

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра електронних приладів та пристроїв

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Л.Д. Писаренко

“ \_\_\_ ” червня 2019 р..

## Дипломна робота

освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»

(назва ОКР)

з спеціальності : **6.050802- Електронні пристрої та системи**

Спеціалізація: **Електронні прилади та пристрої**

на тему: 3D-сканер

### Виконав:

студентка IV курсу, гр. ДЕ-51

Бевза Ірина Олегівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доц. к. т. н. Чадюк В. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

### Консультанти:

Нормоконтроль доц. к. т. н. Чадюк В. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент професор, д. т. н., проф. Ромашко В. Я.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2019

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет            Е л е к т р о н і к и  
Кафедра            Електронні прилади та пристрої  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр  
Спеціальність: 6.050802 – Електронні пристрої та системи  
Спеціалізація : Електронні прилади та пристрої

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.  
\_\_\_\_\_Л.Д.Писаренко  
«\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломний проект студенту  
**Бевзі Ірині Олегівні**

**1. Тема проекту «3D-сканер»**

і керівник проекту **Чадюк Вячеслав Олександрович**, доцент.

затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р., № 1405-с

**2. Строк подання студентом проекту «4» червня 2019 р.**

**3. Вихідні дані до проекту:** джерело випромінювання – лазерний діод з довжиною хвилі 540 нм та потужністю 100 мВт; приймач випромінювання – цифрова камера з роздільною здатністю 12 мегапікселей, відстань до сканованого об'єкта 0,3–1,0 м; точність вимірювання відстані до об'єкта 1 мм.

**4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по принципам побудови та функціонування 3D-сканерів; огляд науково-технічної літератури по основним складовим частинам сканера – лазер та цифрова камера; розробка структурної схеми пристрою конструкції камери, схеми алгоритму дії 3D-сканера; технологія виготовлення лазерного діода; Висновки; перелік використаної науково-технічної літератури.

**5. Перелік графічного матеріалу:** Структурна схема 3D-сканера, блок-схема роботи приладу, плакат з оптичною схемою.

**7. Дата видачі завдання** 20.02.2019 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по 3D-сканерам	20.03.2019	
2	Розробка структурної схеми пристрою. Вибір елементної бази	10.04.2019	
3	Розробка оптичної схеми сканера	20.04.2019	
4	Розробка методики вимірювань та побудови математичної моделі поверхні об'єкта	01.05.2019	
5	Аналіз технології лазерних діодів	10.05.2019	
6	Аналіз параметрів та характеристик цифрових камер	20.05.2019	
7	Оформлення пояснювальної записки	25.05.2019	
8	Підготовка креслення структурної схеми 3D-сканера та плакату з оптичною схемою	27.05.2019	
9	Подача пояснювальної записки на кафедру	04.06.2019	

Студент гр. ДЕ-51 \_\_\_\_\_ **І.О. Бевза**

Керівник проекту \_\_\_\_\_ **В.О. Чадюк**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**до дипломного проекту**

**на тему: «3D-сканер»**

Київ – 2019

# РЕФЕРАТ

## 3D-сканер

Дипломна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» спеціальності 171-Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. Бевза Ірина Олегівна. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-51. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 62 с., іл. 22.

**Ключові слова:** сканер, лазерний діод, цифрова камера, триангуляційний далекомір, шуми, модель поверхні, технологія виготовлення

**Короткий зміст роботи:** У дипломній роботі розглянуто різні типи контактних та безконтактних 3D-сканерів, призначених для побудови математичної моделі поверхні об'єкта. Для розробки вибрано оптичний безконтактний сканер на основі триангуляційного далекоміра. Проаналізовано основні види лазерів, які можна використати в далекомірі. Описана технологія виготовлення лазерних діодів. Зроблено огляд параметрів, характеристик та технологій цифрових камер. Описано структурну та оптичну схеми 3D-сканера. Розроблено методику побудови матричної моделі поверхні 3D-сканера.

## АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі представлено огляд науково-технічної літератури по контактним та безконтактним 3D-сканерам. Показано перспективи використання таких пристроїв для потреб людини (проектування, будівництво, археологія, медицина тощо). Проаналізовано основні види лазерів, які можна використати в далекомірі. Описана технологія виготовлення лазерних діодів. Зроблено огляд параметрів, характеристик та технологій цифрових камер. Описано структурну та оптичну схеми 3D-сканера. Розроблено методику побудови матричної моделі поверхні 3D-сканера. Розроблено конструкцію сканера, його структурну та оптичні схеми. 3D-сканер може забезпечити наступні параметри:

- глибину сканованої сцени 0,3–1,0 м ;
- точність вимірювання відстані до точок поверхні об'єкта не гірше 0,5 мм;
- роздільну здатність не гірше 0,5 мм;
- діапазон сканування 360°;
- час побудови матричної 3D-моделі об'єкта не більше 5 хвилин.

## S U M M A R Y

In this thesis the review of scientific and technical literature on contact and non-contact 3D scanners is presented. The prospects of using such devices for human needs (design, construction, archeology, medicine, etc.) are shown. The main types of lasers that can be used in range measurements are analyzed. The technology of manufacturing laser diodes is described. An overview of the parameters, characteristics and technologies of digital cameras is made. The structural and optical diagrams of a 3D scanner are described. The method of constructing a matrix model of 3D-scanner surface is developed. The design of the scanner, its structural and optical circuits is developed. The 3D scanner can provide the following options:

- depth of the scene is 0.3-1.0 m;
- the accuracy of measuring the distance to the points of the surface of the object is not worse than 0.5 mm;
- Resolution is not worse than 0.5 mm;
- Scan range 360°;
- Time to construct a matrix 3D object model for no more than 5 minutes.

# ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	10
ВСТУП.....	11
1 СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-СКАНУВАННЯ.....	12
1.1 Класифікація сучасних 3D-сканерів .....	12
1.1.1 Контактні сканери .....	13
1.1.2 Контактно-вимірювальні машини .....	15
1.1.3 Безконтактні сканери .....	16
1.1.3.1 Стереоскопічні сканери .....	22
1.1.3.2. Фотограмметричні сканери.....	23
1.2 Застосування сканерів.....	23
Висновки до розділу 1 .....	24
2 ОСНОВНІ СКЛАДОВІ 3D-СКАНЕРУ .....	25
2.1. Лазери .....	25
2.1.1 Типи лазерів .....	25
2.1.1.1. Газові лазери .....	26
2.1.1.2. Напівпровідникові лазери .....	29
2.1.1.3. Інжекційні лазери .....	29
2.1.1.4. Твердотільні лазери .....	32
2.1.1.5. Рідинні лазери .....	35
2.2. Цифрова камери.....	36
2.2.1 ПЗЗ та КМОН матриці .....	36
2.2.2 Характеристики цифрових камер .....	39
2.2.2.1. Чутливість цифрових камер .....	40
2.2.2.2. Просторова роздільна здатність .....	41
2.2.2.3. Шуми у цифровій камері .....	41
Висновки до розділу 2 .....	44
3 РОЗРОБКА 3D-СКАНЕРА.....	45

3.1. Розробка структурної схеми.....	45
3.2.Методика побудови моделі поверхні об'єкта .....	46
3.3. Технологічний процес виготовлення лазерних діодів .....	48
3.3.1. Вирощування напівпровідникових монокристалів .....	50
3.3.2.Механічна та хімічна обробка напівпровідникових пластин .....	51
3.3.3.Епітаксія .....	52
3.3.4.Окислення .....	55
3.3.5. Дифузія та іонна імплантація.....	55
3.3.6.Оптична літографія .....	56
3.3.7. Іонно-променева літографія .....	56
3.3.8. Травлення .....	57
3.3.9. Металізація .....	57
3.3.10. Приєднання виводів .....	57
Висновки до розділу 3 .....	58
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	60

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

3D – тривимірний;

CAD – автоматизована комп'ютерна розробка;

ЛД – лазерний діод;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком;

КМОН – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник;

К – градуси у кельвінах;

мВт – міліват;

мкм – мікрометр.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

З розвитком комп'ютерних технологій та їх швидким розповсюдженням у найвіддаленіші галузі людської діяльності, 3D-моделі реальних об'єктів починають використовувати все частіше, а 3D-сканери набувають все більшої популярності.

3D-моделі реальних об'єктів знаходять застосування у авіа- та машинобудуванні, архітектурі, ландшафтному дизайні, археології, реверс-інжинірингу, контролі якості та в системах, що використовують доповнену або віртуальну реальність. 3D-скануванням об'єкту є процес систематичного визначення координат точок поверхні сканованих об'єктів у просторі та перенесення даних про точки у спеціалізовану програму.

У сучасних 3D-сканерах застосовують різноманітні засоби для зняття інформації про поверхню об'єктів: починаючи від контактних щупів і закінчуючи камерами та проекціями структурованого світла.

Можливість застосування сканерів дозволила спростити, прискорити та автоматизувати процес моделювання об'єктів. Свого часу це призвело до росту цікавості відносно даної технології. За останні 15-20 років ринок виробників 3D-сканерів розширився, однак для широкої аудиторії дані прилади досі залишаються важкодоступними через дорогу вартість.

Метою даної дипломної роботи було визначено розробити конструкцію власного 3D-сканера з наступними параметрами:

- глибина сканованої сцени 0,3–1,0 м ;
- точність вимірювання відстані до точок поверхні об'єкта не гірше 0,5 мм;
- роздільна здатність не гірше 0,5 мм;
- діапазон сканування 360°;
- час побудови матричної 3D-моделі об'єкта не більше 5 хвилин.

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

# 1. СТАН РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-СКАНУВАННЯ

## 1.1. Класифікація сучасних 3D-сканерів

Останнім часом цифрові технології займають важливі місця у різноманітних сферах людської діяльності. Набирають популярності засоби віртуальної реальності. Стають все більш поширеними можливості автоматизації контролю якості. Набувають розповсюдження технології 3D- друк з різних матеріалів. У всіх цих галузях застосовують програми, що оперують 3D-моделями об'єктів. З розповсюдженням технологій, що потребують моделей реальних об'єктів, набувають популярності 3D-сканери, які дозволяють відносно швидко створити віртуальну модель реального об'єкту. Це привело до появи великої різноманітності 3D-сканерів на ринку техніки.

За типом взаємодії 3D-сканерів з об'єктом їх можна поділити на два типи – контактні та безконтактні сканери.

Контактні сканери являють собою пристрої, що фізично взаємодіють з об'єктом за допомогою щупів чи спеціальної контактної руки. Виходячи з даних, отриманих з сенсорів, що взаємодіяли з поверхнею досліджуваного об'єкту, формується цифрова модель поверхні цього об'єкту. До цього типу пристроїв відноситься частина промислових 3D-сканерів. Принцип їх дії полягає в обчисленні координат щупа, який взаємодіє з поверхнею. Контактні сканери можна поділити ще на три підтипи за механізмом дії.

У першому типі контактних сканерів каретка з вимірювальною рукою розміщена вертикально. В такому випадку поки рука рухається вздовж каретки – відбувається вимірювання вздовж осей. Даний підтип контактних сканерів найкраще підходить для звичайних плоских або рельєфних поверхонь.

Другий підтип 3D-сканерів являє собою маніпулятор з високоточними кутовими датчиками. Вони вимірюють лінійні та кутові переміщення вимірювальної руки сканера, що дозволяє досліджувати внутрішню поверхню об'єктів з невеликим вхідним отвором.

Третій тип сканерів поєднує у собі каретку та контактну руку. Поєднання першого та другого підтипів контактних сканерів дозволяє створювати 3D-моделі великих об'єктів зі складною формою, що можуть представляти собою поверхні на різних рівнях, у тому числі з отворами [1].

Саме точність обчислення координат сенсора та його якість визначають точність самого 3D-сканера.

Головною перевагою даного типу сканерів є можливість досліджувати внутрішню поверхню об'єктів, які мають поглиблення, отвори, тощо. Недоліком є те, що досліджувана поверхня може бути пошкоджена, якщо вона недостатньо тверда, або якщо матеріал є крихким і не витримає натиск щупа сканера. Також,

									Арк.
									12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

БР. 6.050802.051.002 ПЗ

даний тип сканера є відносно повільним, якщо порівнювати його з безконтактними сканерами.

Безконтактні 3D-сканери не потребують безпосереднього контакту з поверхнею досліджуваного об'єкта, і в свою чергу також умовно поділяються на два підтипи – активні та пасивні. В активних безконтактних сканерах для зчитування рельєфу поверхні досліджуваного об'єкта використовують лазерне чи рентгенівське випромінювання, а також ультразвук. У пасивних 3D-сканерах використовують цифрові зображення.

Лазерні датчики в активних сканерах замінюють собою механічний щуп контактних сканерів і обмежені у вимірах об'єктів, що мають внутрішню поверхню, на яку не потрапляє світло. Однак сканери, що використовують рентгенівське випромінювання чи ультразвук дають можливість створити 3D-моделі навіть тих об'єктів, що мають внутрішню поверхню.

Пасивні 3D-сканери використовують цифрову камеру та обмежені її роздільною здатністю.

Важливою частиною сканувальних систем є програмне забезпечення. Більшість виробників сканерів забезпечують також і власним програмним забезпеченням. Це дозволяє користувачам зручно застосовувати придбані пристрої. Однак з порівняно простими завданнями можуть справлятися і деякі широкодоступні програмні продукти, або навіть можливо самостійно розробити алгоритм та програму для сканування об'єктів.

Однією з таких загально доступних програм є редактор 3D-зображень Rhinoceros 3D. Вона є гібридом системи CAD та тривимірного редактора, який спочатку підтримував важільні контактні сканери MicroScribe. Процес роботи даної програми зі сканером доволі простий: користувач самостійно вказує точки, які з'являються у робочому вікні редактора. Програма дозволяє будувати криві, перетини та будувати об'ємні фігури по точкам, отриманим зі сканера [2].

Для самостійної обробки даних з безконтактних сканерів та обробки цифрових зображень можна використовувати систему MATLAB [3] або створювати програму для обробки зображень самостійно з використанням доступних засобів програмування.

### **1.1.1. Контактні сканери**

Найпростішими та, можливо, найдоступнішими моделями тривимірних контрактних сканерів є пристрої серії MicroScribe, вироблені американською компанією Immersion. Дана компанія колись була відома завдяки технології «force feedback», яка була використана в ігрових маніпуляторах. Сканери даної лінійки відносяться до механічних важільних. Зовні конструкція доволі проста: основа з шарніром, вимірювальна рука з датчиками на рухомих частинах та сенсор у вигляді стилусу.

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



Рис. 1.1. Сканер Immersion MicroScribe G2 [2]

Робота такого сканера полягає у тому, що користувач торкається стилусом поверхні об'єкту та водночас натискає кнопку, що дає команду зберегти координати точки. Також важливо, щоб досліджуваний об'єкт та сам сканер були жорстко закріплені, щоб максимально зменшити імовірність взаємних переміщень під час роботи.

Дані про координати точки передаються по команді оператора у програму, де буде побудована цифрова модель. Даний сканер сумісний з багатьма програмами, що працюють з 3D-моделями, наприклад, 3D Studio MAX, Rhinoceros 3D та інші. Цифрова модель поверхні буде сформована по точковій моделі об'єкта вже засобами програмного забезпечення – тривимірного редактора. Додатковим засобом для створення 3D-моделі об'єкту є створення розмітки. Нанесення додаткових ліній чи точок на досліджувану поверхню може допомогти оператору більш оптимально зняти точки об'єкту для побудови моделі [2].

До складу лінійки MicroScribe G2, який показано на рис. 1.1., входять чотири моделі, що мають інтерфейс RS-232 або USB 1.1. Вони відрізняються розміром робочої області та точністю. Моделі з індексом «X» мають удвічі кращу точність +/- 0,3 мм, а з індексом «L» - збільшена робоча область – 1,67 м, тоді як у моделях з індексом «G» - 1,27. Крім сканерів виробник постачає також додаткове обладнання та запчастини.

Більшість додаткового обладнання потрібна для більш надійної фіксації сканера чи об'єкту сканування – це різного роду штативи та регульовані універсальні підставки. Також виробник пропонує зовнішні кнопки та педалі для

									Арк.
									14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.002 ПЗ				

управління побудовою моделі. Серед запропонованих запчастин – наконечники стилусу різної форми для різного типу поверхонь.

Перевагою Immersion MicroScribe G2 є можливість створювати моделі об'єктів, що не перевищують об'єм сфери діаметром 1,3м, з точністю 0,2 мм.

Недоліками Immersion MicroScribe G2 є необхідність калібрувати прилад перед використанням, обов'язкова жорстка фіксація об'єкту та сканеру та тривалі (декілька годин) обробка та побудова 3D-моделі.

Однією з можливих модифікацій важільного типу контактних сканерів є поєднання їх з безконтактним лазерним сканером. Представниками даного типу сканерів є продукти компанії AXILA. У даному виді конструкції лазерний сенсор невеликого радіусу дії закріплений на кінці вимірювальної руки замість стилусу. Це дозволяє поєднати властивості важільного сканеру та можливість зчитувати дрібний рельєф досліджуваної поверхні [4].

Один з таких сенсорів призначений для так званої зворотної розробки («reverse engineering»), тоді як інший – для створення моделей м'яких і пористих поверхонь, таких як пінопласт, поролон та ін.

Програмне забезпечення також являє собою універсальну систему, що може бути інтегрована у будь яку комбінацію пристроїв. Можливе також використання сканера з програмами сторонніх компаній, з системами CAD та Microsoft Excel, при тому що базове програмне забезпечення надає майже весь діапазон необхідних функцій.

### **1.1.2. Контактно-вимірювальні машини**

Високоточні контактні 3D-сканери, які застосовують на виробництві, отримали назву контактні-вимірювальні машини (КВМ). Як приклад розглянемо КВМ типу GLOBAL Advantage фірми HEXAGON показаний на рис. 1.2. Дана лінійка налічує 15 модифікацій. За характеристиками 15 модифікацій цього приладу забезпечують:

- можливі габарити досліджуваного об'єкту, обмежені максимальним діапазоном розмірів по осям – від  $0.5 \times 0.7 \times 0,5$  м до  $2 \times 4 \times 1,5$  м;
- максимально допустиму масу досліджуваного об'єкту – від 227 до 6500 кг;
- роздільну здатність вимірювальної системи – 0,039 мкм та 0,08 мкм.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.2. Сканер GLOBAL Advantage [1]

Конструктивно даний тип контактної сканера складається з: нерухомого гранітного вимірювального столику та боковим приводом, що переміщують на повітряних підшипниках. Зміщення вимірювального щупа реєструється високоточними вимірювальними системами з високою роздільною здатністю.

Також сканери х даної лінійки підтримують два режими роботи: ручний та мікропроцесорний. Ручний режим забезпечує джойстик, що знаходиться на пульті керування. Мікропроцесорний режим роботи активується за допомогою клавіатури комп'ютера.

Програмне забезпечення також має декілька видів модифікацій для вирішення різного типу задач. Базова версія дозволяє операторові навчатися та використовувати всі потрібні функції, у тому числі калібровку щупів, або автоматичне розпізнавання геометричних елементів та використання їх для побудови графічного зображення об'єкту. Другою модифікацією програмного забезпечення є версія, що представляє собою базову версію та додаткову функцію вимірювання за CAD моделлю. Третя модифікація програми є розширеною другою версією, що додатково включає в себе функцію сканування, оцифрування моделі та зняття розмірів тонкостінних елементів досліджуваних об'єктів [5].

### 1.1.3. Безконтактні сканери

Безконтактні 3D-сканери для зчитування поверхні об'єкта використовують лазерне або рентгенівське випромінювання, а також ультразвук.

Для зчитування рельєфу віддалених об'єктів розроблені часопролітні лазерні 3D-сканери. Даний тип сканерів використовує лазерний далекомір для вимірювання відстані до точки об'єкта, використовуючи для розрахунку час прольоту лазерного імпульсу до об'єкту і назад.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Так як лазерний далекомір вимірює відстань тільки до однієї точки за один вимір, необхідно виконувати дискретний поворот вимірювальної осі пристрою для зчитування поверхні вимірюваного об'єкту. Для цього можуть використовувати обертове дзеркало. Сканери такого типу дозволяють вимірювати від 10 000 до 100 000 точок за секунду [6].

Типовим представником даного типу сканера є X300 компанії STONEX показаний на рис. 1.3. Конструктивно даний сканер складається з лазера класу 1М, що випромінює лазерні імпульси довжиною хвилі 905 нм. Діапазон дальності для даного приладу складає від 1.6 до 300 м у просторі 360 градусів горизонтально та 90 градусів вертикально (з допуском від -25 до +65 градусів).

Дана модель сканера обладнана Wi-Fi модулем, USB та Ethernet портами для обміну даними, а також має вбудовану карту пам'яті на 32 ГБайти. Увесь цей технічний комплекс загалом дає можливість керувати роботою сканера через Wi-Fi, користуючись спеціальним веб-інтерфейсом для телефонів або планшетів. За швидкості вимірювань до 40 000 точок/с STONEX X300 створює цифрову модель з похибкою 6 мм на відстані до 50 м та 40 мм до 300м [7].



Рис. 1.3. Сканер STONEX X300 [7]

Для сканування порівняно невеликих об'єктів, наприклад, тіла людини, розроблені прилади, які поєднують в собі сканування об'єкта лазерним променем та зйомку цифровою камерою. Розробником таких приладів є компанія Vitronic, яка має у своєму асортименті дві моделі сканерів – 3D Body scanner Vitus pro 8C та 16 C (рис.1.4).

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис.1.4. Vitronic 3D Body scanner [2]

Ці сканувальні системи мають у своєму складі відео- та фотокамери для зчитування форми та кольору відповідно. Час сканування залежить від заданої користувачем роздільної здатності: за роздільної здатності 2 мм – час сканування займає 21 секунду, а за 4 мм – лише 11 секунд [10].

Для сканування цілого людського тіла були також створені сканери компанією Cyberware. Їх сканери були створені на базі однотипних сканувальних модулів. Це дозволило компанії створити лінійку сканерів, призначених для сканування об'єктів різних розмірів, починаючи з невеликих об'ємів до півметра у діаметрі з більшою точністю, і закінчуючи великими комплексами, що були здатні сканувати фігуру людини з усіх боків за один прохід. До того ж використання окремих модулів давало змогу фірмі створювати сканери на замовлення. Усі сканери компанії Cyberware використовували інтерфейс SCSI, що забезпечували пропускну здатність, достатню для передачі інформації про всі 15 000 точок від кожного сканувального модуля.

Сканери фірми Cyberware випускаються на базі 3-х основних сканувальних модулів – моделей 15, 3030, WB4. Модель 15 використовують у невеликих настільних сканерах Desktop 3D Scanner Bundle. Даний прилад використовують для моделювання «в матеріалі». Як і його аналоги, він складається з поворотної платформи для сканованого об'єкту та самого сканувального модулю, закріпленого поруч. Сканування об'єкту відбувається за один повний поворот платформи (близько 17 секунд). Даний тип сканера не використовує для вимірів камеру. Порівняним недоліком є його нездатність зчитувати колір чи текстуру

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

БР. 6.050802.051.002 ПЗ

об'єкту. Максимальний допустимий розмір для сканування – 250 x 150 x 75 мм [11].

Для серійних сканерів Head & Face 3D Color Scanner, Model Shop Color 3D Scanner і Mini Model Shop Color 3D Scanner – були використані модулі типу 3030. Використання саме цієї моделі сканувального модуля дозволяє цим трьом сканерам створювати моделі з текстурою. Один вид одного ці три пристрої відрізняються лише різними типами поворотних платформ та кріпленнями модулів. Усі вони передають зображення у 8-бітному форматі на канал RGB. Допустима похибка при фіксації точок поверхні вкладає 0,1 мм.

Як зрозуміло з назви – Head & Face 3D Color Scanner – дана модель здатна створювати тривимірний портрет людини. Для цього сканер повинен бути встановленим на штатив перед людиною. Платформа налаштовується вручну і виставляється по висоті. При скануванні сканер повертається самостійно.

Інші дві моделі сканерів, що базуються на 3030 моделі сканувального модуля, майже ідентичні між собою і відрізняються тільки максимально допустимими розмірами об'єкту сканування. Mini Model Shop Color 3D Scanner здатний сканувати невеликі об'єкти до 1 м у діаметрі, з достатньо високою роздільною здатністю, тоді як Model Shop Color 3D Scanner розрахований на більш великі об'єкти.

Найкращим сканувальним модулем з використовуваних у Cyberware є WB4, який дозволяє будувати модель фігури людини, враховуючи текстуру.

Як можна побачити на рис. 1,5, сканер є циліндром висотою 2 м і діаметром 1,2 м. Під час роботи сканера модулі рухаються вертикально, тоді як програмне забезпечення зшиває масиви отриманих пікселів, тим самим створюючи модель поверхні.



Рис. 1.5. Сканер людського тіла моделі Cyberware WBX [2]

Перевагами сканерів Vitronic 3D Body scanner та Cyberware WBX є можливість сканувати відносно великі об'єкти, такі як тіло людини, а також те, що сканування об'єкту займає менше 30 секунд;

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До недоліків цих сканерів можна віднести необхідність обробки моделей, отриманих зі сканерів, та висока вартість приладів та пакетів програмного забезпечення для обробки результатів після сканування.

Інший тип безконтактних оптичних сканерів – це тріангуляційні сканери. Тріангуляційні сканери подібні до часопротитних і теж використовують лазерний промінь для вимірів. Однак у даного типу сканерів для визначення відстані до досліджуваного об'єкту використовують метод тріангуляції: лазерний промінь падає на поверхню, відбивається і падає на об'єктив цифрової камери. В залежності від віддаленості поверхні від сканеру світлова пляма потраплятиме на різні ділянки матриці камери. Для калібрування тріангуляційного сканера використовують контрольну пластину розташовану між об'єктом та об'єктивом на відомій відстані як показано на рис. 1.5. Контрольна пластинка дозволяє відмічати початкове положення лазерного променя, тим самим відзначаючи точку відліку – положення контрольного пікселя.

Принцип вимірювання базується на тому, що між системою вимірювання та вимірюваним об'єктом утворюється прямокутний трикутник, в якому відома довжина одного з катетів, також можливо виміряти гострий кут. За відомими даними можливо розрахувати вимірювану відстань.

Цей вид безконтактних сканерів може знімати цифрову модель об'єкту з доволі високою роздільною здатністю, однак це потребує відносно багато часу. На похибки при скануванні впливають можливий рух об'єкту чи сканеру. Також точність даного типу вимірювань значно обмежує спекл-структура лазерного променя, обумовлена когерентністю світлових пучків, що його формують. Світлова пляма такого типу у цифровій фотокамері виглядає як сукупність світлих та темних пікселів. Додатково обмежень надає характерна для всіх лінзових систем формування зображення дифракційна межа Аббе в  $\lambda/2$  [8].

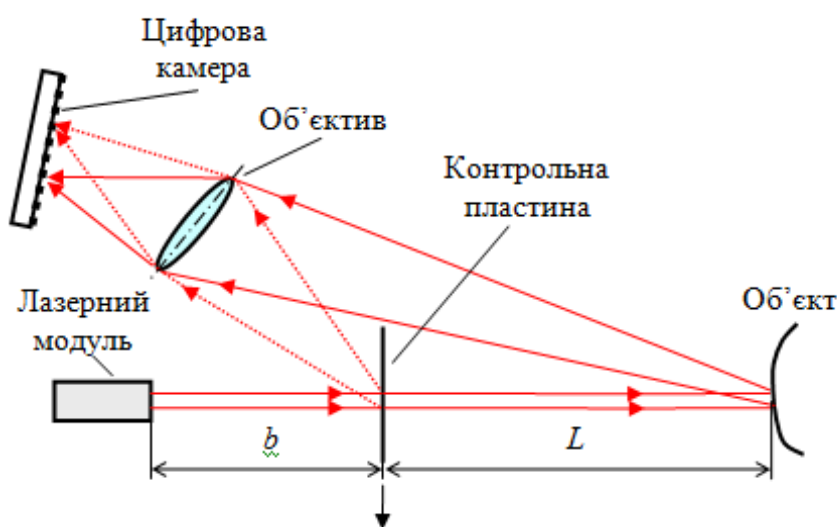


Рис. 1.6. Схема тріангуляційного вимірювача відстані

						БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
							20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Новим типом сканерів є коноскопічні голографічні сканери. Коноскопією називають спостереження інтерференційної картини, утвореної конусними світловими пучками. Коноскоп складається з кристала з подвійним променезаломленням, розташованого між двома фільтрами з круговою поляризацією, які забезпечують інтерференцію ортогонально поляризованих звичайної та незвичайної хвиль на виході коноскопа шляхом перетворення лінійної поляризації у кругову.

Коноскопічна голографія, як і звичайна голографія, є інтерферометричним методом запису зображення об'єкта. У коноскопічній голографії вимоги до когерентності джерела випромінювання та роздільної здатності фоточутливого шару датчика зображення значно менші, оскільки об'єкту та опорну хвилі утворюють незвичайна та звичайна хвилі кристала з подвійним променезаломленням і різниця ходу цих хвиль досить мала. За формою хвильового фронту коноскопічна голографія нагадує голографію Габора, де також кожна точка об'єкта відображається в інтерференційній картині концентричними смугами (зонами Френеля). Осьове зміщення точки поверхні викликає радіальне переміщення смуг, за яким і визначають глибину рельєфу поверхні [9].

Ще один незвичний тип сканерів складають сканери зі структурованим світлом. Даний метод сканування заснований на проекції структурованого світла на об'єкт (наприклад: світлова сітка). Розташована трохи подалі від проектора, цифрова камера фіксує деформацію зображення, сформовану світлом, що падає на рельєфну поверхню. Базуючись на цій деформації, комп'ютер будує модель досліджуваного об'єкту.

Перевагами даного типу сканерів є швидкість і точність створення цифрової моделі реального об'єкту. За частку секунди система отримує інформацію не про одну, а відразу про декілька точок відразу, які знаходяться в полі зору камери. Це дозволяє уникнути спотворень, що виникали під час руху вимірюваного об'єкту у всіх попередніх типах сканерів. У порівнянні з моделями, побудованими за допомогою тріангуляційного сканера, сканери, що використовують структуроване світло, є більш точними. Деякі з них можуть навіть сканувати об'єкти в режимі реального часу.

Сканери, що працюють таким чином випускає фірма InSpeck. У них використовується направлене світло від галогенних ламп. Час сканування у даного пристрою залежить від заданої роздільної здатності – вона знаходиться у проміжку від 0,03 до 3 мм. До переваг також можна віднести те, що даний сканер також має можливість зчитувати колір сканованого об'єкту. Інтегрований базовий пакет програмного забезпечення включає в себе програму для обробки даних: in Speck-EM. Вона дозволяє обробляти цифрове зображення моделі, спрощувати полігони, надає можливість користувачеві коригувати отримані дані, а також переводити їх у формат NURBS. Також дане програмне забезпечення дозволяє

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експортувати відскановані моделі у різноманітні програми для роботи з 3D-моделями, такі як Maya, Lightwave, Max.

### 1.1.3.1. Стереоскопічні сканери

Стереоскопічні сканери використовують дві цифрові камери, розташовані на певній базовій відстані одна від одної. Цифровий аналіз стереознімків дозволяє визначити відстань до кожної з точок. Точність такого сканера теж невисока.

Сканери такого типу створюють фірми Minolta (серія VIVID) та ZScanner.

У 2006 році компанією ZScanner був презентований тривимірний сканер ZScanner 700 (рис. 1.7)



Рис. 1.7. Сканер ZScanner 700 [11].

Даний пристрій здатний сканувати об'єкти у режимі реального часу. Побудована цифрова модель одразу відображається на екрані, що дозволяє користувачу контролювати коректність сканування та, за необхідності, повернути об'єкт потрібним боком, або наблизити сканер до об'єкту в необхідному місці. При цьому сканування не припиняється. Як результат, моделі отримані за допомогою цього сканера потребують меншого часу на обробку результатів, отриманих зі сканера.

Перевагами даного сканера є портативність, точність (до 40 мкм) та швидкість – 25 000 точок/с.

Недоліки – велика маса сканера, висока вартість та нездатність сканувати великі об'єкти [11].

Ще кілька типів сканерів побудовані на аналізі фотознімків об'єкта. Так, фотометричні сканери будують віртуальну модель об'єкта, співставляючи групу

									Арк.
									22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

знімків об'єкта з різних напрямків освітлення, що дозволяє відтворити поверхню за множинами пікселів з отриманих знімків.

У силуетних сканерах використовують знімки об'єкта на контрастному тлі, що дозволяє виділити силует цього об'єкта. Після виділення зі знімків силуетів об'єкта, силуети перетворюють для отримання видимої оболонки об'єкта. Головним недоліком цього типу сканерів є неможливість сканувати складну поверхню.

### **1.1.3.2. Фотограмметричні сканери**

У фотограмметричних сканерах використовують принципи фотограмметрії, формуючи щось на зразок панорамний фотознімків. Спираючись на різні зображення об'єкта, користувач сам виявляє та ідентифікує деякі особливості форми об'єкта. Для цього використовують певні програмні додатки, такі як D-Sculptor, iModeler, Autodesk ImageModeler або PhotoModeler. Такі сканери застосовують, коли потрібно швидко створити тривимірну модель об'єкта з простою формою, наприклад, будівлі.

## **1.2. Застосування сканерів**

Тривимірні моделі мостів та будівель вже широко використовують для представлення потенційних змін у місті. Їх використання дозволяє вирахувати можливі ризики та уникнути збитків.

Технології швидкого створення 3D-моделей будинків та вулиць призвели до виникнення ідея створення моделі міського середовища. Даний проект мав місце у США в Університеті Берклі під егідою оборонного агентства DARPA. Метою проекту є «швидко автоматизоване генерування фотореалістичних 3D-моделей міських середовищ для створення симулятора і можливості інтерактивного обходу, об'їзду або обльоту". Для виконання цього завдання було вирішено використовувати лазерні сканери та цифрові камери, встановлені на міському повітряному або наземному транспорті. Це рішення дозволило значно пришвидшити створення 3D карт. Лазерні сканери фіксують розміри об'єктів, після чого комп'ютер комбінує отримані з даними, отриманими з камери [12]. На робочу модель центру міста Берклі витратили 4,5 години: на аерофотозйомку та фотографування з землі 12 районів було витрачено всього 25 хвилин [12].

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

## Висновки до розділу 1

У розділі було розглянуто існуючі на даний момент методи сканування 3D-об'єктів. Було виявлено велику кількість сучасних приладів та умовно поділено їх на дві групи, в залежності від виду взаємодії з об'єктом під час сканування – на контактні та безконтактні сканери.

Контактні сканери використовують спеціалізовані сенсори що безпосередньо за допомогою щупа фізично контактують з поверхнею сканованого об'єкту. Даний тип сканерів характеризується високою точністю сканування та можливістю дослідження внутрішньої поверхні об'єкта крізь отвір. Недоліками контактних сканерів є низька швидкість сканування та можливість пошкодження крихких і недостатньо міцних об'єктів.

Безконтактні сканери є більш широко представленими серед 3D-сканерів і мають ряд переваг: незалежність результату сканування від матеріалу об'єкту, можливість сканувати будівлі, можливість сканувати невеликі отвори.

Також було виявлено, що 3D-сканери вже активно застосовують у різних галузях і зацікавленість у даному типі приладів тільки зростає.

Згідно з поставленою метою роботи була затверджена розробка лазерного 3D-сканера з використанням тріангуляційного методу через наступні переваги:

- Можливість забезпечити точність близьку поставленим вимогам;
- Відносно невисока вартість;
- Простота конструкції, порівняно з контактними сканерами.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ОСНОВНІ СКЛАДОВІ 3D-СКАНЕРА

### 2.1. Лазер

#### 2.1.1. Типи лазерів

Існуючі типи лазерів можна розділити на декілька груп за такими параметрами як:

- активна речовина лазера;
- спосіб накачки лазера;
- режим роботи;
- конструкція резонатора.

В залежності від групи, до якої відноситься лазер, залежать можливості використання та сфера застосування лазера.

При створенні лазерів в якості активного середовища використовують різноманітні матеріали, що можуть відрізнятись агрегатним станом, характеристиками утворюваного лазерного випромінювання, але всі речовини мають відповідати певним вимогам:

- атоми даних матеріалів повинні мати явні, чітко виражені енергетичні рівні. Це дозволяє найбільш ефективно використовувати енергію зовнішнього накачування, та з найменшими енергетичними втратами перетворювати її у випромінювання;
- матеріал активного середовища має бути якнайбільш оптично однорідним для зменшення енергетичних втрат при частковому поглинанні енергії квантів;
- матеріал повинен мати високу теплопровідність та малий коефіцієнт термічного розширення;
- речовина має бути стійкою до змін температури і вологості, та зберігати свої характеристики в процесі роботи лазера;
- якщо матеріал з якого має бути виготовлене активне середовище твердий, то він також повинен мати високу міцність, щоб не руйнуватись при механічній обробці (різання, шліфування, полірування) при виготовленні лазерних стрижнів.

Як вже було вказано вище, в залежності від типу активного середовища, лазери розподіляють на окремі групи:

- газові лазери;
- напівпровідникові лазери;
- твердотільні лазери;
- рідинні лазери.

Розглянемо їх більш детально.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.1.1.1. Газові лазери

Як зрозуміло з назви - активним середовищем лазерів цього типу є активний газ. Зазвичай використовують такі гази як неон, вуглекислий газ, а також пари розігрітої твердої речовини як, наприклад, мідь, або пари розігрітої рідини – води, метилового спирту [17]. Він заповнює спеціальну трубку, що поміщається до оптичного резонатора. Найпростіший оптичний резонатор складається з двох паралельно розташованих непрозорого та напівпрозорого дзеркал. Утворена оптична хвиля поширюється у активному газі, та, створюючи лавину фотонів, посилюється. Коли оптична хвиля досягає напівпрозорого дзеркала частина фотонів виходить за межі резонатора, а частина відбивається назад у резонатор. Ті фотони, що вийшли за межі резонатора утворюють лазерне випромінювання. Тоді як віддзеркалена частина оптичної хвилі породжує іншу лавину фотонів. Всі фотони, що утворюються в результаті даного процесу рухаються в одному напрямку, до того ж їх можна вважати ідентичними за фазою та частотою, тому лазерне випромінювання є когерентним.

Газові лазери дають можливість створювати випромінювання різної частоти широкого діапазону. Це дозволяє виробляти лазери у широкому діапазоні випромінювання від ультрафіолетового до інфрачервоного.

Порівняно з рідинами та твердими матеріалами, гази мають значно меншу щільність та вищу однорідність. Через це оптичний промінь, що проходить через активне середовище у газових лазерах, практично не спотворюється, не розсіється та не втрачає енергію. У результаті, даний тип лазерів характеризується високою спрямованістю лазерного випромінювання, межа якого визначається дифракцією світла. Розбіжність світлового променя газових лазерів в області видимого світла складає  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  рад, а в інфрачервоній області  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  рад [13].

Висока стабільність частоти випромінювання у газових лазерах залежить від нерухомості дзеркал та інших компонентів оптичного резонатора.

Інверсія населеностей рівнів у лазерах з газовим активним середовищем забезпечують різними способами. Найчастіше використовують електричний розряд, що спричиняє виникнення вільних електронів. Утворені вільні електрони стикаються з частинками речовини (атоми, іони, молекули) та за допомогою електронного удару збуджують їх і переводять на більш високі енергетичні рівні. При відносно довгому житті збуджених частинок створюється чітко виражена і стійка інверсія населеностей рівнів. Метод електронного удару використовують для накачки газових лазерів що працюють у імпульсному та/або безперервному режимі роботи лазера.

									Арк.
									26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Також для інверсії населеності рівнів застосовують спосіб резонансної передачі збудження: збудження мікрочастинок одного виду відбувається при непружних зіткненнях з мікрочастинками іншого виду. Створення інверсії населеностей відбувається у два етапи: електрони збуджують спочатку атоми допоміжного газу, і тільки потім, у процесі непружних зіткнень з частинками основного, робочого матеріалу передається надлишкова енергія. Накопичення енергії у мікрочастинок допоміжної речовини у достатній кількості можливе лише у тому випадку, якщо їх час життя на високих енергетичних рівнях достатньо великий.

Гелій-неоновий лазер – лазер для якого у якості активного середовища використовують суміш газів: гелій та неон. Дані лазери мають робочу довжину хвилі 632,8 нм, що знаходиться у видимій області спектру. Конструкцію даного лазера можна побачити на рис. 2.1.

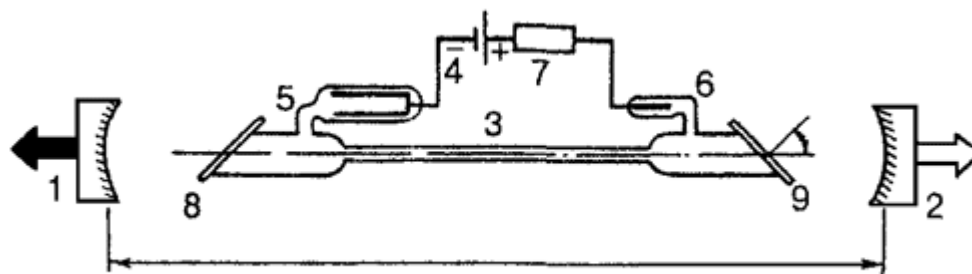


Рис. 2.1 Конструкція гелій-неонового лазера:

1,2- увігнуті дзеркала; 3-трубка;4-зовнішнє джерело;5-катод;6-анод;7-резистор;8,9-оптичне поліроване скло [13]

CO<sub>2</sub>-лазер – один з найперших видів газових лазерів, що на початок ХХІ століття був одним із найбільш потужних лазерів із неперервним випромінюванням. ККД цього лазера сягає до 20%. Даний тип газових лазерів генерує випромінювання з довжинами хвиль від 9,4 до 10,6 мкм, що припадає на інфрачервоний спектр діапазону. Схематичне зображення вуглекислотного лазера можна побачити на рис. 2.2.

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



### 2.1.1.2. Напівпровідникові лазери

Основною особливістю напівпровідникових лазерів, що вирізняє їх між інших типів, є їх енергетична структура. На відміну від ідеальних атомів та молекул, у напівпровідників є широкі зони енергетичних станів, замість вузьких енергетичних рівнів. Дозволені ж зони розділені між собою забороненими рівнями. Доступний для випромінювання спектр довжин хвиль перекриває доволі широкий діапазон – від ультрафіолету до інфрачервоної області спектру: 0,33 – 31,2 мкм [15].

З точки зору практичного застосування у напівпровідникових лазерів виділяють такі переваги:

- компактність, що обумовлена великим коефіцієнтом підсилення;
- висока ефективність перетворення енергії у випромінювання обумовлює високий ККД;
- Можливість обирати матеріали з необхідною шириною забороненої зони, що дозволяє генерувати випромінювання у широкому діапазоні;
- Плавна перебудова довжини хвилі випромінювання, що обумовлено залежністю спектрально-оптичних властивостей напівпровідників, а саме ширини забороненої зони, від температури, тиску і магнітного поля;
- Малий час релаксації і безінерційність створення нерівноважних дірок та електронів при накачці, що обумовлюють мало інерційність лазера загалом. Це дозволяє модулювати випромінювання зміною струму накачки, що сягає 10 ГГц.
- Можливість накачки постійним струмом. Це обумовило просту конструкцію та сумісність напівпровідникових лазерів з інтегральними схемами [15].

### 2.1.1.3. Інжекційні лазери

Інжекційний лазер – це напівпровідниковий двохелектродний прилад з р-п переходом в якому при протіканні прямого струму через р-п перехід відбувається інжекція зарядів, що призводить до генерації когерентного випромінювання. Так як даний тип лазера використовує р-п перехід для нього часто застосовують термін «лазерний діод».

Даний тип лазера використовує те ж саме явище інжекційної електролюмінесценції, що і світлодіоди. Незважаючи на їх конструктивну схожість, на відміну від світлодіодів з не когерентним випромінюванням, випромінювання лазерних діодів – когерентне і більш потужне ніж у світлодіодів.

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Дана відмінність обумовлена тим що:

- у лазерних діодах створена інверсія населеностей рівнів, що призводить до зміни поглинального середовища в діоді на підсилювальне;
- завдяки позитивному зворотньому зв'язку випромінювання у діодах декілька разів проходить через підсилююче середовище;
- наявність оптичного резонатора у конструкції призводить до того, що підсилення випромінювання можливе тільки на певній обмеженій множині частот [17].

Управління лазерними діодами відбувається схмотехнічними засобами. Потужність випромінювання  $P_{\text{івл}}$  напівпровідникового лазера (рис. 2.4) залежить від інжекційного струму  $I_{\text{лд}}$  в активній зоні лазерного діода (ЛД). При невеликих рівнях струму  $I_{\text{лд}}$  напівпровідниковий лазер діє як світлодіод і генерує некогерентне оптичне випромінювання невеликої потужності. При досягненні порогового рівня струму  $I_{\text{лд}}$  генеруються оптичні коливання в лазерному резонаторі, випромінювання стає когерентним; різко зростає потужність випромінювання  $P_{\text{івл}}$ . Однак генерується потужність  $P_{\text{івл}}$  і в цьому режимі пропорційна рівню струму  $I_{\text{лд}}$ . Таким чином, можливості перемикання чи модуляції потужності випромінювання напівпровідникового лазера прямо пов'язані з цілеспрямованою зміною інжекційного струму  $I_{\text{лд}}$ .

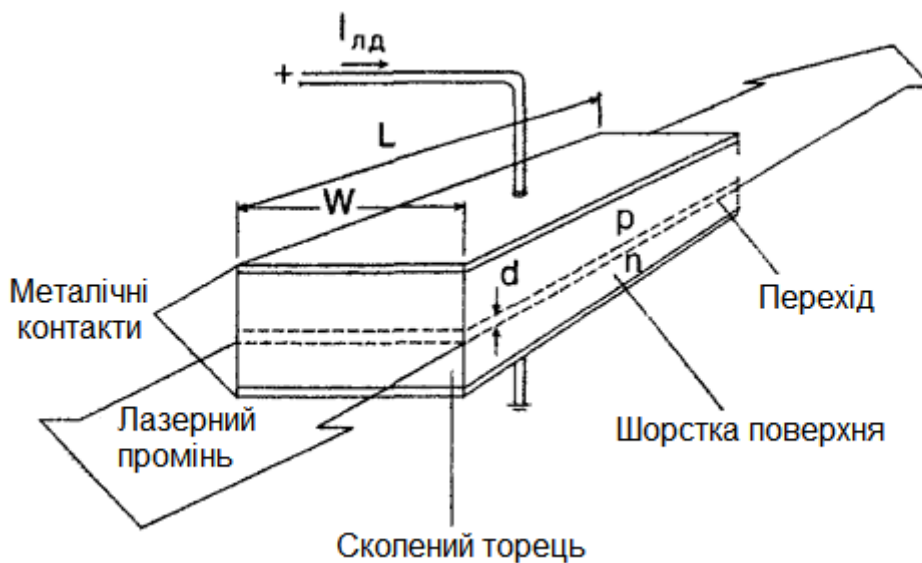


Рис. 2.4 Конструкція напівпровідникового лазера [14]

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

В імпульсному режимі роботи лазерного діода його робоча точка М (рис. 2.5а) фіксується на пологій ділянці ватт-амперної характеристики  $P_{\text{изл}} = f(I_{\text{лд}})$  в передпороговій області лазера. Різде збільшення струму  $I_{\text{лд}}$  переводить робочу точку на круту ділянку характеристики (наприклад, в положення N), що гарантує збудження і інтенсивне зростання потужності лазерних коливань. Спад струму  $I_{\text{лд}}$  і перехід робочої точки лазера у вихідне положення М забезпечують зрив лазерних коливань і різке зниження вихідної потужності лазерного випромінювання.

В аналоговому режимі модуляції лазерних коливань робоча точка Q фіксується на крутій ділянці ваттамперної характеристики (рис. 2.5б). Зміна струму  $I_{\text{лд}}$  під дією зовнішнього інформаційного сигналу призводить до пропорційної зміни вихідної потужності напівпровідникового лазера.

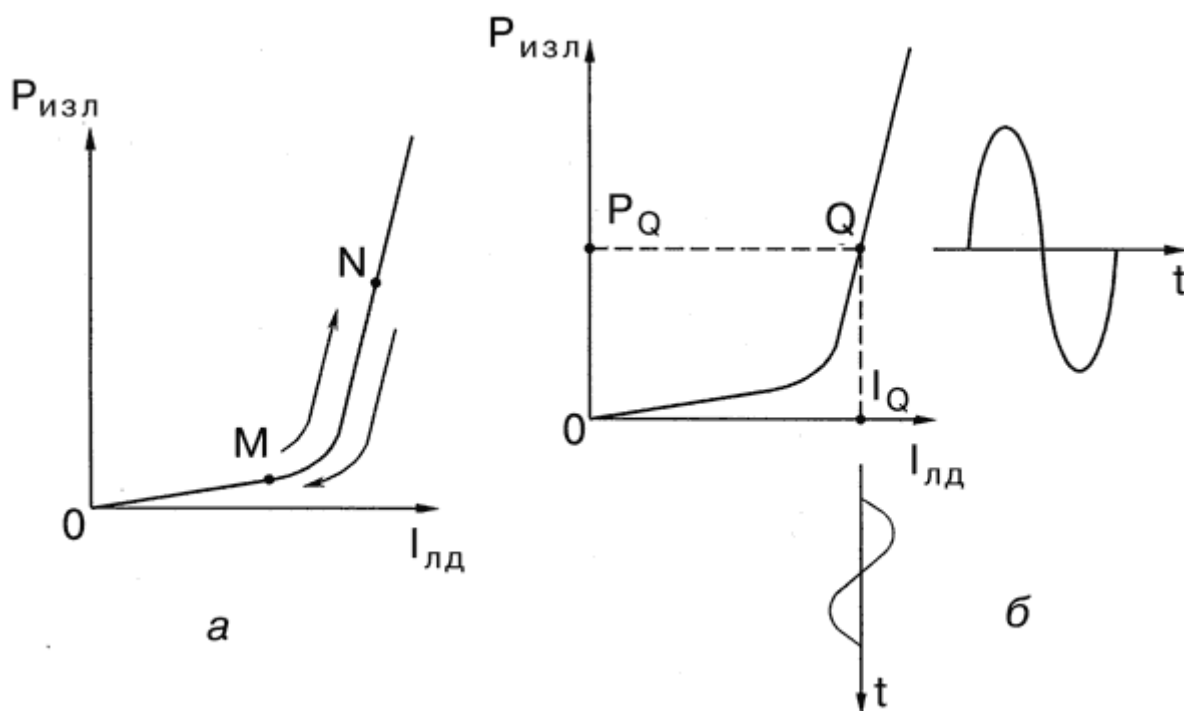


Рис. 2.5 Діаграми управління потужністю випромінювання напівпровідникового лазера в режимах цифрової (а) та аналогової (б) модуляції [16]

Переваги інжекційних лазерів:

- Дуже малі розміри: теоретична мінімальна довжина резонатора близька до 10 мкм, а площа його поперечного перерізу - до  $1\text{ мкм}^2$ ;
- високий ККД перетворення енергії накачування у випромінювання, що наближається у кращих зразків до теоретичної межі; це обумовлено тим, що лише при інжекційному накачуванні вдається виключити небажані втрати: вся енергія електричного струму переходить в енергію збуджених електронів;
- зручність управління - низькі напруги і струми збудження, сумісні з інтегральними мікросхемами; можливість зміни потужності випромінювання без застосування зовнішніх модуляторів; робота як у безперервному, так і в імпульсному режимі із забезпеченням при цьому високої швидкості перемикання в напівсекундному діапазоні.

До недоліків інжекційних лазерів можна віднести:

- невисоку когерентність випромінювання (порівняно, наприклад, з газовими лазерами) - значну ширину спектральної лінії;
- відносно більшу кутову розбіжність;
- асиметрію лазерного пучка [15].

#### 2.1.1.4. Твердотільні лазери

Твердотільні лазери вирізняються поміж інших типів лазерів найбільшою інверсією рівнів, що в свою чергу призводить до найвищих показників коефіцієнту підсилення. Це обумовлено концентрацією активних частинок, як то атоми чи іони, у твердих матеріалах, порівняно із рідкими матеріалами чи газами. Концентрація частинок складає  $10^{17} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Як результат – потужність випромінювання твердотільних лазерів сягає значень понад 100 кДж [17].

Структура активного середовища твердотільних лазерів являє собою діелектричну матрицю з великою кількістю рівномірно розподілених випромінювальних центрів. Лазерними центрами у кристалічній решітці скла чи кристалу можуть бути:

- домішки (атоми або іони);
- власні іони;
- F-центри (рис. 2.6).

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

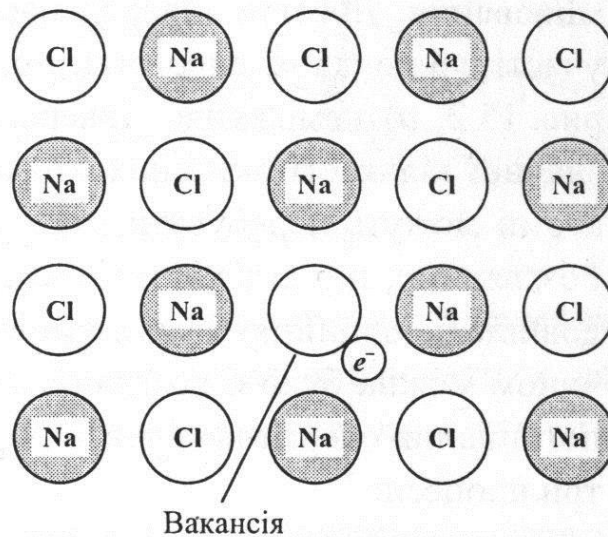


Рис. 2.6. Утворення F-центру в кристалі NaCl [17].

Кристалічна структура лазерних стержнів – твердотільних матриць – має задовольняти певні вимоги:

- виготовлення або вирощування діелектричного матеріалу, його механічна обробка мають бути технологічними;
- матеріал повинен мати високі показники оптичних характеристик, таких як прозорість, однорідність речовини та ефективність лазерних центрів матриці;
- низький рівень впливу температур на характеристики матеріалу: низький коефіцієнт теплового розширення та висока теплопровідність [17].

Даний різновид лазерів, у порівнянні з газовими, значно обмежені у способах накачки. Зазвичай накачування відбувається через охолоджуючу речовину і застосовують оптичний метод – використовують газорозрядні лампи, світло діоди, лазери і т.д. Найчастіше використовують лампове накачування.

Зазвичай в конструкції твердотільного лазера (рис. 2.7) використовують активний лазерний стержень 1 і лампу накачування 2 однакової конструкції. Дзеркала 3 і 4 оптичного резонатора розділені керуючим оптичним затвором 5. Для ефективного застосування енергії оптичного накачування стержень 1 і лампа 2 поміщені в замкнутий рефлексор 6 еліптичної форми. При цьому елементи 1 і 2 розміщуються в фокусах еліптичного перетину рефлексора, що дозволяє сконцентрувати енергію оптичного накачування в обсязі активного середовища. Рефлексор 6 заповнений охолоджувальною рідиною, яка періодично прокачується через лазер[16].

									Арк.
									33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



розташовують у фокусах еліптичного перетину, що забезпечує максимальну концентрацію світлової енергії накачування в товщі активного елемента.

В якості дзеркал оптичного резонатора в твердотільному лазері можуть використовувати оброблені торці активного елемента, які за необхідності, забезпечують відбиваючими покриттями для отримання необхідних значень коефіцієнтів відбиття і пропускання. Якщо необхідно отримати спеціальні властивості лазерного випромінювання, такі як характер поляризації, модовий склад, тощо, дзеркала оптичного резонатора можуть бути і зовнішніми.

Активний елемент і лампа накачування твердотільного лазера зазвичай вимагають рідинного охолодження в тих випадках, коли потужність випромінювання лазера є достатньо високою (вище рівня міліват). Це призводить до ускладнення конструкції, так як через охолоджуючу рідину буде проходити енергія накачування, яка не повинна значно поглинатися цією рідиною.

Зазвичай твердотільні лазери, крім джерела живлення, комплектуються спеціальною системою охолодження з насосом і теплообмінником. Це призводить до зниження сумарного коефіцієнта корисної дії та створює необхідність виконання додаткових профілактичних робіт при експлуатації.

### 2.1.1.5. Рідинні лазери

В рідинних лазерах активною речовиною виступають рідкі діелектрики з домішковими робочими атомами. Певні суміші рідкоземельних елементів з рідинами дозволяють отримати структуру енергетичних рівнів, що дуже схожа на структуру енергетичних рівнів домішкових атомів в твердих діелектриках. Тому принцип роботи рідинних лазерів аналогічний до твердотільних [16].

Рідинні лазери мають багато переваг. До них відноситься можливість циркуляції рідини з метою її охолодження. Також даний тип лазерів має високий ККД близько 2-5%, через що їх відносять до лінійки потужних лазерів. Потужність лазера у неперервному режимі роботи може перевищувати 100кВт, а при гігантському імпульсі (за модуляції добротності резонатора) може бути більше за 1 ТВт [16; 17].

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак рідинні лазери мають два суттєві недоліки:

- Нестійкість рідини відносно великих інтенсивностей світла що застосовуються у накачування та генерації;
- зміна коефіцієнта заломлення активної рідини в процесі генерації від нагрівання. Це призводить до того, що промінь, який генерується, не стійкий на торці резонатора[16].

## 2.2. Цифрова камера

Цифрові камери вперше були створені у 1969 році та запатентовані 1972р. компанією Texas Instruments як «повністю електронний пристрій для запису і подальшого відтворення нерухомих зображень». У перших цифрових камерах чутливим елементом були ПЗЗ-матриці, а отримані зображення зберігались на магнітних стрічках [18].

Сучасні цифрові камери були значно вдосконалені і безупинно вдосконалювались, але ПЗЗ-датчики досі використовуються. Паралельно з ПЗЗ (прилади із зарядовим зв'язком) у якості електронно-оптичних перетворювачів використовують КМОН-матриці (КМОН – компліментарні метало-оксидні напівпровідники).

### 2.2.1. ПЗЗ та КМОН матриці

ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком – це аналогова інтегральна схема, яка обладнана електродами, що слугують затворами. При подачі на затвори певних потенціалів, утворюються потенціальні ями, де накопичуються електричні заряди, які і є носіями інформації. Періодична зміна глибини потенціальних ям переносить ці заряди на вихід ПЗЗ (рис. 2.8), де вони заряджають конденсатор і перетворюються у напругу сигналу.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



- створення антиблюмінгових каналів, шляхом профілювання р-каналів, куди могли б рухатись надлишкові електрони. Однак це також призводить до погіршення характеристик матриці, а тому і камери: знижується квантова ефективність та погіршується частотно-контрастна характеристика;
- подача потенціалів з протилежними значеннями на другий та третій електроди (рис. 2.8, а) під час накопичення заряду. Це змушує надлишкові електрони рухатись до межі між Si та SiO<sub>2</sub> де відбувається рекомбінація надлишкових зарядів з дірками.

Також недоліком ПЗЗ матриці є імовірна втрата заряду при переносі зарядів між потенціальними ямами. Це може бути викликано поперечним розтіканням зарядів в процесі перенесення зарядів між потенціальними ямами або захопленням зарядів поверхневими станами напівпровідника, що були в свою черг утворені дефектами кристалічної ґратки матеріалу. До них відносяться обрив періодичної структури кристалічної ґратки та домішкові абсорбовані атоми на поверхні кристалу. В результаті появи дефектів кристалічної структури напівпровідника можуть утворюватись енергетичні рівні забороненої зони, які виявляються пастками для носіїв заряду.

З метою запобігання поперечному розтіканню зарядів створюють стоп-канали з р+-Si по обидва боки р-каналу, яким переносяться заряди. Для повнішого перенесення зарядів між каналами, кремній, з якого виконують стоп-канал, сильніше легують акцепторною домішкою, що в свою чергу запобігає утворенню потенціальних ям.

Для боротьби з втратами зарядів на поверхневих станах канал перенесення зарядів переміщують з при поверхневого шару (глибиною близько 10 нм) у глиб напівпровідника. Даний канал розміщують вздовж р-n-переходу, що утворюється на межі підкладки з р-Si та каналу з n-Si (рис. 2.8, а). Прилади такого типу носять назву ПЗЗ зі схованим каналом.

Інтегральна КМОП матриця, виконана за комплементарною метал-оксид-напівпровідниковою технологією, є, на відміну від ПЗЗ-матриці, цифровою

									Арк.
									38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР. 6.050802.051.002 ПЗ				

схемою. В ній може бути реалізовано більшість функцій, які потрібні для роботи датчика [19].

## 2.2.2. Характеристики цифрових камер

Якщо порівнювати плівкові та цифрові фотоапарати, одразу можна помітити, що в звичайних цифрових фотоапаратах об'єктив менший ніж у плівкових (хоча розмір фотооб'єктиву дзеркальних цифрових камер має порівняно такі ж розміри як у цифрових камерах). Це пояснюється розмірами кадрів: розмір кадру плівки – 24 x 36 мм, для світлочутливої матриці звичайної цифрової камери – від 1,8 x 2,4 до 13,0 x 17,3 мм, для дзеркальної цифрової камери – до 24 x 36 мм [19]. Наступною відмінністю між цифровими та плівковими камерами є те, що фотоемульсія плівки зберігає свою максимальну фоточутливість в самому початку експозиції і починає різко втрачати її при довготривалій витримці. В той самий час у ПЗЗ матриці фоточутливість постійна незалежно від часу витримки [18].

Для детальнішого розгляду принципу роботи сучасної цифрової камери розглянемо її на прикладі цифрової камери з ПЗЗ-матрицею (рис.2.9)

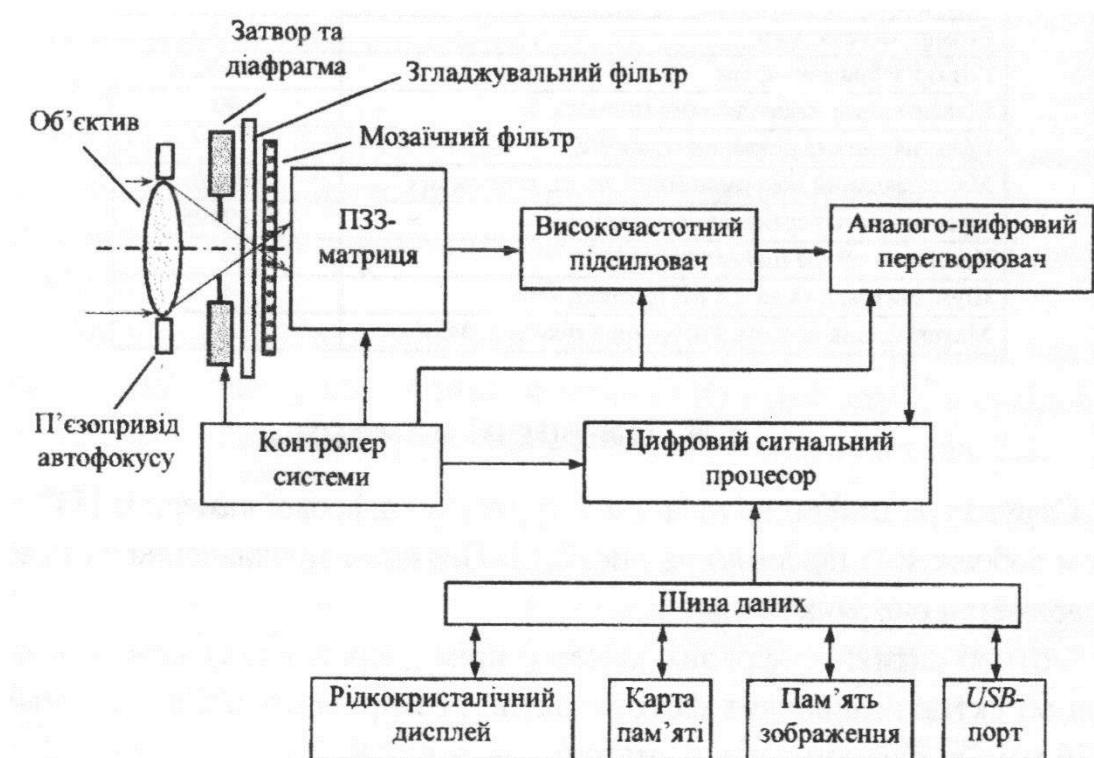


Рис. 2.9. Структурна схема цифрового фотоапарата із ПЗЗ-датчиком зображення [19]

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Автоматичний фокус у цифрових камерах забезпечує вбудований в об'єктив кільцевий п'єзоелектричний двигун.

Запуск та зупинка експонування світлочутливої матриці відбувається за допомогою затвору. У звичайних цифрових камерах затвор електронний, однак у дорогих камерах він може бути доповнений механічним затвором. Він запобігає засвічуванню електронно-оптичного перетворювача після його експонування та утворенню паразитних зарядів.

Згладжувальний фільтр у конструкції цифрової камери запобігає появі муарових смуг (візерунок, що з'являється при накладенні двох періодичних сітчастих малюнків). Цей фільтр розмиває зображення незалежно від необхідності у цьому, тому різкість зображення знижується. Оптико-механічний фільтр створює мікроколивання матриці та може бути вимкнений при відсутності муарових смуг на зображенні.

Мікроконтролер контролює взаємодією елементів системи та здійснює керування всіма системами цифрової камери. У професійних камерах для обробки зображень використовують додатковий цифровий сигнальний процесор [19].

### **2.2.2.1. Чутливість цифрових камер**

Світлочутливість цифрової камери завжди нижча ніж світлочутливість у камери з фото приймальною матрицею. Це обумовлено тим, що в результаті проходження світла крізь фотооб'єктив до 10% втрачається.

Порогова чутливість цифрової камери обумовлена переважно тепловим шумом, однак виробники зазначають лише еквівалентну світлочутливість. Одним із стандартів, що визначають одиниці світлочутливості є стандарт ISO. Даний стандарт дозволяє порівнювати світлочутливість фотоматеріалу та цифрової камери у заданому режимі. Визначають світлочутливість камери за значенням мінімальної освітленості, що відповідає заданому відношенню сигнал/шум.

Світлочутливість цифрових камер залежить від чутливості матриці, шумів та коефіцієнту підсилення високочастотного підсилювача, алгоритму та розрядності АЦП. Вища розрядність АЦП забезпечує менший рівень шумів.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Збільшити чутливість можливо за рахунок підвищення сигналу матриці, однак підсилення сигналу в  $n$  разів призводить до такого ж збільшення рівня шумів. При відношенні  $S/N=10$  (20 дБ) якість зображення вважається задовільною, а при 40 (32 дБ) – відмінною [19].

### 2.2.2.2. Просторова роздільна здатність

Роздільна здатність вимірюється у мегапікселях (Мп) і визначається кількістю пікселів, що матриця може створити у цифровому зображенні. Так як роздільна здатність залежить від кількості світлочутливих елементів і не залежить від щільності їх розміщення на матриці, роздільну здатність світлочутливої матриці можна підвищити або збільшуючи розміри матриці, або зменшуючи розміри світлочутливих елементів матриці. Як було вказано вище, зазвичай розміри матриці цифрової камери не перевищують 24 x 36мм, тоді як роздільна здатність професійних цифрових фотокамер з матрицями такого розміру сягає 50 Мп.

Роздільна здатність у свою чергу поділяється на повну та ефективну роздільну здатність. Повна роздільна здатність позначає загальну кількість пікселів на матриці. Ефективна роздільна здатність позначає кількість пікселів, яка формує зображення, так як частина пікселів, що знаходяться на периферії захищені від світла. Дані периферійні пікселі використовують для компенсації темного струму у інформаційному сигналі, що надходить з матриці. Зазвичай вони покриті непрозорим матеріалом і заряд, що накопичується в цих пікселях приймають за «рівень чорного». Від цього значення здійснюють відлік величини заряду, який був отриманий з фотонів.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.2.3. Аналіз шумів цифрової камери

Як і у будь якій електронній системі спостерігаються шуми при передачі та прийомі інформації, так і в датчиках зображення можна спостерігати ряд шумів:

- тепловий шум;
- дробовий шум;
- $1/f$  шум;
- генераційно-рекомбінаційний шум;
- шум фіксованого розподілу;
- телеграфний шум;
- шум зчитування (скидання) заряду пікселі;
- шум Фано;
- шум перенесення заряду [19].

Кожен із цих шумів впливає на похибку при створенні та зчитуванні зображення у цифровій камері. Однак вплив у них нерівномірний – найбільш сильними є тепловий та дробовий шум.

#### • Тепловий шум

Для датчиків зображення транзистор повторювача витоку є основним джерелом теплових шумів. Даний транзистор забезпечує передачу фотоелектричного сигналу з фотоприймача на зсувний регістр. Різниця у архітектурі ПЗЗ та КМОН- матриць призводить і до різниці частот на яких з'являється тепловий шум: для ПЗЗ-датчиків тепловий шум надходить на вихід у всій смузі частот, а для КМОН-датчиків – лише у смузі частот рядка і виявляється меншим, так як тепловий шум вважається аналогічним «білому» шуму – його потужність є пропорційною ширині смуги частот.

Для датчиків зображення також характерне виникнення теплового шуму на еквівалентній ємності пікселя  $C$ . Даний тип теплового шуму є основним для пікселів з великою площею світлочутливої поверхні фотодіода.

Для боротьби з тепловими шумами зазвичай використовують радіатори або мікрохолодильники на ефекті Пельтьє.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поріг чутливості у КМОН-датчиках обумовлений тепловим шумом і становить  $4,6 \cdot 10^{-12}$  Дж [20].

- **Дробовий шум**

Дробовий шум приладах обумовлений дискретністю таких частинок як фотони та електрони. Як і у випадку теплового шуму, спектральна густина дробового шуму не залежить від частоти, що робить його аналогічним «білому» шуму.

Фотонний дробовий шум у світлочутливих елементах виникає через дискретність світлового потоку та через неодночасність прильоту фотонів на фотоприймач. У разі надходження сигналу на фотоприймач на протязі певного часу експозиції, на  $q$  фотонів дробовий шум викликає генерацію  $\sqrt{\eta_e q}$  шумових електронів, так як середня квадратична напруга дробового шуму пропорційна кореню квадратному зі смуги частот:  $U_{n-sh} \sim \sqrt{\Delta f}$ . Аналогічно за час експозиції  $t$  дробовий шум для темного стуму  $I_d$  викличе появу  $\sqrt{I_d t / e}$  шумових електронів [19]. Обмежити вплив дробового фотонного шуму неможливо, однак можливо обмежити темновий дробовий шум ПЗЗ-матриці. Зазвичай для цього достатньо її охолоджувати та перейти на інвертований режим роботи, у якому носіями сигналу стають дірки.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки до розділу 2

Було розглянуто доступні на сьогоднішній день типи лазерів та їх характеристики, конструктивні особливості. Визначено їх переваги та недоліки. Було обрано напівпровідниковий лазер – лазерний діод неперервної дії – через такі параметри як:

- Доступність;
- Легкість у використанні та інтегруванні в систему;
- Невеликі розміри.

Обраний лазерний діод має довжину хвилі 540 нм і потужність 100 мВт.

Були розглянуті ПЗЗ та КМОН матриці. Також було розглянуто характеристики цифрової камери, такі як чутливість роздільна просторова здатність. Також були розглянуті шуми, що найбільше впливають на зчитування зображення у цифрових камерах – тепловий та дробовий.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. РОЗРОБКА 3D-СКАНЕРА

#### 3.1. Розробка структурної схеми

На рис 3.1 представлена структурна схема 3D-сканера, що показує електричні зв'язки між блоками приладу.

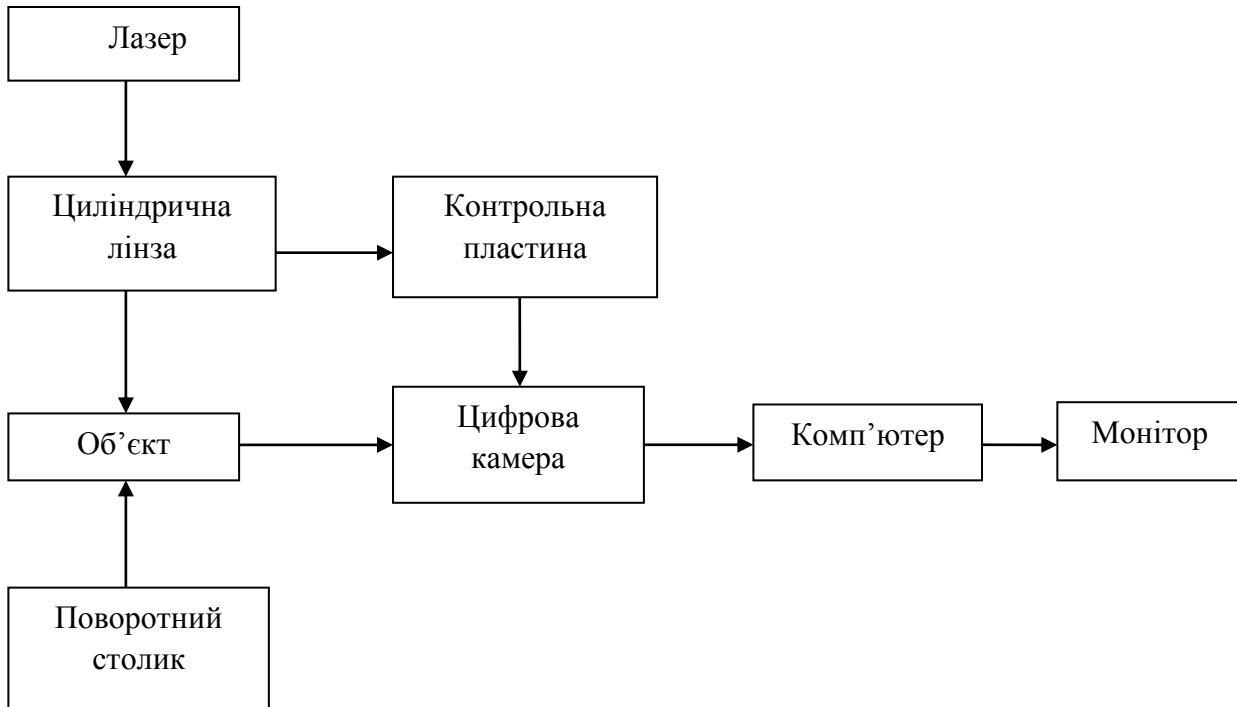


Рис. 3.1. Структурна схема 3D-сканера

Проходячи через циліндричну лінзу, лазерний світловий пучок перетворюється у тонку лінію (товщина якої залежить від характеристик лінзи та розміру світлового пучка). Світлова лінія в свою чергу проходить крізь контрольну пластину і падає на сканований об'єкт.

Об'єкт сканування має відповідати певним вимогам:

- поверхня має бути білою і матовою;
- не мати внутрішньої поверхні, недоступної прямому світловому пучку;
- повинен жорстко кріпитись на поворотному столику.

Поворотний столик в свою чергу забезпечує поворот об'єкта на відомий кут за відомий проміжок часу. Це забезпечує певну дискретність вимірів.

									Арк.
									45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

В результаті проходження лазерної лінії крізь контрольну пластину, за допомогою цифрової камери стає можливим зафіксувати базову лінію. З даною базовою лінією можна порівнювати рельєф світлової плями, що падає на сканований об'єкт. Також є пряма залежність відстані між базовою і «скануючою» лінією та відстанню від контрольної пластини, що закріплена нерухомо на відомій відстані, до об'єкта.

Цифрова камера фіксує обидві лінії та передає їх на комп'ютер, де зображення опрацьовують у спеціалізованій програмі.

Комп'ютер забезпечує доступ зображення та роботу програми, що попіксельно опрацьовує зображення і будує систему точок в залежності від результату порівнянь двох ліній.

На монітор виводяться результати обробки зображення.

### **3.2. Методика побудови моделі поверхні об'єкта**

Невеликий розмір сканованого об'єкта і відповідно невелика відстань до нього зумовлюють вибір триангуляційного методу сканування, більш точного на відстанях менше 10 м за часо-пролітний метод. Триангуляційний метод ґрунтується на вимірюванні лінійного зміщення на цифровій камері зображення підсвіченої точки об'єкта в залежності від відстані до нього, що є простішим за вимірювання часу прольоту лазерного імпульсу між сканером та об'єктом. Схема лабораторного стенду для дослідження 3D сканера зображена на рис. 3.2.

Джерелом випромінювання у стенді є лазерний діод неперервної дії з довжиною хвилі  $\lambda = 540$  нм та потужністю  $P = 100$  мВт. Випромінювання лазера за допомогою лінзи 1 формується у вузький паралельний пучок, який циліндричною лінзою 2 перетворюється на плоский розбіжний пучок, перпендикулярний площині рисунка. Цей пучок утворює на поверхні об'єкта лазерну лінію, яка з боку лазера виглядає як пряма, а з боку цифрової камери – як крива, яка відображає рельєф поверхні об'єкта.

Об'єктив, який стоїть перед цифровою камерою, формує на ній зображення поверхні об'єкта з накладеною на поверхню лазерною лінією.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

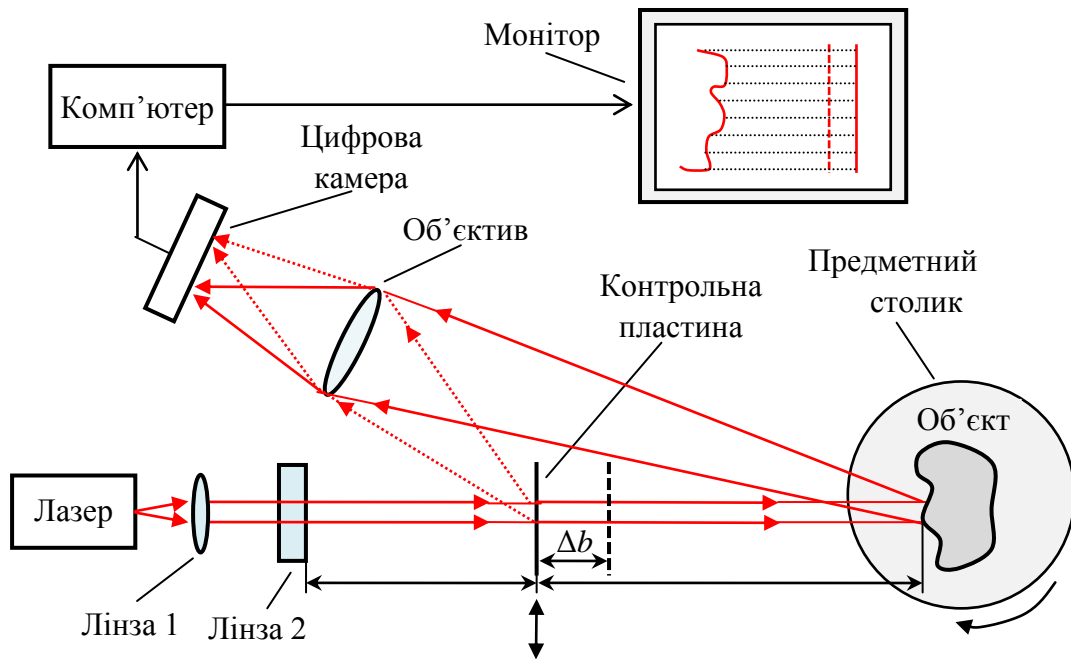


Рис. 3.2. Схема лабораторного стенду для дослідження

Для калібрування сканера на довільній відстані  $b$  від циліндричної лінзи встановлюють вертикально матову контрольну пластину. Пряма лазерна лінія на поверхні пластини перетворюється об'єктивом та цифровою камерою в пряму вертикальну лінію на екрані монітора – базову лінію. Пересуваючи пластину вздовж осі лазерного пучка паралельно самій собі на відому відстань  $\Delta b$ , знаходять, на скільки міліметрів  $\Delta N_x$  перемістилася у горизонтальному напрямку пряма лінія на екрані монітора. Після калібрування контрольна пластину зсувається убік.

Перемножуючи масштабний коефіцієнт  $m = \Delta b / \Delta N_x$  на горизонтальну відстань в міліметрах між відповідними точками базової та контурної ліній на екрані монітора, знаходять відстань певної точки поверхні об'єкта від контрольної пластини. За одного кутового положення предметного столика знімають у матричному вигляді одну контурну лінію об'єкта (множину відстаней між точками поверхні об'єкта, підсвічених лазерною лінією, та контрольною пластиною, взятих з певним кроком по висоті  $\Delta h$ ). Якщо об'єкт має висоту  $H$ , то контурна лінія буде задана  $M_h$  відліками відстаней між відповідними точками об'єкта та контрольної пластини, де  $M_h = H / \Delta h$ .

Для того, щоб задати поверхню об'єкта у матричному вигляді, предметний столик обертають з невеликим кроком  $\Delta\theta$  ( $1^\circ$ ), отримуючи у результаті множину контурних ліній. За повного оберту ця множина складатиметься з  $M_\theta$  контурних ліній, де  $M_\theta = 2\pi/\Delta\theta$ . Отже, бічна поверхня об'єкта може бути задана множиною відстаней  $M$  між відповідними точками об'єкта та контрольної пластини, а саме  $M = M_h M_\theta = 2\pi H / \Delta h \Delta\theta$ .

Блок-схема методики роботи приладу представлена на креслені БР 6.050802.051.002.2 СА

### 3.3. Технологія виготовлення лазерних діодів

Більшість технологічних процесів, які використовують для виробництва лазерних діодів є типовими для мікроелектроніки та використовуються для виробництва інших оптоелектронних приладів. Технологічними процесами, які застосовують для виробництва лазерних діодів є:

- вирощування напівпровідникових монокристалів;
- механічне та хімічне оброблення напівпровідникових пластин;
- епітаксія;
- окислення;
- дифузія та іонна імплантація;
- протонне опромінення;
- фотолітографія;
- металізація;
- розділення пластин із виготовленими напівпровідниковими структурами на окремі кристали;
- приєднання виводів;
- складання лазерних діодів [19].

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3.1. Вирощування напівпровідникових монокристалів

Одним із найбільш розповсюджених методів вирощування монокристалів є метод кристалізації з розплаву – метод Чохральського. За допомогою даної технології вирощують і діелектричні, і напівпровідникові кристали. Схему даного методу можна побачити на рис. 3.2.

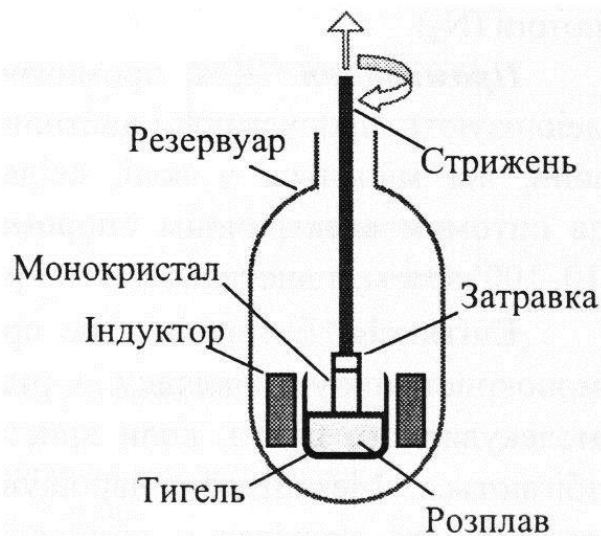


Рис. 3.2. Схема вирощування кристалів методом Чохральського [19].

Тигель з тугоплавкого металу, наповнений розплавом певної речовини яку кристалізують, знаходиться у кварцовому резервуарі. По соленоїду, що відіграє роль індуктора, пропускають сильний високочастотний струм, що призводить до появи змінного електромагнітного поля. Дане поле викликає появу струмів у металі, які нагрівають тигель. На кінці стрижня розміщена затравка – монокристал тієї ж речовини, що і розплав у тигелі. Стрижень опускається у розплав, а потім повільно обертаючись, поступово підіймається. За рахунок плівки поверхневого натягу, в результаті того, що затравка занурена у розплав, трохи підіймається, при поверхневий шар розплаву теж підіймається. Таким чином, при поверхневий шар на затравці охолоджується і кристалізується. Таким чином поступово вирощується зливоч монокристала циліндричної форми.

Діаметр	монокристалічних	зливків може сягати 400 мм, а довжина – 1,5 м [19].	Арк.
		БР. 6.050802.051.002 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис Дата
			49

Майже аналогічним методу Чохральського є метод, заснований на горизонтальній спрямованій кристалізації – метод Бриджмена.

### 3.3.2. Механічна та хімічна обробка напівпровідникових пластин

Напівпровідникові пластини піддаються різноманітним видам обробки:

- Шліфування.

Шліфування виконується на обертальних шліфувальних кругах, вкритих суспензією з дрібнодисперсних порошоків. Діаметр частинок у порошках поступово зменшують до 1-2 мкм.

- Полірування.

Так як шліфування є доволі грубою обробкою матеріалу, він порушує однорідність поверхневого шару та створює приповерхневий шар, який містить механічні дефекти, такі як тріщини, подряпини, вкраплення та ін.. Також механічна обробка призводить до появи шару з дефектами кристалічної решітки та залишковими механічними напруженнями.

Для механічного полірування використовують суспензії на основі порошоків з субмікронними частинками. Для хімічного полірування (травлення) застосовують спеціалізовані травильні розчини, що розчиняють поверхневий шар. В результаті того, що розчинаються виступи мікрорельєфу, поверхневий шар напівпровідника розгладжується.

- Очищення поверхні пластин.

Від органічних забруднень, таких як жирові плівки, пластини очищують за підвищеної температури такими розчинниками як ацетон, трихлоретилен, чотири хлористий вуглець.

- Промивання.

Промивання виконують деіонізованою водою. Для деіонізації воду пропускають крізь гранульовані смоли – іони осідають на гранулах. Ступінь іонізації води оцінюють за електричним опором: деіонізована вода має питомий опір у межах 10-100 кОм·м, а дистильована – близько 8 кОм·м.

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

### 3.3.3. Епітаксія

Епітаксія – це технологічний процес нарощення монокристалічного шару на монокристалічну підкладку. При цьому матеріал, з якого здійснюється нарощення шару на підкладку, може знаходитись у рідкій або газовій фазі, або наноситись за допомогою молекулярного пучка, в разі якщо кристалографічні осі нарощеного шару та підкладки збігаються. Механізмом даного технологічного процесу є термохімічна реакція у при поверхневому шарі напівпровідника. Для успішної реалізації епітаксії необхідно щоб параметри кристалічних решіток були подібними між собою. Періоди кристалічних решіток не повинні відрізнятись між собою більше ніж на 10%.

Найкраще узгоджуються матеріали зі схожим просторовим розміщенням вузлів кристалічної решітки.

В залежності від взаємодії між осаджуваним матеріалом (адсорбатом) та матеріалом підкладки розрізняють 3 основні механізми епітаксіального росту:

- Ріст Вольмера-Вебера

З адсорбатомів на поверхні підкладки формуються кластери у вигляді невеликих острівків (рис. 3.3, а) так як взаємодія між адсорбатами більша ніж взаємодія між адсорбатами та поверхнею. Їх подальший ріст призводить до утворення плівки з шорсткою поверхнею.

- Ріст Франка ван дер Мерве

Відбувається у разі сильнішої взаємодії адсорбатомів з поверхнею підкладки ніж між собою, що призводить до утворення налипання адсорбатомів та утворення моно атомного шару, після чого атоми починають налипати і утворювати іншу плівку і так далі. В результаті утворюється плівка з дзеркальною поверхнею (рис. 3.3, б)

- Ріст Странскі-Крастанова

Ріст, що відбувається після наросту моно атомного шару і починають утворюватись острівки (рис 3.3, в). Це відбувається через те, що товщина плівки досягає певної граничної товщини, що призводить до переходу від горизонтального росту до вертикального.

									Арк.
									51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

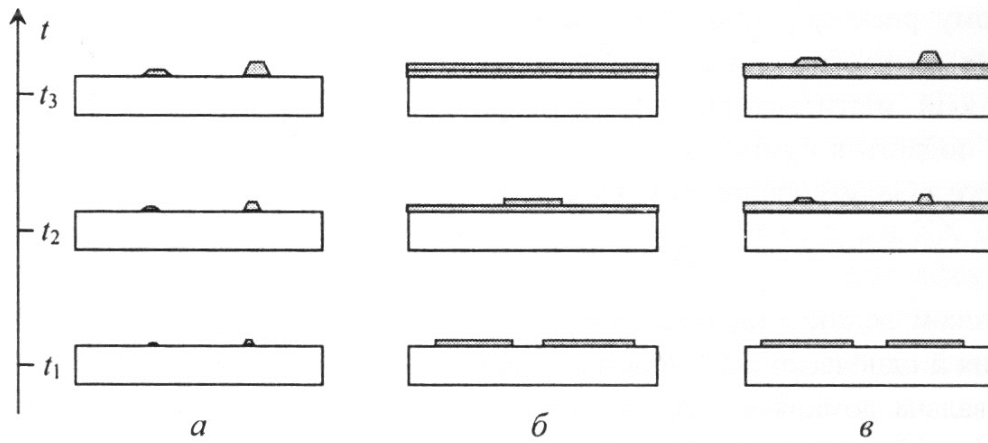


Рис. 3.3. а – ріст Вольмера-Вебера; б – ріст Франка ван дер Мерве; в – ріст Странські-Крастанова [19].

Використання епітаксії дозволяє уникнути дефектів кристалічної ґратки, які можуть виникати при використанні інших технологічних процесів. Також епітаксія дозволяє утворювати тверді розчини на кристалічній підкладці, так як можливо проводити одночасно одразу декілька процесів нарощування кристалів.

Для рідинної епітаксії застосовують рідкі розплави речовин, здатні утворити тонку плівку на поверхні підкладки тонкий монокристал. В процесі рідинної епітаксії рідким розплавом заливають розігріту підкладку. В результаті цього методу утворюється менше дефектів кристалічної ґратки, що в свою чергу підвищує квантову ефективність лазерних діодів. Однак, через те, що для даного методу епітаксії потрібна більша кількість кожного з реагентів, тому вона є дорожчою ніж газова епітаксія. Для певної економії застосовують сплави з товщиною шару близько 1мм.

Газова епітаксія в свою чергу дозволяє отримати переходи з плавною зміною вмісту компоненту в твердих розчинах. Дана властивість дозволяє зменшити негативні наслідки від неузгодженості властивостей поєднаних речовин. Газова епітаксія дає можливість виготовляти одразу декілька тисяч напівпровідникових структур та досягати більшої концентрації легувальної домішки. Це підвищує квантову ефективність електролюмінесценції, однак на межі підкладки та епітаксiального шару квантова ефективність невисока. Також

до недоліків газової епітаксії відносяться більша дефектність кристалічної ґратки та неможливість використовувати інші речовини окрім летких сполук.

До технології епітаксії також відноситься хімічне парофазне осадження – це метод нанесення на підкладку кристалічних або аморфних плівок, які утворюються внаслідок хімічної реакції між матеріалом підкладки та осаджуваним матеріалом (прекурсором). Для виконання осадження прекурсор може бути як в газоподібному, так і в аерозольному стані. До того ж, хімічне парофазне осадження може відбуватись і при атмосферному тиску, і при низькому чи високому вакуумі. Для останніх плівка утворюється найбільш однорідною. Одним із видів даного методу вирощування плівок є газова епітаксія.

Плазмохімічне парофазне осадження – вид епітаксії, в якому з газоподібної речовини відбувається вирощення плівки на поверхні підкладки, де плазма газового розряду ініціює певні процеси, що сприяють епітаксіальному росту.

Металоорганічна паро фазна епітаксія – процес вирощення плівки в результаті обдування нагрітої підкладки струменем пари, яка попередньо була отримана в результаті випаровування металоорганічних сполук. Даний метод є модифікацією методу газової епітаксії, однак в свою чергу забезпечує найбільшу квантову ефективність світлодіодів та лазерних діодів. До того ж, лазерні та світлодіоди мають найменші робочі напруги.

Молекулярно-променева епітаксія – є модифікацією вакуумного напилення та відбувається в умовах надвисокого вакууму. Даний метод дозволяє: вирощувати моно атомні плівки та наноструктури з чіткими межами між шарами (внаслідок низьких температур, за яких відбувається вирощування шарів); створювати структури з різкими локальними змінами хімічного складу чи типу легування; отримувати кристали високої чистоти.

Вакуумне термічне випаровування – один із методів епітаксії, в якому наноситься тонкий шар попередньо нагрітого у вакуумі матеріалу, який перетворюється на пару без переходу у рідку фазу, на охолоджену підкладку.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Імпульсне лазерне осадження – метод вирощування плівки на підкладці, де, за допомогою рубінового лазера, спрямованого на мішень, утворюється плазма, яка поширюється у бік підкладки, що розміщена напроти мішені. При наближенні плазми до підкладки, іони з енергією до 50 еВ вибивають атоми з поверхні підкладки, що призводить до утворення області зіткнення атомів та іонів, де і відбувається осадження частинок на підкладку. Порівняно з молекулярно-променевою епітаксією, імпульсне лазерне осадження помітно є повільнішим, однак нанесена плівка є помітно якіснішою.

### 3.3.4. Окислення

Для окислення кремнію відбувається у водній парі або у кисневій атмосфері за температури 1300-1500 К. Для отримання більш якісних кисневих плівок окиснення відбувається у два етапи: спочатку у сухій кисневій атмосфері за нижчої температури, а потім у вологій атмосфері за вищої температури.

Окисні плівки кремнію використовують як діелектричний шар, як захисний шар від сторонніх впливів та як маску для легування напівпровідників.

### 3.3.5. Дифузія та іонна імплантація

Дифузія є найбільш розповсюдженим методом легування напівпровідників, швидкість якого приблизно пропорційно збільшується при підвищенні температури. При дифузійному легуванні, атоми домішки розміщуються між вузлами кристалічної решітки або заповнюють вакансії у ній.

Залежність швидкості дифузії від температури дозволила використання у дифузійному легуванні лазерного випромінення, що в свою чергу зробило можливим легування окремих поверхонь без використання захисних масок.

Дифузійне легування призводить до градієнтного розподілу домішки у при поверхневому шарі, що унеможливорює створення шарів товщиною менше 1 мкм. В той самий час іонна імплантація дозволяє виконувати легування на глибині 0,1-0,4 мкм.

						<i>Арк.</i>
					<i>БР. 6.050802.051.002 ПЗ</i>	<i>54</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Іонною імплантацією називають метод легування, при якому напівпровідник бомбардується іонами домішки. Іонна імплантація відрізняється від дифузії тим, що легування відбувається за нижчої температури і тим, що іонна імплантація дозволяє легувати матеріал крізь вікно у масці без бічного розтікання домішки.

Розподіл домішки в залежності від методу легування зображено на рис. 3.4.

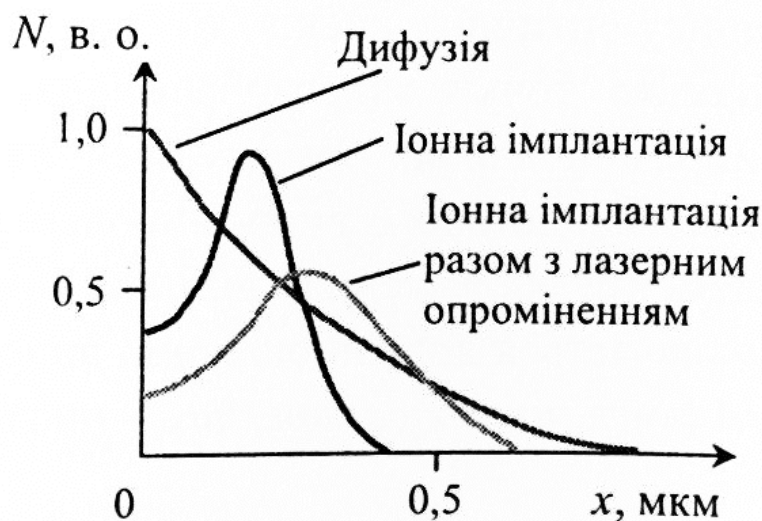


Рис. 3.4. Розподіл концентрації домішки у матеріалі за різних методів легування [19].

### 3.3.6. Оптична літографія

Літографія – це метод створення маски певної форми на поверхні матеріалу, який дозволяє виконувати травлення, легування та наносити шари іншого матеріалу.

Фотолітографія – це фотографічний метод, що дозволяє створювати на поверхні фотополімерні маски для проведення літографії. У даному методі літографії для збереження рисунку маски застосовують фотошаблони – скляні пластини на яких рисунок маски утворений у масштабі 1:1. Розмір елемента зображення на даній масці згідно з критерієм Релея, визначається довжиною хвилі випромінювання та числовою апертурою об’єктива NA [19]:

$$\frac{0.61\lambda}{NA}$$

Фоторезист – це полімерний лак, який під дією оптичного випромінювання змінює розчинність. Фоторезисти поділяються на позитивні та негативні, для

									Арк.
									55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

кожного з яких використовують відповідні фотошаблони. Негативні фоторезисти під впливом випромінювання стають нерозчинними для протравлювача, тоді як позитивні – утворюють розчинну для протравлювача плівку.

Етапи фотолітаграфічного процесу (рис. 3.5.):

- Нанесення тонкого шару фоторезиста (0,5-1 мкм) на поверхню напівпровідникової пластини;
- Накладення фотошаблону рисунком до пластини і засвічення фоторезисту ультрафіолетовою кварцовою лампою;
- Проявлення пластини у протравлювачі та промивання;
- Видалення залишків оксидного шару.

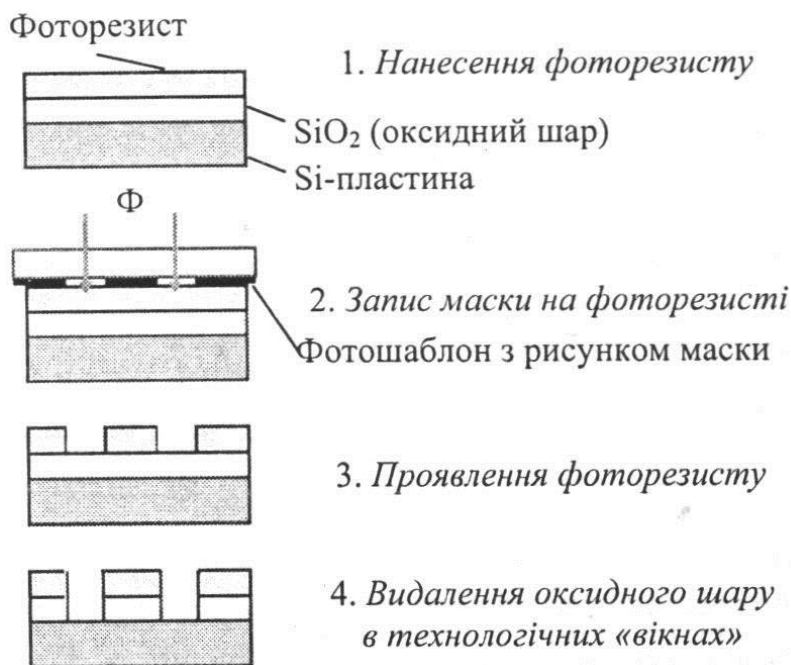


Рис. 3.5. Етапи фотолітаграфічного процесу на кремнієвій пластині [19].

Інтерференційна (голографічна) літографія – метод створення захисної маски двома або більше когерентними хвилями, які внаслідок інтерференції формують на шарі фоторезисту рисунок маски у вигляді просторово-періодичної структури.

### 3.3.7. Іонно-променева літографія

Довжина хвилі пучка є найменшою – 0,01-0,1 нм, що у перспективі може забезпечити найвищу роздільну здатність. До переваг даного методу літографії

									Арк.
									56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

відносяться: значно менше розсіяння іонів порівняно з електронами, мала енергія і тому малий вплив вторинних електронів; більша продуктивність.

Недоліками іонно-променевої літографії є пошкодження масивних іонів кристалічної структури підкладки та необхідність у стійких до іонного бомбардування шаблонів.

### **3.3.8. Травлення**

Переважають застосовують три види травлення – хімічне, іонне та лазерне.

Хімічне травлення – це процес видалення з поверхні зразка матеріалу у рідинному чи газоподібному реагенті.

Іонне травлення – розпилення поверхневого шару зразка під впливом іонного бомбардування.

Лазерне травлення – процес випаровування верхнього шару матеріалу під дією лазерного випромінювання, що призводить до сильного нагрівання.

Травлення застосовують для хімічного полірування поверхні, для очищення поверхні від бруду та окислів, а також для модифікації рельєфу поверхні.

### **3.3.9. Металізація**

Металізацію використовують для нанесення контактних площадок.

Проводять її з використанням наступних методів:

- Термовакуумне осадження;
- Електронно-променеве випаровування;
- Гальванічне нанесення;
- Іонно-променеве осадження [19].

### **3.3.10. Приєднання виводів**

Приєднання ніжок до контактних площадок відбувається за допомогою дротиків з алюмінію чи золота діаметром 30-50 мкм, які сильно притискають до контактної площадки та нагрівають до температури 500-600 К. Це призводить до взаємної дифузії та утворення міцного механічного з'єднання.

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

### **Висновки до розділу 3**

У даному розділі було представлено структурну схему розробленого 3D-сканера та описано його складові частини. Також були вказані вимоги до об'єкту сканування.

Описано принцип роботи сканера, процес його калібровки та методику побудови об'єкту. Створена блок-схема роботи сканера.

Також була описана технологія виробництва лазерних діодів.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі було виконано огляд існуючих нині 3D-сканерів та умовно поділено їх на дві групи – контактні та безконтактні сканери. Визначено їх переваги та недоліки, розглянуто їх застосування та перспективи використання. З огляду на технічне завдання було обрано безконтактний типа 3D-сканера, тріангуляційний метод сканування.

Було розглянуто доступні сьогодні типи лазерів, визначено їх конструктивні особливості, переваги та недоліки. Для використання у приладі було обрано напівпровідниковий лазерний діод з такими характеристиками:

- Довжина хвилі – 540 нм;
- Потужність 100 мВт.

Розглянуто ПЗЗ та КМОН матриці, характеристики цифрових камер та шуми, що виникають при формуванні зображення у цифровій камері.

Було представлено структурну схему розробленого приладу, принцип роботи та методику побудови поверхні об'єкту. Також була зіставлена блок-схема роботи 3D-сканера.

Описано процес виготовлення лазерного діода.

Отриманий в результаті розробки прилад отримав такі характеристики:

- глибина сканованої сцени 0,3–1,0 м ;
- точність вимірювання відстані до точок поверхні об'єкта не гірше 0,5 мм;
- роздільну здатність не гірше 0,5 мм;
- діапазон сканування 360°;
- час побудови матричної 3D-моделі об'єкта не більше 5 хвилин.

Що повністю відповідає технічному завданню даної дипломної роботи.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





20. Анисимова И.Д. Полупроводниковые фотоприемники:

Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны  
спектра / И. Д. Анисимова, И. М. Викулин, Ф. А. Зайтов, Ш. Д.

Курмашев; под ред. В. И. Стафеева. – М. : Радио и связь, 1984. – 216 с.

					БР. 6.050802.051.002 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

