

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

В.П. Кожем'яко, Г.Л. Лисенко, В.А. Суприган

СХЕМОТЕХНІКА ПОБУДОВИ ОПТОЕЛЕКТ- РОННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ОБРОБКИ ІН- ФОРМАЦІЇ

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів бакалаврського напрямку 6.0911 – “Лазерна та оптоелектронна техніка”. Протокол №4 від “27” листопада 2003 р.

Вінниця ВДТУ 2003

УДК 681.383.9: 681.327
С 92

Р е ц е н з е н т и:

В.С. Осадчук, доктор технічних наук професор
, доктор фізико-математичних наук, професор
С.О. Костюкевич, кандидат фізико-математичних наук, с.н.с.

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

В.П. Кожем'яко, Г.Л. Лисенко, В.А. Суприган
С 92 Схемотехніка побудови оптоелектронних інтегральних схем обробки інформації. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 103 с.

У навчальному посібнику розглянуті матеріали щодо проектування оптоелектронних інтегральних схем та волоконно-оптичних приладів для побудови телекомунікаційних та комп'ютерних мереж.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності “Лазерна та оптоелектронна техніка” і може бути корисним для спеціалістів, які займаються проектуванням оптоелектронних інтегральних схем.

УДК 681.383.9: 681.327

© В.П. Кожем'яко, Г.Л. Лисенко,
В.А. Суприган, 2003

В.П. Кожем'яко, Г.Л. Лисенко, В.А. Суприган



СХЕМОТЕХНІКА ПОБУДОВИ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Навчальне видання

Володимир Прокопович Кожем'яко
Геннадій Леонідович Лисенко
Віталій Анатолійович Суприган

Схемотехніка побудови оптоелектронних інтеграль- них схем обробки інформації

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор В.О. Дружиніна

Навчально-методичний відділ ВДТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ

Підписано до друку

Формат 29,7×42 $\frac{1}{4}$

Друк різнографічний

Тираж прим.

Зам. №

Гарнітура Times New Roman

Папір офсетний

Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького державного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОБУДОВИ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ	7
1.1. Аналіз алгоритмів обробки зображень на оптоелектронних інтегральних схемах	7
1.2. Аналіз технології виготовлення оптоелектронних інтегральних схем	13
1.3. Аналіз схемотехніки оптичних та оптоелектронних інтегральних схем	19
1.4. Висновки	26
1.5. Контрольні запитання	27
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ У ЦИФРОВОМУ ОПТОЕЛЕКТРОННОМУ ПРОЦЕСОРІ	28
2.1. Розробка математичної моделі паралельного передавання даних по ВОЛЗ	28
2.2. Побудова функціональної моделі оптоелектронних інтегральних схем з паралельно-послідовним поворотом зображень	32
2.3. Розробка функціональної моделі базових комірок та операційного екрана на їх основі	40
2.4. Розробка математичної моделі комірки оптоелектронної інтегральної схеми	44
2.5. Висновки	47
2.6. Контрольні запитання	47
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ЦИФРОВОГО ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ПОЗРІЗОВОГО ПРОЦЕСОРА	48
3.1. Особливості організації цифрового оптоелектронного процесора	48
3.2. Організація пам'яті на оптоелектронних інтегральних схемах	52
3.3. Розробка структури та комірки оптоелектронної інтегральної схеми	55
3.4. Розробка приладу паралельного передавання даних по ВОЛЗ у цифровому оптоелектронному процесорі попарного сортування даних	56
3.5. Пошук та ідентифікація об'єктів на операційних екранах ...	60

3.6. Висновки	67
3.7. Контрольні запитання	68
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЙНОГО ЕКРАНА	69
4.1. Основні аспекти розробка компіляторів для оптоелектронних інтегральних схем	69
4.2. Дослідження параметрів оптоелектронних інтегральних схем з оптичними комутаторами	71
4.3. Дослідження характеристик приладу паралельного передавання даних по оптоволоконному світловодному джгуту	75
4.4. Дослідження енергетичного балансу шини передавання даних	78
4.5. Розробка топології оптоелектронної інтегральної схеми	83
4.6. Визначення вимог та рекомендацій до приладу паралельного передання даних по ВОЛЗ у цифровому оптоелектронному процесорі	85
4.7. Висновки	85
4.8. Контрольні запитання	86
СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ВЕБ-САЙТИ ВІДОМИХ ВИРОБНИКІВ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	89

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АГК – арсенід-галієві компілятори
БАЕ – базові апаратні елементи
ВДТУ – Вінницький державний технічний університет
ГОІС – гібридна оптична інтегральна схема
ДН – діаграма направленості
ЕП – елемент пам'яті
НПЛ – напівпровідниковий лазер
ОВ – оптичне волокно
ОВШ – оптоволоконний шлейф
ОЕ – операційний екран
ОЕІС – оптоелектронна інтегральна схема
ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій
ОІС – оптична інтегральна схема
ОК – оптичний комутатор
ОКТ – оптично керований транспарант
ОХ – оптичний хвилевід
РПВ – рівень побічних випромінювань
СВД – світловипромінювальний діод
ФД – фотодіод
ФЩІ – функція щільності імовірності
ЦОЕП – цифровий оптоелектронний процесор

ВСТУП

В сучасній науково-промисловій області все більше уваги приділяють орієнтації інформаційних технологій на нову елементну базу – оптоелектронну [1-4]. Галузь обробки зображень також звичайно орієнтована на оптоелектроніку [5]. Однією з найважливіших особливостей її є те, що вона дозволяє паралельно обробляти сигнали за час, сумірний з часом проходження сигналу через середовище, що його обробляє [6]. Потрібно взяти до уваги також те, що несуча зображення хвиля світлового діапазону є робочою хвилею в пристроях з оптичною та оптоелектронною обробкою даних [7-15]. Іншою важливою особливістю є те, що розвиток мікроелектроніки привів до технологій такого рівня, який дозволив виготовляти елементи з розмірами порядку довжини хвилі світла [16; 17]. Тому спостерігається тенденція виготовлення оптоелектронних пристроїв у інтегральному вигляді.

Існуючі інформаційні технології пов'язані з обробленням великих потоків інформації, в основному, поданих у вигляді зображень. Одним з ефективних шляхів підвищення швидкодії пристроїв обробки зображень є розвиток та впровадження оптоелектронних інформаційних технологій. Враховуючи перспективність мікромініатюризації просто пояснюється важливе значення інтегральної оптоелектроніки у самій оптоелектронній галузі.

До окремого класу задач відносять попереднє оброблення зображень. Прилади, які реалізують ці методи, повинні бути здатними до паралельного введення-виведення зображень з одночасним попереднім обробленням. Беручи до уваги основні напрямки роботи науково-дослідних шкіл в області оптоелектроніки на Україні і в світі, основні та перспективні напрямки роботи, як створення нових: оптоелектронної елементної бази; оптоелектронних інтегральних елементів на основі квантово-розмірних структур; оптико-електронних систем штучного інтелекту; інтегральних- та волоконно-оптичних засобів оброблення та передавання інформації; оптичних та оптоелектронних методів оброблення зображень та ін. можна стверджувати, що пристрої з паралельним введенням-виведенням великих масивів інформації з одночасною попередньою обробкою при передаванні є невід'ємною частиною різних оптоелектронних систем, а саме, питання розробки та дослідження таких засобів знаходяться в стадії постановки задачі і є актуальним.

Дана робота пов'язана з науковими дослідженнями з метою підвищення швидкості попереднього оброблення зображень з одночасним паралельним передаванням на основі оптоелектронних інтегральних схем та оптоволоконного шлейфу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОБУДОВИ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ДЛЯ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Для побудови ОЕІС обробки зображень слід розглянути та проаналізувати відомі алгоритми обробки зображень, виділити коло задач, які найбільш ефективно реалізуються на інтегральній оптоелектронній елементній базі, проаналізувати схемотехнічні особливості та технологічні можливості виготовлення таких ОЕІС.

1.1. Аналіз алгоритмів обробки зображень на оптоелектронних інтегральних схемах.

З метою створення різноманітних технічних систем обробки інформації, а особливо штучного інтелекту, велика увага в сучасному науковому світі та промисловості приділяється пошуку та створенню принципово нових пристроїв [18-28]. Спостерігається чітка тенденція оброблення інформації у її природному вигляді, тобто без перетворень [2; 5]. Серед багатьох діапазонів представлення даних особливу увагу викликають оптичний та близький інфрачервоний діапазони. Ці діапазони характеризуються наявністю елементної бази, яка на сучасному етапі має найбільшу теоретичну швидкодію [4; 29-38]. Тому цілком природно для обробки даних, які існують в широкій смузі частот, представляти та обробляти їх в оптичному та інфрачервоному діапазонах у вигляді зображень, якщо для їх перетворення не вимагається апаратних затрат та саме перетворення несуттєво зменшує швидкодію.

У зв'язку з цим виникає потреба аналізу методів обробки даних на ОІС та ОЕІС (рис.1.1).

Аналіз обробки інформації суто оптичними методами добре описано в літературі [39-54]. Характерною рисою оптичних методів обробки зображень є те, що їх обробка відбувається без використання проміжних позаалгоритмічних ланок збереження інформації. Обробка таких зображень відбувається виключно на оптичній елементній базі. Обробку зображень у цьому випадку можливо вважати аналоговою.

Оптоелектронні методи характеризуються виконанням обробки інформації використовуючи активні електронні та оптоелектронні компоненти.

Спільним для згаданих методів є розв'язання загальних задач (рис.1.1). Для обробки зображень на ОІС та ОЕІС задача введення-виведення приймає різні забарвлення в залежності від мети та виду даних. Розглянемо основні напрямки.

Введення-виведення зображень розділяється на такі складові: прийом, видача, індикація зображень та їх характеристик.

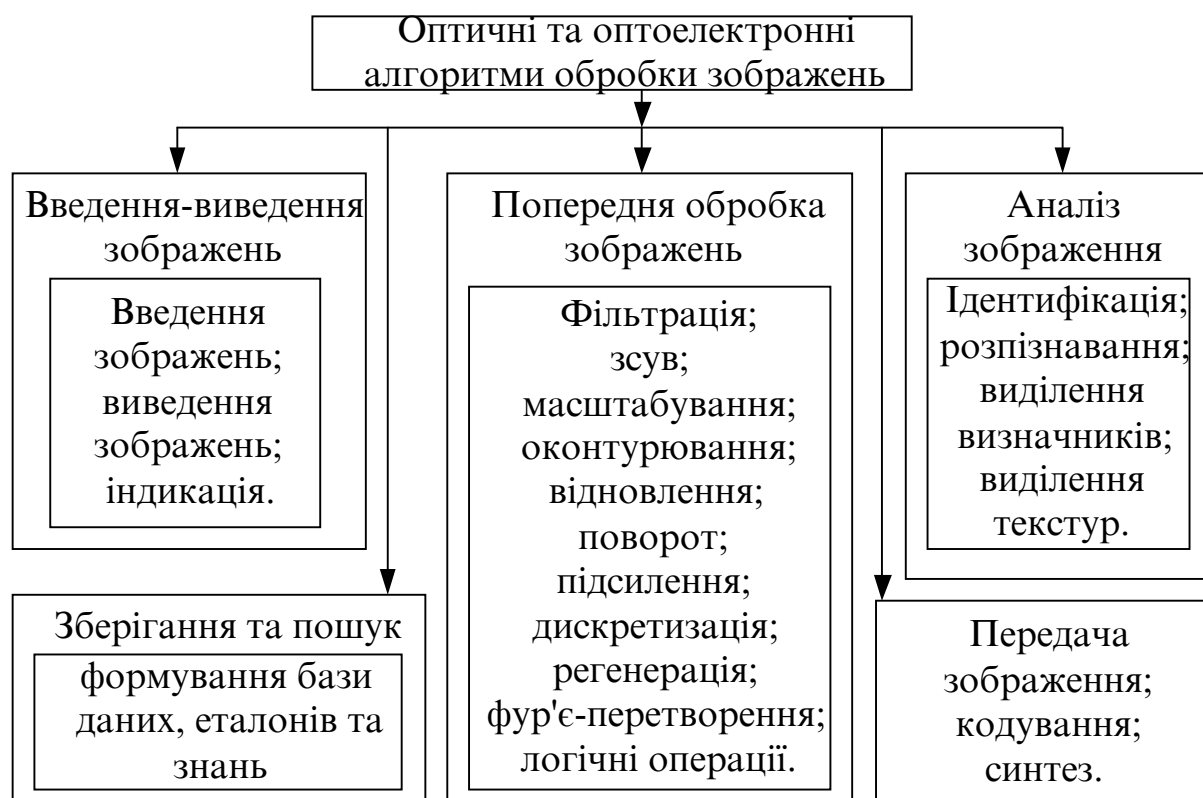


Рисунок 1.1 – Оптичні та оптоелектронні алгоритми обробки зображень

Введення зображень ОІС та ОЕІС може бути в оптичному, електричному та комбінованому виді. Оптичний вид зображень – інформація несучою якої є світлове або інфрачервоне випромінювання. В ОІС та ОЕІС зображення заносять по оптичних світловодах [55] або зображення проектується безпосередньо на кристал. Зображення як вид даних в електричній формі подаються в ОІС та ОЕІС по електричних провідниках. Комбінований тип вхідних зображень це одночасне їх надходження як в оптичному, так і в електричному видах.

Виведення зображень з ОІС та ОЕІС це операція обернена прийому, причому усі способи прийому зображень є інваріантними і для їх передачі.

Індикація – відображення поточного зображення, яке знаходиться у пристрої [56].

Попередня обробка зображень призначена для перетворення зображень у стандартний або визначений вид. Така обробка включає: підсилення, регенерацію, цифро-аналогове та аналого-цифрове перетворення, фільтрацію, зсув, масштабування, оконтурювання, відновлення, поворот зображення, фур'є-перетворення та відновлення.

Підсилення – це функція аналогових компонент ОІС та ОЕІС. Їх задача полягає у підвищенні або пониженні рівня вхідного сигналу у заданому спектральному діапазоні.

Дискретизація – перетворення зображень у такий вид, коли їх характеристики та саме зображення представляється у цифровій формі [51].

Регенерація – це прийом-передача даних ОІС та ОЕІС з відтворенням їх первісних характеристик без внесення додаткових енергетичних та інформаційних затрат.

Фільтрація – виділення інформативної складової даних або її частини з вхідних зображень.

Зсув – операція в результаті якої зображення можна змістити у просторі, порядку та спектрі.

Масштабування – операція збільшення або зменшення вхідного набору даних. Операція в загальному виді відбувається таким чином: визначаються критичні елементи даних для заданого коефіцієнта масштабування, потім проводиться їх видалення або розмноження. Існує ще один спосіб масштабування – представлення зображення сукупністю графічних примітивів. Подальше масштабування виконується над цим примітивом [57]. Такий вид обробки – векторний.

Оконтурювання – операція виділення оригінальної деякого масиву даних, які мають однакові характеристики.

Відновлення – операція регенерації спотворених даних з додатковими зовнішніми енергетичними та інформаційними затратами.

Поворот – операція зміни порядку обробки передачі або розміщення даних.

Фур'є-перетворення – операція, результатом якої є фур'є-образ вхідного зображення. Ця операція може виконуватися оптичними системами в аналоговій формі або цифровими системами за допомогою алгоритмів швидкого фур'є-перетворення [58; 59].

Логічні операції – тип цифрових перетворень, коли дані представляють у вигляді булевих змінних. Такі операції в ОІС та ОЕІС виконуються порозрядно паралельно-послідовно [60]. До переліку логічних операцій відносять: диз'юнкцію, кон'юнкцію, заперечення, рівнозначність, нерівнозначність і т.д.

Аналіз зображень – це сукупність операцій, характерним для яких є обробка даних за допомогою стандартизованих алгоритмів [61]. До них відносять: ідентифікацію, розпізнавання, виділення визначників та виділення текстур [62].

Ідентифікація – визначення подібності між двома об'єктами: зображеннями, сигналами і т.д.

Розпізнавання – визначення належності об'єкта до певного класу об'єктів [63; 64].

Виділення визначників – це комплексна операція в яку входять пошук найбільш інформативних визначників та їх обробка [65].

Виділення текстур – операція пошуку та виділення частини зображення, яку відрізняє від інших тип забарвлення, впорядкованості та ін. [66].

Складовою частиною систем з штучним інтелектом є операції накопичення, зберігання та пошуку образів. Ці операції використовуються в пристроях оптичної, голографічної та оптоелектронної пам'яті в системах

попередньої обробки та аналізу зображень для навчання та самонавчання систем.

В комплексних системах обробки та використання зображень виникає необхідність передавати великі об'єми інформації. Для цього використовуються спеціальні міжмашинні інтерфейси з відповідними протоколами та архітектурою зв'язку.

Кодування зображення – це операція представлення його кожної точки, примітива, текстури або повністю усього зображення в іншій формі використовуючи таблицю, по якій кодують, у якій відображено відповідність представлення вихідних елементів до вхідних [67].

Операція створення нових зображень або їх елементів називається синтезом. Процес синтезу проводиться у такому порядку: опис, конструювання сцени, зйомка та відображення [68].

Одним із перспективних напрямків підвищення паралелізму обробки числової інформації вважається перехід від одно-двооперандної обробки до макрооперандної організації обчислень [69-; 74]. Особливий ефект очікується від застосування багатооперандної обробки інформації при реалізації інтегральних операцій, зокрема при паралельному підсумовуванні множини операндів, що в алгоритмах обробки сигналів і зображень визначається як оператор групового підсумовування.

Специфіка багатооперандної обробки полягає в тому, що операції або набір операцій виконуються в єдиному операційному циклі над блоком даних, кількість яких більше двох [75].

Існують дві групи почислових та порозрядних способів обчислення оператора групового підсумовування (рис.1.2) [71] виду, залежно від формування проміжних сум [69]:

$$x_n = \sum_{i=1}^n a_i, \quad (1.1)$$

де x – оператор групового підсумовування;

i – змінна підсумовування;

a_i – доданки (розрядні перерізи);

n – вимірність масиву даних.

В рамках кожної групи, у відповідності з подачею і обробкою доданків a_i , можна виділити дев'ять способів обчислення оператора, причому у назві кожного способу перша частина визначає спосіб подачі доданків, а друга – спосіб подачі розрядів доданків.

Таким чином актуальною є задача вибору оптимальної математичної моделі оператора групового підсумовування з урахуванням реалізації принципу багатооперандної обробки даних. В оптоелектронних системах обробки зображень найбільш відомим є паралельно-послідовний спосіб в обох групах, при якому виконується паралельне підсумовування всіх n доданків при послідовній подачі їх розрядів. В почисловій групі цей спосіб відомий як алгоритм логарифмічного підсумовування або рекурсивного

подвоєння. Цей спосіб, як і всі способи з паралельною або змішаною (групами) обробкою операндів і розрядів, використовує метод “піраміди”. Цей метод дозволяє організувати виконання будь-якої інтегральної операції за рахунок її максимального розпаралелювання. При цьому довжина критичного шляху у відповідних інформаційних графах зводиться до значення порядку $[69] t \times \log(2n)$, де n – вимірність масиву даних; t – час виконання елементарної операції.

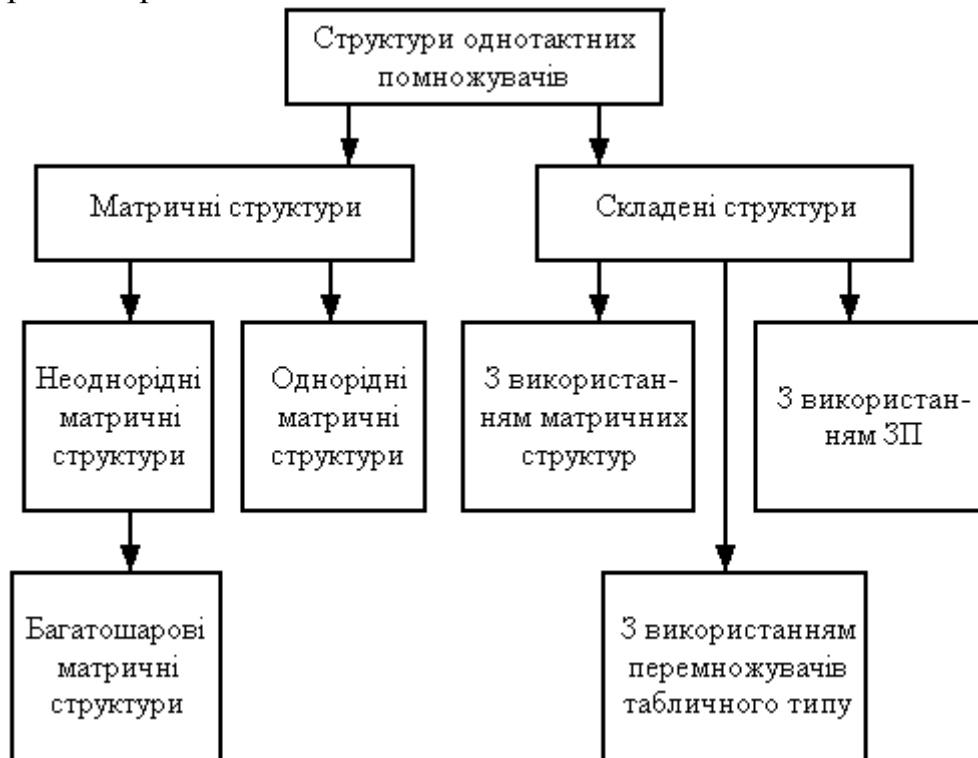


Рисунок 1.2 – Класифікація структур обчислення оператора групового підсумовування

Незважаючи на всі переваги і широке використання, почисловий паралельно-послідовний спосіб не є багатооперандним, оскільки реалізує сукупність бінарних операцій підсумовування.

На теперішній час найширше застосовуються два алгоритми багатооперандного підсумовування сукупності доданків [69]:

- 1) з використанням розрядних перерізів;
- 2) з використанням перерізів різниць.

Перший алгоритм, являє собою порозрядний паралельно-послідовний спосіб, в основі якого лежить обчислення порозрядних сум (розрядних перерізів) сукупності доданків. Розглянемо його реалізацію. Найбільш відомі два методи:

- 1) шляхом прискореного перетворення багаторядного коду в однорядний;
- 2) шляхом перетворення розрядних перерізів, що включає підрахунок одиниць в кожному розрядному перерізі, і перетворення отриманого ущільненого коду в унітарний код.

Ефективність обох способів полягає у відмові від застосування багаторозрядних лічильників і суматорів та у використанні апаратних засобів для реалізації необхідних перетворень інформації. Разом з тим, для накопичення проміжних сум в першому способі використовується паралельний багаторозрядний суматор.

При реалізації другого способу використовується постійний запам'ятовувальний пристрій і перетворювач двійкового коду в ущільнений або постійний запам'ятовувальний пристрій і асоціативний запам'ятовувальний пристрій.

Алгоритм підсумовування з використанням розрядних перерізів знаходить застосування в процесах цифрової двовимірної згортки з паралельним обчисленням по розрядних перерізах. Істотним недоліком при використанні даного алгоритму є необхідність застосування для підсумовування проміжних результатів, вибраних із запам'ятовувального пристрою, деревоподібної конвеєрної мережі суматорів, тобто повернення до відомого способу розпаралелювання операції підсумовування множини операндів – до почислового паралельно-послідовного способу. Таким чином, незважаючи на те, що усі способи реалізації алгоритму з використанням розрядних перерізів орієнтовані на апаратні засоби виконання необхідних перетворень інформації, потрібно вдаватися до реалізації багаторозрядного паралельного суматора для формування остаточного результату.

Другий алгоритм з двох відомих багатооперандних алгоритмів, який використовує зрізи різниць, полягає у виділенні загальної частини всіх доданків і формуванні відповідних залишків в процесі циклічної реалізації алгоритму з поступовим зменшенням кількості вхідних даних до моменту отримання нульового залишку. Суть даного алгоритму полягає в тому, що підсумовування n чисел зводиться до обчислення і підсумовування R часткових сум, тобто [71]:

$$S = \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^R q_j p_j, \quad (1.2)$$

де S – оператор групового підсумовування;

R – кількість вхідних змінних;

q_j – загальна значуща частина всіх доданків на кроці j ;

p_j – кратне загальної частини на кроці j .

ЦОЕП, що використовує постеківий спосіб кодування інформації в масивах зображень і поєднує цифровий спосіб обробки й аналоговий спосіб представлення зображень відомий як пристрій складений за допомогою агрегативування. Такий комбінований підхід при обробці зображень, поданих у просторово-неперервній формі, дозволяє досягти високої точності і значної швидкодії. Для нього характерне представлення розрядних перерізів багаторівневих зображень, тобто бінарних матриць, що містять однойменні

розряди зображення, у вигляді оптичних пучків. В результаті процес обробки масивів зображень можна розглядати як обробку окремих бінарних операндів по всьому полю зображення.

Тому актуальним є створення такого ЦОЕП на оптоелектронній елементній базі у інтегральному вигляді. Для цього потрібно: розробити структуру базової комірки ОЕІС для виконання операцій введення-виведення та попередньої обробки зображень.

1.2. Аналіз технології виготовлення оптоелектронних інтегральних схем

Характеристики пристроїв інтегральної оптики визначаються технологією їх виготовлення [76-84]. Це обумовлено головним чином тим, що внаслідок малої довжини світлових та інфрачервоних хвиль існують жорсткі вимоги до однорідності фізичних параметрів матеріалів та ін. Загальною вимогою до матеріалів, що використовуються в пристроях інтегральної оптики є можливість створення світловодних ділянок з малими втратами в заданому спектральному діапазоні та сумісність з іншими матеріалами. При цьому допустимий рівень втрат не повинен перевищувати долей децибелу на сантиметр для пасивних компонентів та декількох децибел на сантиметр – для активних.

Існують два основних класи оптоелектронних інтегральних схем [9; 10; 14; 31] – гібридні та монолітні мікросхеми [84]. Для виготовлення ГОІС використовують навісні елементи та компоненти, для виготовлення ОІС використовується один матеріал [84].

Відомо три основних класи матеріалів для підкладок ОІС та ГОІС [10; 14] (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Характеристики основних класів матеріалів

Властивості та характеристики матеріалу	Монокристали активних діелектриків (LiNbO ₃ , LiTaO ₃ і т.д.)	Монокристали напівпровідникових сполучень A ^{III} B ^V .	Аморфні діелектрики і напівпровідникові матеріали на кремнієвих підкладках.
Акустооптичний ефект	Так	Так	В гібридній структурі
Електрооптичний ефект	Так	Так	Ні
Якість оптичних світловодів	Добра	Дуже добра	Відмінна

Продовження таблиці 1.1

Інтеграція ви- промінювачів	В гібридній структурі	Так	В гібридній структу- рі
Інтеграція фо- топриймачів	В гібридній структурі	Так	Так
Складність ви- готовлення	Невисока	Висока	Середня

Таким чином можна пересвідчитись, що такий клас матеріалів як монокристали напівпровідникових сполучень $A^{III}B^V$ найбільш зручні для виготовлення більшості елементів ЦОЕІС. Тому у подальшому основний нахил будемо робити на інтегральну технологію.

Напівпровідникові матеріали типу $A^{III}B^V$ та їх тверді розчини являють собою найбільш перспективні матеріали для створення монолітних ОІС (табл.1.2).

Таблиця 1.2 – Перелік характеристик технологій виготовлення ОІС та ГО-ІС [10; 14]

Характеристики	Епітаксійне ви- рощування (мол. пром. епі- таксія)	Методи замі- щення атомних домішок	Тонкоплів- кові по- криття	Зменшення концентрації носіїв
Роздільна здат- ність по вертикалі	~0,5 мкм	~0,3 мкм	~0,3 мкм	~0,3 мкм
Характеристики	Епітаксійне ви- рощування (мол. пром. епі- таксія)	Методи замі- щення атомних домішок	Тонкоплів- кові по- криття	Зменшення концентрації носіїв
Роздільна здат- ність по довжині та ширині	~0,10 мкм	~0,10 мкм	~0,15	~0,2

Елементи на основі цих матеріалів отримують методами дифузії, епітаксійного нарощування, іонної імплантації та ін. [10; 14; 31] (табл.1.3).

Гібридний підхід для виготовлення ГОІС представляє собою зручний підхід отримання схем з широким спектром операцій, що виконуються. ГОІС виготовляються за будь-якою зручною технологією.

Аналізуючи дані з таблиці 1.2. можна зробити висновки, що технологія епітаксійного нарощування є найбільш перспективною для виготовлення ЦОЕІС.

Таблиця 1.3 – Характеристики хвильоводних структур на основі напівпровідникових матеріалів [10]

Матеріали хвильоводу та підкладки	Діапазон прозорості, мкм	Показник заломлення хвильоводного шару на відповідній довжині хвилі, мкм	Метод формування	Втрати, дБ/см на відповідній довжині хвилі, Мкм
GaAs/ Ga _{1-x} Al _x As (n+-GaAs, GaAsP)	0,8...11	3,6(0,8) 3,37(1,15)	Епітаксія	4...0 (1,15)
Ga _{1-x} Al _x As/ Ga _{1-y} Al _y As (x>y)	0,9...11	3,1...3,37(1,15)	–	4(1,15)
GaAs _x P _{1-x} / GaP (InGaP)	0,6...10	3,1...3,4(0,63)	–	1(1,15)
GaP/Ga _{1-x} Al _x P(n+ GaP)	0,6...10	3,31(0,63)	Епітаксія, іонна імплантація	3(1,15)
Ga _{1-x} In _x As/ GaAs (InP)	0,9...10	3,4(1,15)	Епітаксія	4(1,15)
In _{1-x} Ga _x P _{1-y} As _y / InP	1...16	3,37(1,15)	–	4(1,15)
CdS _{1-x} Se _x /CdS	0,5...11	2,46...2,5(0,63)	Епітаксія, дифузія	10(0,63)
ZnS _{1-x} Se _x /ZnS	0,4...12	2,37(0,63)	Дифузія	3(0,63)
Zn _{1-x} Cd _x S/ZnS	0,4...12	2,37(0,63)	–	3(0,63)
Zn _{1-x} Cd _x Se/ZnSe	0,5...12	2,58(0,63)	–	3(0,63)
ZnTe	0,55...12	2,98(0,6)	Іонна імплантація	1...3(0,63)
CdTe	0,8...12	2,97(0,85)	–	1...3(0,8)
ZnO/Al ₂ O ₃	0,2...4	1(0,6)	хімічне осадження з газової фази	0,7(0,6)
ZnO/SiO ₂	0,2...4	2(0,6)	Напилення	2(0,63)

Для сполук $A^{III}B^V$, коли отримуються хвильоводні шари методом дифузії, частіше за все використовують як легуючі суміші цинку (акцептор). Крім цинку в ролі легуючих домішок використовують Cd, Se, S, Te. Профіль дифузії залежить від режимів дифузії, дефектів підкладки, якості підготовки поверхні.

Дифузія, як метод виготовлення хвильоводів, що мають товщину декілька мікрометрів оснований на дифузії домішкових атомів підкладки. При цьому використовуються стандартні методи дифузії, в яких підкладку розміщують в піщі (звичайно при температурах 700-1000⁰C), де знаходиться джерело домішкових атомів. Таке джерело може бути потоком газу, рідини або твердою поверхневою плівкою. Основним недоліком є використання високих температур при виготовленні, що приводить до появи мікротріщин та збільшує швидкість старіння ОХ.

Молекулярно-променева епітаксія. Оптичні хвильоводи $A^{III}B^V$ та їх тверді розчини отримують, використовуючи спосіб молекулярно-променевої епітаксії. Матеріали, що утворюють тверду фазу заданого складу, термічно випаровуються у вакуумі та осаджуються на підігріту підкладку. Спосіб молекулярно-променевої епітаксії забезпечує епітаксійне нарощування шарів $A^{III}B^V$ зі швидкістю $1,5 \times 10^{-4}$ мкм/с при температурі 600⁰C.

Метод молекулярно-променевої епітаксії являє собою процес епітаксійного росту тонких шарів різних сполучень за рахунок реакції між молекулярними або атомними пучками, які термічно утворюються на поверхні підкладки, яка знаходиться в надвисокому вакуумі при підвищеній температурі. За цими характеристиками метод буде відрізнятися від інших технологій та характеризуватися [31]:

- малою швидкістю росту порядку 1мкм/год;
- відносно низькою температурою росту;
- можливістю введення різних пароподібних компонентів для зміни складу шару та управління концентрацією домішок шляхом введення додаткових джерел, які утворюють необхідні молекулярні пучки;
- наявністю атомно-гладкої поверхні кристалу, який вирощується;
- можливістю аналізу в ході росту.

В залежності від агрегатного стану середовища, з якого виконується кристалізація, розділяють газову, рідинну та молекулярно-променеву епітаксію.

Однорідність складу плівки та її кристалічної структури визначається однорідністю молекулярних пучків по площі підкладки.

Епітаксійний ріст напівпровідникових з'єднань включає ряд послідовних явищ, найважливішими з яких є:

- 1) адсорбція складових матеріалу атомів і молекул;
- 2) міграція та дисоціація адсорбованих частинок;
- 3) пристосування складових атомів до підкладки, що приводить до зародкоутворення та росту.

Таким чином тонка плівка, яка росте, має кристалографічну структуру, що визначається підкладкою.

Газову фазу в залежності від виду початкових реагентів розділяють на хлоридний, хлоридно-гібридний і гібридно-металоорганічні сполуки. Спосіб епітаксії з газової фази забезпечує швидкість росту епітаксійних шарів приблизно рівну 8×10^{-3} мкм/с при температурах 750°C .

Нарощування епітаксійних шарів GaAlAs на підкладках GaAs при виготовленні ОІС, як правило, проводять з рідкої фази, з використанням трубчатої печі при температурах $700\text{-}900^{\circ}\text{C}$.

Використання плівок ZnO в поєднанні з підкладками з кремнію та арсеніду галію дозволяє реалізувати гібридні інтегральні акустооптичні пристрої.

Оптичні хвилеводи на основі плівок ZnS, що мають високі нелінійні властивості, отримують, використовуючи методи молекулярно-променевої епітаксії і вакуумного напилення.

Таким чином метод молекулярно-променевої епітаксії має ряд технологічних особливостей, які дозволяють спростити сам процес виготовлення ОЕІС, підвищити рівень виходу якісних кристалів та виготовляти кристали розмірами порядку 2×2 см.

Метод іонної імплантації дозволяє синтезувати хвилеводні структури в сполуках $A^{III}B^V$ з високою оптичною якістю. У порівнянні з елементарними напівпровідниковими процесами імплантації в багатокомпонентних твердих розчинах є ряд особливостей. До них відносяться: можливість розкладання напівпровідникового матеріалу при відпаленні, що йде за іонною імплантацією; можливі ефекти нестехіометрії, що виходять при іонному втіленні легуючих домішок, атоми яких повинні бути розташовані в одній підградці таким чином, щоб був електрично активним; необхідність в ряді випадків проводити імплантацію при підвищених температурах; можли-

вість зміни в матеріалі підкладки, що викликана неімплантованим легуванням.

При формуванні хвильоводів в сполуках $A^{III}B^V$ проходить зміна концентрації вільних носіїв в шарі, що опромінювався. Протонне бомбардування GaAs призводить до зміни концентрації вільних носіїв р- та n- типів. Для забезпечення однорідності імплантованого шару іонний пучок сканують по поверхні підкладки.

Метод іонної імплантації застосовується у технологічних процесах виготовлення підкладок для невеликого числа матеріалів, хоча і дозволяє виконувати ряд активних та пасивних елементів інтегральної електроніки з високою горизонтальною та вертикальною точністю [31].

В області, де концентрація вільних носіїв стає меншою, показник заломлення збільшується і отриманий компенсований шар використовується як хвильовід. Для зменшення оптичних втрат, що виникають за рахунок імплантаційного порушення, ввели післяімплантаційне відпалення. При цьому для попередження розкладання GaAs при післяімплантаційному відпаленні на поверхню підкладки наносять плівку, що герметизує. Відпалення проводять при температурах 500-700⁰С, при наявності захисної плівки біля 900⁰С протягом 20-30 хвилин.

Глибина проникнення імплантованих іонів залежить від маси енергії, а також від типу матеріалу підкладки та її орієнтації.

За гальмівними характеристиками іонів та дозою іонів, які імплантуються на ділянку з площею 1см², яку можна досить точно визначити за вимірною густиною струму в промені та часом імплантації, можна розрахувати профіль розповсюдження концентрації імплантованих іонів по глибині.

Метод імплантації має більші (в порівнянні з методом дифузії) можливості для розповсюдження концентрації введених домішкових атомів завдяки зміні енергії та дози іонів з ціллю отримання заданого профілю.

Використання способів лазерного та фотонного відпалення також дають зменшення оптичних втрат в імплантованому шарі.

Головним здобутком підрозділу є те, що визначено пріоритетну технологію для виготовлення ЦОЕІС – молекулярно-променевої епітаксії. З урахуванням такої технології слід побудувати математичну модель передачі даних у ЦОЕП. Математична модель повинна відтворювати взаємозв'язок між геометричними характеристиками елементів ЦОЕП та необ-

хідною і достатньою потужністю випромінення. Тому така модель має визначати пороги оптичних сигналів.

1.3. Аналіз схемотехніки оптичних та оптоелектронних інтегральних схем

Схемотехніка ОІС та ОЕІС визначається набором елементної бази та прийомів їх комбінації. Останні підрозділяються в залежності від типу сигналів [85].

Під час обробки зображень сигнали можна розділяти на аналогові, цифрові, цифро-аналогові та імпульсні.

У аналогових та цифрових сигналах загальними інформативними є декілька параметрів – амплітуда, частота слідування, спектр та ін.

Цифрові сигнали можуть бути: імпульсними та потенціальними. Імпульсні – коли числа задаються наявністю або відсутністю імпульсу. Потенціальні – числа задаються зміною рівнів потенціалів.

У імпульсних сигналів відомості про зображення можуть бути не тільки в амплітуді сигналу але і в ряді додаткових параметрів: довжині імпульсів, частоті чи періоді їх повторення, шпаруватості, фазі, спектральному складові та ін.

Широким класом є імпульсні пристрої у яких в якості інформативного параметра є часові характеристики, які також можуть бути поєднанні з іншими. Такі пристрої називаються імпульсно-часовими (рис.1.3) [85].



Рисунок 1.3 – Класифікація імпульсних пристроїв

Перша група, це коли інформативним визначником імпульсної послідовності є її середнє значення амплітуди, то такі пристрої називаються пристроями зі згладжуванням імпульсних потоків.

До другої групи відносять пристрої з системами розгортки, які ґрунтуються на фіксації миттєвих значень сигналів у певні моменти часу.

Третя група імпульсно-часових пристроїв основана на вимірюванні площі імпульсів у кожному періоді їх повторення шляхом інтегрування сигналів протягом визначених інтервалів часу. Така група пристроїв називається пристроями з почерговим інтегруванням.

Четверта група, це спектрально-імпульсні пристрої носієм інформації у яких є спектральний склад потоку періодичних імпульсів.

У п'ятій групі, ймовірно-імпульсних пристроях, носієм інформації є імовірність появи імпульсу в даному такті періодичної послідовності. Широкий клас пристроїв ґрунтується на кодуванні сигналів імпульсами, довжина яких відповідає інформаційному змісту символу. Такі пристрої називаються логіко-часові. Усім значенням надаються відрізки існування довжиною T . Ці відрізки ототожнюються з довжиною інформаційних сигналів.

Проведемо розгляд та аналіз елементної бази для ОЕІС. Для обробки сигналів ОІС та ОЕІС будуватиметься на такій елементній базі: оптичні пасивні, активні (див. рис.1.4) [55] та електронні пасивні та активні елементи.

Пасивні оптичні елементи виконують фіксоване перетворення інформаційного оптичного сигналу або хвиль в ОХ і не вимагають для своєї роботи керуючих електричних або оптичних сигналів. До них відносять: підкладки, хвилеводи, резонатори, ізолятори, дзеркала, фокусувальні елементи, елементи введення-виведення випромінювання, елементи з періодичними та аперіодичними структурами, атенюатори, комутатори, розгалужувачі, елементи з'єднань та зв'язку, фільтри, призми, мультиплексори і демультимплексори.

Під оптичними активними елементами розуміють такі елементи, для роботи яких вимагається прикладення відповідної керуючої напруги, пропускання струму або подача оптичного керуючого сигналу. Виходячи з цього активними оптичними елементами є світловипромінювальні елементи, фотоприймачі, електрооптичні модулятори, перемикачі Міллера, акустооптичні модулятори, логічні і арифметичні елементи.

До пасивних елементів напівпровідникової електроніки відносять елементи, які для роботи не вимагають керуючих сигналів, для створення яких використовують ділянки напівпровідникового матеріалу обмежених розмірів. До переліку таких елементів відносять: дифузні резистори, пінч-резистори, іонно-леговані резистори, епітаксійні резистори, тонкоплівкові

резистори, конденсатори, розподілені RC-структури, індуктивні елементи, міжелементні з'єднання та контактні площадки, провідники, ємності та пасивні елементи напівпровідникової електроніки.

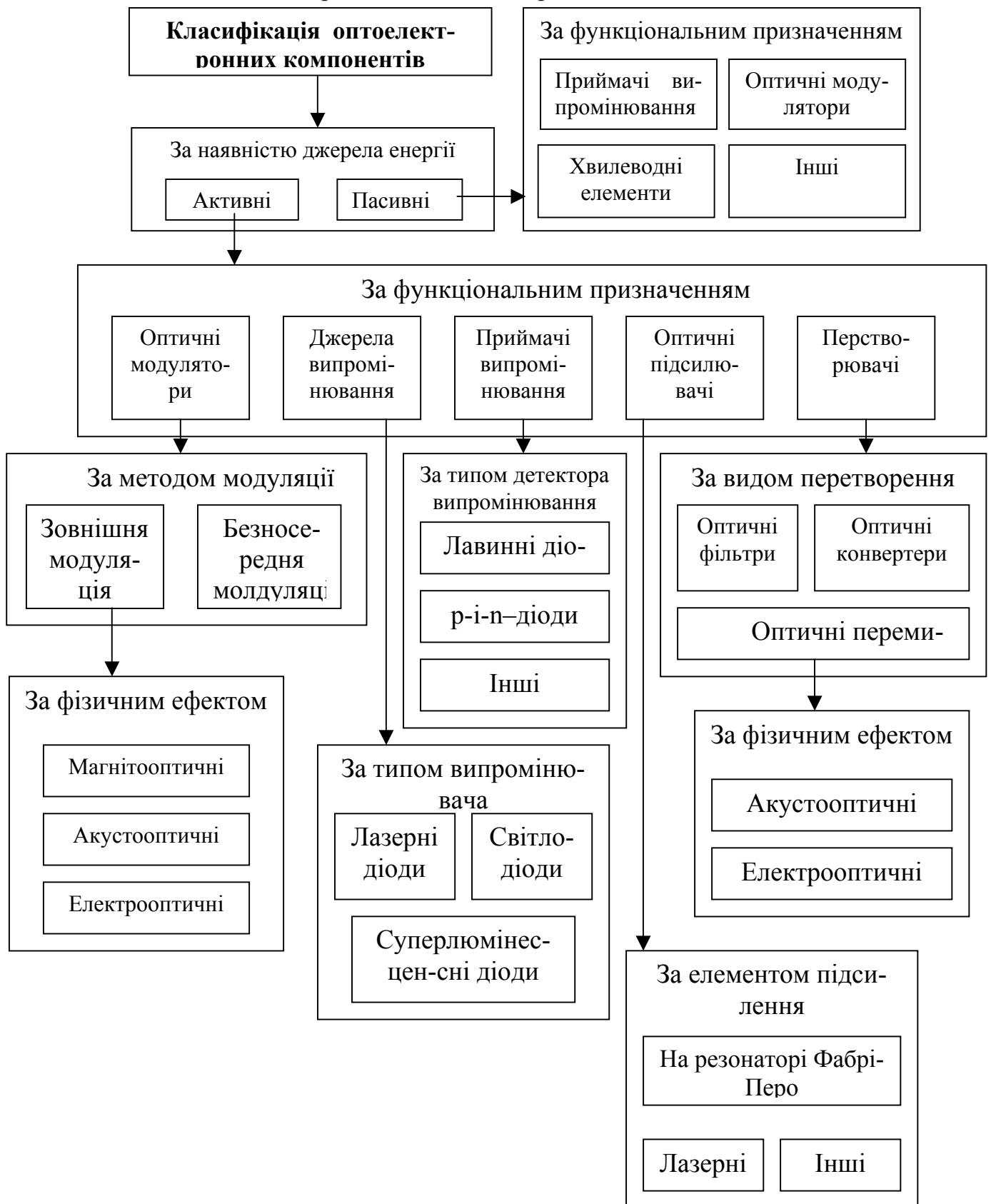


Рисунок 1.4 – Класифікація оптоелектронних компонентів

До активних електронних елементів відносять: транзистори, діоди, елементи на ефекті Джозефсона, елементи з негативним опором – негatronи [86-91] та ін.

Розглянемо оптичні пасивні елементи. Обрання матеріалу для підкладки, на основі якої виготовляється оптична інтегральна схема, дуже сильно залежить від функції даної ОІС. ОІС поділяють на два основні класи: гібридні та монолітні. Оскільки більшість ОІС потребують використання джерела світла, то монолітні ОІС можна виготовити лише з активних оптичних матеріалів, наприклад, з напівпровідникових матеріалів, перерахованих в табл. 1.4. Пасивні матеріали також можна використовувати в якості матеріалу для підкладки, але з зовнішнім джерелом світла, яке оптично або механічно з'єднано з підкладкою.

Хвилеводи. Конструктивною основою для розробки пристроїв інтегральної оптики і ОІС є планарні та різні види тривимірних (канальні та смугові) хвилеводів, сформованих в активних діелектриках та напівпровідникових матеріалах. Тривимірні ОХ на відміну від хвилеводів планарної геометрії забезпечують додаткове обмеження оптичного випромінювання в поперечному перерізі хвилеводу. Поділ тривимірних хвилеводів на канальні і смугові в деякій мірі умовний, але він відбиває конструктивні особливості хвилеводних структур, визначає можливу кількість хвилеводних мод, розподіл їх полів, їх основні характеристики.

Основними типами канальних хвилеводів є: гребінчасті, занурені, занурені градієнтні. Смугові поділяються на: тонкоплівкові та градієнтні.

Таблиця 1.4 – Матеріали для підкладок ОІС [10; 14]

Пасивні, що не генерують світло	Активні, які генерують світло
Кварц; Ніобат літію (LiNbO_3); Танталат літію (LiTaO_3); П'ятиокис танталату (Ta_2O_5); П'ятиокис ніобію; Кремній (Si).	Арсенід галію (GaAs); Алюміній арсенід галію (AlGaAs); Фосфід-арсенід галію; Індій арсенід галію (InGaAs); Інші напівпровідникові матеріали $A^{III}-B^V$ і $A^{II}-B^{VI}$ груп з прямою заборонею зоною.

Елементи введення та виведення випромінювання: поперечні елементи зв'язку, призмові елементи зв'язку, ґраткові елементи зв'язку та звужуваний елемент зв'язку. Основними характеристиками будь-якого елемента зв'язку є його ефективність та модова вибірковість. Ефективність, як правило, визначається частиною загальної енергії оптичного пучка, введеною в хвилевід або виведеною з нього.

Ефективність сполучення залежить від узгодження між полями оптичного пучка і хвилеводної моди.

Поперечні елементи зв'язку являють собою такі елементи, в яких пучок фокусується безпосередньо на спеціально підготовлений переріз хвилеводу. Для випадку пучка в вільному просторі таке фокусування можна здійснити за допомогою лінзи. Поперечне з'єднання двох хвилеводів здійснюють з'єднуючи встик відполіровані або сколоті торці хвилеводів.

Призмові елементи зв'язку використовують якщо потрібно ввести випромінювання в хвилевід, що знаходиться всередині ГОІС. При використанні призми забезпечується рівність складових фазових швидкостей в напрямку осі z розповсюдження як для хвилеводу, так і для пучка.

Граткові елементи зв'язку використовуються у тих самих випадках, що і призмові. Основна перевага полягає в тому, що після виготовлення вони є складовою частиною хвилеводної структури.

Звужуваний елемент зв'язку. Принцип дії полягає в тому факті, що хвилеводи товщиною, меншою тієї, що вимагає умова відсічки, передають енергію в випромінювальні моди.

Елементи з'єднання та зв'язку: стикові з'єднання, елементи зв'язку плівки та граткові елементи зв'язку. Ключовим елементом інтегральних оптичних схем є елемент зв'язку, що передає оптичні хвилі між волоконним світловодом та хвилеводом, що входить в склад ОІС.

Стикові з'єднання. Волокно можна безпосередньо стикувати з хвилеводом без проміжного пристрою (якщо поперечний переріз серцевини волокна та хвилеводу достатньо близькі за розмірами). Головна проблема методу – важко досягти та підтримувати оптимальне узгодження.

Елементи зв'язку плівки, що звужується з хвилеводом. Волокно вставляють в циліндричний отвір в підкладці нижче хвилеводу. В напівсферичному дні цього отвору формується лінза. Світлові хвилі, виведені з тонкоплівкового хвилеводу в підкладку, збираються волокном.

Граткові елементи зв'язку для з'єднання волокно-хвилевід. Можна використовувати для зв'язку волокна з малим показником заломлення з хвилеводом, з матеріалу з високим показником заломлення.

Тонкоплівкові фокусувальні елементи, що забезпечують зміну фронту світлового пучка і використовуються для фокусування, просторової фільтрації, фур'є-аналізу і т.д. є важливими компонентами пристроїв інтегральної оптики [92]. Вимоги до якості хвилеводних лінз визначаються їх призначенням.

Елементи з періодичними та аперіодичними структурами. Дифракцію випромінювання на періодичних структурах в площині ОХ використову-

ють для поділу або відхилення світлових променів в планарних хвильоводах та для просторово-частотної фільтрації.

Граткова структура майже періодична, з періодом, що монотонно змінюється уздовж дифракційної ґратки (аперіодичні ґратки), представляє великий інтерес для інтегральної оптики. Такі ґратки можна отримати гофруванням поверхні ОХ і модулюванням показника заломлення хвильоводу при формуванні і запису на поверхні хвильоводу інтерференційної картини від двох когерентних оптичних променів з плоским і циліндричним хвильовими фронтами.

Розглянемо активні оптичні елементи. До фотоприймачів відносяться пристрої, призначені для перетворення інформації, що міститься в електромагнітній хвилі оптичного діапазону, який включає в себе ультрафіолетову, видиму та інфрачервону смуги впритул до міліметрових хвиль. Їх робота ґрунтується на двох принципах роботи: квантовому та тепловому.

До світловипромінювальних елементів відносять: НПЛ та СВД, в яких використовуються оптичні переходи за участю вільних носіїв струму в кристалах.

Найбільш перспективними типами НПЛ є НПЛ на основі розподілених береговських дзеркал та розподіленому зворотному зв'язку, для отримання стабільної одночастотної генерації з вузькою смугою випромінювання $\sim 0,3 \text{ \AA}$.

Основні характеристики СВД та НПЛ [93]:

- центральна довжина хвилі випромінювання;
- потужність випромінювання;
- форма діаграми направленості;
- ККД;
- схема дії;
- тип резонатора;
- режим роботи;
- тип накачування.

Розглянемо діаграму направленості джерел випромінювання через необхідність аналізу процесів розповсюдження світла по оптичному волокну та визначення форми оптичного випромінювання. Існують дві основні моделі джерел випромінювання: ламбертовська та гаусівська [44]. Геометрію випромінювання НП лазерів звичайно описують гаусівською моделлю, а у випадку світлодіодів – ламбертівською.

Ламбертівська модель [44]: $I(\phi) = I_0 \cos(\phi) \quad [\text{Вт/м}^2]$,

де $I(\phi)$ – інтенсивність випромінювання;

ϕ – кут огляду;

I_0 – номінальна інтенсивність випромінювання.

Гаусівська модель [44]:

$$E_x(r, z) = E_0(z) \exp\left[-r^2/w^2(z)\right],$$
$$H(r, z) = H_0(z) \exp\left[-2r^2/w^2(z)\right],$$

де z – відстань, яка вимірюється в напрямку розповсюдження променя;

$E_0(z)$, $H_0(z)$ – електричне поле [В/м] та концентрація потужності [Вт/м];

$w(z)$ – радіус променя;

r – відстань від осі z .

До переваг СВД відносять простоту конструкції, лінійність потужності, що випромінюється в широкому діапазоні струмів інжекції, високу надійність та невисоку вартість. Недоліками є широка смуга випромінювання (20...100 нм), невисокі зовнішня квантова ефективність та енергетична яскравість, широка діаграма направленості.

За конструкцією СВД поділяють на поверхневі та торцеві. За структурою переходу: гомоперехід та подвійна гетероструктура.

Враховуючи задовільні потужності випромінювання, СВД часто використовуються у масивах світловипромінювачів. Математичних моделей опису ДН таких масивів не існує. Для визначення порогів оптичних сигналів при передаванні даних у ЦОЕП слід створити математичну модель розрахунку поля діаграми направленості світловипромінювача та масиву світловипромінювачів з переходом до визначення потужності передавання у кожному каналі окремо.

Розроблений цілий ряд модуляторів і перемикачів, побудованих на використанні електрооптичного керування, відбивання або дифракційної комутації світла. Робота дифракційних модуляторів базується на ефекті Брега, який полягає у розподілених взаємодіях світла з великим масивом елементів, що відбивають, зазвичай у виді оптичної ґратки. Типовий оптичний модулятор на основі ефекту Брега складається з пари електродів, сплетених один з одним в подібності двох гребінців. Напруга, яка подається на електроди, змінює показник заломлення в матеріалі під електродом, формуючи в хвилеводі активну ґраткову картину. Ця ґратка викликає зміну напрямку розповсюдження світлового променя.

В випадку акустооптичного ефекту в матеріалі за рахунок проходження акустичних хвиль виникає механічне напруження. Тому таке напруження викликає зміну показника заломлення за рахунок фотопружного ефекту. В кристалічних твердих тілах, які в основному використовуються в якості підкладок для ОІС, акустичний ефект має яскраво виражену залежність від

орієнтації кристалу. Але цей ефект порівняно слабкий навіть для оптимальних випадків підбору матеріалу і орієнтації. За типом взаємодії з промінням АОМ розділяють за типом ефекту, що використовується: Брега або Рамана-Ната [14].

Перемикачі, які застосовуються в оптичних інтегральних схемах основані на біжучих акустичних хвилях. Тому індукована ґраткова структура профілю показника заломлення матеріалу фактично рухається відносно оптичного пучка. Але такий рух спричиняє незначний вплив на роботу більшості приладів.

Основним для підрозділу є аналіз характеристик та роботи елементів, та підтвердження актуальності створення математичної моделі розрахунку поля діаграми направленості світловипромінювача та масиву світловипромінювачів з переходом до визначення потужності передавання у кожному каналі окремо.

Підсумовуючи можна відмітити, що інтегральна оптоелектронна елементна та схемотехнічна бази є достатньо розвиненими для створення ОЕ-ІС паралельного оброблення зображень. Проведений аналіз схемотехнічних особливостей побудови оптоелектронних інтегральних схем для попереднього оброблення зображень показав, що на основі молекулярно-променевої епітаксії можна виготовляти набір інтегральних елементів для ОЕІС, достатній для реалізації оптоелектронних методів паралельного оброблення зображень: введення-виведення з одночасним обробленням зображень.

1.4. Висновки

1. Визначено коло задач, які ефективно розв'язуються за допомогою оптоелектронної елементної бази, та перераховано типи архітектур ЦОЕП, що ефективно їх реалізують. Перспективним є використання інтегрально-електронної та оптоелектронної елементної бази у ЦОЕП для попередньої обробки зображень. Вказується, що такі процесори або операційні пристрої повинні бути агрегатованими – тобто мати можливість нарощуватись до потрібних розмірів або розрядності.

2. Проведений аналіз існуючих технологій виготовлення оптоелектронних інтегральних схем показав, що на теперішній момент часу найбільш оптимальною є молекулярно-променева епітаксія.

3. З розділу випливає, що ЦОЕП та операційні пристрої здатні до секціонування, що дозволяє утворювати системи для обробки зображень великих розмірів та обробляти багатоградаційні зображення, а аналіз схемотехнічних особливостей побудови оптоелектронних інтегральних схем для

попереднього оброблення зображень показав, що на основі молекулярно-променевої епітаксії можна виготовляти набір інтегральних елементів для ОЕІС, достатній для реалізації оптоелектронних методів паралельного оброблення зображень: введення-виведення з одночасним попереднім обробленням зображень.

4. На основі пунктів, які перераховані, для розробки ОЕІС для ЦОЕП потрібно розв'язати такі задачі:

- створити математичну модель визначення порогів оптичних сигналів у приладах з паралельним передаванням даних;
- розробити структуру базової комірки ОЕІС для виконання операцій введення-виведення та попередньої обробки зображень.

1.5. Контрольні запитання

1. На які основні групи поділяються алгоритми оброблення зображень?
2. У якому спектральному діапазоні працюють оптичні хвилеводи?
3. Суть багатооперандного оброблення даних. Які існують два основні способи?
4. Які є основні три класи матеріалів для підкладок ОЕІС?
5. Які основні ефекти та інтегральні оптоелектронні елементи реалізуються за допомогою сучасних інтегральних технологій?
6. Які ви знаєте основні сучасні технології виготовлення ГОІС? Їх характеристики?
7. Які існують основні групи імпульсних пристроїв?
8. Які ви знаєте активні оптоелектронні елементи?
9. Що таке діаграма направленості СВД та НПЛ? Основні закони та залежності для визначення її форми?

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІЙ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ У ЦИФРОВОМУ ОПТОЕЛЕКТРОННОМУ ПРОЦЕСОРІ

В розділі моделюється тракт паралельного передавання зображень між оптоелектронними інтегральними схемами. Розглядається введення-виведення зображення у ОВШ та передавання у ньому. Одержані нові математичні моделі побудови розподілу поля діаграми направленості масиву світловипромінювачів оптоелектронної інтегральної схеми, що описують процес паралельного передавання даних у когерентних та некогерентних волоконно-оптичних лініях зв'язку.

Для побудови пристрою паралельного введення-виведення з одночасним обробленням зображень слід скласти математичну модель передавання зображень, а саме: загальну діаграму направленості випромінювачів, модель паралельного передавання зображень між ОЕІС та визначити необхідні пороги оптичних сигналів. Побудувавши за допомогою одного з методів ДН можна визначити загальне поле випромінювання масиву СВД у простір. Для побудови загальної ДН масиву світловипромінювачів слід знайти закон, яким пов'язана загальна ДН масиву СВД з ДН кожного окремого випромінювача [94].

2.1. Розробка математичної моделі паралельного передавання даних по ВОЛЗ

В системах обробки даних, зокрема в оптоелектронному асоціативному процесорі попарного сортування даних, використовується пам'ять фіксації реакції, що представляє собою матричний екран з розмірами $m \times n$ комірок. Екран запам'ятовує набір двійкових чисел. Цей набір пропонується зчитувати та передавати паралельно за допомогою набору ОВ.

Тому задачею цього підрозділу буде вибір способу паралельної передачі даних, розробка математичної моделі та її дослідження.

На поточний момент існують два перспективних способи з'єднання: з'єднання за допомогою виділених ОВ за топологією "точка-точка" та з'єднання за допомогою волзтрону (рис.2.1) [1; 2; 5; 55].

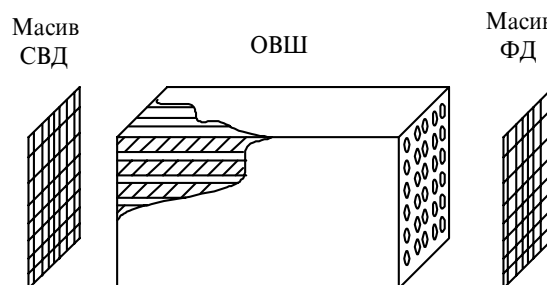


Рисунок 2.1 – Передавання за допомогою волзтрону

В загальному випадку потрібно для різних варіантів групового з'єднання визначити такі значення P_1 , P_0 та межі P_{1MIN} , P_{0MAX} , P_{1MAX} та P_{0MIN} , щоб виконувалася умова (рис.2.2) [95; 96]:

$$\begin{cases} P_{1MIN} < P_1 < P_{1MAX} \\ P_{0MIN} < P_0 < P_{0MAX} \\ P_{1MIN} > P_{0MAX} \end{cases}, \quad (2.1)$$

де P_1 – значення вихідного сигналу високого рівня у окремому каналі;

P_0 – значення вихідного сигналу низького рівня у окремому каналі;

P_{0MIN} – мінімальне значення сигналу низького рівня;

P_{0MAX} – максимальне значення сигналу низького рівня.

P_{1MIN} – мінімальне значення сигналу високого рівня;

P_{1MAX} – максимальне значення сигналу високого рівня.

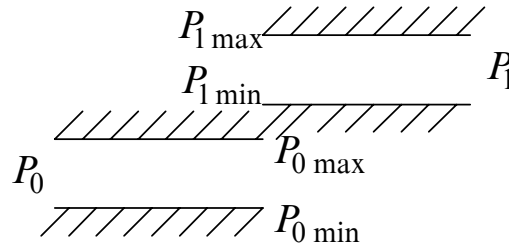


Рисунок 2.2 – Діапазони логічних рівнів оптичних сигналів випромінювача

Загальний вираз математичної моделі для окремої комірки буде мати такий вигляд:

$$P(n, m) = \frac{1}{2} \iint_D E_{вих}(x, y) dx dy, \quad (2.2)$$

де область D задається нерівностями

$$D = \begin{cases} a \leq C_0 n + x \leq b \\ c \leq C_0 m + y \leq d \end{cases}, \quad (2.3)$$

C_0 – масштабний коефіцієнт;

c , a та b , d , – початкові та кінцеві координати меж фоточутливої зони;

n та m – номери стовпця та рядка, до яких відносять область D (рис.2.3, рис.2.4);

$E_{ВИХ}$ – поверхня, яка відображає густину випромінювання на виході ОВ шини [97].

Значення $E_{ВИХ}$ розраховується з виразу (рис.2.1) (рис.2.2)

$$E_{\text{вих}}(n, m) = \sum_m \sum_n \Delta E_{\text{вих.од.}}(nK, mK) \quad (2.4)$$

де Δ – функція укладання волокон;

K – щільність укладання волокон;

$E_{\text{вих.од.}}$ – напруженість на виході окремого ОВ.

$E_{\text{вих.од.}}$ визначається як

$$E_{\text{вих.од.}}(nK, mK) = KSE(n, m)a(nK, mK), \quad (2.5)$$

де S – площа торця окремого ОВ;

a – коефіцієнт, який враховує втрати (кутові, вісьове зміщення та ін.) на введення випромінювання у ОВ;

$E(n, m)$ – енергетичний профіль випромінювання масиву – ДН СВД, визначається у полярних координатах так [55] (перемноживши два радіус-вектори)

$$\rho = E_0 \sin \varphi \sin \gamma, \quad (2.6)$$

де E_0 – амплітуда напруженості поля ДН СВД;

φ та γ – полярні кути, які лежать у межах – від 0 до π ;

ρ – полярний радіус.

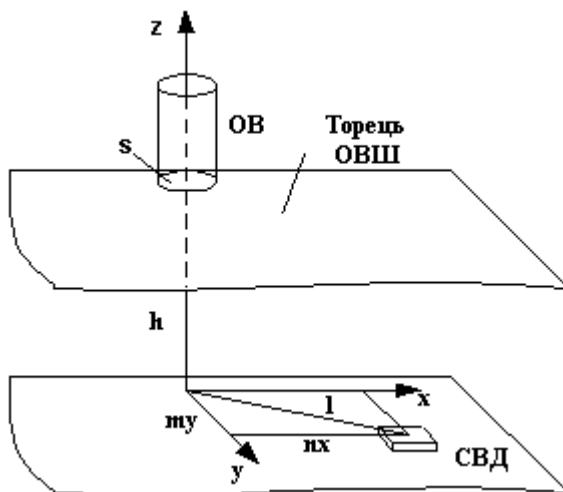


Рисунок 2.3 – Схема розташування елементів масиву світловипромінювачів та ОВШ

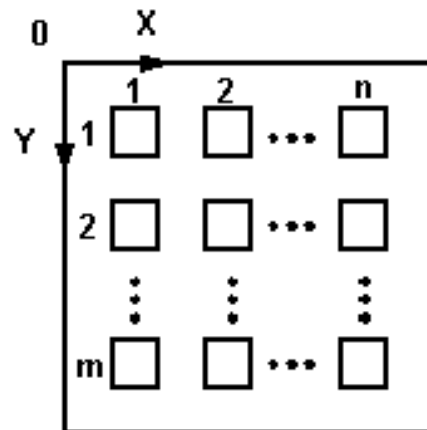


Рисунок 2.4 – Розташування комірок масиву світловипромінювачів

Для побудови згаданої математичної моделі потрібно задатись математичним описом елементів, з яких буде складатись система.

При переході до прямокутних координат отримуємо вираз:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = E_0 \frac{xy}{(x^2 + y^2 + z^2)}, \quad (2.7)$$

де $x = \rho \times \sin \gamma$;

$y = \rho \times \sin \varphi$;

$z = \sqrt{\rho - \rho \sqrt{\sin^2 \varphi + \sin^2 \gamma}}$.

Тоді:

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{xy}{(x^2 + y^2 + z^2) \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (2.8)$$

Основним видом втрат при введенні випромінювання в оптоволоконну шину будуть кутові втрати [98]:

$$a_g = -10 \lg \left[1 - \frac{2}{\pi} \frac{\theta}{\arcsin(NA)} \right] \quad (2.9)$$

та втрати через щілину (вісьове зміщення) [98]:

$$a_s = -10 \lg [1 / (1 + 2 (S/D) \operatorname{tg} [\arcsin(NA/n_0)])]^2, \quad (2.10)$$

де NA – числова апертура окремо взятого ОВ;

n_0 – показник заломлення середовища;

θ – кут між падаючим випромінюванням та віссю світлопровідної серцевини. Він знаходиться як [98]

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{l}{h}, \quad (2.11)$$

де $l = \sqrt{(nx)^2 + (my)^2}$;

h – зазор;

S – вісьове зміщення;

D – діаметр світлонесучої частини волокна.

Тоді можна записати значення густини на виході окремого ОВ:

$$E_{\text{вих.од.}}(nx, my) = sE(nx, my)a_g(nx, my). \quad (2.12)$$

Поверхня, яка буде відображати густину випромінювання на виході ОВ шини, знаходиться з виразу:

$$E_{\text{вих}}(nx, my) = \sum_{mx} \sum_{ny} E_{\text{вих.од.}}(nx, my) \quad (2.13)$$

Сумарну потужність, яка попаде на окремий ФД можна знайти проінтегрувавши енергетичний профіль випромінювання у межах області положення ФД:

$$P(nx, my) = \iint_D E_{\text{вих}}(nx, my) dx dy \quad (2.14)$$

де область D задана нерівностями:

$$D = \begin{cases} a \leq nx \leq b \\ c \leq my \leq d \end{cases} \quad (2.15)$$

З урахуванням формул (2.2) – (2.15) запишемо загальний вираз сигналу, який поступає на окремий ФД через ОВШ [99]:

$$P(nx, my) = \int_a^b dx \int_c^d \left[\sum_{nx} \sum_{my} [-10 E_0 S \times \right. \\ \left. \times \lg \left(1 - \frac{2}{\pi} \frac{\arctg \left(\frac{\sqrt{nx + my}}{z} \right)}{\arcsin(NA)} \right) \exp \left(- \frac{\sqrt{(nx)^2 + (my)^2}}{w_o^2} \right) \right] dy \quad (2.16)$$

Співвідношення (2.16) визначає потужність у окремому каналі передавання між парою елементів. Шляхом аналізу потужностей можна визначити значення сигналів “оптичних порогів” у ЦОЕП.

2.2. Побудова функціональної моделі оптоелектронних інтегральних схем з паралельно-послідовним поворотом зображень

Сучасні паралельно-послідовні методи обробки двовимірних масивів реалізовані на ОЕБ, використовують природній паралелізм притаманний процесорам з логіко-часовим типом обробки даних [5].

Апаратну реалізацію таких алгоритмів доцільно виконати на ОІС (рис.2.5). ОЕ являє собою матричну структуру, в якій кожний окремих елемент виконує такі функції: прийом з виділеного напрямку зберігання інформації та передачу на виділений напрямок. Функції прийому та передачі можуть бути зовнішніми та внутрішніми. Приймання та виведення зображення зовні ОІС виконується по оптоволоконному шлейфу. ОК представляють собою лінійку направлених відгалуджувачів для паралельної обробки масивів. Необхідність застосування ОК пояснюється виключенням позаалгоритмічних ланок збереження образів. Найбільшу вагу в пристрої мають джерела випромінювання, оскільки інші елементи ОІС розробляються з врахуванням довжини хвилі та модового складу випромінювання. Для реалізації ОІС слід оптимізувати параметри елементів: потужність споживання ОІС, розміри, довжину хвилі випромінювання, сумісність матеріалів та розрядність і швидкодію.

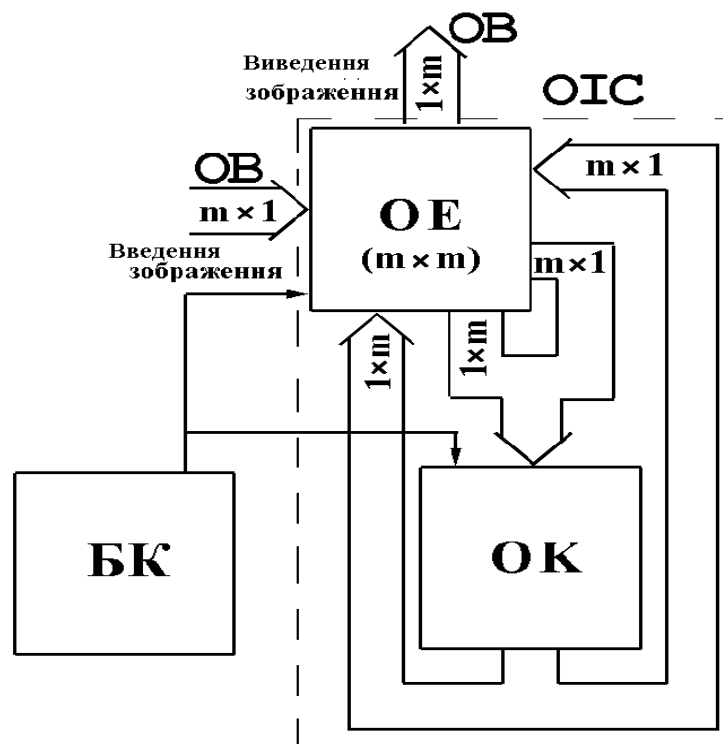


Рисунок 2.5 – Структура ОІС (БК – блок керування)

Зацікавленість до неї викликана насамперед можливістю створення надійних малогабаритних пристроїв для оптичної обробки інформації. На основі різних оптичних хвилеводних елементів, інтегрованих на загальній підкладці, що керується електричними і оптичними сигналами, можливо

створення модуляторів, комутаторів, процесорів та приймально-передавальних модулів, які за питомим електроспоживанням здатні конкурувати з мікроелектронними аналогами, а за швидкістю значно перевищують їх.

Найбільш перспективне використання ОІС в засобах перетворення інформації логіко-часового типу, оскільки моделі їх функціонування використовують часові інтервали відрізків існування, що ототожнюються з довжиною інформаційних сигналів [1; 2; 5].

Реалізація на ОІС алгоритмів нормування зображень дозволяє виключити проміжні ланки збереження образів. При обробці зображень в реальному часі, будь-то в системах технічного зору, кореляційно-екстремальних системах наведення, слідування, розпізнавання та навігації, вимагається попереднє геометричне нормування. До найбільш складних та трудомістких операцій нормування відносяться поворот та масштабування.

На даний момент часу завершено моделювання комплексу ОІС для обробки зображень з розрядністю – 32×32 , 64×64 та 128×128 пікселів. В комплект ОІС входять ОЕ ОК та ОВШ. Розробляється ОІС з інтегрованими на одній підкладці ОЕ та ОК з максимальною розрядністю – 64×64 пікселів. Пристрої призначені для виконання операцій масштабування та повороту зображення. Алгоритм масштабування зводиться до видалення або роздвоєння критичних точок з одночасним зсувом інших, а алгоритм повороту до зсуву та масштабування по черзі вздовж кожної осі.

В існуючих схемах ОЕ, джерела випромінювання можуть виконуватись на НПЛ та СВД. Випромінювання останніх – багатомодове, і тому не придатне для комутації за допомогою схеми ОК. Існує два напрямки побудови ОЕ – використання тільки НПЛ в якості джерел випромінювання та виготовлення комбінованих схем.

При проектуванні таких ОІС постає задача вибору оптимального співвідношення розмірності оброблюваного зображення до розмірів кристалу. Одним з шляхів розв'язання проблеми збільшення розрядності є використання секціонованих масивів з базових ОІС виконаних у вигляді функціонально-завершених одиниць, які реалізують ті ж самі операції і при секціонуванні базових ОІС. Технічні характеристики базових елементів повинні задовольняти мінімально необхідні вимоги щодо обробки зображень – розрядність не менше 32×32 , мати можливість виготовлення на сучасному технологічному рівні.

Очевидно, що схеми для обробки великоформатних зображень слід будувати на ОЕ та ОК з використанням відомих алгоритмів обробки, при-

чому, в даному випадку виконання ОЕ та ОК на загальній підкладці неможливо, оскільки вимагається формування двох окремих набірних банків з ОЕ та ОК (рис.2.6). Введення та виведення зображення пристроєм здійснюється за допомогою оптичної системи або ОВШ. Зв'язок між підкладками $OE \rightarrow OE$, $OE \rightarrow OK$, відбувається по 128-розрядному ОВШ, між $OK \rightarrow OE$ по 130-розрядному ОВШ.

Для роботи схема обробки великоформатних зображень, наприклад 512×512 (рис.2.6), використовує алгоритми, які є інваріантні до розрядності зображення та ступеня агрегування самого екрана.

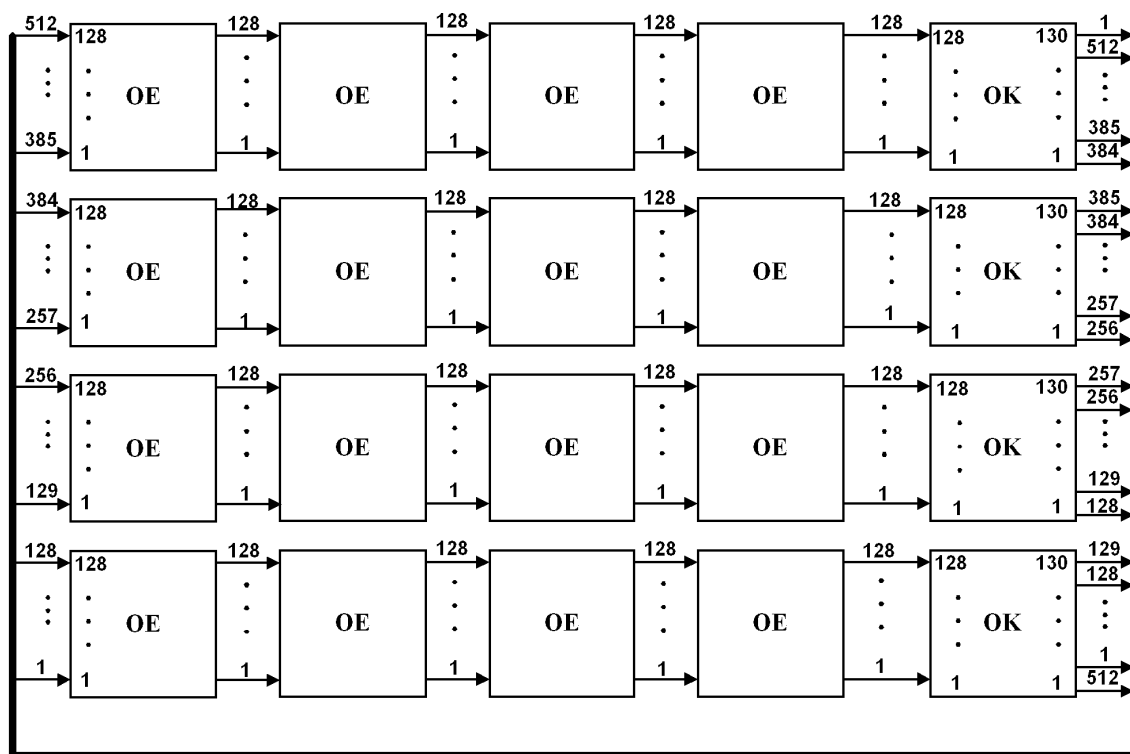


Рисунок 2.6 – Структура формування двох окремих набірних банків ОЕ та ОК

Алгоритм повороту зображення на 90^0 . Для масштабування на матричних структурах необхідно виконувати операції зсуву вздовж ОХ та ОУ. Це ускладнює структуру ОЕ та приводить до великої кількості зовнішніх – $4N$ та внутрішніх – $2N(N-1)$ оптичних зв'язків ОЕ. Застосування алгоритму повороту зображення на 90^0 усуває згадані недоліки: кількість зовнішніх оптичних зв'язків – $2N$ та внутрішніх – $N(N-1)$ (рис.2.7). При цьому зображення передаються паралельно-послідовно по рядку з набору ОЕ, електрично ОЕ об'єднуються у стовпці (рис.2.7).

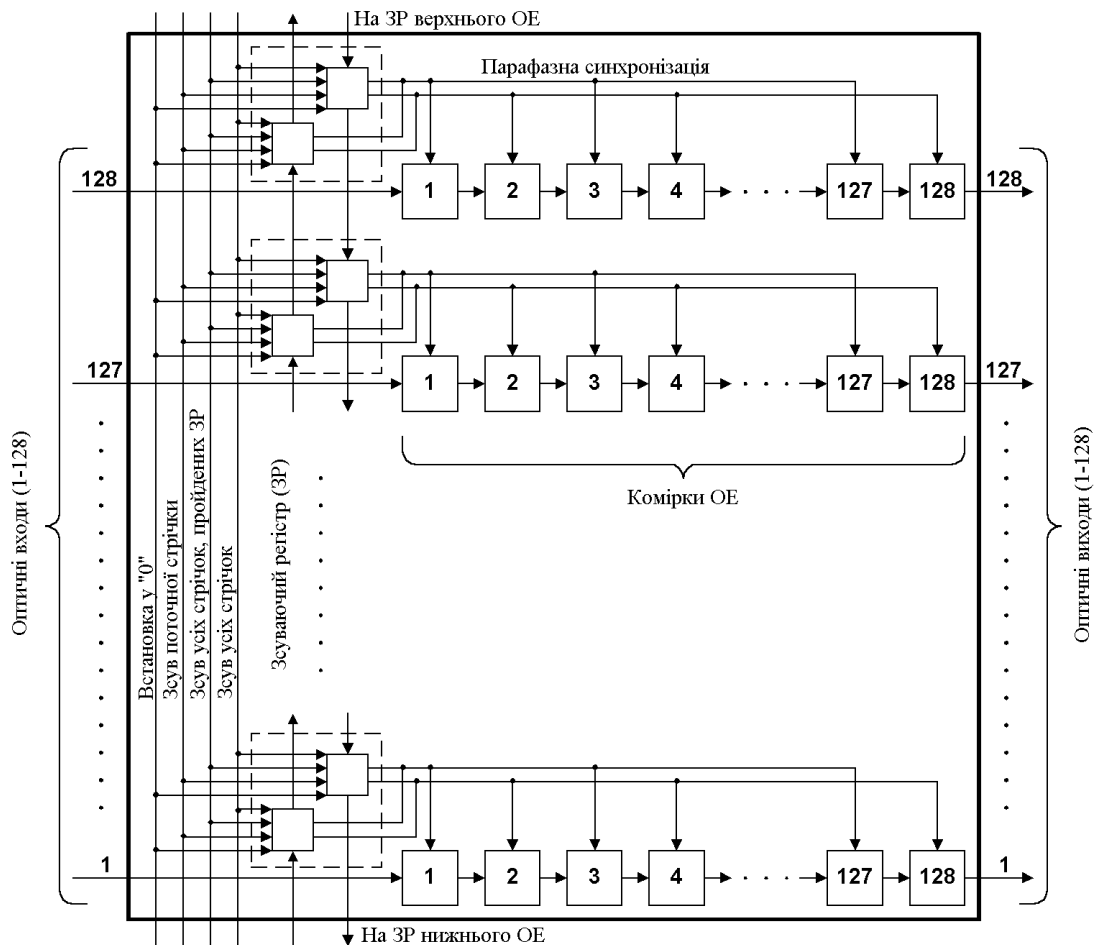


Рисунок 2.7 – Схема оптичних та електричних зв'язків ОЕ

Алгоритм виконується зсувом вздовж осі ОХ на ОЕ та вздовж осі ОУ на ОК (рис.2.8). Він є складовою частиною алгоритмів масштабування та повороту зображення. Кількість тактів необхідних для повороту на 90^0 N -розрядного зображення обчислюється за виразом:

$$M = N(2(N-1) + 1) \quad (2.17)$$

Розглянемо алгоритми оброблення зображень на матричних структурах. Однією із операцій нормування при обробці двовимірних зображень є збільшення або зменшення зображень в α раз. Звичайно при масштабуванні зображення змінюється його координатне описання. Потрібно знайти, яка точка вихідного зображення відображається в дану точку трансформованого зображення. Критичні точки – це точки, які підлягають видаленню при $0 < \alpha < 1$ або роздвоєнню $1 < \alpha < \infty$.

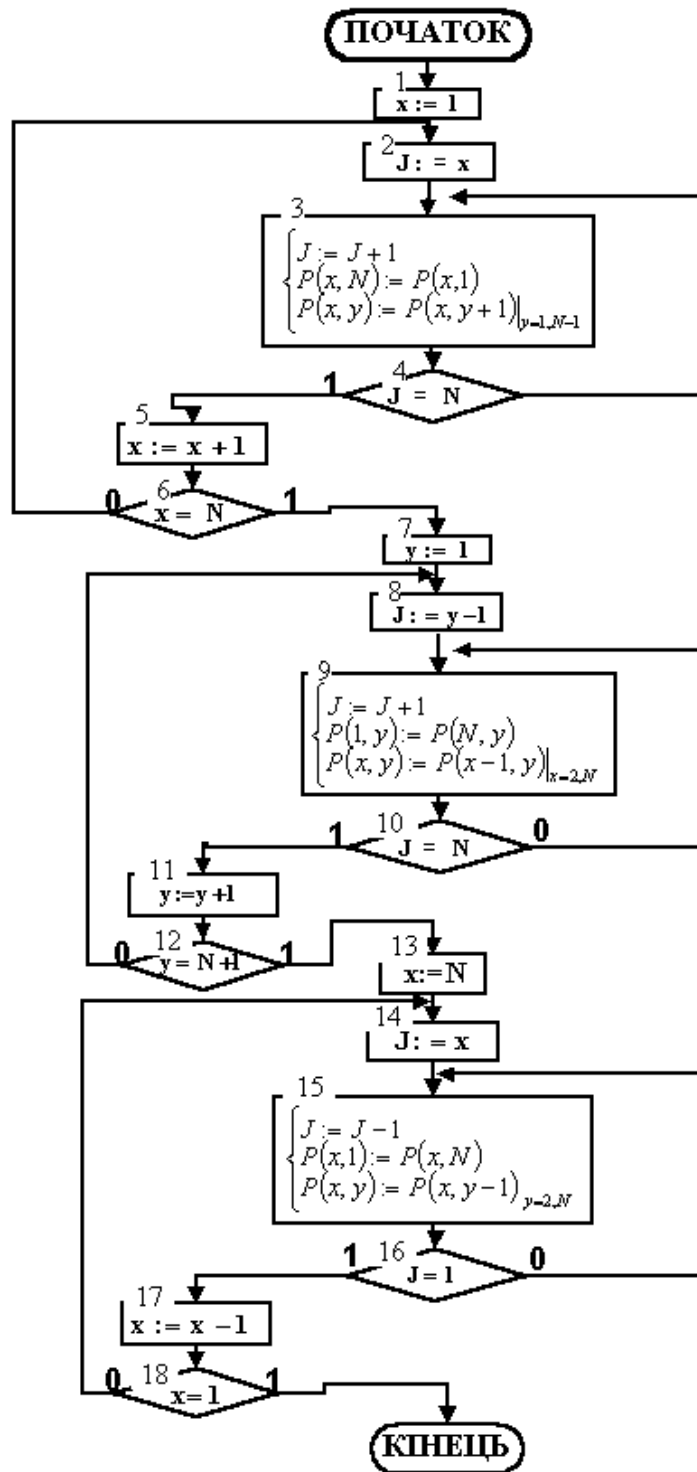


Рисунок 2.8 – Блок-схема методу повороту зображення на 90^0

При коефіцієнті масштабування α , значення критичних точок приймають крайні елементи груп з однаковим зсувом:

$$x(\alpha - 1) - \frac{\alpha}{2} \leq \Delta \leq x(\alpha - 1) + \frac{\alpha}{2}, \quad (2.18)$$

де $\Delta = x^T - x$ – різниця між координатами одного і того ж пікселя трансформованого та початкового зображення;

$$\alpha = x^T / x.$$

Масштабування на площині вимагає послідовного виконання операцій зсуву, видалення та роздвоєння вздовж координатних осей X та Y . Причому, вздовж осі OX масштабування ведеться паралельно для кожного стовпця, а вздовж OY – паралельно для кожного рядка. На рис.2.9 приведено алгоритм масштабування для екрана розрядністю $N \times N$, для коефіцієнтів $0 < \alpha < 1$ та $1 < \alpha < \infty$, де $RAM(I)$ – слово в пам'яті за адресою I .

Поворот – це перетворення, при якому змінюється тільки кут між початковим та новим радіус-вектором при незмінності самого модуля. Тому відстань між двома раніше вибраними точками зображення не змінюється при повороті, а змінюється їх орієнтація в просторі відносно початку координат (центру повертання).

Розглянемо поворот точки A на заданий кут δ в декартових системах координат, координати трансформованих точок x^T та y^T визначаються [2]:

$$\begin{cases} x^T = (x + y \tan \delta) \cos \delta \\ y^T = (y - x^T \sin \delta) \sec \delta \end{cases}, \quad (2.19)$$

де центром повертання є початок координат.

Для методу описаного системою (2.19) перший крок – отримання проміжної точки $AI(x^T, y)$, яка потім зсувається вздовж осі OY на величину $x^T \sin \delta$. Потім отримана проекція радіус-вектора масштабується на вісь OY з коефіцієнтом масштабування $K_m = \sec \delta$. Внаслідок вищевказаного співвідношення (2.70) можливо стверджувати, що поворот є функцією зсуву та масштабування, причому вздовж осей OX та OY .

Призначення елементів ОІС. Призначення ОЕ – зберігання, введення-виведення та паралельний зсув зображення. На рис. 2.7 зображено структуру внутрішніх та зовнішніх електричних та оптичних зв'язків ОЕ. Особливістю роботи є те, що обробка двовимірного масиву відбувається лише по осі OX , обробка по іншій відбувається після повороту зображення на 90° . Рядки ОЕ можуть працювати у двох режимах: паралельний зсув усього масиву та зсув кожного рядка окремо. Рядки в останньому випадку є керованими лініями затримки. Керування рядками відбувається за допомогою регістра зсуву.

Призначення ОК – пропускання стовпця без змін, зсув частини стовпця з відповідним роздвоєнням або видаленням критичних точок.

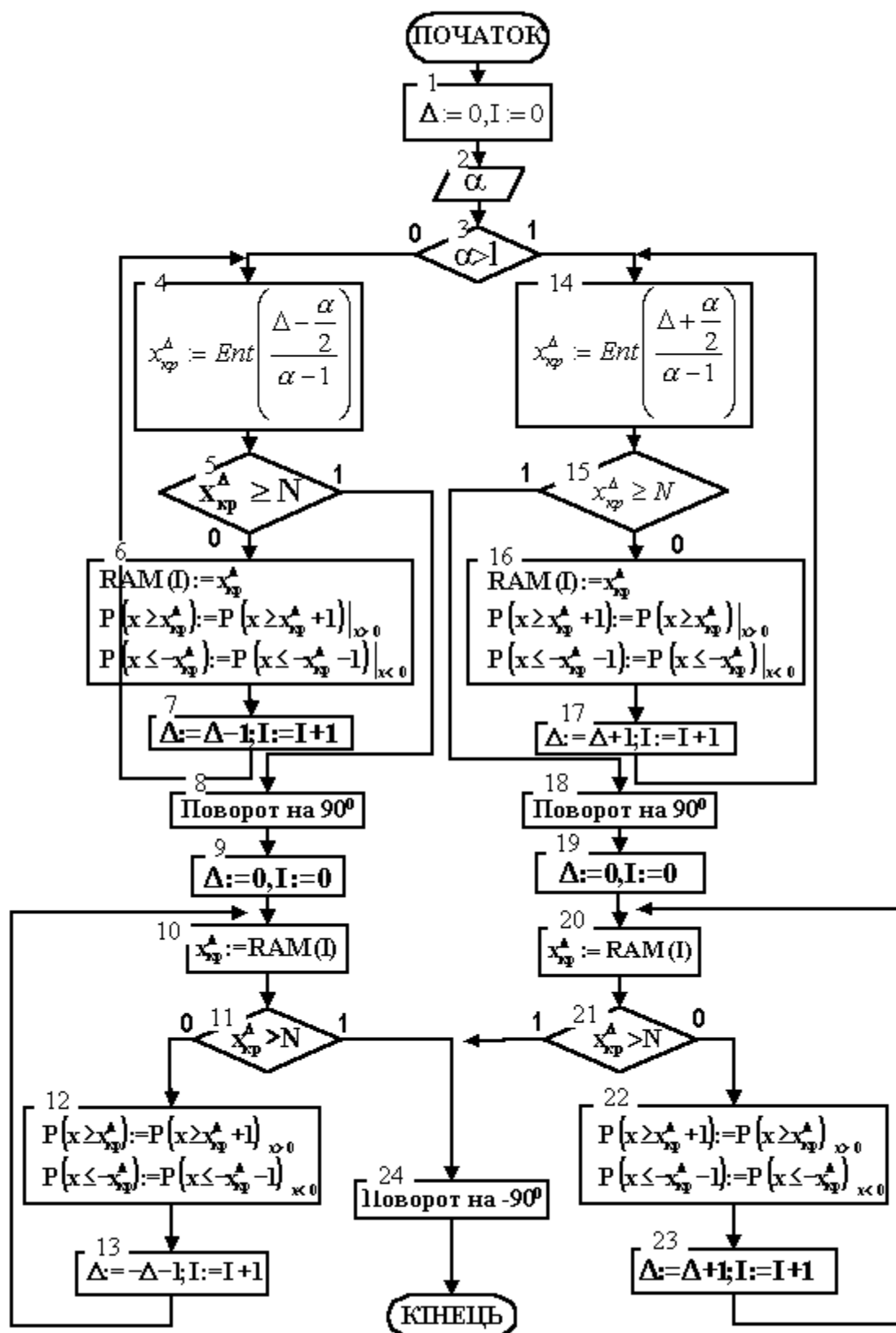


Рисунок 2.9 – Блок-схема методу масштабування

2.3. Розробка функціональної моделі базових комірок та операційного екрана на їх основі

Одним із класів операційних пристроїв для виконання обробки зображень є матричні екрани. Для виконання алгоритмів попередньої обробки зображень ОЕ повинні виконувати чотири групи операцій.

Перша з них пов'язана з перетворенням ij -точки $O(\tau_1)$ в kl -точку $O(\tau_2)$ незалежно від стану сусідніх точок.

Друга група перетворень формує точку $O(\tau_2)$ із підмножини сусідніх точок ij -точки $O(\tau_1)$.

До третьої групи відносяться перетворення, коли із ij -точки $O(\tau_1)$ формується група точок $O(\tau_2)$.

Четверту групу перетворень складають так, що ij -точка $O(\tau_3)$ утворена із логіко-часових перетворень ij -точок $O(\tau_1)$ та $O(\tau_2)$. Конкретизуємо вказані групи логіко-часових перетворень.

До першої групи відносяться операції інверсії, зсуву, повороту та копіювання. При інверсії значення ij -точки перерізу зображення $O(\tau_1)$ змінюються на протилежні в $O(\tau_2)$.

При зсуві проходить передача значення ij -точки $O(\tau_1)$ в kl -точку $O(\tau_2)$. Тим самим проводиться одночасний зсув на $|i - k|$ по осі x та на $|j - l|$ по осі y .

При повороті на фіксований кут $\pm\varphi$ проводиться передача ij – точки $O(\tau_1)$ в kl – точку $O(\tau_2)$. Важливо відмітити, що в загальному випадку принципово не існує в дискретному координатному просторі однозначної відповідності між точками вихідного та повернутого на деякий кут зображення. Копіювання є найбільш простою операцією першої групи та ґрунтується на розмножуванні зображення шляхом передачі значення ij – точки $O(\tau_1)$ в ij – точку $O(\tau_2)$.

До другої групи відносяться операції фільтрування та зменшення масштабу зображення. Можливо здійснити два типи фільтрації. Перший пов'язаний з дискретною анізотропною фільтрацією з апертурою, що дозволяє послабити вплив окремих місцевих дефектів у зображенні. Інший тип фільтрації – зі зв'язністю v_{ij} -точки, що ефективно видаляє окремі шумові елементи. При вираховуванні зв'язності v_{ij} -точки враховується її особисте значення. При обох типах фільтрації в квантронах задаються нормуючі пороги при передачі значення точок $O(\tau_1)$.

Операції масштабування зображення при зменшенні передбачають передачу значень групи точок $n \times m$ в групі точок $n' \times m'$, де $n \geq n'$ та $m \geq m'$ за визначеним апріорним алгоритмом.

Третя група логіко-часових перетворень пов'язана зі збільшенням масштабу зображення. При цьому значення ij -точки $O(\tau_1)$ розповсюджується в відповідності з заданим алгоритмом на групу сусідніх точок $O(\tau_2)$.

Четверта група перетворень дозволяє виконувати повний набір логічних операцій над двома змінними довільного перерізу зображення, таких як "І", "АБО", "І-НІ" та ін.

Основним елементом ОІС з матричною структурою є базова комірка (рис. 2.10).

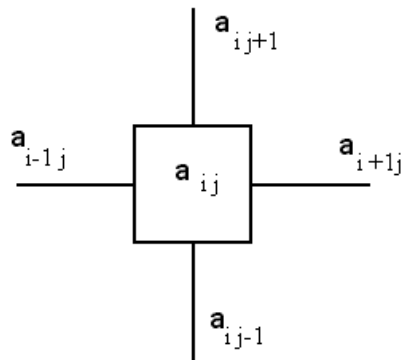


Рисунок 2.10 – Структурна схема комірки ОЕ

Математичну модель роботи такої комірки можна описати за допомогою виразу:

$$a_{i+1j} = \begin{cases} a_{ij}, & \text{якщо } 0 < t < T \\ a_{i-1j}, & \text{якщо } T < t \end{cases} \quad (2.20)$$

та

$$a_{ij-1} = \begin{cases} a_{ij}, & \text{якщо } 0 < t < T \\ a_{ij+1}, & \text{якщо } T < t \end{cases}, \quad (2.21)$$

де a_{i+1j} , a_{ij+1} – вихідні сигнали комірки;

a_{ij} – поточний стан комірки;

a_{i-1j} , a_{ij-1} – вхідні сигнали комірки;

t , T – поточний час та довжина такту.

Для реалізації зазначених операцій слід використовувати схему, зображену на рис. 2.11.

За допомогою ОЕ можна виконати першу групу операцій. Для забезпечення виконання усіх чотирьох груп операцій у пристрої слід використовувати ОК. Тоді операції груп 2-4 можна виконувати за відомими алгоритмами.

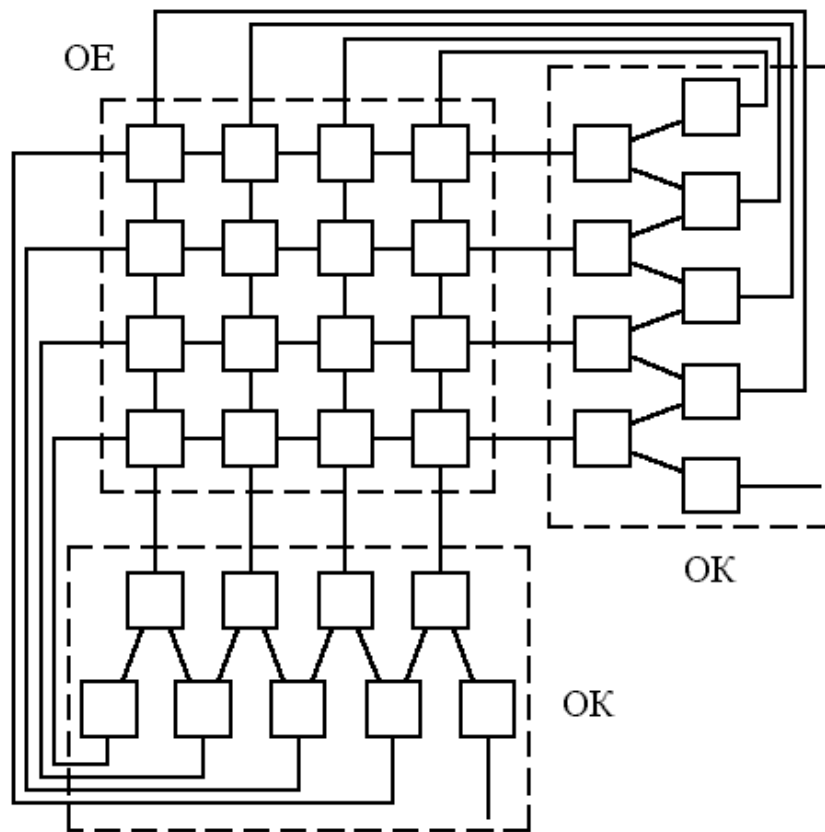


Рисунок 2.11 – Структурна схема зв'язків OE з ОК

На рис. 2.12 зображено структуру з'єднань базових комірок в OE.

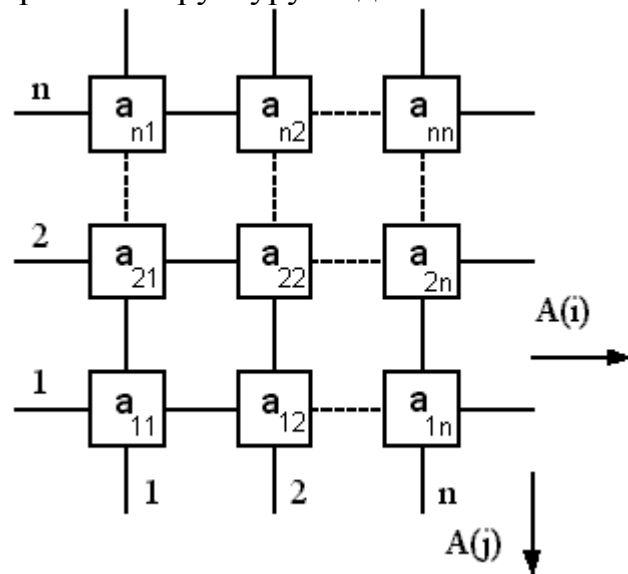


Рисунок 2.12 – Структурна схема зв'язків між елементами OE

На рис. 2.12 $A(i)$ та $A(j)$ – стовпці та рядки, які є виходами OE. Вони описуються таким чином:

$$\begin{aligned} A(j) &= \{a_{1j}(t), \dots, a_{nj}(t)\}, \\ A(i) &= \{a_{i1}(t), \dots, a_{in}(t)\}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

У роботах показано сенс використання секціонованих схем для обробки зображень великих розмірів та обробки багатоградаційних зображень. Для випадку обробки великих зображень схема зв'язків пристрою зображена на рис. 2.13.

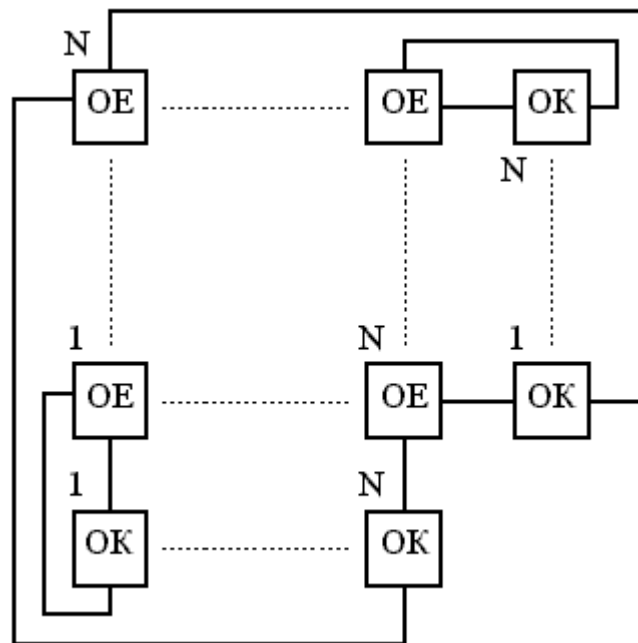


Рисунок 2.13 – Структура міжз'єднань

На рис. 2.13 показано структуру міжз'єднань OE та ОК для обробки зображень без врахування зв'язків для перенесення випадкових бітів між OE.

Для обробки багатоградаційних зображень на OE слід використати схему міжз'єднань OIC зображену на рис. 2.14.

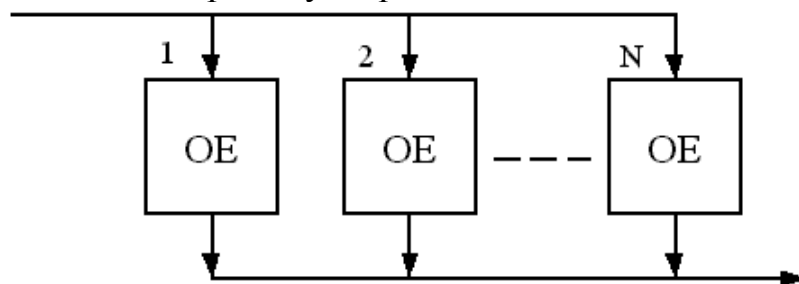


Рисунок 2.14 – Структурна схема розташування OE для обробки багатоградаційних зображень

Розрядні перерізи багатоградаційного зображення записують у послідовність OIC. Якщо багатоградаційне зображення має розрядність N , то його можна записати у вигляді N -розрядних перерізів:

$$S(N) = \{A(1), \dots, A(N)\}, \quad (2.23)$$

де $S(N)$ – багатоградаційне зображення;

$A(1), \dots, A(N)$ – розрядні перерізи багатоградаційного зображення.

Крім відомих алгоритмів попередньої обробки зображень було розроблено алгоритм швидкого повороту зображення на 90^0 та масштабування зображень.

2.4. Розробка математичної моделі комірки OEIC

Компромiсним i оптимальним на даний момент рішенням для ПФР є використання АЗП на ОІС (рис.2.15). На сьогодні є завершеним моделювання комплексу ОІС для обробки двовимірних бінарних зрізів із розмірами 32×32 точок. Запис зрізу в ОІС виконується паралельно-послідовно в електричній формі – по стовпцях або рядках. В початковому стані в ОІС записується діагональна одинична матриця. Зчитування зрізу проводять у оптичній формі за допомогою ОВШ.

В процесі сортування в ПФР елементи бінарного зрізу – рядки зсовуються в обох напрямках згідно з сигналами керування q_i^+ та q_i^- .

Комплект ОІС містить ОЕ та ОВШ. Призначення ОЕ – зберігання, введення-виведення та паралельний зсув інформації у рядках зрізу.

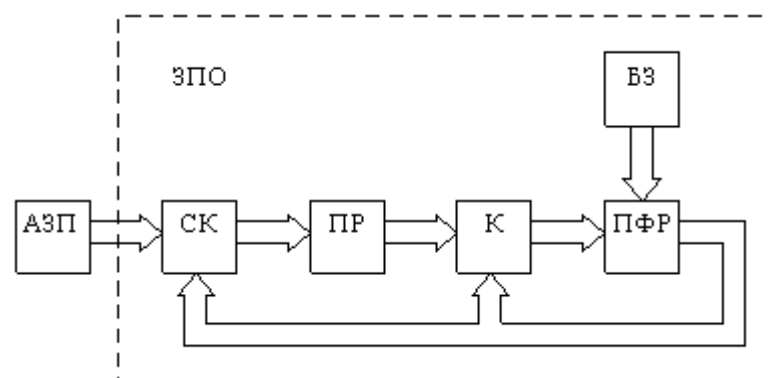


Рисунок 2.15 – Структурна схема цифрового оптоелектронного процесора попарного сортування даних:

АЗП – асоціативний запам'ятовувальний пристрій;

ПФР – пам'ять фіксації реакції;

БЗ – блок завантаження;

К – комутатори;

СК – селектор кодів

ОЕ являє собою матричну структуру, у якій кожний елемент виконує такі функції: прийом інформації, зберігання і передавання.

У деяких задачах обробки зображень у вигляді двовимірних матриць достатньо оперувати зрізами розмірністю 32×32 , 64×64 . В даному випадку достатньо використовувати ОЕ з розмірністю 32×32 та ОВШ, що можуть бути побудовані із волстроу або спеціального ОВШ, у якому кожний канал відповідає за передавання конкретного біта інформації.

Базовим елементом ОЕ є комірка. З'єднання комірок між собою представляє рядки, причому кількість комірок у рядку дорівнює 32. Вирішальним фактором у побудові схемотехніки комірки є технологія ОІС. У нашому випадку на підкладці з GaAs реалізовані в інтегральному виконанні випромінювачі, фотоприймачі й електронні компоненти з використанням молекулярно-променевої епітаксії.

Для запису або зчитування зрізу у двовимірному вигляді шляхом проектування або послідовно-паралельної передачі по ОВШ в комірках використовуються матеріали для випромінювачів – AlGaAs, для фотоприймачів – InGaAs, діапазон довжин хвиль $\lambda=0,8\ldots 1$ мкм.

Комірка ОІС ПФР складається з таких функціональних блоків – тригерів: 1 – запам'ятовувальний, 2 та 3 – входні тригери, 4 та 5 – вихідна логіка (рис. 2.16.), де C – сигнал синхронізації; D – дані; q_i^+ – керуючий сигнал зсуву праворуч; q_i^- – керуючий сигнал зсуву ліворуч; S_2 – дані з тригера 2; S_3 – дані з тригера 3; Q – дані з тригера 3; D_- – дані на комірку ліворуч; D_+ – дані на комірку праворуч; W – дозвіл на запис у тригер 1; R – дозвіл на зчитування.

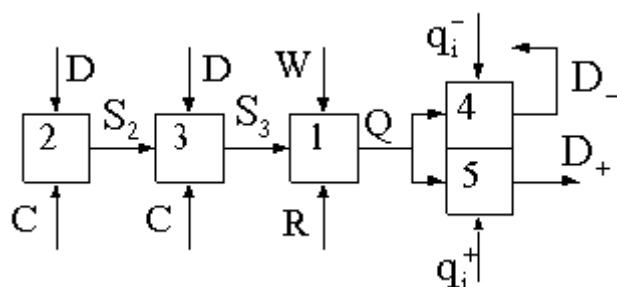


Рисунок 2.16 – Структурна схема комірки пам'яті фіксації реакції

Електрична схема комірки зображена на рис. 2.15, де $+E_5$, $+E_{2,5}$ та $-E_5$ – напруги живлення +5 В, +2,5 В та -5 В відповідно. Значення напруг взято довільним та можуть бути зменшені при оптимізації робочих параметрів комірки.

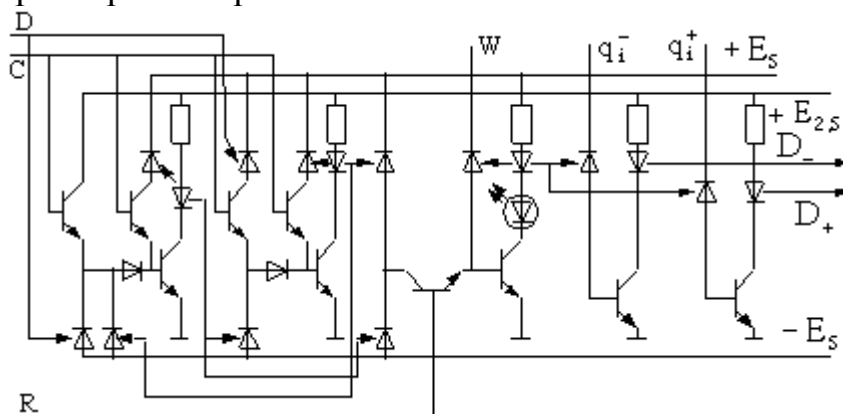


Рисунок 2.17 – Електрична схема комірки пам'яті фіксації реакції

Схема (рис. 2.17) та її функціональна схема заміщення (рис. 2.18) яка синхронізується фронтом C , працює таким чином: якщо на вхід D надходить "1", то тригер 2 встановлюється в "0", а тригер 3 – в "1". Якщо на вхід D надходить "0", то тригер 2 встановлюється в "1", а тригер 3 – в "0".

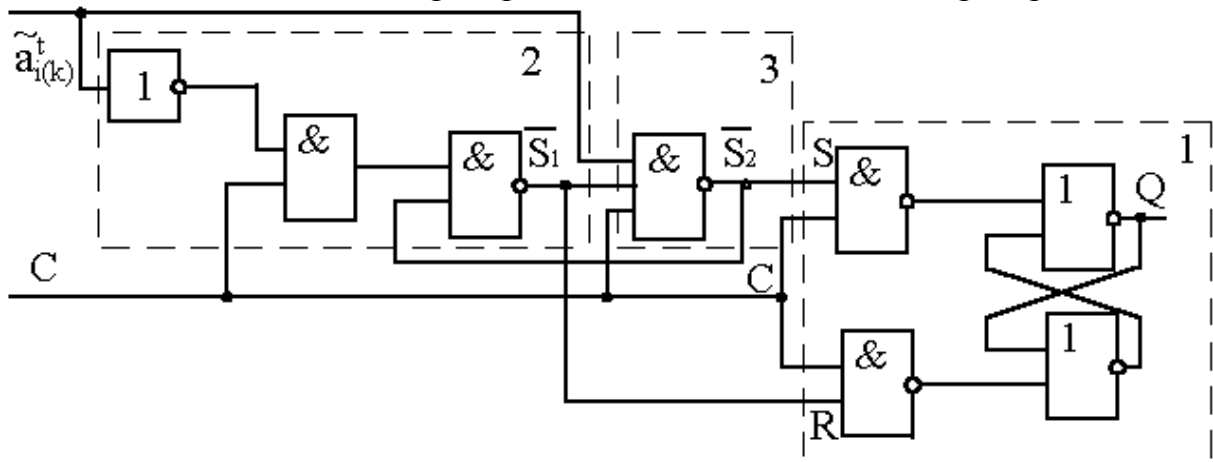


Рисунок 2.18 – Функціональна схема комірки пам'яті фіксації реакції

Тригер 1 зчитує дані S_2 і S_3 під час високого рівня сигналу R та зберігає дані на виході Q під час високого рівня сигналу W .

Вихідна логіка призначена для передачі значення Q або на вхід наступної комірки – сигнал D_+ (керуючий сигнал q_i^+), або на вхід попередньої комірки – сигнал D_- (керуючий сигнал q_i^-). Закон функціонування комірки:

$$\begin{cases} S_2 = ((S_2 \cdot C) \vee C) \cdot (\overline{D \vee S_3}); \\ S_3 = ((D \cdot C) \vee (S_3 \cdot C)) \cdot \overline{S_2}; \\ Q = ((W \cdot Q) \vee (R \cdot S_3)) \cdot (\overline{R \cdot S_2}); \\ D_+ = q_i^+ \cdot Q; \\ D_- = q_i^- \cdot Q. \end{cases} \quad (2.24)$$

Згідно із вимогами до особливості побудови ОІС ПФР кожний рядок представляє собою двонаправлений 32-х розрядний зсувовий регістр. Структура зв'язків у рядку зображена на рис. 2.19.

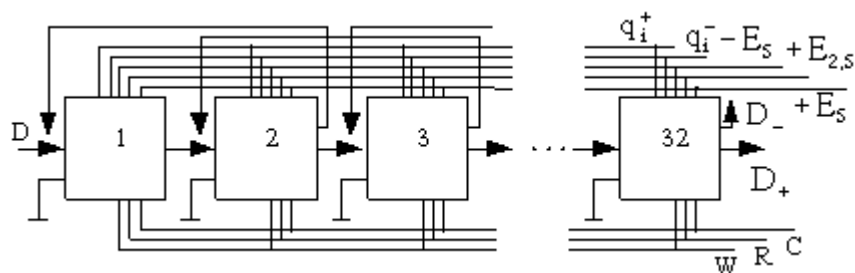


Рисунок 2.19 – Структурна схема зв'язків у рядок пам'яті фіксації реакції

Таким чином основним здобутком підрозділу є побудова приладу паралельно-послідовного оброблення зображень, яка складається з набору ОЕ та приладу паралельного передавання. Згаданий прилад є універсальним при застосуванні його як складової ЦОЕП сортування даних SLICE-обробки зображень. Але такі ЦОЕП ще потребують більш детальної розробки та узгодження власних параметрів.

2.5. Висновки

1. Вперше одержано математичну модель оптоелектронних інтегральних схем оброблення зображень, яка дає змогу визначити логічні рівні оптичних сигналів при паралельному передаванні зображень, що підвищує швидкість оброблення зображень.

2. Удосконалено метод повороту зображення на кут 90^0 , який реалізується на секціонованих оптоелектронних інтегральних схемах з використанням оптоволоконного шлейфу, що дозволяє виключити втрати інформації у зображенні під час повороту.

3. За запропонованою моделлю визначення порогів оптичних сигналів розроблено функціональну модель комірки ОЕ, використання якої підвищує достовірність групового введення-виведення та попереднього оброблення зображень.

4. Розроблено структурну схему міжз'єднань ОЕІС у ОЕ та ОЕІС комутаторів, що підвищило швидкість обробки інформації за рахунок паралельної обробки стовпця чи рядка цих даних.

5. Розроблені схеми ОЕ мають можливість збільшувати розмірність оброблюваних даних за рахунок секціонування.

2.6. Контрольні запитання

1. За якими основними законами можна побудувати діаграму направленості СВД чи НПЛ?

2. Які існують основні види втрат при стикуванні оптичних волокон?

3. Як можна збільшити розрядність пристрою оброблення зображень?

4. Суть методу повороту зображення на кут 90^0 ?

5. Основна суть алгоритму масштабування зображень?

6. Яка основна суть методу повороту зображення?

7. Структурна схема цифрового оптоелектронного процесора попарного сортування даних?

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ЦИФРОВОГО ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ПОЗРІЗОВОГО ПРОЦЕСОРА

Однією з основних процедур при виконанні алгоритмів оброблення й аналізу зображень вважається накопичення отриманих результатів, поданих у вигляді двовимірних матриць. Якщо при цьому зображення є багаторівневим, то процесору необхідно реалізувати відповідно багаторівневе накопичення матриць зображень.

Відома структура ЦОЕП, що використовує постеківий спосіб кодування інформації в матрицях зображень і поєднує цифровий спосіб обробки й аналоговий спосіб представлення зображень. Такий комбінований підхід при обробці зображень, поданих у просторово-безупинній формі, дозволяє досягти високої точності і значної швидкодії. Для нього характерно представлення розрядних зрізів багаторівневих зображень, тобто бінарних матриць, що містять однойменні розряди зображення, у вигляді оптичних пучків. В результаті процес обробки матриць зображень можна розглядати як обробку окремих бінарних операндів по всьому полю зображення.

Метою даної роботи є дослідження можливостей реалізації основних операційних блоків ЦОЕП на ОЕІС.

3.1. Особливості організації цифрового оптоелектронного процесора

Основними блоками ЦОЕП є оперативні запам'ятовувальні пристрої ОЗП1 і ОЗП2, елементи пам'яті картинного типу ЕП1 і ЕП2, суматор, інверсні оптично керовані транспаранти ОКТ1, ОКТ2, ОКТ3 і світлоз'єднувальний вузол 3 (рис.3.1.). Розглянемо більш детально можливості структурної організації ОЗП, яка у значній мірі визначається способом кодування збереженої в ньому інформації.

У даному випадку серед відомих способів кодування, що складають порядковий, постеківий і спосіб символної заміни, найбільш слушним виявився постеківий спосіб. Суть цього методу полягає в тому, що число кодується стеком у K плоских матрицях зображень із молодшим (нульовим) значущим бітом у першій матриці і старшим (знаковим) бітом у K -й матриці. Таким чином, числовий масив розмірністю $N \times M$, складений із K -розрядних вихідних чисел, а також результат обробки можуть бути подані як K зображень розмірністю $N \times M$, кожне з яких містить відповідний розрядний зріз $N \times M$ двійкових чисел (рис. 3.2).

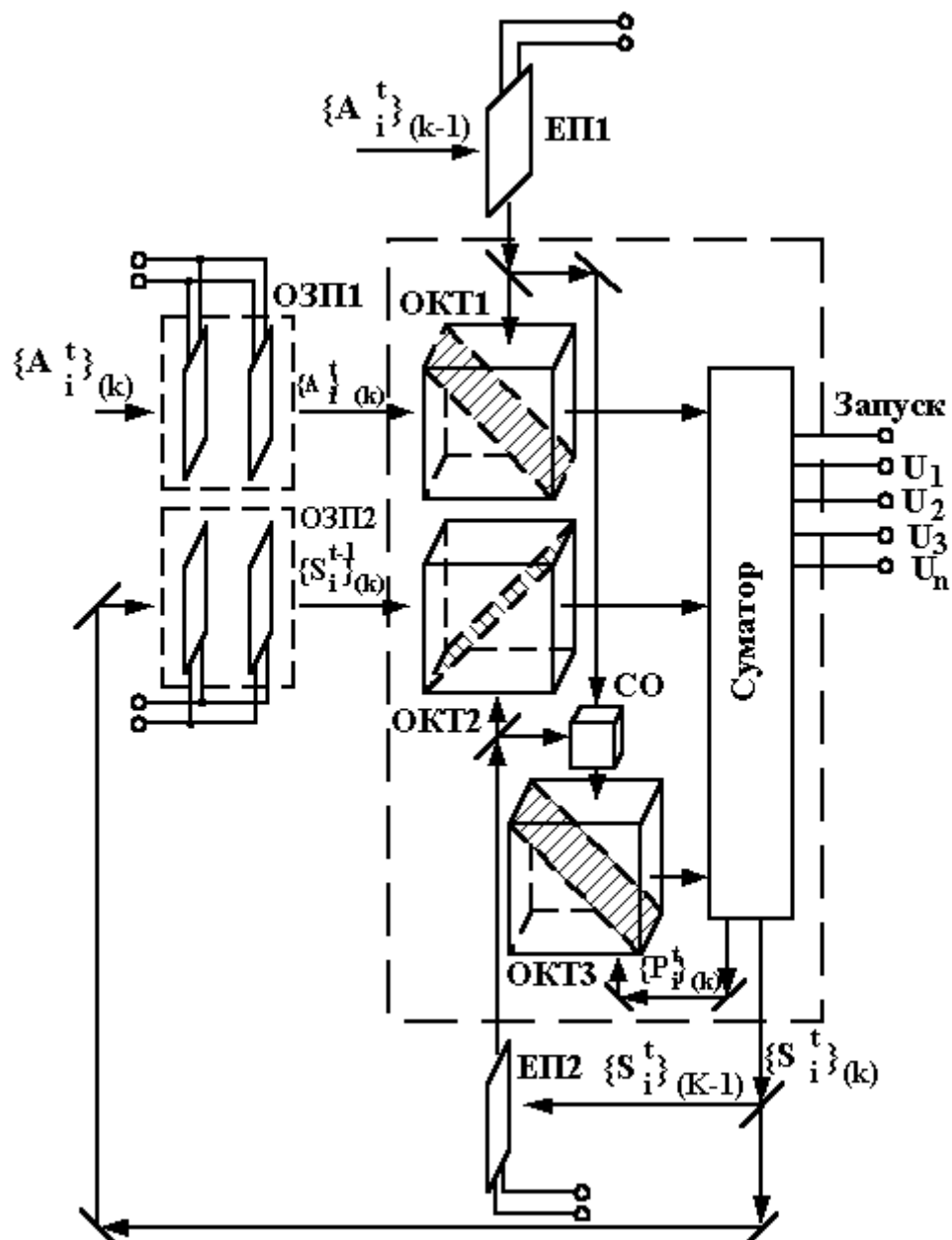


Рисунок 3.1 - Структурна схема ЦОЕП попарного сортування даних

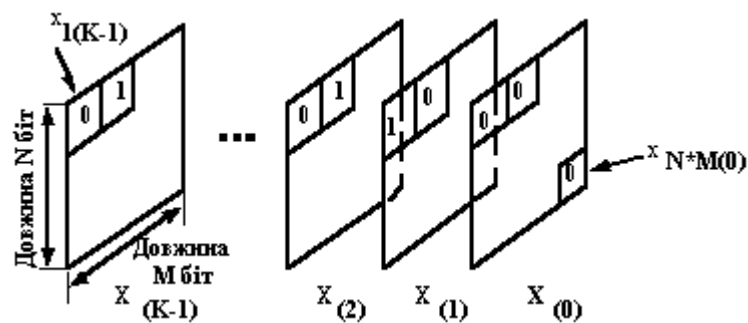


Рисунок 3.2 – Схема розташування розрядних перерізів багатоградаційного зображення

Суть багаторівневого накопичення зображень полягає у формуванні в кожному циклі обробки послідовності зображень Z вигляду

$$Z = X + Y,$$

де послідовність зображень

$$X = \{X_{(K-1)}, \dots, X_{(k)}, \dots, X_{(0)}\}, \quad (3.1)$$

запам'ятовує $N \times M$ двійкових K -розрядних чисел

$$A_i = \{a_{i(K-1)}, \dots, a_{i(k)}, \dots, a_{i(0)}\}, \quad i = \overline{1, N \times M}.$$

Аналогічно послідовність зображень Y і Z представляє собою масив $N \times M$ двійкових K -розрядних чисел B_i і R_i , причому старші розряди чисел $a_{i(K-1)}$, $b_{i(K-1)}$, $r_{i(K-1)}$ є знаковими, а відповідні зображення $X_{(K-1)}$, $Y_{(K-1)}$, $Z_{(K-1)}$ – знаковими матрицями. Знак "+" за відомим правилом кодується нулем, а знак "-" кодується одиницею.

Принцип роботи процесора полягає в забезпеченні алгебраїчного додавання послідовності T чисел A_i^t (де $t = \overline{1, T}$). У процесі накопичення проміжних результатів одним із доданків є результат алгебраїчного додавання S_i^{t-1} , отриманий на попередньому $(t-1)$ -му циклі додавання, тобто

$$S_i^t = A_i^t + S_i^{t-1},$$

$$\text{де } S_i^t = \{s_{i(K-1)}^t, \dots, s_{i(k)}^t, \dots, s_{i(0)}^t\}.$$

Таким чином, результат алгебраїчного додавання послідовностей T чисел A_i^t дорівнює $R_i = S_i^T$, причому $S_i^1 = A_i^1$, $t = \overline{1, T}$.

При представленні вихідної інформації у вигляді $2K$ -рівневих зображень розмірністю $N \times M$, послідовність опрацьовується по розрядних зрізах, починаючи з нульового, як масив $N \times M$ операндів розрядністю K або як послідовність зображень вигляду (3.1), при

$$X_{(k)} = \{A_i^t\}_{(k)} = \{a_{1(k)}^t, \dots, a_{N \times M(k)}^t\},$$

де $\{A_i^t\}_{(k)}$ – двійкова матриця, для котрої

$$i = \text{var}(i = \overline{1, N \times M}), \quad t = \text{const}.$$

Беручи до уваги, що процес алгебраїчного додавання виконується над масивами знакозмінних чисел A_i^t і S_i^t , необхідно вихідну ін-

формацію, задану в області оригіналів у вигляді прямого коду, перекласти в область зображень (додатковий код), у якій виконуються всі необхідні операції, а потім здійснити переклад результатів в область оригіналів оберненим перетворенням. У такий спосіб для k -го розряду t -ї суми можна записати такий вираз:

$$s_{i(k)}^t = \begin{cases} a_{i(k)}^t + s_{i(k)}^{t-1} + p_{i(k-1)}^t, & \text{якщо } a_{i(K-1)}^t = 0; \\ \overline{a_{i(k)}^t + s_{i(k)}^{t-1} + p_{i(k-1)}^t}, & \text{якщо } a_{i(K-1)}^t = 1, \end{cases} \quad (3.2)$$

де $\overline{a_{i(k)}^t}$ – інверсне значення $a_{i(k)}^t$;

$p_{i(k-1)}^t$ – перенесення із $(k-1)$ -го розряду t -ї суми S_i^t ;

$k = \overline{0, K-1}$.

Для нульового розряду t -ї суми S_i^t вираз (3.2) приймає такий вигляд:

$$s_{i(0)}^t = \begin{cases} a_{i(0)}^t + s_{i(0)}^{t-1} + 0, & \text{якщо } a_{i(K-1)}^t = 0; \\ \overline{a_{i(0)}^t + s_{i(0)}^{t-1} + 1}, & \text{якщо } a_{i(K-1)}^t = 1, \end{cases} \quad (3.3)$$

оскільки перенесення у нульовому розряді відсутнє, але є присутньою одиниця при перетворенні величини $a_{i(0)}^t$ з прямого в додатковий код, в залежності від значення величини $a_{i(K-1)}^t$ в знаковому розряді.

Таким чином, у кожному k -му такті циклу додавання виконується підсумовування однойменних k -х розрядів попередньої суми і прямого (оберненого) коду поточного доданку, а також одиниці перенесення, сформованої в попередньому $(k-1)$ -му такті, за формулою (3.2) або нуля (одиниці) у нульовому розряді за формулою (3.3). Інвертування або пропускання інформації без змін виконується за допомогою ОКТ1 і ОКТ2 з урахуванням знакових матриць в ЕП1 і ЕП2 у процесі зчитування оптичної інформації з ОЗП1 і ОЗП2 відповідно. Запис, збереження і зчитування послідовності зображень $X(k)$ у t -му циклі алгебраїчного додавання виконується з використанням двовимірного стекового ОЗП1, а послідовність зображень $Z(k)$ вигляду

$$Z_{(k)} = \{S_i^t\}_{(k)} = \{s_{1(k)}^t, \dots, s_{N \times M(k)}^t\}$$

записується, зберігається і зчитується з ОЗП2. Знакова матриця чергового масиву доданків $\{A_i^t\}_{(K-1)}$, тобто вміст K -го розряду двовимірного ОЗП1,

дублюється в ЕП1 картинного типу, а знакова матриця поточної суми, тобто вміст $\{S_i^t\}_{(K-1)}$ K -го розряду ОЗП2, - у ЕП2 картинного типу.

З аналізу роботи ЦОЕП випливає, що він повинен мати пам'ять, яка може забезпечити одночасне надходження в оптоелектронний суматор двох двовимірних розрядних зрізів. Таким чином, процесор повинний виконувати функції збереження, введення - виведення, позрізового додавання, при цьому інформація повинна надходити і зчитуватись в оптичному вигляді паралельно по зрізах. Усі ці вимоги роблять актуальною задачу суміщення функцій ОЗП і ОКТ в одному пристрої з можливістю його реалізації на ОІС.

3.2. Організація пам'яті на оптоелектронних інтегральних схемах

Компромісним і оптимальним на даний момент часу рішенням, що дозволяє сумістити ОЗП і ОКТ в одному блоці, є використання запам'ятовувального пристрою на ОІС. На сьогодні є завершеним моделювання комплекту ОІС для обробки зображень із розрядностями 32×32 , 64×64 , 128×128 точок. Характерною рисою оптоелектронних компонент є їх простота при виконанні функції активного елемента пам'яті (рис.3.3) [1], тобто звичайного тригера, але з двома істотними відмінностями. Перша відмінність – тригер принципово не може бути побудований на одному активному елементі (транзисторі) [5; 13] (за винятком схем на тиристорах, які не зовсім зручні для використання у якості активного елемента пам'яті [13]) і в тригері необхідні два зворотні зв'язки із виходів кожного з плечей на вхід іншого, тоді як у поточній схемі потрібен лише один. Крім того такий тригер достатньо просто реалізується у інтегральному оптоелектронному виготовленні.

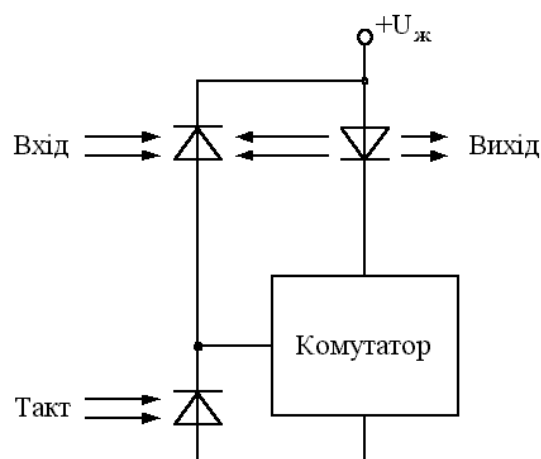


Рисунок 3.3 – Структурна схема квантрона

Для збереження кількох бітових зрізів і знакового зрізу необхідно використовувати відповідну кількість ОІС. Організація пам'яті – стекова, тип – прохідний (рис. 3.4).

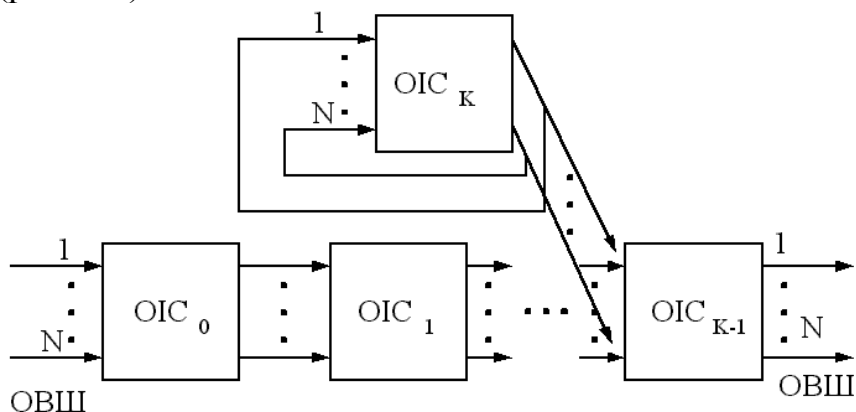


Рисунок 3.4 – Схема передачі зображень у ЦОЕП

У комплект ОІС включений: ОЕ і ОВШ. Призначення ОЕ – збереження, введення, виведення і паралельний зсув зображення.

ОЕ являє собою матричну структуру, у якій кожен елемент виконує такі функції: прийом інформації, збереження і передачу. Прийом і передача зрізів між ОІС виконуються паралельно-послідовно по оптоволоконному шлейфу, а також можливий прийом і передача двовимірного зрізу зображення при проектуванні його на поверхню кристала ОІС. Перший тип комірки містить у собі елементи, із яких починається кожний рядок ОІС (рис. 3.5) – $a_{l,c}$, де $l = \overline{1, N}$, $c = 1$ і виконує операції прийому, збереження, передачі і додавання за модулем 2:

$$\tilde{a}_{i(k)}^t = \begin{cases} a_{i(k)}^t, & \text{якщо } \text{sign } A_i^t = 0; \\ \overline{a_{i(k)}^t}, & \text{якщо } \text{sign } A_i^t = 1, \end{cases}$$

тобто

$$\tilde{a}_{i(k)}^t = a_{i(K-1)}^t \oplus a_{i(k)}^t, \quad (3.4)$$

тому що $\text{sign } A_i^t = a_{i(K-1)}^t$.

Другий тип комірки ОІС (рис. 3.6) – $a_{l,c}$, де $l = \overline{1, N}$, $c = \overline{2, M+1}$, виконує прийом, збереження і передачу біта інформації. Структурна схема ОІС подана на рис. 3.7.

Розрядність базових ОЕ вибирається з оптимального співвідношення кількості виводів і енергоспоживання ОІС. У деяких задачах обробки зображень при накопиченні двовимірних матриць достатньо оперувати зрізами 32×32 . Тому для виконання алгоритму достатньо використовувати ОЕ розрядністю 32×32 і ОВШ із кількістю волокон 32×1 .

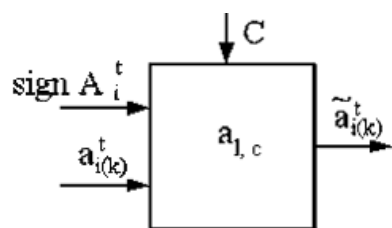


Рисунок 3.5 – Структурна схема вхідної логіки ОКТ

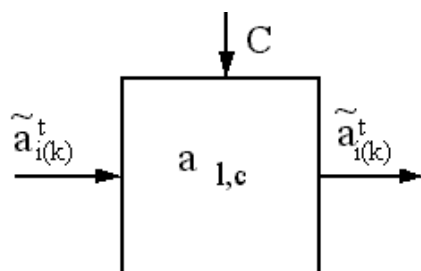


Рисунок 3.6 – Структурна схема комірки ОКТ

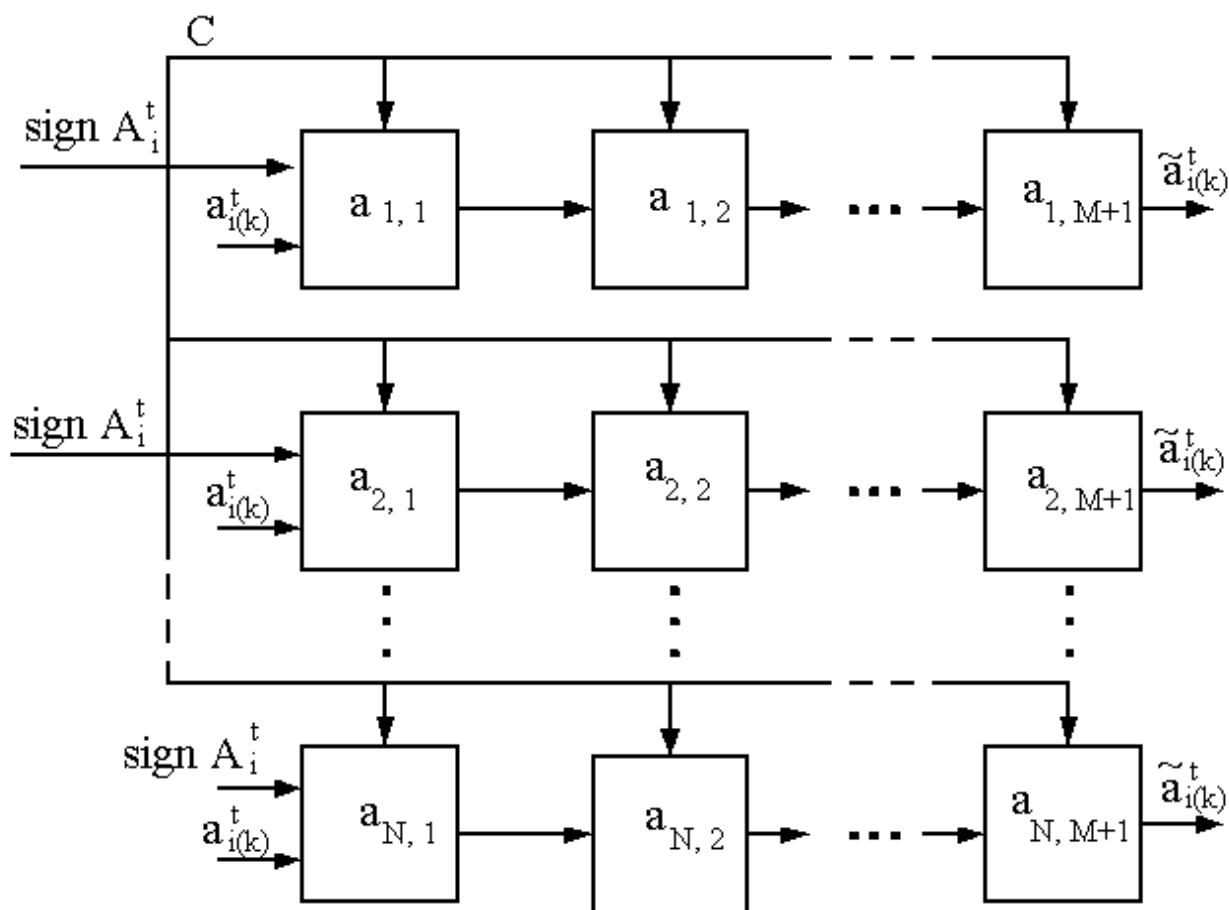


Рисунок 3.7 – Структурна схема ОКТ

Технічні характеристики ОВШ – діаметри серцевини 50 мкм і оболонки 125 мкм. Параметри вибрані з урахуванням геометричних розмірів

ОЕ. Тип з'єднання ОВШ із ОІС – у стик, кількість волокон у шлейфі – 32×1 .

Пам'ять на ОІС дозволяє записати на початку циклу “маску” (знакову матрицю), а потім при подачі бінарних матриць (розрядних зрізів) виконує збереження зрізів і перетворення інформації (інвертування) на $(k-1)$ тактах циклу, відповідно до знакового розряду.

3.3. Розробка структури та комірки оптоелектронної інтегральної схеми

Базовим елементом ОЕ є комірка. З'єднання комірок між собою представляє рядки, причому кількість комірок у рядку дорівнює $M+1$, де M – кількість рядків. Вирішальним фактором у побудові схемотехніки комірки є технологія виготовлення ОІС – молекулярно-променева епітаксія. У нашому випадку на підкладинці з GaAs реалізовані в інтегральному виконанні випромінювачі, фотоприймачі та електронні компоненти.

Для запису або зчитування зрізу в двовимірному вигляді в комірках використовуються матеріали для випромінювачів – AlGaAs, для фотоприймачів – InGaAs, діапазон довжин хвиль $\lambda=0,8 \dots 1$ мкм. При виконанні операцій прийому і передачі по оптичних хвилеводах і волокнах у комірках застосовуються матеріали для випромінювачів – InGaAs, фотоприймачів – InGaAs, діапазон довжин хвиль $\lambda=1,4 \dots 1,6$ мкм.

У якості комірки першого типу використана функціональна схема, що складається з вихідного 1, першого 2 і другого 3 тригерів, а також вхідної логіки 4, яка містить елемент “Виключне АБО” (рис. 2.14). Позначимо виходи першого 2 і другого 3 тригерів відповідно S_1 і S_2 , вихідного 1 тригера – Q і $\bar{Q}$. Схема, яка синхронізується фронтом C , працює таким чином: вхідна логіка комірок першого стовпця – елемент “Виключне АБО” виконує операцію додавання за модулем 2 вхідних сигналів (3.4). Сигнали синхронізації C і $\tilde{a}_{i(k)}^t$ надходять на входи першого 2 і другого 3 тригерів. Функція першого 2 тригера – скидання в “0” вихідного тригера при надходженні по входу даних нуля. Функція другого тригера 3 – установка в “1” вихідного тригера при надходженні на вхід даних одиниці. Функція вихідного тригера – запам'ятовування значення, що надійшло на вхід даних під час приходу фронту останнього синхроімпульсу. Закон функціонування комірки:

$$\begin{cases} \tilde{a}_{i(k)}^t = a_{i(k-1)}^t \oplus a_{i(k)}^t; \\ S_1 = (\overline{S_2 \tilde{a}_{i(k)}^t} C) \vee (C S_1); \\ S_2 = (S_2 C) \vee (C \tilde{a}_{i(k)}^t \overline{S_1}); \\ Q^{n+1} = (Q^n S_1) \vee S_2. \end{cases} \quad (3.5)$$

У якості комірки другого типу використана функціональна схема, що складається з вихідного 1, першого 2 і другого 3 тригерів (див. додаток А). Схема комірки працює аналогічно схемі комірки першого типу і відрізняється відсутністю вхідної логіки. Закон функціонування комірки:

$$\begin{cases} S_1 = (\overline{S_2 \tilde{a}_{i(k)}^t} C) \vee (C S_1); \\ S_2 = (S_2 C) \vee (C \tilde{a}_{i(k)}^t \overline{S_1}); \\ Q^{n+1} = (Q^n S_1) \vee S_2. \end{cases} \quad (3.6)$$

У ОІС використаний оптоелектронний, керований фронтами тригер. Така схема підвищує вірогідність роботи комірок ОІС, оскільки вона вилучає ефект “гонок”, хоча і потребує застосування додаткових елементів у схемі комірки. Принцип роботи таких комірок на оптоелектронній елементній базі входить в основи квантронної схемотехніки і докладно описаний у літературі [1].

Таким чином, можливість реалізації схемою ОІС операції логічного додавання за модулем 2, яку у структурі процесора (рис. 3.1) виконують ОКТ1 і ОКТ2, дозволяє реалізувати функції групи таких вузлів процесора як ОЗП, ЕП і ОКТ, у вигляді $(K+1)$ ОІС (рис.3.4).

3.4. Розробка приладу паралельного передавання даних по ВОЛЗ у цифровому оптоелектронному процесорі попарного сортування даних

Під час створення ЦОЕП було розв’язано задачу з’єднання ОІС між собою [100; 101; 102]. Класифікація існуючих способів з’єднання ОІС представлена на рис. 3.8. На основі класифікації компонент з’єднань ОІС (рис. 3.9) робимо висновок, що найбільш оптимальним рішенням є комбінована схема зв’язку – використання розетки між ОІС та ОВ шлейфом (рис.3.10). Воно обумовлено можливістю мобільної зміни розрядності приладу. Труднощі при проектуванні викликають затухання, вони поділяються на роз’ємні з’єднання та затухання волокна.

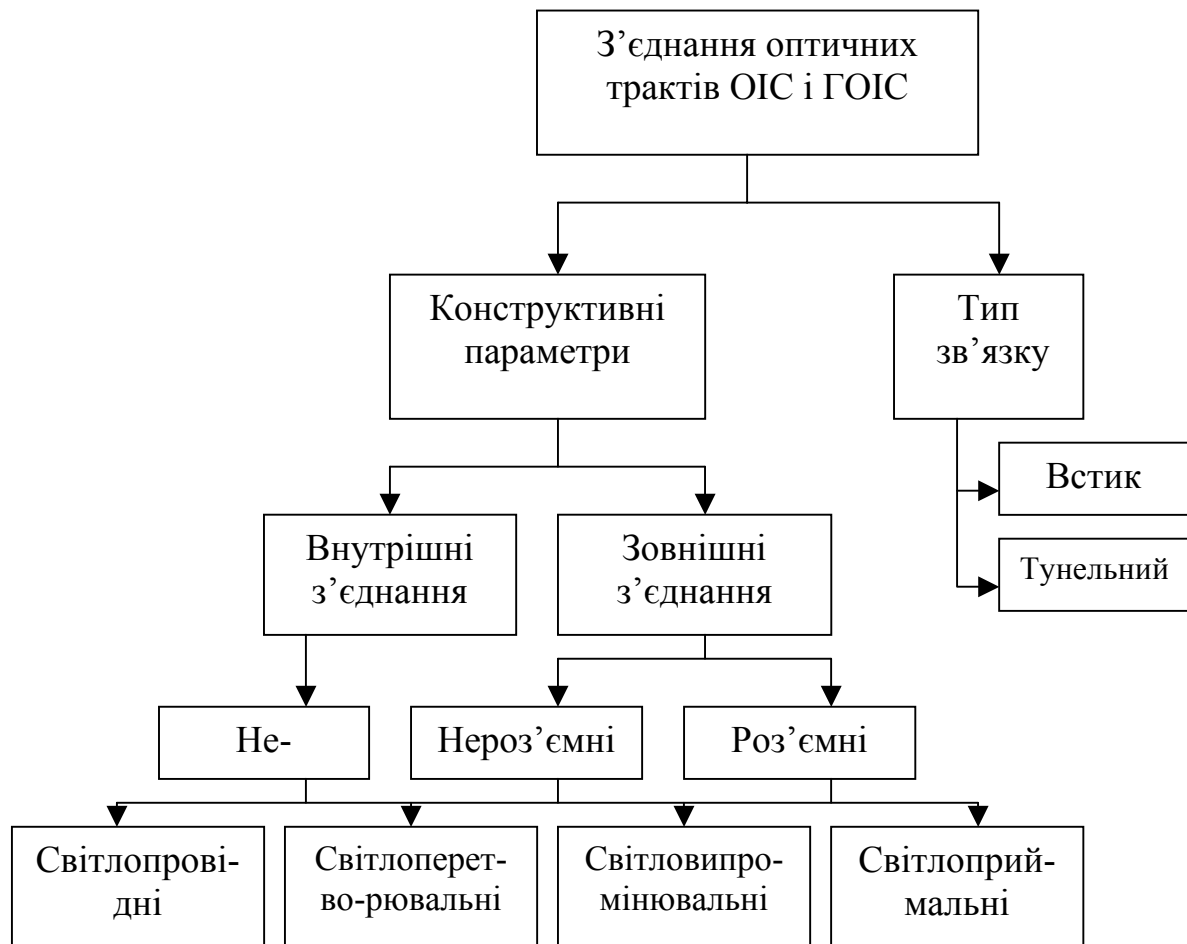


Рисунок 3.8 – Класифікація типів та елементів з'єднань оптичних трактів ОЕІС, ОІС та гібридних оптоелектронних інтегральних схем (ГОЕІС)

Для оцінки затухання потрібно враховувати сумарний вплив:

- а) затухання волокна;
- б) зовнішні втрати з'єднання:
 - радіальне неузгодження;
 - кутова неузгодженість осей;
 - децентрування конструктива;
 - наявність мікрровиступів;
 - взаємна непаралельність поверхонь торців;
 - виникнення інтерференції світла в зазорі;
- в) внутрішні втрати з'єднання:
 - неоднакова числова апертура волокон;
 - різниця в діаметрах серцевин;
 - незбіжні діаметри оболонок.

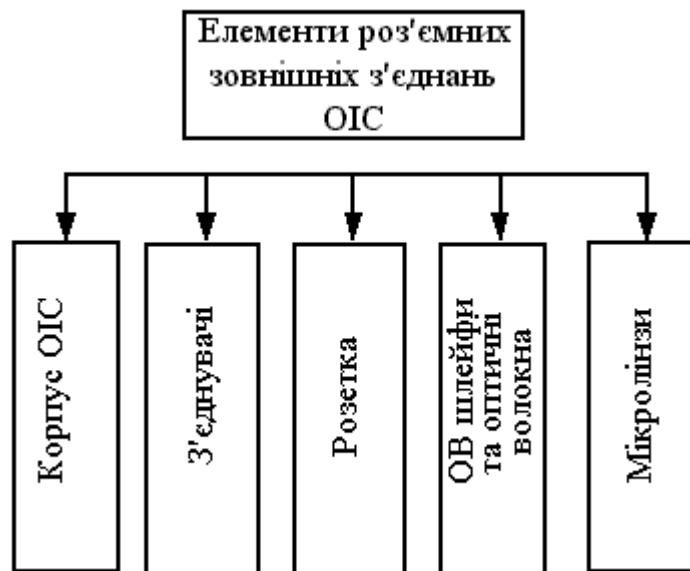


Рисунок 3.9 – Класифікація елементів роз'ємних з'єднань ОІС, ОЕІС та ГОЕІС

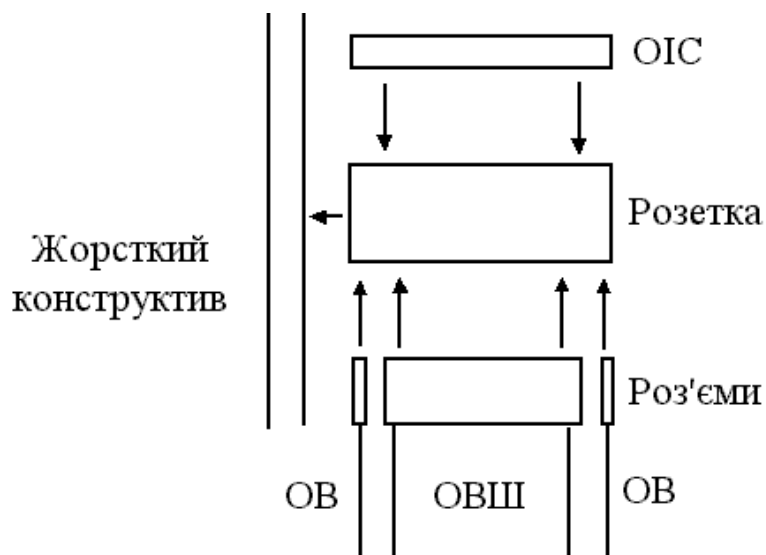


Рисунок 3.10 – Структурна схема зв'язків елементів з'єднання

На основі схеми з'єднання елементів детальніше розглянемо кожний елемент.

Корпус ОІС призначений для механічного кріплення кристалу та виводів. Запропоновано варіанти ОІС з розрядністю 128×128, 64×64, 32×32.

Розетка призначена для утримання корпусу ОІС, ОВ шлейфа та ліній електричної передачі (рис. 3.11). Розетка передбачає кріплення до конструктива.

З'єднувачі призначені для під'єднання ОВ шлейфа до розетки, ОВ до розетки.

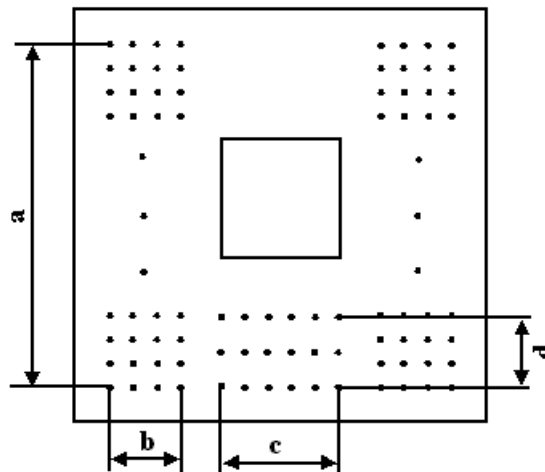


Рисунок 3.11 – Розетка

Для лінії передачі пропонується використовувати оптоволоконний кабель розроблений *Mitsubishi Rayon* [103; 104]. Оптоволоконний кабель призначений для створення інформаційних мереж та має параметри: діаметр серцевини – 1 мм, зовнішній діаметр оболонки – 2 мм, втрати при розповсюдженні – 150 дБ/км для одномодових коливань, швидкість передачі даних до 1 Гбіт/с.

Для досягнення необхідної пропускної здатності між ОІС, гнучкі з'єднання пропонується виготовляти у вигляді рядкової структури. Одне із вдалив конструктивних рішень запропонувала *Bell Laboratories*, а саме, виготовляти з волокон матриці. Матриця розділяється на рядки, які легко накладаються один на один. Рядки складаються із укладених паралельно волокон. Волокна розташовані між двох шарів: шару поліетилену з великою в'язкістю та малим модулем пружності та шару поліефіру з великим модулем пружності. Основні конструктивні параметри таких ОВ шлейфів з використанням ОВ *Mitsubishi Rayon* наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики роз'ємного з'єднання

Параметр	Значення
Розрядність ОЕІС	32×32
Кристал ОЕІС, мм	49,6×49,6
Корпус ОЕІС, мм	54×79,6×5

Продовження таблиці 3.1.

Параметр	Значення
Розетка, мм	54×79,6
Крок між ОВ, мм	2
Крок між електричними провідниками, мм	2,5
a , мм	50
b , мм	11
c , мм	67,5
d , мм	12,5
Розрядність ОВШ, кількість ОВ	32
Роз'єм ОВШ, мм	$a \times b$
Роз'єм ОВ, мм	$4 \times 4 \times 10$

3.5. Пошук та ідентифікація об'єктів на операційних екранах

В сучасних системах обробки зображень широко застосовуються оптоелектронні системи. Це пов'язано з тим, що несучою робочих сигналів системи та вхідної інформації є світлові хвилі. Такий збіг природи сигналів усуває необхідність проміжних перетворень. В якості систем з цифровою оптичною обробкою зображень використовуються операційні матричні структури – ОЕ. ОЕ виконують такі функції: прийом, зберігання, зсув, поворот на малий кут, поворот на кути – 90^0 , 180^0 , 270^0 та виведення зображення. На основі вищезгаданих операцій можна реалізувати операційний оптоелектронний інтегральний пристрій пошуку та ідентифікації об'єктів на бінарному зображенні [60; 105; 106].

Опишемо метод пошуку об'єкта на ОЕ. ОЕ – сукупність бістабільних елементів, розташованих в цілочисельних точках площини, здатних оперувати бінарними сигналами. Кожен елемент ОЕ має два стани – активний (1) і пасивний (0). При представленні зображень на ОЕ воно дискретизується в площині екрана у множині точок і є сукупністю активних (або пасивних) елементів ОЕ. Таким чином, зображення на ОЕ представляється сукупністю логічних одиниць (або нулів).

Об'єкт на ОЕ (розміри ОЕ – $N \times N$) має розміри $n \times n$ при цьому $n = N/k$, $k = 2\tau$, де τ – натуральне ціле число. Вважається, що еталонний об'єкт також представляється на площині розмірністю $n \times n$. Отже, об'єкт, який аналізується буде перекривати деяку частину і може знаходитися в будь-якій зоні ОЕ.

Таким чином, ставиться задача пошуку об'єкта на ОЕ і визначення його координат. Під координатами аналізованого об'єкта будемо розуміти

порядкові номери рядка крайнього верхнього стовпця і крайньої лівої точки об'єкта. Це дозволяє визначити умовні лінії зміщення (горизонтальне і вертикальне) для накладання один на одного площин аналізованого і еталонного об'єктів при ідентифікації. Виходячи з цього, задача пошуку і визначення координат об'єкта зводиться до встановлення верхньої горизонтальної лінії, що проходить на верхній крайній точці об'єкта і лівої вертикальної лінії, що проходить на лівій крайній точці об'єкта.

Для розв'язання цієї задачі потрібно ОЕ умовно розділити на квадрати розмірністю $n \times n$. Розділення ОЕ на квадрати з розмірами $n \times n$ пояснюється максимальними допустимими розмірами аналізованого об'єкта і помітно спрощує задачу визначення координат об'єкта, оскільки аналізований об'єкт може знаходитись в одному або в кількох з цих квадратів.

Аналізований об'єкт може виходити за межі умовного квадрата і перекривати деяку частину відразу декількох квадратів, але не більше чотирьох сусідніх.

Теорема. Якщо ОЕ розмірністю $N \times N$ поділений на квадрати розмірністю $n \times n$, то об'єкт, який має максимальні розміри $n \times n$, не може перекривати більш ніж чотири сусідніх квадрати.

Припустимо, що об'єкт охоплює деяку частину квадрата E_{ij} з координатами ij , де i – порядковий номер квадрата по вертикалі ОЕ, а j – порядковий номер квадрата по горизонталі ($ij = \overline{1, k}$), тобто деяка кількість елементів квадрата E_{ij} знаходиться в активному стані. В даному квадраті E_{ij} рядок і стовпець, в яких хоча б один елемент знаходиться в активному стані, позначимо їх відповідно через A^1 та B^1 , а рядок і стовпець, в яких всі елементи знаходяться в пасивному стані, – відповідно через A^0 і B^0 . Кількість рядків A^1 і стовпців B^1 квадрата E_{ij} позначимо відповідно через F_{ij}^1 і Q_{ij}^1 , а кількість рядків A^0 і стовпців B^0 – через F_{ij}^0 та Q_{ij}^0 . Оскільки розміри квадрата $n \times n$, тому справедливо:

$$F_{ij}^1 + F_{ij}^0 = n; \quad (3.7)$$

$$Q_{ij}^1 + Q_{ij}^0 = n. \quad (3.8)$$

Об'єкт охоплює деяку частину квадрата E_{ij} , тобто $0 < F_{ij}^1 \leq n$ та $0 < Q_{ij}^1 \leq n$.

Припустимо $F_{ij}^1 = n$, тоді з (3.7) $F_{ij}^0 = 0$ і всі рядки об'єкта повністю знаходяться в квадраті E_{ij} . Якщо $Q_{ij}^1 = n$, тоді з (3.8) $Q_{ij}^0 = 0$ і всі стовпці об'єкта повністю знаходяться в квадраті E_{ij} .

При одночасному виконанні цих умов об'єкт повністю буде знаходитись в квадраті E_{ij} (рис.3.12, а).

Якщо $F_{ij}^1 < n$ і $Q_{ij}^1 < n$, тоді об'єкт буде охоплювати деяку частину сусідніх квадратів як по горизонталі, так і по вертикалі.

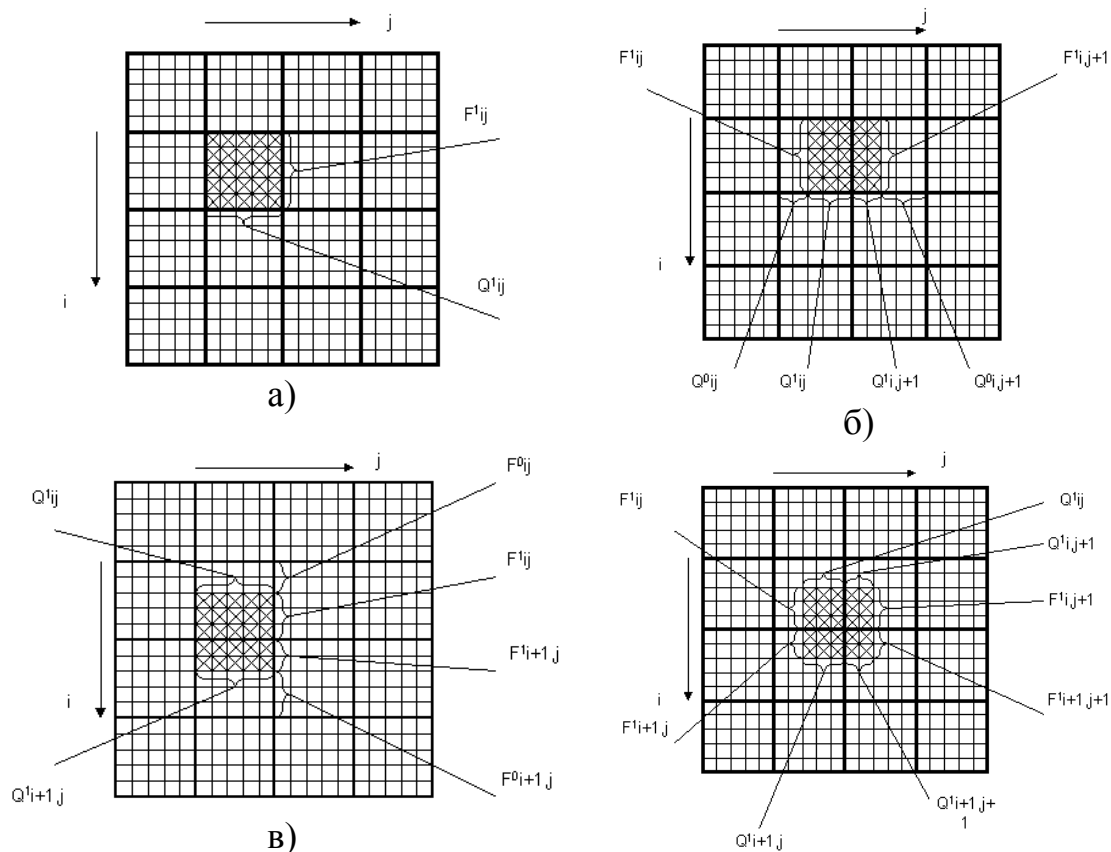
Припустимо, що об'єкт охоплює деяку частину квадратів E_{ij} та $E_{i,j+1}$, тоді:

$$Q_{ij}^1 + Q_{i,j+1}^1 = n, \quad (3.9)$$

де $Q_{i,j+1}^1$ – кількість стовпців квадрата $E_{i,j+1}$, що мають елементи в активному стані. Але, якщо порівняти (3.8) та (3.9), то

$$Q_{ij}^0 = Q_{i,j+1}^1 \text{ та } Q_{ij}^1 = Q_{i,j+1}^0, \quad (3.10)$$

де $Q_{i,j+1}^0$ – кількість стовпців квадрата $E_{i,j+1}$, що не мають елементів в активному стані. З (3.10) випливає, що якщо об'єкт по горизонталі з одного квадрата переходить в сусідній квадрат в одну сторону і охоплює його деяку частину, то в іншу сторону воно не може переходити (в сусідньому квадраті), оскільки в цій стороні в даному квадраті обов'язково буде деяка кількість стовпців, що не мають елементів в активному стані (рис.3.12, б). На основі цього можна зробити висновок, що об'єкт на ОЕ по горизонталі може охоплювати деяку частину ОЕ, але не більше двох сусідніх квадратів.



г)

Рисунок 3.12 – Розбивка ОЕ на зони

а) варіант 1; б) варіант 2; в) варіант 3; г) варіант 4.

Аналогічно, якщо припустити, що зображення перекриває деяку частину квадратів E_{ij} та $E_{i+1,j}$, тоді:

$$F_{ij}^1 + F_{i+1}^1 = n, \quad (3.11)$$

де $F_{i+1,j}^1$ – кількість рядків квадрата $E_{i+1,j}$, що мають елементи в активному стані. Тоді виявляємо, що:

$$F_{i,j}^0 = F_{i+1,j}^1, \quad (3.12)$$

$$F_{ij}^1 = F_{i+1,j}^0, \quad (3.13)$$

де $F_{i+1,j}^0$ – кількість рядків квадрата $E_{i+1,j}$, які не мають елементів в активному стані. З (3.12) та (3.13) випливає, що аналогічно вищевказаному твердженню, об'єкт з одного квадрата по вертикалі може переходити тільки в один сусідній квадрат, тобто об'єкт по вертикалі може охоплювати деяку частину, не більше двох сусідніх квадратів (рис.3.12, в).

Таким чином, якщо в квадраті $E_{ij}: F_{ij}^1 < n$ та $Q_{ij}^1 < n$, тоді об'єкт охоплює деяку частину, але не більше двох квадратів як по вертикалі, так і по горизонталі. Припустимо, об'єкт охоплює деяку частину квадратів $E_{ij}, E_{i,j+1}$ та $E_{i+1,j}$. Тоді, виходячи з вищевказаних тверджень, воно не може охоплювати квадрати $E_{i,j-1}$ та $E_{i-1,j}$. При цьому аналізований об'єкт, виходячи з його розмірностей, не може охоплювати квадрати $E_{i-1,j+1}$ та $E_{i+1,j-1}$, оскільки в іншому разі це суперечить умовам теореми. Оскільки в квадраті $E_{i+1,j}: 0 < F_{i+1,j}^1 < n$, тому справедливо, що $0 < Q_{i+1,j}^1 < n$. Також, якщо в квадраті $E_{i,j+1}: 0 < Q_{i,j+1}^1 < n$, то справедливо, що $0 < F_{i,j+1}^1 < n$. На основі (3.9) та (3.11) випливає, що об'єкт може перекривати квадрат $E_{i+1,j+1}$, тобто $F_{i+1,j+1}^1 > 0$ і $Q_{i+1,j+1}^1 > 0$. Таким чином, на основі отриманих результатів можна зробити висновок, що об'єкт на ОЕ може охоплювати квадрати $E_{ij}, E_{i,j+1}, E_{i+1,j}, E_{i+1,j+1}$ (рис.3.12, г), тобто об'єкт може охоплювати деяку частину, але не більше чотирьох сусідніх квадратів, що і потрібно було довести.

Умовне розділення ОЕ на квадрати значно спрощує задачу і зменшує час пошуку об'єкта на ОЕ.

Запропонований метод об'єкта на ОЕ – послідовний. Метод враховує послідовне зчитування кожного квадрата E_{ij} з метою виявлення його ста-

ну. Стан Φ квадрата E_{ij} будемо вважати одиничним ($\Phi_{ij} = 1$), якщо в ньому є хоча б один активний елемент. В іншому випадку стан квадрата E_{ij} будемо вважати нулевим, тобто $\Phi_{ij} = 0$. Одиничний стан квадрата E_{ij} вказує на присутність об'єкта або його частини в даному квадраті і при знаходженні цього квадрата проводиться визначення координат рядка крайньої верхньої і стовпця крайньої лівої точки об'єкта в даному квадраті.

При використанні методу пошуку об'єкта на ОЕ виконуються такі операції:

1. Проводиться зчитування квадрата E_{ij} , де $i, j = \overline{1, k}$.
2. У випадку виявлення першого ж квадрата, для якого $\Phi_{ij} = 1$, виконується зчитування рядків A_m і стовпців B_e квадрата E_{ij} , де $m, e = \overline{1, n}$, до виявлення перших рядка і стовпця, що мають хоча б один елемент в активному стані, тобто $\varphi_m = 1(A_m \Leftrightarrow \varphi_m)$ і $\varphi_e = 1(B_e \Leftrightarrow \varphi_e)$.
3. Проводиться фіксування номерів виявлених рядка і стовпця квадрата E_{ij} .
4. Проводиться зчитування квадрата $E_{i,j+1}$ (у випадку, коли $j < k$) і якщо $\Phi_{i,j+1} = 1$, то виконується дії по пп.2 і 3.
5. Зчитується квадрат $E_{i+1,j+1}$, якщо $\Phi_{i+1,j+1} = 1$, то виконуються дії по пп.2 і 3.
6. Зчитується квадрат $E_{i+1,j}$, якщо $\Phi_{i+1,j} = 1$, то виконуються дії по пп.2 і 3.
7. У випадку, якщо $\Phi_{i,j+1} = 0$ то $\Phi_{i+1,j+1} = 0$ виконується зчитування квадрата $E_{i+1,j-1}$ (в іншому випадку квадрат не аналізується). Якщо, $\Phi_{i+1,j-1} = 1$, то виконуються дії по пп.2 і 3.
8. Проводиться вибір мінімальних значень номерів рядка $Am_{\min}$ і стовпця $Be_{\min}$.

Визначені рядок $Am_{\min}$ і стовпець $Be_{\min}$ є умовними лініями зіставлення (відповідно горизонтальної і вертикальної) для накладання площин аналізованого і еталонного об'єкта.

При використанні даного методу пошуку, у випадку виявлення квадрата зі станом $\Phi_{ij} = 1$, аналізу підлягають тільки його сусідні квадрати, а аналіз інших квадратів не виконується. Це дозволяє в багатьох випадках в значній мірі зменшити час пошуку і визначення координат об'єкта.

При виконанні методу ідентифікації бінарних зображень, позначимо еталонне і поточне бінарне зображення, відповідно як I_E і I_T . Бінарне зображення можна розглядати як фігуру на площині і, також, як матрицю $A = \|a_{ij}\|$ [5; 7], яку записують в ОЕ.

За аналогією модульно-кореляційної функції [6], вводимо кореляційну функцію бінарних зображень. Кореляційною функцією бінарних зображень I_E, I_T називається функція $\Phi(I_E, I_T)$ яка визначається як [106; 107]

$$\Phi(I_E, I_T) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}(I_E) \oplus b_{ij}(I_T) \quad (3.14)$$

де $N \times N$ розміри матриць $\mathbf{A}$ і $\mathbf{B}$, $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$, $\mathbf{B} = \|b_{ij}\|$ відповідно для еталонного і поточного бінарних зображень, $a_{ij} \in \{0,1\}$, $b_{ij} \in \{0,1\}$.

Бінарні зображення I_E, I_T вважаються подібними, якщо виконується умова [108]: $\Phi(I_E, I_T) \leq \Delta_{don}$, де Δ_{don} – максимально допустиме розходження.

Для визначення значення допустимого розходження Δ_{don} приймають, що максимально допустиме відхилення $\rho_{\max}^T$ лінійних розмірів по осях X та Y даного зображення не може перевищувати 10% мінімального лінійного розміру об'єкта $l_{\min}^E$ по осях X та Y у еталонного зображення. Тобто маємо

$$\rho_{\max}^T = \min(l_{\min}^X, l_{\min}^Y) \cdot 10\% = l_{\min}^E \cdot 10\% \quad (3.15)$$

Для подібності еталонного I_E і поточного I_T зображень допускається наявність відхилень (похибки) $\rho_{\max}^T$ по всьому контуру даного зображення I_T . Тоді максимально допустиме розходження можна визначити таким чином:

$$\Delta_{don} = P^E \cdot \rho_{\max}^T, \quad (3.16)$$

де P^E – периметр еталонного зображення.

У методі збігання площ S^E , S^T еталонного і поточного зображень (з врахуванням допустимого відхилення) є необхідним, але недостатнім для умов визначення їх подібності.

Нарешті, введено обмеження, що поточне зображення після проведення операцій попередньої обробки повинно поміщатися в рамках квадрата $n \times n$, де $n < N$.

При цьому є можливість виконання операції складання за модулем 2 паралельно для усіх одноіменних елементів квадратів, в яких одержані зображення I_E, I_T , шляхом їх "накладання" один на одного.

Для визначення подібності бінарних зображень I_E, I_T , відповідно описаній методиці, розроблено такий алгоритм:

1. Зображення I_E зсувається так, щоб лівий і верхній краї торкались країв квадрата.

2. Визначаються: площа S^E , периметр P^E , $l_{\min}^E$, $\rho_{\max}^T$ за виразом (3.15) та $\Delta_{\text{дон}}$ за виразом (3.16).

3. Визначаються координати крайніх точок зображень праворуч і знизу по відношенню лівого і верхнього країв квадрата відповідно. В результаті отримуємо значення проекції R_X^E та R_Y^E зображень I_E , по осях X та Y .

4. Після отриманого поточного зображення відбувається його зміщення за аналогією п.1.

5. Визначається: площа S^T , значення R_X^T , R_Y^T та ΔS , де $\Delta S = |S_E - S_T|$.

6. Виконується аналіз, якщо $\Delta S \leq \Delta_{\text{дон}}$, то процедура визначення збіжності продовжується (п.7), інакше виходить результат: "збіжність не виявлено".

7. Зображення "накладаються" так, щоб зміщеними виявились краї квадратів. Виконується операція $\oplus$ між еталонними (рис.3.13, а) та поточними (рис.3.13, б) однаковими елементами квадратів (рис.3.13, в).

8. Визначається $\Phi(I_E, I_T)$ – площа фігури, яка одержується після виконання операції $\oplus$ (рис.3.13, г).

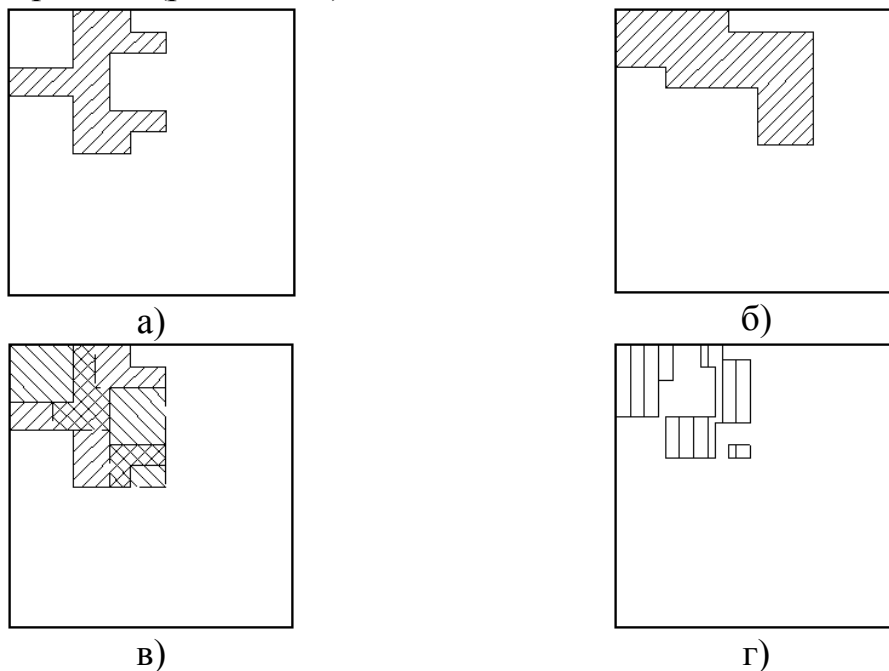


Рисунок 3.13 – а) еталонне зображення; б) поточне зображення;
в) накладання еталонного та поточного зображень;
г) ідентифікація зображення на ОЕ

9. Аналізується, якщо $\Phi(I_E, I_T) \leq \Delta_{\text{дон}}$, то збіжність зображень I_E, I_T встановлено, інакше процедура продовжується (п.10).

10. Виконується порівняння R_X^E та R_Y^E . Оскільки максимальне відхилення лінійних розмірів не може перевищувати $\rho_{\max}^T$, то якщо $|\delta_X| > 2\rho_{\max}^T$, $\delta_X = |R_X^E - R_X^T|$, отримуємо результат: "збіжність не виявлена", інакше задається значення покрокового зміщення по осі $X - \delta_X$. В залежності від значення δ_X визначається спосіб зміщення зображень: якщо $\delta_X = 0$, то зміщення не відбувається; якщо $\delta_X > 0$, то I_T зміщується праворуч; якщо $\delta_X < 0$, то I_E зміщується праворуч.

11. Аналогічні перетворювання, як в п.13, відбуваються, для R_Y^E, R_Y^T , тобто виходить: якщо $\delta_Y = 0$, то зміщення не відбувається; якщо $\delta_Y > 0$, то I_T зміщується вниз; якщо $\delta_Y < 0$, то I_E зміщується вниз.

12. Покроково, на величину прийнятої дискрети, зображення зміщуються праворуч і вниз по чергові (в залежності від значень δ_X, δ_Y). Після кожного зміщення відбувається перетворення по пп.7, 8, 9. Процедура закінчується, якщо на якому-небудь кроці буде визначена збіжність зображень, або, якщо зміщення досягнуть значень δ_X, δ_Y .

13. Процедура закінчується, якщо ні одна з вищеописаних дій не приведе до виявлення збіжності.

3.6. Висновки

1. Основним здобутком розділу є розробка ОЕІС – операційного екрана для оптоелектронного процесора розрядних перерізів, такі ОЕІС забезпечують виконання функції пам'яті, вхідної логіки оптоелектронного процесора та функції оптично керованих транспарантів у одному пристрої – ОЕ, що дало можливість обробляти багатоградацийні зображення по розрядних перерізах.

2. Запропоновано ОЕ, який виконує операції введення-виведення зображень в ОЕ як по оптоволоконному шлейфу, так і за допомогою волст-рону, що збільшує багатфункціональність пристрою.

3. Запропоновано і розроблено пристрій з'єднання ОЕ між собою у оптоелектронному процесорі за допомогою розеток та оптоволоконного шлейфу, що дало можливість паралельного введення-виведення інформації в ОЕ.

4. Запропоновано метод ідентифікації об'єктів на ОЕ, що дозволяє системам технічного зору виявляти дефекти у контрольованих об'єктах.

3.7. Контрольні запитання

1. Яка структура цифрового оптоелектронного процесора попарного сортування даних?
2. Зобразіть схему розташування розрядних перерізів багатоградаційного зображення.
3. Що таке оптично-керований транспарант?
4. Структурна схема квантрона.
5. Які основні типи загасань потрібно враховувати при стикуванні двох оптичних волокон?
6. Чим ідентифікація відрізняється від розпізнавання?
7. Що таке модульно-кореляційна функція?

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦІЙНОГО ЕКРАНА

Для ряду задач потрібні ОЕ у яких повинні бути точно витримані характеристики: часові, оптичні, електричні, габаритні, розрядні та довільні розміри самого екрана по кількості точок [109-112]. Створення ОЕ супроводжується складністю проектування топології, тому доцільно розглянути систему автоматизованого проектування (САПР) топології ОЕІС. На відміну від звичайних електронних інтегральних схем, для створення ОЕІС ми повинні використовувати спеціалізований САПР. Проведемо дослідження на основі запропонованих моделей.

4.1. Основні аспекти розробки компіляторів для оптоелектронних інтегральних схем

В сучасних системах обробки зображень виникла чітка тенденція переходу на оптоелектронну елементну базу. Це пов'язано з тим, що такі пристрої здатні обробляти зображення з швидкістю 10^{10} – 10^{15} біт/с [1-12]. На сучасному етапі в системах обробки зображень спостерігається повільне впровадження нових методів обробки зображень [113; 114]. Це звичайно пов'язано зі складностями проектування та виготовлення ЦОІС [115].

Одними із шляхів покращення ситуації є створення компіляторів. Оскільки більшість ЦОІС реалізуються на підкладках з GaAs, то назвемо такі компілятори арсенід-галієві.

Для створення АГК слід виконати аналіз інтегральної оптоелектронної елементної бази, розглянути які логічні операції можна виконувати і виявити які операції з обробки зображень можна реалізувати за допомогою АГК на ЦОІС [116].

Для більш чіткого означення області дослідження обмежимося створенням замовлених ЦОІС, де замовлені ЦОІС – технологічно закінчена одиниця; напівзамовлені ЦОІС – прилади, що являють собою програмовані логічні матриці.

Елементна база ЦОІС складається з пасивних та активних елементів. До пасивних елементів відносять: підкладку; хвилеводи; резонатори; ізолятори; дзеркала; фокусуючі елементи; елементи введення та виведення випромінювання; елементи з періодичною та аперіодичною структурами; атенюатори; комутатори.

Активні елементи: напівпровідникові лазери; фотоприймачі; електрооптичні модулятори; перемикачі Міллера; акустооптичні модулятори.

Для створення ЦОІС найбільш оптимально використовувати підкладки з монокристалів напівпровідникових сполучень $A^{III}B^V$, оскільки це єдиний клас матеріалів для підкладок на якому можна виготовити в інтегральному вигляді пасивні та активні елементи ЦОІС.

Будь-який оптоелектронний логічний елемент імпульсно-потенціального типу можна представити структурною схемою (рис.4.1) [117], де

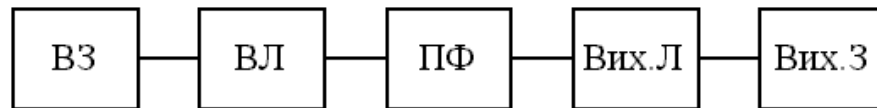


Рисунок 4.1 – Оптоелектронний логічний елемент:

ВЗ – входні зв’язки;

ВЛ – входна логіка;

ПФ – підсилювач–формував;

Вих. Л – вихідна логіка;

Вих. З – вихідний зв’язок

Функціонально-логічне призначення схеми відображається у ВЛ. Синхронізація може бути як оптичною, так і електричною.

Реалізація найпростіших функцій “НІ”, “І”, “АБО” достатньо проста. Хоча для побудови функціонально повного базису достатньо створення схем “І”/”І-НІ” чи “АБО”/”АБО-НІ”, можна використовувати схеми, які реалізують функції: “І-АБО” та $\oplus$.

Оскільки АГК, що розробляється, орієнтований для створення топології ЦОІС для обробки зображень, то виконаємо перелік операцій обробки зображень, які можна реалізувати на основі згаданих логічних функцій.

Як наводилось вище АГК перетворює входний опис у топологію ЦОІС. Під топологією розуміється вихідна інформація, яка достатньо детально описує топологічне креслення оригіналу фотошаблону.

Розглянемо основні складові АГК які потрібно створити: мову, архітектуру, бібліотечні елементи та генератор топології.

Мова. Потрібно виділити три аспекти: рівень абстракції; відповідність між мовними структурами і реалізацією; спеціальні оператори.

Мови програмування високого рівня допускають використання великої кількості набору типів даних та інструкцій. Занадто великий набір типів ускладнює ефективну апаратну реалізацію, а також виявляється що при розробці апаратури виникає велика кількість ситуацій, яка не розглядається в сучасних мовах програмування. Мови опису апаратури (HDL) най-

більш повно задовольняють ці специфічні вимоги. Вони більше походять на посередні описи, а не на мову опису високого рівня.

Архітектура. Такий термін використовується для означення загального опису базових елементів (модуляторів, лазерів, фотоприймачів і т.д.) їх взаємозв'язків (хвилеводів, провідників) та системи введення-виведення. Архітектура тісно пов'язана з вибором мови, оскільки логічно основа, яку вона забезпечує, повинна бути достатньо широкою для реалізації в ній будь-якого правильного опису.

Технологія. При втіленні будь-якої з перелічених операцій обробки зображення слід задатись технологією виготовлення оптоелектронної елементної бази. При виборі технології визначальними факторами є потужність розсіювання, швидкодія схеми та щільність упаковки елементів. Відомо про велику ступінь незалежності вхідних мов високого рівня та проміжних кодів від технології. Тому є цілком природно для генерації схем у різних технологіях змінювати залежні від технології секції компілятора.

Елементна база. Під елементною базою доцільно розуміти БАЕ. Такі БАЕ можуть представляти собою оптоелектронні елементи та їх з'єднання різного ступеня складності. При розробці БАЕ слід враховувати їх майбутні взаємозв'язки.

Генерація топології. Елементи найнижчого рівня виконуються користувачами АГК. Такі елементи описують в топологічних мовах і заносять в бібліотеку. Маючи повний опис апаратних елементів схеми і їх зв'язків необхідно згенерувати топологію автоматично. При використанні АГК необхідно вибрати метод компонування базових елементів. При цьому метод компонування за основні критерії повинен приймати: мінімально спрощену структуру міжз'єднань та зручне розташування входів-виходів ЦОІС.

4.2. Дослідження параметрів ОЕІС з оптичними комутаторами

Оптоелектронні засоби перетворення та відображення інформації, маючи такі характеристики як висока роздільна здатність, швидкодія, можливість переробки і відтворення кольорових зображень, без необхідності проміжних джерел збереження інформації, вважаються одними з найбільш перспективних при обробці зображень у реальному часі [113].

Призначення ОЕ – відображення інформації (рис.4.2). На основі ОЕ авторами запропоновано пристрій з додатковими функціями – масштабування та поворот зображення. Його реалізація можлива на основі ІСОК (рис.4.3).



Рисунок 4.2 – Операційний екран

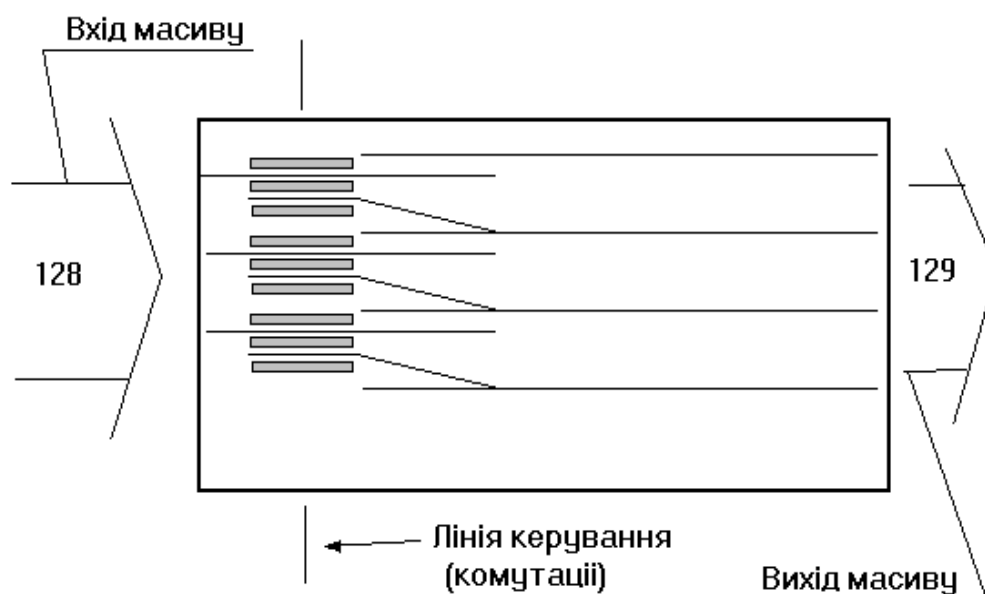


Рисунок 4.3 – Інтегральна схема оптичних комутаторів

Алгоритм операції масштабування такий: операційний екран зсуває кожний рядок або стовпець в буфер з якого вони потрапляють на ІСОК. ІСОК виконує такі функції: пропускання рядка або стовпця без змін, зсув частини елементів масиву на одну комірку вправо або вліво з роздвоєнням або видаленням елементів відповідно до алгоритму масштабування. Точки які роздвоюються або знищуються в алгоритмі масштабування називають-

ся критичними. При коефіцієнті масштабування $2 > a > 1$ критична точка (Δ) -

$$\text{го рангу } (\Delta = 1, 2, \dots) \text{ визначається } x_{kp}^{\Delta} = \text{ent} \left(\frac{\Delta + \frac{a}{2}}{a - 1} \right), \text{ де } a -$$

коефіцієнт масштабування.

Критична точка нульового рангу для $a > 2$ – це точка з координатою $x=0$. А критичні точки кожного наступного рангу при цьому дорівнюють значенню кожної наступної координати, оскільки будь-яка наступна точка як мінімум подвоюється. При цілочисельних значеннях коефіцієнтів a вирази для $\Delta(x)$ приймають вигляд:

для парних a :

$$\Delta(x) = x(a - 1) - \frac{a}{2}, \quad (4.1)$$

для непарних a :

$$\Delta x = x(a - 1) - \frac{a - 1}{2}, \quad (4.2)$$

Якщо $0 < a < 1$, то величина приросту складає від'ємну величину в відповідності з

$$x(a - 1) - \frac{a}{2} \leq x_0 - x < x(a - 1) + \frac{a}{2}, \quad (4.3)$$

критична точка нульового рангу визначається з першої частини нерівності (4.3) та дорівнює

$$x_{kp}^0 \dots = -\text{ent} \left(\frac{a}{2(a - 1)} \right), \quad (4.4)$$

На основі пристрою пропонується реалізовувати операції повороту зображення. Дослідження системи показують, що повернення радіус-вектора точки на заданий кут a можливо здійснити таким чином: вихідну точку A зсунути вздовж осі X на величину, пропорційну добутку значення ординати точки A та тангенсу кута повороту.

Отримана проекція на вісь OX масштабується з коефіцієнтом масштабування $K_{xm} = \cos(a)$. Отримана проміжна точка AI зсувається з координатою $AI((x + y \tan(a)) \cos(a), y)$ зсувається вздовж осі OY на величину добутку значення абсциси точки $A(x, y)$ та тангенса кута повороту. Отримана проекція радіус-вектора на вісь OY масштабується з коефіцієнтом масштабування $K_{ym} = \sin(a)$. Масштабування проекцій в першому випадку робиться

відносно точки y , а в іншому випадку – відносно $(x+y\operatorname{tg}(a))\cos(a)$. Практично цей спосіб можливо реалізувати на ОЕ який повинен здійснювати функцію зсуву на ІСОК.

Оптичні хвилеводи формуються на Z -розрізі електрооптичного кристала LiNbO_3 , за схемою (рис.4.4) [114; 115; 118]. Довжина ділянки зв'язку L вибирається з умови:

$$xL = \frac{\pi}{2}, \quad (4.5)$$

де x – коефіцієнт зв'язку.

Вона забезпечує повний перехід потужності в хвилевід 2 (стан “ТАК”) при умові $\Delta\beta = 0$, яка для ідентичних хвилеводів виконується при відсутності напруги на електродах. Стан “НІ” досягається при подачі такої напруги U на електроди, при якій:

$$L\Delta\beta = \pi\sqrt{3}. \quad (4.6)$$

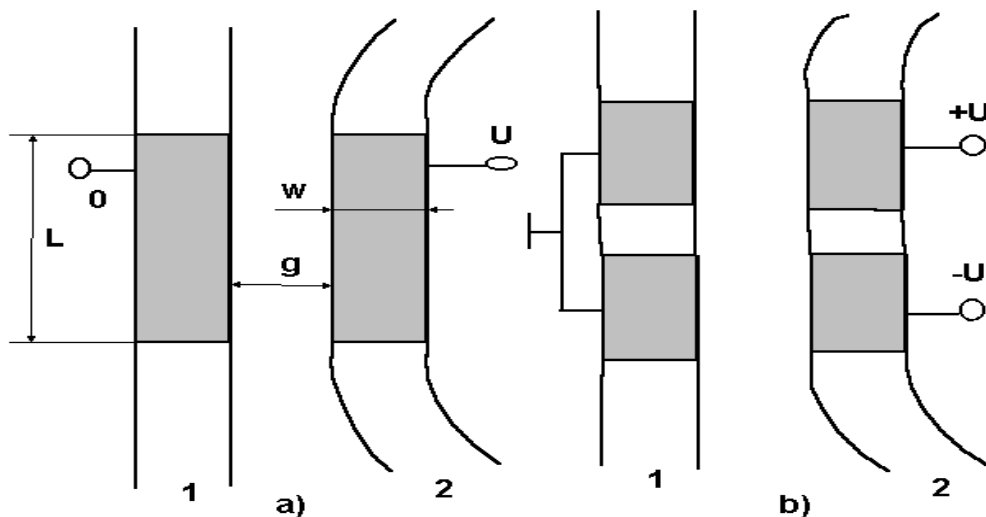


Рисунок 4.4 – Комутаційні елементи на направлених відгажувачах

Для ТМ-моди [119]:

$$|\Delta\beta| = \frac{2\pi}{\lambda} p n_e^3 r_{33} \frac{U}{g}, \quad (4.7)$$

де r_{33} – робоча компонента тензора електрооптичних коефіцієнтів;

$0 < p < 1$ – коефіцієнт перекриття між прикладеним електричним полем та полем світлової хвилі;

λ – довжина світла у вакуумі;

n_e – показник заломлення для незвичайної хвилі.

Недоліком такого КЕ є високі вимоги до технології виготовлення.

В якості ІСОК пропонується використовувати оптичну схему направлених розгалужувачів, керованих електричною напругою (рис.4.4). При розрахунках секціонованих електродів на основі LiNbO_3 ($n_1=2.072$) шляхом дифузії Ti ($n_2=2.21$) та обмежених розрідженим повітряним прошарком ($n_3=1$) була підтверджена можливість виготовлення на сучасному етапі. На основі цих хвилеводів шириною 2 мкм для робочої довжини хвилі 0.63 мкм створений КЕ з довжиною зв'язку 6,61609 мм, напругою переключення 12 В та міжхвилеводною відстанню 2.3 мкм. Оптимальна розрядність пристрою – 128. Вона вибрана з урахуванням кількості виводів керування. При розрахунку енергії переключення ($W=4.87\text{мкВт}$) для одного КЕ міжхвилеводна відстань у 2,3 мкм дозволяє формування мідних електродів $6616 \times 1,8 \times 2,2$ мкм. При виготовленні такої інтегральної схеми оптичних комутаторів розміри кристала будуть $16,71 \times 13,52$ мм [120].

4.3. Дослідження характеристик приладу паралельного передавання даних по оптоволоконному світловодному джгуту.

На основі розробленої топології створена функціональна схема заміщення (рис.4.5). Її робота була промодельована у пакеті *CircuitMaker 5* (рис.4.6).

В результаті розробки ОЕІС для ЦОЕП було визначено, що для сучасного розвитку мікроелектроніки можна виготовляти ОЕІС з розрядністю 32×32 точки, розміри кристалу підкладки для одноплощинної ОЕІС $59,15 \times 56,05$ мм [121; 122], робочі напруги 2,5 В, 5 В та -5 В, потужність споживання інтегральної схеми 36 Вт, тактова частота синхронізації 30 МГц, робоча довжина хвилі 0,8...1 мкм.

Для багатоплощинної ОЕІС з розрядністю 32×32 точки, розміри кристала підкладки ОЕІС $24,75 \times 24,75$ мкм, робочі напруги 2,5 В, 5 В та -5 В, потужність споживання інтегральної схеми 40 Вт, тактова частота синхронізації 25 МГц [123], робоча довжина хвилі 0,8...1 мкм.

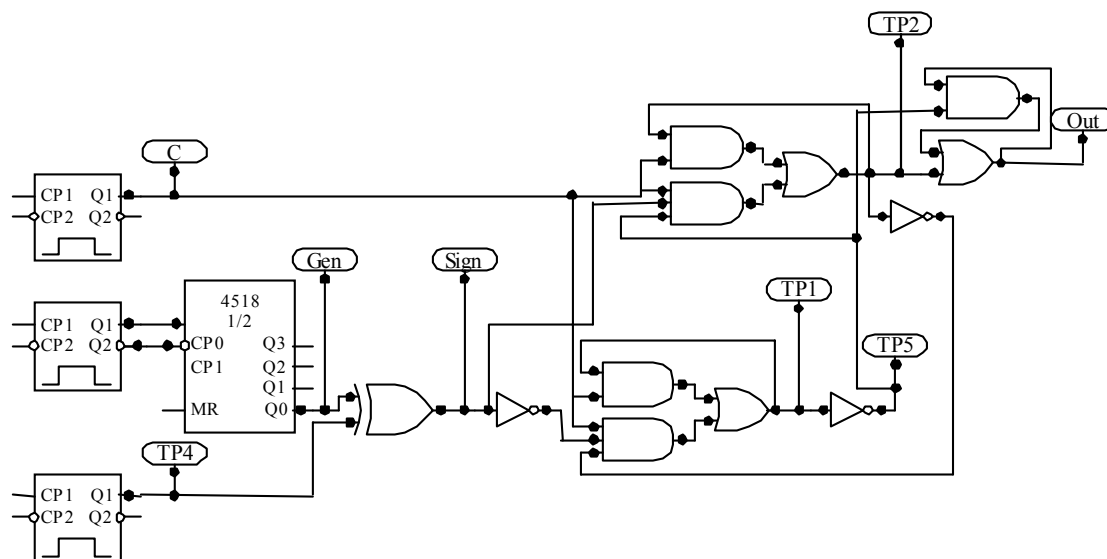


Рисунок 4.5 – Функціональна схема заміщення комірки

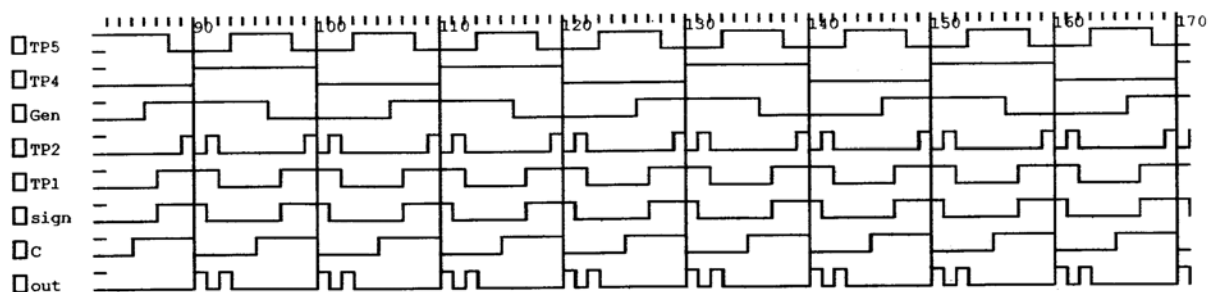


Рисунок 4.6 – Часові діаграми роботи комірки

Для практичного дослідження системи (рис.2.7) було взято такі промислово-випускані основні елементи [124-127]:

Волстрон, з робочими характеристиками [128; 129;]:

- щільність – 8 волокон/мм;
- довжина джгута – 0,4 м;
- тип волокон – багатомодові;
- показник заломлення – 1,52;
- функція профілю показника заломлення – градієнтна;
- діаметри серцевини та оболонки – 50/125 мкм.

Масив СВД, MHR38A8 (*SunLED*) з робочими характеристиками [130, 131]:

- розрядність 16×16 ;
- діаграма направленості комірок: $\theta_{\parallel}=50^{\circ}$; $\theta_{\perp}=60^{\circ}$.
- період розташування випромінювальних елементів – 500 мкм.

Масив ФД, МФ-16А з робочими характеристиками [132] (рис.4.7):

- розрядність - 32×32 ;
- вольтова чутливість 3×10^9 В/Дж;

- токова чутливість $7,2 \times 10^7$ А/Дж;
- поріг чутливості $5..7 \times 10^{-13}$ Дж/ком.;
- час зберігання інформації – 200 мкс.

При передачі даних між окремими комірками було досягнуто таких значень рівнів оптичних сигналів: “логічної одиниці”:

- потужність випромінення комірки: 0,04 мВт;
- робочий струм фотоприймача: 3 нА;
- та “нуля”:
- потужність випромінення комірки: 0,055 мВт;
- робочий струм фотоприймача: 1,2 мА.

4.4. Дослідження енергетичного балансу шини передачі даних

Для визначення оптимального робочого режиму роботи пристрою паралельного передавання використаємо запропоновану математичну модель підрахунку рівня потужності сигналу (2.16), який падає на фотоприймач. Проведемо числові розрахунки, для підтвердження коректності моделі. Для спрощення та наглядності проведемо оцінку загасання окремо.

Для оцінки загасання потрібно враховувати сумарний вплив [133]:

1. Загасання волокна.
2. Зовнішні втрати з'єднання.
 - 2.1. Радіальне неузгодження.
 - 2.2. Кутовий зсув осей.
 - 2.3. Децентрування конструктива.
 - 2.4. Наявність мікровиступів.
 - 2.5. Взаємна непаралельність поверхонь торців.
 - 2.6. Виникнення інтерференції світла в зазорі.
 - 2.7. Осьове зміщення.
 - 2.8. Неузгодженість діаметрів приймально-передавальних світловодних частин.
 - 2.8.1. При введенні випромінення у волокно.
 - 2.8.2. При виведенні випромінення із волокна.

Пункт 1; не враховуємо через невеликий відрізок волокна $\sim 0,3$ м (загасання волокна $\sim 0,2$ дБ/км) [134].

Пункт 2.1; загасання при радіальному неузгодженню при заданому діапазоні розходжень визначаємо за формулою [98] (рис.4.8):

$$L_r=0-2,5 \text{ мкм: } a_l = -\log \left[1 - \left(\frac{4}{\pi} \right) \times \right] \frac{L_r}{D_V}.$$

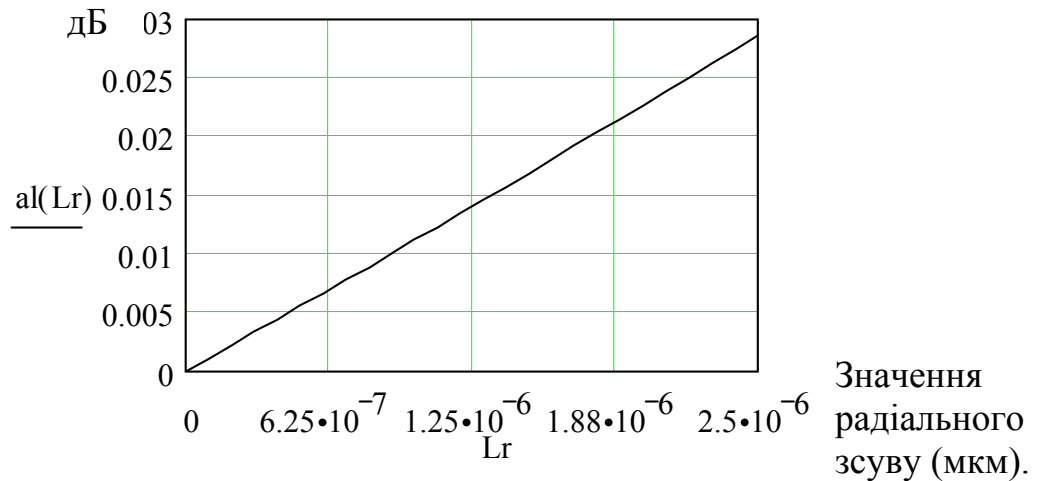


Рисунок 4.8 – Втрати при радіальному неузгодженні

Пункт 2.2; втрати при кутовому зсуві та заданому діапазоні розходжень ($\phi=0^\circ-3^\circ$, числова апертура $NA=0,2$) визначаємо за формулою [98]

(рис.4.9):
$$a_\sigma = -\log \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} \right) \times \left(\frac{\theta_\phi}{\arcsin(NA)} \right) \right].$$

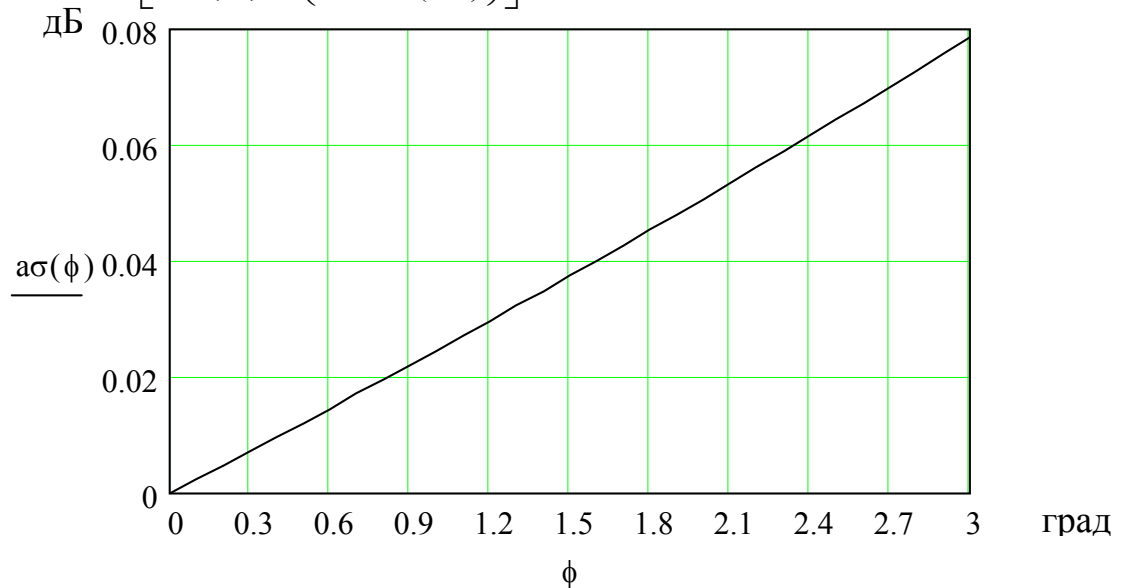


Рисунок 4.9 – Втрати при кутовому зсуві

Пункт 2.3; децентрування конструктива входить у діапазон розходжень у розрахунку радіального неузгодження.

Пункт 2.4; при наявності мікроступів значення втрат носить типовий характер та приводиться у літературі [98] і має вигляд (рис.4.10).

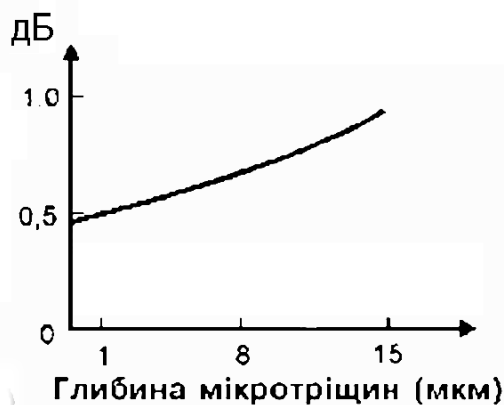


Рисунок 4.10 – Залежність рівня втрат від глибини мікротріщин

Пункт 2.5; взаємна непаралельність поверхонь торців входить у діапазон розходжень, у розрахунку кутового неузгодження.

Пункт 2.6; виникнення інтерференції світла в зазорі звичайно не враховується, тому що вносить незначні втрати ($\sim 0,01$ дБ) [10; 14; 98].

Пункт 2.7; осьове зміщення при заданому діапазоні розходжень ($S=0-0,5$ мм) знаходиться за формулою [98], а графічно залежність зображена на рис.4.11:

$$a = 10 \times \log \left[\frac{1}{\left[1 + 2 \times \left(\frac{S}{D_V} \right) \times \operatorname{tg} \left(\arcsin \left[\frac{NA}{n_0} \right] \right) \right]} \right]^2.$$

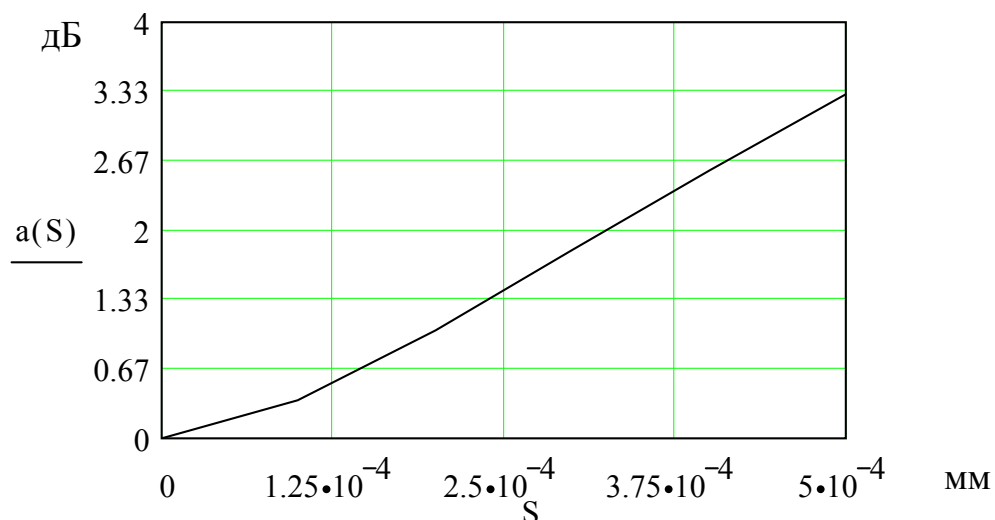


Рисунок 4.11 – Втрати при осьовому зміщенні

Пункт 2.8; неузгодженість діаметрів приймально-передавальних світловодних частин.

При введенні випромінювання у волокно (пункт 2.8.1) втрати визначаються за формулою: $a(r_{\text{fib}}) = 10 \times \log \left(\frac{r_{\text{fib}}}{r_{\text{led}}} \right)^2$, а графічна залежність представлена на рис.4.12.

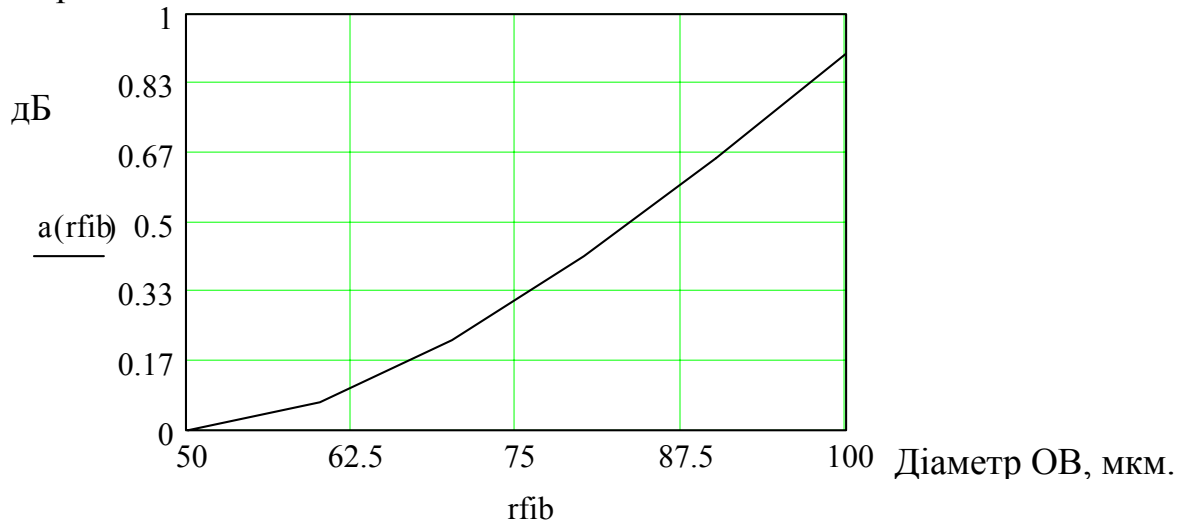


Рисунок 4.12 – Втрати при введенні випромінювання у світловод

При виведенні випромінювання із волокна (діаметр серцевини 50 мкм) (пункт 4.11), втрати визначаються за формулою $a(r_{\text{ph}}) = 10 \times \log \left(\frac{r_{\text{ph}}}{r_{\text{fib}}} \right)^2$, а графічну залежність приведено на рис.4.13.

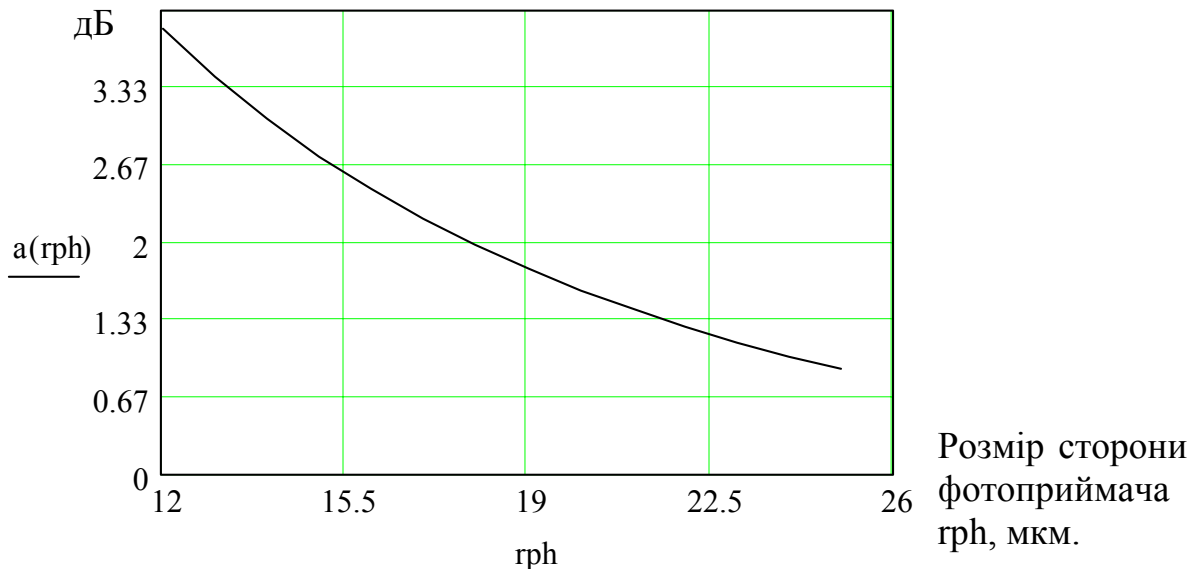


Рисунок 4.13 – Втрати при виведенні випромінювання із світловода

Визначаємо порядок загальних втрат A за формулою:

$$A = a_l(L_r) + a_\sigma(\phi) + a_{\text{mikr}} + a_{\text{interf}} + a(S) + a(r_{\text{fib}}) + a(r_{\text{ph}}).$$

Підставивши числові значення, отримаємо:

$$A=0,01+0,04+0,5+0,01+1,33+0,33+2=4,22 \text{ дБ.}$$

Для окремої пари передавач-приймач (за формулою (2.16)) отримуємо: щоб досягнути необхідного фотоструму на окремому ФД з урахуванням (2.16), рівня фотоструму, який відповідає “логічному нулю” на відповідному ФД, потужність випромінювання СВД повинна бути у межах від 0 мВт до 0,03 мВт.

Для досягнення необхідного фотоструму на окремому ФД з урахуванням (2.16), рівня фотоструму, який відповідає “логічній одиниці”, потужність випромінювання, відповідного для ФД, СВД повинна бути у межах від 0,2 мВт до 0,5 мВт [135], робоча формула (2.16).

Розрахуємо робочий струм світлодіода.

Вихідні дані:

- робоча довжина хвилі, нм	850
- тип волокна – багатомодове	50/125
- показник заломлення, n_1	1,46
- відносна різниця показників заломлення, Δn	1,25
- числова апертура, NA	0,2
- довжина волокна, L , см	20

- кількість стиків	4
- відстань в зазорі, S , мкм	40
- допуск, %	5-10

Характеристики фотоприймача:

- тип фотоприймача (InGaAs)	p-i-n
- струмова чутливість, S_{ph} , А/Вт	0,8
- темновий струм, нА	0,1-3

Розрахунок необхідної потужності опромінення фотоприймача для отримання робочого струму $I_p=1\text{мА}$:

$$p_\lambda = \frac{I_p}{S_{ph}} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$$

Загальний рівень втрат на з'єднання з урахуванням кількості з'єднань (4) $A=4,22$.

Розрахунок необхідної потужності на вході у волокно з урахуванням втрат на з'єднання (втрати на загасання сигналу в волокні не враховуються через малу довжину волокна):

$$p_i = \frac{p_\lambda}{10^{\frac{A}{10}}} = 3,303 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$$

Розрахунок робочого струму світлодіода I_d для забезпечення вище зазначеної потужності p_i :

Квантова ефективність $\eta=0,3$;

Напруга живлення $U=5\text{В}$.

$$I_d = \frac{\left(\frac{p_i}{\eta}\right)}{U} = 2,202 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

При порівнянні робочих потужностей випромінювання СВД для досягнення робочих струмів видно, що розрахунковий діапазон потужностей має відхилення на 20% від експериментального.

4.5. Розробка топології ОЕІС

Компонування ОЕІС можна виконувати таким чином: вибираємо кількість площин, у яких будуть розміщуватися елементи та виконуємо компонування та розведення провідників та хвилеводів.

При виборі розташування елементів комірки у декількох площинах, наприклад за функціональним призначенням, ескізи топології зображені на рис. 4.14. та рис. 4.15.

Для варіанта з компонуванням в одній площині ескіз топології комірки зображений на рис 4.16.

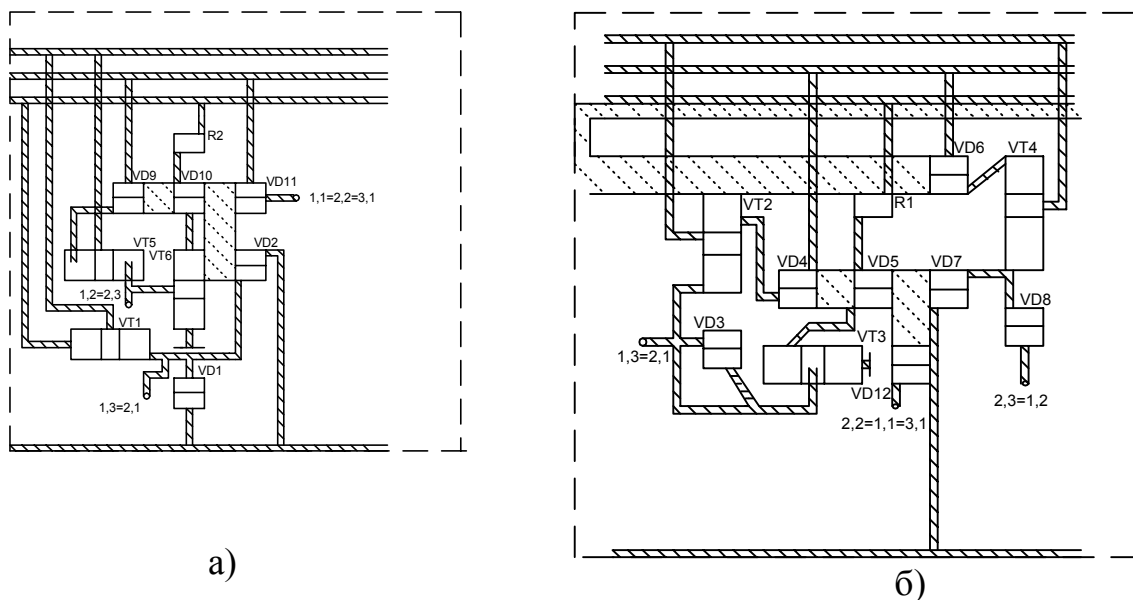


Рисунок 4.14 – Ескіз топології багатоплощинної ОЕІС: а) шар 1;
б) шар 2

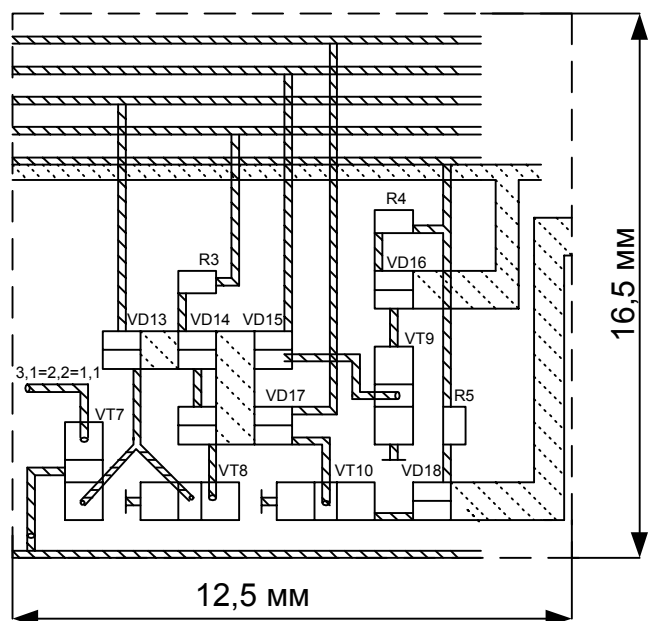


Рисунок 4.15 – Ескіз топології багатоплощинної ОЕІС, шар 3

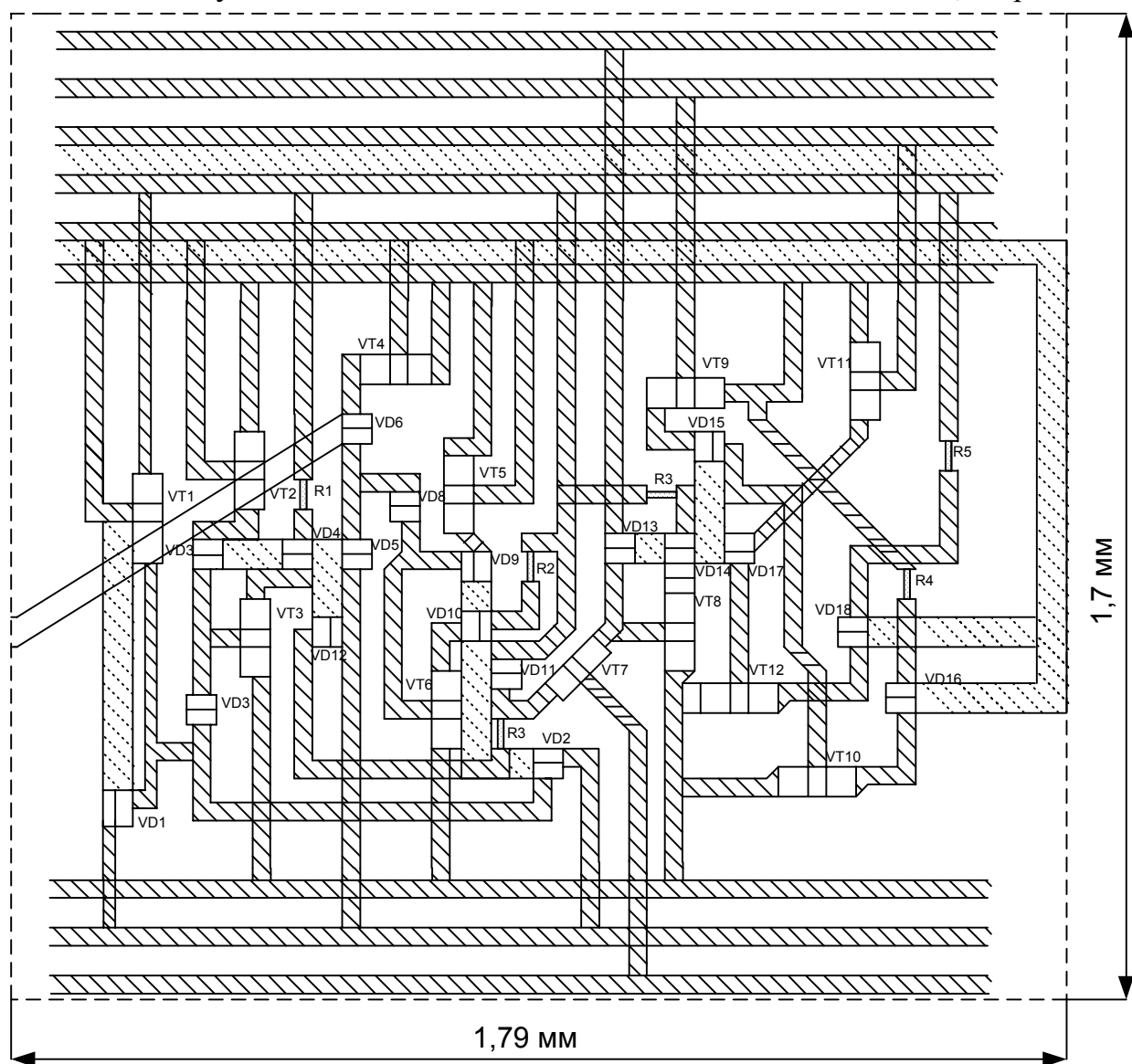


Рисунок 4.16 – Ескіз топології комірки одноплощинної ОЕІС

4.6. Визначення вимог та рекомендацій до приладу паралельного передання даних по ВОЛЗ у цифровому оптоелектронному процесорі

Для виготовлення ОЕІС з необхідними параметрами слід забезпечити відповідність таким вимогам:

для одноплощинної ОЕІС (розміри не більше) [136, 137]:

- СВД 20×20 мкм [138];
- ФД 20×20 мкм;
- транзистори 50×20 мкм;
- резистори 10×20 мкм;
- діоди 20×20 мкм;
- контактні площадки 20×20 мкм;
- провідники до ФД 3 мкм, до СВД 5 мкм;
- хвилеводи 20×20 мкм;
- відстані між

хвилевід-хвилевід 20 мкм;

електричний провідник-електричний провідник 10 мкм;

електричний провідник-елемент 20 мкм.

для багатоплощинної ОЕІС

- СВД 30×30 мкм [139];
- ФД 30×30 мкм;
- транзистори 50×20 мкм;
- резистори 10×20 мкм;
- діоди 20×20 мкм;
- контактні площадки 20×20 мкм;
- провідники до ФД 3 мкм, до СВД 5 мкм;
- хвилеводи 20×20 мкм;
- відстані між

хвилевід-хвилевід 20 мкм;

електричний провідник-електричний провідник 10 мкм;

електричний провідник-елемент 20 мкм.

4.7. Висновки

1. Визначено вимоги та рекомендації до ОЕІС для їх промислового використання, завдяки чому спрощується розробка нових оптоелектронних систем у інтегральному виконанні.

2. Визначено основні вимоги та рекомендації до створення арсенід-галієвого компілятора для створення системи автоматизованого проектування (САПР) ОЕІС, який (САПР) полегшує проектування нових ОЕІС.

3. Сформульовані вимоги до ОЕІС для їх сумісного використання з ОК, що дозволяє розширити кількість задач обробки зображень на ОЕІС.

4. Проведено експеримент на аналогах масивів СВД та ФД і волстро-ну, що показав відхилення значень потужності логічних рівнів оптичних сигналів на 20% у порівнянні з числовим розрахунком характеристик паралельного передання та сприйняття оптичної інформації ОЕІС.

4.8. Контрольні запитання

1. Що таке САПР топології ОЕІС?
2. Що таке кремнієвий компілятор? Чим арсенід-галієвий компілятор відрізняється від кремнієвого?
3. Які основні типи оптичних комутаторів ви знаєте?
4. Що таке волзтрон?
5. Якими технологічними показниками обмежуються розміри кристала ОЕІС при її виготовленні?
6. Які існують основні фізичні ефекти комутації оптичного випромінювання?

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ВЕБ-САЙТИ ВІДОМИХ ВИРОБНИКІВ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

Таблиця А.

№	Назва	Веб-адреса
1.	AESP Inc.	www.aesp.ru
2.	3Com	www.3com.ru
3.	ADP NetWorks	www.adp.ru
4.	Agilent technology	www.agilent.com
5.	Alcatel	www.usa.alcatel.com
6.	Allied Telesyn International - North America	www.alliedtelesyn.com
7.	AMP	www.amp.com
8.	Analog devices	www.analog.com
9.	Anritsu	www.eu.anritsu.com
10.	APC	www.apc.com
11.	ARM	www.gaw.ru
12.	ASA	koi.asa.ru
13.	Atmel	www.atmel.com
14.	ATS-SD	www.atcsd.neva.ru
15.	Barr associates Inc.	www.barrassociates.com
16.	Bell Labs Innovations	www.bell-labs.com
17.	Boston Optical Fiber Inc.	www.piap.ch
18.	Bourns Inc.	www.bourns.com
19.	Cisco	www.cisco.com
20.	Clare	www.cpclare.com
21.	Coherent Inc.	www.coherentinc.com
22.	Fiberoptic	www.fiberoptic.nm.ru
23.	FTI-optronic	www.fti-optronic.com
24.	Gigabyte Technology	www.gigabyte.ru
25.	Hitachi semiconductor	www.halsp.hitachi.com
26.	HP	www.hp.com
27.	IMC Laser	www.imclaser.com
28.	Intel	www.intel.com
29.	International rectifier	www.irf.com
30.	Kingbright	www.kingbright.com
31.	Kodak FTP	ftp.kodak.com
32.	Laser Accents	www..com
33.	Laser Technologies Inc.	lasertechnologiesinc.com
34.	Laser-Laboratorium Göttingen e. V.	www.llg.gwdg.de
35.	LEMT	www.lemt.minsk.by

Продовження табл. А.

№	Назва	Веб-адреса
36.	Lightsearch.com	www.lightsearch.com
37.	Linear Technology	www.linear-tech.com
38.	MAXIM IC Analog	www.dalsemi.com
39.	Microtest Inc.	www.mbinfo.ru
40.	Motorola	www.motorola.com
41.	Murata electronics	www.murata.com
42.	Optel	www.optel.ru
43.	Philips Semiconductors	www.semiconductors.philips.com
44.	Pmc-Sierra	www.pmc-sierra.com
45.	Polyus	www.polyus.msk.ru
46.	Samsung electronics	www.samsungelectronics.com
47.	Sun-Led	www.sun-led.com
48.	Syrus systems	www.syrus.ru
49.	Texas Instruments	www.ti.com
50.	XBT Коммуникации	www.ixbt.com
51.	XILINX	www.xilinx.com
52.	Айвазовский оптико-механический завод	www.ncic.ru
53.	Вимком-оптик	vimcom.ru
54.	Группа компаний Телеком-Сервис ИТ: сети и кабельные системы	www.tls-group.ru
55.	Казанский оптико-механический завод	www.kcn.ru
56.	Лазерная ассоциация	laser.stu.neva.ru
57.	ОАО "Восход"	www.users.kaluga.ru

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кожемяко В.П. Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды. – Тбилиси: Мецниереба, 1984. – 357 с.
2. Свечников С.В., Кожемяко В.П., Тимченко Л.И. Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа. – К.: Наукова думка, 1987. – 256 с.
3. В. Кожемяко, О. Натрошвили Проблемы и перспективы построения интеллектуальных структур новых поколений с применением оптоэлектронной информационной технологии // Оптоелектронні інформаційні технології “Фотоніка-ОДС 2000”. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, м.Вінниця, 2-5 жовтня 2000 року. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 2000. – С.10-11.
4. V. Osinsky, Super high-speed optoelectronics: technological fundamentals and economics // In Selected Papers from the International Conference on Optoelectronic Information Technologies, Sergey V. Svechnicov, Volodymyr P. Kojemiako, Sergey Al. Kostyukevych, Editors, Processing of SPIE Vol. 4425, P.263-271 (2001).
5. Оптоэлектронные параллельные вычислительные устройства. Принципы построения и способы реализации / В.П. Кожемяко, О.Г. Натрошвили, Л.И. Тимченко, Г.Л. Лысенко, Д.О. Саникидзе, О.Т. Цинцадзе. Тбилиси: Мецниереба, 1985. – 245 с.
6. Оптоэлектронная схемотехника / Кожемяко В.П., Натрошвили О.Г., Мартынюк Т.Б., Имнашвили Л.И. – К.: УМК ВО, 1988. – 276 с.
7. Лисенко Г.Л. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1: Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 1998. – 127 с.

8. Свечников С.В., Свечников Г.С. Интегральная оптика. – К.: О-во “Знание” УССР, – 1987. – 48 с.
9. Свечников С.В. Элементы оптоэлектроники. М.: изд-во “Советское радио”, 1971. – 272 с.
10. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.
11. Смирнов А.Г. Квантовая электроника и оптоэлектроника. – Минск: ВШ, 1987. – 196 с.
12. Фрир Дж. Построение вычислительных систем на базе перспективных микропроцессоров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 413 с.
13. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники / Кожемяко В.П., Тимченко Л.И., Лысенко Г.Л., Кутаев Ю.Ф. – К.: УМК ВО, 1990. – 251 с.
14. Хансперджер Р. Интегральная оптика. Теория и технология: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
15. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 240 с.
16. Шарма Б.Л., Пурохит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы: Пер. с англ. – М.: Советское радио, 1979. – 232 с.
17. Осинский В.И., Привалов В.И., Тихоненко О.Я. Оптоэлектронные структуры на многокомпонентных полупроводниках. – Минск: Наука и техника, 1981. – 208 с.
18. Бутаков Е.А., Островский В.И., Фадеев И.Л. Обработка изображений на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.

19. Проектирование пульсирующих информационных решеток / Шмойлов В.И., Русын Б.П., Кузьо М.Н., Капший О.В. / Львов: Меркатор, 2000. – 101 с.
20. Верхаген К. Дёйн Р., Грун Ф., Йостен Й. Распознавание образов. Состояние и перспективы: Пер. с англ. – М.: РиС, 1985. – 104 с.
21. Пью А. Техническое зрение роботов: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
22. Грязин Г.Н. Оптикоэлектронные системы для обзора пространства. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
23. Заморин А.П., Мячев А.А., Селиванов Ю.П. Вычислительные машины, системы, комплексы. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.
24. Кочемасов В.Н., Долбня Е.В., Соболев Н.В. Акустоэлектронные фурье-процессоры. – М.: Радио и связь, 1987. – 168 с.
25. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 678 с.
26. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
27. Морозов В.Н. Оптоэлектронные матричные процессоры. – М.: Радио и связь, 1986. – 112 с.
28. СБИС для распознавания образов и обработки изображений / Под.ред. К.Фу. – М.: Мир, 1988. – 248 с.
29. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического усиления. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.
30. Алиев Т.М., Вигдоров Д.И., Кривошеев В.П. Системы отображения информации. – М.: Высшая школа, 1988. – 223 с.

31. Андрушко Л.М., Вознесенский В.А., Каток Б.В. Волоконно-оптические линии связи. Справочник. – К.: Техника, 1988. – 239 с.
32. Басс Ф.Г., Булгаков А.А., Тетервов А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
33. Бондаренко В.С., Зоренко В.П., Чкалова В.В. Акустооптические модуляторы света. – М.: Радио и связь, 1988. – 136 с.
34. Крутякова М.Г., Чарыков Н.А., Юдин В.В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
35. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – М: ВШ, 1987. – 480 с.
36. Ребрин Ю.К., Сидоров В.И. Оптические дефлекторы. – К.: Техника, 1988. – 136 с.
37. Электрооптические дефлекторы света / Гриб Б.Н., Кондиленко И.И., Коротков П.А., Цященко Ю.П. – К.: Техника, 1980. – 208 с.
38. Яцишин В.И., Бурдукова С.С. Полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы. – Харьков: ВШ, 1985. – 230 с.
39. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. – М.: Высш. Шк., 1988. – 237 с.
40. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
41. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1989. – 232 с.
42. Грицык В.В. Распараллеливание алгоритмов информации в системах реального времени / АН УССР. Физико-механический ин-т. – К.: Наукова думка, 1981. – 216 с.

43. Заболотная Н.И. Шолота В.В., Зволейко А. В. Реализация обращения матриц на структуре параллельного умножителя картин-изображений // III Всеукраїнська міжнародна конференція з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів "УКРОБРАЗ-96". - Київ: Видання Української асоціації з оброблення інформації та розпізнавання образів. – 1996. – С. 230–231.

44. Катус Г.П. Восприятие и анализ оптической информации автоматической системой. – М.: Машиностроение, 1986. – 416 с.

45. Кейсент Д. Оптическая обработка информации: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 349 с.

46. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображения. – М.: Радио и связь, 1986. – 248 с.

47. Кузьмин И.В., Стащенко А.А. Специализированный процессор для обработки изображений // Материалы II Всесоюзной научно-технической конференции по функциональной оптоэлектронике. – Винница-Тбилиси: Издательство Грузинского политехнического института. – 1987. – С. 484–486.

48. Мартинес Ф. Синтез изображений. Принципы, аппаратное и программное обеспечение: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1990. – 192 с.

49. Молчанов А.А., Шарадкин А.М. Дискретизация информационных сигналов. – К.: Выща школа, 1990. – 158 с.

50. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Чепорнюк С.В., Савалюк І.М., Стецюра О.Г. Оптико-електронний метод визначення координат центру спроектованого об'єкта // IV Всеукраїнська міжнародна конференція з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів "УКРОБРАЗ-98". –

Київ: Видання Української асоціації з оброблення інформації та розпізнавання образів. – 1998. – С. 177–180.

51. Азаров О.Д., Томчук М.А. Аналого-цифрове перетворення в задачах наукових досліджень // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький). – 1999. – №3 – С.88–101.

52. Парыгин В.Н., Балакший В.И. Оптическая обработка информации. – М.: Издат. Моск. Универс., 1987. – 142 с.

53. Стюард И.Г. Введение в фурье-оптику: Пер. с англ. –М.: Мир, 1985. – 182 с.

54. Техническое зрение роботов / В.И. Мошин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков / Под ред. Ю.Г Якушенкова. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

55. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи и измерения. – М.: Сайрус-системз, 1999. – 671 с.

56. Christophe Gorecki, Bertrand Trolard. Optoelectronic implementation of adaptive image preprocessing using hybrid modulations of Epson liquid crystal television – applications to smoothing and edge enhancement. Optical Engineering, // SPIE.–1998,– vol. 37, №3.– P.924–930.

57. Hongmei Sing, Liren Liu, Huiquan Chend, Lan Shao. Morphological ordered grad-scale erosion for optical image processing. Optical Engineering.// SPIE.– 1998, –vol. 37, №6.–P.1732–1739.

58. Beningo Rodriguez, Alfredo Dubra, Carlos Martinez, Gonzalo Escuder, Joze A. Ferrari. Nonlinear joint transform correlator using one-dimensional Fourier transformation. Optical Engineering, // SPIE.–1998, –vol. 37, №10.– P.2742–2747.

59. S. Berezhna, I. Berezhnyy, M. Takashi, A. Voloshin Accuracy of whole-field mapping by Jones matrix Fourier photopolarimeter // Optoelectronic and Hybrid Optical / Digital System for Image and Signal Processing. –1999 Lviv, – P. 81–89.

60. V. Valkovskii, T. Farid, On realization of cellular automata technique by means of optoelectronic devices // In Selected Papers from the International Conference on Optoelectronic Information Technologies, Sergey V. Svechnikov, Volodymyr P. Kojemiako, Sergey Al. Kostyukevych, Editors, Processing of SPIE Vol. 4425, P. 391-397 (2001).

61. Weiming Ren, Yalei Wang, Hao Zhu, Peimao Sun. Online fast measurement of section sizes of three-dimensional objects using binary image analysis. Optical Engineering, // SPIE. – 1998, – vol. 37, №6. – P. 1740–1745.

62. Ignacio Moreno, Juan Campos, Mfria J. Yzuel, Vitaly Koder. Implementation of bipolar real-valued input scenes in a real-time optical correlator: application to color pattern recognition. Optical Engineering, // SPIE. – 1998, – vol. 37, №1. – P.144–150.

63. Jianpring Yao, Gug Lebreton Invariant pattern recognition: smart algorithms for segmented two-dimensional patterns with an axis of symmetry // OE. –1999, –Vol. 38, – 12, – P. 2022–2028.

64. Alessandro Barducci, Ivan Pippi Object recognition by edge analysis: a case study // OE. –1992, –Vol. 38, –2, –P. 284– 294.

65. Кожем'яко В.П., Понура О.І., Сачанюк Н.В. Реалізація КВП-перетворень в технічних засобах око-процесорного типу схемах // Вісник Державного університету "Львівська політехніка". Елементи теорії та практики твердотілої електроніки. – 2000. №393. – С. 68–78.

66. Hitoshi Saji, Hiromasa Nakatani. Energy – minimization-basest approach to image modification for assembling subpictures. Optical Engineering, // SPIE. –1998, –vol. 37, №3.– P.984–988.

67. Andre Marion. Discovery of inscriptions on the shroud of Turin by digital image processing. Optical Engineering.// SPIE. –1998, –vol. 37, №8. – P.2308–2313.

68. Jurden Begerer, Fernando Puente Leon. Adaptive separation of random line and background. Optical Engineering. // SPIE.–1998, – vol. 37, №10. – P.2733–2741.

69. Мартинюк Т.Б. Рекурсивні алгоритми багатооперандної обробки інформації: Монографія. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 2000. – 216 с.

70. Мартинюк Т.Б. Асоціативна обробка чисел з використанням зрізів різниць // Вісник ВПІ. – 1999. – №4. – С. 40–43.

71. Мартинюк Т.Б. Алгоритм многооперандного суммирования чисел для систолических структур // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Приборостроение-98”. – Винница-Симеиз: Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – С. 170–174.

72. Мартинюк Т.Б. Використання зрізів різниць для багатооперандного додавання числових величини // Вісник ВПІ. – 1998. – №2. – С. 55–59.

73. T. Martyniuk, T. Vasilyeva, V. A. Suprigan, M. Al-Heyari, Features of sorting memory realization // In Selected Papers from the International Conference on Optoelectronic Information Technologies, Sergey V. Svechnicov, Volodymyr P. Kojemiako, Sergey Al. Kostyukevych, Editors, Processing of SPIE Vol. 4425, P.89-91 (2001).

74. Martyniuk T.B. Structure of Assosiative Processor with Bitwise Serial Processing of Data // Engeneering Simulation. – 1997. – Vol. 14. – P.383–389.

75. Мартынюк Т.Б. Разработка методов построения и исследование схемотехники вычислительных сред логико-временного типа: Автореф. дис... канд. техн наук: 05.13.05 / Грузинский политехнический ин-т. – Тбилиси, 1987. – 20 с.

76. Алексеенко А.Г. Основы микросхемотехники. – М.: Советское радио, 1977. – 408 с.

77. Бебчук Л.Г., Богачев Ю.В., Заказнов Н.Р. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.

78. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 527 с.

79. Гуляев Ю.В., Меш М.Я., Проклов В.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. – М.: РиС, 1991. – 152 с.

80. Ефимов И.Е., Козырь И.Я. Основы микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1983. – 384 с.

81. Мейзда Ф. Интегральные схемы. Технология и применения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 280 с.

82. Оптические свойства полупроводников. Справочник. / Гавриленко В.И., Грехов А.М., Корбутяк Д.В., Литовченко В.Г. – К.: Наукова думка, 1987. – 607 с.

83. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. – М.: Высшая школа, 1984. – 352 с.

84. Николаев И.М., Филинюк Н.А. Интегральные микросхемы и основы их проектирования: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1992. – 424 с.

85. Время-импульсные вычислительные устройства / Смоллов В.Б., Угрюмов Е.П., Артамонов А.Б. Герасимов А.В., Мурсаев А.Х., Никитенко

С.Г./ Под ред. Смолова В.Б., Угрюмова Е.П. – М.: Радио и связь, 1983. – 288 с.

86. Лосев О.В. Телефония и телеграфия без проводов. – М.: Сов. Радио, 1922. – Т.14. – 240 с.

87. Бонч-Бруевич М.А. Телефония и телеграфия без проводов. – М.: Сов. Радио, 1928. – Т.50. – 188 с.

88. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая Школа, 1972. – 376 с.

89. Филинюк Н.А. Основы анализа и синтеза информационных устройств на базе инжекционно-пролетных эффектов: Дис... докт. техн. наук: 05.13.05. – К., 1983.

90. Молчанов П.А. Теорія нелінійних транзисторних негатронів для пристроїв систем керування: Дис... докт. техн. наук: 05.13.05. – Вінниця, 1998. – 292 с.

91. P. Molchanov, V. Checkotun, P. Mulyar, O. Linnyk Microwave processing of optical signals by the circuits with negative resistance // Оптико-електронні інформаційні технології “Фотоніка-ОДС 2000”. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, м.Вінниця, 2-5 жовтня 2000 року. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 2000. – С.33.

92. Evgeny R. Tsvetov Adaptive correlation image processing by collinear optical heterodyning with hologram lens scanning // Optoelectronic and Hybrid Optical / Digital System for Image and Signal Processing. –1999 Lviv, – P. 158–169.

93. Григорук В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика: Підручник – К.: “МП Леся”, 1997. – 480 с.

94. Мокин Б.И., Корбич Ю.А. Математические модели контроля и управления в энергетике. – К.: Техника, 1990. – 192 с.
95. Суэмацсу Я., Кисино К., Араи С., Кояма Ф. Полупроводниковые лазеры с распределенным отражателем, сохраняющие одномодовость в динамическом режиме // Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – С. 177–217.
96. Херман Й., Вильгельм Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов: Пер. с нем. – М.: Мир, 1986. – 386 с.
97. Xiaoyuan He, Daqing Zou, Sheng Liu, Yifan Gui. Phase-shifting analysis in moire interferometry and its applications in electronics packaging. // Optical Engineering. SPIE, –1998, –vol. 37, №5.–P.1410–1419.
98. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 1998. – 267 с.
99. Осадчук В.С., Носолюк В.М., Яремчук В.Ф. Дослідження впливу оптичного випромінювання на параметри р-п переходу // Вісник ВПІ. – 1996. – №3. – С. 63–65.
100. Богомоллов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК-систем. – М.: Радио и связь, 1987. – 208 с.
101. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
102. Грейсух Г.И., Ефименко И.М., Степанов С.А. Оптика градиентных и дифракционных элементов. – М.: Радио и связь, 1990. – 136 с.
103. Тарновський М.Г., Осадчук В.С., Осадчук О.В. Дослідження фотогальванічного ефекту у оптично керованому GaAs-ПТШ // Вісник ВПІ. – 1998. – №2. – С.109–116.

104. Козанне А., Флере Ж., Мэтр Г., Руссо М. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации: Пер. с франц. – М.: Мир, 1984. – 504 с.

105. Суприган В.А. Алгоритми пошуку та ідентифікації об'єктів на операційних екранах // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький). – 1999. – №3. – С. 121–125.

106. T. Farid, O. Riznyk, V. Valkovskii, D. Zerbino Some new possibilities of optoelectronic means // Оптоелектронні інформаційні технології “Фотоніка-ОДС 2000”. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, м.Вінниця, 2-5 жовтня 2000 року. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 2000. – С.78–79.

107. W.B.Spillman, Jr., D.R. Huston. Cellular automata for image analysis of damage in large structures. Optical Engineering, // SPIE. –1998, –vol. 37, №3.– P.898–903.

108. Taegeun Kim, Ting-Chung Poo Extraction of 3-D location of matched 3-D object using power fringe-adjusted filtering and Wigner analysis // OE. – 1999, –Vol. 38, – 12, –P. 2176–2183.

109. Ко́лье Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 686 с.

110. Носов Ю.Р. Волоконно-оптическая связь. – М.: Знание, 1990. – 64 с.

111. Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. / Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Хисихара Х., Кюма К., Хатаме К./ Под ред. Окоси Т. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

112. Окоси Т. Оптоэлектроника и оптическая связь: Пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 96 с.

113. Петрук В.Г. Оптичні методи та інтерактивні засоби контролю в діагностиці неоднорідних середовищ: Дис... докт. Техн. наук: 05.11.13. – Вінниця, 1998. – 390 с.

114. Петрук В.Г. Теоретичні основи оптичних методів вимірювань неоднорідних середовищ. Монографія. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 1997. – 340 с.

115. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки: Навчальний посібник. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 1999. – 245 с.

116. Hiroshi Kage, William T. Freeman, Yasunari Kyuma Artificial retina chips as on-chip image processors and gesture-oriented interfaces // OE. – 1999, –Vol. 38, –12, – P. 1979–1988.

117. Лысенко Г.Л. Разработка и исследование параллельных методов и средств предварительной обработки изображений логико-временного типа: Дис... канд. Техн. наук: 05.13.05. – К., 1990. – 333 с.

118. Циделко В.Д., Нагаец Н.В., Хохлов Ю.В. Проектирование микропроцессорных измерительных проборов и систем. – К.: УМК ВО, 1984. – 342 с.

119. Андрушко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 135 с.

120. Кузнецов В.А., Долгов В.А., Коневских В.М. и др. Справочник. Измерения в электронике. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.

121. Data Book.05.95. Optical Information Tehnology. / Siemens, 1995. – P. 266.

122. Data Book.04.95. Optical Information Tehnology. / Siemens, 1995. – P. 108.

123. Asoke K. Bhattacharyya. High-Frequency Electromagnetic Tehniques: Resent Advances and Application. John Wiley & Sons, Inc, 1995. – P.487.

124. Мухитдинов М., Мусаев Э.С. Светоизлучающие диоды и их применение. – М.: РиС, 1988. – 80 с.

125. Лярский В.Ф., Мурадян О.Б. Справочник. Электрические соединители. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

126. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем / Котюк А.Ф., Курчатов Ю.А., Майборода Ю.П., Николаев В.К., Стысин В.Е., Суродин М.П., Тихомиров С.В., Хлескова Т.Н. / Под ред. Котюка А.Ф. – М.: РиС, 1987. – 224 с.

127. Тарновський М.Г., Осадчук В.С., Осадчук О.В. Дослідження оптичної чутливості арсенід галієвих польових транзисторів із бар'єром Шотткі при умові власного поглинання випромінювання. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький). – №3. – 1999. – С. 52–55.

128. Data Sheets.10.90. 1300 nm Fider Optic Semiconductor Devices. / Siemens, 1990. – P. 51.

129. Data Book.04.96. SMT – Optoelectronic Semiconductor. / Siemens, 1996. – P. 547.

130. Data Book.03.96. Si- Photodetectors, IR Emitters, Light Barriers. / Siemens, 1996. – P. 619

131. Data Book. January 1998 The ALTERA Advantage / Altera, 1998. – P. 885

132. Техника оптической связи: Фотоприемники: Пер. с англ. / Капас-со Ф., Пирсолл Т., Полдак М., Канеда Т., Форрест С., Кэмпбелл Дж. / Под ред. У. Тсанга. – М.: Мир, 1988. – 528 с.
133. Вычислительная оптика: Справочник / Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д., Андреев Л.Н., Агальцова Н.А., Ишанин Г.Г., Василевский О.Н., Родионов С.А. / Под ред. Русинова М.М. – Л.: Машиностроение, 1984. – 424 с.
134. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.
135. Кузьмін І.В. Основі теорії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем. // Вісник ВПІ. – №1(2). – 1994. – С. 5–9.
136. Data Book.01.94. SMT – Optical Semiconductor. / Siemens, 1994. – P. 440.
137. The Programmable Logic. Data Book. / Xilinx, 1999. - P. 816.
138. Data Book.01.97. Light Emitting Diodes. / Siemens, 1997. – P. 643.
139. Data Sheets.01.94. Light Emitting Diodes. / Siemens, 1994. – P. 384.