

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська**

**ОПТОЕЛЕКТРОННІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ  
ТРАНСПАРАНТИ ДЛЯ ШВИДКОДІЙНИХ  
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2015

УДК 621.383.9

ББК 32.854

Л63

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 25.12.2014 р.)

Рецензенти:

**Л. І. Тимченко**, доктор технічних наук, професор

**В. А. Лужецький**, доктор технічних наук, професор

**Лисенко, Г. Л.**

Л63 Оптоелектронні напівпровідникові транспаранти для швидкодійних спеціалізованих обчислювачів : монографія / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 140 с. ISBN 978-966-641-629-5

В монографії розглядаються питання підвищення швидкодії спеціалізованих обчислювачів за рахунок використання паралельного введення-виведення і паралельної обробки інформації, поданої у матричному вигляді на основі оптоелектронних напівпровідникових транспарантів. Отримані в монографії результати в сукупності дають можливість вирішити проблему розробки та дослідження спеціалізованих обчислювачів з використанням оптоелектронних напівпровідникових транспарантів, які дозволяють виконувати матричні операції з великорозмірними масивами даних із високою швидкістю.

**УДК 621.383.9**

**ББК 32.854**

**ISBN 978-966-641-629-5**

© Г. Лисенко, І. М'ялківська, 2015

## ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ З ПАРАЛЕЛЬНИМ ВВЕДЕННЯМ- ВИВЕДЕННЯМ І ОБРОБКОЮ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ.....	9
1.1 Аналіз галузей застосування спеціалізованих обчислювачів .....	9
1.2 Класифікація спеціалізованих обчислювачів з паралельним введенням-виведенням і обробкою інформації .....	10
1.3 Класифікація та порівняльна характеристика транспарантів як елементів спеціалізованих обчислювачів з паралельною обробкою інформації.....	16
1.4 Аналіз елементної бази для створення транспарантів .....	24
1.5 Обґрунтування вибору критерію ефективності спеціалізованих обчислювачів.....	32
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ТРАНСПАРАНТІВ ДЛЯ ШВИДКОДІЙНИХ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ .....	35
2.1 Обґрунтування вибору матеріалу для оптоелектронних транспарантів.....	35
2.2 Модель поглинання випромінювання для оптоелектронного транспаранта з двохвильовим керуванням.....	44
2.3 Метод двохвильового керування для оптоелектронного напівпровідникового транспаранта.....	53
2.4 Математичні моделі для визначення впливу часових та просторових параметрів на роботу оптоелектронних напівпровідникових транспарантів .....	57
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ОПТОЕЛЕКТРОННИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТРАНСПАРАНТІВ ДЛЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ .....	64
3.1 Оптоелектронні схеми напівпровідникового транспаранта на базі логічних елементів І-НІ.....	64
3.2 Оптоелектронна схема напівпровідникового транспаранта на базі напівсуматорів та суматорів.....	71
3.3 Метод виконання операцій у спеціалізованих обчислювачах на базі оптоелектронних транспарантів.....	77

3.4 Структури швидкодіючих спеціалізованих обчислювачів із застосуванням оптоелектронних напівпровідникових транспарантів.....	79
3.4.1 Структури спеціалізованих обчислювачів із застосуванням транспарантів для виконання матричних операцій.....	79
3.4.2. Структури спеціалізованих обчислювачів на базі багатoshарового оптоелектронного транспаранта для виконання набору логічних операцій над матрицями.....	85
3.5 Топологія побудови спеціалізованих обчислювачів на базі оптоелектронних напівпровідникових транспарантів та розрахунок їх параметрів.....	89
3.6 Оцінки ефективності спеціалізованих обчислювачів на основі транспарантів.....	93
<b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ТРАНСПАРАНТІВ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧАХ.....</b>	
4.1 Дослідження оптичних властивостей напівпровідникових транспарантів.....	98
4.1.1. Дослідження оптичних властивостей транспарантів на напівпровідниках групи $A^{III}B^V$ .....	98
4.1.2. Дослідження оптичних властивостей транспарантів на напівпровідниках з квантовими ямами.....	101
4.2 Дослідження впливу часових та енергетичних характеристик оптичного випромінювання на роботу СО на основі транспарантів.....	103
4.2.1 Дослідження впливу часових та просторових характеристик оптичного випромінювання на роботу спецобчислювачів на основі транспарантів.....	103
4.2.2 Дослідження впливу енергетичних характеристик оптичного випромінювання на роботу спецобчислювачів на основі транспарантів.....	104
4.2.3 Алгоритм та програмна реалізація роботи багатoshарового оптоелектронного транспаранта для виконання набору логічних операцій над матрицями.....	109

4.3 Рекомендації щодо побудови систем управління оптоелектронними напівпровідниковими транспарантами у спеціалізованих обчислювачах .....	110
4.4 Рекомендації щодо застосування оптоелектронних напівпровідникових транспарантів в оптичних технологіях .....	114
4.4.1 Застосування транспаранта в оптоелектронних пристроях ..	114
4.4.2 Застосування оптоелектронного транспаранта для паралельної комутації.....	117
4.4.3 Введення інформації в систему керування інтерфейсом повністю оптичних мереж за допомогою оптоелектронного транспарант.....	119
4.4.4 Оптоелектронний напівпровідниковий транспарант як елемент паралельного D-тригера з MS-структурою .....	121
ВИСНОВКИ.....	122
ЛІТЕРАТУРА .....	124
Додаток А Параметри напівпровідникових матеріалів.....	133
Додаток Б Результати моделювання у програмі Micro-Cap 8 .....	134
Додаток В Результати моделювання у програмі MathCAD.....	137
Додаток Д Алгоритм роботи багатошарового оптоелектронного транспаранта для виконання набору логічних операцій над матрицями .....	138
Додаток Е Результати роботи програми .....	139

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

<b>EAM</b>	електроабсорбційний модулятор
<b>КЯ</b>	квантова яма
<b>НП</b>	напівпровідник
<b>ОЗ</b>	обчислювальні засоби
<b>СО</b>	спеціалізований обчислювач
<b>ФП</b>	фотоприймач
<b>MIMD</b>	множинний потік команд, множинний потік даних
<b>MISD</b>	множинний потік команд, одиночний потік даних
<b>OCEAM</b>	оптично керований електроабсорбційний модулятор
<b>SEED</b>	пристрій з електрооптичним ефектом
<b>SIMD</b>	одиночний потік команд, множинний потік даних
<b>SISD</b>	одиночний потік команд, одиночний потік даних
<b>SMP</b>	симетрична багатопроцесорна архітектура
<b>VCSEL</b>	лазери з вертикально випромінювальною поверхнею

## ВСТУП

В сучасному світі постійно збільшується кількість інформації, що передається та обробляється в обчислювальних системах. Це обумовлено такими задачами як екологічний моніторинг, прогнозування погоди, проведення ядерних досліджень та інші. Кількість інформації, яку необхідно одночасно обробляти для таких задач, становить від  $10^8$  елементів і більше. Тому гостро стоїть задача збільшення швидкості обробки цієї інформації. Одним із найбільш вдалих на сьогодні методів, що дозволяє це здійснювати, – паралельна обробка, тобто обробка інформації, поданої у вигляді масивів даних.

Для реалізації цього методу обробки використовують різні обчислювальні засоби. Серед них багатопроцесорні комп'ютери, масивно-паралельні структури, конвеєрні пристрої та інші спеціалізовані обчислювачі. Проте вони мають недостатню швидкодію, що пов'язано з обмеженими можливостями електронних обчислювальних засобів. Більш перспективними на сьогодні є спеціалізовані обчислювачі, які працюють на оптоелектронних елементах.

Оптоелектронні системи – це напрям, який досить динамічно розвивається і яким займаються провідні науковці як України, так і зарубіжжя. Серед українських вчених оптоелектронними паралельними системами займаються С. В. Свечніков, В. П. Кожем'яко, В. І. Осинський, З. Ю. Готра, Л. І. Тимченко, роботи [1–8] яких внесли значний вклад в розвиток цього напрямку. Серед закордонних вчених слід відзначити Д. Міллера (США) [9, 10], О. Г. Натрошвілі (Грузія) [11], Ю. Р. Носова, О. С. Сидорова (Росія), В. Сабніса (США).

Перевагами оптоелектронних спеціалізованих обчислювачів є висока швидкодія, паралелізм виконання операцій, невеликі габаритні розміри та ін. Найкраще для задач обробки інформації, поданої у вигляді масивів даних, підходять спеціалізовані обчислювачі на основі керованих транспарантів.

Під керованими транспарантами розуміють пристрої, виконані у вигляді матриць, які працюють за принципом просторово-часових модуляторів світла.

Так, на сьогоднішній день, обробка інформаційних сигналів може здійснюватись паралельно за допомогою обчислювачів на базі опто-

електронних транспарантів (акустооптичних, на монокристалічних сегнетоелектриках, на феромагнітних матеріалах тощо). І хоча такі транспаранти мають достатньо якісні характеристики, в них є один великий недолік – відсутність можливості інтеграції таких пристроїв у обчислювальні системи. Цей недолік відсутній в оптоелектронних транспарантах на напівпровідникових матеріалах. Крім того, оптоелектронний напівпровідниковий транспарант має високу чутливість, що дозволяє здійснювати як електричне (електричною напругою), так і оптичне (оптичним випромінюванням) керування цим пристроєм. Оптичне керування здійснюється в результаті взаємодії керувального випромінювання з матеріалом транспаранта, в результаті чого відбувається модуляція вхідного випромінювання, яким представлені вхідні дані. Ці властивості напівпровідників можуть бути використані для створення спеціалізованих обчислювачів на основі транспарантів. Тому розробка керованих пристроїв паралельного введення-виведення та обробки інформації в спеціалізованих обчислювачах є актуальною науковою задачею.

Вступ, висновки, а також розділ 3 підготував Г. Л. Лисенко; розділи 1, 2, 4 підготувала І. В. М'ялківська.



# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ З ПАРАЛЕЛЬНИМ ВВЕДЕННЯМ-ВИВЕДЕННЯМ І ОБРОБКОЮ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

### 1.1 Аналіз галузей застосування спеціалізованих обчислювачів

В сучасному світі постійно зростають обсяги інформації, що передаються та обробляються в обчислювальних системах. Тому одним із найважливіших завдань таких систем є збільшення швидкодії їх роботи. Одним із шляхів вирішення цього завдання є паралельна обробка за рахунок подачі даних у вигляді масивів. При цьому масиви даних можуть бути представлені у вигляді порозрядних зрізів та оброблятися за допомогою спеціалізованих обчислювачів.

СО вирішують задачі первинної і вторинної цифрової обробки інформації [12]. При первинній обробці здійснюється перетворення вхідних сигналів у цифрову форму, знаходження корисних сигналів у шумах, вимірювання параметрів сигналів, їх спектрально-кореляційне перетворення та ін. Основні методи вирішення цих задач полягають в цифровій обробці в часовій області та обробці в частотній області (наприклад, цифрова фільтрація з використанням дискретного перетворення Фур'є). Важливою вимогою є необхідність виконання обробки в реальному масштабі часу, що накладає жорсткі обмеження як на час вирішення задач, так і на швидкість обміну інформацією за допомогою інтерфейсу.

При вторинній обробці вирішуються задачі траєкторних вимірювань, розпізнавання образів, задачі управління, контролю, діагностики тощо.

За можливістю інтегрування СО можна поділити на стаціонарні та такі, що інтегруються (влаштовуються). Областями застосування стаціонарних СО є вирішення задач, що потребують громіздких та складних обчислень:

- математичне моделювання;
- обробка статистичних даних;
- обробка великих масивів даних;
- обробка високошвидкісних потоків тощо.

СО, що інтегруються, застосовуються у різних областях військової та цивільної техніки. Серед них: різноманітні комплекси і системи озброєння; авіація; космічна техніка; флот; складне промислове обла-

днання; телекомунікаційні пристрої; радіолокаційне та навігаційне обладнання; автоматизовані та дистанційно керовані системи та ін. [12].

Задачі, що виконуються інтегрованими СО різного призначення, досить різноманітні, але в той же час, між ними є багато спільних рис: великі об'єми вхідних даних; функціональна гнучкість (різні задачі та багатозадачний режим); мультипротокольне інтерфейсне середовище; необхідність обробки даних в режимі реального часу, що надходять як в синхронному, так і в асинхронному режимі; необхідність покращення масогабаритних показників і параметрів енергоспоживання; необхідність забезпечення високої надійності; розподілення задач за ступенем їх критичності.

Стаціонарні високопродуктивні СО характеризуються дещо іншими вимогами й особливостями:

- досягнення максимально пікової продуктивності на спеціалізованих задачах, яка обмежена тільки можливостями застосовуваної елементної бази, а не архітектурою побудови системи;
- можливість адаптації до широкого кола задач із забезпеченням максимально пікової продуктивності;
- гнучкість і зручність засобів розробки прикладних задач;
- нарощування ресурсів шляхом масштабування;
- стійкість функціонування.

Отже, коло задач, які виконуються за допомогою СО є досить широким, починаючи від вирішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь і закінчуючи такими важливими задачами як аерофотознімання, прогнозування глобального потепління та ін. Крім того, деякі з цих задач можливо виконати тільки на СО з паралельним введенням-виведенням і обробкою даних. Тому доцільно розглянути більш детально класифікацію паралельних СО.

## **1.2 Класифікація спеціалізованих обчислювачів з паралельним введенням-виведенням і обробкою інформації**

СО для обробки даних у вигляді великорозмірних масивів являють собою засоби, що здатні виконувати матричні операції, в яких кожний розряд представлений зрізом даних. Щоб забезпечити належну швидкість виконання операцій у СО, необхідно застосувати для них паралельні методи введення, обробки і виведення даних. Такі методи реалізуються на різних типах ОЗ паралельної обробки даних.

Класифікація ОЗ паралельної обробки даних наведена на рис. 1.1.

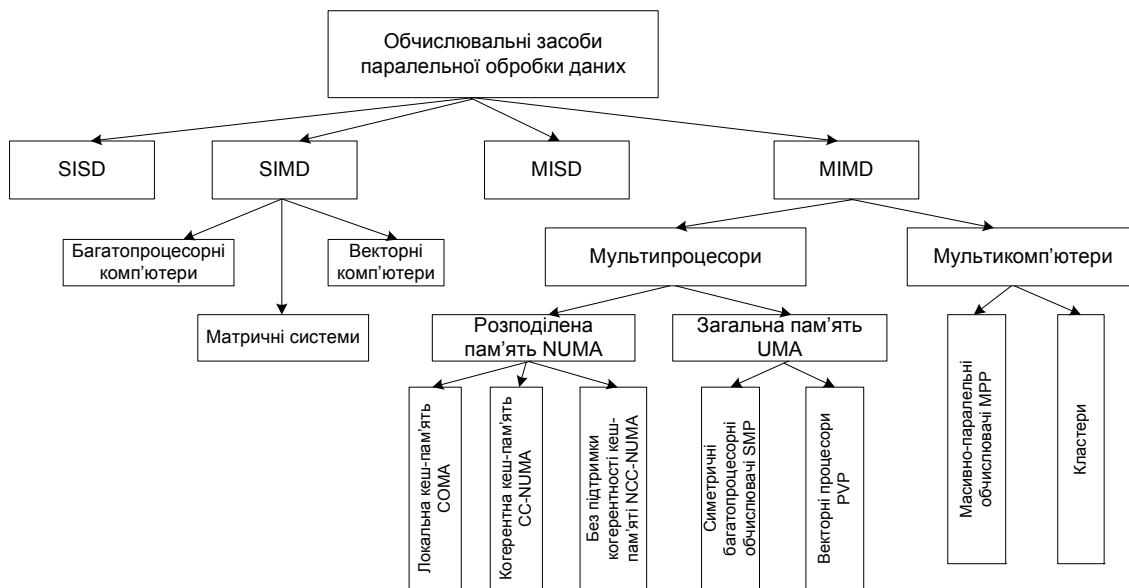


Рисунок 1.1 – Класифікація ОЗ паралельної обробки даних

В 1966 році М. Фліном був запропонований надзвичайно зручний підхід до класифікації обчислювальних систем. В основу було покладено поняття потоку, під яким розуміється послідовність елементів, команд або даних, що обробляються процесором. Відповідна система класифікації базується на розгляді числа потоків інструкцій і потоків даних та описує чотири класи [13]:

1) **SISD (single instruction stream / single data stream)** – одиночний потік команд і одиночний потік даних. До цього класу відносять послідовні комп'ютерні системи, які мають один центральний процесор, здатний обробляти тільки один потік послідовно виконуваних інструкцій. В даний час практично всі високопродуктивні системи мають більше одного центрального процесора, однак кожний з них виконує не пов'язані потоки інструкцій, що робить такі системи комплексами SISD-систем, які діють на різних просторах даних. Для збільшення швидкості обробки команд і швидкості виконання арифметичних операцій може застосовуватися конвеєрна обробка. У випадку векторних систем векторний потік даних слід розглядати як потік із одиночних неподільних векторів. Прикладами комп'ютерів з архітектурою SISD є більшість робочих станцій Compaq, Hewlett-Packard і Sun Microsystems.

Проте такі ОЗ важко застосовувати для обробки даних, поданих у вигляді масивів, оскільки про паралелізм таких обчислювачів можна говорити лише в разі застосування множини SISD-комп'ютерів. Відповідно, така структура не може забезпечити належної швидкості обробки, яка необхідна для матричних даних та характеризується великими апаратними затратами.

**2) MISD (multiple instruction stream / single data stream)** – множинний потік команд і одиночний потік даних [13]. Теоретично в цьому типі машин безліч інструкцій повинна виконуватися над єдиним потоком даних. До цих пір жодної реальної машини, що належала б до цього класу, не було створено. Як аналог роботи такої системи, мабуть, можна розглядати роботу з базою даних. З будь-якого терміналу можна подати команду і щось зробити з наявним банком даних. Оскільки база даних одна, а команд багато, то ми маємо справу з множинним потоком команд і одиночним потоком даних.

Обчислювачі з такою будовою не можуть бути застосовані до обробки масивів даних, оскільки такі масиви є 3-вимірними (набір 2-вимірних зрізів, що розташовані один за одним). Тобто дані не можуть бути представлені у вигляді одиночного потоку, що робить застосування MISD недоцільною для таких систем.

**3) SIMD (single instruction stream / multiple data stream)** – одиночний потік команд і множинний потік даних. Ці системи, зазвичай, мають велику кількість процесорів, в межах від 1024 до 16384, які можуть виконувати одну і ту ж інструкцію відносно різних даних в жорсткій конфігурації. Єдина інструкція паралельно виконується над багатьма елементами даних. Прикладами SIMD-машин є системи CPP DAP, Gamma II і Quadrics Apemille. Іншим підкласом SIMD-систем є векторні комп'ютери [14]. Векторні комп'ютери маніпулюють масивами схожих даних подібно до того, як скалярні машини обробляють окремі елементи таких масивів. Це робиться за рахунок використання спеціально сконструйованих векторних центральних процесорів. Коли дані обробляються за допомогою векторних модулів, результати можуть бути видані на один, два або три такти частотогенератора (такт частотогенератора є основним часовим параметром системи). При роботі у векторному режимі векторні процесори обробляють дані практично паралельно, що робить їх у декілька разів швидшими, ніж при роботі в скалярному режимі. Прикладами систем подібного типу є, наприклад, комп'ютери Hitachi S3600.

Застосування обчислювачів на основі такої архітектури можливе у СО для задач обробки масивів даних. Підвищення швидкості обробки відбувається за рахунок паралелізму виконання матричних операцій (виконання над всім масивом даних єдиної команди керування).

**4) MIMD (multiple instruction stream / multiple data stream)** – множинний потік команд і множинний потік даних. Ці машини паралельно виконують декілька потоків інструкцій над різними потоками даних. На відміну від багатопроцесорних SIMD-машин, згаданих вище, команди і дані зв'язані, тому що вони є різними частинами одного і того ж виконуваного завдання. Наприклад, MIMD-системи можуть

паралельно виконувати безліч підзадач з метою скорочення часу виконання основного завдання.

Наявність великої різноманітності систем, що потрапляють в цей клас, робить класифікацію Фліна не повністю адекватною. Дійсно і чотирипроцесорний SX-5 компанії NEC, і тисячопроцесорний CRAY T3e – обидва потрапляють в цей клас. Це змушує використовувати інший підхід до класифікації, що інакше описує класи комп'ютерних систем [14]. Основна ідея такого підходу може бути такою. Вважається, що множинний потік команд може бути оброблений двома способами: або одним конвеєрним пристроєм обробки в часі, що працює в режимі розділення, для окремих потоків; або кожен потік обробляється своїм власним пристроєм. Перша можливість використовується в MIMD-комп'ютерах, які, зазвичай, називають конвеєрними або векторними, друга – в паралельних комп'ютерах. У основі векторних комп'ютерів лежить концепція конвеєризації, тобто явної сегментації арифметичного пристрою на окремі частини, кожна з яких виконує свою підзадачу для пари операндів. У основі паралельного комп'ютера лежить ідея використання для вирішення одного завдання декількох процесорів, що працюють спільно, причому процесори можуть бути як скалярними, так і векторними [15].

**SMP-систему (symmetric multiprocessing)** – системи на основі симетричної багатопроцесорної архітектури. Головною особливістю SMP-систем є наявність загальної фізичної пам'яті, що розділяється всіма процесорами. Пам'ять є способом передачі повідомлень між процесорами, при цьому всі обчислювальні пристрої при зверненні до неї мають рівні права і одну і ту ж адресацію для всіх елементів пам'яті. Тому SMP-архітектура називається симетричною. Остання обставина дозволяє дуже ефективно обмінюватися даними з іншими обчислювальними пристроями. SMP-система будується на основі високошвидкісної системної шини (SGI Powerpath, Sun Gigaplane, DEC Turbolaser), до слотів якої підключаються функціональні блоки трьох типів: процесори, операційна система і підсистема введення-виведення. Для під'єднання до модулів введення-виведення використовуються вже повільніші шини (PCI, Vme64). Найбільш відомими SMP-системами є SMP-сервери і робочі станції на базі процесорів Intel (IBM, HP, Compaq, Dell, ALR, Unisys, DG, Fujitsu і ін.) Вся система працює під управлінням єдиної операційної системи (зазвичай, unіx-подібної, але для Intel-платформ підтримується Windows NT). Операційна система автоматично (в процесі роботи) розподіляє процеси по процесорах, але інколи можлива і явна прив'язка [16].

Основні переваги SMP-систем:

- простота і універсальність для програмування;

- легкість в експлуатації;
- відносно невисока ціна.

До недоліків можна віднести те, що системи із загальною пам'яттю, побудовані на системній шині, погано масштабовані. Цей важливий недолік SMP-систем не дозволяє вважати їх посправжньому перспективними і застосовувати для обробки велико-розмірних масивів даних.

**MPP-системи (*massive parallel processing*)** – обчислювачі з масивно-паралельною архітектурою. Головна особливість такої архітектури полягає в тому, що пам'ять фізично розділена. В цьому випадку система будується з окремих модулів, що містять процесор, локальний банк операційної пам'яті, два комунікаційні процесори (роутери), інколи – жорсткі диски та інші пристрої введення-виведення. Один роутер використовується для передачі команд, інший – для передачі даних. По суті, такими модулями є повнофункціональні комп'ютери. Доступ до банку операційної пам'яті з цього модуля мають лише процесори з цього ж модуля. Модулі з'єднуються спеціальними комунікаційними каналами [16].

Головною перевагою систем з роздільною пам'яттю є гарна масштабованість: на відміну від SMP-систем в машинах з роздільною пам'яттю кожен процесор має доступ лише до своєї локальної пам'яті, у зв'язку з чим не виникає необхідності в потактовій синхронізації процесорів. Проте, слід відзначити такі їх недоліки:

- кожен процесор може використовувати лише обмежений об'єм локального банку пам'яті;
- відсутність загальної пам'яті помітно знижує швидкість міжпроцесорного обміну, оскільки немає загального середовища для зберігання даних, призначених для обміну між процесорами. Потрібна спеціальна техніка програмування для реалізації обміну повідомленнями між процесорами;
- висока ціна програмного забезпечення для масивно-паралельних систем з роздільною пам'яттю.

Системами з роздільною пам'яттю є суперкомп'ютери MVS-1000, IBM Rs/6000 SP, SGI, CRAY T3e, системи ASCI, Hitachi Sr8000, системи Parsytec. Машини останньої серії CRAY T3e від SGI, засновані на базі процесорів Dec Alpha 21164 з піковою продуктивністю 1200 Мфлопс/с (CRAY T3e-1200), здатні масштабуватися до 2048 процесорів [14].

Головною особливістю гібридної архітектури **NUMA (*nonuniform memory access*)** є неоднорідний доступ до пам'яті. Гібридна архітектура втілює в собі зручності систем із загальною пам'яттю і відносно дешевизну систем з роздільною пам'яттю. Суть цієї архітектури – в

особливій організації пам'яті, а саме: пам'ять є фізично розподіленою по різних частинах системи, але логічно не розділяється, так що користувач бачить єдиний адресний простір. Система складається з однорідних базових модулів (плат), що, в свою чергу, складаються з невеликого числа процесорів і блока пам'яті. Модулі об'єднані за допомогою високошвидкісного комутатора [16].

Підтримується єдиний адресний простір, апаратно підтримується доступ до віддаленої пам'яті, тобто до пам'яті інших модулів. При цьому доступ до локальної пам'яті здійснюється у декілька разів швидше, ніж до віддаленої. По суті, архітектура NUMA є MPP-архітектурою, де як окремі обчислювальні елементи беруться SMP-вузли. Вперше ідею гібридної архітектури запропонував Стів Воллох і втілював в системах серії Exemplar. Варіант Воллоха – система, що складається з восьми SMP-вузлів. Фірма HP купила ідею і реалізувала на суперкомп'ютерах серії SPP. Ідею підхопив Сеймур Крей (Seymour R. Cray) і додав новий елемент – когерентний кеш, створивши так звану архітектуру CC-NUMA (Cache Coherent Non-Uniform Memory Access), яка розшифровується як «неоднорідний доступ до пам'яті із забезпеченням когерентності кешів». Він її реалізував на системах типу Origin.

PVP (Parallel Vector Process) – паралельні обчислювачі з векторними процесорами. Основною ознакою PVP-систем є наявність спеціальних векторно-конвеєрних процесорів, в яких передбачені команди однотипної обробки векторів незалежних даних, що ефективно виконуються на конвеєрних функціональних пристроях. Як правило, декілька таких процесорів (1–16) працюють одночасно із загальною пам'яттю (аналогічно SMP) в рамках багатопроесорних конфігурацій [17]. Декілька таких вузлів можуть бути об'єднані за допомогою комутатора (аналогічно MPP). Таким чином, системи PVP-архітектури можуть бути машинами загального призначення. Проте, оскільки векторні процесори досить дорогі, ці машини не будуть загальнодоступними.

СО з паралельною обробкою можуть бути створені на основі конвеєрних пристроїв, багатопроесорних систем та однорідних матричних структур.

Ідея конвеєрної обробки полягає у виділенні окремих етапів виконання загальної операції, причому кожний етап, виконавши свою роботу, передавав би результат наступному, одночасно приймаючи нову порцію вхідних даних. Проте недоліком конвеєрних пристроїв є великі апаратні затрати та висока вартість, яка з них випливає.

Суть використання багатопроесорних систем полягає у розпаралелюванні обробки вхідного масиву даних на декілька процесорів.

Тобто, висока швидкодія досягається в таких системах за рахунок одночасної обробки всього масиву на різних процесорах. Причому зі збільшенням процесорів зростає і швидкість обробки. Однак багатопроцесорні системи мають низку недоліків. Основним з них є те, що швидкість міжпроцесорної взаємодії значно нижча швидкості локальної обробки кожним процесором. Крім того, збільшення числа процесорів веде до збільшення вартості таких систем.

Однорідні матричні структури характеризуються поодинокими елементами, які зібрані в масиви, за допомогою яких і реалізується паралелізм для СО. В свою чергу, всі елементи цього масиву мають свою адресу, і обробляють лише ті дані, які на них надходять, не взаємодіючи при цьому з іншими елементами масиву. Такі структури можуть бути реалізовані на електронних, оптико-електронних та оптичних елементах.

Одним із варіантів реалізації однорідних матричних структур може бути використання керованих транспарантів як елементів введення-виведення, так і обробки даних. Керовані транспаранти служать для просторової модуляції оптичного сигналу за амплітудою, фазою чи для поляризації і застосовуються в системах введення-виведення даних. Існують СО з використанням оптично керованих та електрично керованих транспарантів.

СО з використанням керованих транспарантів відносять до ОЗ типу SIMD, і вони є найбільш перспективними, оскільки за рахунок великої розмірності транспарантів можна забезпечити високий рівень паралелізму передачі даних, а за рахунок ефективного керування транспарантом можна значно підвищити швидкодію таких СО.

### **1.3 Класифікація та порівняльна характеристика транспарантів як елементів спеціалізованих обчислювачів з паралельною обробкою інформації**

В основі роботи керованих транспарантів можуть лежати різні фізичні явища: електрооптичний, магнітооптичний або акустооптичний ефекти. Тому, в залежності від ефекту, який лежить в основі роботи, розрізняють вид модулятора.

Робота електрооптичного модулятора базується на електрооптичному ефекті. Він полягає в зміні оптичних властивостей матеріалу під впливом електричного поля. При прикладанні до кристала напруги відбувається зміна напряму поляризації світла, що пройшло через кристал. Для здійснення амплітудної модуляції падаючого випромінювання електрооптичний кристал розміщують між поляризатором і аналізатором із взаємно ортогональними площинами пропускання. Поляризатор, що знаходиться на вході модулятора, пропускає тільки



плоскополяризовану складову вхідного світлового потоку, який надходить від джерела випромінювання. Якщо до кристала не було прикладено напругу, то напрям поляризації світлової хвилі не змінюється, і вона затримується вихідним аналізатором. Якщо ж напруга прикладена, то площина поляризації хвилі повертається на кут, пропорційний величині електричного поля в кристалі, і частина світлового потоку з набутою поляризацією проходить крізь аналізатор. Умовою максимальної яскравості є поворот поляризації вхідної хвилі в кристалі на  $90^\circ$ .

Системи на основі електрооптичних модуляторів мають значні обмеження: висока напруга керування; нерівномірність електричних характеристик, що обумовлено дефектністю кристала; необхідність низьких робочих температур для забезпечення необхідної чутливості [17].

Робота магнітооптичного модулятора базується на ефекті Фарадея, який полягає у зміні напрямку поляризації випромінювання, що проходить через речовину, при наведенні в ній магнітного поля. Схема роботи аналогічна схемі роботи електрооптичного модулятора. Недоліками магнітооптичних модуляторів є їх сильне нагрівання і нетехнологічність [17].

Акустооптичні пристрої дозволяють керувати амплітудою, частотою, поляризацією, спектральним складом світлового сигналу і напрямом розповсюдження світлового променя [18, 19]. Під впливом механічних деформацій, що переносяться звуковою хвилею, виникає просторова модуляція оптичних властивостей. Оптичні властивості середовища змінюються в часі з частотою звукової хвилі, тобто значно повільніше як в порівнянні з періодом електромагнітних коливань в світловій хвилі, так і в порівнянні з часом проходження світлового променя через звуковий пучок. Акустооптичні модулятори при максимальній простоті конструкцій дозволяють здійснювати певний клас таких складних операцій, як паралельна обробка інформації (кореляційна згортка, фільтрація [20]) в акустооптичних процесорах.

За способом керування модуляцією світлового пучка розрізняють електрично й оптично керовані транспаранти. Обидва типи можуть здійснювати дискретну чи аналогову модуляцію. У першому випадку транспарант повинен мати нелінійну характеристику, у другому, навпаки, лінійну залежність його оптичних властивостей від керувального сигналу.

Як показано на рис. 1.2 існують оптично та електрично керовані транспаранти [21]. В оптично керованих транспарантах як керувальний сигнал використовується оптичне випромінювання, а модуляція здійснюється за рахунок зміни оптичних властивостей матеріалу при дії різних зовнішніх факторів (прикладеної напруги, довжини хвилі, електричного поля та ін.).

Серед різних типів оптично керованих транспарантів найбільш відомі пристрої, у яких використовується зміна фотопровідності в шарі напівпровідника в результаті освітлення (рис. 1.3). Цей шар є необхідним елементом багат шарової структури типу конденсатора, на обкладках якого присутні електричні заряди, створювані електронним пучком чи прикладеною електричною напругою. Іншим елементом структури є шар електрооптичного матеріалу.



Рисунок 1.2 – Типи керованих транспарантів

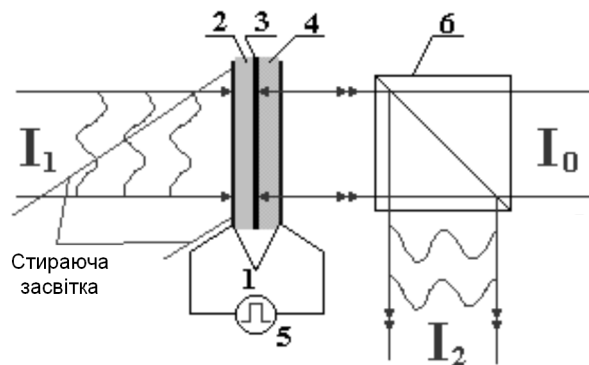


Рисунок 1.3 – Схема побудови оптично керованого транспаранта відбиваючого типу з однорідним модульовальним шаром:

- 1 – прозорі електроди; 2 – шар фотопровідника;
- 3 – оптичний розділювальний шар; 4 – світломодульовальний шар;
- 5 – генератор імпульсів напруги; 6 – поляризувальний розкладач променя;
- $I_0$  – зчитувальна хвиля;  $I_1$  – керувальна хвиля вхідного зображення;
- $I_2$  – відбита хвиля з вихідним зображенням

Запис інформації здійснюється шляхом одночасної подачі постійної напруги і експозиції фотопровідника модульованим світловим пучком (керувальна хвиля  $I_1$ ). При цьому відбувається перерозподіл різниці потенціалів, прикладеної до структури. Модульований світловий пучок створює у фотопровіднику заряджені носії, що дрейфують до поверхні фотопровідник–електрооптичний матеріал. Електричне поле, що прикладається до транспаранта, просторово послаблюється фотоносіями пропорційно інтенсивності падаючого світла. Це приводить до зміни оптичних властивостей електрооптичного матеріалу у відповідності з керувальною хвилею [21].

Для неруйнівного зчитування записаних даних треба використовувати світло з іншою довжиною хвилі. Зчитування може проводитися за допомогою пройденого чи відбитого світла. При роботі у відбитому світлі між фотопровідником і електрооптичним матеріалом міститься оптичний розділювальний шар [22]. У результаті зчитувальна хвиля  $I_0$ , яка пройшла через електрооптичний шар, піддається амплітудній чи фазовій модуляції. Після припинення дії імпульсу напруги структура повертається до початкового стану. Іноді для стирання застосовується зовнішнє засвічування. При планарній конструкції транспарантів такого типу для модуляції можуть застосовуватися повздовжній ефект Поккельса на кристалах типу DKDP, KDP, ADP; електропоглинання внаслідок дії ефекту Франца-Келдиша в широкозонних напівпровідниках типу GaAs, Cd, Ga; динамічне розсіювання в рідких кристалах та інші [22, 23].

Одним із останніх досягнень в області оптичних модуляторів стало створення компанією Intel кремнієвого просторово-часового модулятора світла, на основі якого отримана швидкодія обробки даних до 10 Гбіт/с. В основі такого модулятора лежить інтерферометр Маха–Цендера, і він має досить мініатюрні розміри (в 100 разів менший, ніж існуючі на сьогодні модулятори), що дозволяє інтегрувати його на одному чіпі і розміщувати на друкованих платах [24]. Серед недоліків цього модулятора є те, що нагрівання і охолодження лазера модулятора може призвести до помилок (внаслідок викривлення імпульсів). Але для вирішення цієї проблеми використовується зовнішня модуляція джерела [25].

Як показано на рис. 1.2, за способом керування транспаранти бувають оптично та електрично керовані. Оптично керовані транспаранти поділяються на дві групи: транспаранти, які працюють на пропускання, і транспаранти, які працюють на відбиття. Обидві ці групи можуть класифікуватись за напрямом розповсюдження пучків та за довжиною хвилі.

Транспаранти на пропускання, в яких напрями розповсюдження керувального та інформаційних пучків не збігаються, мають вигляд, показаний на рис. 1.4а. Інформаційний пучок надходить на транспарант з одного боку, проходячи крізь нього, а керувальний – з іншого, регулюючи параметри вихідного (що пройшов) пучка.

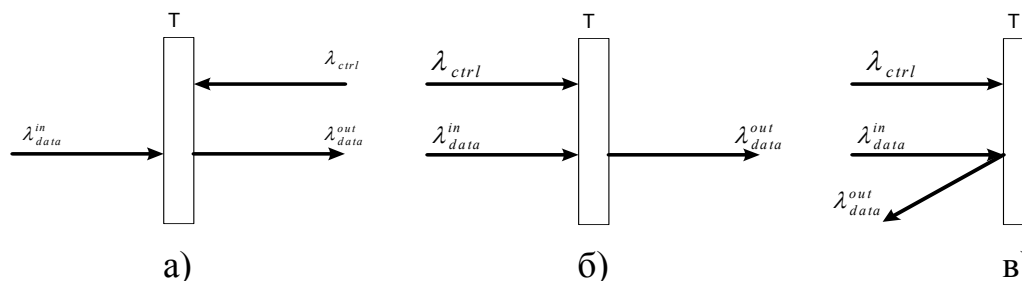


Рисунок 1.4 – Варіанти освітлення транспаранта керувальними та інформаційними пучками

Структурна схема транспаранта на пропускання, в якому напрями розповсюдження керувального та інформаційних пучків збігаються, зображена на рис. 1.4б. На цій структурі інформаційний та керувальний промені надходять на транспарант з одного боку, а вихідний промінь з'являється з іншого боку, пройшовши крізь транспарант. Застосування першого або другого варіанта транспаранта на пропускання зумовлюється технологічними особливостями СО. Оптичні транспаранти, що працюють на відбиття, мають вигляд, показаний на рис. 1.4в. Такі транспаранти можуть бути реалізовані лише в тому випадку, коли напрями інформаційного і керувального променів збігаються, оскільки технологія їх виготовлення передбачає їх інтеграцію в СО, залишаючи «робочою» тільки одну поверхню транспаранта. Це дозволяє зменшити розміри СО.

Що стосується значень довжин хвиль (керувальної та інформаційної) для транспарантів, то вони можуть бути або однаковими, або відрізнятися незалежно від того, працює цей пристрій на відбиття чи на пропускання. Особливістю варіанта з різними довжинами інформаційної та керувальної хвиль є те, що вихід одного елемента (транспаранта) не може бути використаний як вхід іншого, оскільки на вході і виході елемента будуть різні довжини хвиль, що ускладнює створення послідовності таких елементів. Позитивною стороною такого варіанта є кращий коефіцієнт модуляції.

У варіантах з однаковими довжинами інформаційної та керувальної хвиль вирішено проблему створення послідовності елементів, оскільки як на вході, так і на виході елемента сигнал має однакову довжину хвилі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Свечников С. В. Квазиимпульсно-потенциальные элементы и устройства логико-временного типа / С. В. Свечников, В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко. – К. : Наукова думка, 1987. – 256 с.
2. Кожем'яко В. П. Оптоелектронна схемотехніка : навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, М. Г. Тарновський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 189 с.
3. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники : учебное пособие / В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лысенко, Ю. Ф. Кутаев. – К. : УМК ВО, 1990. – 251 с.
4. Кожем'яко В. П. Схемотехніка побудови оптоелектронних інтегральних схем обробки інформації : навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко, В. А. Суприган. – Вінниця : ВДГУ, 2003. – 103 с.
5. Осинский В. И. Распознавание образов при помощи квантового компьютера / В. И. Осинский // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2004. – № 1. – С. 101–109.
6. Готра З. Ю. Технология микрорелектронных устройств : справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
7. Фізичні основи електронної техніки : підручник / З. Ю. Готра, І. Є. Лопотинський, Б. А. Лук'янець [та ін.]. – Львів : Бескид Біт, 2004. – 880 с.
8. Osinsky V. Super High-Speed optoelectronics: technological fundamentals and economics // V. Osinsky // Proc. Of SPIE. 2000. – V. 4425, P. 263 – 271.
9. Miller D. A. B. Quantum-well self-electro-optic effect device / D. A. B. Miller // Optical and Quantum electronics. – 1990. – № 22. – P. 61–98.
10. Spatial light modulator and optical dynamic memory using a  $6 \times 6$  array of self-electro-optic-effect devices / D. A. B. Miller, J. E. Henry, A. C. Gossard, and J. H. English // Optics Letters. – 1988. – № 13. – P. 297–299.
11. Натрошвили О. Г. Организация оптоэлектронных некогерентных процессоров ЦВМ / О. Г. Натрошвили, В. П. Кожемяко, Д. О. Саникидзе. – Тбилиси : Ганатлеба, 1989. – 510 с.
12. Зиятдинов С. И. Проектирование специализированных вычислителей цифровой обработки сигналов : учебное пособие / С. И. Зиятдинов, Л. А. Осипов. – СПб. : СПбГУАП, 2002. – 75 с.
13. Шпаковский Г. И. Организация параллельных ЭВМ и суперскалярных процессоров / Г. И. Шпаковский. – М. : Радио и связь, 1992. – 295 с.

14. Воеводин В. В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 532 с.
15. Азаров О. Д. Аналого-цифрові інтерфейси ЕОМ : навчальний посібник / О. Д. Азаров, В. П. Марценюк, Н. О. Біліченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 179 с.
16. Гергель В. П. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем : учебное пособие / В. П. Гергель, Р. Г. Стронгин. 2-е изд., доп. – Нижний Новгород : издательство Нижегородского государственного университета, 2003. – 286 с.
17. Васильев А. А. Пространственные модуляторы света / А. А. Васильев, Д. Кайсесент. – М. : Радио и связь, 1987. – 284 с.
18. Cholesteric gratings with field-controlled period / D. Subasius, S. V. Shiyanovskii, P. Bos, and O. D. Lavrentovich // Appl. Phys. Lett. 71. – 1997. – P. 3323–3325.
19. A. Y. G. Fuh. Dynamic pattern formation and beam steering characteristics of cholesteric gratings / A. Y. G. Fuh, C. H. Lin, and C. Y. Huang, Jpn. J. // Appl. Phys. – 2002. – Part 1, № 41. – P. 211–218.
20. Мартинюк Т. Б. Кореляція, фільтрація та сегментація зображень : лабораторний практикум / Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко, Я. Г. Скорюкова. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 80 с.
21. Лисенко Г. Л. Аналіз сучасних типів транспарантів та їх характеристик / Г. Л. Лисенко, І. В. М'яківська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 2 (14). – С. 145–153.
22. Компанец И. Н. Электрически управляемая модуляция света в ЦТСЛ–керамике / Компанец И. Н., Семочкин П. Н., Соболев А. Г. // Управляемые транспаранты и реверсивная запись оптических сигналов. – М. : Наука, 1981. – С. 27–30.
23. Орлов В. А. Оптоэлектронное быстродействующее арифметическое устройство на управляемых транспарантах / В. А. Орлов, Ю. М. Попов // Автометрия. – 1982. – № 6. – С. 45–48.
24. Ultracompact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator / William M. J. Green, Michael J. Rooks, Lidija Sekaric, Yurii A. Vlasov // Optics Express, 2007. – P. 1118–1126.
25. Оптическая обработка информации / под ред. Д. Кайсесента. – М. : Мир, 1980. – 312 с.
26. Вистинь Л. К. Новое электроструктурное явление в жидких кристаллах нематического типа / Л. К. Вистинь // ДАН СССР, 1980. – С. 21–24.
27. Жидкокристаллический управляемый транспарант с индивидуальной адресацией / Г. Ш. Мцкерадже, А. А. Ермаков, И. Н. Компанец, В. Я. Ремизов // Квантовая электроника. – 1988. – № 1. – С. 32–35.

28. Косарев А. И. Пространственные модуляторы света / А. И. Косарев, В. К. Соколов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1974. – № 8. – С. 59–79.
29. Вьюрков В. Гигантская электрооптика / В. Вьюрков // Nanoweeek. – 2009. – № 63. – С. 15–18.
30. Принципы построения оптических процессоров с переменными операторами / Н. Г. Басов, И. Н. Компанец, С. К. Ли и др. // Квантовая электроника. – 1988. – № 3. – С. 50–54.
31. Захаров И. С. Пространственно-временные модуляторы света / И. С. Захаров. – Томск : Изд. ТГУ, 1983. – 245 с.
32. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – М. : Высшая школа, 1986. – 352 с.
33. Васильев А. А. Разрешающая способность жидкокристаллических пространственных модуляторов излучения: математическое моделирование и экспериментальные результаты / А. А. Васильев, Ю. К. Грузевич. – М. : Препринт, 1986. – 215 с.
34. Парыгин В. Н. Электрооптика, акустооптика и оптическая обработка информации на кафедре физики колебаний МГУ / В. Н. Парыгин, В. И. Балакший, В. Б. Волошинов // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 7. – С. 775–792.
35. Задорин А. С. Динамика акустооптического взаимодействия / А. С. Задорин. – Томск : Томский гос. университет, 2004. – 223 с.
36. Магдич Л. Н. Акустооптические устройства и их применение / Л. Н. Магдич, В. Я. Молчанов. – М. : Сов. радио, 1978. – 218 с.
37. Жидкокристаллический дисплей с ПВМС / Н. Ф. Ковтонюк, А. В. Борошнев, А. Л. Клюкин, А. В. Соколов // Оптический жур. – 1993. – № 7. – С. 74 – 77.
38. Смит Р. Полупроводники / Р. Смит – М. : Мир, 1982. – 560 с.
39. Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения типа  $A^{III}B^V$ ) / Под ред. Р. Уиллардсона и А. Бира. – М. : Мир, 1970. – 488 с.
40. Energy scaling and subnanosecond switching of symmetric self-electrooptic effect devices / A. L. Lentine, L. M. F. Chirovsky, L. A. D'Asaro [та ін.] // IEEE Photonics Tech. Lett. – 1989. – № 1. – P. 129–131.
41. Васильев А. А. Пространственные модуляторы света / А. А. Васильев, Д. Кайсасент. – М. : Радио и связь, 1987. – 284 с.
42. Finader O. Photonic integration for optical interconnects: from chip scale to long distance / Onur Finader. A dissertation submitted to the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy, 2007. – P. 19–23
43. Yairi M. B. An optically controlled optoelectronic switch: from theory to 50 gigahertz burst-logic demonstration / Micah B. Yairi.

A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2001. – 210 p.

44. Optically-controlled electroabsorption modulators for unconstrained wavelength conversion / V. A. Sabnis, H. V. Demir, O. Fidaner [та ін.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – № 84. – P. 469–471.

45. Кузьмін І. В. Основи теорії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем / І. В. Кузьмін // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – № 1(2). – 1994. – С. 5–9.

46. Кузьмин И. В. Специализированный процессор для обработки изображений / И. В. Кузьмин, А. А. Стащенко // *II Всесоюзная научно-техническая конференции по функциональной оптоэлектронике : матеріалі конференції.* – Вінниця, Тбілісі : Издательство Грузинского политехнического института. – 1987. – С. 484–486.

47. Wu-chun Feng. The Green500 List: Encouraging Sustainable Supercomputing / Wu-chun Feng, Kirk W. Cameron // *IEEE Computer.* – 2007. – Режим доступу до журн.: <http://www.osp.ru/os/2008/01/4839411/>.

48. Основи інформаційних систем : навч. посібник / під ред. Ситника В. Ф. [та ін.] – К. : КНЕУ, 1997. – 252 с.

49. Оптические свойства полупроводников : справочник / В. И. Гав-риленко, А. М. Грехов, Д. В. Корбутяк, В. Г. Литовченко. – К. : Наукова думка, 1987. – 608 с.

50. Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol.1 / M. P. Mikhailova., M. Levinshtein, S. Rumyantsev [та ін.] – London : World Scientific, 1996. – P. 147–168.

51. Handbook Series on Semiconductor Parameters, vol.1 / M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. – London : World Scientific, 1996. – P. 169 – 190.

52. Mialkivska I. Using optical properties of semiconductor materials for modulators realization / Gennadiy Lysenko, Iryna Mialkivska // *Optics and Photonics for Information Processing, Proc. SPIE.* – 2007. – № 6695. – 10 p.

53. Диэлектрическая функция твердых растворов GaPAs в области колебательного поглощения / А. В. Гончаренко, О. С. Горя, Н. Л. Дмитрук [та ін.] // *ЖТФ.* – 2001. – № 8. – С. 39–47

54. Пихтин А. Н. Оптическая квантовая электроника / А. Н. Пихтин. – М. : Высшая школа, 2001. – 573 с.

55. Ивкин А. Фотопропускание на связанных экситонах в GaP(N) и GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>(N) / А. Н. Ивкин, А. Н. Пихтин // *Письма в ЖТФ.* – 1998. – Т. 24, № 11. – С. 18–19.

56. Днепроvский В. С. Экситоны перестают быть экзотическими квазичастицами / В. С. Днепроvский // *Соросовский образовательный журнал.* – 2000. – Т. 6, № 8. – С. 88–92.



57. Исследование эффекта Штарка вертикально сопряженных квантовых точек в гетероструктурах InAs/GaAs // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, вып. 9. – С. 1089–1096.

58. Грибковский В. П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках / В. П. Грибковский. – Минск : Наука и техн., 1975. – 322 с.

59. Мялківська І. Дослідження оптичних властивостей напівпровідникових матеріалів типу  $A^{III}B^V$  для виготовлення транспарантів / Г. Л. Лисенко, І. В. Мялківська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2006. – № 2(12). – С. 171–177.

60. Алесковский В. Б. Физико-химические методы анализа. Практическое руководство / В. Б. Алесковский. 2-е изд., пер. и испр. – Л. : Химия, 1971. – 424 с.

61. Vijit Sabnis. Optically-controlled electroabsorption modulators for future generation optical networks // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2003. – 166 p.

62. Noah Charles Helman. Optoelectronic modulators for optical interconnects // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2005. – 178 p.

63. Bianca Elizabeth Nelson Keller. Wavelength division multiplexed optical interconnects using short pulses // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2002. – P. 48.

64. Gordon Arthur Keller. Optical interconnects to silicon CMOS: integrated optoelectronic modulators and short pulse systems // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2002. – 182 p.

65. Excitons in resonant coupling of quantum wells/ A. M. Fox, D. A. B. Miller, G. Livescu [and other] // Physical Review B. – 1990. – V. 42, № 3. – P. 1841–1844.

66. High-speed absorption recovery in quantum well diodes by diffusive electrical conduction / G. Livetsu, D. A. B. Miller, T. Sizer [and other] // Appl. Phys. Lett. – 1989. – V. 54 – P. 748.

67. Schmitt-Rink S. Linear and nonlinear optical properties of semiconductor quantum wells/ S. Schmitt-Rink, D. S. Chemla, D. A. B. Miller // Advances in Physics. – 1989. – V. 38, № 2. – P. 89–188.

68. М'ялківська І. В. Оптичні транспаранти з багатохвильовим керуванням для паралельної обробки даних у матричних спецобчислювачах / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // PHOTONICS-ODS 2008 : міжнар. конф. з оптоелектронних інформаційних технологій : тези допов. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – С. 48–49

69. М'ялківська І. В. Оптимізація спеціалізованих обчислювальних систем для виконання складних матричних операцій на основі оптичних транспарантів / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 1. – 7 с. Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-1/2009-1.htm>.

70. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.

71. Лисенко Г. Л. Оптимізація спеціалізованих обчислювальних систем для виконання складних матричних операцій на основі оптичних транспарантів / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // Контроль і управління в складних системах : міжнар. наук.-техн. конф. : тези допов. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 1 с.

72. Пат. України, МПК<sup>8</sup> G 09 G 3/14. Оптоелектронний повний суматор / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська, О. В. Дюдюк; заявник і патентовласник ВНТУ. – № 200900895; заявл.06.02.09; опубл. 25.06.09, Бюл. № 12.

73. Лисенко Г. Л. Моделювання оптоелектронних систем з оптичним напівпровідниковим транспарантом для здійснення матричних операцій / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // Теорія та методи обробки сигналів (ТМОС–2008): міжнар. наук.-техн. конф. : тези допов. – К. : НАУ, 2008. – С. 82–83.

74. Мартинюк Т. Б. Системотехніка оптоелектронних та лазерних систем. Лабораторний практикум / Т. Б. Мартинюк, Н. І. За-болотна. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 119 с.

75. Цирульник С. М. Розробка принципів побудови і структурної організації динамічної пам'яті на волоконно-оптичних лініях : автореф. дис. канд. техн. наук / С. М. Цирульник. – Вінниця, 2007. – 19 с.

76. Войцеховский А. В. Оптика полупроводников : учебное пособие / А. В. Войцеховский, А. С. Петров, Г. Й. Потахова. – Томск : Томский гос. ун-т, 1987. – 368 с.

77. Лисенко Г. Л. Оптоелектронний пристрій на основі транспарантів з повним набором логічних операцій для роботи з матрицями / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська, О. В. Дюдюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 1(17). – С. 71–76.

78. Способи вирішення проблеми довгострокового зберігання інформації, записаної в цифровому вигляді / В. В. Петров,

А. А. Крючин, С. М. Шанойло [та ін.] // Доповіді Національної академії наук України. – 2003. – № 4. – С. 52–58.

79. Корнеев В. В. Параллельные вычислительные системы / Корнеев В. В. – М. : Нолидж, 1999. – 256 с.

80. Кожемяко В. П. Системный анализ параллельных оптоэлектронных процессоров / В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартинюк, Н. И. Заболотная. – Львов, 1992. – 118 с. – (Препр. / АН України)

81. Мялківська І. В. Використання оптичних транспарантів для спеціалізованих обчислювальних систем / І. В. Мялківська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 123–129.

82. Конструкция и технология изготовления матриц вертикально-излучающих лазеров / Н. А. Малеев, А. Г. Кузьменков, А. Е. Жуков [и др.] // ФТП. – 2005. – Т. 39, выпуск 4. – С. 487–491.

83. Лазеры на основе InGaAs/InP с квантовыми слоями / Е. Г. Голикова, В. П. Дураев, С. А. Козиков [и др.] // Квантовая электроника. – 1995. – Т. 22, № 2. – С. 105–107.

84. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором: навч. посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. – 162 с.

85. Rafael I. Aldaz. Towards monolithic integration of mode-locked vertical cavity surface emitting laser // A dissertation submitted to the department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford university in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, 2007. – 198 p.

86. Larry A. Coldren. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits / Larry A. Coldren, Scott W. Corzine. – Wiley: Interscience publication, 1995. – 594 p.

87. Fabrication of a two-dimensional phased array of vertical cavity surface-emitting lasers / Y.-J. Yoo, A. Scherer, J. P. Harbison [та ін.] // Appl. Phys. Lett. – 1990. – V. 56. – P. 1198–1200.

88. Лисенко Г. Л. Елементарна комірка оптичного транспаранта для оптоелектронних обчислювальних комплексів на SEED-структурах / Г. Л. Лисенко, І. В. Мялківська // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП–2007) : III Міжнародна наук.-техн. Конференція : тези допов. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – С. 182–183.

89. Надежность и эффективность АСУ / Заренин Ю. Г., Збырко М.Д. и др. – К. : Техника, 1975. – 368 с.

90. Натрошвили О. Г. Повышение эффективности устройств функциональной оптоэлектроники / О. Г. Натрошвили, Л. Ш. Иманнашвили, З. К. Кобесашвили // Оптоэлектронные методы и средства

обработки изображений : Всесоюзная конф. : тезисы докл. – Винница, Тбилиси, 1987. – С. 207–212.

91. Лисенко Г. Л. Елементарна комірка оптичного транспаранта для оптоелектронних обчислювальних комплексів на SEED-структурах / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 5. – С. 90–94.

92. Захаров С. М. Оптоэлектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров / С. М. Захаров, В. Б. Федоров, В. В. Цветков // Квантовая электроника. – 1999. – Вып. 28, № 3. – С. 189–206.

93. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, А. Хилл. – М. : Мир. – 1998. – 704 с.

94. Кожем'яко В. П. Оптоелектронна схемотехніка на логіко-часових інформаційно-обчислювальних середовищах / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1994. – № 2–3. – С. 23–25.

95. Кошельна І. В. Оптоелектронний десятковий пристрій / І. В. Кошельна, М. Аль Равашдех // XXXIII науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області, присвячена 80-річчю професора І. В. Кузьміна : тези допов. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – С. 96.

96. Пат. 63750 Україна, МПК<sup>7</sup> G 06 F 7/62. Оптоелектронний десятковий пристрій / Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко, І. В. Кошельна, М. Аль Равашдех; заявник і патентовласник ВНТУ. – №2003065360 ; заявл. 10.06.03 ; опубл. 15.01.04, Бюл. № 1.

97. Натрошвили О. Г. Устройство сравнения на многофункциональных оптоэлектронных модулях. / О. Г. Натрошвили, В. П. Кожем'яко, О. М. Гунченко [и др.] // Функциональная оптоэлектроника в ВТ и устройствах управления : Всесоюзная конф. : тезисы докл. – Тбилиси, 1986. – С. 41–46.

98. Пат. 17396 Україна, МПК<sup>7</sup> G 06 F 7/556. Пристрій для оброблення чисел / Т. Б. Мартинюк, О. В. Король, І. В. М'ялківська, А. О. Лу-ньов; заявник і патентовласник ВНТУ. – № 200604102 ; заявл. 13.04.06 ; опубл. 15.09.06, Бюл. №9.

99. Пат. 11296 Україна, МПК<sup>7</sup> G 06 F 7/556. Оптоелектронний десятковий пристрій / Т. Б. Мартинюк, Г. Л. Лисенко, І. В. Кошельна, А. В. М'ялківський; заявник і патентовласник ВНТУ. – № 200506064 ; заявл. 21.06.05 ; опубл. 15.12.05, Бюл. № 12.

100. Пат. України, МПК<sup>5</sup> G 01 R 19/00. Оптоелектронний матричний індикатор напруги / В. П. Кожем'яко, О. А. Ремінний, І. В. М'ял-

ківська; заявник і патентовласник ВНТУ. – № 200901300 ; заявл. 16.02.09 ; опубл. 10.08.09, Бюл. № 15.

101. Пат. 12933 Україна, МПК<sup>5</sup> Н 03 К 17/00. Спосіб паралельної комутації / Г. Л. Лисенко, І. В. Кошельна, О. Ф. Ф. Абудаїа, О. В. Бурмакіна; заявник і патентовласник ВНТУ. – № 200506084; заявл. 21.07.05 ; опубл. 15.03.06. , Бюл. № 3.

102. Пат. 71261 Україна. МПК<sup>7</sup> Н 04 3/54, 7/005, G 02 F 1/00. Спосіб та пристрій повністю оптичної комутації / Г. Л. Лисенко, В. О. Тка-ченко, Ю. Г. Ропай, О. В. Бурмакіна, І. В. Кошельна, М. Аль Равашдех; заявник і патентовласник ВНТУ. – №20031211549 ; заявл. 15.12.03 ; опубл. 15.11.04р, Бюл. № 11.

103. Гнеденко Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М. : Наука, 1987. – 336 с.

104. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення : монографія / О. Д. Азаров. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–ВІННИЦЯ, 2004. – 260 с.

105. Оптическая обработка информации / под ред. Д. Кайсесента. – М. : Мир, 1980. – 312 с.

106. Лисенко Г. Л. Дослідження особливостей модифікованого паралельного інтерфейса НІРРІ в повністю оптичних мережах / Г. Л. Лисенко, І. В. Кошельна // Photonics ODS – 2005 : III міжнар. конф. з оптоелектронних інформаційних технологій : тези допов. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – С. 53–54.

107. Лисенко Г. Л. Застосування модифікованого паралельного інтерфейса НІРРІ в повністю оптичних мережах / Г. Л. Лисенко, І. В. Кошельна // XXXIV науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези допов. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – С. 95.

108. Кошельна І. В. Система керування інтерфейсом повністю оптичних мереж / І. В. Кошельна, О. В. Бурмакіна, У. Абудаїа // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2003. – № 1–2 (5–6). – С. 158–166.

109. Заболотна Н. І. Комп'ютерне моделювання задач лазерної та оптоелектронної техніки : навч. посібник / Н. І. Заболотна, С. В. Павлов, В. В. Шолота. – Вінниця : ВНТУ, 2003. – 151 с.

*Навчальне видання*

**Лисенко Геннадій Леонідович**  
**Мялківська Ірина Володимирівна**

**ОПТОЕЛЕКТРОННІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ  
ТРАНСПАРАНТИ ДЛЯ ШВИДКОДЮЧИХ  
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська  
Оригінал-макет підготовлено І. Мялківською

Підписано до друку 22.09.2015 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-29

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

**publish.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.