ФП 5 з'єднуються з джерелом живлення 4, а струм в колі його навантаження контролюється за допомогою мікроамперметра 10 з границею вимірювання 0 – 500 мкА. Вольтметр 7 вимірює напругу на ДВ 3.



1, 4 – джерела живлення; 2 – реостат; 3 – джерело випромінювання; 5 – фотоприймач; 6 – міліамперметр; 7 – вольтметр; 8 – коннектор; 9 – вимірювач оптичної потужності; 10 – мікроамперметр.

Рисунок 1.9 – Структурна схема лабораторного стенду

1.9 Порядок проведення ПР

1. Ввімкнути джерела живлення 1 та 4. Виміряти ВАХ та ВтАХ ДВ-1 (СД) в діапазоні струмів накачки 0...100 мА, а потім ДВ-2 (ЛД) в діапазоні струмів накачки 0...120 мА, а також величину струму ФД.
2. Виміряти струм контрольного ФД в пристрої ІЛПН-206.
3. Побудувати ВАХ та ВтАХ на одному графіку для ДВ-1 та на другому для ДВ-2.
4. Розрахувати значення квантової ефективності ДВ-1 та ДВ-2 на лінійному відрізку характеристики.
5. Визначити пороговий струм накачки ДВ-2.
6. По ВАХ визначити динамічний опір $R_{\text{дин}}$ ДВ-1 та ДВ-2 при струмі накачування, що відповідає середині її лінійної ділянки. $R_{\text{дин}} = \Delta U / \Delta I$, де ΔU – приріст напруги на виводах випромінювача, що відповідає прирісту струму через нього.

1.10 Зміст звіту

1. Назва і мета практичної роботи, теоретична частина по ДВ.
2. Привести структурну схему типового лабораторного стенду.
3. Виконати розрахунки за завданням згідно завдання.
4. Накреслити ВтАХ для ДВ-1.
5. Накреслити ВтАХ для ДВ-2.
6. Розрахувати квантовий ККД для ДВ-1 та ДВ-2.
7. Навести рисунок (фото) конструкції ПОМ з поясненням розташування функціональних вузлів та елементів.
8. Навести призначення вузлів та елементів ПОМ.
9. Перелік характеристик ПОМ
10. Зробити висновки по роботі.

2 ПРАКТИЧНА РОБОТА №6

Фотоприймачі. Приймальні оптоелектронні модулі

Мета роботи - ознайомлення з основою теоретичних відомостей про фотоприймачі (ФП) і типи модулів на їх основі, основними параметрами і особливостями технічної реалізації, а також ознайомлення з ними на практиці з розрахунком деяких їх параметрів.

2.1 Загальні відомості

Фотоефект. Існує два різновиди фотоефекту. При першому електрони вивільнюються з поверхні металу при поглинанні енергії потоку фотонів. Це явище називається зовнішнім фотоелектричним ефектом. Такі приймачі випромінювання, як вакуумний фотодіод (ФД) і фотоелектричний помножувач (ФЕП), засновані на цьому ефекті. Друга група приймачів випромінювання- НП прилади на основі р-п переходу, у яких при поглинанні фотонів генеруються вільні носії заряду (НЗ): електрони і дірки. Цей механізм називають внутрішнім фотоелектричним ефектом (рис.2.1). На цьому явищі засновані прилади: р-п ФД, р-і-п ФД і лавинний ФД (ЛФД).

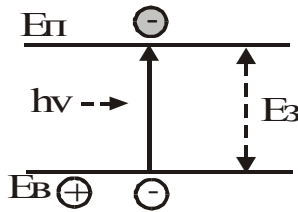


Рисунок 2.1 – Явище внутрішнього фотоефекту в НП

Напівпровідникові фотодіоди. Фотодіод (ФД) служить для приймання (детектування) і перетворення оптичних сигналів у електричні. Як перетворювач, ФД має оптичний вхід (керуючий ланцюг) і електричний вихід (сигнальний ланцюг), параметри яких повинні бути узгоджені з джерелом випромінювання і оптичною лінією (з одного боку) і з електричним навантаженням, що включає в себе будь-який перетворювач електричних сигналів: підсилювач,

модулятор, декодер (з іншого боку). В залежності від типу і режиму детектування ФД може працювати в фотовольтаїчному режимі (коли ФД є генератором фотонапруги і струму без зовнішнього джерела живлення) та у фотодіодному режимі (коли ФД є генератором струму, який пропорційний оптичній потужності). Схеми вмикання ФД в фотовольтаїчному та фотодіодному режимах наведено на рисунку 2.2.

Режим роботи ФД зі зворотним зміщенням має назву фотодіодного. У порівнянні з фотовольтаїчним, фотодіодний режим забезпечує високу швидкодію, кращу стабільність, великий динамічний діапазон, добру температурну стабільність, більш ширший діапазон спектральної чутливості. Саме цей режим використовується у ВОЛЗ.

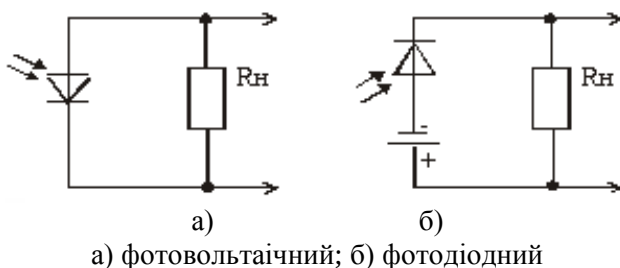


Рисунок 2.2 – Режими детектування

Головний недолік – наявність темнового струму (ТС), що виникає навіть без випромінювання під дією зворотнього зміщення.

Процес генерації фотоструму і детектування сигналу можна також проілюструвати за допомогою рисунка 2.3 і еквівалентної схеми ФД, поданої на рисунку 2.4, де i_p – середньоквадратичний струм сигналу (фотосигналу), $\sqrt{i_s^2}$ – струм дробового шуму, C_j – ємність переходу, R_j – опір переходу, R_s – послідовний опір, R_L – зовнішній опір навантаження, $\sqrt{i_T^2}$ – струм теплового шуму, R_i – вхідний опір підсилювача.

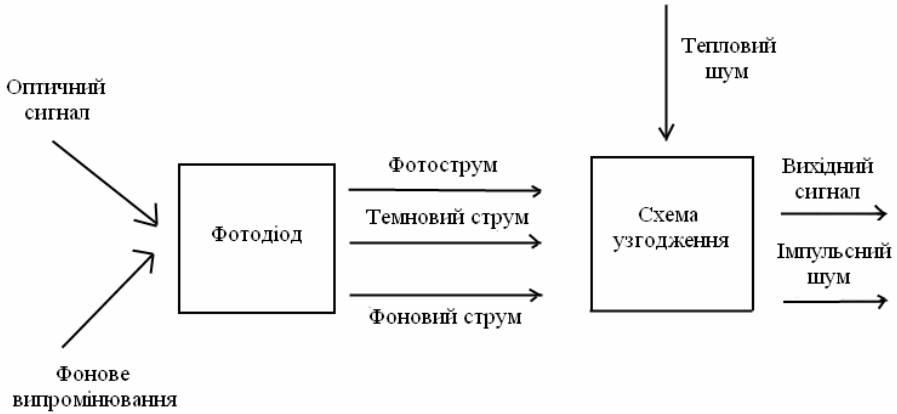
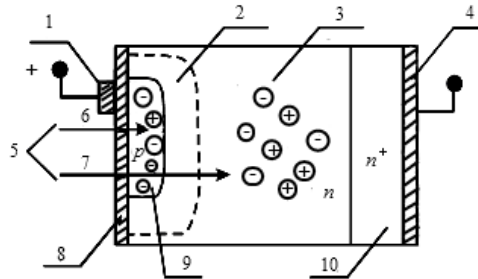


Рисунок 2.3 – Процес генерації фотоструму і детектування сигналу



1 - позитивний електрод (анод); 2 - збіднена область; 3- p- шар; 4 - негативний електрод (катод); 5 - падаюче світло; 6 - короткохвильове оптичне випромінювання; 7 - довгохвильове оптичне випромінювання; 8 - шар ізоляції; 9 - р-шар; 10 – n+- шар

Рисунок 2.4 – Схематичне зображення перетину фотодіода

До ФД в ВОСПІ висуваються наступні вимоги:

- ефективність оптоелектронного перетворення - забезпечення максимальної потужності електричного сигналу на виході при мінімальній оптичній потужності на вході;
- швидкодія, яка необхідна для приймання оптичного сигналу, промодульованого широкосмуговим інформаційним повідомленням;

- мінімум власних шумів – вимагається для забезпечення високої чутливості (мінімальної потужності випромінювання, яку можна виявити);
- широкий динамічний діапазон оптичних сигналів, що приймаються;
- малі габарити, висока надійність та стабільність параметрів, низька напруга живлення, мала вартість.

Найбільш повно цим вимогам відповідають НП ФД, які працюють на основі явища внутрішнього фотоефекту.

Принцип дії НП ФД. Явище фотоефекту засноване на генерації вільних НЗ (електронів і дірок) при поглинанні фотонів випромінювання атомами кристалічної решітки (власний фотоефект) або атомами легуючої домішки (домішковий фотоефект). Механізм приймання світла за допомогою НП структури пояснимо за допомогою найпростішого ФД р-п-типу. На рисунку 2.4 зображено повздовжний переріз кристала ФД. Шар р-типу відповідає типу провідності активної області. Шар n-типу відповідає типу провідності початкового матеріалу.

Формування шару р-типу створює р-п-перехід, який служить для розділення оптично генерованих носіїв заряду. Звичайно шар n-типу для кремнієвого ФД створюється за допомогою селективної дифузії бору, глибина залягання якого складає 1 – 3 мкм, а нейтральна область між р- та n-шарами відома як збіднений шар або область об'ємного заряду.

Змінюючи товщину р-шару, n-шару і шару n+-типу з тильної сторони кристала фотодіода, можливо регулювати спектральну і частотну характеристики ФП. Якщо енергія фотона $h\nu$ (рис.2.4), яка поглинається атомом НП, перевищує ширину його забороненої зони $E_g = E_n - E_v$, тобто якщо $h\nu \geq E_g$, то електрон переходить з валентної зони E_v в зону провідності E_n (власне поглинання), або ж з домішкового рівня в зону провідності (домішкове поглинання). В ФД використовуються домішкові НП.

При надходженні до ФД оптичного сигналу (значного числа фотонів) починається генерація великої кількості вільних носіїв. Вони створюють надлишкову (відносно рівновагової) концентрацію зарядів, що викликає зміну струму (фотоструму) або напруги (фотонапруги) у

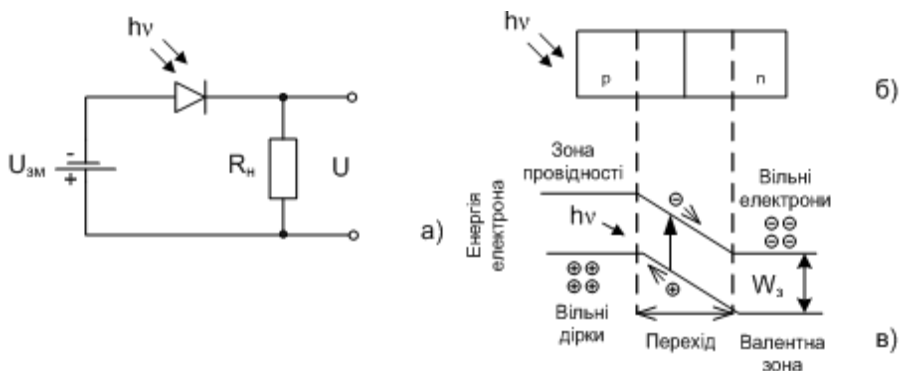
зовнішньому навантажувальному колу. Потім фотосигнал надходить до підсилювача, який, зазвичай, підключають до ФД. НП ФД мають малі розміри і масу, високу чутливість і швидкодію і здатні працювати при напрузі зворотнього зміщення в кілька Вольт, майже ідеальні для використання у ВОЛЗ.

Розглянемо три різновиди таких приладів: p - n ФД, p - i - n ФД і лавинний ФД. При подачі зворотного зміщення (рис.2.5а) потенційний бар'єр між p - і n - областями збільшується (рис.2.5б). P - N (p - n) переходом називається область, де існує потенційний бар'єр. Оскільки в області p - n переходу відсутні будь-які вільні заряди, її називають збідненою $NЗ$ областю.

Вільні електрони (переважають в n -області) і вільні дірки (переважають в p -області) не можуть подолати потенційний бар'єр, тому струм через перехід не тече. Відсутність вільних $NЗ$ приводить до того, що опір цієї області великий, тому майже вся напруга зовнішнього зміщення прикладена до збідненої області ФД. Отже, напруженість електричного поля в збідненій області висока і мала поза нею.

На рисунку 2.5 в показано, як сигнальний фотон поглинається у p - n переході після проходження через p -шар. Поглинена енергія дозволяє перевести зв'язаний електрон із валентної зони ($VЗ$) крізь заборонену зону ($ЗЗ$) в зону провідності ($ЗП$). Електрон тепер вільний і здатний рухатися. Вільна дірка залишається у $VЗ$ як вакансія електрона. Отже, при поглинанні фотона створюється пара вільних носіїв заряду (електрон і дірка).

Електрон переміститься в нижню частину бар'єра, а дірка (чия потенційна енергія протилежна енергії електрона) переміститься у верхню частину бар'єра. Це переміщення зарядів викликає протікання струму через зовнішнє коло. Якщо вільні дірки і електрони рекомбінують (чи досягають краю p - n переходу, де електричне поле мале, $NЗ$ припиняють рух і фотострум стає нульовим. Коли фотон буде поглинений у p - або n -областях по обидва боки від p - n переходу, то виникає пара електрон-дірка, але ці $NЗ$ будуть рухатися повільно через слабе електричне поле, що існує за межами p - n переходу. Більшість $NЗ$ буде повільно рухатись внаслідок дифузії через ФД і прорекомбінує, не досягнувши переходу.



а) схема; б) НП структура; в) зонна діаграма

Рисунок 2.5 – ФД *p-n*-типу

Ці НЗ роблять незначний внесок у фотострум і знижують відгук ФД. Ясно, що це явище робить *p-n* ФД малоефективним. НЗ, що створені поблизу від збідненої області, можуть (внаслідок дифузії) наблизитися до неї і досягти *p-n* переходу завдяки великому електричному полю, що існує в ньому. У зовнішньому колі потече струм, але він буде запізнюватися відносно оптичної потужності, що надходить. Припустимо, що потрібно виміряти час наростання струму *p-n* ФД, подавши на його вхід "сходинок" оптичної потужності. Деякі з фотонів на початку "сходинки" поглинаються у самому переході і викликають майже негайне протікання фотоструму. Проте, ті фотони початку "сходинки", що поглинаються поблизу переходу, викличуть протікання струму з деяким запізненням. Поступове збільшення струму, яке досягає максимуму за час τ_n , відбувається через певний термін після того, як закінчиться перепад вхідної потужності. Час наростання є великим. Типові *p-n* ФД мають час наростання струму близько кількох мікросекунд, що робить їх непридатними для швидкісних ВОЛЗ. ФД *p-i-n*-типу вирішує проблему низької чутливості і повільного відгуку.

Цікаво зіп'явставити НП прилади, що використовуються в якості ДВ і ФП. Для випромінювання світла СД подається пряме зміщення і носії заряду, що інжектвані в область переходу, рекомбінують. Це призводить до утворення фотонів і випромінювання. Коли

відбувається приймання світла, все відбувається навпаки. На ФД подають зворотне зміщення і фотони, що надходять, генерують пари електрон-дірка. Це призводить до електричного струму. Можна розробити спеціальний *p-n* прилад, який буде використовуватися як ДВ, так і як ФП випромінювання.

Фотодіод *p-i-n* типу та лавинний фотодіод. З ФП, що застосовуються у ВОЛЗ, знайшли поширення *p-i-n* ФД і лавинні ФД (ЛФД). Розглянемо принцип дії фотоприймачів (ФП) на прикладі *p-i-n* ФД, для якого характерна наявність *i*-шару (слаболегованого НП) між шарами *p+* та *n+* типу, де “+” означає сильне легування), як показано на рисунку 2.6.

Також *i*-шар називають збідненим шаром, оскільки в ньому немає вільних носіїв. На *p-i-n* структуру подається напруга зі зворотним зсувом (у порівнянні зі СД). Сильне легування крайніх шарів робить їх провідними і максимальне значення електричного поля (градієнт потенціалу) створюється в *i*-шарі. Але, оскільки немає вільних НЗ в *i*-шарі, немає й електричного струму. При наявності падаючого випромінювання на *i*-шар, у ньому утворюються вільні електронно-діркові пари. Вони під дією електричного поля швидко розділяються і рухаються в протилежних напрямках до своїх електродів, відтворюючи електричний струм. Ефективним є взаємодія випромінювання тільки з *i*-шаром, тому що при влученні фотонів в *p+* та *n+* шари виникає дифузійний струм, який має більшу інерційність і погіршує швидкодію. Тому при виготовленні ФД прагнуть робити *p+* та *n+* шари як можна тоншими, а збіднену *i*-область досить великої товщини, щоб вона повністю поглинала все падаюче світло. ФД *p-i-n* типу є найбільш поширеними у ВОСЗ. Такий діод має широку *i*-область із власного напівпровідника між *p-* та *n-* областями (рис.2.6). Шар власної провідності не має вільних НЗ, тому його опір великий і більша частина напруги зміщення $U_{зм}$ ФД прикладена до цієї області і напруженість електричного поля в ній велика. Оскільки шар власної провідності дуже широкий, то є висока ймовірність для фотонів, що надходять, бути поглинутими саме в ньому, а не в тонких *p-* або *n-* областях. Це збільшує квантову ефективність і швидкість відгуку в порівнянні з *p-n* ФД. Схема вмикання *p-i-n* ФД і рух НЗ (електронів і дірок) наведена на рисунку 2.6.

Гранична довжина хвилі. Для створення пари носіїв електрон-дірка, фотон, що надходить, повинен мати енергію достатню, щоб електрон подолав ЗЗ НП. Це потребує виконання умови $h\nu \geq W_3$, яка дає значення граничної довжини хвилі:

$$\lambda_{\text{гр}} = 1,24 / W_3, \text{ мкм}, \quad (2.1)$$

де W_3 – енергія, яка потрібна для подолання забороненої зони, еВ.



Рисунок 2.6 – Структура розподілу потенціалу електричного поля p - i - n ФД

НП матеріали. Кремній (Si) найчастіше використовується для волоконно-оптичних приймачів (ВОП) випромінювання, що працюють у першому вікні прозорості, але він не може працювати в другому вікні (довжина хвилі близько 1,3 мкм). ФД з германію (Ge) і InGaAs вносять більшу кількість шуму, ніж кремній, але вони можуть

функціонувати в другому вікні прозорості. У таблиці 2.1 наведені параметри p - i - n ФД із найбільш поширених НП матеріалів.

Таблиця 2.1 – Типові параметри p - i - n ФД

Матеріал	Область спектральної чутливості, мкм	Довжина хвилі максимального відгуку, мкм	Максимальний струмовий відгук, А/Вт
Кремній (Si)	0,3.. 1,1	0,8	0,5
Германій (Ge)	0,5. ..1,8	1,55	0,7
InGaAs	1,0..1,7	1,7	1,1

Вольт-Амперна характеристика (ВАХ). Сім'ю ВАХ кремнієвого ФД, що має струмовий відгук 0,5 А/Вт, наведено на рисунку 2.7. Якщо на ФД подано напругу зворотнього зміщення, то він працює у ФД (фотовентильному) режимі - ліва частина рисунку 2.7. У цьому випадку сила фотоструму є пропорційною оптичній потужності (P).

Коли зворотнє зміщення відсутнє, тоді (прийнята ФД оптична потужність призводить до виникнення на його електродах напруги прямого зміщення права частина рисунку 2.7). Це фотогальванічний режим, що є основним для сонячних елементів, які виробляють електричну напругу при опроміненні світлом.

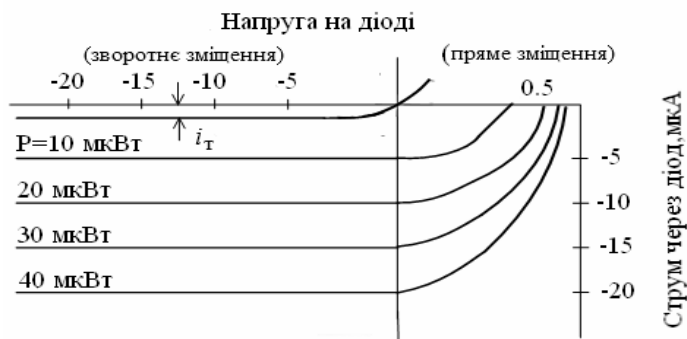


Рисунок 2.7 – ВАХ кремнієвого ФД

Навіть при відсутності оптичної потужності і наявності зворотнього зміщення через зворотньо-зміщений ФД тече малий зворотній струм, що зветься темновим струмом (ТС). Він позначений символом i_T на рисунку 2.7. ТС викликано тепловою генерацією вільних носіїв заряду в ФД, має теплову природу і швидко збільшується з температурою, подвоюючись при збільшенні температури на кожні 10°C . Значення ТС становлять від частки наноампера до кількох сотень наноампер. Кремнієві ФД мають найнижчі значення ТС ($\sim 1\text{нА}$). У ФД із InGaAs він трохи більший, а германієві ФД мають найбільші значення ТС. У цьому одна з основних причин, чому кремнієвим ФД віддають перевагу. Очевидно, що слабкий оптичний сигнал не можна виявити за допомогою ФД, тому що він генерує малий фотострум, який маскується великим ТС. Великий ТС впливає на відношення сигнал/шум і ймовірність помилки приймального пристрою (ПП). Схему найпростішого ПП на основі $p-i-n$ ФД наведено на рисунку 2.8 разом з ідеалізованим сімейством ВАХ, а його графічне рішення наведено на рисунку 2.8б.

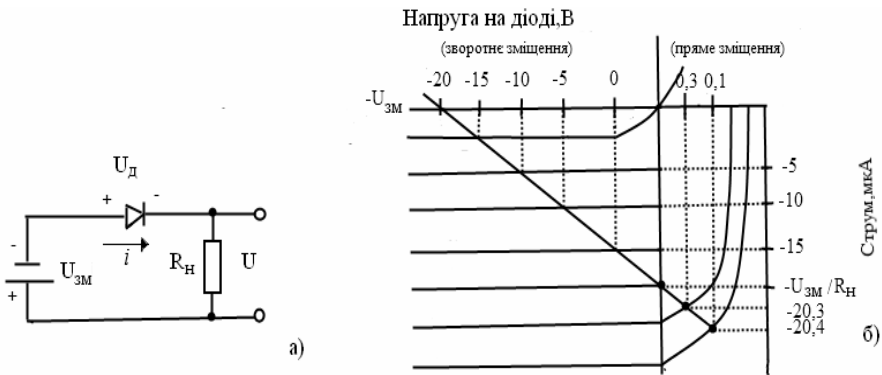


Рисунок 2.8 – Схема ввімкнення $p-i-n$ ФД (а) і її графічний аналіз (б)

Користуючись законом Кірхгофа алгебраїчна сума падінь напруги в замкнутому колі дорівнює ЕРС джерела напруги для схеми на рисунку 2.8, то можна отримати рівняння:

$$-U_{\text{ЗМ}} = U_{\text{Д}} + iR_{\text{Н}}, \quad (2.2)$$

де $U_{зм}$ – напруга зміщення; U_d – падіння напруги на ФД; i – струм у ланцюгу; R_H – опір навантаження.

Оскільки рівняння (2.2) має одночасно задовольняти перетини з ВАХ, то його графічне рішення наведено на рисунку 2.8 (пряма лінія).

Приклад1. Нехай використана напруга зміщення 20 В і резистор навантаження R_H з номіналом 1МОм. Вона перетинає вісь напруги у точці $-U_{зм}$ (у цьому прикладі – 20В) і вісь струмів у точці $-U_{зм}/R_H = 20/10^6 = 20\text{мкА}$. Передатну характеристику (ПХ), яка показує залежність вихідної напруги U від вхідної оптичної потужності P , можна здобути з рисунку 2.8б. Результати обчислень ПХ p - i - n ФД зведено до таблиці 2.2.

Пояснимо, як отримано дані у таблиці 2.2. Наприклад, якщо оптична потужність P дорівнює 10 мкВт, то навантажувальна пряма перетинає ВАХ при напрузі на діоді $U_g = -15$ В. Залишок напруги джерела зміщення величиною 5В падає на резисторі навантаження R_H :

$$|U_H| = |U_{зм} - U_g| = |20 - 15| = 5B, \quad (2.3)$$

тобто на верхньому полюсі резистора існує потенціал 5В відносно заземленого позитивного полюса батареї (рис.2.8а)

Таблиця 2.2-Результати розрахунку ПХ p - i - n ФД

Оптична потужність, P , мкВт	Напруга на ФД, В	Напруга на навантаженні, В
0	-20	0
10	-15	5
20	-10	10
30	-5	15
40	0	20
50	0,3	20,3
60	0,4	20,4

Інші числа в таблиці 2.2 розраховуються аналогічно. Графік ПХ подано на рисунку 2.9. Якщо оптична потужність P стає достатньо великою (у цьому прикладі більшою 40мкВт), ФД починає

функціонувати у фотогальванічному режимі і передатна характеристика стає нелінійною завдяки явищу насичення. Звичайно проблемою є недостатня оптична потужність P , але при проектуванні локальних ліній передачі повиненно подбати, щоб пристрій не потрапив у некерований режим насичення.

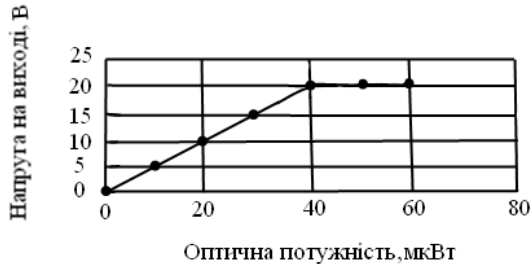


Рисунок 2.9 – Передатна (Вольт-Ваттна) характеристика р-і-п ФД з

$$\rho_i = 1A/Bm \text{ при } R_H = 1\text{МОм}$$

Термін насичення відноситься до стану, коли вхідна оптична потужність настільки велика, що існує нелінійна залежність фотоструму (фотонапруги) від вхідної оптичної потужності. Якщо приймач насичений, його відгук на зміни вхідної оптичної потужності не змінюється. Насичення не тільки спотворює форму сигналу, але й знижує швидкодію приймача та обмежує його динамічний діапазон. Графік (рис.2.9) пояснює явище насичення за високих рівней потужності і обмеження динамічного діапазону (ДД) ФП. Можна використовувати ФД при більш високих потужностях, тобто збільшити динамічний діапазон приймального пристрою. Для цього треба зменшити опір навантаження. Наприклад, зменшення номіналу опору навантаження до 10 кОм в схемі на рисунку 2.8а (тобто в 100 разів) збільшило б в стільки ж разів значення максимального фотоструму до $U_{3M}/R_H = 20/10^4 = 2$ мА. Лінійна залежність між фотонапругою і оптичною потужністю (між фотострумом і оптичною потужністю для великих значень фотонапруги), зберігається протягом більш ніж 6-ти декад зміни оптичної потужності для більшості р-і-п

ФД (якщо потужність не обмежується навантаженням R_n великого номіналу).

Швидкодія p-i-n ФД. Швидкодія p-i-n ФД обмежена часом прольоту вільних НЗ через збіднений носіями шар. У p-i-n ФД довжина збідненої області практично дорівнює ширині шару власної провідності (*i*-шару). Швидкість вільних НЗ пропорційна величині напруги зворотнього зміщення, тому більш висока напруга зменшує час прольоту. Наприклад, при ширині збідненої області 50мкм і типовій швидкості руху носіїв $5 \cdot 10^4$ м/с час прольоту становить $50 \cdot 10^{-6} / 5 \cdot 10^4 = 1$ нс. Це значення приблизно можна вважати часом наростання ФД. Ємність ФД також обмежує швидкість відгуку. Це можна пояснити за допомогою еквівалентної схеми ФД (рис.2.10).

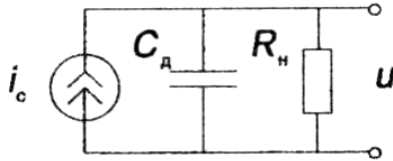


Рисунок 2.10 – Еквівалентна схема p-i-n ФД

У цій схемі ємність конденсатора C_d дорівнює в основному ємності переходу, утвореного НП *p*- і *n* -шарами (що є обкладинками), розділеними ізолювальною *i*-областю з власною провідністю. У цю ємність також входить ємність корпусу, в якому змонтований ФД. Аналіз схеми показує, що час наростання $R_n C_d$ кола за рівнями 0...63 % (так звана стала часу) і час наростання за рівнями 10...90% пов'язані співвідношенням:

$$t_n = 2,19 R_n C_d \quad (2.4)$$

ФД, що розроблені для швидкодіючих систем передачі, мають ємності близько 1пФ або менше. Щоб забезпечити низьку ємність C_d , площа світлочутливої поверхні ФД має бути малою. Проте, для ефективної передачі світла, діаметр цієї площадки не може бути меншим, ніж діаметр серцевини оптичного волокна (ОВ), що

приєднується до ФД. Залежно від обставин, швидкодія ФД обмежується або часом прольоту, або часом наростання схеми. Зазвичай наростання обмежується меншим за нього часом прольоту. Він звичайно лежить в інтервалі 0,1...10 нс для швидкодіючих $p-i-n$ ФД. Пізніше були виготовлені ФД з часом наростання меншим 100 пс.

Лавинний ФД (ЛФД). Головною відмінністю лавинного ФД від $p-i-n$ ФД є внутрішнє підсилення сигналу, що базується на лавинному електронному помноженні. На відміну від структури $p-i-n$ ФД у ЛФД додається r -шар, як показано на рисунку 2.11. Підсилення збільшує значення струмового відгуку порівняно з $p-n$ або $p-i-n$ приладами. Наявність підсилення у ЛФД робить його схожим на вакуумний фотоелектронний підсилювач (ФЕП), проте коефіцієнт лавинного підсилення є набагато меншим, ніж у ФЕП. Він обмежений значеннями в кілька сотень разів, або і менше. Проте, наявність внутрішнього підсилення робить ЛФД значно чутливішим приймачем, ніж $p-i-n$ ФД. Внутрішнє підсилення забезпечує набагато більше відношення сигнал/шум на виході приймального пристрою, ніж зовнішнє підсилення.

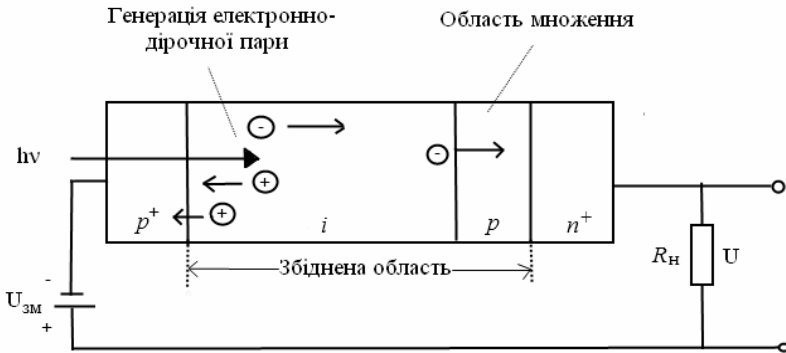


Рисунок 2.11 – Переріз НП структури і принцип дії ЛФД з проникненням поля

Лавинне множення відбувається в такий спосіб. Поглинений в збідненій області фотон створює вільну електронно-діркову пару (ЕДП). Профіль розподілу легуючих домішок вибирається так, щоб найбільший опір, а отже і найбільшу напруженість електричного поля

(рис.2.12) мав p – шар. При впливі світла на i -шар утворюються електронно-діркові пари. Завдяки невеликому за напруженістю електричному полю відбувається спрямований рух носіїв до відповідних полюсів. Після попадання вільних електронів з i -шару в p – шар їхнє прискорення стає більше відчутним через високе електричне поле в p - шарі. Прискорюючись у зоні провідності p – шару, такі електрони накопичують енергію, якої вже достатньо для вибивання інших електронів з ВЗ у ЗП. Коли заряди, що швидко рухаються, зіштовхуються з нейтральними атомами, вони створюють додаткові електронно-діркові пари (ЕДП), тобто частина їх кінетичної енергії використовується, щоб передати зв'язаним (з атомами) електронам енергію, якої достатньо для подолання забороненої зони. Один прискорений заряд може створити декілька вторинних. Вторинні заряди також можуть прискорюватися і створювати ще більшу кількість ЕДП- явище називається лавинним множенням НЗ.

Електричне поле, що прискорює носії, має бути сильним, щоб надати зарядам значну кінетичну енергію. Це забезпечується за допомогою великої напруги зворотнього зміщення (кілька сотень Вольт для деяких приладів).

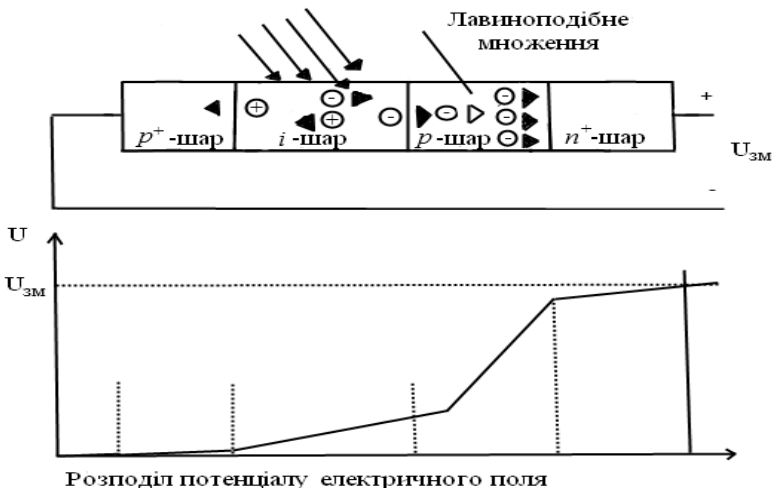


Рисунок 2.12 – Структура включення і розподіл потенціалу електричного поля ЛФД

Коефіцієнт множення (підсилення) збільшується зі зростанням напруги зміщення на ЛФД u_d відповідно до апроксимуючого виразу Міллера:

$$M = \frac{N_{\text{втор}}}{N_{\text{пер}}} = \frac{1}{1 - (u_d / U_{\text{пр}})^n}, \quad (2.5)$$

де $N_{\text{втор}}$ та $N_{\text{пер}}$ – число вторинних та первинних носіїв заряду, відповідно, $U_{\text{пр}}$ – зворотня пробійна напруга діода; n – експериментальний параметр, значення якого більше одиниці. Значення $U_{\text{пр}} = 20 \dots 500$ В для різних матеріалів.

ЛФД звичайно є модифікаціями p - i - n ФД. Матеріали, які використовуються при виготовленні таких ФД, а також області їх спектральної чутливості є однаковими. Як і у ФД без множення, швидкість відгуку ЛФД обмежена часом прольоту НЗ і РС сталою часу. Час прольоту в ЛФД, що відповідає часу наростання, становить кілька десятих часток нс. Час наростання менший, ніж 100 пс досягнуто для кремнієвих і для германієвих ЛФД. Вони мають високу швидкодію, однак випадкова природа лавинного струму призводить до виникнення шуму. На відміну від корисного сигналу, що підсилюється пропорційно до M , шум підсилюється більше (приблизно як $2,1 M$). У результаті цього вибирається оптимальне значення коефіцієнта множення в межах від 30 до 100. Особливістю роботи ЛФД є більш висока напруга (кілька сотень Вольт) у порівнянні з p - i - n ФД.

ЛФД мають добру лінійність відносно оптичної потужності в інтервалі від часток нВт до кількох мкВт. Якщо потужність, що надходить на приймальний пристрій, може перевищувати 1 мкВт, то ЛФД звичайно не використовують. При такій потужності p - i - n ФД забезпечують потрібний відгук і достатньо велике відношення сигнал/шум у більшості випадків. Коефіцієнт підсилення ЛФД залежить від температури. Він зменшується при її підвищенні тому, що середня довжина вільного пробігу носіїв між зіткненнями знижується зі зростанням температури, в результаті багато носіїв заряду втрачають можливість досягнути високих швидкостей, які потрібні для створення вторинних НЗ. У ПП з ЛФД, що працює в широкому інтервалі температур, може знадобитися стабілізація

температури або компенсація зміни коефіцієнта лавинного підсилення за рахунок автоматичного регулювання напруги зворотного зміщення.

2.2 Технічні характеристики ФП

Фактори, що впливають на технічні характеристики ФП є складні та дуже взаємопов'язані між собою. На перший погляд може здатися, що досить вибрати тільки три параметри – чутливість, швидкодію, ціну. На практиці ці фактори часто виявляються залежними від інших параметрів: робочої довжини хвилі λ , типу ОВ і передавача, величини ТС, шумових характеристик, типу кодування сигналу, що передається, ін.. Нижче розглянуто головні з них: струмова чутливість; квантова ефективність; ТС; час наростання і спаду; еквівалентна потужність шуму; співвідношення сигнал/шум і чутливість аналогових систем; частота виникнення помилок і чутливість цифрових систем; максимально допустима зворотня напруга; робочий діапазон температур; термін служби та надійність.

Струмова чутливість (монохромна) S_{ph} (А/Вт) визначається як:

$$S_{ph} = I_{ph} / P(\lambda), \quad (2.6)$$

де I_{ph} – фотострум, $P(\lambda)$ – повна оптична потужність випромінювання, яка падає на фоточутливу площадку на довжині хвилі λ . Струмова чутливість характеризує ФП при низьких частотах модуляції.

Квантова ефективність η (безрозмірна величина) визначається як:

$$\eta = N_c / N_{ph}, \quad (2.7)$$

де N_{ph} – кількість фотонів, які падають за одиницю часу на ФП; N_c – кількість народжених в результаті цього вільних електронів (або електронно-діркових пар). Квантова ефективність p - i - n ФД не може бути більшою за одиницю (або у відсотках за 100%). Криві для η в залежності від довжини хвилі для різних матеріалів наведено на

рисунку 2.13. Між струмовою чутливістю і квантовою ефективністю існує простий зв'язок:

$$S_{ph} = \frac{e\lambda}{hc} \eta, \quad (2.8)$$

де e – заряд електрона ($1,60 \cdot 10^{-19}$ К), λ – довжина хвилі, h – постійна Планка, c – швидкість світла.

З підстановкою значень констант отримуємо:

$$S_{ph} = \frac{e\lambda}{1,24}, \quad (2.9)$$

Значення струмової чутливості для p - i - n ФД в їх робочих діапазонах складає 0,5 – 0,8 А/Вт, а для лавинних ФД: 20 – 60 А/Вт.

Характеристики η і S_{ph} використовують при створенні приймальних оптичних модулів (ПрОМ), коли необхідно узгодити наступний каскад електронних підсилювачів.

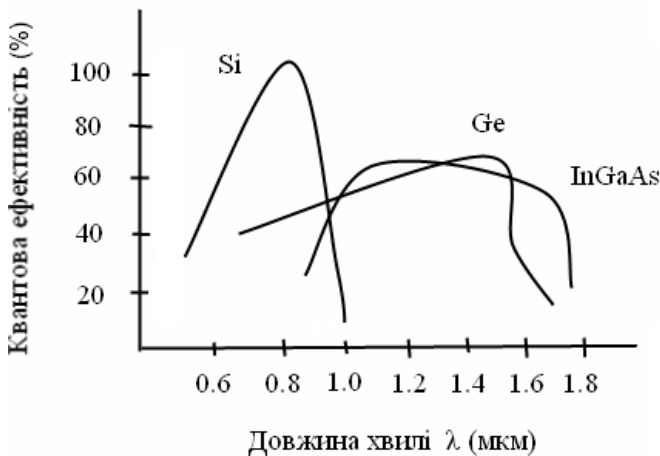


Рисунок 2.13 – Залежність квантової ефективності від довжини хвилі для різних матеріалів

Темновий струм (ТС) $I_d(A)$ протікає при зворотньому зміщенні через навантаження у відсутності падаючого на ФД випромінювання. Його величина залежить від матеріалу НП, температури навколишнього середовища, конструкції ФП. Максимальне значення цей струм має в ФД, які виготовлено із германію. Величина ТС може бути від долей до одиниць мА. Він додається до струму корисного сигналу, коли на ФД надходить світло.

Час наростання τ_n і спаду – це найважливіша динамічна характеристика ФП. Ці параметри залежать від геометрії ФД, матеріалу, напруженості електричного поля в слабологованій області, температури. Максимальна з двох величин, зазвичай τ_n , береться в якості характеристики часу відгуку ФП. Зі збільшенням частоти модуляції вхідних оптичних імпульсів максимальне значення фотоструму зменшується. Гранична частота смуги пропускання визначається як частота модуляції, при якій струмова чутливість складає 0,707 від значення струмової чутливості при низьких частотах модуляції. Якщо внутрішні затримки прямо не впливають на смугу пропускання або швидкість передачі, то час наростання і спаду головним чином визначають смугу пропускання. Різні ФП можуть дуже сильно відрізнятися за швидкодією. Найбільш швидкими є *p-i-n* ФД. У лавинних ФД збільшення коефіцієнта множення супроводжується зменшенням швидкодії у порівнянні з *p-i-n* ФД. Найбільш повільні фоторезистори (ФР) і фототранзистори (ФТр.).

Потужність еквівалентна шуму (ПЕШ) P_n (Вт) – це одна з найважливіших характеристик, що враховують шумові властивості ФП. Вона визначає мінімальну потужність оптичного сигналу на вході ФП, при якій відношення сигнал/шум дорівнює одиниці, та розраховується за формулою:

$$P_n = I_n / S_{ph}, \quad (2.10)$$

де I_n - повний шумовий струм.

Головна функція ФП – це якомога точніше відтворити оптичний сигнал, що отримується із ОВ. Два фундаментальних параметри

впливають на те, наскільки добре ФП справляється з цією задачею: амплітуда вхідного сигналу та рівень шумів.

Співвідношення сигнал/шум та чутливість аналогових систем. Для аналогових систем відношення сигнал/шум вимірюється кількісно. На практиці прийнятне відношення сигнал/шум залежить від застосування – для одних достатнім відношенням може бути величина 50...60 дБ, для інших до 30 дБ. Знаючи еквівалентну потужність шуму P_n і вимоги до відношення сигнал/шум, можна визначити мінімальний вхідний сигнал $P_{n \min}$ – чутливість аналогового ПрОМ, при якому внесені спотворення і шуми будуть в межах норми. Цей параметр наводиться виробниками для ФП при постачанні мережевого обладнання з цілком визначеною областю застосування. Якщо вхідний сигнал нижче чутливості приймача, то відношення сигнал/шум може бути недостатньо великим, щоб коректно виконувалося дане застосування. Прийнятою одиницею вимірювання чутливості ФП, як і потужності випромінювання у СД, є дБм (дБ відносно потужності в один міліВатт).

Максимально допустима зворотня напруга - це напруга, перевищення якої може призвести до пробою ФП і його руйнації. Нарівні з цим значенням виробники ФП можуть вказувати просто зворотню робочу напругу. Якщо вибрати менше значення робочої напруги, то буде обмежена область лінійної характеристики ФП.

Робочий діапазон температур. Існує дві характеристики, на які сильно впливає зміна робочої температури ФП. По-перше, це квантова ефективність, яка може поводити себе в загальному випадку досить складним чином зі зміною температури. По-друге, зростання температури призводить до експоненційного зростання термічно збуджених електронно-діркових пар, в результаті чого також експоненційно зростає ТС. Витік ТС подвоюється при підвищенні температури на кожні 8 – 10°C.

Термін служби та надійність також є важливими експлуатаційними параметрами ФП. Всім ФД притаманна деградація – поступове зменшення чутливості при тривалій експлуатації. Деградація зростає зі збільшенням струму навантаження, що протікає через ФД. Для використання в системах зв'язку термін служби повинен складати більш ніж: 10^5 годин (для наземних) та 10^6 (для підводних) ліній зв'язку.

2.3 Конструкції ФД

Корпуси ФД подібні до тих, що використовуються для світло- і лазерних діодів, але вимоги до них менш жорсткі. Світлочутлива площадка ФД часто перевищує діаметр серцевини ОВ, по якому надходить світло, так що допустимі деякі поперечні зміщення. ФД також мають велику числову апертуру (на відміну від ДВ). Вони приймають світло в широкому інтервалі кутів. Кутове зміщення і неузгодженість між значеннями числових апертур ОВ і приймача не є проблемою. ФД монтуються в корпус (патрон) різними способами. Основні з них:

- кристал ФД встановлюють у стандартний корпус транзистора, що аналогічний корпусу СД. У металевий ковпачок вбудовується прозоре скляне вікно або лінза. Остання фокусує світло на активну площадку приймача. Лінза може збирати світло з торця волокна, діаметр серцевини якого більший, ніж діаметр ФД. Це збільшує ефективність збору променів. У деяких випадках ковпачок усувають, щоб забезпечити доступ безпосередньо до ФД;
- у корпус ФД вмонтовують гнучкий одноволоконний кабель із з'єднувачем на протилежному кінці (або без нього);
- ФД розміщується всередині корпусу ПрОМ. При цьому можлива його інтеграція в єдину інтегральну схему або сполучення двох чіпів (ФД і попереднього підсилювача) при гібридному виконанні ПрОМ.

2.4 ФП у ВОСПІ, ВОЛЗ

У ВОСПІ, ВОЛЗ використовується два методи передачі і прийому:

- модуляція інтенсивності і безпосередній прийом;
- модуляція по амплітуді, частоті або фазі (АМ, ЧМ, ФМ і їх комбінації) та когерентне детектування.

Спрощені структурні схеми, що відповідають цим методам прийому, наведено на рисунку 2.14а,б. Метод модуляції інтенсивності і безпосередній прийом є основними при побудові сучасних ВОСПІ. Випромінювання ЛД або СД частоти ν_c модулюється по інтенсивності $P_c(\omega_c t)$ інформаційним сигналом із частотою ω_c , а на приймальній

стороні ФП генерує фотострум I_ϕ , що пропорційний миттєвому значенню прийнятої потужності $I_\phi \sim P_C(\omega_C t)$ (рис.2.14а). Тут ФП є енергетичним детектором. У майбутніх ВОСПІ, ВОЛЗ основним методом прийому стане когерентне детектування оптичного випромінювання з кутовими методами модуляції (ЧМ, ФМ і ін.) з їхніми відомими перевагами. Цей метод ілюструє рисунок 2.14б. Тут за допомогою напівпрозорого дзеркала на світлочутливій поверхні НП ФП поєднуються електричні поля сигналу E_C із частотою ω_C і місцевого генератора (гетеродина) E_T із частотою ω_T . Оскільки ФП є квадратичним детектором, а оптична потужність пропорційна квадрату модуля сумарного електричного поля, то народжуваний фотострум є пропорційним величині оптичної потужності P . Отже, при когерентному прийомі ФП діє як змішувач, що створює вихідний електричний сигнал на проміжній частоті (гетеродинування). Переваги когерентного прийому:

- модуляція може здійснюватися по одному з параметрів – амплітуді E_C , частоті ω_C або фазі φ_C одномодового несучого коливання;
- значення фотоструму на проміжній частоті може бути набагато більшим, ніж при прямому детектуванні за рахунок вибору потужності гетеродина $P_T \gg P_C$.



а) безпосередній прийом; б) когерентне детектування

Рисунок 2.14 – Методи прийому у ВОСПІ

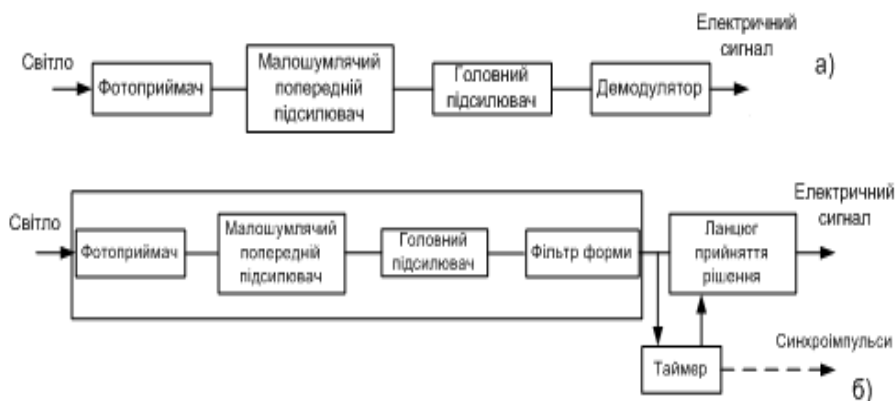
2.5 Приймальні оптоелектронні модулі (ПрОМ)

ПрОМ – це устрій, який поєднує в єдиній конструкції ФП, попередній електронний підсилювач, устрій вводу випромінювання і екранований корпус, який усуває зовнішні перешкоди. Основними функціональними елементами ПрОМ є:

- ФП, що перетворює оптичний сигнал в електричну форму;
- каскад електричних підсилювачів, що підсилюють сигнал і перетворюють його у форму, яка придатна до обробки;
- демодулятор, що відтворює первісну форму сигналу.

На рисунку 2.15 наведені функціональні елементи аналогового (а) і цифрового (б) ПрОМ.

Аналогові ПрОМ приймають аналоговий оптичний сигнал і на виході також формують аналоговий електричний сигнал. Аналогові приймачі мають забезпечити високу лінійність перетворення і підсилення сигналу при мінімумі внесених шумів, у протилежному випадку зростають спотворення сигналу. На протяжних лініях з великою кількістю приймально-передавальних вузлів спотворення і шуми накопичуються, що знижує ефективність аналогових багаторетрансляційних ліній зв'язку. При цифровій обробці не потрібна дуже точна ретрансляція імпульсів.



а) аналоговий; б) цифровий

Рисунок 2.15 – Функціональні елементи ПрОМ

Цифровий приймач повинен включати вузол прийняття рішення або розпізнавальний дискримінатор, що має встановлені пороги на прийняття сигналів 0 і 1, який усуває шуми і відновлює необхідну амплітуду сигналу. Вірне виділення корисного сигналу може відбуватися при великому рівні шумів підсилення.

Електронні елементи цифрового ПрОМ (рис.2.156). Вихідний електричний сигнал від ФП підсилюється каскадом електронних підсилювачів та, можливо, певним чином обробляється. Основні функції, які виконує ПрОМ на цьому етапі – підсилення, корекція, фільтрація, дискримінація, синронізація, забезпечення роботи таймера.

Електронне попереднє і подальше підсилення. Типове значення оптичного сигналу на вході ФП складає 1-10 мкВт, а іноді і менше. Якщо такий сигнал обробляється *p-i-n* ФД з струмовою чутливістю від 0,6 до 0,8 А/Вт, а вихідний струм складає декілька мкА, то необхідне подальше підсилення, яке може включати одну або декілька стадій. Підсилювач на першій стадії називається попереднім підсилювачем. Його особливістю є низький рівень внесених шумів. Далі йде підсилювач потужності.

Вирівнювання. Прийом і підсилення сигналу може трохи змінювати оброблюваний сигнал. Наприклад, каскад електронних підсилювачів, що приймає широкосмуговий аналоговий сигнал, може мати різний коефіцієнт підсилення для високих і низьких частот. Щоб відновити правильне співвідношення амплітуд у низьких і високих областях спектра частот додають ланцюг вирівнювання сигналу.

Фільтрація дозволяє збільшити відношення сигнал/шум за допомогою вибіркового (у певних діапазонах частот) придушення шуму. Часто, таким чином, можна придушити високочастотні складові шуму, свідомо знаючи, що корисний сигнал не поширюється в цій області спектра.

Дискримінація. Якщо попередні три задачі рівною мірою могли ставитися перед ПрОМ як при обробці аналогового сигналу, так і цифрового, то задача дискримінації ставиться тільки для обробки цифрових сигналів. Через наявність дисперсії при поширенні світла по ОВ фронти імпульсів можуть втратити первісну прямокутну форму. Для подолання наслідків призначений ланцюг прийняття рішення або дискримінатор, що має поріг спрацьовування. Якщо амплітуда поступаючого на дискримінатор сигналу менша за поріг, то

приймається рішення про те, що на виході сигналу немає (0), якщо ж він перевершує поріг, то приймається рішення, що на виході є сигнал певної амплітуди (1). Головним недоліком такої регенерації цифрового сигналу є можливість порушення тривалості імпульсів. Чим меншою є амплітуда поступаючого на дискримінатор сигналу, тим коротшими можуть бути імпульси, які відповідають одиничному сигналу на виході дискримінатора. Низьке значення порога також не бажане, оскільки виникає ймовірність помилкового прийняття шуму в якості корисного сигналу. Для збереження тривалості імпульсів на виході дискримінатора, необхідно, щоб дискримінатор одержував інформацію про частоту, з якою повинні надходити імпульси.

Робота таймера. Основна функція таймера – це придушення ресинхронізації сигналу. Стандартний цифровий сигнал генерується на характерній частоті, наприклад, $f = 10^{-6}$ Гц (1 раз у мікросекунду). При передачі і ретрансляції сигналу випадкові часові помилки можуть накопичуватися і досягти порядку тривалості самого імпульсу. В результаті приймач може інтерпретувати прийнятий помилковий біт як інформаційний або “втратити” біт. Такі випадкові часові помилки одержали назву джитер (jitter, тремтіння). Їхня поява характерна при синхронному режимі передачі. Зменшити джитер можна, якщо підвищити вимоги до стандарту частоти генератора імпульсів. Однак, якщо приймач має свій власний таймер, то при тривалому прийомі будуть проскакувати помилки внаслідок наявності джитера. Подальше зменшення помилок через джитер досягається в більш сучасній технології магістральних оптичних мереж, заснованих на так званій синхронній цифровій ієрархії SDH. В SDH при передачі в бітовому потоці поряд з корисною інформацією присутні спеціальні синхроімпульси, по яких настроюється (під частоту передавача) таймер приймача. У складній мережі SDH існує один незалежний провідний таймер (master clock), на який рівняються пристрої мережі.

Інтегральний приймальний модуль. Приймальний пристрій, який виконують у вигляді інтегральної схеми детектор-підсилювач (integrated detector preamplifier: IDP), звичайно містить $p-i-n$ ФД або ЛФД, передпідсилювач і один або кілька каскадів для додаткового підсилення і узгодження. Дуже важливо, що інтегральне виконання знижує можливість проникнення електричних перешкод, які можуть наводити струми на елементах вхідного каскаду неінтегральної конструкції. Шум, що вносить діод і вхідні каскади підсилювача, може

маскувати слабкий сигнал. Останній необхідно ретельно захищати від перешкод, оскільки він, поширюючись від джерела випромінювання, проходить через вхідний з'єднувач, кілька лінійних з'єднувачів і мережні розподільні пристрої, а також крізь волокно довжиною кілька кілометрів, перш ніж потрапити на чутливий ФД і малошумлячий попередній підсилювач. Типовий монолітний кремнієвий детектор-підсилювач IDP має Вольтовий відгук 30 мВ/мкВт і час наростання 35 нс. Такий час наростання відповідає ширині смуги пропускання (на рівні -3дБ) у 10МГц.

Гібридний приймальний модуль забезпечує ті ж самі функції, що і монолітний IDP. Ці модулі містять ФД і підсилювач, виготовлені окремо й потім з'єднані усередині загального корпусу. Типовий гібридний приймальний пристрій містить $p-i-n$ ФД або ЛФД, з'єднаний із підсилювачем на польовому транзисторі (кремнієвому або арсенід-галієвому із затвором Шоткі). Використовуються товстоплівкові схемні елементи і керамічні підкладки. Активні та пасивні компоненти розміщуються на двосторонній друкованій платі. Оптичний сигнал на ФД може надходити через з'єднувач або гнучкий ВОК, приєднаний до модуля.

Особливості цифрових ПрОМ. При цифровому прийомі сигналів досить, щоб приймач міг лише розрізнити сигнали "0" і "1", а точне відтворення форм їхніх імпульсів не обов'язково. Тому цифровий приймач, як блок регенерації, повинен містити вузол прийняття рішення (дискримінатор), що має встановлені пороги для розрізнення сигналів "0" і "1" і, що отже може розпізнавати, який сигнал прийшов "0" чи "1", вбирає шуми і відновлює необхідну амплітуду сигналу. Звичайно, у цифрових системах зв'язку, задовільне виділення сигналу може відбуватися при великому рівні шумів.

Розрізняють *синхронний* і *асинхронний* режими прийому-передачі цифрового сигналу. При *синхронному* режимі бітовий потік між приймачем і передавачем носить беззупинний характер. При *асинхронному* режимі дані передаються у виді організованих бітових послідовностей - пакетів. У проміжках між пакетами сигналів немає.

При *синхронному* режимі прийому - передачі таймер приймача виділяє в прихідній бітовій послідовності спеціальні сигнали - синхроімпульси, на підставі яких ФП регулярно підстроює свій ритм прийому для задовільної ідентифікації усіх бітів.

При *асинхронному* режимі прийому - передачі ФП має свій незалежний таймер. Приймаючи початкові біти пакета (преамбулу), таймер приймача набудовує вузол прийняття рішення так, щоб визначення приходячого біта виконувалося на його середині. Електричний сигнал, що видає вузол прийняття рішення, йде на частоті таймера.

Тому що всі таймери мають погрішність і вона різна в різних таймерів, то через неї в міру прийняття наступних бітів пакета, момент визначення приходячого біта може повільно зміщуватися в одну зі сторін, щодо середини приходячого біта. Для вірної ідентифікації всіх бітів пакета важливо, щоб зсув за час прийняття пакета не перевищував 0,5 тривалості біта. Це явище обмежує максимальну тривалість пакета. Причому чим менше погрішність таймерів, тим більш довжина пакета може використовуватися для передачі.

Частота появи помилок. У цифрових системах, коли інформація передається бітами, мірою якості прийнятого сигналу є імовірність некоректного прийому "0" і "1", що називається частотою появи помилок (BER). Вона визначається як відношення кількості неправильно прийнятих бітів до повного числа прийнятих бітів. У цифрових системах, застосовуваних для телекомунікацій, частота появи помилок не повинна перевищувати величину 10^{-9} . В обчислювальних мережах вимоги до BER більш високі і ця величина не повинна перевищувати 10^{-12} . Частота появи помилок залежить від швидкості передачі - чим менше швидкість передачі, тим менше BER.

Чутливість цифрового ПрОМ- це мінімальна потужність вхідного сигналу, при якій BER не виходить за рамки максимально припустимого значення, встановленого для даного додатка. Для нормальної роботи потужність вхідного оптичного сигналу повинна бути не менш чутливості ПРОМ. Чутливість цифрових ФП прийнято вимірювати в дБм, або мВт.

Насичення ПрОМ. При великих вхідних оптичних сигналах можуть з'явитися "хвости" фотоструму, що залишаються і тоді, коли на ФП вже не подається сигнал. В такому разі нульовий сигнал на вході, слідуючий безпосередньо за одиницею, може бути невірно впізнаний, що призводить до зростання помилок. Насиченням цифрового ПРОМ називається максимальна вхідна потужність, вище якої значення в BER починає перевершувати максимально припустиму величину для даного пристрою. Діапазон значень потужності ПрОМ від чутливості («знизу») до насичення («зверху») називається його

динамічним діапазоном (ДД).

2.6 Серійні ФП

Промисловістю освоєно широку номенклатуру НП *p-i-n* ФД, ЛФД для ВОСП. ФД розміщуються в герметичному металевому корпусі з дворядним розташуванням виводів. Разом з ФД у корпусі може бути розташовано попередній електронний широкосмуговий підсилювач, перший каскад якого виконано за трансімпендансною схемою на польовому транзисторі на арсенідгалієвій основі. У Росії ФПі для ВОСП виробляють підприємства «ТЕЛАЗ», ДП НДІ „Полюс” і деякі інші. Підприємство ДП НДІ «ПОЛЮС» випускає ПрОМ ФПМ-8М/ЛМ, ФПМ-34М/ЛМ, ФПМ-662М, і ФПМ-662ЛМ, ін.. Вони призначені для роботи в системах ВОЛЗ в діапазоні довжин хвиль від 1300 нм до 1600 нм. Модулі мають оптичний вхід у вигляді відрізка багатомодового або одномодового кабелю з оптичним конектором типу FC, ST, PC (вилка). У фотоприймальних модулях використовуються високочутливі ФД на основі германію або InGaAsP. ФД мають структуру *p-i-n*. Крім того, застосовуються також лавинні ФД. У таблиці 2.3 наведені технічні характеристики фотоприймальних модулів (усі перелічені ПрОМ мають робочий спектральний діапазон 700...1600 нм).

Примітка. У тій графі таблиці, де вказана напруга + 45В, слід мати на увазі ЛФД.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики фотоприймальних модулів

Тип модуля	Швидкість, Мбіт/с	Динамічний діапазон, дБ	Напруга живлення, В	Чутливість (сер.), дБм
ФПМ-8М/ЛМ	1-8	40	+5;-5/+5;-5;+45	-50/-64
ФПМ-34М/ЛМ	8-34	30	+5;-5/+5;-5;+45	-50/-60
ФПМ-155М/ЛМ	34-155	30	+5;-5/+5;-5;+45	-44/-54
ФПМ-622М	622	>20	+5;-5	-37
ФПМ-622ЛМ	622	>30	+5;-5;+45	-44

Приймальний модуль типу ERM 578FC/PC9916E1179 випускає фірма EPITAX. Модуль розраховано на швидкість прийому 10 Гбіт/с при чутливості у – 26 дБм. Як фотодетектор в модулі застосовано лавинний ФД (рис.2.16).

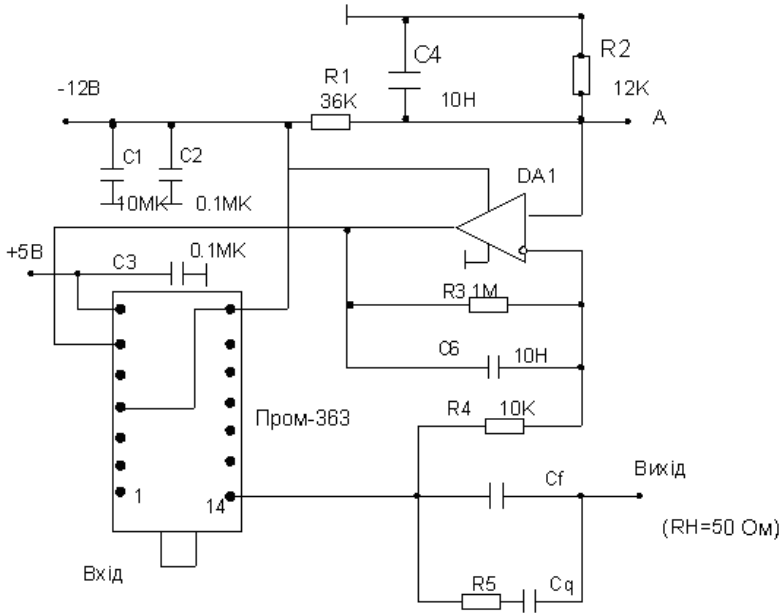


Рисунок 2.16 – Принципова електрична схема підключення приймального модуля ПРОМ –363

Швейцарська фірма OptoSpeed виробляє приймальний оптичний модуль типу PDMH40B, який розраховано на приймальну смугу частот до 40 ГГц. Робочий діапазон довжин хвиль цього модуля – від 800 до 1600 нм. Різні компанії, що спеціалізуються на розробці і виробництві оптоелектронних компонентів, розробили високошвидкісні фотодетектори для прийому оптичних цифрових сигналів з швидкістю до 47 – 50 Гбіт/с в діапазонах довжин хвиль S, C і L. Частотна характеристика цього ФД має спад- 3 дБ на частоті 47 ГГц, при цьому його чутливість дорівнює – 0,56 А/Вт.

2.7 Завдання до ПР

1. Провести розрахунок одного з ряду основних параметрів ВОСП: ДД «зверху» для існуючих типів ПрОМ (згідно таблиць 2.4 і 2.5) по варіантах таблиці 2.6.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики фотоприймальних модулів підприємства «ТЕЛАЗ»

Тип модуля	Швидкість прийому, Мбод	Шумова смуга, МГц	Чутливість		Динамічний діапазон, дБ	Коефіцієнт передачі, В/мВт
			Типова (сер.) дБм	Мінімальна, дБм		
ПРОМ-364	4	2,5	-54	-55	50	400
ПРОМ-364	16	11	-50	-51	45	200
ПРОМ-364	68	50	-43	-45	40	700
ПРОМ-364	160	110	-38	-40	36	35
ПРОМ-364	320	220	-33	-35	30	8
ПРОМ-363	565	350	-36	-37,5	25	0,8
ПРОМ-363	678	420	-35	-36,5	24	0,7
ПРОМ-363	1200	800	-31	-33	18	0,3

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики фотоприймальних модулів фірми LASERTRON

Тип модуля	Швидкість прийому Мбіт/с	Шумова смуга, МГц	Чутливість (сер., мін.), дБм	Динамічний діапазон, дБ	Темновий струм, А
QDFB-100	155	110	-39/-40	34	10^{-7}
QDFT-0,25	34	25	-46,5/-48	25	10^{-7}
QDAX-500	622	475	-40/-41	28	10^{-8}
QR48	2488	1700	-22/-23	22	$5 \cdot 10^{-9}$

Це означає, що необхідно переконатися, що рівень сигналу, отриманого в кінці ділянки ОВ, *не перевищує* максимально допустимий для ФП рівень сигналу. Ця величина обчислюється по формулі:

$$P_{i \text{ Вих.ОВ}} < P_{i \text{ ФП мин.}} + \text{ДД}, \quad (2.11)$$

де:

- $P_{i \text{ Вх.ФП}}$ - рівень прийнятого сигналу з виходу ОВ (дБм);
- $P_{i \text{ ФП мин.}}$ - чутливість (мінімальна і середня) ФП (дБм);
- $P_{i \text{ ФП сер.}}$ - чутливість (середня) ФП (дБм);
- ДД –динамічний діапазон (дБ).

Таблиця 2.6 – Вхідні дані для розрахунку

Параметри	Вхідні дані для розрахунку, що відповідають останній цифрі залікової книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{i \text{ Вих.ОВ, дБм}}$	-12	-14	-16	-18	-10	-13	-15	-17	-19	-11

2. Ознайомитись і засвоїти метод перетворення оптичного випромінювання в електричні сигнали на основі ФД, р-і-п ФД і ЛФД.

3. Підготувати бланк протоколу, де повинні бути назва роботи, мета, теоретична частина, структурна схема лабораторного макету, склад і призначення вузлів ПрОМ, а також основні характеристики ПрОМ та розрахунки за п.2.7.

4. Підготувати відповіді на контрольні запитання.

2.8 Контрольні питання

1. Які функції виконує ПрОМ, його призначення у схемі ВОЛЗ.

2. Перелічити функціональні вузли ПрОМ.

3. Накреслити функціональну схему ПрОМ та пояснити призначення його елементів.

4. Чому ПрОМ має окремі попередній і головний підсилювачі?

5. Яке призначення вузла вирівнювання?

6. Яке призначення вузла фільтрації?

7. Яке призначення вузла дискримінації?
8. Яка функція таймера?
9. Як працює таймер у режимі SDN?
10. Що таке чутливість ПрОМ?
11. Що таке частота з'явлення помилок?
12. Що таке насичення ПрОМ?
13. Що таке ДД і-го ПрОМ, його параметри «зверху» і «знизу»?
14. Які характеристики ПрОМ чутливі до зміни температур?
15. Як конструктивно виконується захист ПрОМ від шумів?
16. Навести типи і характеристики сучасних ПрОМ.

2.9 Порядок проведення ПР

У ході проведення ПР необхідно ознайомитись з теоретичною частиною основ роботи ПрОМ, його параметрами, їх особливостями і конструкцією усіх його елементів.

Намалювати зовнішній вигляд ПрОМ і позначити усі його вузли та особливості їх виконання, а саме:

- як конструктивно виконан ПрОМ;
- як виконані мікросбірки, чому їх дві;
- як підводиться випромінювання до ФП;
- як виконується захист електричної схеми від зовнішніх впливів;
- як виконується термостабілізація ПрОМ;
- які зовнішні електричні та оптичні ланцюги.

2.10 Зміст звіту

Оформлений звіт повинен містити:

- мету ПР;
- теоретичні відомості, технічні і експлуатаційні характеристики ФП;
- структурну схему ПрОМ, призначення основних вузлів;
- розрахунок ДД «зверху» згідно варіанту таблиці 2.6;
- висновки за результатами ПР.

2.11 Загальні рекомендації при проектуванні

Частину інформації, здобуту під час вивчення ОВ, ДВ, ФП, Пом, ПРОМ, ОТ підсумовано на рисунку 2.17.

Тип компонента		Довжина хвилі, мкм												
		0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5			
Джерело	СД	GaAs —												
	ЛД	AlGaAs — InGaAs — InGaAs												
Волокно	СОВ	3дБ/км Кварц <1дБ/км												
	ГОВ	10дБ/км Кварц/полімер												
	ОМ	500дБ/км Полімер/полімер												
Приймач	p-i-n	Кремній												
	ЛФД	Германій												
		InGaAs												

Рисунок 2.17 - Основні НП активні і пасивні компоненти ВОСПІ

На підставі цього рисунка проектувальник системи може вибрати попередньо придатні (узгоджені) компоненти ДВ і ФП, по деяких властивостях ВОСПІ: робочі довжини хвилі у видимому спектрі, у 1-3 вікнах прозорості; ДВ (СД або ЛД); матеріал ОВ (кварц/кварц, кварц/полімер або полімер/полімер); тип ОВ (східчасте, градієнтне або одномодове); ФП (p-i-n-типу або ЛФД), типи ПОМ і ПРОМ, ін.. Вибір цих обов'язкових компонентів, з використанням яких виконуться розробка ВОЛЗ, ВОСПІ (з урахуванням їх параметрів і типів, які наведені на рисунку 2.17), допоможе розробити узгоджену по деяким параметрам ДВ і ФП (довжина хвилі, вікно прозорості, частота перемикавання, загасання, ін.) систему передачі інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пролетарский А.В. Беспроводные сети Wi-Fi / А.В. Пролетарский, И.В. Баскаков, Д.Н. Чирков. – М.: Интернет-Университет Информационных технологий, 2007. – 178 с.
2. Джон Росс. Беспроводная компьютерная сеть Wi-Fi своими руками. Установка, настройка, использование.– СПб.: Наука и Техника, 2009. – 384 с.:
3. Колисниченко Д.Н. Беспроводная сеть дома и в офисе. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 480 с.: ил. – (Самоучитель) ISBN 978-5-9775-0427-0
4. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети / В. Столлингс. – М.: Издательство: Вильямс, 2005. – 640 с.
5. Вишневский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
6. Корнейчук В.И. Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП. Учебное пособие / В.И. Корнейчук. – Одесса: Видавничий центр УДАЗ ім О.С. Попова, 2000. – 232 с.
7. Коток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку / В.Б. Коток. – К.: Lucent Technologies, 1999 – 480 с.
8. Стерлинг Д.Д. Техническое руководство по волоконной оптике / Д.Д. Стерлинг. – М.: Лори, 1998. – 288 с.
9. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / В.І. Корнійчук, П.Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 363 с.