

---

---

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

---

---

УДК 004.93'1

А.В. КОЖЕМ'ЯКО, Т.Б. МАРТИНЮК, А.О. КИРИЯЧЕНКО, С.П. ЛЮБИЧ

### ВАРІАНТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ ОБРОБКИ В ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРОЦЕСОРАХ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

*Вінницький національний технічний університет  
21021, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна*

**Анотація:** У статті розглянуто структури двох оптоелектронних процесорів, а саме оптоелектронного класифікатора та процесора для розпізнавання симетричних зображень. Запропоновано варіанти реалізації оптичних каналів обробки цих процесорів.

**Анотация:** В статье рассмотрены структуры двух оптоэлектронных процессоров, а именно оптоэлектронного классификатора и процессора для распознавания симметричных изображений. Предложены варианты реализации оптических каналов обработки этих процессоров.

**Abstract:** In article the structures of two optoelectronic processors, namely the optoelectronic classifier and the processor for recognition of symmetric images are considered. The options of realization of optical channels for processing of these processors are offered.

**Ключові слова:** оптоелектронний процесор, матриця смарт-пікселів, оптичний канал, матриця мікролінз, смартлінк

#### ВСТУП

Приходить час, коли електронні технології, що використовуються для створення кремнієвих процесорів, наближаються до теоретичної межі своїх можливостей [1]. Ці фундаментальні обмеження визначаються насамперед квантово-механічними ефектами при зменшенні розмірів транзистора до 10 нм, зростанням потужності, що розсіюється, а також пов'язане з швидкісним перемиканням напівпровідникових вентилів та фізичними межами швидкості поширення електричного сигналу по чіпу. В 2005 році ці фактори встановили максимальну частоту процесора в районі 3ГГц, що змусило розробників процесорів перейти на стратегію "багатоядерності" [2]. В той же час частота оптичного випромінювання становить ... Гц, що дозволяє створити до інформаційних каналів зі спектральної шириною 100 ГГц [3]. Отже, рішення даної проблеми неможливе без залучення оптичних та оптоелектронних технологій. Одним з рішень проблем, пов'язаних з розпаралелюванням обчислювальних процесів, є створення обчислювальних засобів з тривимірними між'єднаннями, в яких для організації обміну інформації поряд з електричними зв'язками використовуються оптичні зв'язки [4].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для інтелектуальних систем однією з найважливіших процедур є розпізнавання образів. Штучно створені системи для розпізнавання ефективно використовуються в багатьох галузях, таких як військова справа, системи безпеки, медицина, робототехніка тощо [5]. Разом з тим для створення сучасних систем для розпізнавання, що працюватимуть в реальному часі з великими масивами даних, доцільне використання оптичних та оптоелектронних засобів.

В даній роботі розглядається задача реалізації оптичних каналів у складі оптоелектронних процесорів, а саме в оптоелектроному навченому класифікаторі та процесорі для розпізнавання симетричних зображень.

Структуру оптоелектронного класифікатора показано на рисунку 1. Оптоелектронний навчений класифікатор [6] містить оптично зв'язані матрицю світловипромінювачів, керовану маску і матрицю фотоприймачів, а також детектор максимального сигналу, процесор і пам'ять еталонних зразків.

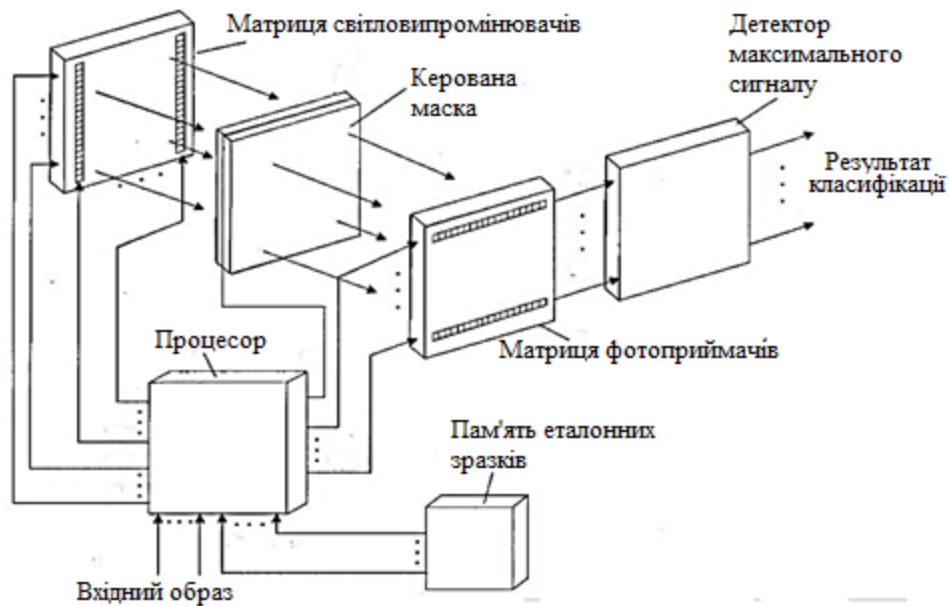


Рис. 1. Структурна схема оптоелектронного класифікатора

Даний класифікатор має два режими роботи: навчання та класифікації. При режимі навчання відбувається зміна коефіцієнта прозорості тонкої магнітної плівки керованої маски. Конкретні еталонні зразки подаються на входи процесора з пам'яті еталонних зразків. При одночасній подачі сигналів  $m$ -вимірному коду керування на відповідні входи матриці світловипромінювачів і сигналу належності даного коду на входи матриці фотоприймачів з виходів процесора змінюється коефіцієнт пропускання керованої маски. Так виконується навчання класифікатора на певному навчальному наборі еталонних зразків [7].

В режимі класифікації вхідний образ подається на входи процесора у вигляді  $n$ -вимірного вектора  $X$ , якому відповідає визначене включення вертикальних випромінюючих смуг матриці світловипромінювачів. Світло від них, проходячи через керовану маску, потрапляє на фотоприймальну матрицю. Кожний з  $m$  рядків керованої маски являє собою ймовірнісну характеристику для  $m$  класів, за якими класифікується вхідний образ. Ступінь відповідності характеризується сумарним світловим потоком з кожного рядка. В режимі класифікації пам'ять еталонних зразків не задіюється [7].

В даному класифікаторі через різні технології виготовлення основних компонентів оптичного каналу, а саме матриці світлодіодів, керованої маски та матриці фотоприймачів, постає проблема його реалізації через узгодженість даних компонентів [8].

Структурну схему оптоелектронного процесора для розпізнавання симетричних зображень показано на рисунку 2. Оптоелектронний процесор для розпізнавання симетричних зображень [9] складається з блока обробки, який містить перший блок зсуву (центрування) з проектувальною оптикою, блок повороту зображення, другий блок зсуву, два канали обробки зображень, кожен з яких містить мультиплікатор світлового потоку, формувач сигналів статичних моментів, і блока керування.

Процесор дозволяє обробляти бінарні й напівтонові зображення, для яких градації яскравості вхідного зображення мають центральну симетрію (якщо розпізнається центрально симетричне зображення) або осьову (зображення з осьовою симетрією) [10].

Вихідними сигналами процесора є результуючі сигнали  $Z1, Z2, Z3$ :

- одиничне значення сигналу  $Z1$  свідчить про центральну симетрію зображення;
- одиничне значення сигналу  $Z2$  свідчить про осьову симетрію зображення;
- одиничне значення сигналу  $Z3$  фіксує несиметричність зображення.

Процесор для розпізнавання симетричних зображень потребує розробки оптичного каналу, що повинен мати у своєму складі компоненти, виготовлені на базі однієї технології [11].

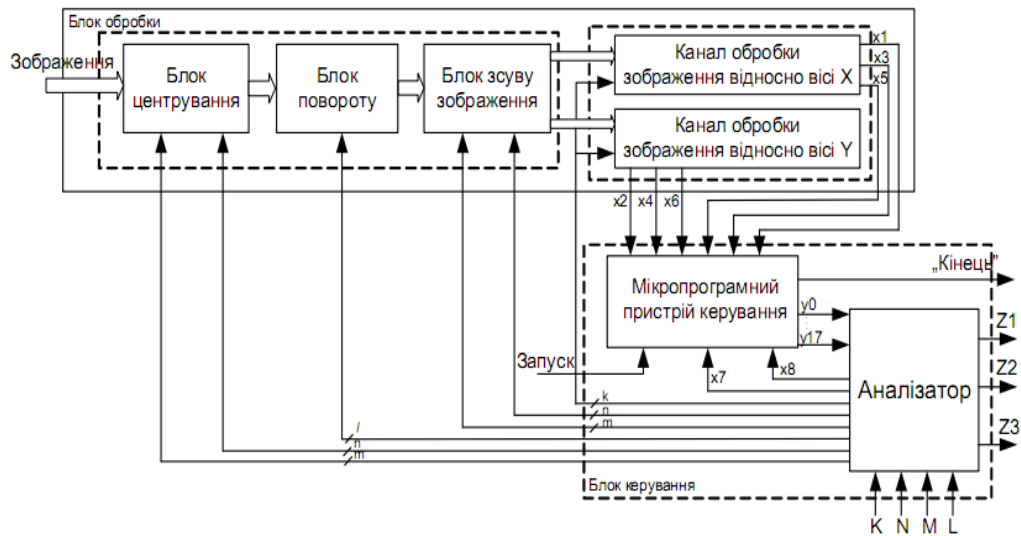


Рис. 2. Структурна схема оптоелектронного процесора для розпізнавання симетричних зображень

Метою даної роботи є реалізація оптичних каналів оптоелектронних процесорів з орієнтацією на сучасну оптоелектронну елементну базу.

### ОПТИЧНИЙ КАНАЛ В ОПТОЕЛЕКТРОННОМУ КЛАСИФІКАТОРІ

Удосконалену структурну схему оптоелектронного навченого класифікатора зображено на рисунку 3 [12].

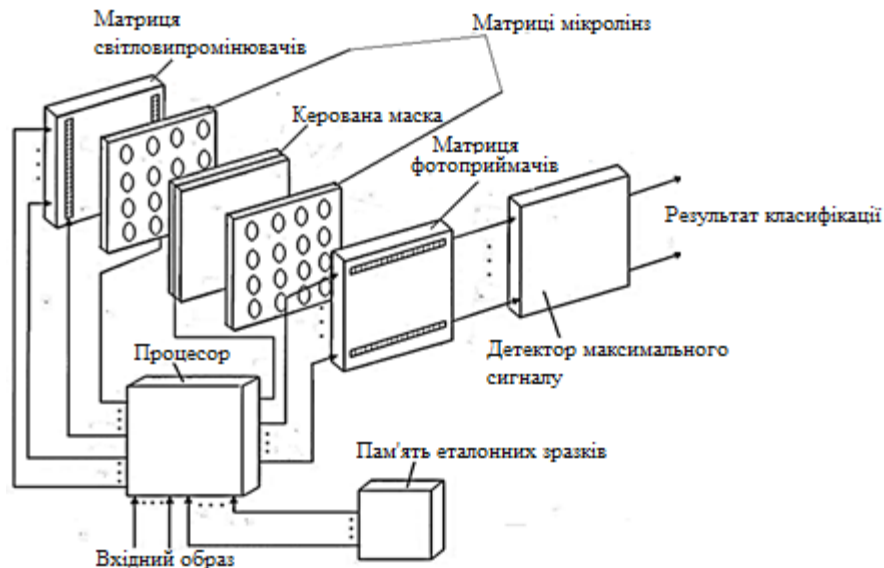


Рис. 3. Структурна схема оптоелектронного класифікатора

В результаті оптичний канал класифікатора складається з матриці світловипромінювачів, керованої маски, матриці фотоприймачів і матриць мікролінз. Як і для оптоелектронного процесора для розпізнавання симетричних зображень (рисунку 2), для спрощення узгодженості окремих компонентів виникає потреба в єдиній технології виготовлення таких важливих елементів оптичного каналу класифікатора, як матриця світловипромінювачів та матриця фотоприймачів. За даної умови проблема узгодженості компонентів оптичного каналу спроститься до узгодження світло- і фотоелектричних матриць з просторово-часовим модулятором світла в якості керованої маски. Окремо запропонований варіант оптичного каналу оптоелектронного класифікатора зображено на рисунку 4 [12].

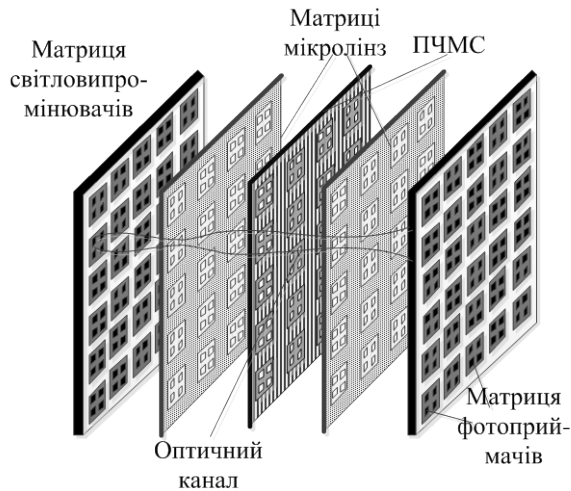


Рис. 4. Оптичний канал оптоелектронного класифікатора

Отже, оптичний канал оптоелектронного класифікатора містить оптично зв'язані матрицю світловипромінювачів, просторово-часовий модулятор світла (ПЧМС), матрицю фотоприймачів та дві матриці мікролінз, що розташовані між матрицею світловипромінювачів та ПЧМС і між ПЧМС та матрицею фотоприймачів. Вхідна та вихідна інформація оптичного каналу надходить в електронному вигляді, а операції, що відбуваються всередині каналу – в оптичному [12].

Це робить доцільним використання матриць смарт-пікселів [4] в якості світло- та фотоелектричних матриць оптичного каналу.

#### БЛОК ОПТИЧНОЇ ОБРОБКИ В ОПТОЕЛЕКТРОННОМУ ПРОЦЕСОРІ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СИМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У процесорі для розпізнавання симетричних зображень блок оптичної обробки містить оптичний канал, що складається з блока центрування, блока повороту та блока зсуву зображення. Перспективним для реалізації даного оптичного каналу є застосування єдиної технології виготовлення кожного з його окремих компонент і перехід на оптоелектронну елементну базу (оптоелектронні ІС) [13]. За цієї умови вирішиться проблема узгодженості параметрів оптичних блоків центрування, повороту та зсуву зображення. Крім того, оптоелектронні ІС на базі матриць смарт-пікселів мають можливість не тільки приймати та передавати оптичний сигнал, але й обробляти дані в електронному вигляді [4].

Один з варіантів реалізації оптичного каналу у складі оптоелектронного процесора для розпізнавання симетричних зображень наведено на рисунку 5 [11].

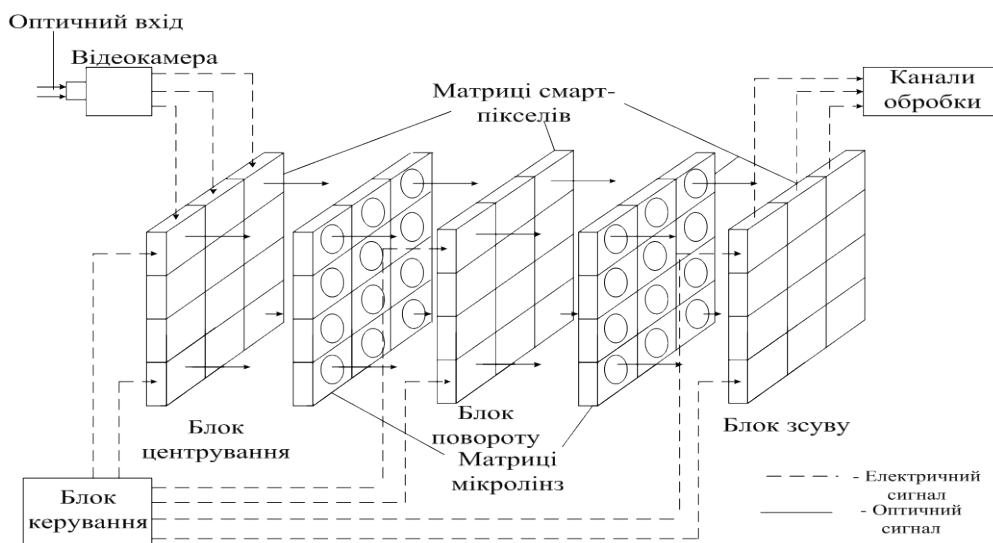


Рис. 5. Структурна схема оптичного каналу процесора для розпізнавання симетричних зображень

Отже, до складу оптичного каналу процесора для розпізнавання симетричних зображень входить відеокамера, три матриці смарт-пікселів та дві матриці мікролінз. На першу матрицю смарт-

пікселів зображення надходить в електронному вигляді з відеокамери. Після виконання першою матрицею смарт-пікселів операції центрування інформація в оптичному вигляді через матрицю мікролінз надходить на другу матрицю смарт-пікселів. Друга матриця смарт-пікселів виконує операції повороту та передає інформацію оптично через другу матрицю мікролінз на третю матрицю смарт-пікселів. Від третьої матриці смарт-пікселів після виконання операції зсуву інформація в електричному вигляді надходить у канали обробки (рисунок 2) [11]. Такий підхід є можливим через те, що кожна матриця смарт-пікселів має електричні входи керування та можливість обробки вхідних оптичних сигналів в електричному вигляді [4].

### ВИКОРИСТАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІС НА МАТРИЦЯХ СМАРТ-ПІКСЕЛІВ

Потенційні перспективи передачі інформації з використанням світлових променів, що розповсюджуються у вільному просторі замість електричних зв'язків, добре відомі [1]. Тривимірні оптичні системи можуть забезпечити: 1) передачу даних в паралельній формі по перетинаючим просторовим зв'язкам зі швидкістю передачі інформації по кожній з них до 10Тбит/с; 2) безконтактність з'єднання; 3) стійкість до електромагнітних завад; 4) незалежну передачу інформації на різних оптичних частотах [1]. Значний прогрес в дослідженнях і технології виготовлення матриць вертикально-випромінюючих лазерів (ВВЛ) і швидких напівпровідникових фотоприймачів з високою чутливістю призвів до створення нової оптоелектронної структури - смарт-пікселя, що дозволяє ефективно вирішити проблему єдиної технології виготовлення матричних масивів для введення та виведення інформації в оптичному вигляді.

Матриці смарт-пікселів представляють собою фрагмент інтегральної схеми, в котру об'єднані пристрої введення/виведення оптичної інформації та електронна схема для обробки даної інформації. Складність електронної схеми може в значній степені варіюватись – від одного чи двох до тисячі транзисторів у пристроях, що здійснюють складну обробку інформації, наприклад, обробку в системах з асинхронною (пакетною) передачею даних [4]. Отже, матрицю смарт-пікселів можна використовувати як в якості матриці світловипромінювачів, так і в якості матриці фотоприймачів. Структурну схему матриці смарт-пікселів зображено на рисунку 6 [4].

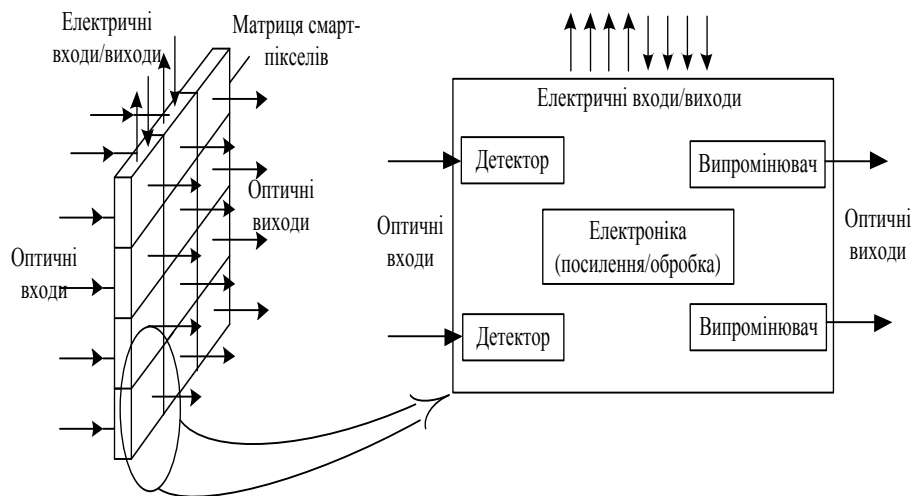


Рис. 6. Структурна схема матриці смарт-пікселів

Створення матриць смарт-пікселів в теперішній час йде двома напрямками. Один з них – виготовлення матриць смарт-пікселів з великою загальною продуктивністю (більше 100 Мбит/с) і помірною кількістю входів-виходів ( $10^2$ - ) при достатньо високій функціональній складності окремих смарт-пікселей (більше 50 транзисторів на канал). Другий напрямок, що використовує технологію “рідкого кристалу на кремнію”, складається з виготовлення матриць з високою комунікаційною здатністю, тобто з більшою кількістю оптичних входів/виходів (більш як ), але з меншою продуктивністю (менше 100 Мбит/с) і функціональною складністю (менше 50 транзисторів на канал) [4]. У відповідності з цими двома напрямками можна виділити і дві області застосування матриць смарт-пікселів. Так, областю застосування матриць високопродуктивних смарт-пікселів можуть бути комунікаційні системи, оптоелектронні об'єднані плати другого рівня або спеціалізовані високопродуктивні обчислювальні пристрої. Область застосування матриць з великою кількістю входів/виходів – дисплеї, аналогові оптичні процесори, оптичні нейронні мережі, оптичні запам'ятовуючі пристрої.

В роботі [14] наведено існуючі технології виготовлення смарт-пікселів, серед яких виділяють три основні підходи: монолітна інтеграція, пряма епітаксія і гібридна інтеграція. Варіант інтегрального виконання смарт-пікселя на базі ВВЛ, фотоприймачів (метал-напівпровідник-метал) та польових транзисторів зображено на рисунку 7 [4].

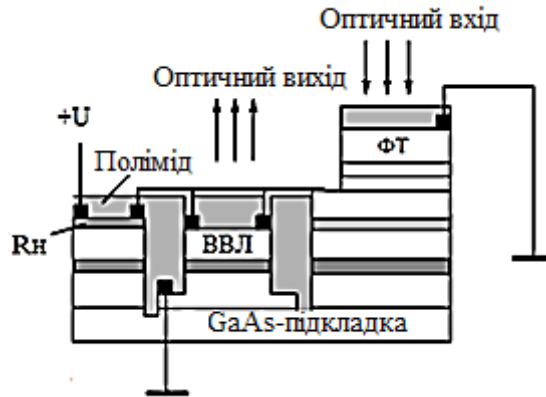


Рис. 7. Окремий елемент матриці смарт-пікселів

При цьому тепловий опір з функцією взаємного впливу виявляється менш чутливий до конструктивних особливостей, якщо лазери в матриці знаходяться на характерних відстанях, більших за лінійні розміри окремих елементів [15]. Матриці ВВЛ ефективно використовують в комутуючих пристроях [16]. В роботі [16] показано важливість останніх досліджень в розробці матриць ВВЛ для практичної реалізації оптоелектронного комутуючого пристрою, та наведено його переваги над електричними аналогами.

В роботі [17] запропоновано технологію та конструкцію виготовлення матриць ВВЛ з нижнім напівпровідниковим AlGaAs/GaAs і верхнім AlGaO/GaAs шарами, що розподілені брегівськими відбивачами, та реалізовано матриці, які містять 8×8 лазерів. У США промислово створено матриці смарт-пікселів потужністю 1мВт з робочою довжиною хвилі 850 нанометрів і пороговим струмом 3-4 мА, розмірністю 32×32 елемента ще в 1991 році [4]. В роботі [4] можна знайти приклад реалізації комерційно доступних матриць смарт-пікселів, де представлено першу оптоелектронну високошвидкісну надвелику ІС. Ця схема складається з 16 модулів, кожен з яких, в свою чергу, містить 16 мультиплексорів з 16 оптичними входами і одним оптичним виходом, 4096 оптичних детекторів, 256 оптичних модуляторів і більше 140 000 транзисторів. Схема випробувалась при швидкості отримання інформації в канал 400 МБіт/с, розкид часової затримки не перевищував 400 пс, розмірність схеми 7×7 мм [4].

Таким чином, використання матриць смарт-пікселів дозволяє технічно узгодити параметри компонентів оптичного каналу оптоелектронних процесорів. Як приклад в табл.1 і в табл.2 наведено варіант реалізації оптичного каналу оптоелектронного класифікатора.

Таблиця 1.

**Узгоджені технічні параметри**

Назва компонента	Геометричні розміри активних частин в діаметрі, мкм	Напруга живлення, В	Робоча довжина хвилі, нм	Посилання на літературу
Елемент ВВЛ	15-50	5-15	850±15	[18]
Елемент фотоприймача	15-50	3-5	850±15	[18]
Комірка модулятора світла	100	5-15	400-1000	[19]

Таблиця 2.

## Узгоджені геометричні параметри

Назва елемента	Розмірність, елементів	Розмір робочої поверхні елемента, мкм	Розмір елемента, мкм	Міжелементна відстань, мкм	Загальний розмір, мкм	Посилання на літературу
Матриця випромінювачів	8×8	50×50	190×190	60	2000×2000	[18]
Матриця фотоприймачів	8×8	50×50	190×190	60	2000×2000	[18]
Просторовий модулятор світла	8×8	100-100	100×100	150	2000×2000	[19]

Отже, використання матриць смарт-пікселів забезпечує узгодженість як технічних параметрів вузлів оптичного каналу класифікатора, так і їх геометричних параметрів.

Одним з виробників матриць мікролінз, які можна використати в оптичних каналах процесорів, є компанія «LIMO» (Дортмунд, Німеччина) [20]. Поряд зі стандартними елементами мікрооптики компанія пропонує індивідуальні матриці мікролінз: можливе виготовлення індивідуальних поверхонь довільної форми на підкладках різного розміру. Параметри матриць мікролінз наведено в табл.3 і табл.4 [20].

Таблиця 3.

## Параметри матриць мікролінз

Ефективна фокусна відстань, мм	Крок, мм	Розмір, мм <sup>2</sup>
4,23 - 61,6	0,5	12x12
8,55 - 206,5	0,8	20x20
5,88 - 98,3	1,3	35x35

Таблиця 4.

## Технічні параметри матриць мікролінз

Параметри	Одиниці виміру	Значення
Матеріал		кварц
Довжина	мм	12,0 ± 0,1
Ширина	мм	12,0 ± 0,1
Висота	мм	2,0 ± 0,1
Світловий діаметр	мм	10,0 x 10,0
Показник заломлення: λ= 532нм λ= 850 нм λ= 1064 нм		1,509 1,461 1,449
Крок	мм	0,5
Радіус	мм	3.50 ± 0.11 5.50 ± 0.17 14.0 ± 0.42 21.0 ± 0.63 31.3 ± 0.94
Пропускна здатність	%	> 90

Одним з новітніх перспективників напрямку для реалізації оптичних каналів оптоелектронних процесорів є створення закритого оптичного каналу передачі інформації на базі технології смартлінк. Смартлінк представляє собою багатоканальне оптоволоконне оптичне з'єднання [21]. Схему лабораторного зразка смартлінка зображено на рисунку 8 [21].

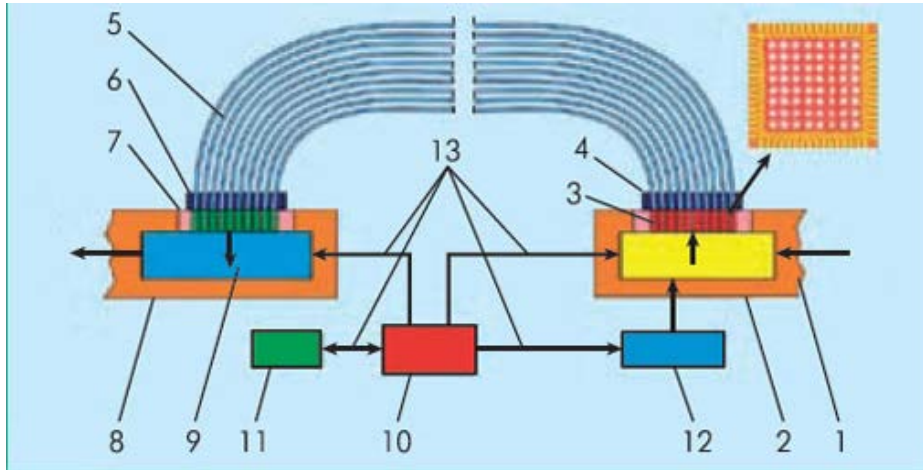


Рис. 8. Схема лабораторного зразка смартлінка

Рисунок 8 містить такі позначення: 1 - мікросхема - джерело сигналів; 2 - комутатор матриць передавачів; 3 - матриця передавачів (світлодіоди, VCSEL-лазери); 4 - матриця вхідних кінцівок пучка провідників; 5 - пучок оптичних волокон (оптошина); 6 - матриця вихідних кінцівок пучка провідників; 7 - матриця приймачів; 8 - мікросхема приймачів сигналів; 9 - комутатор каналів; 10 - процесор; 11 - блок пам'яті; 12 - система формування тестових сигналів каналів; 13 - шини зв'язку [21].

Перший зразок смартлінка містить передавач, оптошину і приймач сигналів. Управління смартлінком здійснюється мікропроцесором, що керує з'єднанням за допомогою комутатора. Основою передавача є гібридна мікросхема, що містить 8 напівпровідникових лазерів, що випромінюють у видимому діапазоні (довжина хвилі 680 - 760 нм). Потужність випромінювання одного лазера складає близько 30 - 70 мВт. В якості оптошини в смартлінках використовується оптоволоконний джгут діаметром 3 мм, а в якості багатоканального приймача - елементна матриця пін-фотодіодів з прямим доступом [22].

На входи лазерної матриці, розташованої в мікросхемі - джерелі інформації, подають електричні імпульси, які модулюють випромінювання лазерів. Це випромінювання по оптошині надходить до матриці фотодіодів, розташованої в приймачі інформації, і перетворюється в потік електричних імпульсів. Кожен фотодіод підключений до керованого процесором комутатора, реалізованого на ПЛІС [22].

Оптошину підключають до матриць передавачів і приймачів в переплутаному порядку. Щоб отримати потрібний порядок підключення шини, процесор на початку роботи пристрою з'єднується з матрицею передавача і за особливою процедурою проводить розпізнавання каналів. За допомогою комутатора розпізнавані канали зв'язку перепідключаються на виходи комутатора в заданому порядку. Непрацездатні та дублюючі канали відключаються [22].

Отже, перспектива застосування технології смартлінк дозволить з'єднувати компоненти оптоелектронних процесорів закритим оптичним каналом. Використовуючи дану технологію відпадає потреба у введенні матриць мікролінз (рисунок 3-5). Технологію смартлінк більш доцільно використовувати в процесорі для розпізнавання симетричних зображень (рисунок 2), оскільки оптичний канал даного процесора містить однотипну технологію виготовлення його вузлів (рисунок 5). Якщо ж розглядати використання смартлінків в оптоелектронному класифікаторі, то через наявність в його оптичному каналі вузлів різних технологій виготовлення, а саме матриць світловипромінювачів, матриць фотоприймачів і ПЧМС, такий підхід не є доцільним.

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто задачу реалізації оптичних каналів в оптоелектронних процесорах для розпізнавання зображень, яка полягає у складності узгодження базових компонентів оптичних каналів, а саме матриць світловипромінювачів та матриць фотоприймачів.

2. В ході проведених досліджень запропоновано варіанти реалізації оптичних каналів в оптоелектронних процесорах за рахунок використання матриць смарт-пікселів для забезпечення високоефективної передачі інформації всередині оптичного каналу процесорів.

3. Наведено приклади узгодження за технічними та геометричними розмірами вузлів оптичного каналу процесорів, що свідчить про можливість його практичної реалізації.

4. Запропоновано використання в оптичних каналах оптоелектронних процесорів матриць мікролінз для збільшення ефективності реєстрації випромінювання в оптоелектронному класифікаторі



між матрицею світловипромінювачів і ПЧМС та між ПЧМС і матрицею фотоприймачів, а також в процесорі для розпізнавання симетричних зображень між матрицями смарт-пікселів.

5. Розглянуто варіант реалізації закритого оптичного каналу для передачі інформації за допомогою використання технології смартлінк, що дозволить здійснювати такі операції над оптичним зображенням, як поворот, центрування, зсув в процесі його комутації.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оптические процессоры: достижения и новые идеи / П. А. Белов, В. Г. Беспалов, В. Н. Васильев, С. А. Козлов, А. В. Павлов, К. Р. Симовский, Ю. А. Шполянский // В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – С. 6 – 36.
2. Применение полупроводников в электронике [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://hightolow.ru/semiconductors1.php>
3. Богатырева В.В. Оптические методы обработки информации / В.В. Богатырева, А.Л. Дмитриев – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 74 с.
4. Захаров С.М. Оптоэлектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров / С.М. Захаров, В.Б. Федоров, В.В. Цветков // Квантовая электроника. – 1999. – 28, №3. – С.189-206
5. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения / Я. А. Фомин – 2-е изд. – М.: ФАЗИС, 2012. – 429 с. – ISBN 978-5-7036-0130-4
6. Патент 73074 Україна, МПК8 G06K9/00. Оптоелектронний навчений класифікатор / Т.Б. Мартинюк, А.О. Бендера, Є.В. Дубінін; ВНТУ. – №201202359; заявл. 28.02.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл №17.
7. Мартинюк Т.Б. Особливості процесу класифікації в оптоелектронному класифікаторі / Т.Б. Мартинюк, А.О. Кириаченко, О.М. Перейніс // Інтелектуальні технології в системному програмуванні (ІТСП-2014); Третя всеукр. наук.-практ. конф., 23-25 квітня 2014р.: матер. конф. – Хмельницький, Гонта А.С., 2014 – С.135-136. – ISBN 978-966-96686-7-7.
8. Мартинюк Т.Б. Особливості організації оптоелектронного класифікатора / Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, А.О. Кириаченко // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ-2013); Всеукр. наук.-практ. конф., 27-31 травня, 2013 р.: тези доп. – Чернівці, Видавничий дім "Родовід", 2013. – С. 138-140.
9. Патент України 52678, МПК7 G06K9/58, G06K9/52. Пристрій для розпізнавання симетричності зображень об'єктів/ А.Г. Буда, Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, В.І. Андрущенко, С.А. Буда; ВНТУ. – №99021033, заявл. 23.02.99; опубл. 15.01.03, Бюл. №1.
10. Буда А.Г. Оптоелектронний процесор розпізнавання симетричних зображень об'єктів / А.Г. Буда, С.П. Любич, М.В. Повидало // Інтелектуальні технології в системному програмуванні (ІТСП-2014); Третя всеукр. наук.-практ. конф., 23-25 квітня 2014р.: матер. конф. – Хмельницький: Гонта А.С., 2014 – С.271-272. – ISBN 978-966-96686-7-7.
11. Реалізація оптичної обробки у процесорі розпізнавання симетричних зображень об'єктів/ Т.Б. Мартинюк, А.Г. Буда, С.П. Любич, А.О. Кириаченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія; Четверта міжнар. наук.-практ. конф., 28-30 травня 2014р.: тези доп. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – С.246-247. – ISBN 978-966-641-465-9
12. Kozhemiako A. Optoelectronic classifier / A. Kozhemiako, N. Denysyuk, A. Kyryyachenko // 1st International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint-Petersburg OPEN 2014", 25-27 March, 2014: abstracts.- St.Peterburg, 2014. – P. 213-214.- ISBN 978-5-906433-10-7
13. Мартинюк Т.Б. Використання матриць смарт-пікселів в оптоелектронних процесорах/ Т.Б. Мартинюк, А.О. Кириаченко, С.П. Любич// Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки (ПІКТ-2014): Всеукр. наук.-практ. конф., 27-30 травня, 2014 р.: тези доп. — Чернівці, Видавничий дім "Родовід", 2014. – С. 176-177.
14. Порівняльний аналіз оптоелектронних інтегральних схем на базі матриць смарт-пікселів / В.П. Кожем'яко, Г.Д. Дорощенко, Т.Б. Мартинюк, О.М. Гуцол// Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. - № 2. - С. 36-40. – ISSN 2311-2662
15. Захаров С.М. Перекресное взаимное тепловое влияние в матрицах поверхностно излучающих лазеров с вертикальным выводом излучения / С.М. Захаров // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, вып.4. – С.499-503.
16. Фёдоров В.Б. Высокопроизводительное оптоэлектронное коммутирующее устройство с матрицами вертикально излучающих лазеров // Квантовая электроника – 2003. – Т. 33, вып.3. –

- С.259–264.
17. Малеев Н.А. Конструкция и технология изготовления матриц вертикально-излучающих лазеров/ Н.А. Малеев, А.Г. Кузьминков, А.Е.Жуков, А.П.Васильев и другие // Физика и техника полупроводников. – 2005. – Т. 39, вып.4. – С.487-491.
  18. Каталог продукции компании “Коннектор Оптикс” [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.connector-optics.com>
  19. Пространственно-временной модулятор света на основе эффекта памяти формы [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.fid-tech.com/rus/technol/data/instr\\_making/1.378.html](http://www.fid-tech.com/rus/technol/data/instr_making/1.378.html)
  20. Матрицы микролинз – высокопрецизионные поверхности произвольной формы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.limo.de/ru/produkty-i-reshenija/mikrooptika/reshjotki-mikrolinz/>
  21. Никитин В.С. Смартлинки – умные соединения. Испытания технических возможностей лабораторного образца смартлинка. / В.С. Никитин, Э.И. Семенов, А.Н. Ломанов [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://introfizika.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2&Itemid=7](http://introfizika.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=7)
  22. Первый смартлинк создан в России [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://introfizika.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=6&Itemid=11](http://introfizika.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=11)

Надійшла до редакції 23.06.2014р.

**КОЖЕМ'ЯКО АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ** – к.т.н., доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**МАРТИНЮК ТЕТЯНА БОРИСІВНА** – д.т.н., професор кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**КИРИЯЧЕНКО АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – магістрант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**ЛЮБИЧ СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ** – студент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.