

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження характеристик вихідних сигналів оптико-електронних систем з
урахуванням процесів дефектоутворення в напівпровідниках
(тема)

Виконав:
студент 6 курсу, групи МНПм-21-1
Таран О.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Мікро- та наноелектронні
прилади і пристрої
(повна назва освітньої програми)

Керівник професор каф. МЕПП Стрілкова Т. О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

_____ (прізвище, ініціали)

2022

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
Кафедра Мікроелектроніки, електроних приладів та пристроїв
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
« ____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
студентові Тарану О.С.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи “Дослідження характеристик вихідних сигналів оптико-електронних систем з урахуванням процесів дефектоутворення в напівпровідниках”

затверджена наказом університету від 14. 11 2022 р. № 1473Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи

Рівень внутрішніх шумів фотоприймача – 50 мкА

Статистичні параметри внутрішніх шумів: спектральний діапазон реєстрації імпульсного випромінювання – від 1 мкм до 1,6 мкм; Спектральний діапазон прийому оптичних сигналів тривалістю 30 нс та подальшого формування ТТЛ-імпульсів – від 1,06 мкм до 1,65 мкм

Рівень відношення сигнал/шум – 5

Дефекти напівпровідників: контактні, поверхневі, приповерхневі, внутрішньо-об'ємні.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Визначення оптико-електронної системи, її параметри та характеристики. Описати процеси дефектоутворення в напівпровідниках та їх вплив на ОЕС. Розглянути фотоприймачі GaAs.

Описати структурні порушення підкладок GaAs. Змоделювати вплив дефектів на внутрішні шуми та виявляючу здатність фотоприймачів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Презентація – 14 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз технічного завдання	14.11.22	Виконано
	Аналітичний огляд	16.11.22	Виконано
	Оформлення теоретичної частини	17.11.22 – 20.11.22	Виконано
	Оформлення аналітичної частини	21.11.22 – 23.11.22	Виконано
	Оформлення пояснювальної записки	24.11.22 – 01.12.22	Виконано
	Підготовка презентації	03.12.22-05.12.22	Виконано
	Рецензування, нормоконтроль	09.12.22	Виконано

Дата видачі завдання 12.09.2022 р..

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. МЕПІ Стрілкова Т. О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 92 сторінок, 33 рисунків, 35 використаних джерел.

ОПТИКА, ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА, НАПІВПРОВІДНИК, ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ

Об'єкт дослідження: оптико-електронні системи.

Мета роботи: дослідження параметрів та характеристик ОЕС.

Метод дослідження – теоретичний аналіз.

Актуальність роботи визначається тим, що нині у техніці відбувається інтенсивне використання електромагнітних коливань оптичного діапазону довжин хвиль. Розробка оптико-електронних приладів (ОЕП) є одним з перспективних напрямків сучасного оптичного приладобудування. Вони дають можливість отримувати, передавати та обробляти інформацію у всіх галузях оптичного спектру в результаті перетворення оптичних сигналів на електричні, а також дозволяють автоматизувати управління різними об'єктами та технічними процесами. Швидкому розвитку ОЕП сприяє промислове освоєння лазерів, що дозволяють створювати лазерні ОЕП із якісно відмінними характеристиками. Застосування голографічних методів обробки даних є основою голографічних ОЕП, здійснюють багатоканальне перетворення великих масивів інформації.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 92 pages, 33 figures, 35 sources used.

OPTICS, OPTIC-ELECTRONIC SYSTEM, SEMICONDUCTOR, DEFECT FORMATION

Object of research: optical-electronic systems.

Purpose: study of parameters and characteristics of OES.

Research method: theoretical analysis.

The relevance of the work is determined by the fact that today in technology there is an intensive use of electromagnetic oscillations in the optical range of wavelengths. The development of optical-electronic devices (OED) is one of the promising areas of modern optical device construction. They make it possible to receive, transmit and process information in all branches of the optical spectrum as a result of the conversion of optical signals into electrical ones, and also allow to automate the management of various objects and technical processes. The rapid development of OED is facilitated by the industrial development of lasers, which make it possible to create laser OED with qualitatively different characteristics. The use of holographic data processing methods is the basis of holographic OEDs, which perform multi-channel transformation of large arrays of information.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ	12
1.1 Визначення ОЕС.....	12
1.2 Узагальнена схема ОЕС.....	13
1.3 Методи роботи ОЕС.....	14
1.4 Класифікація ОЕС	16
2 ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЙМАЧІВ	17
2.1 Приймачі випромінення оптичного діапазону (фотоприймачі).....	17
2.2 Параметри фотоприймачів	17
2.3 Чутливість фотоприймачів.....	18
2.4 Шуми фотоприймачів	23
2.5 Порогова чутливість	30
2.6 Питома виявна здатність	31
2.7 Постійна часу.....	31
2.8 Внутрішній опір фотоприймача	32
2.9 Характеристики фотоприймачів.....	34
2.10 Виявляюча здатність сучасних приймачів ІЧ-випромінювання	40
3 ПІДКЛАДКИ GaAs ТА ФОТОПРИЙМАЧІ НА ЇХ ОСНОВІ	41
3.1 Підкладка арсеніду галію	41
3.2 Отримання монокристалів арсеніду-галію спрямованою кристалізацією (метод Бріджмена).....	42
3.3 Отримання монокристалу арсенід галію за методом зонної плавки ...	43
3.4 Отримання монокристалу арсеніду галію за методом Чохральського	45
3.5 Багатоелементні фотоприймачі УФ-діапазону	46
3.6 Фоторезистивні приймачі ІЧ-випромінювання	50
4 СТРУКТУРНІ ПОРУШЕННЯ ПІДКЛАДОК GAAS ТА МЕТОДИ ЇХ КОНТРОЛЮ	53
4.1 Чинники, що впливають на структурні порушення та відхилення від площинності підкладок GaAs	53

4.2	Методи та апаратура контролю відхилення від площинності у підкладках GaAs	59
4.3	Методи та апаратура контролю щільності дислокацій у підкладках GaAs	64
4.4	Загальні відомості про оптичний контроль матеріалів	68
4.5	Візуально-оптичні методи контролю	70
4.6	Фотометричні методи контролю	73
4.7	Контроль телевізійними методами	74
4.8	Інтерференційні методи контролю	76
4.9	Голографічні методи	76
4.10	Пристрій та принцип роботи вимірювального мікроскопа	78
4.11	Методики голографічного контролю	82
4.12	Дослідження дислокацій	84
4.13	Вимірювання щільності дислокацій в пластинах арсеніду галію	86
5	МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНІХ ШУМІВ ПРИ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯХ В ФОТОПРИЙМАЧАХ	89
5.1	Електронні флуктуації в напівпровідниках	89
5.2	Вплив типу та локалізації дефектів в напівпровідниках на їх характеристики	90
5.3	Контактні дефекти	91
5.4	Поверхневі дефекти	91
5.5	Приповерхневі дефекти	92
5.6	Внутрішньо-об'ємні дефекти	93
5.7	Моделювання процесу реєстрації оптичного сигналу	93
	ВИСНОВКИ	96
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	98
	ДОДАТОК А	Ошибка! Закладка не определена.
	ДОДАТОК Б	Ошибка! Закладка не определена.
	ДОДАТОК В	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІЧ – інфрачервоний;

ОПЗ – область просторового заряду;

ОЕП – оптико-електронний прилад;

ОЕС – оптико-електронна система;

УФ – ультрафіолетовий.

ВСТУП

Оптико-електронними системами називають системи та пристрої, до складу яких входять два типи вузлів, а саме оптичні та електронні, при чому вони слугують для виконання основних задач даного приладу (системи).

Принцип роботи ОЕС полягає в перетворенні енергії випромінювання оптичного діапазону спектру (довжина хвилі від 1 нм до 1 мм) в електричну.

Виділяють наступні ділянки випромінювання:

- ділянка УФ випромінювання (від 0,001 мкм до 0,38 мкм);
- ділянка видимого випромінювання (від 0,38 мкм до 0,78 мкм);
- ділянка ІЧ випромінювання (0,78 мкм до 1 мкм).

Широке практичне використання ОЕС стало можливим тільки починаючи з 30-40х років ХХ століття, коли були досягнуті перші вагомні результати в технологіях створення оптичних матеріалів для різних діапазонів спектру і, насамперед, у розробці приймачів випромінювання, що мають високу чутливість у тих же областях довжин хвиль .

Вивчення властивостей оптичного випромінювання ведуться дуже давно. Ще у XVIII столітті В.І. Ньютон описав досліди з розкладання білого світла на квазімонохроматичні складові. Одна з перших теорій, що пояснюють з фізичних позицій оптичні явища, що спостерігаються, була розроблена Декартом (XVII століття) і потім Ньютоном і ґрунтувалася на уявленні світла як сукупності корпускул-дрібних частинок ефіру, що поширюються вздовж певних траєкторій – світлових променів. У цей період з'явилися перші роботи Гюйгенса, у яких було зроблено спробу інтерпретації тих самих явищ з урахуванням понять світлової хвилі. Теорія Гюйгенса тривалий час поступалася за популярністю теорії Ньютона і завдяки дослідженням Юнга і Френеля межі XIX століття отримала блискуче підтвердження. До кінця XIX століття Максвелл надав хвилям Френеля електромагнітну інтерпретацію і

показав, що будь-яка світлова хвиля є електромагнітним обуренням. Теорія Максвелла була блискуче підтверджена дослідним шляхом Герцем.

Електромагнітна теорія, узагальнена як системи диференціальних рівнянь, стала вершиною класичного етапу розвитку оптики.

Другий етап тісно пов'язаний із перетвореннями, які оптика зазнала на початку ХХ століття. В 1905 році Ейнштейн на основі теорії Планка відродив корпускулярну теорію світла в новій формі. У 1916 році він же передбачив, що перехід електрона в атомі з верхнього енергетичного рівня E_v на нижній E_n і випромінювання, що супроводжує цей акт, можуть відбуватися не тільки мимоволі: під впливом зовнішнього електромагнітного поля збуджений атом може передчасно звільнитися від надлишку енергії шляхом випромінювання фотона, названо вимушеним, або індукованим. Вірогідність індукованого випромінювання різко зростає при збігу частоти електромагнітного поля з власною частотою випромінювання збудженого атома. Пролітаючий фотон як би струшує із збудженого атома подібний до себе фотон, не витрачаючи на це енергії і результуюча хвиля має амплітуду більшу, ніж падаюча. Особливістю індукованого випромінювання є те, що воно монохроматичне і когерентне.

Успішно підтверджена гіпотеза Планка про квантову природу випромінювання світла і гіпотеза Ейнштейна (1916 р.) у поєднанні з успіхами радіотехніки та потребами практики послужили базою для винаходу оптичних квантових генераторів і народження нової галузі науки, що інтенсивно розвивається – квантової електроніки.

На можливість використання індукованого випромінювання для спостереження негативного поглинання (тобто посилення) речовиною, вперше вказав 1940 року В.А.Фабрикант.

Інженерами різних країн було витрачено багато зусиль на створення генераторів максимально коротких хвиль. Довжина хвилі найбільш коротких хвиль, отриманих радіотехнічними засобами становить величину близько 1000 мкм. Спроби отримати ще коротші хвилі наштовхнулися на непереборні

труднощі виготовлення мініатюрних резонансних систем, розміри яких мають бути порядку довжини хвилі.

Вирішення останньої проблеми можливе на шляху використання як резонаторів безпосередньо атомів і молекул, що мають найрізноманітніші частоти коливання. Таким чином, така проблема стимулювала створення нового типу приладу – квантових генераторів випромінювання для створення когерентних електромагнітних коливань в оптичному діапазоні спектру.

Для позначення обговорюваного класу випромінювачів найбільше застосування знайшов термін "Лазер", сформоване з перших букв англійської фрази "світловий підсилювач за допомогою вимушеного випромінювання" за аналогією зі своїм попередником, названим "Мазер", який відноситься до перших НВЧ генераторів, розроблених проф. Колумбійського університету Е.Таунсом у 1954 році і використовував явище вимушеного випромінювання.

Початок основного технологічного прориву в оптичному приладобудуванні слід віднести до 1920-1930 рр., коли було створено низку штучних джерел УФ та ІЧ випромінювання. Пізніше з'явилися перші багатокаскадні фотопомножувачі, перші фоторезистори, чутливі до ІЧ-області спектра.

Успіхи та інтенсивність розробок у галузі оптоелектроніки (розділу науки і техніки, що досліджує процеси взаємодії оптичного випромінювання з речовиною для передачі, прийому, зберігання тощо) у цей та наступний періоди значною мірою були стимульовані розширенням військових застосувань ОЕС. Тут наприкінці ХХ століття чітко виявилася тенденція до комплексування в апаратурі одного і того ж призначення кількох каналів, що працюють як в оптичному, так і в радіодіапазоні, що надає часом вирішальне значення, наприклад, підвищення достовірності показань дистанційних систем спостереження або управління, в яких оператору чи автомату-дешифратору у кожному даному випадку пред'являється взаємодоповнюючий набір інформаційних ознак прийняття максимально правильного рішення.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

1.1 Визначення ОЕС

Властивості електромагнітного випромінювання широко використовуються в сучасній науці та техніці, особливо в безконтактних, дистанційних пристроях контролю, вимірювання, передачі та перетворення інформації, збору та передачі енергії та ін. Серед приладів, заснованих на використанні електромагнітного випромінювання, особливе місце займають ОЕП, яким властиві висока точність, швидкодія, можливість обробки багатовимірних сигналів та інші цінні для практики властивості.

Оптико-електронними називаються прилади, в яких інформація про досліджуваний або спостережуваний об'єкт переноситься оптичним випромінюванням (міститься в оптичному сигналі), а її первинна обробка супроводжується перетворенням енергії випромінювання в електричну енергію. До складу цих приладів входять як оптичні, так і електронні ланки, причому ті та інші виконують основні функції даного приладу, а не є допоміжними пристроями (наприклад, вузлами підсвічування відлікових шкал, пристроями термостабілізації тощо).

Структура багатьох сучасних ОЕП є досить складною. Вона включає велику кількість різних за своєю фізичною природою і принципом дії ланок — аналогових та цифрових перетворювачів електричних сигналів, мікропроцесорів, механічних та електромагнітних вузлів та ін. Тому ОЕП часто називають оптикоелектронними системами (ОЕС).

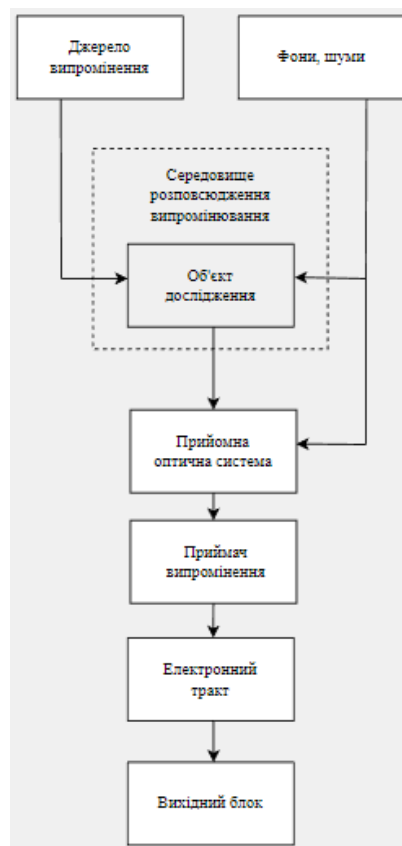
ОЕС працюють в оптичного діапазону спектру (довжина хвилі від 1 нм до 1 мм) в електричну.

Виділяють наступні ділянки випромінювання:

- ділянка УФ випромінювання (від 0,001 мкм до 0,38 мкм);
- ділянка видимого випромінювання (від 0,38 мкм до 0,78 мкм);
- ділянка ІЧ випромінювання (0,78 мкм до 1 мкм).

1.2 Узагальнена схема ОЕС

Дія ОЕС заснована на прийомі та перетворенні електромагнітного випромінювання в різних діапазонах оптичної області спектру, тобто в УФ, видимій та ІЧ частинах його. Одна з можливих узагальнених схем роботи ОЕС представлена на рис. 1.1. Джерело випромінювання природного чи штучного походження створює матеріальний носій корисної інформації – потік випромінювання.[2]



Рисинок 1.1 – Узагальнена схема роботи ОЕС

Цим джерелом може бути сам досліджуваний об'єкт. Часто джерело випромінювання доповнюється передавальною оптичною системою, яка спрямовує потік на досліджуваний об'єкт або у приймальну оптичну систему (якщо спостерігається саме джерело). Приймальна оптична система збирає потік, що випромінюється об'єктом, що спостерігається, або відображений від нього, формує цей потік і направляє його на приймач випромінювання. Приймач перетворює сигнал, що переноситься потоком випромінювання (оптичний сигнал), електричний.

Джерело випромінювання (з передавальною оптичною системою), приймальна оптична система, приймач випромінювання, а іноді і перші ланки наступного за приймачем електронного тракту утворюють систему первинної обробки інформації ОЕП. Призначенням її є отримання сигналу (інформації) від об'єкта, що спостерігається або досліджуваного у вигляді, зручному для подальшої обробки або використання.

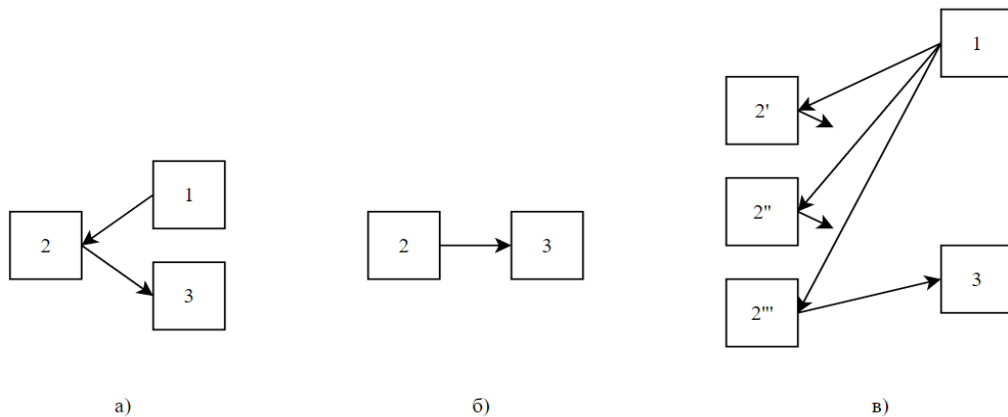
Вихідний блок формує сигнал, що за своїми параметрами задовольняє вимоги одержувача інформації.

Крім досліджуваного об'єкта ("корисний" випромінювач) на рис. 1.1. показані і можливі практично "шкідливі" випромінювачі (фони, перешкоди). Взаємне розташування ланок може бути дещо іншим. Іноді до складу ОЕС не входять деякі з перерахованих ланок. Це визначається, як правило, методом роботи приладу.

1.3 Методи роботи ОЕС

При активному методі роботи (рис. 1.2, а) об'єкт 2, що досліджується або спостерігається, опромінюється джерелом електромагнітних хвиль 1, параметрами і характеристиками якого може керувати оператор, який проводить дослідження і спостереження.

При цьому найкраще вдається узгодити параметри джерела 1 (передавальної системи), об'єкта 2, середовища поширення випромінювання та приймальної системи 3. Це дуже часто дозволяє вирішити задачу перешкодозахищеності ОЕС, наприклад, досить ефективно відокремити корисний сигнал від сигналу перешкоди.



а – активний, б – пасивний, в – напівактивний

Рисунок 1.2 – Методи роботи ОЕС

При реалізації активного методу необхідно мати спеціальне джерело, яке іноді буває дуже складним, громіздким та споживає більшу потужність.

При пасивному методі роботи (рис. 1.2, б) використовується власне випромінювання об'єкта 2, що спостерігається, яке приймає ОЕС. Для підвищення схибленості тут доводиться особливо ретельно стежити за оптимальним співвідношенням між параметрами ОЕС, об'єкта та середовища поширення випромінювання.

Іноді штучне або природне джерело 1 опромінює не одні, а ряд об'єктів 2', 2'', 2''' тощо (рис. 1.2, в)[1]. Як правило, ОЕС повинна виділити потік, відображений від одного з них, причому часто параметрами випромінювання, що опромінює об'єкти, керувати не можна (наприклад, у разі використання

природного освітлення). Такий метод роботи зазвичай називають напівактивним.

1.4 Класифікація ОЕС

За спектральним робочим діапазоном випромінювання розрізняють системи для роботи в ультрафіолетовій області спектра (УФ-прилади), видимої області, інфрачервоної області (і прилади).

За автоматичністю виділяють автоматичні ОЕС, у яких весь цикл обробки інформації проходить без участі людини-оператора, та неавтоматичні, де роль людини у вирішенні поставленого завдання найчастіше є визначальною. Наприклад, суттєві відмінності мають такі ОЕС, як повністю автоматичні системи самонаведення, та прилади, що використовують електронно-оптичні перетворювачі для визначення напрямку на випромінювач. Причому останні служать як би сполучною ланкою між оптичною системою, що працює в невидимій частині спектру, і людським оком, що здійснює впізнання та виділення випромінювача.

За призначенням ОЕС Можна підрозділити на кілька великих класів:

- інформаційно-вимірювальні;
- спостерігаючі;
- прилади та системи виявлення;
- прилади та системи для перетворення зображення.

Усередині цих класів виділяють пошукові системи, радіометри та спектрорадіометри, кутомірні (пеленгатори) та далекомірні (локатори) ОЕС, ОЕС зв'язку, контрольно-юстувальні ОЕС, системи технічного зору роботів, ОЕС для дослідження природних ресурсів та низку інших.

2 ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЙМАЧІВ

2.1 Приймачі випромінювання оптичного діапазону (фотоприймачі)

Приймачі випромінювання є фотоелектронними пристроями, що перетворюють падаючий потік випромінювання електричні сигнали. Це перетворення описується рядом характеристик і параметрів, що обумовлюються технічними умовами та державними стандартами.

2.2 Параметри фотоприймачів

Параметр – це величина, єдине значення якої характеризує певну властивість приймача. Параметр може бути вимірний безпосередньо або побічно визначений за даними вимірювань інших величин. Основними параметрами приймачів випромінювання є:

- чутливість або крутість перетворення S ;
- постійна часу (інерційність) t ;
- рівень шумів $U_{ш}$ чи $I_{ш}$;
- порогова чутливість $R_{пор}$;
- питома виявна здатність D^* ;
- динамічний діапазон лінійності D ;
- темновий опір R_t .

Для оцінки конструктивних особливостей приймачів служать такі параметри:

- ефективна фоточутлива площа S_{ef} ;
- робоча напруга живлення U_p ;
- максимально допустима напруга U_{max} ;
- максимальна потужність розсіювання P_{max} ;

- робоча температура чутливого шару приймача Тр.

2.3 Чутливість фотоприймачів

Під чутливістю або крутістю перетворення приймача випромінювання розуміють відношення зміни електричного сигналу на його виході до падаючого потоку. Оскільки на виході фотоприймача може змінюватися струм або напруга, розрізняють напругову (формула 2.1) та токову чутливість (формула 2.2).[6]

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} \left(\frac{B}{Bm} \text{ або } \frac{B}{лк} \right) \quad (2.1)$$

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} \left(\frac{A}{Bm} \text{ або } \frac{A}{лк} \right) \quad (2.2)$$

Також розрізняють спектральну та інтегральну чутливість. Абсолютна спектральна чутливість S_λ це реакція фотоприймача на монохроматичний потік випромінювання і зазвичай визначається формулою 2.3.

$$S_\lambda = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi_\lambda}, \quad (2.3)$$

де $\Delta \Phi_\lambda$ – зміна монохроматичного потоку.

У більшості приймачів випромінювання спектральна чутливість змінюється з довжиною хвилі і для якогось певного значення λ_{\max} досягає максимального значення $S\lambda_{\max}$. Це значення іноді наводять у паспорті на приймач випромінювання. Поняття спектральної чутливості просте й наочне, але визначення його абсолютного значення пов'язані з деякими труднощами.

Тому замість абсолютної зазвичай користуються відносною спектральною чутливістю S_λ , яка визначається формулою 2.4.

$$s_\lambda = \frac{S_\lambda}{S_{\lambda_{\max}}} \quad (2.4)$$

Відносна спектральна чутливість зазвичай наводиться у графічного вигляді у відносних одиницях, як показано на рис. 2.1. За такими залежностями можна приблизно судити наскільки повно приймач може бути узгоджений по спектру з детектованим випромінюванням.

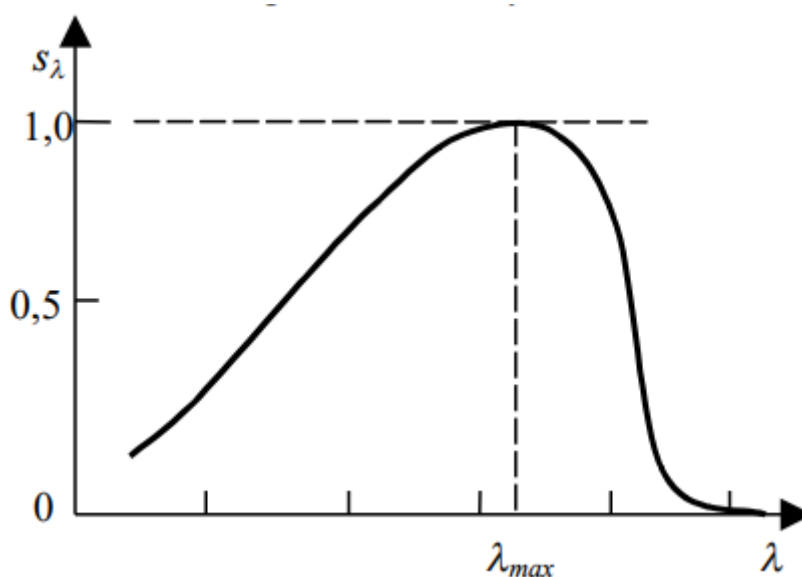


Рисунок 2.1 – Відносна спектральна чутливість у графічному вигляді

Інтегральна чутливість визначається для стандартних джерел випромінювання (наприклад, АЧТ за якоїсь стандартної температури) за формулою 2.5.

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} = \frac{\Delta U}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta \Phi(\lambda) d\lambda}, \quad (2.5)$$

де $[\lambda_1, \lambda_2]$ – діапазон спектральної чутливості приймача випромінювання,

$\Delta \Phi(\lambda)$ – збільшення спектральної щільності падаючого на приймач випромінювання від АЧТ.

Наведемо приклад визначення інтегральної чутливості інфрачервоного приймача. Для цього використовується модель АЧТ, вихідний отвір якого перекривається турельною діафрагмою з набором різних отворів діаметра (рис. 2.2).

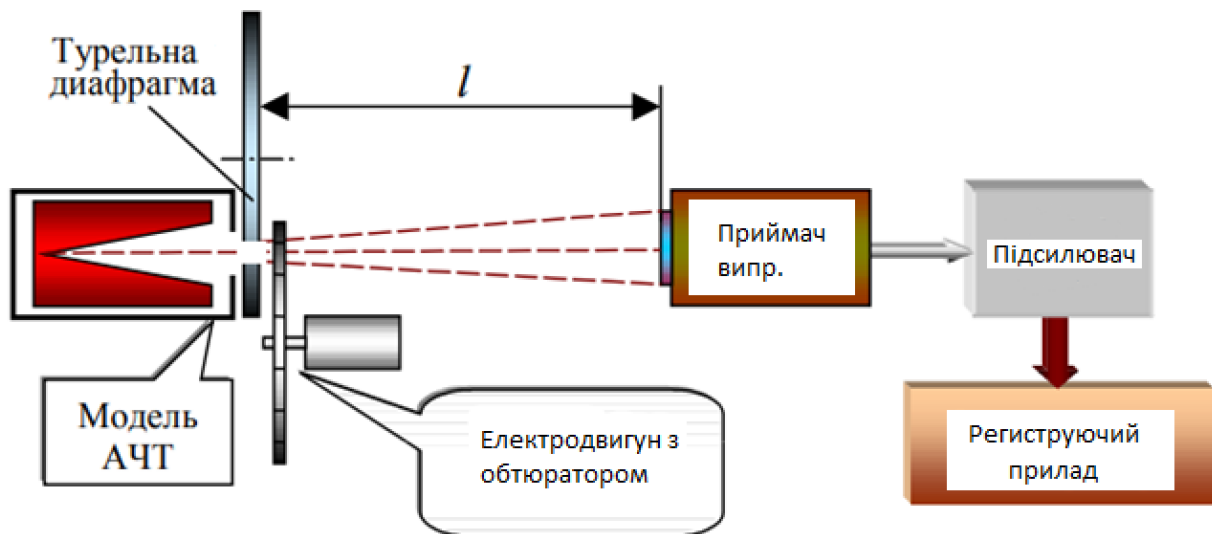


Рисунок 2.2 – Функціональна схема установки для визначення інтегральної чутливості ІЧ-приймача

Механічна модуляція потоку випромінювання моделі АЧТ здійснюється за допомогою дискового обтюратора, встановленого на валу електродвигуна.

Промодульований потік потрапляє на чутливу майданчик ІК-приймача, викликаючи на навантажувальному опорі змінне напруження з амплітудою U_c . Змінний сигнал зазвичай подають на вузькосмуговий підсилювач, на виході якого є амплітудний детектор. Амплітудне значення сигналу реєструють за допомогою вольтметра.

Для розрахунку величини потоку, що потрапляє на чутливий шар приймача випромінювання, необхідно взяти до уваги, що розміри приймача випромінювання та діафрагми моделі АЧТ зазвичай набагато менше, ніж відстань між ними l . Тоді можна скористатися відомою формулою для визначення потоку, що надходить на вхідний з'єднання оптичної системи від АЧТ з видимою площею $S_{ачт}$, розташованого на осі системи (формула 2.6).

$$\Phi_{np} = \int_{\varphi} \int_{\Theta} L_{\Theta} \sin \Theta \cos \Theta * S_{ачт} d\varphi d\Theta \quad (2.6)$$

де L_{Θ} – яскравість АЧТ у напрямку Θ .

Для круглого чутливого майданчика приймача межі інтегрування Θ беруться від 0 до U (U – апертурний кут системи), по φ – від 0 до 2π . Розмір апертурного кута приблизно визначається формулою (2.7).

$$\sin^2 U \approx \frac{D_{np}^2}{4l^2} \quad (2.7)$$

Оскільки АЧТ є ламбертовським випромінювачем $L_{\Theta} = L = const$, то: (2.8)

$$\Phi_{np} = \pi L S_{ачт} \sin^2 U = \frac{L S_{ачт} S_{np}}{l^2} = \frac{M S_{ачт} S_{np}}{\pi l^2} = \frac{\sigma T^4 S_{ачт} S_{np}}{\pi l^2} \quad (2.8)$$

де M – енергетична світність моделі АЧТ,

S_{np} – площа чутливого шару приймача.

Для неселективного приймача випромінювання останній вираз і визначатиме його інтегральну чутливість. Для селективного приймача сигнал, що викликається потоком, що падає на нього, може бути записаний формулою 2.9.

$$U_c = S\Phi_{np} = S \frac{S_{ачт} S_{np}}{\pi l^2} \int_0^{\infty} M_{\lambda T} S_{\lambda} d\lambda \quad (2.9)$$

Тоді його відносна інтегральна чутливість може бути визначена за формулою 2.10.

$$S_{отн} = \frac{\int_0^{\infty} M_{\lambda T} S_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{\lambda T} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} M_{\lambda T} S_{\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (2.10)$$

Очевидно, що інтегральна чутливість приймача випромінювання залежатиме від температури джерела, у разі моделі АЧТ. Для інфрачервоних приймачів температура АЧТ вибирається рівною 500 К, а фотоприймачів, які у видимої області спектра – 2870 К.

Зазначимо, що у виразі (2.5) визначення інтегральної чутливості входить різниця потоків. У прикладі $\Delta\Phi$ визначається різницею потоків від моделі АЧТ з температурою 500 К і від лопаті обтюратора. В принципі потік, що потрапляє на приймач при перекритті вихідного отвору АЧТ лопатею обтюратора, визначатиметься рівноважним випромінюванням навколишнього середовища, що має температуру T_{cp} . Але оскільки він не модулюється, то різницю потоків можна визначати за формулою 2.11 [7],

$$\Delta U_c = S \frac{S_{aum} S_{np}}{\pi l^2} \left(\int_0^{\infty} M_{\lambda}(T_{aum}) s_{\lambda} d\lambda - \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T_{cp}) s_{\lambda} d\lambda \right) \quad (2.11)$$

тобто вважати, що лопать обтюратора випромінює як АЧТ при навколишній температурі середовища. Останній вираз (2.12) використовується для визначення інтегральної чутливості приймача випромінювання.

$$S = \frac{\pi l^2}{S_{aum} S_{np}} \frac{\Delta U_c}{\left(\int_0^{\infty} M_{\lambda}(T_{aum}) s_{\lambda} d\lambda - \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T_{cp}) s_{\lambda} d\lambda \right)} \quad (2.12)$$

Зазначимо, що визначення інтегральної чутливості можна вести змінюючи діаметр вихідного отвору моделі АЧТ.

2.4 Шуми фотоприймачів

Крім корисного сигналу, на виході приймача завжди спостерігається хаотичний сигнал, з випадковими амплітудою та частотою - шум приймача випромінювання. Рівень шумів обмежує граничні можливості приймача під час реєстрації слабких сигналів. Джерела шуму можуть бути як внутрішніми, так і зовнішніми по відношенню до приймача та системи в цілому. Тому розробники ОЕС прагнуть звести їх до мінімуму. Оскільки шуми є випадковими процесами, їх описують такими числовими характеристиками, як математичне очікування, дисперсія, спектральна густина потужності та одномірна густина розподілу ймовірності. Механізми виникнення шумів досить різноманітні і будуть докладно розглядатися щодо кожного типу приймачів. Тут коротко розглянемо основні види шумів.

Теплові шуми викликаються хаотичним тепловим рухом вільних електронів провідного матеріалу приймача. В результаті такого руху число електронів, що переміщуються в одному напрямку, не дорівнює числу електронів, що рухаються в протилежному напрямку. В результаті, струм, що виникає в навантаженні, або напруга носить випадковий характер. Зауважимо, що тепловий шум властивий тільки провідникам і його середньоквадратичне відхилення визначається формулою Найквіста (2.13).

$$\sigma_U = \sqrt{u_{uu}^2} = \sqrt{4kTR_T\Delta f} \quad \text{або} \quad \sigma_I = \sqrt{I_{uu}^2} = \sqrt{\frac{4kTR_T\Delta f}{R_T}} \quad (2.13)$$

де k - постійна Больцмана, що дорівнює $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж · градус⁻¹;

T - температура чутливого шару приймача k ;

Δf - смуга частот, в якій вимірюється середньоквадратичне відхилення.

Генераційно-рекомбінаційний шум обумовлений флуктуаціями швидкостей теплової генерації та рекомбінації вільних носіїв заряду у напівпровіднику, тобто флуктуаціями середньої концентрації носіїв струму. При цьому опір зразка флуктує у часі, що викликає флуктуацію напруги на навантаженні фотоприймача. Залежно від властивостей напівпровідника, можливі різні аналітичні вирази для генераційно-рекомбінаційного шуму.

Для напівпровідників з домішковою провідністю джерелом електронів або дірок є єдиний домішковий рівень. Тому флуктуації числа вільних носіїв пов'язані з флуктуаціями швидкості їхньої генерації та рекомбінації на цьому рівні. Для криогенно охолоджуваних фотоприймачів кількість термічно іонізованих домішкових центрів дуже мало і дисперсія напруги холостого ходу для генераційно-рекомбінаційного шуму зразка з опором R визначається формулою 2.14.

$$\overline{u_{u-ep}^2} = \overline{i_{u-ep}^2} R = (2IR)^2 \frac{\tau \Delta f}{N_0 (1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (2.14)$$

де τ – час життя вільних носіїв;

N_0 – повна кількість вільних носіїв;

I – струм усунення.

Для напівпровідників з провідністю, близькою до власної, домішкові центри за робочих температур можна вважати повністю іонізованими, оскільки

рівні домішок розташовані поблизу відповідних зон. За рахунок теплової енергії кристалічні грати утворюються електронно-діркові пари. Як правило, через наявність домішок р- та n-типу концентрації електронів і дірок не рівні між собою. У цьому випадку генераційно-рекомбінаційний шум описується формулою 2.15.

$$\overline{u_{u-ep}^2} = \overline{i_{u-ep}^2} R = (2IR)^2 \left(\frac{b+1}{bN+P} \right)^2 \frac{NP}{N+P} \frac{\tau \Delta f}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (2.15)$$

де b - відношення рухливостей електронів та дірок;

N - повне число електронів;

P - повне число дірок у зразку.

Якщо електронів суттєво більше, ніж дірок, а їх рухливість перевищує рухливість дірок (що зазвичай і спостерігається), то останнє вираз дещо спрощується (2.16).

$$\overline{u_{u-ep}^2} = \left(\frac{2IR}{N} \right)^2 \frac{\tau \Delta f}{(1 + \omega^2 \tau^2)}. \quad (2.16)$$

Наступним видом шуму, який переважно спостерігається в діодах, є дробовий шум. Струм, що протікає через напівпровідниковий діод можна описати формулою 2.17.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right], \quad (2.17)$$

де I_0 – струм насичення при зворотному зміщенні;

V – прикладена напруга;

e – заряд електрону.

Оскільки електричний струм є потоком дискретних частинок та залежить від їхнього числа, яке флукутує у часі. Протікаючи по навантажувальному опору цей флукуючий струм створює напругу, дисперсія якої розраховується за формулою 2.18.

$$\overline{u_{ш-зр}^2} = 2e(I + 2I_0)R_n^2 \Delta f. \quad (2.18)$$

При нульовому зміщенні нахил вольт-амперної характеристики діода:

$$R = \frac{kT}{eI_0}, \quad (2.19)$$

струм I при цьому дорівнює нулю і вираз для дробового шуму набуває вигляду, як за формулою 2.20.

$$\overline{u_{ш-зр}^2} = 4eI_0 R_n^2 \Delta f = 4 \frac{kT}{R} R_n^2 \Delta f. \quad (2.20)$$

При $R_n = R$ останній вираз повністю збігається з виразом для теплового шуму. При досить великому зворотному зміщенні $I = -I_0$ і вираз для дробового шуму розраховується за формулою 2.21.

$$\overline{u_{ш-др}^2} = 2eI_0R_n^2\Delta f \quad (2.21)$$

Останні вирази найчастіше використовуються для опису дробового шуму.

Шум типу $1/f$ проявляється у детекторах випромінювання на низьких частотах.

Зазвичай поява цих шумів пов'язують із наявністю потенційних бар'єрів на контактах, обсягом чи поверхні напівпровідника. Для монокристалічних напівпровідників з омичними контактами ці шуми в основному пов'язані з процесами поверхні. У фотоемісійних приладах ці шуми спостерігаються у вигляді шумів мерехтіння, пов'язаних з термоіонною емісією, з емісією в сильному електричному полі або витоками від анода до катода. На практиці часто застосовують вираз 2.22 для описи низькочастотного шуму.

$$\overline{u_{ш-нч}^2} = K_{нч}I^2R^2\frac{\Delta f}{f}, \quad (2.22)$$

де $K_{нч}$ - чисельна стала, значення якої визначається для кожного типу приймача, наприклад, для фоторезистора типу PbS $K_{нч}$ дорівнює від 10^{-11} до 10^{-12} .

Радіаційний шум є зовнішнім по відношенню до приймача та визначається флуктуаціями сигналу, тобто. флуктуаціями числа фотонів, що потрапляють на чутливий шар як від зовнішніх випромінювачів (мета, передавач, фон), так і від елементів конструкції, що не охолоджуються,

оптико-електронної системи. Крім того, в теплових приймачах з'являються флуктуації температури через непостійність процесу теплообміну між чутливим майданчиком та навколишнім середовищем. Останні часто називають тепловими флуктуаціями.

Флуктуації потужності випромінювання, що надходить від фону - чорного тіла з температурою T_ϕ , на приймач з площею S_{np} описуються виразом 2.23.

$$\overline{\Delta\Phi_\phi^2} = 8\varepsilon_n k T_\phi^5 \sigma S_{np} \Delta f, \quad (2.23)$$

де ε_n – коефіцієнт поглинання чутливого шару приймача.

Оскільки приймач є, своєю чергою, випромінювачем з температурою T_{nu} , то флуктуації потоку, що "відходить" від нього, можна записати формулою 2.24.

$$\overline{\Delta\Phi_{nu}^2} = 8\varepsilon_n k T_{nu}^5 \sigma S_{np} \Delta f. \quad (2.24)$$

Сумарні флуктуації, що визначають дисперсію радіаційного шуму, рівні формулі 2.25.

$$\overline{\Delta\Phi_p^2} = 8\varepsilon_n k (T_\phi^5 + T_{nu}^5) \sigma S_{np} \Delta f. \quad (2.25)$$

Спектр цього шуму є рівномірним (білим).

Радіаційний шум визначається параметрами джерела випромінювання, фону та умов роботи приймача випромінювання. Практично він визначає граничне мінімальне значення шумів криогенно охолоджуваних приймачів.

Тому часто за ідеальний приймач приймають той, у якого всі шуми незначні, порівняно з радіаційним.

У різних типах фотоприймачів може переважати той чи інший тип шуму. Наприклад, у термоелементів переважають теплові шуми, у напівпровідникових болометрів – теплові та струмові, у фоторезисторів – струмові та радіаційні. При наявності декількох шумових механізмів їхнє загальне середньоквадратичне значення може бути обчислено підсумовуванням їх дисперсій. При використанні фотоприймачів важливо знати спектральну густину потужності сумарних шумів, приклад якої наведено на рис. 2.3.

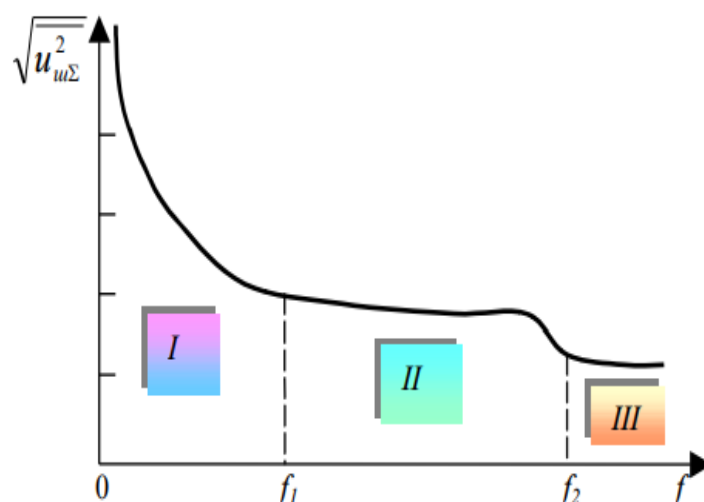


Рисунок 2.3 – Зразковий вид спектральної густини потужності сумарних шумів типового фотоприймача

Виділяють три області спектра шумів. На низьких частотах до f_1 (приблизно 1 кГц) переважними є шуми, що підкоряються залежності $1/f$ (область I). У сфері середніх частот II переважають генераційно-рекомбінаційні шуми. На більших частотах (більше десятків кілогерців) найбільший внесок вносять теплові шуми.

Знаючи спектральну щільність потужності шумів, можна вибрати таку частоту модуляції потоку випромінювання та смугу робочих частот системи реєстрації сигналу, у яких значення власних шумів приймача випромінювання буде мінімальним.

2.5 Порогова чутливість

Мінімальний потік, що викликає на виході приймача сигнал, що дорівнює середньоквадратичному значенню шумів приймача, називається порогом чутливості (див. формулу 2.26).

$$\Phi_n = \frac{\sigma_U}{S_U} = \frac{\sqrt{u_{ш}^2}}{S_U} [\text{Вт}] \text{ або } \Phi_n = \frac{\sigma_I}{S_I} = \frac{\sqrt{u_{ш}^2}}{S_I} [\text{Вт}]. \quad (2.26)$$

Поріг чутливості та чутливість приймача взаємопов'язані. При цьому первинним параметром, що записується в паспорт приймача, є чутливість (S_U або S_I), яка визначається експериментально.

Оскільки шум залежить від смуги частот та площі фотоприймача, то для порівняння параметрів різних фотоприймачів вводиться поняття питомої порогової чутливості (див. формулу 2.27),

$$\Phi_{n-уд} = \frac{\Phi_n}{S_{np} \sqrt{\Delta f}} [\text{Вт} / (\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2})]. \quad (2.27)$$

яка зазвичай визначається для площі приймача 1 см^2 та смуги частот 1 Гц . Часто ці два поняття не розрізняють і під пороговою чутливістю розуміють питому граничну чутливість.

2.6 Питома виявна здатність

Оскільки порогові потоки дуже малі, виявилось зручним для порівняння різних приймачів між собою користуватися величиною, зворотної питомої граничної чутливості. Її називають питомою виявною (детектуючою *detectiviti*) здатністю(див. формулу 2.28)

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{n-yd}} = \frac{S_{np} \sqrt{\Delta f}}{\Phi_n} = \frac{S_U}{\sqrt{u_{ш}^2}} S_{np} \sqrt{\Delta f} \quad [см \cdot Гц^{1/2} \cdot Вт^{-1}]. \quad (2.28)$$

і застосовують для оцінки здатності приймача з площею 1 см² до виявлення одиничного потоку 1 Вт у смузі частот 1 Гц.

2.7 Постійна часу

Інерційність фотоприймачів характеризується постійними фронтами наростання τ_n і спаду τ_{cn} фотовідповіді при імпульсному засвіченні. Ними визначаються граничні робочі частоти модуляції випромінювання, у яких ще відбувається помітного зменшення фотопотоку. Як правило, $\tau_n < \tau_{cn}$. Проміжок часу від початку опромінення до моменту, коли вихідна величина досягає 63% встановленого значення при тривалому опроміненні називається постійним фронтом наростання τ_n .

Постійна часу спаду τ_{cn} визначається як інтервал часу після припинення впливу випромінювання, після якого спадає по експоненті фотосигнал зменшується в e разів (спадає до 37%). Якщо використовується синусоїдальна модуляція світлового потоку, то швидкодія приймача характеризується граничною частотою f_{cp} , якої амплітуда його сигналу зменшується рівня 0,707

(на 3 дБ) щодо стаціонарного значення, а потужність падає удвічі, тобто зменшується на 3 дБ за потужністю. Для "ідеального" інерційного приймача залежність амплітуди вихідного сигналу від частоти модуляції розраховується за формулою 2.29.

$$u_{вих(\omega)} = \frac{u_{вих(0)}}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}, \quad (2.29)$$

де $u_{вих(0)}$ - амплітуда сигналу фотоприймача на "нульовій" частоті;

t – постійна фронту наростання.

З останнього вираз добре видно, що для цього випадку стала часу визначається з умови $2\pi f_{zp}\tau = 1$.

2.8 Внутрішній опір фотоприймача

Цей параметр особливо важливий при виборі або розрахунку ланцюга увімкнення фотоприймача. Знаючи його можна вибрати оптимальне опір навантаження приймача випромінювання. Для різних приймачів прийнято використовувати різні параметри, з допомогою яких можна оцінити опір чутливого елемента. Наприклад, для фоторезисторів як параметр розглядається темновий опір R_T - опір приймача у разі відсутності його засвічення. Для фотодіодів зазвичай наводять значення диференціального опору R_D , яке дорівнює відношенню малого збільшення напруги сигналу до відповідного збільшення струму при заданих середній величині і змінах опроміненості фотоприймача. Розрізняють також світловий опір, що вимірюється через певний проміжок часу після того, як на чутливому шарі встановилася задана освітленість.

Від величини внутрішнього опору приймача залежить постійна часу фотоприймача та рівень його шумів. Темновий опір більшості напівпровідникових приймачів нестабільний за часом і сильно змінюється в залежність від навколишніх умов. Наприклад на рис. 2.4. показана залежність темнового опору сірчано-свинцевих фоторезисторів від температури чутливого шару.

Видно, що при охолодження шару від кімнатної температури (293 До) до температури твердого вуглекислого газу (195 К) внутрішній опір змінюється майже в шість разів, а при охолодженні до температури рідкого азоту (77 К) збільшується у 100 разів. Необхідно мати на увазі, що при цьому змінюється і крутість перетворення приймача.

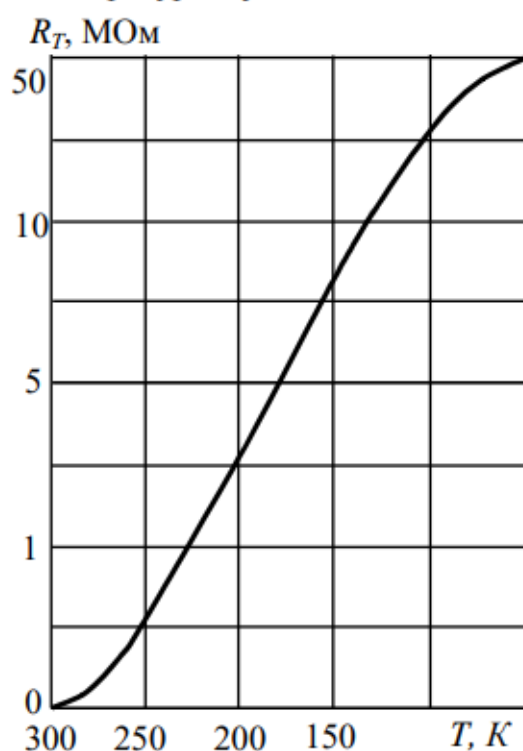
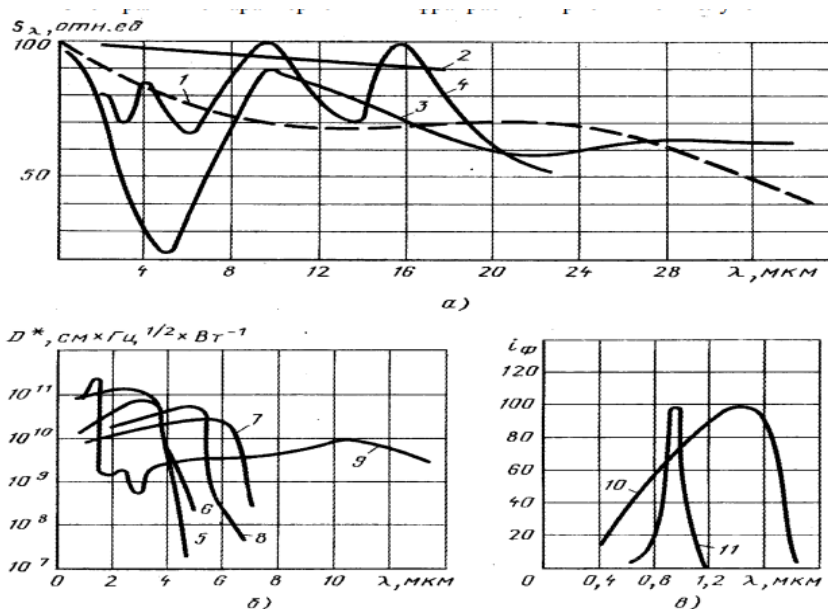


Рисунок 2.4 – Залежність R_T фоторезистора PbS від температури чутливого шару

Для фоторезисторів деяких типів використовується кратність зміни опору – відношення темнового опору до опору при освітленості 200 лк та температурі

2.9 Характеристики фотоприймачів

Зміни параметрів приймача (чутливості, виявної здатності тощо), що спостерігаються для різних довжин хвиль прийнятого монохроматичного випромінювання називають спектральними характеристиками.



а) – теплових приймачів: 1 – термоелемента; 2 – металевого болометра із золотим чернем; 3 - напівпровідникового болометра з вікном KRS 5; 4 - імерсійного болометра з германієвою лінзою; б) - фоторезисторів при охолодженні до 78 К: 5 - сірчистосвинцевого; 6 - телуросвинцевого; 7 – селеністосвинцевого; 8 - сурм'яно-індієвого; 9 - германієвого; в) - фотодіодів та фототранзисторів: 10 - германієвого; 11 – кремнієвого

Рисунок 2.5 – Спектральні характеристики інфрачервоних приймачів

випромінювання

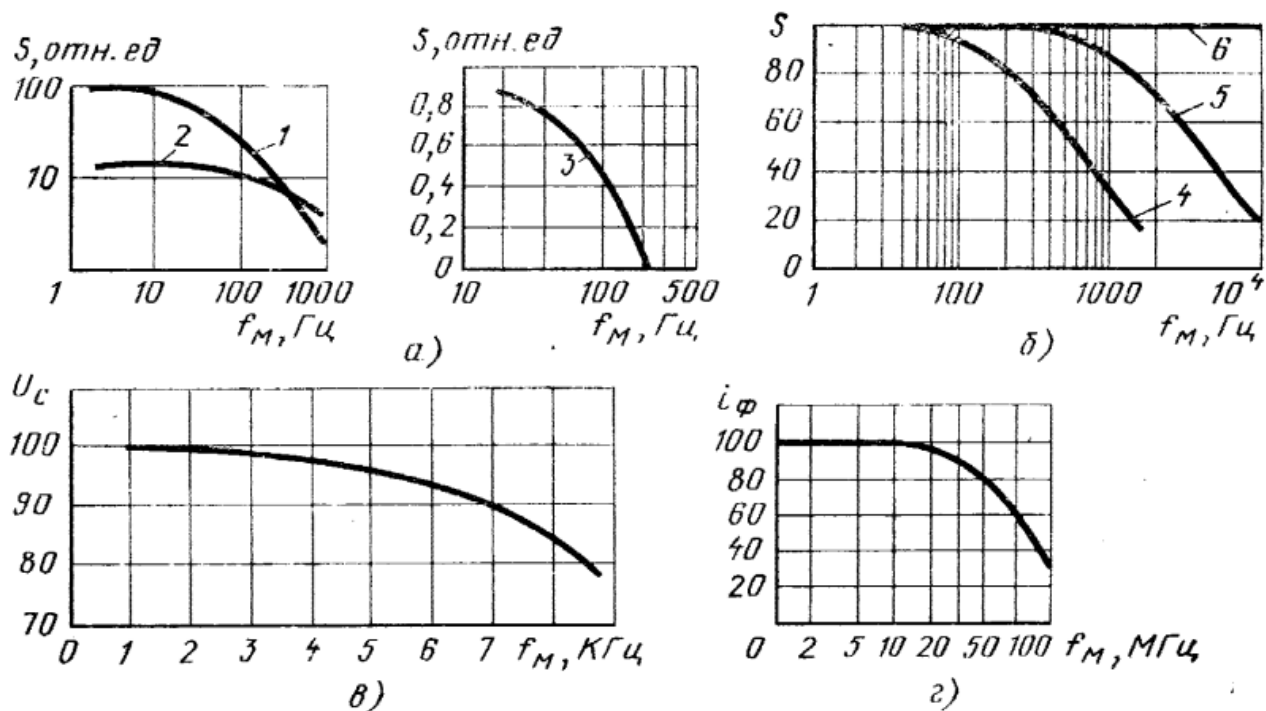
На рис. 2.5 показані спектральні характеристики сучасних приймачів ІК випромінювання. З представлених залежностей видно, що червонохвильова межа чутливості фоторезисторів, що охолоджуються до 78 К, досягає 6...7 мкм у селеністосвинцевих фоторезисторів і 10...15 мкм - у германієвих приймачів. Фотодіоди та фототранзистори працюють без охолодження, і межа їхньої чутливості знаходиться в межах 1,0...1,8 мкм. Найбільш довгохвильову межу чутливості мають теплові приймачі – термоелементи та болометри.

Частотні характеристики визначають залежність крутості перетворення приймача від частоти модуляції випромінювання. Оскільки від частоти залежать і шумові параметри приймачів випромінювання, то частотних характеристик відносять і спектральну щільність потужності шуму приймача, і навіть частотну залежність питомої виявної здатності $D^*(f)$.

На рис. 2.6. представлені типові частотні характеристики деяких приймачів випромінювання. З наведених залежностей видно, що найбільш інерційними є теплові приймачі випромінювання. Фоторезистори мають на порядок найкращі частотні характеристики.

Сучасні фотодіоди мають досить велику швидкодію, наприклад, р-і-п діоди для оптоволоконних систем зв'язку можуть працювати на частотах більше 1 ГГц. Найбільш чутливі приймачі – фотоелектронні помножувачі забезпечують прийом аж до частот модуляції 100...200 МГц.

Енергетична (світлова) характеристика виражає залежність сигналу на виході приймача від величини падаючого потоку. Селективні приймачі випромінювання при збільшенні потоку, що падає на них, поведуться подібно до ока - їх чутливість зменшується. Зазвичай при великій освітленості крутість перетворення приймача падає, що проявляється в вигляді нелінійної її залежності від потоку, що приймається. Тому чутливість приймача повинна визначатися при заданій освітленості приймального майданчика та заданому спектральному складі.



а) теплових приймачів: 1 – металевого болометра з тиском гелію в балоні 13,3 Па; 2 - те ж із тиском 10130 Па; 3 – напівпровідникового болометра; б) сірчисто-свинцевого та сурм'яно-індієвого фоторезисторів: 4 - охолоджуваних до 195 К; 5 - неохолоджуваних; 6 - сурм'яно-індієвих охолоджуваних до 78 К; в) германієвого фотодіода; г) фотоелектронного помножувача.

Рисунок 2.6 – Частотні характеристики приймачів

Вольтові характеристики описують залежність вихідного сигналу приймача, його шумів та порогової чутливості від величини напруги живлення. На рис. 2.7. наведено залежності зміни середньоквадратичного значення шумів (крива 1), амплітуди сигналу (2) та відношення сигнал/шум (3) від напруги живлення для фоторезистора GaAs. Добре видно, що існує оптимальна величина напруги живлення, при якій відношення сигнал/шум має максимальне значення.

Зменшення або збільшення напруги на чутливому шарі щодо оптимального знижує відношення сигнал/шум. Подібні характеристики

знімають і для інших типів приймачів, що дозволяє вибрати оптимальні значення напруги живлення.

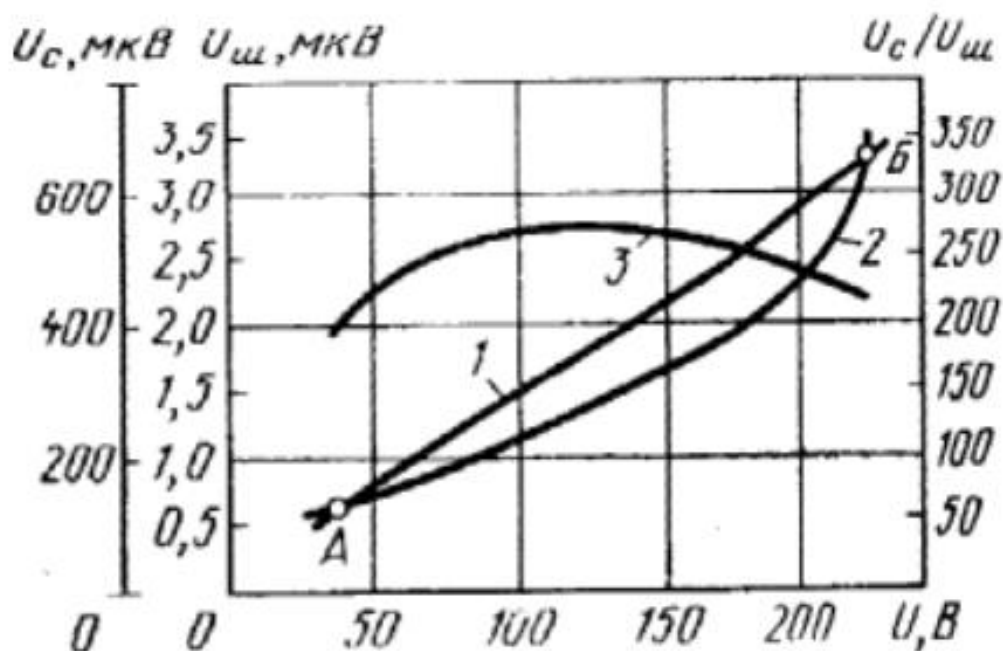
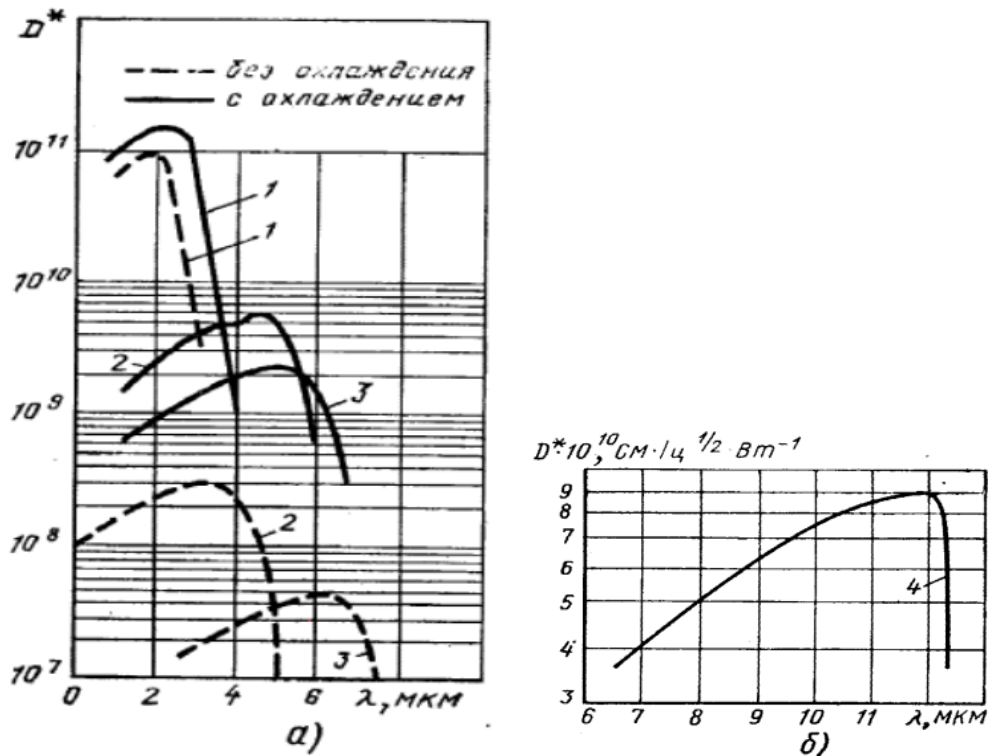


Рисунок 2.7 – Вольтові характеристики GaAs фоторезистора

Температурна характеристика показує зміни параметрів приймача в залежності від температури чутливого шару. Зазвичай внутрішній опір фоторезисторів зростає за зниження температури (див. рис. 2.9). Охолодження наводить також до покращення порогової чутливості приймача випромінювання, що пов'язано з зменшенням теплових та надлишкових шумів. Вплив температури на параметри приймачів випромінювання наведено на рис. 2.9, 2.10.



.1 - сірчисто-свинцевий фоторезистор; 2 - селеністосвинцевий фоторезистор;
 3 - фотоматгітоелектричний приймач з сурм'янистий індія; 4 - фоторезистор
 на основі CdHgTe.

Рисунок 2.8 – Зміна питомої виявної здатності D^* при охолодженні деяких типів приймачів випромінювання до температури 78 К

При охолодженні приймачів від кімнатної температури до температури рідкого азоту виявна здатність фоторезистора PbSe підвищується в десятки разів, а довгохвильового InSb - майже в 100 разів.

Ще більший ефект від охолодження у приймачів на потрійних сполуках CdHgTe (див. криву 2 на рис. 2.9). При охолодженні на 30 градусів величина D^* збільшується до 104 разів. Підвищення температури негативно позначається на параметрах приймачів

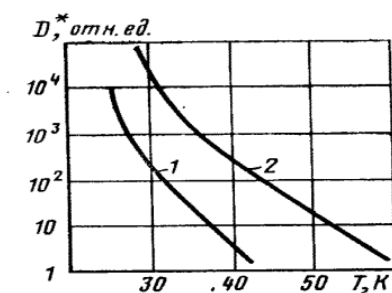


Рисунок 2.9 – Залежність D^* від температури шару фоторезисторів Ge:Hg(1) та CdHgTe(2)

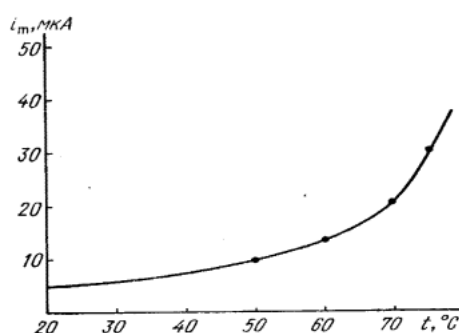


Рисунок 2.10 – Залежність темного струму кремнієвого фотодіода ФД-24К від температури шару

наприклад, як показано на рис. 4.10 підвищення температури кремнієвого фотодіода з 20°C до 75°C призводить до п'ятикратного зростання темного струму.

До просторових характеристики зазвичай відносять зонну характеристику - розподіл чутливості по майданчику приймача, кутову характеристику чутливості - її залежність від кута падіння променів на фотоприймач, а для координатних приймачів - координатну характеристику, що визначає залежність сигналу на виході приймача від координати зображення (світлової плями) на чутливому шарі.

3 ПІДКЛАДКИ GaAs ТА ФОТОПРИЙМАЧІ НА ЇХ ОСНОВІ

3.1 Підкладка арсеніду галію

Арсенід галія (GaAs) – хімічна сполука галію і миш'яку. Важливий напівпровідник, третій за масштабами використання у промисловості після кремнію та германію. Використовується для створення надвисокочастотних інтегральних схем та транзисторів, світлодіодів, лазерних діодів, діодів Ганна, тунельних діодів, фотоприймачів та детекторів ядерних випромінювань.

Деякі електронні властивості GaAs перевершують властивості кремнію. Арсенід галію має більш високу рухливість електронів, яка дозволяє приладам працювати на частотах до 250 ГГц.

За фізичними характеристиками GaAs — тендітніший і менш теплопровідний матеріал, ніж кремній. Підкладки з арсеніду галію набагато складніше для виготовлення і приблизно вп'ятеро дорожчі, ніж кремнієві, що обмежує застосування цього матеріалу.

Напівпровідникові прилади на основі GaAs генерують менше шуму ніж кремнієві прилади на тій же частоті. Через більш високу напруженість електричного поля пробою в GaAs в порівнянні з Si прилади з арсеніду галію можуть працювати при більшій потужності. Ці властивості роблять GaAs широко застосовуваним у напівпровідникових лазерах, деяких радарних системах. Напівпровідникові прилади на основі арсеніду галію мають більш високу радіаційну стійкість, ніж кремнієві, що зумовлює їх використання в умовах радіаційного випромінювання (наприклад, сонячних батареях, що працюють у космосі).

GaAs – прямозонний напівпровідник, що також є його перевагою. GaAs може бути використаний у приладах оптоелектроніки: світлодіодах, напівпровідникових лазерах.

Складні шаруваті структури арсеніду галію в комбінації з арсенідом алюмінію (AlAs) або потрійними розчинами $Al_xGa_{1-x}As$ (гетероструктури) можна виростити за допомогою молекулярно-променевої епітаксії (МЛЕ) або МОС-гідридної епітаксії. Через практично ідеальне узгодження постійних ґрат шари мають малі механічні напруги і можуть вирощуватися довільної товщини.

Для синтезу арсеніду галію використовуються спрямована кристалізація (метод Бріджмена), зонна плавка та метод Чохральського.

3.2 Отримання монокристалів арсеніду-галію спрямованою кристалізацією (метод Бріджмена)

За методом Бріджмена галій промивають у теплій розведеній соляній кислоті для видалення з поверхні окисного шару, потім у деіонізованій воді і поміщають разом з миш'яком у стехіометричному співвідношенні в кварцовий човен. Крім цього додають деякий надлишок миш'яку, необхідний для створення надлишкового тиску. Потім човник з вихідними компонентами поміщають в реакційну ампулу, запаяну з одного кінця. Інший кінець ампули приєднують до вакуумної системи, а ампулу поміщають у піч, що нагрівається під час відкачування до 250°C . При цьому видаляється триокис миш'яку, після чого ампулу запаяють і поміщають у відкриту з обох кінців керамічну трубку, що переміщується з регульованою швидкістю через систему печей, що складається з трьох окремих нагрівачів. У печі підтримується температура 605°C , що визначає пружність пари миш'яку в ампулі. Рідкий арсенід галію утворюється в печі, де максимальна температура дорівнює 1250°C . Потім розплав кристалізується спрямовано з одного кінця шляхом переміщення

ампули зі швидкістю 1-2см/год через відповідний градієнт температур, створений між печами 1 і 2. У середині зони 1 температура становить 1150°C, що створює градієнт температури 5° на 1см. Точність підтримання температур у зонах $\pm 2,0^\circ\text{C}$. Коли кристалізація арсеніду галію закінчена, весь злиток знаходиться при 1200 ° C, після чого повільно охолоджується до кімнатної температури.

Спрямована кристалізація дозволяє отримати чистий та однорідний матеріал. Однак при цьому висуваються жорсткі вимоги до матеріалу човника, в якому вирощується злиток. Найбільше застосування знайшли човники з кварцу, окису алюмінію, нітриду бору. Ступінь компенсації монокристалів GaAs значно падає під час проведення наступної термообробки при 800°C протягом 484 годин. Внаслідок проведення термообробки зникають рівні з енергією активації від 0,01 до 0,2 еВ.

Кращі монокристали арсеніду галію, вирощені спрямованою кристалізацією, мають концентрацію електронів $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і рухливість 8000 $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{сек})$ при 300°К. Спрямованою кристалізацією також отримані напівізолюючі кристали арсеніду галію.

3.3 Отримання монокристалу арсенід галію за методом зонної плавки

Зонна плавка – метод очищення твердих речовин, заснований на різній розчинності домішок у твердій та рідкій фазах. Метод є різновидом спрямованої кристалізації, від якої відрізняється тим, що у кожен час розплавленої є деяка невелика частина зразка. Така розплавлена зона пересувається на зразок, що призводить до перерозподілу домішок. Якщо домішка краще розчиняється в рідкій фазі, вона поступово накопичується в розплавленій зоні, рухаючись разом з нею. В результаті домішка накопичується в одній частині вихідного зразка. У порівнянні з спрямованою кристалізацією цей метод має більшу ефективність.

Зонна плавка проводиться для додаткового очищення та отримання монокристалу. Вона здійснюється в запаяній ампулі або під шаром флюсу, наприклад, V_2O_3 .

Завантаження, що складається із затравного кристала певної орієнтації, полікристалічного арсеніду галію і найбільшої кількості металевого миш'яку, поміщають у човник. Зазвичай кварцові човники попередньо обробляють, покриваючи вуглецем і потім випалюючи при $1300^\circ C$ протягом 2 годин.

Човен із завантаженням поміщають у кварцову ампулу, яку запаюють під вакуумом. Нагрівання системи здійснюється за допомогою трьох печей: печі для розплавлення арсеніду галію і двох печей для управління температурними градієнтами: температура однієї $800^\circ C$, а інший $600^\circ C$. Швидкість проходження зони змінюється не більше від 0,5 до 5 см/ч.

Флюс V_2O_3 плавиться при температурі $450^\circ C$ кипить, при температурі понад $1500^\circ C$; у розплавленому стані він є в'язкою рідиною, яка, повністю покриваючи поверхню розплаву, пригнічує процес випаровування миш'яку. Щодо забруднення розплаву домішками, що містяться в окисі бору, конкретних даних немає. До недоліків окису бору слід віднести гігроскопічність та здатність взаємодіяти з кварцом.

При зонному плавленні арсеніду галію при досягненні концентрації носіїв заряду 10^{16}см^{-3} подальше очищення цим методом не дає ефекту.

Безтигельна зонна плавка не має особливих переваг, порівняно з іншими методами. Труднощі, пов'язані з герметизацією зливка GaAs в кварцовій ампулі та неминучістю його випаровування, роблять процес безтигельної зонної плавки мало придатним для практичного використання. Злиток арсеніду галію, отриманий методом бестигельної зонної плавки, після кількох проходів має високий питомий опір (порядку $M\Omega \cdot \text{см}$) в початковій і низький питомий опір у частині кристала. Рухливість носіїв в арсеніді галію з низьким питомим опором $5500 \text{ см}^2/(\text{в} \cdot \text{сек})$.

Передбачається, що високий опір в арсеніді галію в обох методах зонної плавки утворюється в результаті присутності домішки з енергетичним рівнем, близьким до центру забороненої зони, що діє як пастка.

3.4 Отримання монокристалу арсеніду галію за методом Чохральського

Метод Чохральського – метод вирощування кристалів шляхом витягування їх вгору від вільної поверхні великого обсягу розплаву з ініціацією початку кристалізації шляхом приведення затравального кристала (або кількох кристалів) заданої структури та кристалографічної орієнтації в контакт із вільною поверхнею розплаву.

Використовуються два варіанти витягування кристалів за методом Чохральського: у запаяній ампулі, де створюється необхідний тиск парів миш'яку, та під шаром флюсу, наприклад, В2О3.

У першому варіанті основною технологічною складністю є запобігання попаданню кремнію з кварцового тигля до розплаву. Для запобігання цьому застосовують тиглі з нітриду алюмінію, завдяки чому між розплавом та кварцовою трубкою немає прямого контакту. Іншою значною складністю застосування методу Чохральського є переміщення та обертання зливка. Одне з можливих розв'язків цієї проблеми полягає у використанні магнітного поля.

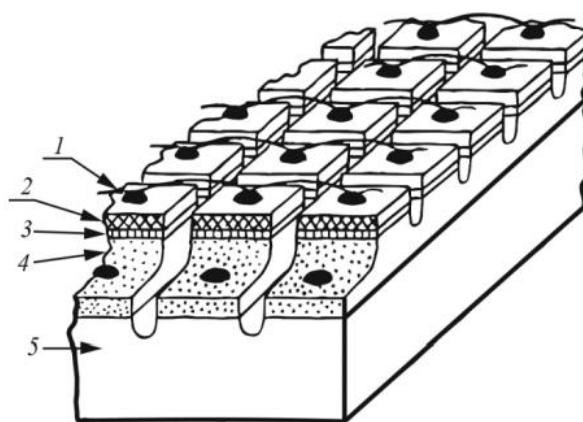
При вирощуванні кристала температура найхолоднішої ділянки ампули підтримувалася рівною 615°C, швидкість обертання затравки становила 17 об/хв, швидкість витягування – від 45 до 50 мм/год. Довжина вирощених кристалів 20см, діаметр 20мм.

Розподіл деяких домішок в арсеніді галію, вирощеному з розплаву, залежить від концентрації домішки, кристалографічної орієнтації та швидкості зростання. Радіальний температурний градієнт істотно впливає на досконалість структури зливка арсеніду галію, вирощеного за методом Чохральського, збільшуючи кількість дислокацій.

Отримані методом Чохральського зливки мали рухливість носіїв за кімнатної температури вище $7000 \text{ см}^2/(\text{в}\cdot\text{сек})$. Рухливість у деяких зразках вище $8000 \text{ см}^2/(\text{в}\cdot\text{сек})$, причому іноді вона досягала $8500 \text{ см}^2 (\text{в}\cdot\text{сек})$ за кімнатної температури. Концентрація носіїв у всіх зразках знаходилась у межах $(4\div 6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3.5 Багатоелементні фотоприймачі УФ-діапазону

На основі GaAs π - ν - n -структур, отриманих у процесі дифузії заліза в епітаксійні шари n -типу на напівізолюючій підкладці, створені фотоприймальні матриці для отримання зображення в ультрафіолетовому діапазоні спектра. Конструкція матричного фотоприймача схематично зображено на рис. 3.1.



1 – омичний контакт; 2 – високоомний π -шар; 3 – ν -шар; 4 – n -шар; 5 – підкладка напівізолюючого GaAs.

Рисунок 3.1 – Конструкція матричного фотоприймача на основі π - ν - n -структури

Матриці виконані за технологією монолітних інтегральних схем та включають три операції фотолітографії для отримання багаторівневої схеми.

Двовимірні матриці включають більше 103 елементів зі словниковою організацією знімання інформації.

Вихідний сигнал зчитується із різних шин за командами регістру вибірки ряду. Адресація окремих елементів вздовж шини відбувається за час зчитування рядка. Елементи фотоприйомної матриці формуються розміром від $0,05\text{мм}^2$ до $0,5\text{мм}^2$. Вони можуть працювати як у режимі накопичення заряду, так і в режимі миттєвої дії при використанні відповідно n - π - v - n - або π - v - n -структури у фотодіодному або фотогальванічному режимі.

На основі арсеніду галію, легованого хромом у процесі газофазової епітаксії (структури GaAs:Cr), розроблено дискретні та багатоелементні фотоприймачі УФ-діапазону [2–4]. Дискретний фотоприймач мав зустрічно-штирову систему контактів (рис. 3.1), що забезпечує меншу в порівнянні з p - i - n -діодом ємність. Ширина контактних висновків становила 200 мкм, ширина контакту та міжконтактна відстань – 20 мкм. Контакти виготовлялися шляхом електронно-променевого напилення на поверхню GaAs шарів ванадію (50 нм) та нікелю (30 нм) та наступного хімічного осадження Ni (від 0,8 до 0,9 мкм). Спектральна характеристика фотоприймача, виміряна за допомогою монохроматора МДР-3 представлена на рис. 3.2.

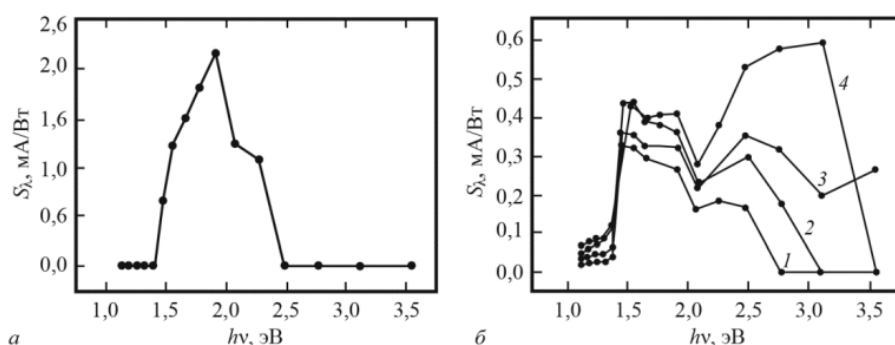


Рисунок 3.2 – Спектральна залежність чутливості фотоприймача: а – як КЗ; б – при напрузі усунення: 1 - 1 В; 2 - 2 В; 3 - 3 В; 4 – 5 В

Як видно із рис. 3.2 а, у фотovoltaїчному режимі (режим короткого замикання) залежність чутливості від енергії квантів характеризується вузьким спектром з максимумом у сфері власного поглинання за енергії квантів 1,9 еВ.

При додатку зовнішньої напруги (рис. 3.2 б) абсолютні значення чутливості зростають у всьому досліджуваному діапазоні енергій. Загалом залежність має немонотонний характер із двома максимумами. Перший максимум (1,5 еВ) відповідає початку області власного поглинання. Другий максимум (2,2-3,0 еВ) також знаходиться в області власного поглинання, але його становище залежить від напруги усунення на фотоприймачі. Високі значення струмової чутливості (~1,8 А/Вт) разом із залежністю положення другого максимуму від напруги усунення дозволяють припускати наявність ефекту внутрішнього посилення сигналу.

Це припущення підтверджується розрахунком спектральної залежності струмової чутливості, проведеним на основі наступних двох виразів для квантової ефективності:

$$\eta = S_l \frac{hc}{e\lambda} = S_l \frac{1,24}{\lambda}, \quad (3.1)$$

де η – квантова ефективність;

h – постійна Планка;

c – швидкість світла;

e – елементарний електричний заряд;

λ – довжина хвилі.

$$\eta = (1 - R) \cdot \left(1 - \frac{e^{-\alpha d}}{1 + \alpha L} \right), \quad (3.2)$$

де R - Коефіцієнт відображення;

$$L = L_p + L_n; L_p = \mu_p \tau_p \xi - \text{дрейфова довжина.}$$

дірок; $L_n = \mu_n \tau_n \xi$ - дрейфова довжина електронів; μ_p, μ_n – рухливості дірок та електронів; τ_p, τ_n – час життя дірок та електронів; ξ – напруженість електричного поля; d – товщина приповерхневої області, у якій напруженість електричного поля перевищує 1 кВ/см; α – коефіцієнт поглинання. Результати розрахунку подано на рис. 3.3.

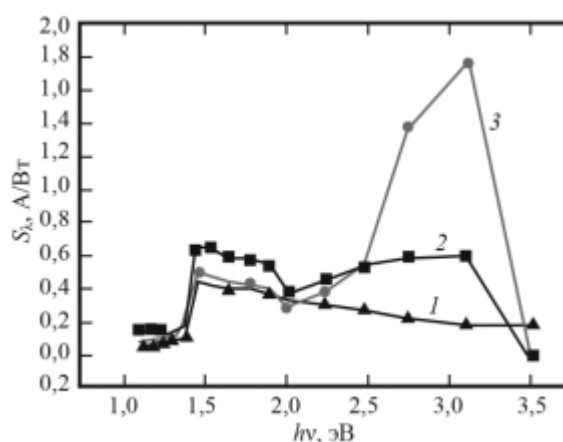


Рисунок 3.3 – Теоретична (1) та експериментальні (2, 3 – для двох зразків) залежності струмової чутливості

При енергіях випромінювання в діапазоні від 1,0 еВ до 2,0 еВ розрахункові дані близькі до експериментальних. Однак за енергії квантів вище 2,1 еВ спостерігається значна розбіжність – експериментальні значення значно перевищують розрахункові, що підтверджує припущення про наявність ефекту внутрішнього посилення сигналу. Дослідження імпульсних характеристик показало лінійну залежність струму фотоприймача від інтенсивності випромінювання. Час швидкодії фотоприймача становив 15 нс.

Таким чином, фотоприймачі на основі GaAs:Cr мають високу чутливість в області домішкового та власного поглинання, мають ефект внутрішнього

посилення сигналу при напрузі на фотодетекторі вище 3 В, мають швидкодію 15 нс.

На основі π - v - n -структури створено також багатоеlementний УФ-фотоприймач. Конструкція 128-elementного УФ-фотоприймача є серією p - i - n -діодів, які утворюють канали (стрипи) детекторної лінійки. Фоточутлива площа становить 63% загальної площі стрипу. Елементи в лінійці розділені дисковою різкою на повну глибину чутливого прошарку.

Спектральні залежності струмової чутливості багатоеlementного арсенід-галієвого фотоприймача і, для порівняння, кремнієвого фотодіод ФДУК-13У вимірювалися в діапазоні довжин хвиль від 220 нм до 320 нм. У цьому діапазоні струмова чутливість GaAs фотоприймача монотонно зростає від 0,06 А/Вт до 1,12 А/Вт. При цьому струмова чутливість кремнієвого фотодіода вдвічі нижче у всьому інтервалі довжин хвиль.

На основі 128-канального фотодетектора створено фотоприймальний модуль для знімання та передачі сигналу з фотодетектора.

3.6 Фоторезистивні приймачі ІЧ-випромінювання

Арсенід галію, легований марганцем, є перспективним матеріалом для створення чутливих елементів фотоприймачів випромінювання із довжиною хвилі 10,6 мкм. У зв'язку з цим проводилися дослідження електрофізичних та фотоелектричних властивостей арсеніду галію, легованого Mn при різних режимах дифузії (температура дифузії 900 і 1000 °С; тиск парів миш'яку 10^{-2} і 10^{-3} атм). Дифузія Mn здійснювалася в GaAs з вихідною концентрацією електронів від $5 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$.

На рис. 3.4 представлені температурні залежності концентрації дірок у зразках GaAs:Mn. Отримане із цих залежностей значення енергії іонізації акцепторів у досліджених зразках лежить в інтервалі $\epsilon_a =$ (від 0,08 до 0,11) еВ. Це відповідає енергії іонізації центрів Mn в GaAs, вирощеному з розплаву. При

цьому немає істотної залежності параметрів акцепторів від режиму дифузії Mn.

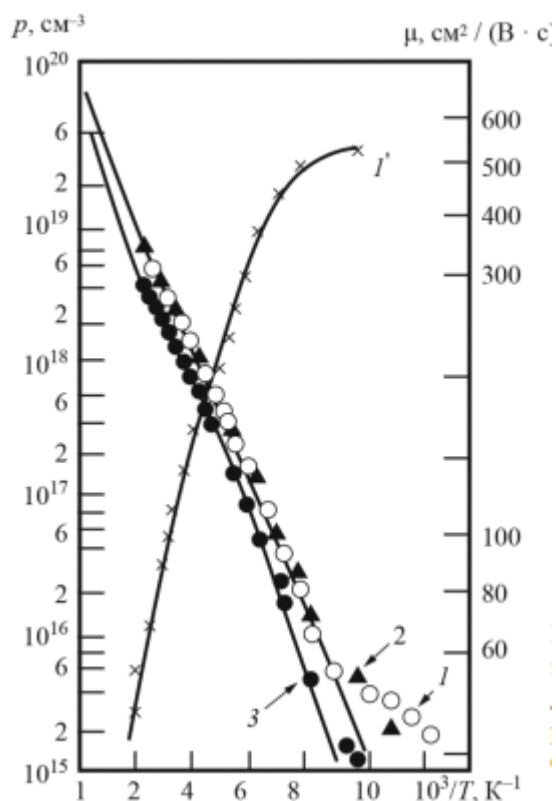


Рисунок 3.4 – Температурна залежність концентрації (1, 2, 3) та рухливості (1') дірок у GaAs: Mn. Концентрація акцепторів, см-3: 1 - $1 \cdot 10^{20}$; 2 - $0,4 \cdot 10^{20}$; 3 - $0,8 \cdot 10^{20}$

Спектри фотопровідності GaAs, легованого марганцем методом дифузії, виміряні в ділянці від 0,5eВ до 2 eВ при $T = 90$ К, наведені на рис. 3.5. По довгохвильовій межі спектра визначено енергію іонізації глибокого рівня, $\epsilon = 0,6$ eВ від краю валентної зони. Цей рівень може бути пов'язаний з дефектами решітки, оскільки спостерігається в арсеніді галію незалежно від типу легуючої домішки. З фотоелектричних характеристик оцінено час життя основних носіїв у досліджених кристалах, при температурі 90 К воно становило $\sim 10^{-9}$ с.

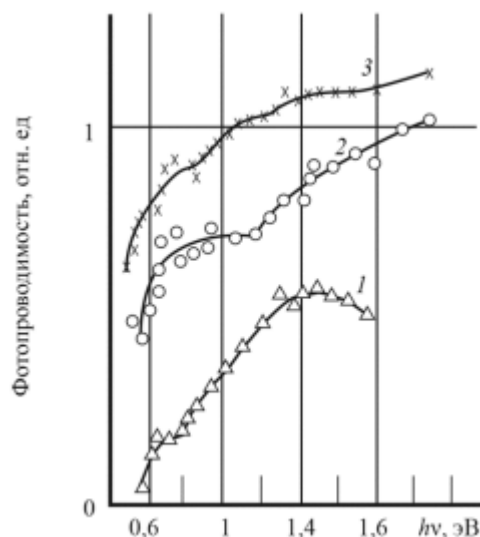


Рисунок 3.5 – Спектральна залежність фотопровідності GaAs: Mn.
 Концентрація акцепторів, см-3: 1 - $0,3 \cdot 10^{20}$; 2 - $1 \cdot 10^{20}$; 3 - $2,2 \cdot 10^{20}$

Досліджувалась також домішкова фотопровідність на довжині хвилі 106 мкм. Домішна фотопровідність збуджувалася імпульсно модульованим випромінюванням оптичного квантового генератора, а реєстрація фотовідповіді здійснювалася безконтактним НВЧ-способом. Для досліджуваних фоторезисторів із чутливим майданчиком (2×2) мм² та товщиною від 0,2 мм до 0,4 мм визначено порогову чутливість ($R_{пор}$) та час релаксації домішкової фотопровідності ($\tau_{рп}$) на довжині хвилі 10,6 мкм. Експериментальне значення $R_{пор}$ при від 90 до 100 К склало (від 10^{-9} до 10^{-8}) Вт/Гц^{1/2}. За цієї робочої температури чутливість обмежувалася шумами схеми. Інерційність більшості фоторезисторів була порядку 10^{-9} с.

4 СТРУКТУРНІ ПОРУШЕННЯ ПІДКЛАДОК GaAs ТА МЕТОДИ ЇХ КОНТРОЛЮ

4.1 Чинники, що впливають на структурні порушення та відхилення від площинності підкладок GaAs

Зіставлення результатів отриманих різними дослідниками для арсеніду галію [7] показує, що, незважаючи на наявність чітко виражених загальних закономірностей дефектоутворення в монокристалах при відхиленні від стехіометричного складу, конкретні дані за величинами щільності, періоду решітки та концентрації електрично та оптично активних центрів у них, як правило, помітно різняться. І обумовлено це, в першу чергу, не різною точністю використовуваних методів дослідження, а особливостями самих об'єктів. Досліджувані кристали вирощуються з кінцевою (у ряді випадків досить великий) швидкістю. Це вже по собі визначає деяке відхилення від рівноваги на межі розділу фаз. Крім того, швидкість охолодження кристала від температури твердіння також є кінцевою величиною. У процесі охолодження концентрація власних точкових дефектів структури, що вводяться в кристалах при кристалізації, може суттєво змінюватися як через значну температурну залежність їх розчинності, так і за рахунок їх взаємодії між собою, а також з супутніми структурними дефектами та домішками. Тому загальна остаточна дефектність вирощеного монокристалу, пов'язана з відхиленням від стехіометричного складу, за інших рівних умов має залежати від конкретних параметрів його одержання, зокрема від швидкості росту та охолодження, від

температури кристалізації, а також від концентрації супутніх залишкових домішок; щільності дислокацій, що є ефективними внутрішніми стоками для власних точкових дефектів; геометричних розмірів зливка, що визначають роль поверхні стоку точкових дефектів з обсягу тощо. Більш об'єктивну інформацію про високотемпературні рівноваги за участю власних точкових структурних дефектів дають експерименти з відпалу наступним загартуванням зразків.

Як показано в роботі [8], високотемпературний (приблизно 1000 ° C) відпал вирощених монокристалів арсеніду галію з наступним різким охолодженням призводить до суттєвого збільшення періоду решітки по порівняно з вихідним станом. При наступній витримці за кімнатної температури період решітки зменшується і після закінчення 60 год повертається до початкового значення. Цей процес відбувається у дві стадії: на першій стадії (перші 30 год) період решітки зменшується досить швидко, друга стадія характеризується суттєво нижчою швидкістю протікання процесу. Кінетика процесу на другій стадії досить добре описується співвідношеннями, характерними для реакції першого порядку з енергією активації 1,0 еВ. Аналіз цих даних підтверджує складний характер твердих розчинів в арсеніді галію при відхиленні від стехіометрії, встановлений для дослідження вирощених кристалів. Зокрема, у роботі [9] відзначається можливість одночасної присутності в кристалах пар Френкеля у підрешітці миш'яку та миш'якових вакансій. Визначені ними на основі даних щодо температурної залежності зміни періоду решітки при відпалі ентальпія, утворення миш'якових вакансій становить від 2,0eВ до 2,1 eВ, що добре узгоджується з даними інших авторів; отриманими із незалежних експериментів. Отримані результати, наведені в роботі [10], свідчать про те, що через високу рухливість власних точкових структурних дефектів процеси взаємодії за їх участю протікають з досить високою швидкістю вже за порівняно невисоких температур. Це призводить до суттєвих змін

концентрації цих дефектів у кристалах і створює серйозні труднощі у фіксації високотемпературного стану навіть за умов досить різкого охолодження.

Виконаний аналіз дозволив виявити тенденцію освіти комплексів між власними структурними дефектами та атомами залишкових та легуючих домішок, що супроводжується зміною спектра енергетичних рівнів дефектів у кристалах. Так, у роботі [11] при дослідженні впливу термообробки на властивості монокристалів арсеніду галію, легованих телуrom, переконливо показано, що атоми домішки, що легує, утворюють стійкі комплекси з власними дефектами. З цими комплексами автори пов'язують появу в кристалах акцепторного рівня ($E_v+0.18$ eV) та смуги випромінювання 1,30 eV при 77 K.

Якщо у питанні генерації додаткових акцепторних центрів, пов'язаних з наявністю в кристалах галієвих вакансій, більшість дослідників одностайні, то в оцінці природи дефектів, зумовлених присутністю вакансій миш'яку, є суттєві розбіжності. Так, вивчаючи вплив відпалу в контрольованій атмосфері при температурі від 700 до 1000°C на електричні властивості монокристалів GaAs, автори роботи [12] приходять до висновку про те, що миш'якові вакансії є донорами. При цьому коефіцієнт дифузії їх у GaAs істотно нижчий, ніж для галієвих вакансій:

$$DVGa = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-2,1 / kT), \quad (4.1)$$

$$DVGa = 7,9 \cdot 10^{-103} \cdot \exp(-4,0 / kT). \quad (4.2)$$

На основі даних фотолюмінесцентних досліджень робиться висновок, що обидва типи вакансій є центрами безвипромінювальної рекомбінації.

Слід зазначити достатню різноманітність рівнів дефектів, які у термооброблених зразках. Незважаючи на деяку спірність у трактуванні отриманих результатів, пов'язану з низкою припущень, що спрощують,

зроблених авторами (не облік міждоузельних власних точкових дефектів та складних комплексів), факт істотного впливу відхилення від стехіометричного складу на спектр енергетичних рівнів дефектів у досліджених зливках та підкладках не викликає сумнівів. Заслуговує на увагу те, що з наявністю власних точкових дефектів може бути пов'язана поява декількох рівнів забороненої зони, у тому числі й глибоких. При цьому далеко не всі ці рівні зумовлені утворенням комплексів із супутніми домішками. У зливках та підкладках можуть одночасно співіснувати дефектні центри, пов'язані як з вакансіями миш'яку, так і з вакансіями галію. При підвищенні температури переважають дефекти, пов'язані з вакансіями галію, що є непрямим підтвердженням асиметрії області гомогенності в арсеніді галію.

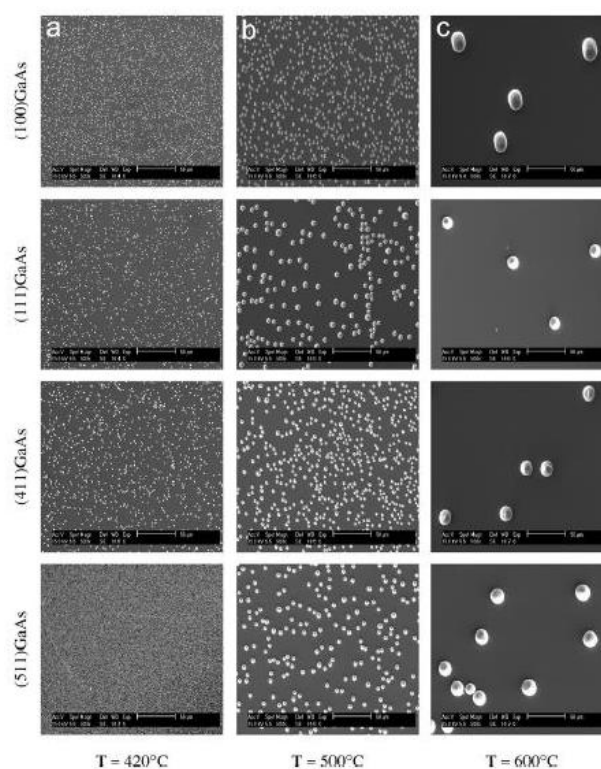


Рисунок 4.1 – Зображення дислокацій у підкладках арсеніду галію для підкладок різної орієнтації за різних режимів відпалу. За даними роботи [13].

Як показано у роботі [13] при низькотемпературному відпалі, до 700°C , точкові дефекти об'єднуються в центри, що виявляють себе як дислокації, і які виявляються у вигляді ямок травлення. Зі збільшенням температури утворення центрів стає більш інтенсивним та їх розмір збільшується (рис. 4.1). Водночас вплив високотемпературного відпалу при температурах близьких до 1000°C досліджено в повному обсязі.

У роботі [14] термообробка була використана для отримання монокристалів GaP з підвищеними значеннями фотолюмінесцентної здатності та часу життя неосновних носіїв струму. Час життя неосновних носіїв струму в таких монокристалах також приблизно на два порядку нижче.

Основною причиною цього є підвищена концентрація в монокристалах власних точкових дефектів, насамперед галієвих вакансій та комплексів за їх участю, які є центрами безвипромінювальної рекомбінації. Термообробка монокристалів при температурі від 1200 до 1300°C з наступним повільним охолодженням (від 2 до $50^{\circ}\text{C}/\text{год}$) до 500°C призвела до істотного зниження в них концентрації центрів безвипромінювальної рекомбінації та до значного збільшення часу життя та люмінесцентної здатності. На думку авторів, у процесі високотемпературної термообробки ($> 1000^{\circ}\text{C}$) відбувається руйнування різноманітних комплексів, є ефективними центрами безвипромінювальної рекомбінації (комплекси типу $\text{VGa} - 0$). Подальше повільне охолодження сприяє встановленню рівноважної концентрації власних точкових дефектів обсягом кристала за рахунок їхнього стоку на супутні дефекти, наприклад дислокації.

Технологічний маршрут підготовки підкладок призводить до того, що підкладки арсеніду галію піддаються дії різних механічних, хіміко-механічних та термічних факторів, що призводять до виникнення в них залишкових внутрішніх напруг. Залишкові напруження викликають пружну деформацію (вигин) підкладок, що помітно знижує відсоток виходу придатної продукції [15]. Крім того, залишкові напруги впливають на міцність підкладок, а також

на електричні властивості та довговічність приладів, виготовлених на основі зазначених пластин та структур.

Питанням вивчення деформацій та внутрішніх напруг у підкладках арсеніду галію присвячено досить велику кількість робіт [16, 18]. Однак у більшості робіт розрахунок напруг, що діють у підкладках проводиться на підставі експериментально визначених деформацій за формулами, що виражають закон Гука для плоскої задачі теорії пружності в надмірно спрощеній формі. Зокрема, зазвичай передбачається, що згинання пластин сферично симетричний, а внутрішні напруги, що діють в поверхневих шарах пластин, ізотропні. При цьому зазвичай не враховують анізотропію пружних характеристик (модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона) кристала кремнію.

У той же час відомо, що форма підкладки відрізняється від сферично-симетричної вже після початкових стадій механічної обробки і на подальших стадіях технологічного циклу. Зрозуміло, що при цьому не тільки величина, а й знак деформацій залежить від кристалографічного напрямку у площині підкладки. Зазначена анізотропія вигину пластин різко знижує відсоток виходу придатної продукції. Для підкладок з кристалографічними орієнтаціями, відмінними від (111), розрахунок компонента тензора внутрішніх напруг повинен проводитися з урахуванням залежності модуля Юнга та коефіцієнта Пуассона від кристалографічного напрямку у площині пластин.

Необхідно відзначити також, що у більшості розглянутих, [17], підкладок та структур деформація відбувається по поверхнях складного профілю, форма яких дуже далека від сферичної. Підкладки, як правило, згинаються таким чином, що два напрямки, що відповідають максимальним та мінімальним вигинам, взаємно перпендикулярні та близькі до кристалографічних напрямків $\langle 100 \rangle$.

Слід зазначити, що при послідовному поліруванні порушеного шару (для пластин після механічної обробки) підкладки зменшують свій вигин, що говорить про переважно пружний характер деформації.

Побудова кіл Мора [19] всім досліджених пластин дозволило встановити, що напрям головних деформацій у них близький до двом взаємно перпендикулярним напрямкам $\langle 100 \rangle$ (середній кут відхилення напрямів головних деформацій відрізняється від зазначеного кристалографічного напрямку на 9°). Отримані результати добре узгоджуються з даними робіт [17, 18], де було показано, що «слабкі» напрямки, в яких реалізуються екстремальні значення вигинів пластин, що пройшли механічне шліфування або механічну обробку та подальше термоокислення для пластин орієнтації (100), практично збігаються з двома напрямками $\langle 100 \rangle$.

4.2 Методи та апаратура контролю відхилення від площинності у підкладках GaAs

У процесі виготовлення підкладки арсеніду галію піддаються різним механічним та температурним операціям. В результаті цього відбувається відхилення від площинності підкладок (див. рис. 4.2). Відхилення від площинності дуже негативно впливає на фінішні операції виготовлення електронних приладів, такі як епітаксія та фотолітографія. Питання вивчення деформацій в епітаксійних структурах та підкладках присвячено досить велику кількість робіт. Основні положення представлені у роботі [20].

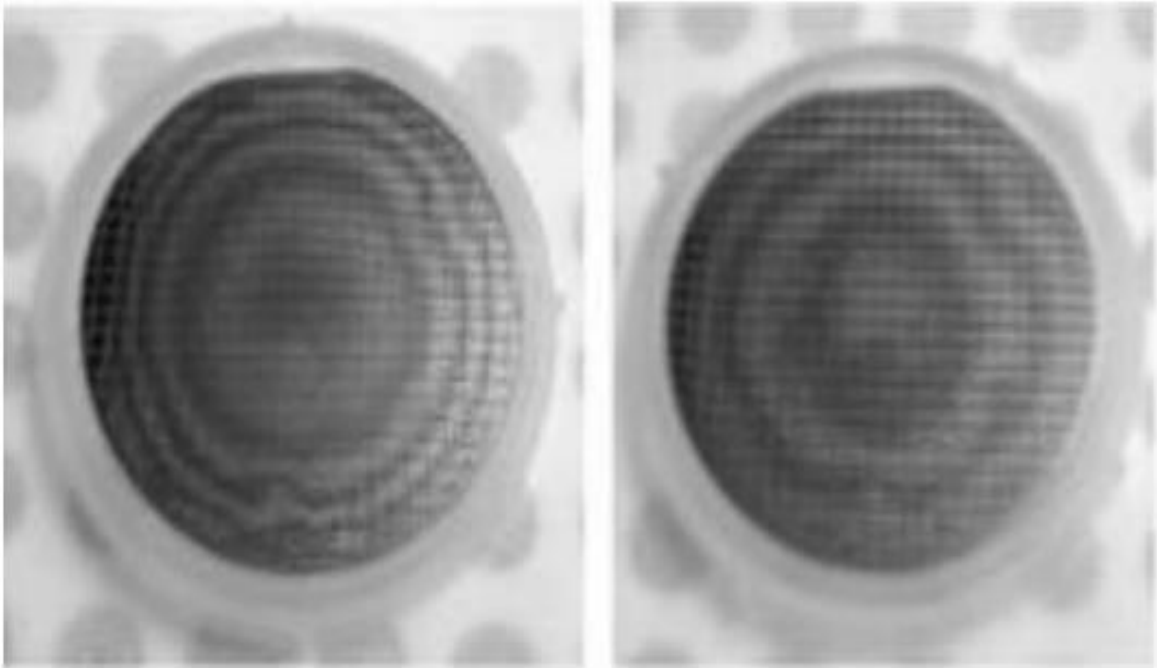


Рисунок 4.2 – Відхилення від площинності підкладки кремнію після полірування

Виходячи з цього до розробників методик контролю відхилення від площинності (геометричних параметрів) готової продукції висуваються дуже жорсткі вимоги.

З одного боку, враховуючи вимоги процесів фотолітографії, точність контролю геометричних параметрів має перевищувати від 2мкм до 5 мкм, а з іншого боку в методиках має бути врахована залежність геометричних параметрів від кристалографічних напрямів. Так як надалі кремнієві пластини та структури беруть участь у процесах фотолітографії, перебуваючи на плоскому вакуумному столику, то геометричними параметрами прийнято називати такі параметри:

а) відхилення від площинності – це максимальне геометричне відхилення поверхні пластини від базової площини у вільному стані;

б) відхилення від паралельності – це різниця між максимальною та мінімальною товщиною пластини при вакуумному навантаженні на базовій поверхні.

До основних груп методів контролю відхилення від площинності відносять такі: електротензометрію, оптико-геометричні, поляризаційно-оптичні, інтерференційно-оптичні, проникаючих випромінювань. До другої групи експериментальних методів відносять методи вимірювання відхилення від площинності по окремих точках, що використовують перетворювачі різного типу, основні з яких механічні, оптико-механічні, оптичні, (лінзові та растрові) потенціометричні, ємнісні, індукційно-трансформаторні, п'єзоелектричні, п'єзоелектричні, , фотоелектричні, струнні, пневматичні, електроакустичні, ультразвукові, механотронні, вихрострумові, оптоелектронні.

Для вимірювання геометричних параметрів напівпровідникових пластин довільної форми авторами робіт [21, 22] було розроблено серію пристроїв "Номінал-1", "Номінал-2", загальний вигляд яких показаний на рис. 4.3 та рис. 4.4.



Рисунок 4.3 – Пристрій “Номінал-1”



1. Електронний блок. 2. Індуктивний перетворювач переміщення.
3. Вимірювальна головка. 4. Предметний столик. 5. Товкач. 6. Важіль переміщень.

Рисунок 4.4 – Пристрій «Номінал-2»[74]

Установки типу «Номінал» дозволяють контролювати геометричні параметри напівпровідникових пластин довільної форми, які легко деформуються (наприклад, твердих розчинів CdHgTe) в діапазоні 0-1000 мкм. Мінімальне вимірювальне зусилля приблизно 10 мЛгр дає можливість контролювати товщину дуже крихких пластинок CdHgTe, призначених для виробництва приладів нічного бачення і мають жорсткі вимоги до геометричних параметрів.

Дуже широкого поширення напівпровідникової промисловості набула установка «Експрес-4» (рис. 4.5), призначена для контролю геометричних параметрів підкладок та структур у напівавтоматичному режимі.



Рисунок 4.5 – Напівавтоматична установка «Експрес-4» для контролю геометричних властивостей КС

На основі вищесказаного можна зробити висновок, що існуюче обладнання та методи вимірювання відхилення від площинності в напівпровідникових пластинах переважно орієнтовані на вироби з кремнію. Вимірювання відхилення від площинності підкладок арсеніду галію має ряд особливостей, які пов'язані, перш за все, з великим рівнем внутрішніх напруг. В результаті цього, товщина пластини GaAs значно майже вдвічі, перевищує товщину пластини кремнію, що призводить до необхідності використовувати високоточні неруйнівні методи.

Можна зробити висновок необхідність розробки нових або модернізації існуючих пристроїв, методик і методів вимірювання відхилення від площинності підкладок арсеніду галію.

4.3 Методи та апаратура контролю щільності дислокацій у підкладках GaAs

Високий рівень сучасної мікроелектроніки, досягнення останніх років у галузі субмікронної технології багато в чому пов'язані з застосування нових структурно досконалих напівпровідникових матеріалів. Широке застосування у напівпровідниковому виробництві отримали малодислокаційні та бездислокаційні матеріали. Наявність в активній області приладів та мікросхем або поблизу її навіть одного дефекту може призвести до збою, до нестабільності параметрів і характеристик деградаційним процесам, тобто. істотно знижує надійність як самих приладів та мікросхем, так і виробів мікроелектроніки на їх основі.

Тому актуальним завданням на сьогоднішній день є як розробка прямих, неруйнівних, високочутливих та високороздільних методів та методик реєстрації, так і надійна ідентифікація дефектів структури основних напівпровідникових матеріалів, що застосовуються у технології виробництва напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем.

На електричні властивості напівпровідникових приладів сильне вплив надають структурні дефекти матеріалу такі, як дислокації, дефекти упаковки, лінії ковзання, та ін. призводять до погіршення вольт-амперних характеристик р-п переходів. Тому контроль густини дефектів структури відіграє особливо важливу роль у виробництві напівпровідникових матеріалів. Для цих цілей широке застосування знайшли методи візуалізації структурних дефектів шляхом їх декорування домішками та методи селективного хімічного травлення.

Сутність ефекту декорування ось у чому. Відомо, що під дією локальних пружних полів, що виникають навколо структурних недосконалостей кристалічних ґрат, домішкові атоми концентруються переважно поблизу дефектів структури, утворюючи ними так звану домішкову атмосферу. Якщо

домішка вводиться в досліджуваний зразок при високій температурі, коли розчинність її в кристалічній ґратці велика, при охолодженні твердий розчин домішки в кристалі стає пересиченим і виникає процес осадження надлишкових домішкових атомів з утворенням частинок другої фази. Цей процес найбільш інтенсивно протікає поблизу дефектів структури, так як домішкова атмосфера навколо них призводить до більш сильного пересичення твердого розчину декоруючої домішки та виникнення частинок другої фази в цих областях кристала стає енергетично вигіднішим.

Вперше метод декорування використали [23] для спостереження дислокацій у кремнії. Декорування проводилося домішкою міді. Для цього досліджувані зразки змочувалися в розчині $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ після чого відпалювалися приблизно протягом години в атмосфері водню при 900°C . Після відпалу зразки витягувалися з печі та охолоджувалися до кімнатної температури протягом кількох хвилин. На практиці дифузію міді в кремній з метою декорування дефектів структури проводять у ширшому діапазоні температур $900\text{-}1200^\circ\text{C}$. Тривалість дифузії вибирають такою, щоб мідь, що дифузує, рівномірно розподілялася за обсягом кристала.

Швидкість охолодження кристала після закінчення дифузії не має бути занадто малою. При дуже повільному охолодженні велика кількість міді може виходити з об'єму внаслідок зворотної дифузії до поверхні, внаслідок чого зменшується контрастність декорування (див. рис. 4.6). З іншого боку, різке зменшення температури не дає можливості розвиватися процесу осадження пересиченого твердого розчину міді на дефектах структури, оскільки інтенсивність цього процесу обмежується дифузійним переміщенням атомів міді центрам осадження.

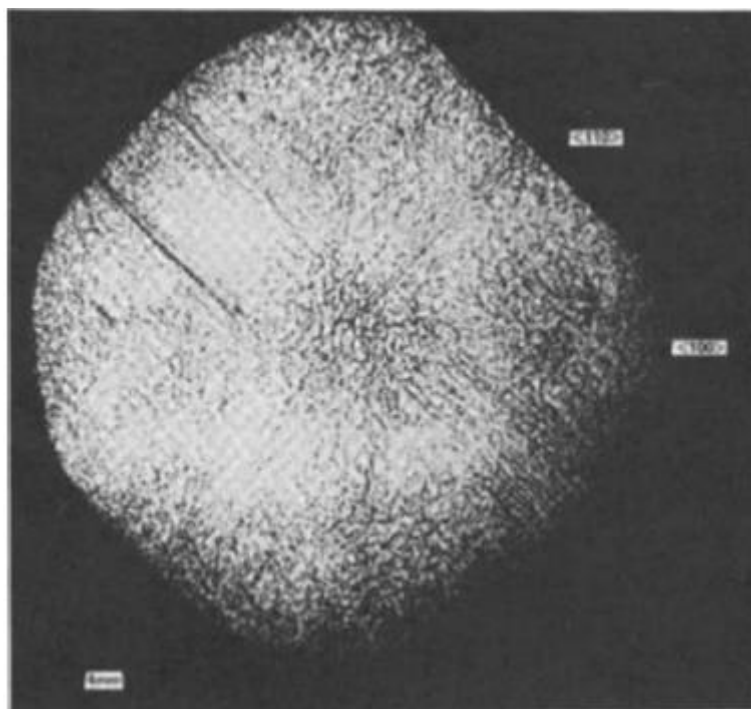


Рисунок 4.6 – Дефекти в арсеніді галію декоровані міддю.

За даними роботи [24].

У місцях перетину структурного дефекту з поверхнею зразка виникає локальна зміна поверхневої енергії. У хімічних травниках ці ділянки поверхні розчиняються з більшою швидкістю, внаслідок чого дефект структури виявляється у вигляді ямки (рис. 4.7). Форма ямки травлення залежить від типу дефекту, кристалографічної орієнтації площини, де він виявляється, і навіть від режимів хімічного травлення. Наприклад, дислокації на площині (111) у напівпровідниках з кубічними ґратами типу алмазу (таких, як германій, кремній) характеризуються трикутною ямкою травлення. Фігура травлення дефекту упаковки на площині (111) має вигляд замкнутого або незамкнутого трикутника або відрізка лінії, орієнтованого в напрямку (110).

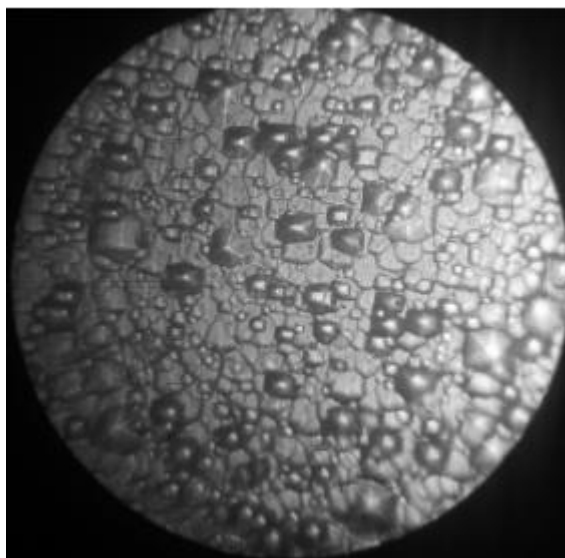


Рисунок 4.7 – Дислокації у пластині GaAs після хімічного травлення

Лінія ковзання є рядом дислокаційних ямок травлення з лінійною щільністю більш ніж 25 ямок/мм, орієнтований на площині (111) вздовж напрямку (110).

Для виявлення розглянутих дефектів структури на різних матеріалах рекомендовано багато різних хімічних складів.

За допомогою відповідних травників можна виявити дислокаційну структуру в кристалах, визначити положення двійникових меж, визначити реальну симетрію кристалів, яку можна виявити за фігур розчинення (травлення).

Аналізуючи методи та способи визначення щільності дислокацій та мікроефектів у підкладках GaAs можна зробити висновок, що існуючі методи та методики припускають "ручне" вимірювання цього параметра. Для збільшення точності вимірювання потрібна розробка пристроїв вимірювання густини дислокацій та інших структурних порушень.

4.4 Загальні відомості про оптичний контроль матеріалів

Оптичні методи діагностики матеріалів ґрунтуються на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом та реєстрації результатів цієї взаємодії. Методи, характерні для оптичного контролю, використовують електромагнітне випромінювання діапазону довжин хвиль у вакуумі від 103 мкм (Гц) і охоплюють ультрафіолетове (УФ), видиме (ВІ) та інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. При цьому поєднуються вони між собою спільністю застосовуваних методик, способів та прийомів проведення контролю.

У більшості варіантів контролю довжина хвилі світла мала в порівнянні з геометричними розмірами деталей, елементів і дефектів об'єктів, що контролюються, що дозволяє використовувати при аналізі взаємодії випромінювання з об'єктом методи геометричної оптики. Разом з тим, у ряді випадків (виявлення дефектів малих розмірів, контроль тонких плівок, випробування голографічними та інтерференційними методами та ін.) застосовуються методи, характерні для аналізу хвильових процесів. У цій частині методи оптичного контролю близькі до методів радіохвильового контролю, аналогічні і величини, що несуть корисну інформацію.

Оптичні методи контролю якості можна умовно поділити на наступні групи:

- візуальний та візуально-оптичний методи характеризуються тим, що результати контролю найбільшою мірою визначаються особистими якостями оператора: його зором, умінням та досвідом. Візуальні методи контролю якості – найбільш доступні та прості, тому мають велике поширення;

- фотометричний, денситометричний, спектральний та телевізійний методи в основному будуються на результатах апаратурних вимірювань та забезпечують меншу суб'єктивність контролю, їх застосування за складом

контрольно-вимірювальних операцій ближче до роботи з електронно-вимірювальними приладами;

- Интерференционный, дифракционный, фазовоконтрастный, рефрактометрический, нефелометрический, поляризационный, стробоскопический и голографический методы використовують хвильові властивості світла і дозволяють проводити неруйнівний контроль об'єктів з чутливістю до десятих часток довжини хвилі джерела випромінювання.

За допомогою оптичних методів можна контролювати об'єкти з матеріалів, прозорих та напівпрозорих для світлового випромінювання. Якщо матеріал об'єкта непрозорий, у такого об'єкта можна перевіряти стан зовнішніх і внутрішніх поверхонь або розмірів. Залежно від властивостей матеріалу контрольованого об'єкта оптичний контроль здійснюється у відбитому, минулому або розсіяному випромінюванні, а у необхідних випадках і при комбінованому освітленні. Параметри джерел світла (інтенсивність, спектр, напрямок, поляризація тощо) вибирають виходячи з конкретних умов, щоб забезпечити максимальний контраст зображення. У всіх випадках бажано мати в приміщенні загальне освітлення, що створює освітленість не менше 10% від місцевого освітлення, що використовується. При цьому використовують поняття розмаїття зображення дефекту: нормований перепад яскравості на дефектному ділянці і навколишньому дефект фоні, тобто відбитого або пройшов крізь матеріал контрольованого об'єкта світла:

$$K_d = (B_\phi - B_d) / B_\phi, \quad (4.3)$$

де B_d, B_ϕ – яркість зображення дефекта и фону, кд/м².

4.5 Візуально-оптичні методи контролю

Мінімальний розмір дефекту, який чітко виявляється при візуальному контролі, залежить від характеру досліджуваного об'єкта (зокрема, чим грубіше його поверхня і структура, чим більше розмір дефекту, що виявляється), рівня яскравості і напрямку освітлення, контрасту між дефектом і фоном, тобто. від перепаду яскравостей, кольорів або здібностей, що відбиваються, а також від особистих якостей оператора (зору, досвіду і т. д.). Орієнтовно вважають, що з візуальному контролі оператор з нормальним зором з відривом найкращого зору впевнено виявляє дефекти з мінімальним розміром 0,1 мм у площині, перпендикулярної лінії спостереження.

Візуально-оптичним називають неруйнівний контроль якості із застосуванням оптичних засобів, що дозволяють суттєво розширити межі природних можливостей органів зору людини. Він є технічним продовженням візуального контролю, дає можливість виявляти дрібніші дефекти і проводити вимірювання з високою роздільною здатністю (1-5 мкм). Зазвичай проводять багатоступінчастий контроль: оглядають поверхню виробу без оптичних засобів, виявляючи великі дефекти та підозрілі місця, вивчають ці місця через лупу (однолінзовий мікроскоп), а потім досліджують окремі ділянки контрольованого виробу за допомогою багатолінзового мікроскопа, послідовно збільшуючи кратність його збільшення. При правильному виборі умов візуально-оптичного контролю розміри елементів об'єкта або мінімальних дефектів, що виявляються (в мм) зменшуються відповідно до оптичного збільшення пристрою:

$$K_{\text{ув}}/l_{\text{min}} = 0,1/K_{\text{ув}} \quad (4.4)$$

Лупи призначені для оптичного контролю близьких елементів зображення при невеликому збільшенні і зазвичай при ручному контролі.

Зручність роботи з ними залежить від того, що їх легко переміщати по контрольованому об'єкту, а зона огляду лупи порівняно велика.

Так як для луп і мікроскопів з великим збільшенням глибина різкості зменшується, проведення контролю з їх допомогою ускладнюється і потребує більшого часу для фокусування зображення (пошуку відстані найкращого бачення).

Лупи мають різне конструктивне оформлення відповідно до варіантів їх застосування: оглядові – для контролю одночасно двома очима; налобні у вигляді збільшувальних окулярів; складні, у тому числі – кишенькові, вартові, телескопічні. Оптична частина лупи може складатися з однієї лінзи або кількох скріплених між собою, що дає можливість скоригувати частину аберацій та отримати зображення гарної якості. Лупи з малим збільшенням використовують із пошуку дефектів і дефектних зон, і з великим – їхнього аналізу та виявлення дефектів мінімально можливих розмірів. Щоб максимально використовувати можливості лупи при проведенні візуально-оптичного контролю, її (крім великих біноклярних луп) треба тримати якомога ближче до ока, оскільки в цьому випадку сприймається найбільша кількість променів, що йдуть від контрольованого об'єкта, і знижується вплив відбиття (відблисків) від сторонніх предметів та лінзи. Лупа розміщується, як правило, паралельно контрольованій поверхні, що підвищує продуктивність та достовірність візуально-оптичного контролю.

Мікроскоп є оптичним багатолінзовим пристроєм для спостереження елементів, що не видно неозброєним оком, що має регулювання оптичних властивостей. Він дає можливість отримати якісне збільшене зображення, причому збільшення може досягати 2000 разів, а лінійна роздільна здатність – 0,5 мкм. Мікроскопи дозволяють проводити візуально-оптичний контроль за різних режимів освітлення та збільшення, а також за різними методиками. Лінзові системи є апланатичними, тобто для них виконується умова синусів:

$$n_{ко} \sin \psi_{ко} = K_{ув} n_{из} \sin \psi_{из}, \quad (4.5)$$

де $n_{ко}$ і $n_{из}$ – показники заломлення середовища у просторі предметів та у просторі зображень;

$\psi_{ко}$ та $\psi_{из}$ – апертурні кути у просторі предметів та зображень.

За допомогою мікроскопів та пристроїв, побудованих за тим же принципом, вирішуються такі завдання неруйнівного контролю якості: вимірювання геометричних розмірів та форми малогабаритних виробів, виявлення дефектів малих розмірів (до часток мікрметра) з високою роздільною здатністю за їх просторовим положенням, контроль фізико-хімічних властивостей та стану матеріалів (внутрішніх положень) за їх оптичними характеристиками; контроль внутрішньої будови малогабаритних виробів або їх частин, розташованих у прозорому або напівпрозорому матеріалі.

Ендоскопом називають пристрій, з освітлювачем і оптичною системою для огляду внутрішньої поверхні об'єктів з порожнинами. Ендоскопи дозволяють вирішувати завдання дефектоскопії і контролю будови виробів шляхом перенесення видимого зображення з недоступної зони до оператора. Порівнюючи ендоскопи з іншими пристроями, придатними для вирішення аналогічних завдань, і в першу чергу з малогабаритними телевізійними камерами, що містяться в порожнині, слід зазначити, що гнучкі ендоскопи мають менші розміри поперечного перерізу. Це дає можливість вводити їх через дуже малі отвори об'єкта в порожнині та канали складного профілю, якщо радіус вигину при повороті ендоскопа в порожнині понад п'ять діаметрів джгута.

4.6 Фотометричні методи контролю

Методи, засновані на вимірі величин, що характеризують світлове випромінювання, шляхом перетворення їх у електричний сигнал та обробки його вторинними блоками. Вони знайшли широке поширення, оскільки добре вписуються у технологічний процес. До таких методів можна умовно віднести фотометричний, денситометричний, колориметричний та деякі різновиди поляризаційного та спектрального методів. Фотометричний метод передбачає вимірювання вторинної освітленості, яскравості, світлового потоку або інтенсивності світлового випромінювання, отриманого після взаємодії з об'єктом, що контролюється. Використання тієї чи іншої фізичної величини залежить від конкретної реалізації методу, обраної оптичної системи та первинного вимірювального перетворювача. Денситометричний метод у тому, що вимірюється оптична щільність чи коефіцієнт пропускання. Поляризаційний метод відрізняється використанням поляризованого світла та аналізом поляризації минулої компоненти. Колориметричний метод полягає в аналізі кольорних складових світла або їх відношення. При реалізації цих методів основний процес вимірювання або перетворення може бути зведений у багатьох випадках до фотометричного, тому розглянемо його як основний варіант побудови апаратури та відзначимо особливості реалізації інших методів.

Фотометричні та подібні до нього методи можуть бути застосовані для вирішення наступних завдань неруйнівного контролю: вимірювання геометричних розмірів і площ, контроль коефіцієнта згасання, пропускання або відображення, дефектоскопія. Прилади, що реалізують фотометричний спосіб, зазвичай працюють у минулому випромінюванні і мають дві оптичні системи. Оскільки первинні вимірювальні перетворювачі світлових величин електричні сигнали найчастіше мають нелінійні світлові характеристики, які стабільність недостатня, застосовують спеціальні способи побудови приладів,

щоб ці недоліки мали мінімальний вплив. У приладах контролю геометричних розмірів часто застосовують стежать системи, і навіть фотокомпенсаційний, фотоімпульсний, растровий методи та інших.

Фотокомпенсаційний спосіб передбачає порівняння двох світлових потоків, один із яких частково перекривається контрольованим об'єктом, а інший – спеціальною пластиною, положення якої за рівності світлових потоків визначає геометричний розмір об'єкта. Фотостежить спосіб полягає в переміщенні за допомогою стежить фотоелектричного перетворювача, що відзначає положення кордону «світло - тінь», створюваної при освітленні контрольованого об'єкта, і реєстрації його параметрів по положенню перетворювача.

Фотоімпульсні прилади мають найбільше поширення і по суті використовують перетворення лінійного розміру електричний імпульс, тривалість якого пов'язана з вимірюваним розміром і швидкістю руху модулюючого елемента. Застосування растрових пристроїв дозволяє дискретизувати світловий потік, що йде від об'єкта, що контролюється, і отримати послідовність імпульсів, число яких пов'язане з розмірами контрольованого об'єкта.

У пристроях на принципі фотоімпульсного перетворювача можуть бути застосовані лінійні матриці на базі приладів із зарядним зв'язком, на виході яких відразу отримують послідовність імпульсів, пов'язаних з поперечним розміром, що спрощує побудову приладів для контролю геометричних розмірів фотометричним способом та забезпечує кращі метрологічні показники.

4.7 Контроль телевізійними методами

Основою застосування телевізійних методів є електронно-вакуумні телевізійні трубки, що передають, які дозволяють перетворити видиме

зображення в упорядковану послідовність – відеосигнал. Найбільшого поширення телевізійних системах з метою неруйнівного контролю мають видикон і дисектор. Сигнали, отримані від телевізійного передавального блоку, далі можуть використовуватися по-різному: для формування видимого зображення, яке аналізується оператором, для логічної обробки сигналів і виділення інформації про контрольований об'єкт або для введення в комп'ютер.

Зазначимо основні переваги телевізійного методу порівняно з візуальним та візуально-оптичним:

- а) можливість одночасної оцінки зображення на кількох екранах групою операторів, що особливо суттєво під час роботи з мікроскопом, ендоскопом та іншими подібними пристроями;
- б) робота з великим зображенням, що отримується за рахунок електронного збільшення так, що загальне збільшення розраховуватиметься за формулою 4.6:

$$K_y = K_{\text{OPT}} K_{\text{ВД}}. \quad (4.6)$$

- в) передача та аналіз зображення практично на будь-якій відстані від контрольованого об'єкта;
- г) можливість запису, обробки зображення та його поліпшення шляхом усунення перешкод з використанням методів, що широко застосовуються в телеметричних системах;
- д) простота проведення контролю для об'єктів різної форми;
- е) широкі можливості автоматизації контролю та використання його результатів, оброблених на комп'ютері, для їх фіксації, аналізу, а також керування ходом технологічного процесу.

Більшість цих переваг дозволяє реалізувати апаратура або пристрої, які можуть бути побудовані на базі серійних блоків і систем. Такі пристрої

називають системами промислового телебачення та телевізійної автоматики. Крім того, деякі спеціальні пристрої, що створюють на виході видиме зображення, по суті побудовані на основі принципів, характерних для телевізійної техніки.

4.8 Інтерференційні методи контролю

Відмінною рисою інтерференційних методів оптичного контролю є взаємодія двох потоків світла. До інтерференційних методів належать: інтерферометричний, дифракційний, фазово-контрастний, рефрактометричний та голографічний. Вони ґрунтуються на зміні енергії та фази вторинних потоків після взаємодії з контрольованим об'єктом, його елементами або частинами. Оскільки величиною, що визначає набіг фази, є довжина хвилі, інтерференційні методи забезпечують вимірювання та контроль параметрів об'єктів до часток довжини хвилі. Зазвичай похибка або роздільна здатність такого роду апаратури становить. У зв'язку з високою роздільною здатністю та чутливістю цих методів велика увага повинна бути приділена незмінності умов контролю, у тому числі і параметрів навколишнього середовища. Інтерференційні методи успішно застосовуються для високоточного вимірювання геометричних розмірів, фізико-хімічних властивостей (насамперед оптичних), рідше – для дефектоскопії та контролю внутрішньої будови виробів.

4.9 Голографічні методи

Унікальні властивості лазерного випромінювання зробили реальним застосування голографічних методів у контролі, що не руйнує. Як відомо, голограма – це отримана певним чином фотопластинка із зображеними на ній інтерференційними лініями, при освітленні якої когерентними коливаннями

формується потік світла, що створює видиме об'ємне зображення сфотографованого об'єкта. Безпосереднє використання властивостей фіксованого тривимірного зображення виробу в контролі, що не руйнує, має таке ж значення, як звичайна фотографія, - отримання і зберігання документа, але містить набагато більшу інформацію, оскільки зображення має об'ємність і розподіл світла зареєстровано з точністю до часткою його довжини хвилі.

Голограми можуть бути одержані фізичним шляхом за допомогою оптичних установок або розрахунковим шляхом за допомогою комп'ютера та спеціальних графічних пристроїв (бінарні голограми). Так як голограма виходить за рахунок інтерференції світлових хвиль, що пройшли різний шлях до фотоплівки, що реєструє, необхідні висока когерентність, монохроматичність і стабільність джерела світла, що особливо істотно при великих різницях ходу променів. Найкращі з сучасних лазерів можуть забезпечити виконання необхідних умов на відстані до 30 м. Дві інтерференційні лінії на голограмі знаходяться на відстані $l_u = \lambda / (\sin \alpha / 2)$, де α – кут між напрямками сигнального та опорного променів. Оскільки найменша відстань між лініями на голограмі приблизно дорівнює довжині світла, тобто у видимому діапазоні 0,35-0,75 мкм, то плівка для голографії повинна мати високу роздільну здатність - 2000-5000 ліній/мм. Робота з такою плівкою потребує великої освітленості та значного часу експозиції. Під час експозиції необхідно витримувати постійні показники навколишнього середовища, оскільки їх зміни не повинні призводити до появи прирощень електричної довжини одного з променів більш ніж на чверть довжини хвилі, інакше структура інтерференційних смуг порушуватиметься (змащуватиметься, розпливатиметься). Зазначені особливості ускладнюють широке впровадження голографічних методів у руйнівному контролі якості.

Розрахункові (бінарні) голограми отримують шляхом обчислення для конкретних умов контролю результуючих амплітуд та фаз у площині голограми на комп'ютері. Отримані значення виводяться на будівельник

графічного зображення або передаються каналами зв'язку приймальний центр. Потім зображення перефотографується в зменшеному масштабі так, щоб лінії голограми на фотографії знаходилися на відстанях, які можна порівняти з довжиною хвилі світла, що відновлює зображення. Розрахунковий спосіб створення голограм дозволяє мати їх для ідеальних об'єктів, які реально не існують, виготовляти фільтри з заданими властивостями і передавати голографічну інформацію. Особливо ефективно для цілей неруйнівного контролю застосування розрахункових голограм, коли виріб повинен мати форму, що точно описується математичними формулами (циліндр, сфера, параболоїд і т. д.) при малих допустимих відхиленнях від неї.

4.10 Пристрій та принцип роботи вимірювального мікроскопа

До складу типового мікроскопа входять: освітлювач, предметний столик, що переміщається щодо корпусу мікроскопа, та збільшувальна частина. Найбільш складні мікроскопи для вимірювальних цілей містять електронні системи цифрового відліку, а також перетворюючу телевізійну установку для передачі та обробки зображення. Як правило, мікроскоп працює з джерелом штучного світла, що створює велику освітленість контрольованого об'єкта необхідного спектрального складу та напрямки світла.

Вихідний світловий потік найчастіше має вигляд паралельного пучка променів або спеціальну будову (східного або розбіжного, зі світлими або темними місцями, з різними мітками тощо).

Збільшувальна частина мікроскопа призначена для отримання зображення, зручного для оперативного аналізу під час контролю різних об'єктів у вибраному режимі. Типовий варіант побудови збільшувальної системи мікроскопа зображено на рис. 4.8. Для розширення можливостей у

Таким шляхом проходить світловий потік під час роботи у світлому полі, коли кут падіння променів світла θ близький до нуля. При роботі в темному полі, коли добре відображає полірована поверхня здається чорною, світловий потік через периферійну частину лінзи L_4 потрапляє на дзеркало Z_3 і далі на дзеркало Z_6 , зване епіоб'єктивом і виконане у вигляді круглого кільцеподібного металевого дзеркала з внутрішньою параболічною поверхнею, що відображає, формує ($\theta \neq 0$) Висвітлення. Центральна частина світлового потоку в цьому варіанті висвітлюється діафрагмою D_3 , що перекривається, щоб не було прямого відображення світла в об'єктив. Хід променів світла після взаємодії з об'єктом, що контролюється, в обох випадках однаковий.

Промені світла, що несуть корисну інформацію як зображення ділянки контрольованого об'єкта КО, відбиті від дзеркала Z_4 , через окуляр ОК спостерігаються оператором. Якщо прибрати дзеркало Z_4 , то промені потрапляють у фотоокуляр L_8 , який після відображення їх від дзеркала Z_5 формує зображення на пластині ПЛ, яка може бути матовим екраном при роботі в проєкційному режимі або фотопластинкою при фотографуванні. Отримання чіткого зображення забезпечує його фокусування шляхом переміщення об'єктива ОБ в напрямку лінії візування (головної оптичної осі) за допомогою ручки фокусування РФ, пов'язаної з мікрометричним відліковим пристроєм відліку відстані. Безпосередньо в об'єктиві, окулярі або встановлюється вимірювальна сітка ВС з поділами, ціна яких залежить від збільшення мікроскопа. Ця сітка забезпечує проведення відліків довжини в площині перпендикулярної лінії візування і може бути проградуєвана по еталонах або за допомогою мікрометричних відлікових пристроїв.

Предметний столик ПС є базою, на якій розміщується контрольований об'єкт КО, для чого до нього надається набір приладдя: спеціальні затискачі, пружинні тримачі, додаткові кільця та насадки тощо. здійснюється ручками

відповідних координатних переміщень РП, пов'язаних із предметним столиком ПС відліковими мікрометричними пристроями.

Освітлювальна частина мікроскопа ОС₂ для роботи в минулому освітленні виконана у вигляді лампи розжарювання об'єктива, фільтра та діафрагми, укладених у загальний корпус. Такий освітлювач може легко розміщуватись у необхідному положенні при оптимальному куті падіння світла та фіксувати його.

Залежно від розв'язуваної задачі контролю якості мікроскоп можна використовувати для роботи в наступних режимах освітлення: у світлі різного напрямку, що проходить і відображається; з білим чи монохроматичним світлом, довжина хвилі якого визначається фільтрами; з поляризованим та неполяризованим світлом, при освітленні світловим потоком різної структури, що створюється масками. У частині мікроскопа, де відбувається обробка світлового потоку після взаємодії з об'єктом, що контролюється, також можливі різні режими роботи, застосування яких доцільно з урахуванням його оптичних властивостей. Оптична система більшості мікроскопів зазвичай налагоджується на певну довжину хвилі (частіше 0,56 мкм), тому для отримання зображень найкращої якості використовують монохроматичне світло. Зазначимо найпоширеніші режими роботи мікроскопів.

Основний режим роботи мікроскопа – освітлення білим світлом. Для отримання зображень, на яких чітко виділяється інформація про відхилення об'єкта від норми, встановлюють різні світлофільтри, причому смуга їх пропускання може бути близькою до довжини хвилі, що несе корисну інформацію, або, навпаки, є додатковою до неї, що підвищує контрастність зображення і різко виділяються сторонні елементи і деталі: дефекти, різні включення і т. п. Робота в темному полі особливо ефективна щодо поверхневих дефектів або при контролі поверхонь з особливими оптичними властивостями, а також при контролі прозорих об'єктів.

4.11 Методики голографічного контролю

Для проведення оперативного контролю необхідно проводити порівняння кількох предметів чи змін, які у одному й тому предметі. З цією метою розроблено різні методики голографічного контролю. Найчастіше контроль ведуть шляхом отримання інтерференційної картини на об'єкті (метод «живих смуг») або методом подвійної експозиції (метод «заморожених смуг»).

Якщо в область, де знаходиться відновлене зображення, помістити сфотографований на голограму предмет або подібний до нього, то голографічне зображення і предмет через точного збігу світлових хвиль здаватимуться єдиним цілим, що має підвищену яскравість і контрастність. При суміщенні голографічного зображення виробу, що має номінальні параметри (контрольний зразок), з випробуванням збіг амплітуд і фаз в деяких місцях буде порушено через відхилення його параметрів від номінальних значень і на випробуваному виробі з'являться інтерференційні смуги, викликані різницею ходу когерентних та випробуваного об'єкта. Отримувана інтерференційна картина залежить від конкретних відмінностей голографічної копії контрольного зразка та реального виробу, що дозволяє легко та точно виявляти відхилення у випробуваному виробі від контрольного зразка.

Метод подвійної експозиції полягає у накладенні двох голограм фізичних зображень на одну плівку. В результаті відновлення такої складної подвійної голограми також виходить система інтерференційних смуг, що помітно виділяє ту область, де є відмінності в об'єктах, що експонувалися.

Голографічні методи виявилися ефективними для проведення неруйнівного контролю у таких випадках:

- а) контроль геометричних розмірів, оптичні властивості та виявлення дефектів у високоякісних напівфабрикатів та виробів шляхом порівняння з еталоном або розрахунковою голограмою;

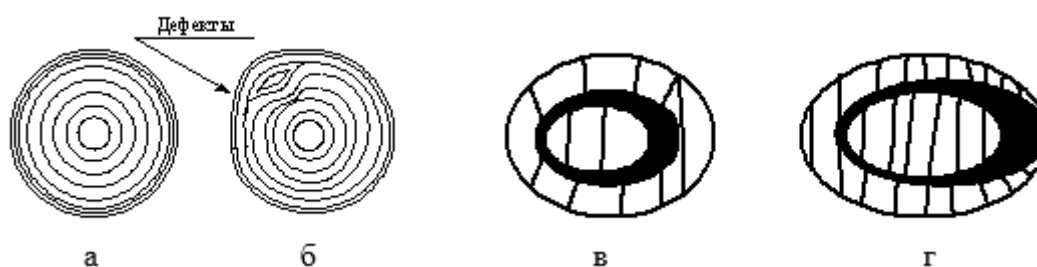
б) аналіз мікропереміщень та змін ділянок чи деталей об'єктів з часом. Такий аналіз проводиться шляхом порівняння зробленої раніше голограми об'єкта з його реальним станом. При цьому вдається визначити не лише невеликі зміни в геометричних та оптичних параметрах об'єкта, але й виявити незворотні зміни у вигляді мікротріщин та втомних змін;

в) контроль виробів у динамічних режимах, викликаних механічним навантаженням, нагріванням (охолодженням) або вібраційними навантаженнями. У всіх цих випадках відбувається зміна геометрії виробу та проводиться порівняння нового стану виробу з його колишнім топографічним зображенням. При навантаженні деформація в областях, ослаблених наявністю відхилень від норми або дефектів, виявляється дещо більшою, ніж у нормальних місцях, що призводить до викривлення інтерференційних ліній (рис. 4.9 б) та виявляє аномалії у виробі. Нагрівання або охолодження використовують при голографічному контролі виробів, що працюють при температурах, що змінюються, наприклад елементи і блоки радіоелектронної апаратури (рис. 4.9 в, г).

Цей вид контролю має великі перспективи, оскільки деформації від підвищення температури є надзвичайно малими. Найпростішим варіантом голографічного контролю об'єкта, що вібрує, при періодичному характері коливань є реєстрація голограми в процесі вібрації. Оскільки голограма формується протягом часу, набагато більшого періоду коливань вібруючої деталі, найбільший вплив на фотоплівку мають два її крайні положення, коли миттєві значення швидкості дорівнюють нулю. В результаті виходять дві голограми, накладені на одну плівку:

- контроль якості прозорих і напівпрозорих об'єктів, які важко відрізнити від фону, але призводять до зміни електричної довжини ходу променів.

- вивчення мікроструктури поверхні виробів, що визначає їхню якість. Низька якість поверхні випробуваного виробу в порівнянні з еталоном призводить до погіршення чіткості голограми і проявляється як вплив шуму.



а) – до механічного навантаження; б) – після навантаження; в) – потужного транзистора за нормальної температури; г) – після нагрівання

Рисунок 4.9 – Приклади голографічних інтерферограм за наявності дефектів

Таким чином, голографічні методи дають можливість проводити контроль з високою роздільною здатністю, але через підвищені вимоги до точності виготовлення та якості поверхні порівнюваних виробів, складності контролю застосовуються для перевірки дрібносерійної продукції.

4.12 Дослідження дислокацій

Як добре відомо, продуктивність електронних пристроїв, їх якість та технічні параметри залежать від наявності дефектів та дислокацій у підкладках [25]. У роботі [26] показано кореляцію зниження квантової ефективності підкладок Si: GaAs для світловипромінювальних діодів і показано, що лінії дислокацій можуть виступати як центри безвипромінювальної рекомбінації. Вплив дислокацій та дефектів упаковки на продуктивність GaAlAs/GaAs світлодіодів та деградацію лазерів на основі ZnSe показано у роботі [27, 28].

У зв'язку з цим до щільності дислокацій висуваються високі вимоги. Для створення електронних приладів та фотоелементів на основі арсеніду галію потрібні підкладки із щільністю дислокацій, що не перевищують 10^4 - 10^5 см⁻² (виготовлених із злитків, вирощених за методом Чохральського з рідинною герметизацією діаметром понад 100 мм.).

Дислокації, які формуються в монокристалах, виникають у результаті двох факторів [29]. По-перше, необхідні електрофізичні властивості напівпровідникових матеріалів у процесі вирощування досягаються шляхом введення відповідних домішкових добавок в процесі зростання монокристалів (легування) це призводить до виникнення широкого класу точкових дефектів [30]. Другим фактором є порушення термодинамічного режиму вирощування, що виникає внаслідок недосконалості технології обладнання та технологічних режимів, що призводить до зростання дефектів.

Як відомо, GaAs кристалізується у структурі цинкової обманки. У цій структурі утворюються два типи 60-градусних дислокацій, що позначаються зазвичай як α і β дислокації, відповідно до того, чи завершується чи вставлена площина решітки атомами галію або атомами миш'яку.

Щільність дефектів у монокристалах є контрольованим параметром, значення якого визначається нормативними документами та вказується при здачі продукції замовнику. Існує ряд методів визначення густини дислокацій, наприклад такі як [31, 32]:

- метод вимірювання постійної Холла та електропровідності, які здійснюються в процесі одного експерименту на тих самих зразках і дозволяють визначати концентрацію носіїв заряду та їх рухливість

- метод ємнісної спектроскопії дозволяє з дуже високою точністю фіксувати зміни зарядового стану присутніх центрів у процесі їхньої перезарядки;

- методи, засновані на вимірі параметрів, чутливих до тонким змінам характеру міжатомних зв'язків та періодичності будови кристалічних ґрат у

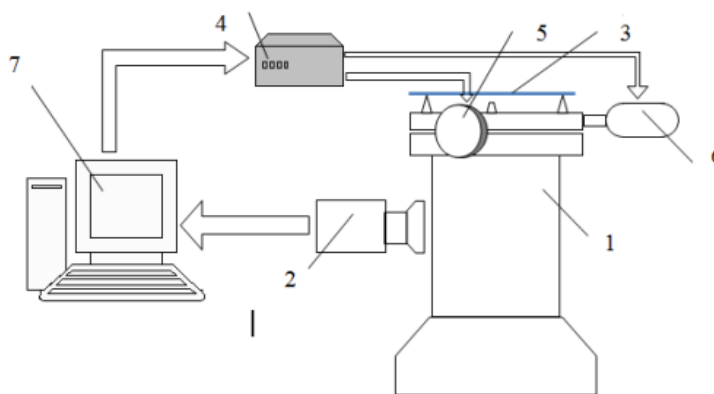
безпосередній близькості від дефекту, такі як метод електронного парамагнітного та ядерного магнітного резонансу (ЕПР та ЯМР);

- прецизійні методи вимірювання щільності та періоду решітки;
- методи візуалізації дислокацій [33] у напівпровідниках, які можуть бути класифіковані як методи виявлення місць виходу дислокацій на поверхню кристала за допомогою вибіркового травлення та спостереження в оптичному мікроскопі та методи спостереження дислокацій в обсязі кристала.

4.13 Вимірювання щільності дислокацій в пластинах арсеніду галію

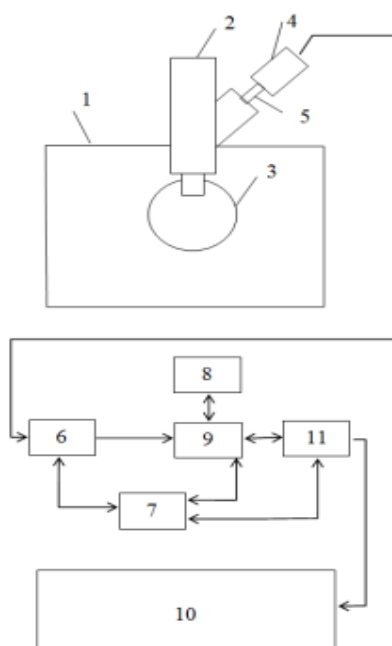
Розглянемо методику вимірювання щільності дислокацій, в основі якої травлення підкладки та виявлення дислокацій методом світлової мікроскопії.

Структурна схема пристрою "ТВ-Дислок 1" вимірювання щільності дислокацій в арсеніді галію [34] наведено рис. 4.10.



- 1 –оптичний мікроскоп МП-4; 2 – відеокамера; 3 – досліджувана пластина, 4 – блок управління двигунами, 5 – двигун переміщення по осі X, 6 – двигун переміщення по осі Y, 7 – персональний комп'ютер.

Рисунок 4.10 – Структурна схема пристрою визначення густини дислокацій у підкладках арсеніду галію та кремнію «ТВ-Дислок 1»



1 – рухливий предметний стіл; 2-оптичний мікроскоп
 МП-4; 3- досліджуваний зразок; 4 -ПЗЗ відеокамера; 5 – об'єктив; 6 -
 відеодекодер; 7 - пристрій виділення зони інтересу; 8 – оперативна пам'ять,
 9 – контролер пам'яті, 10 - вузол розпізнавання та обчислення; 11 – шинний
 Інтерфейс.

Рисунок 4.11 – Структурна схема каналу введення відеосигналу пристрою
 "ТВ-Диск 1"

Завдання визначення густини дислокацій телевізійним методом вимагає високої якості зображення одержуваного з об'єктива мікроскопа. Була використана CCD відеокамера та плата за введення інформації виробництва National Instrument. Структурна схема підключення відеокамери [35] наведено на рис. 4.11.

Арсенід галію є матеріалом із досить високим рівнем дислокацій. Для злитків GaAs, вирощених методом Чохральського з рідинною герметизацією, щільність дислокацій лежить у межах від 10^{-4} см⁻² до 10^{-6} см⁻². Це накладає певні складнощі для автоматизованих методів вимірювання густини дислокацій.

На відміну, наприклад від кремнію, де мікродфекти, як правило, рознесені по площі (за винятком «свір» дефектів), дислокації в GaAs можуть розташовуватися або у вигляді одиночних дислокацій, або у вигляді груп. Приклад одиночних та групових дислокацій, отриманих з використанням оптичного мікроскопа МП-4, показаний на рис. 4.12.

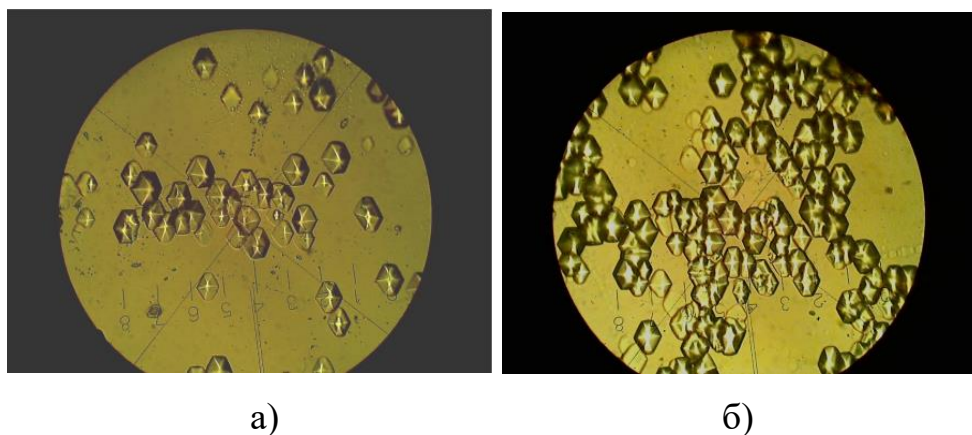


Рисунок 4.12 – Поодинокі (а) та групові (б) дислокації у пластині GaAs.

Оптичний мікроскоп МП-4. Збільшення 400 разів

Таким чином, удосконалений метод має визначати щільність дислокацій у підкладці GaAs розташованих як у вигляді одиночних дислокацій, так і у вигляді груп з використанням телевізійного способу визначення густини дислокацій.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ВНУТРІШНІХ ШУМІВ ПРИ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯХ В ФОТОПРИЙМАЧАХ

5.1 Електронні флуктуації в напівпровідниках

Дослідження електричних флуктуації в напівпровідниках і напівпровідникових приладах, є основою розуміння властивостей напівпровідникових матеріалів та приладів. Уявлення про природу цих флуктуації можуть бути використані як засіб вивчення фізики напівпровідникових приладів і матеріалів. Зокрема, вони дозволяють більш чітко виявити деякі фізичні явища і точніше визначити фізичні параметри матеріалів і приладів в порівнянні з іншими методами.

Теорія теплових і дробових шумів досить повно розроблена стосовно широкої класу напівпровідників отримала експериментальне підтвердження, то такого висновку ще неможливо зробити по низькочастотному шуму. На основі численних даних експериментального дослідження внутрішніх шумів напівпровідників в області низьких частот можна відзначити наступні властивості:

- слабка температурна залежність;
- сильна залежність рівня від стану поверхні реального приладу;
- залежність шуму від механічних деформацій, щільності дислокації і дефектів структури.

5.2 Вплив типу та локалізації дефектів в напівпровідниках на їх характеристики

Випуск високоякісних напівпровідникових пристроїв (НПП) потребує використання високоефективних і водночас високочутливих діагностуючих методів, які б дозволяли виявляти як саму присутність дефекту, так і можливе місце його локалізації, особливо при корекції технологічного циклу.

Методи контролю якості можна розділити на дві основні групи: методи руйнівного контролю – під час контролю піддослідний прилад підлягає повному або частковому руйнуванню (визначення часу роботи приладу на відмову, обстеження внутрішньої структури приладу, яке зумовлює руйнування приладу тощо) та методи неруйнівного контролю задача яких полягає в прогнозуванні якості чи надійності НПП без внесення, або із незначним внесенням, змін у характеристики досліджуваного пристрою. Останні ефективніші і економічно обґрунтовані, оскільки дозволяють проводити повний прохідний контроль вихідних пристроїв на етапі виробництва. Серед неруйнівних методів контролю можна виділити такі групи: візуальний контроль, ультразвукова дефектоскопія, інфрачервоне сканування, рентгеноскопія, форсоване випробування та дефектоскопія за електричними характеристиками НПП.

Серед перерахованих методів найбільш ефективними вважаються методи виявлення дефектів за відхиленнями електричних характеристик НПП таких, як вольт-амперні характеристики, передавальні характеристики, нелінійність, рівень власних шумів тощо. Найбільша чутливість і точність діагностики стану НПП досягається при використанні власних шумів як інформативного параметра. Дефекти, що підвищують рівень власних шумів, значно впливають на надійність НПП, позаяк шуми утворюються при проходженні постійних струмів (крім теплових) через робочі області НПП, в

інших випадках дефекти знаходяться поза робочими областями і значного впливу не мають.

В основному дослідження впливу дефектності структури НПП зводилися до виявлення лише підвищення рівня шумів (коефіцієнта шуму), через що майже недослідженим залишається вплив типу і локалізації дефектів на шумові параметри НПП, тобто втрачається цінна інформація, необхідна для побудови діагностуючих алгоритмів.

5.3 Контактні дефекти

Причиною контактних дефектів є недостатня міцність термокомпенсаційних з'єднань, недостатня адгезія алюмінієвих контактних площадок до поверхні напівпровідникової структури, а також поява небажаних хімічних з'єднань у місцях контакту різних металів. З'єднання можна представити великою кількістю “мікроконтактів”, які зумовлені проникненням атомів металів на стику. Якість цих контактів неоднакова, тому вони можуть замикатися і розмикатися, створюючи при цьому флуктуації струму. Чим більша кількість ненадійних контактів, тим більша інтенсивність контактних шумів. При значних відшаровуваннях контактної площадки можлива поява стрибкоподібної зміни струмів через контакт і відповідно поява шумів, які виникають завдяки проходженню цих струмів.

5.4 Поверхневі дефекти

Поверхневі дефекти утворюються за рахунок металізації або утворення іонопровідних каналів (через наявність води чи інших провідних хімічних речовин). При їх виникненні збільшення шуму відбувається, в основному, за рахунок неідеальності утворених провідних каналів через надто малу їх

товщину. Це зумовлює флуктуацію струму через канал і відображається як підвищення того чи іншого шумового струму. Спектральна густина шуму подібна до спектральної густини контактних шумів, крім випадків виникнення імпульсно-розрядних каналів, коли можливе підвищення і високочастотних шумів.

5.5 Приповерхневі дефекти

Більшість вчених схиляється до думки про те, що надлишкові низькочастотні шуми, в основному, зумовлені станом приповерхневого шару напівпровідника. Обрив кристалічної решітки напівпровідника, окислення, вихід дислокацій назовні ті передумови, які зумовлюють виникнення об'ємного заряду і викривлення енергетичних зон на поверхні кристала та виникнення інверсного шару протилежного за провідністю до провідності основного об'єму напівпровідника. За рахунок заповнення і вивільнення відповідних приповерхневих енергетичних рівнів носіями заряду - електронами і дірками, виникають і щезають поверхневі заряди. Час заповнення і вивільнення може продовжуватися від декількох мікросекунд до годин. Чим далі розміщений поверхневий рівень, тим більший час заповнення або вивільнення. Такі фізичні процеси викликають помітне підвищення низькочастотного шуму і нестабільності НПП. У приповерхневому шарі часто може появитися іонна провідність, спричинена наявністю чужорідних атомів газу (іонізація атомами залишкового газу в об'ємі корпусу НПП), чи рідини (під час хімічної обробки), яка зумовлює збільшення зворотних струмів р-п переходів і може бути виявлена при попередній діагностиці. Типовою характеристикою цих дефектів є їхня всеохоплюваність, тобто, якщо вони і виникають, то виникають на всій поверхні НПП (крім підконтактних площ) і не можна твердити про локалізацію їх у тій чи іншій області. Також можна

відмітити, що вони більш технологічні, позаяк більшість НПП при використанні однієї і тієї ж технології будуть включати дані дефекти майже однаковою мірою.

5.6 Внутрішньо-об'ємні дефекти

Дислокації решітки напівпровідника відповідають за виникнення різного роду генераційно-рекомбінаційних центрів і пасток, чим викликають надлишковий низькочастотний шум. Натомість дефекти, зумовлені чужорідними включеннями в об'ємі напівпровідника, стають першопричиною виникнення перерозподілу інтенсивності потоків електронів і, як наслідок, появляються області із значним збільшенням густини струму. Це призводить до локального підвищення їх температури і підвищення впливу незначних дефектів в областях із підвищеним потоком електронів. Ще більший перерозподіл потоків електронів відбувається при локальному пониженні р-п переходу або утворенні провідного каналу. Ці фактори можуть суттєво підвищити рівень низькочастотних шумових струмів, які протікають через згадані внутрішньо-об'ємні дефекти.

5.7 Моделювання процесу реєстрації оптичного сигналу

Проведено фізико-математичне моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання на тлі внутрішніх завад фотоприймачів.

У напівпровідникових приладах мають місце тепловий шум, дробовий шум і низькочастотний шум.

Шуми напівпровідників в області низьких частот в значній мірі залежать від механічних деформацій, щільності дислокації і дефектів структури.

При використанні фотоприймачів спектральну густину потужності сумарних шумів визначається, як наведено на рис. 5.1.

Порогова чутливість фотоприймачів визначається, як мінімальний потік, що викликає на виході приймача сигнал, що дорівнює середньоквадратичному значенню шумів приймача.

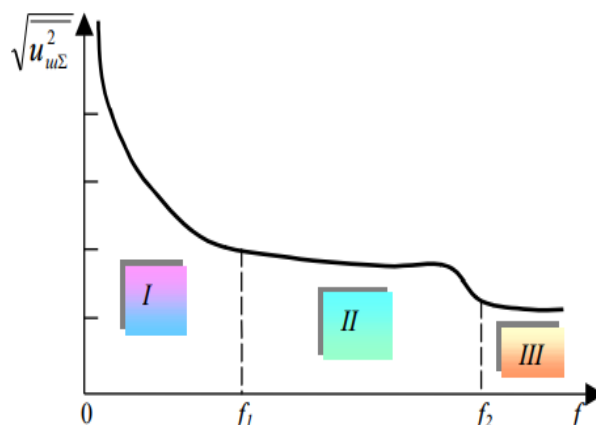


Рисунок 5.1 – Зразковий вид спектральної густини потужності сумарних шумів типового фотоприймача

Проведемо моделювання фізико-математичне моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання на тлі внутрішніх завад фотоприймача, які не мають дефектів (рис.5.2), та фотоприймачів, які мають дефекти (рис.5.3).

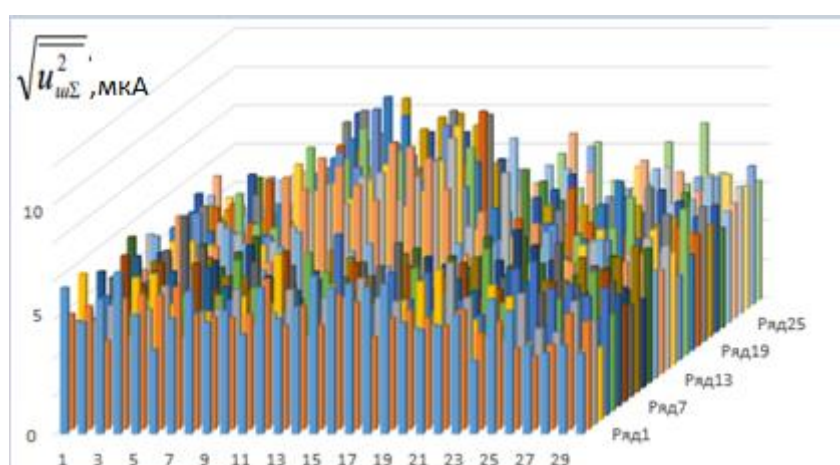


Рисунок 5.2 – Реєстрація оптичного випромінювання фотоприймачем на тлі внутрішніх шумів, які не мають дефектів

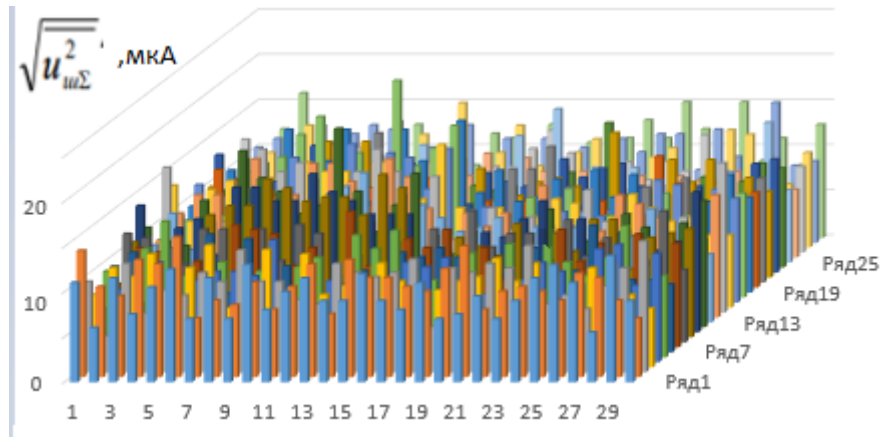


Рисунок 5.3 – Реєстрація оптичного випромінення фотоприймачем на тлі внутрішніх шумів, які мають дефекти

Як можемо бачити, напруга внутрішніх шумів фотоприймача на основі арсеніду галію становлять в середньому 5 мкА, коли напруга корисного сигналу в середньому становить 10 мкА (рис. 5.2). При наявності дефектів в кристалах, середнє значення напруги внутрішніх шумів складатиме порядку 10 мкА (припускаючи їх ріст на у 2 рази) (рис. 5.3). У такому випадку виявляюча здатність фотоприймача значно зменшується та призводить до неможливості розпізнання корисного сигналу.

ВИСНОВКИ

Під час виконання даної передатестаційної роботи я описав суть оптико-електронної системи, методи їх роботи, їх класифікацію, навів її основні параметри та характеристики, а саме:

- чутливість або крутість перетворення S ;
- постійна часу (інерційність) t ;
- рівень шумів $U_{ш}$ чи $I_{ш}$;
- порогова чутливість $P_{пор}$;
- питома виявна здатність D^* ;
- динамічний діапазон лінійності D ;
- темновий опір R_t .
- ефективна фоточутлива площа S_{ef} ;
- робоча напруга живлення U_p ;
- максимально допустима напруга U_{max} ;
- максимальна потужність розсіювання P_{max} ;

Кожний параметр та характеристику описав та навів необхідні для аналізу та розрахунку формули.

Оптико-електронними системами називають системи та пристрої, до складу яких входять два типи вузлів, а саме оптичні та електронні, при чому вони слугують для виконання основних задач даного приладу (системи).

Дефектоутворення в напівпровідниках – процес утворення дефектів кристалічної ґратки напівпровідника: вакансій, атомів основної речовини, що переходять у міжвузля, а також інших дефектів. Такі дефекти значно змінюють основні фізичні властивості напівпровідників, у першу чергу, час життя та зворотні струми приладів.

Було розглянуто фотоприймачі на основі арсеніду галію, методи їх отримання.

Описав чинники, що впливають на структурні порушення та відхилення від площинності підкладок GaAs та методи їх контролю.

Розглянув методи оптичного контролю матеріалів.

Оптичні методи контролю якості можна умовно поділити на наступні групи:

- візуальний та візуально-оптичний методи характеризуються тим, що результати контролю найбільшою мірою визначаються особистими якостями оператора: його зором, умінням та досвідом. Візуальні методи контролю якості – найбільш доступні та прості, тому мають велике поширення;

- фотометричний, денситометричний, спектральний та телевізійний методи в основному будуються на результатах апаратурних вимірювань та забезпечують меншу суб'єктивність контролю, їх застосування за складом контрольованих операцій ближче до роботи з електронно-вимірювальними приладами;

- Интерференционный, дифракционный, фазовоконтрастный, рефрактометрический, нефелометрический, поляризационный, стробоскопический и голографический методы використовують хвильові властивості світла і дозволяють проводити неруйнівний контроль об'єктів з чутливістю до десятих часток довжини хвилі джерела випромінювання.

На прикладі розглянув одиночні та групові дислокації в пластинах галій арсеніду.

Розглянув фотоприймачі GaAs та описав їх структурні порушення підкладок. Змодельовав вплив дефектів на внутрішні шуми та виявляючу здатність фотоприймачів.

У наступній роботі планується більш детально розглянути процеси впливу дефектів на виявлячу здатність фотоприймачів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Барский, А.Г. Оптико-электронные следящие системы / А.Г. Барский. - М.: Логос, 2009. – 200 с.;
2. Данилина, Т. И. / Процессы микро- и нанотехнологии / Т. И. Данилина, К. И. Смирнова. // Учебное пособие – Томск: В–Спектр, 2004. – 259 с.;
3. Астайкин А.И. Основы оптоэлектроники : учеб. пособие / А.И. Астайкин, М.К. Смирнов. – М. : Высш. шк., 2007. – 277 с.;
4. Chroneos A., Londos C., Sgourou E.N., Pochet P. Point defect engineering strategies to suppress A-center formation in silicon // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. № 24;
5. Розенштер Б., Винтер Б. Оптоэлектроника. - М.: Техносфера, 2004. – 592 с.;
6. Optical Methods in Engineering Metrology. Ed. D.C. Williams. Springer, 2012. 477 p.;
7. Potts. H. Annealing and Arsenic Overpressure Experiments on Defects in Gallium Arsenide/ H. R. Potts, G. L. Pearson // J. Appl. Phys. – 1966. – v. 37. – p. 2099– 2105;
8. Seebauer E. G. Oxidation and annealing of GaAs (100) studied by photoreflectance/ E. G. Seebauer // J. Appl. Phys. – 1991. – v. 69. – p. 943– 948;
9. Goldstein B. Diffusion in Compound Semiconductors/ B. Goldstein// Phys. Rev. – 1961. – v. 121. – p.1305 – 1311;
10. Nishizawa J. Nonstoichiometry of Te-Doped GaAs / J. Nishizawa, H. Otsuka, S. Yamakoshi, K. Ishida. //Jap. J. Appl. Phys. . – 1974. – v. 13. – p.46 – 52;
11. S. Y. Chiang. Properties of vacancy defects in GaAs single crystals / S. Y. Chiang, G. L. Pearson //J. Appl. Phys. – 1975. – v. 46, p. 2986 – 2992.;

12. Fitouri H. Surface analysis of different oriented GaAs substrates annealed under bismuth flow/ H. Fitouri, I. Moussa, A. Rebey, B. El Jani // *J. Crystal Growth*. – 2007. – v. 300. – P. 347– 352;

13. Caruso R. The Effect of Heat-Treatment on Photoluminescence Efficiency and Minority Carrier Lifetime in LEC - GaP (Zn , O)/ R. Caruso, A. R. Von Neida // *J. Electrochem. Soc.* – 1974. – v. 121. – P. 1332 – 1337;

14. Музыкант А.Ф. Влияние неплоскостности подложек на выход годных ИС после фотолитографии / А.Ф. Музыкант, В.С. Сотников // *Электр. Промышленность*. – 1986. - Вып. 8. - С. 66-68;

15. Yamagishi S. Anticlastic Bending of Silicon wafers induced during thermal cycling / S. Yamagishi // *Jap. J. Appl. Phys.* – 1973. - Vol.12, №11. - P. 1748-1752;

16. Gallagher P.J. High temperature deformation of gallium arsenide/ P.J. Gallagher, F. Weinberg. // *J. Crystal Growth*. – 1989. – v. 94. – P. 299– 310;

17. Yonenaga I. Dislocation dynamics in the plastic deformation of silicon crystals I. Experiments / I. Yonenaga, K. Sumino // *Phys. Status Solidi. A* . – 1978. – vol 50. – p685 – 693;

18. Тимошенко С.П., Гере Дж. Сопротивление материалов. / С.П. Тимошенко, Дж. Гере – М.: Мир. – 1976. – с. 669;

19. Doig P. Non-destructive stress measurement using x-ray diffraction methods./ P. Doig, P.E.J. Flewitt // *NDT International*. – 1978. – v. 11(3) . – P. 127– 131;

20. Dadgar A. Anisotropic bow and plastic deformation of GaN on silicon / A. Dadgar, S. Fritze, O. Schulz, J. Hennig, J. Bläsing, H. Witte, A. Diez, U. Heinle, M. Kunze, I. Daumiller, K. Haberland, A. Krost // *J. Crystal Growth*. – 2013. – v. 370. – P. 278– 281;

21. Устройство для контроля геометрических параметров полупроводниковых пластин: А.с. 1048305 СССР, G 01 В 7/28. / А.П. Оксанич,

А.Л. Анистратенко, В.К. Кирилюк, С.А.Спектор (СССР). - № 3447075/18-28;
Заявлено 01.06.82; Оpubл. 15.10.83, Бюл. № 38;

22. Установка контроля геометрических параметров полупроводниковых пластин: Свидетельство на промышленный образец № 19574 СССР. 300 / А.П.Оксанич, А.Л.Анистратенко, Б.И.Мовшиц (СССР). - Заявка № 35004, Заявлено 19.03.85; Зарегистр. 23.12.85;

23. Dash W. C. Copper precipitation on dislocations in silicon./ W.C.Dash // J. Appl. Phys. – 1956. – v. 27. – P. 1193–1195;

24. Mahajan S. Growth- and processing-induced defects in semiconductors/ S. Mahajan // Prog. Mater. Sci. – 1989. – v. 33. – 1–76;

25. Mahajan S. Growth- and processing-induced defects in semiconductors/ S. Mahajan // Prog. Mater. Sci. – 1989. – v. 33. – P. 1–76;

26. Roedel R. J. The Effect of Dislocations in $Ga_{1-x}Al_xAs:Si$ Light-Emitting Diodes / R. J. Roedel, A. R. Von Neida, R. Caruso, L. R. Dawson // J. Electrochem. Soc. – 1979. – v. 126(4) . – P. 627 – 633;

27. Dutt B. V. Stacking Faults and Substructure in $GaAs / (Ga, Al) As$ Heteroepitaxial Layers: I . Origin and Elimination / B. V. Dutt, S. Mahajan, R. J. Roedel, G. P. Schwartz, D. C. Miller, L. Derick // J. Electrochem. Soc. – 1981. – v. 128(7) . – P. 1573 – 1578;

28. Guha S. Role of stacking faults as misfit dislocation sources and nonradiative recombination centers in II-VI heterostructures and devices./ S. Guha, J. M. DePuydt, J. Qiu, G. E. Hofler, M. A. Haase, B. J. Wu, H. Cheng// J. Appl. Phys. Lett. – 1993. –v.63. – P. 3023 – 3026;

29. Мильвидский М.Г. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников./ М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. – М: металлургия, 1984. – 275 с;

30. Pekárek L. Dislocations in GaAs single crystals grown by the Czochralski method. / L. Pekárek // Czechoslovak Journal of Physics B. – 1968. –v. 18. – P. 1172-1176;

31. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М.: Наука, 1987. – 240 с;
32. Блад П. Методы измерения электрических свойств полупроводников: Пер. с англ. / П.Блад, Дж. В. Ортон. //Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 1. – С. 3—50;
33. Оксанич А.П. Промышленные методы и устройства исследования напряженно-деформированного состояния полупроводниковых материалов./ А.П. Оксанич. – Харьков: Институт монокристаллов, 2001. – 206 с;
34. Оксанич А. П. Усовершенствование метода и аппаратуры измерения плотности дислокаций в подложках кремния и арсенида галлия / А. П. Оксанич, С. Е. Притчин, В. А. Тербан. М. Г. Когдась // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2013. – Вып. 163. – С. 53–60;
35. Притчин С.Э. Автоматизированная система измерения плотности микродефектов в монокристаллическом кремнии и арсениде галлия. / С.В. Ткаченко, С.Э. Притчин, С.А. Сокун // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вып. 6 – с. 31-35.;