

УДК 621.391.63

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, Г.Д. ДОРОЩЕНКОВ, Т.Б. МАРТИНЮК, О.М. ГУЦОЛ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ НА БАЗІ МАТРИЦЬ СМАРТ-ПІКСЕЛІВ

Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,
E-mail: a.gutsol@gmail.com

Анотація. В статті розглянуто існуючі технології реалізації оптоелектронних інтегральних схем на базі матриць смарт-пікселів, їх функціональні можливості та області застосування. Наведено параметри окремих матриць смарт-пікселів з використанням вертикально випромінюючих лазерів.

Аннотация. В статье рассмотрены существующие технологии реализации оптоэлектронных интегральных схем на базе матриц смарт-пикселей, их функциональные возможности и области применения. Приведены параметры отдельных матриц смарт-пикселей с использованием вертикально излучающих лазеров.

Abstract. Existing smart pixel based optoelectronic integrated circuits technologies, functional abilities and application area are considered in the article. Parameters of separate vertical-cavity surface-emitting laser based smart pixels are given.

Ключові слова: оптоелектронна ІС, матриці смарт-пікселів, оптична передача даних, ВВЛ.

ВСТУП

З розвитком технологій багатопроцесорної обробки інформації виникла потреба в багатоканальних мережах передачі та комутації великих масивів даних, які б забезпечували високу пропускну здатність – більше 1 Тбіт/с [1, 2]. Фундаментальною складовою в таких мережах пропонується оптоелектронна структура, в якій прийом/передача даних відбувається в оптичному вигляді, а обробка – в електричному. Дана структура має назву «смарт-піксель» (англ. smart pixel) (рис. 1) і по суті являється оптоелектронною інтегральною схемою (ІС), в якій електронний чип, який виконує логічну обробку інформації, має, поряд з розташованими по його периферії електричними виводами, ще й оптичні входи/виходи [1 – 3]. Використання таких ІС дозволяє створювати компактні пристрої з тривимірними зв'язками і в платах двовимірної конструкції підвищити швидкість обміну інформацією між розміщеними на друкованій платі ІС.

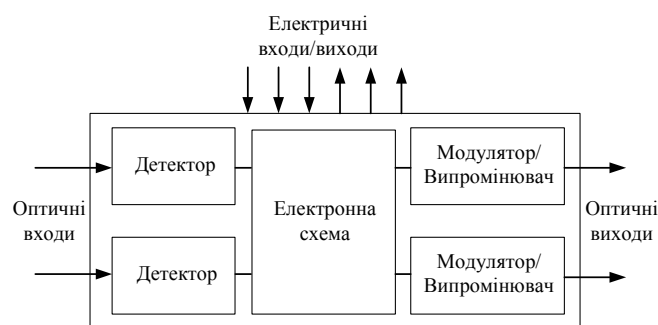


Рис. 1. Структура смарт-пікселя

В багатоканальному виконанні смарт-пікселі об'єднують в матрицю, яка може приймати/передавати інформацію у вигляді оптичного двовимірного масиву (рис. 2) [3, 4].

Концепція смарт-пікселів полягає в об'єднанні схем електронної обробки і окремих оптичних приладів на одному чипі, що дозволяє реалізувати складну електронну обробку та оптичну передачу/прийом інформації [5]. Переваги оптичної передачі з використанням світлових пучків, що розповсюджуються у вільному просторі, добре відомі [4]:

- передача даних в паралельному форматі по просторовим зв'язкам, що можуть перетинатись, зі швидкістю передачі інформації по кожному з них до 10 Тбіт/с;
- незалежна передача інформації на різних оптичних частотах;
- безконтактність з'єднань;
- нечутливість до електромагнітних перешкод.

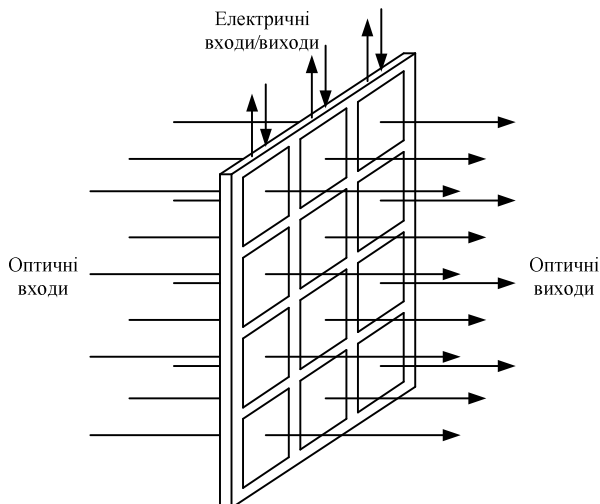


Рис. 2. Загальний вигляд матриці смарт-пікселів

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Застосування оптоелектронних ІС на базі матриць смарт-пікселів в значній мірі залежить від їх основних характеристик, а саме: щільності розташування смарт-пікселів в матриці, загальної кількості оптичних входів/виходів, функціональної складності, загальної продуктивності [4]. Таким чином, високопродуктивні (більше 100 Мбіт/с і числом оптичних входів/виходів 10 – 104) оптоелектронні ІС застосовуються в комутаційних системах, оптоелектронних з'єднувальних платах та спеціалізованих високопродуктивних обчислювальних пристроях. Матриці з великою кількістю оптичних входів/виходів (більше 105) використовують в дисплеях, аналогових оптичних процесорах, оптоелектронних нейромережах, оптичних запам'ятовувальних пристроях [5, 6].

В роботі [7] розроблено пристрій для класифікації образів за дискримінантними функціями з обробленням даних за різницевиими зрізами. Даний пристрій містить блок класифікації, який має матричну структуру для оброблення елементів дискримінантних функцій, крім того введення вхідного образу виконується оптично [8]. Тому, в якості оптоелектронної елементної бази для реалізації паралельної оптичної передачі/прийому та електронної обробки даних в запропонованому пристрої для класифікації образів доцільно використовувати оптоелектронні ІС на базі матриць смарт-пікселів.

Метою даної роботи є аналіз функціональних можливостей оптоелектронних ІС на базі матриць смарт-пікселів та існуючих технологій щодо їх реалізації з орієнтацією на використання як ключової оптоелектронної елементної бази для реалізації окремих блоків пристрою для класифікації образів.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА СТРУКТУРНІ РЕАЛІЗАЦІЇ МАТРИЦЬ СМАРТ-ПІКСЕЛІВ

В наш час існує декілька технологічних підходів реалізації оптоелектронних ІС на базі матриць смарт-пікселів, які головним чином відрізняються способом інтеграції електронних та оптичних приладів. На сьогодні виділяють три основні підходи: монолітна інтеграція, пряма епітаксія і гібридна інтеграція [5]. Монолітна інтеграція – це технологія, яка дозволяє розміщувати електронну та оптичну частину приладу на спільній напівпровідниковій підложці в єдиному процесі вирощування структури. В технології прямої епітаксії прилади напівпровідникових з'єднань вирощуються безпосередньо на кремнієвій підложці. Нарешті, в гібридній технології оптичні прилади вирощуються окремо від кремнієвої електронної частини, а потім ці складові з'єднуються за допомогою різних методів [5].

Також оптоелектронні ІС на базі смарт-пікселів поділяють за приладами, які застосовані в якості вихідних елементів. Так, виділяють смарт-пікселі з використанням модуляторів та активних джерел випромінювання [3 – 5]. Оскільки у 80-х роках значного успіху було досягнуто у створенні оптичних модуляторів на базі приладів з внутрішнім електро-оптичним ефектом (англ. SEED – self electrooptic effect device), тому смарт-пікселі на основі модуляторів були розроблені першими та включені в ряд

демонстраційних систем [3]. Наприклад, з використанням смарт-пікселів на базі модуляторів було розроблено 64-бітовий мікропроцесор (компанія AT&T-ARPA), який налічував 128 оптичних приймачів, 64 оптичних випромінювачів і працював з тактовою частотою 100 МГц [6].

Нижче представлено різновиди смарт-пікселів з використанням модуляторів [1, 3, 5], таблиця 1:

1) FET-SEED (field effect transistor-self electrooptic effect device) – смарт-пікселі виконані по технології монолітної інтеграції з використанням польових транзисторів та модуляторів на основі приладів з внутрішнім електрооптичним ефектом;

2) CMOS-SEED (complementary metal-oxide-semiconductor-self electrooptic effect device) – смарт-пікселі виконані по гібридній технології з використанням модуляторів на основі приладів з внутрішнім електрооптичним ефектом;

3) LCOS (liquid-crystal-on-silicon) – гібридна технологія смарт-пікселів з використанням модуляторів на рідких кристалах на кремнієвій підложці.

Серед смарт-пікселів на основі випромінювачів виділяють такі [1, 3, 5]:

1) MSM/VCSEL (metal-semiconductor-metal/vertical-cavity surface-emitting laser) – смарт-пікселі виконані по гібридній технології метал-напівпровідник-метал (МНМ)/ВВЛ;

2) ELO (epitaxial lift off) – гібридні смарт-пікселі з застосуванням технології епітаксiального відслоювання;

3) MSM/MESFET/VCSEL (metal semiconductor field effect transistor) – монолітні смарт-пікселі з використанням ВВЛ, МНМ-детекторів та польових транзисторів з бар'єром Шотткі.

4) Flip-chip VCSEL/MSM – гібридна технологія смарт-пікселів з застосуванням ВВЛ, які з'єднані з електронною платформою за методом перевернутого кристала.

Таблиця 1.

Різновиди матриць смарт-пікселів з зазначенням їх технології виготовлення та області застосування

| Смарт-пікселі | Застосування | Технологія |
|---|--|--|
| FET-SEED (field effect transistor-self electrooptic effect device) | Корелятори з часовим інтегруванням, матриці приймачів, матричні перемикачі, адресні декодери, матриці просторових модуляторів світла, регістри зсуву, комутаційні вузли, імпульсні нейромережі | Монолітна інтеграція з використанням модуляторів на множинних квантових ямах |
| CMOS-SEED (complementary metal-oxide-semiconductor- self electrooptic effect device) | Обробка напівтонових зображень, матричні перемикачі, комутаційні вузли асинхронної передачі даних, оптичний АЦП, нейромережі, високопродуктивні інтерфейсні шини | Гібридна технологія з використанням модуляторів на множинних квантових ямах |
| LCOS (liquid-crystal-on-silicon) | Оптоелектронні нейромережі, обробка зображень, дисплеї | Гібридна технологія з використанням модуляторів на рідких кристалах |
| MSM/VCSEL (metal-semiconductor-metal/vertical-cavity surface-emitting laser) | - | Гібридна технологія з використанням ВВЛ |
| ELO (epitaxial lift off) | Нейромережі, міжчипові зв'язки і системи волоконно-оптичного зв'язку | Гібридна технологія з використанням світловипромінюючих діодів |
| MSM/MESFET/VCSEL (metal-semiconductor-metal/metal semiconductor field effect transistor/ vertical-cavity surface-emitting laser) | - | Монолітна інтеграція з використанням ВВЛ |
| Flip-chip VCSEL/MSM | Системи високошвидкісного зв'язку по відкритому каналу з високою щільністю | Гібридна технологія з використанням ВВЛ |

Варто зазначити, що до значних недоліків модуляторів відносяться низький коефіцієнт контрастності та необхідність в зовнішньому джерелі випромінювання для формування вихідних оптичних сигналів [9]. Тому останнім часом значний інтерес представляють смарт-пікселі, в яких використовуються активні джерела випромінювання. Активні випромінювачі є альтернативою пасивним модуляторам в гібридній технології. В якості випромінювачів використовували світлодіоди або лазери. Основну увагу було зосереджено на використанні матриць вертикально-випромінюючих лазерів (ВВЛ) з

низькими пороговими струмами лазера (до 10-30 мкА) для паралельної обробки та систем взаємозв'язку. Смарт-пікселі на основі випромінювачів швидко розвиваються, оскільки покращуються характеристики ВВЛ [4, 10]. В таблиці 2 наведено основні параметри матриць на основі ВВЛ, отримані в експериментальних роботах [4].

Таблиця 2.

Експериментальні дані по параметрам матриць на основі ВВЛ

| К-сть лазерів в матриці | Спосіб адресації | I _{th} (мА) | U _{th} (В) | P _{max} (мВт) | λ (нм) | Технологія |
|-------------------------|------------------|----------------------|---------------------|------------------------|---|------------|
| 8×8 | IA | 6 ± 2 | - | ~7 | 3 КЯ In _{0.2} Ga _{0.8} As | MBE |
| 64×1 | IA | 2.1 ± 0.1 | ~12 | 0.5 | 849.4±0.8 | MBE |
| 8×18 | IA | 4.2 ± 0.2 | 2.65 ± 0.1 | ~2.1 | - | MBE |
| 10×10 | IA | 14 ± 2.3 | - | ~2.6 | 984.1-978.5 | MBE |
| 8×8 | IA | 3.39±0.11 | ~2.5 | ~1.1 | 850.93±0.28 | MOCVD |
| 32×32 | MA | 6.8±1.2 | 4.4±0.6 | - | 3 КЯ In _{0.2} Ga _{0.8} As | MBE |
| 10×10 | MA | 3.72±0.22 | 3.26±1.1 | 4.08 | ~850 | MBE |
| 34×1 | IA | 3.07±0.03 | 1.59±0.02 | 2.07 | 858-824 | MOCVD |
| 4×8 | IA | 1±0.17 | ~3.8 | ~0.5 | 874.8±1.4 | MBE |
| 8×8 | IA | 1.6±0.3 | 2.3 | ~4.2 | 855 | MOCVD |

Примітки: IA – індивідуальна адресація; MA – матрична адресація; КЯ – квантові ями; MBE – молекулярно-пучкова епітаксія; MOCVD – метало-органічне хімічне осадження з газової фази; I_{th} – середній граничний струм; U_{th} – гранична напруга; P_{max} – максимальна потужність лазера; λ – довжина хвилі випромінювання.

ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ІС НА БАЗІ МАТРИЦЬ СМАРТ-ПІКСЕЛІВ

Оптоелектронна ІС на базі матриці FET-SEED смарт-пікселів розмірністю 4×4 була використана в демонстраційній системі оптичного переключення AT&T System5. Кожен смарт-піксель налічував 24 польових транзистора, 17 діодів, 4 фотодетектора, 4 модулятора і працював зі швидкістю 400 Мбіт/с [3]. Прикладом матриці смарт-пікселів виконаної по технології CMOS-SEED є матриця розмірністю 4×9 для комутаційного вузла асинхронної передачі даних. Дана матриця налічує 20600 транзисторів, 144 оптичних входів та виходів та працювала зі швидкістю більше 1 Гбіт/с [3].

На рис. 3 показано приклад застосування матриць смарт-пікселів на об'єднувальній підложці для забезпечення оптичного взаємозв'язку по відкритому каналу. В даній системі електронні печатні плати під'єднуються до жорсткої об'єднувальної підложки, яка включає в себе електричні і оптичні канали зв'язку. Оптичний канал включає в себе ряд матриць смарт-пікселів, які забезпечують високошвидкісний зв'язок між окремими печатними платами. Смарт-пікселі цієї системи виконані по технології CMOS-SEED. Розмір чипів окремих матриць смарт-пікселів складав 2×2 мм і налічував більше 20 000 транзисторів. Матриця SEED модуляторів розмірністю 10×20 забезпечувала 200 оптичних входів/виходів, кожен з яких мав оптичне вікно розміром 18×18 μm [5].

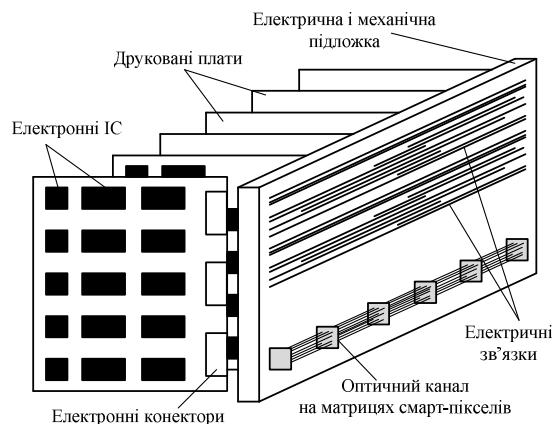


Рис. 3. Приклад застосування матриць смарт-пікселів для оптичного взаємозв'язку між друкованими платами

ВИСНОВКИ

Розглянуто оптоелектронну структуру – смарт-піксель, яка дозволяє виконувати прийом/передачу даних в оптичному вигляді, а їх обробку – в електричному. Використання смарт-пікселів дає можливість виготовлення компактних пристроїв з тривимірними зв'язками (оптоелектронні ІС), крім того, матриці смарт-пікселів забезпечують паралельний прийом/передачу інформацію у вигляді оптичного двовимірного масиву.

Наведено існуючі технології виготовлення смарт-пікселів, серед яких виділяють три основні підходи: монолітна інтеграція, пряма епітаксія і гібридна інтеграція. Крім технології виготовлення смарт-пікселів поділяють за приладами, які використані в якості вихідних елементів, а саме пасивні модулятори та активні джерела випромінювання. Недоліками пасивних модуляторів є низький коефіцієнт контрастності та необхідність в зовнішньому джерелі випромінювання для формування вихідних оптичних сигналів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Intelligent optical backplanes for parallel computing and communications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.doe.carleton.ca/~gallan/pdf/optical_backplanes.pdf.
2. Goodwill D.J. An ATM-based intelligent optical backplane using CMOS-SEED smart pixel arrays and free-space optical interconnect modules / D.J. Goodwill, K.E. Devenport, H.S. Hinton // IEEE journal of selected topics in quantum electronics, vol. 2. – 1996. – №1. – P. 85-96.
3. Hinton H.S. Progress in the smart pixel technologies / H.S. Hinton // IEEE journal of selected topics in quantum electronics, vol. 2. – 1996. – №1. – P. 14-23.
4. Захаров С.М. Оптоелектронные интегральные схемы с применением полупроводниковых вертикально излучающих лазеров / С.М. Захаров, В.Б. Фёдоров, В.В. Цветков // Квантовая электроника. – 1999. – №3. – С. 189-205.
5. Fiber optic data communication: Technological trends and advances / edited by C. DeCusatis. – Hong Kong.: AP, 2002. – 568p. – ISBN 0-12-207892-6.
6. Smart Pixels for Image Computing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA389827>
7. Патент України № 92682, МПК8 G06K 9/00. Пристрій для розпізнавання образів / Т.Б. Мартинюк, К.Ю. Кутаєв, Л.І. Тимченко, О.М. Гуцол; заявники та патентовласники Т.Б. Мартинюк, К.Ю. Кутаєв, Л.І. Тимченко, О.М. Гуцол. – № a200904457; заявлено 05.05.2009; опубл. 25.11.2010, Бюл. №22.
8. Мартинюк Т.Б. Схемотехнічні рішення базових блоків для класифікатора образів / Т.Б. Мартинюк, Г.Д. Дорощенко, О.М. Гуцол // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3(102). – С. 132 – 141.
9. Nakahara T. Performance comparison between multiple-quantum-well modulator-based and vertical-cavity-surface-emitting laser-based smart pixels / T. Nakahara, S. Matsuo, S. Fukushima, T. Kurokawa // Applied Optics, vol. 35. – 1996. – №5. – P. 860-871.
10. Малеев Н.А. Матрицы вертикально излучающих лазеров спектрального диапазона 960 нм / Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.С. Шуленков, С.А. Блохин, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, В.Г. Тихомиров, А.Г. Гладышев, А.М. Надточий, Е.В. Никитина, J.A. Lott, В.Н. Сведе-Швец, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Том 45, Вып. 6. – С. 836-839.

Надійшла до редакції 28.12.2012 р.

КОЖЕМ'ЯКО ВОЛОДИМИР ПРОКОПОВИЧ – д.т.н., проф., зав. кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ДОРОЩЕНКОВ ГЕННАДІЙ ДМИТРОВИЧ – к.т.н., доц. кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

МАРТИНЮК ТЕТЯНА БОРИСІВНА – к.т.н., проф. кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

ГУЦОЛ ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ – аспірант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.