ISSN 1681-7893

Вінницький національний технічний університет

Міністерство освіти і науки України
Академія інженерних наук України
Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
Ужгородський національний університет
Грузинський технічний університет
Люблінський технічний університет
Міжнародні товариства оптичної техніки SPIE, OSA

Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у 2001 році
Виходить 2 рази на рік

№2 (36), 2018

Передплатний індекс 91673

Зареєстрований Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво про реєстрацію – КВ № 15295–3867Р від 22.06.2009 р.

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ВНТУ, протокол № 5 від 29 листопада 2018р.

Міжнародний науково-технічний журнал "Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології" є науковим виданням, публікації в якому визнаються при захисті дисертаційних робіт з технічних наук (постанова Президії ВАК України №1-05/6 від 12 червня 2002 року) (повторна реєстрація, Наказ МОН України №820 від 11 липня 2016 р)
© **Вінницький національний технічний університет, оформлення, верстка, 2018**

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:
Україна, 21021, м. Вінниця,
вул. Хмельницьке шосе, 95.

Тел.: +38 (0432) 51-32-56
Факс: +38 (0432) 46-57-72
http://oeipt.vntu.edu.ua/
E-mail: oeipts@gmail.com

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:
Павлов С. В. Вінницький національний технічний університет, Україна

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:
Войцик В. Т. Технічний Університет «Люблінська Політехніка», Польща
Готра З.Ю. Національний університет "Львівська політехніка", Україна
Натрошвілі О.Г. Грузинський технічний університет, Тбілісі, Грузія
Осадчук В.С. Вінницький національний технічний університет, Україна
Ушенко О.Г. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:
Азаров О. Д.
Вінницький національний технічний університет
Ангельський О.В.
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича
Аврунін О. В.
Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна
Бобицький Я.В.
Національний університет "Львівська політехніка"
Бунь Р.А.
Національний університет "Львівська політехніка"
Бісікало О. В.
Вінницький національний технічний університет
Васіленко В.Б.
Новий університет Лісабону, Лісабон, Португалія
Васілевський О. М.
Вінницький національний технічний університет
Володарський Є. Т.
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, Київ
Грабко В.В.
Вінницький національний технічний університет
Заболотна Н. І.
Вінницький національний технічний університет
Злепко С.М.
Вінницький національний технічний університет
Квєтний Р.Н.
Вінницький національний технічний університет
Коваленко В.С.
НДІ лазерної техніки та технологій Національний технічний університет України "КПІ", Київ
Колісник П.Ф.
Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова
Коробов А.М.
Корпорація „Лазер і здоров'я", Харків
Кичак В.М.
Вінницький національний технічний університет
Кузовик В. Д.
Національний авіаційний університет, Київ, Україна
Кулаков П. І.
Вінницький національний технічний університет
Кухарчук В. В.
Вінницький національний технічний університет
Лежнюк П.Д.
Вінницький національний технічний університет
Лепіх Я.І.
Одеський національний університет ім. Мечникова
Лужецький В.А.
Вінницький національний технічний університет
Литвиненко В. І.
Херсонський державний університет, Україна
Мартинюк Т.Б.
Вінницький національний технічний університет
Медиковський М.О.
Національний університет "Львівська політехніка"
Муравський Л.І.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
Николайчук Я.М.
Тернопільський національний економічний університет, Україна
Осадчук О.В.
Вінницький національний технічний університет
Осінський В.І.
Державне підприємство НДІ Мікроприладів, Київ
Петрук В.Г.
Вінницький національний технічний університет
Поворознюк А.І.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Романюк О.Н.
Вінницький національний технічний університет
Ротштейн А.П.
Донецький національний університет ім. Василя Стуса
Русин Б.П.
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів
Салдан Й.Р.
Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова
Саченко А.О.
Тернопільський національний економічний університет, Україна
Студеняк І.П.
Ужгородський національний університет
Сорокін В. М.
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Україна
Тимчик Г.С.
Національний технічний університет України "КПІ", Київ
Тимченко Л.І.
Національний транспортний університет, Київ, Україна
Шайко-Шайковский О. Г.
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича
Шевчук В.І.
Український державний науково-дослідний інститут медико-соціальних проблем інвалідності, Вінниця
Яровий А.А.
Вінницький національний технічний університет

ВІДПОВІДАЛЬНІ СЕКРЕТАРІ:
Лисенко Г.Л. Вінницький національний технічний університет, Україна
Кожем'яко А.В. Вінницький національний технічний університет, Україна
Тарновський М. Г. Вінницький національний технічний університет, Україна
Костюкевич С.О. Інститут фізики напівпровідників НАНУ, Київ, Україна

ТЕХНІЧНІ СЕКРЕТАРІ:
Безкревний О. С.

РЕДАКТОРИ-КОРЕКТОРИ:
Прадівляний М.Г., Веремієнко С.Я.

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ЗМІСТ

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Д.В. Коцур Порівняльний аналіз алгоритмів спрощення многокутників та ламаних ліній……..... 5

О.Д. Азаров, О.І. Черняк Швидкодіючі Фібоначчієві лічильники для систем обробки сигналів……..……... 14

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

А.В. Кожем'яко, Г.С. Колесник Знаходження дефектів на дервині шляхом сегментації зображення…….……... 20

А.А. Яровий, Л.В. Крилик, О.О. Кулик, Д.Г. Пасічник, О.В. Небожанов Інформаційна технологія побудови 3D сцен для віртуальної реальності з підвищеною швидкодією…… 28

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

О.Ю. Новаковська, О.В. Дуболазов, О.В. Олар, Ю.О. Ушенко, Л.Й. Підкамінь, Ю.Я. Томка Топографічна структури Мюллер-матричних зображень полікристалітних мереж біологічних шарів…….… 35

А.В. Карачевцев, О.В. Дуболазов, О.В. Олар, Ю.О. Ушенко, Л.Й. Підкамінь, Ю.Я. Томка Взаємозв'язок поляризаційно-сингулярного та поляризаційно-кореляційного підходів до аналізу оптичних властивостей біологічних полікристалітних мереж…….…. 43

О.В. Дуболазов, М.Ю. Сахновський, О.В. Олар, П.М. Григоришин, Ю.О. Ушенко Поляризаційна неоднорідність і сингулярності зображень полікристалітних біологічних мереж…….…… 53

Н.І. Заболотна, В.В. Шолота, А.І. Колівошко Аналіз методів та систем лазерної поляриметрії для відтворення анізотропних параметрів біологічних шарів……..… 60

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

V.P. Makhniy, O.V. Kinzerska, I.M Senko Prospects for the use of ZnSe <Te> crystals in hyperspectral optical systems…….…… 72

М.П. Проскурін Генезис інтегральних схем з оптичним зв`язком на мікропотужних оптронах і їх елементах……. 75

Я.Г. Скорюкова, С.М. Марков Особливості впровадження сучасного освітлення в навчальних аудиторіях……. 85

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В.М. Папінов, Я.А. Кулик Багатофункціональна комп'ютеризована лабораторія для наскрізної практичної підготовки студентів спеціальності 151…….……. 94

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL
“OPTOELECTRONIC INFORMATION-POWER TECHNOLOGIES”
CONTENTS

OPTOELECTRONIC/DIGITAL METHODS AND SYSTEMS FOR IMAGE/SIGNAL PROCESSING

D.V. Kotsur Comparative analysis of algorithms for simplifying polygons and broken lines……..... 5

O.D. Azarov, O.I. Chernyk Fast-acting Fibonacci counters for signal processing systems……..... 14

SYSTEMS OF TECHNICAL VISION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE, IMAGE PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

A.V. Kozhemyako, G.S. Kolesnik Finding defects in wood by segmenting the image……... 20

A.A. Yarovy, L.V. Krilyk, O.O. Kulik, D.G. Pasichnyk, O.V. Nebozhanov Information technology for building 3D scenes for virtual reality with high-speed performance …… 28

BIOMEDICAL OPTOELECTRONIC SYSTEMS AND APPARATUS

O.Yu. Novakovskaya, O.V. Dubolazov, O.V. Olar, Yu.O. Ushenko, L.Ya. Pidkamen, Yu.Ya. Tomka Topographical structures of Muller-matrix images of polycrystalline networks of biological layers ……..…… 35

A.V. Karachevtsev, O.V. Dubolazov, O.V. Olar, Yu.O. Ushenko, L.Ya. Podkamen, Yu.Ya. Tomka Interconnection of polarization-singular and polarization-correlation approaches to the analysis of optical properties of biological polycrystalline networks……...……. 43

O.V. Dubolazov, M.Yu. Sakhnovsky, O.V. Olar, P.M. Grigorishin, Yu.O. Ushenko Polarization heterogeneity and singularity of images of polycrystalline biological networks……..…… 53

N.I. Zabolotna, V.V. Sholota, A.I. Kolivoshko Analysis of methods and systems of laser polarimetry for reproduction of anisotropic parameters of biological layers…….…… 60

OPTOELECTRONIC DEVICES AND COMPONENTS IN LASER AND ENERGY TECHNOLOGIES

V.P. Makhniy, O.V. Kinzerska, I.M Senko Prospects for the use of ZnSe <Te> crystals in hyperspectral optical systems…… 72

M.P. Proskurin Genesis of integrated circuits with optical coupling on micropotent optocouplers and their elements …….……. 75

Ya.G. Skoryukova S.M. Markov Features of the introduction of modern lighting in the classroom ……..……. 85

PRINCIPAL CONCEPTS AND STRUCTURING DIFFERENT LEVELS OF EDUCATION FROM OPTIO-ELECTRONIC INFORMATION AND ENERGY TECHNOLOGIES

V.M. Papinov, Ya.A. Kullik Multifunctional computerized laboratory for cross-cutting practical training of students of specialty 151……..……. 94

УДК 621.3.049.774

М.П. ПРОСКУРІН

ГЕНЕЗИС ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ З ОПТИЧНИМ ЗВ`ЯЗКОМ НА МІКРОПОТУЖНИХ ОПТРОНАХ І ЇХ ЕЛЕМЕНТАХ

Запорізький національний технічний університет (ЗНТУ)
вул. Жуковського, 64, м.Запоріжжя, Україна

Анотація. В статті наведено огляд розвитку мікропотужних оптронів УВЧ діапазону, їх елементів при створенні планарних інтегральних схем (ІС) з оптичними зв`язками, проведен аналіз запропонованих конструктивно-технологічних рішень (випромінювачі, фотоприймачі і оптичні канали) у порівнянні з експериментальними розробками відомих виробників ІС.
Ключові слова: оптичний зв`язок, оптрон, світлодіод, фотоприймач, оптичний канал, ВЧ диапазон, конструктивно-технологічне рішення, фізико-топологічна модель, напівпровідникова структура, WDM технології.
Аннотация. В статье приведен обзор развития микромощных оптронов УВЧ диапазона, их элементов при создании планарных интегральных схем (ИС) с оптическими связями, проведен анализ предложенных конструктивно-технологических решений (излучатели, фотоприемники и оптические каналы) в сравнении с экспериментальными разработками известных производителей ИС.
Ключевые слова: оптическая связь, оптрон, светодиод, фотоприемник, оптический канал, ВЧ диапазон, конструктивно-технологическое решение, физико-топологическая модель, полупроводниковая структура, WDM технологии.
Annotation. The article provides an overview of the development of UHF range micropower optocouplerы, their elements when creating planar integrated circuits (ICs) with optical connections, analyzes the proposed design and technological solutions (emitters, photo detectors and optical channels) in comparison with experimental developments of well-known manufacturers of ICs.
Keywords: optical communication, optocoupler, light-emitting diode, photodetector, optical channel, high frequency range, constructive-technological solution, physical topological model, semiconductor structure, WDM technology.
DOI: 10.31649/1681-7893-2018-36-2-75-84

ВСТУП

Обробка швидкісних потоків оптичної інформації широко застосовуються в цифровій апаратурі у вигляді спеціалізованих вхідних/вихідних оптоелектронних телекомунікаційних схем (оптоелектронні передавачі і приймачі, матриці комутації, селектори, ін.). Пошук нових концепцій реалізується у вигляді запропонованих конструктивно-технологічних рішень (КТР), по яких створено зразки і /або ескізи оригінальних інтегральних схем (ІС) з іншим типом зв`язку між каскадами, ніж у традиційних електронних ІС, а саме - оптичним зв'язком (ОЗ), перехід до якого обгрунтовано в багатьох джерелах, наприклад в роботі [1]. На думку автора і інших дослідників ІС з ОЗ прийде на зміну сучасним ІС у вигляді трьох основних типів: а- з оптичними зв'язками (ІСОЗ); б- оптоелектронні цифрові ІС (ОЦІС); в- їх комбінації. Конструкції таких ІС можуть бути технологічно виконано на основі мікропотужних оптронів ДВЧ, УВЧ, СВЧ диапазонів та їх елементів (випромінювач, фотоприймач, модулятор, логічні перемикачі, розгалужувачі, оптичні канали, інтерфейси, ін.). Тому дослідження, розробка, моделювання, вдосконалення їх елементів і мікропотужних оптронів для оптоелектронних ІС (світлодіод - СД, фотодіод - ФД, ін.) та по`єднання досягнень технологій електронних ІС і сучасних розробок оптоелектроніки, аналіз оригінальних КТР в цій галузі є достатньо **актуальним питанням** для розвитку цього напряму. Фірми Intel, IBM, Siemens, Hewlet-Packard, Toshiba, Протон, ін. постійно розширюють номенклатуру виробництва різного типу оптоелектронних пристроїв та розробок (оптрони, оптореле, логічні ключі, ІС з використнням ОЗ, оптичні інтерфейси, ін.), про що свідчить як підвищення об`єму ринку оптоелектроніки, так і їх експериментальні розробки, в тому числі з використанням WDM технологій. Аналіз конструкцій оптронів, їх елементів можливо знайти в окремих фахових публікаціях, але їх поєднання і застосування у вигляді КТР (для їх комплексного застосування в оптоелектронних ІС) ще не проводилось. Це може окреслити підходи щодо **концептуального бачення**, відбору відповідних технологій і привести до розв`язання завдання створення **інтегральних мікропотужних оптронів УВЧ діапазону**, їх елементів для цифрових ІСОЗ, ОЦІС і їх оптичних інтерфейсів, як **наступного покоління ІС - оптоелектронних ІС**.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ. Елементи мікропотужних оптронів.

© М.П. ПРОСКУРІН, 2018

1. Випромінювачі на основі мікропотужних ІЧ СД. З появою в середені 20-го віку інтегральних технологій, а пізніше- твердотільних світловипромінюючих напівпровідникових структур-НПС (типу: інжекційний лазер- ІЛ і його різновид VCSEL, СД, суперлюменісцентний - СЛД, ін.), що були використані у якості ефективних перетворювачів електричних сигналів у світлові (E→L), питання їх широкого використння в сучасних інформаційних технологіях стало лише функцією часу (при стрімкому збільшенні телекомунікаційних мереж, попиту на інформаційне забезпечення, розвитку технологій «розуного» виробництва, зменшення собівартості виробів, появі на ринку сучасних електронних, оптоелектронних технологій і пристроїв, ін.). При виборі типу випромінювача для ІС з ОЗ існують **вагомі аргументи на користь СД** (light emmiting diod - LED), як некогерентного джерела світла різних диапазонів (видимого, ІЧ, УФ). Перевагами твердотільних СД є: їх надмалі розміри, приємне значення ККД перетворення (E→L -десятки відсотків), високе значення внутрішнього/зовнішнього коефіцієнта квантової ефективності (ККЕ) і виводу потужності випромінювання, кілька типів виводу випромінювання (відностно площини p-n переходу), помірна вартість, довговічність (>10^{+6} год.), можливість виробництва по мікроелектронним технологіям, ін.. Вони використовуються в електронних і оптоелектронних пристроях (ВЧ гальванічні розв`язки на базі оптронів [2]), в цифрових пристроях розподілу цифрових потоків (оптоелектронні матриці комутації - ОЕМК [3], ін.), волоконнооптичні лініях зв'язку (ВОЛЗ) на малі і середні відстані (довжина 0,01мм...3км), LED панелях сучасних дісплеїв, ТВ, планшетів, смартфонів, ін.. Останній час приділено увагу використанню надшвидкісних інтегральних мікропотужних інфрачервоних (ІЧ) випромінювачів у вигляді ІЛ, VCSEL, СЛД, СД у складі УВЧ, СВЧ оптронів для **оптичних каналів зв'язку, інтерфейсів** на відстанях ≤ 1мкм…10мм в експериментальних ІС (наприклад, між ядрами процесорів і/або кількома ІС, ін.), розробках логічних перемикачів (ЛП) для цифрових оптоелектронних ІС на їх основі в тому числі з використанням WDM технології [4-6], ін.. Означені типи ІЧ випромівнювачів створено на основі планарних гомогенних і/або гетерогенних НПС на основі p-n переходу з використанням матеріалів A_3B_5 (основний прямозонний матеріал некогерентних випромінювачів - GaAs і/або з домішкою Al, In, наприклад: $Al_xGa_{1-x}As$, ін.). Перебіг через його площину S прямого струму певної величини у вигляді носіїв заряду (НЗ), інжектуємих в активний прошарок СД (зазвичай p+ область) викликає перехід їх із зони провідності (ЗП) у валентну (ВЗ) зі зміною їх енергії ($\Delta E = \hbar F = \hbar C / \lambda$ в вакуумі; для НПС додатково враховується коефіцієнт заломлення n середовища) і спонтанну рекомбінацію з неосновними НЗ у вказаній p+ області, а далі - інтенсивне випромінювання на довжині λ з товщини НПС (слідує з виразу для ΔE). Порівняно із СД, структури ІЛ, VCSEL є більші складними, мають меньший зовнішній ККЕ (фізика їх функціонування потребує наявність оптичного резонатора, який формує «стоячу» хвилю за рахунок залишення частини свтлової енергії в ньому, ін.), жорсткі вимоги до стабільності $U_{живл.}$, відносно високі порогові значення струму $I_{П.}$, ін.. Слід акцентувати, що в питанні вибору випромінювача для ІСОЗ, ОЦІС (при надмалих розмірах кристалів, розміщенні >10^{+6} СД на підкладці, ін.) автор схиляється до використання саме ІЧ СД і/або СЛД [7-9], хоч і не заперечує деякі переваги ІЛ, VCSEL, ін., особливо у якості надшвидкісних передавачів СВЧ діапазону для вихідних цифрових пристроїв. При розробці ІЧ СД робиться огляд відомих і прийнятних підходів, інструментарія і технології проектування, розрахунок і відбір типу НПС (з поверхневим або торцевим виводом випромінювання - ПВВ, ТВВ), вибір режимів роботи та моделювання (з метою отримання бажаних параметрів випромінювача у вигляді набору розрахункових параметрів їх математичної моделі, ін. і розуміння того, як їх можливо покращити). Окреслемо кілька складових вибору КТР для ІЧ СД (у складі мікропотужних УВЧ оптронів), їх віртуальних моделей і ескізів конструкцій. На думку автора базові з них є:

- створення на підкладці комірок з мікрокристалами прямозонних матеріалів A^3B^5 і/або їх модифікацій;
- вибір режиму модуляції ІЧ СД: «малий» чи «великий сигнал». Інерційність СД в першому режимі значно відрізняється від другого і теоретично (для дискретних GaAs СД в режимі "малий сигнал") гранична частота перемикань $F_{Гр.СД} \leq$ 2ГГц (перекриває більшу частину УВЧ діапазону 0,3…3,0 ГГц) [7, 10, 11];
- вибір конструкції мікропотужних ІЧ СД з огляду на напрям випромінювання: з ПВВ і/або з ТВВ;
- формування оптичних мікроканалів, їх напрямів і кількості на оптичних виходах ІЧ СД (з ПВВ і/або ТВВ);
- оптимізація ККД перетворення (E→L), внутрішнього/зовнішнього ККЕ (підбір товщин активного шару p^+).

При проектуванні фізико-топологічної моделі (ФТМ) ІЧ СД зазвичай формалізують **набір вимог** у вигляді таблиці основних параметрів ТЗ [12, 13]. Етапи розробки, розрахунок структури (який виконано на основі аналітичної моделі), характеристики ІЧ СД (на основі $Al_xGa_{1-x}As$), результати моделювання кількох варіантів ІЧ СД і ескізи конструкцій надано у роботах автора його коллег [12-15],

один з варіантів яких наведено на рис.1. Особливостю цього КТР для планарного ІЧ СД з ПВВ є те, що випромінювання виходить назовні з обох його напрямів перпендикулярно поверхні (зверху і знизу), що зменьшує нагрів підкладки, збільшує функціональні можливості ІЧ СД, його ККД і розширює області застосування. Проведене моделювання кількох моделей ІЧ СД в схемах КГІ (на основі трьох інверторів на мікропотужних оптронах) дало наступні результати: при λ ~0,84мкм і зовнішнім ККЕ ≤ 10% (на кожний з двох напрямків випромінювання) отримано частоту перемикання $F_{Гр.}$~1,6ГГц (при $I_{СД\ макс}$ ~ 60…80мкА) [16], що перекриває більше половини УВЧ діапазону. Методики розрахунку ФТМ для ІЧ СД і вхідних/вихідних параметрів, шляхи оптимізації їх НПС, підвищення значень ККД і внутрішнього/зовнішнього ККЕ наведено в [12, 13].

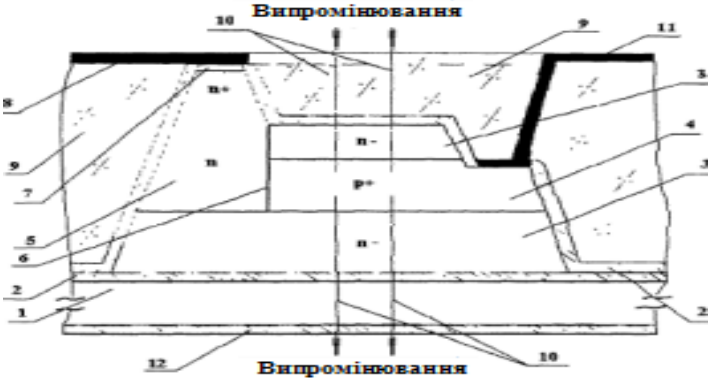


Рис.1- Ескіз КТР з ПВВ інтегрального СД з підвищеним ККД (патент на корисну модель UA №19211 [15])

Окремо слідує відмітити КТР українських вчених у вигляді планарного мікропотужного оптрона (GaAs СД- p-i-n ФД), який створений по мікроелектронним технологіям на Si підкладці [17] (вирощено кристал GaAs в ізольованій SiO_2 мезі методом гетерофазної епітаксії - ГФЕ), що дає можливість виконати НПС СД як із ПВВ, тобто перпендикулярно поверхні p-n переходу, так із ТВВ, тобто з торців p-n переходу: в другому варіанті випромінювання йде паралельно поверхні Si підкладки; ескіз цього КТР надано на рис.2.

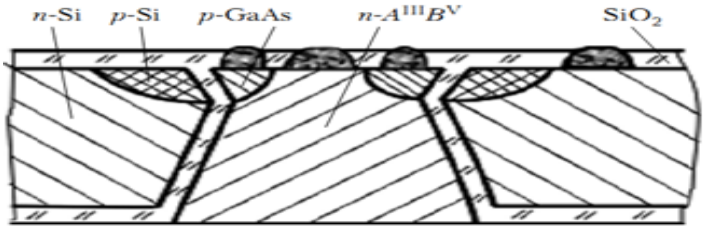


Рис.2- Ескіз планарного оптрона (GaAs СД- p-i-n ФД): Si підкладка і мікрокристал GaAs, ізоляція мези - SiO_2

Висновок по розділу 1. Окреслено етапи проектування мікропотужних ІЧ СД УВЧ діапазону (для інтегральних мікропотужних оптронів у складі ІСОЗ, ОЦІС) і вказано підходи до реалізаціїї їх ФТМ і КТР. В роботах автора [12-16] вказано, що для виходу на прийнятне КТР ІЧ СД необхідно використати **комбінацію з кількох підходів**: 1- формування на Si підкладці комірок (мез) з мікрокристалами $Al_xGa_{1-x}As$; 2- зменшення струму ІЧ СД у 10…100 і більш разів (порівняно зі струмом прототипу пропорційно зниженню лінійних розмірів НПС); 3- використання режиму модуляції типу «малий сигнал», що підвищує частоту перемикання на 1…2 порядки; 4- збільшення у ІЧ СД концентрації домішки робочої області випромінювання $p^+ \geq 10^{19}$см$^{-3}$; 5- оптимізації виводу випромінювання і підвищення ККД, внутрішньої/зовніщньої ККЕ (розрахункова товщина Z активного шару p^+~ 1…3 мкм).

2. Фотоприймачі на основі ІЧ p-i-n ФД з ВЧ транзистором. Для КТР мікропотужного оптрона УВЧ діапазона іншим важливим елементом є ФП, що здатен ефективно перетворювати світло від ІЧ СД в електричний сигнал (L→E). Цим критеріям цілком відповідає ФД з достатньо простою конструкцією, а для перекриття УВЧ діапазону- його різновид у вигляді ІЧ p-i-n ФД. НПС ІЧ p-i-n ФД формується на Si підкладці, що має n_i концентрацію носіїв заряду (НЗ), близьку до власної і (для формування і- зони ФД), а n+ і p+ області отримують методами іонного легування Si підкладки (наприклад, для n+ миш'як As або фосфор P; для p+ бор B, відповідно). Завдання проектування ФТМ ІЧ p-i-n ФД зводиться до формалізації

набору вимог (у вигляді таблиці основних параметрів ТЗ), вибору конструкції і геометрії (наприклад, планарна: тип випромінювання на ФД- перпендикулярно або паралельно площині Si підкладки, розмір фотовікна, значення генерації НЗ на обраній довжині λ, коефіцієнт перетворення випромінювання Кп., ін.) і створення ескізів її геометричної структури, т.д.. Далі тримають розрахункові набори параметрів: прямі і зворотні вольтамперні характеристики (ВАХ) НПС ІЧ p-i-n ФД (з урахуванням неідеальності ряду характеристик: рекомбінаційно-генераційних струмів, електрофізичних ефектів, ін.), їх зв'язку з геометрією НПС (профілі розподілення- ПР, глибини p-n переходів, концентрації домішок, ін.) з її вихідними статичними і динамічними характеристиками. Далі обирається краща модель (з декількох), наприклад, за критеріями отриманих розрахункових її величин: значення НЗ в шарі фотовікна ІЧ p-i-n ФД (для різних ПР його легування) - величини генерації G для НЗ, параметри часу $\tau_{вкл.}/\tau_{викл}$, ємність $C_{p\text{-}i\text{-}n\ ФД}$, ін.. На рис.3 наведено проміжний етап розрахунку ІЧ p-i-n ФД, що проводив автор: два розраховані ПР його p+ області і їх порівняння [12, 18].

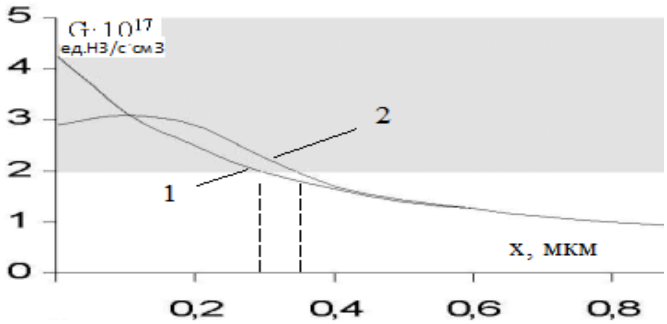


Рис.3 - Розрахункові ПР ІЧ p-i-n ФД з розподіленням концентрації домішки в його аноді: по функції Гаусса- 1; з максимумом ПР на глибині 0,2мкм- 2. Сірим фоном вказана зона прийнятних значень G.

Результат математичного моделювання НПС p-i-n ФД і ВЧ n-p-n Тр. представлено у вигляді рішення систем дифференціальних рівнянь: Пуассона (описує розподіл потенциала) і безперервності (описує поведінку НЗ) і отримання наборів статичних, динамічних ВАХ НПС (при одномірному ізотермічному наближенні), значення генерації G в і-й області НЗ (рис. 3) з подальшою рекомбінацію електронно-диркових пар (формують електронний I_E і дирковий $I_Д$ компоненти струму $I_{ФД} = I_E + I_Д$, урахування їх кінетичних коефіцієнтів, ін.). Розрахунок моделей ІЧ p-i-n ФД проводився на основі аналізу отриманих чисельними методами (ЧМ) рішень системи рівнянь в ПС «Дослідження» створена по методиках роботи [19].

Формування ФТМ і параметрів підсилювача фотоструму $I_{ФД}$ (у вигляді ВЧ n-p-n Тр.) слідує після отримання відповідних вихідних характеристик ІЧ p-i-n ФД (частина з яких є вхідними для нього у вигляді параметрів ТЗ на проектування його ФТМ, які зведено у відповідну таблицю). Етапи проектування для однорідних Si НПС (ВЧ n-p-n Тр.) включають: формалізацію вхідних, вихідних параметрів, що може бути виришено синтезом квазіодномірної математичної моделі як для p-i-n ФД (один p-n перехід), так і для ВЧ n-p-n Тр. (два p-n переходи). Воно ведеться з урахуванням варіювання домішок, отриманих ПР по глибині і лінійних розмірів конструкції, а також аналізу отриманих статичних і динамічних характеристик ФТМ Тр.. Досвід показує, що розробка ВЧ n-p-n Тр. має більшу складність, бо потребує створення, розрахунку і моделювання двох моделей діодів (Е-Б, Б-К) та, відповідно, оптимізації їх конструкції у ФТМ. Особливістю цього ВЧ Тр. є низька напруга живлення схеми з ОЕ (Ежив.~ 1,3В) при коефіцієнті посилення по току h ≥50…10 на частоті $F_{Гр.}$= 0,5…1,6 ГГц (при I_K макс.~ 60..80мкА), ін. [16]. На рис.4 наведено проміжні результати моделювання I_K ВЧ n-p-n Тр. для одного імпульсу $I_{ФД\ вих.} = I_{Б\ вх.}$ = 2мкА довжиною 1нс ($F_{Гр.}$= 0,5 ГГц), при цьому для ВЧ n-p-n Тр. коефіцієнт підсилення h ~ 50...60 (режим К.З.). Пунктирна лінія на рис.4 (а) для імпульсу довжиною в 0,5нс ($F_{Гр.}$= 1,0 ГГц) дозволяє приблизно оцінити значення h ~ 30...35 (режим К.З.). При введені в ланцюг колектору ВЧ n-p-n Тр. резистора R в 1…2 кОм, це значення h знизиться ще на 15...25%, але буде достатнім для того, щоби підсилити струм $I_{ФД\ вих.}$ в 2…4 мкА до значачень в 60…80 мкА. Аналіз означених Si НПС показав можливість їх з`єднання в один пристрій: інтегральний ФП, в зв`язку з цим актуальним було формування КТР у вигляді сумісної інтегральної структури, що поєднала би ІЧ p-i-n ФД з n-p-n ВЧ Тр..

Це було зроблено автором і його колегами і найшло відображення у деклараційному патенті UA (№68540А) «Інтегральний фотоприймальний пристрій» (ІФП) [20]. Приклади проектування, етапи розробки, статичні і динамічні характеристики, результати моделювання кількох варіантів ІФП (ІЧ p-i-n ФД з ВЧ n-p-n Тр.) УВЧ діапазону надано у роботах автора [12, 13] , а в статті [16] вказана можливість

виконання ВЧ Тр. у вигляді МОН структури і надано його модель. Вигляд планарної структури ІЧ ФД для мікропотужного оптрона наведено на рис.1 (зліва, зправа від мези з GaAs: n-Si і p-Si).

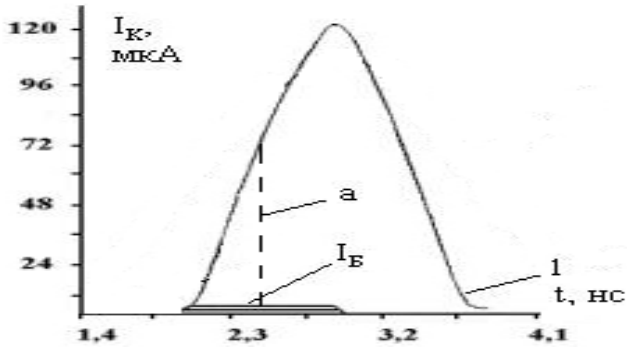
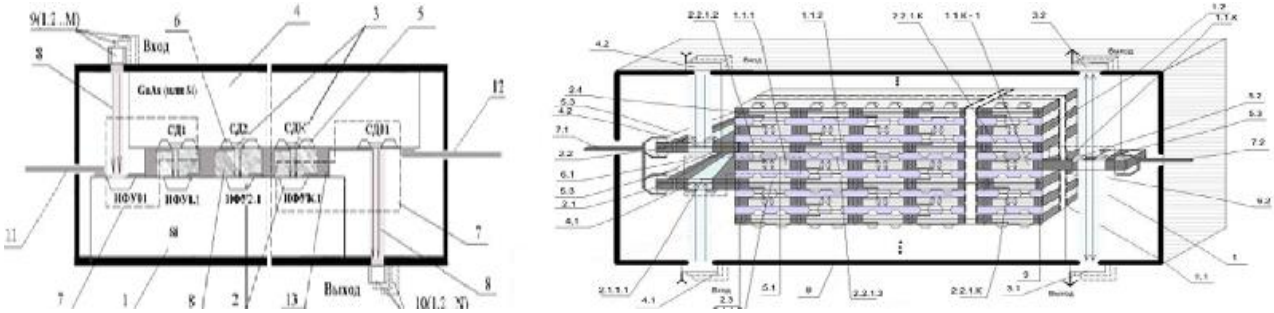


Рис.4- Розрахункова залежність вихідного струму (режим К.З.) I_K ВЧ n-p-n Тр. (1) від часу t для одного імпульсу довжиною в 1нс ($F_{Гр.}$= 0,5ГГц) при $I_{ФД\ вих.}$= $I_{Б\ вх.}$= 2мкА і пунктирна лінія для оцінки I_K імпульсу довжиною в 0,5нс- а

Висновок по розділу 2. Запропоновано в якості основнного КТР для інтегрального ІЧ p-i-n ФД з ВЧ Тр. УВЧ діапазону (для мікропотужних оптронів) застосувати: Si підкладку з концентрацією домішки n^-, близькою до власної (i) і для підсилення $I_{ФД}$ використати ВЧ Тр.; розрахунок параметрів проводити ЧМ по відомим методикам для різних концентрацій домішок і геометричних розмірів їх ФТМ; для поліпшення параметрів ІЧ p-i-n ФД проводити моделювання з декількома ПР НПС і обрати відповідний. Збільшення значення величини генерації G і фотоструму $I_{ФД}$ досягнуто з ПР, який має максимум концентрації не у поверхні p-i-n ФД, а на деякій її глибині X; такий ПР створюється методом направленої дифузії - «возгонки». Розрахована ФТМ ВЧ n-p-n Тр. і отримано сімейство ВАХ для поєднаної структури у вигляді ІФП (ІЧ p-i-n ФД з ВЧ Тр,), визначені основні їх ВАХ характеристики і параметри перемикання $F_{Гр.}$, що охоплюють більшу частину УВЧ діапазону. Вони вказують на перспективність запропонованого підходу для конструкцій ФП мікропотужних оптронів УВЧ діапазону при вдосконаленні їх НПС на основі Si підкладок.

3. Оптичні зв`язки для ІС з ОЗ. Початком використання ОЗ (для реалізації їх переваг в електронних блоках, ІС) і елементів дискретних оптронов можливо вважати їх застосування в експериментальних конструкціях, наприклад, у вигляді вертикально чергуючих блоків (електронні плати з цифровими ІС і міжплатні ОЗ на основі волоконно-оптичних пластин (ВОП), набраних з великої кількості світловодів. Але це КТР далеко від оптимального по ряду причин: 1-застосовано традиційні цифрові ІС і тип зв'язків між ними на і-й платі; 2-використано дискретні оптрони, їх елементи (СД, ФП) і ВОП, зв'язки між ними (немонолітна технологія); 3- складно юстирувати шари ВОП для підвищення ККД передачі сигналів від СД до ФП; 4- відсутні підходи до зниження габаритів, потужності споживання дискретних оптронов (їх елементів) і підвищення частоти перемикання $F_{СД}$; ін.. Зазначені недоліки було частково подолано в декількох КТР, запропонованих автором і його колегами, наприклад: деклараційний патент на корисну модель UA №10133 «Цифровий пристрій з оптоелектронних блоком» [21] (у вигляді ОЦІС), який наведено на рис.5а. Особливостями зазначеного КТР є: застосування оптоелектронних логічних елементів (ОЛЕ) типу nАБО-НІ (базис Пірса) на основі мікропотужних оптронів ДВЧ, УВЧ діапазону, які розроблені, розраховані і промодельовані автором (в режимі модуляції ІЧ СД оптронів типу «малий сигнал»); роздільне виконання напівпровідникових структур (НПС) по планарним технологіям у вигляді підкладок (пластин) з вертикальними мікровипромінювачами (ІЧ СД), рис. 2. Ці КТР автора отримали розвиток і лягли в основу патента на корисну модель UA № 51219 «Оптоелектронна інтегральна схема для цифрових автоматів» [22] (складається з горизонтальних рядів «склейок» ОЦІС двох типів: керуючий автомат (КА) і операційний автомат (ОА), які оптично пов'язані між собою, формуючи ІСОЗ, що показано на рис. 5б. Нарощування «склейок» може бути застосовано в серійних цифрових автоматах (ЦА) з використанням типовий / нетиповий КА і типовий / нетиповий ОА.



а б

Рис.5 - Ескізи КТР у вигляді ІСОЗ. Оптоелектронна цифрова ІС по патенту UA №10133 на корисну модель - а: 1 - підкладка матриці ФП; 2 - ІЧ УВЧ ІФП; 3 - ІЧ УВЧ СД; 4 - підкладка матриці ІЧ СД; 5 - резистори; 6 - Ме струмоведучі шини; 7 - ОЛЕ nАБО-НІ (перший, останній в ряду: наведено пунктиром); 8 - оптично прозоре НС; 9 (1,2…M) і 10 (1,2…N) - вхідні і вихідні оптичні роз'єми; 11,12 - виводи живлення матриць СД і ФП. Патент UA №10133 на корисну модель - б: реалізація різних типів і-го керуючого (КА), k-го операційного (ОА) цифрових автоматів (відповідно): КА- в центрі три «склейки», ОА- по дві «склейки» зверху і знизу КА з можливістю нарощування кількості і варіантів останніх

Однак в питанні реалізації планарних оптичних інтерфейсів ІС зазначені КТР автора не внесли обнадійливого рішення, тому що: 1- ОЗ були перпендикулярні підкладці з Si (не перебувають в її площині); 2- в конструкції ОЦІС, ІСОЗ застосовано гібридну технологію їх збірки; 3- коеффіецієнт розгалуження по виходу схем ОЛЕ в них є не більше 2...4. Відомо, що розробниками фірм Intel, Apple, ін. при реалізації оптоелектронних ІСОЗ застосовано, з одного боку, подібні підходи: підкладка з Si, роздільні випромінювачі з ПВВ і ФД, організація поділу вхідних/вихідних оптичних потоків цифрових даних (окремі мікроблоки лінійок випромінювачів і фотоприймачів), гібридна конструкція ІСОЗ [5, 6], яка наведена на рис.6. З іншого боку ними було використані **навісні елементи оптрону** (VCSEL, ФД; основна частина пристрою виконана як електронна цифрова ІС), від яких автор відмовився в запропонованих ним КТР для ОЦІС, ІСОЗ (рис.5).

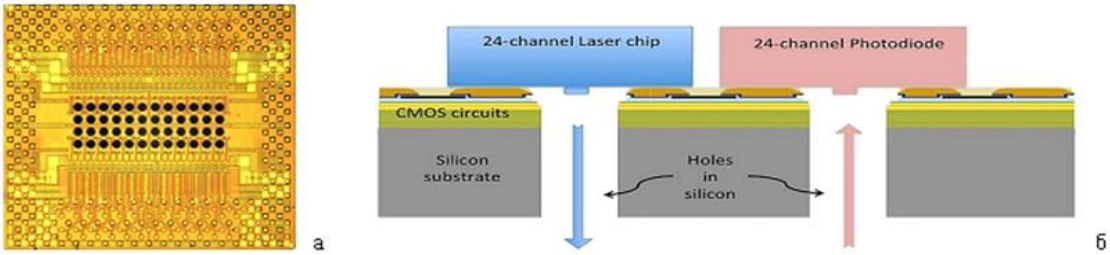


Рис.6- Фрагмент однієї сторони прототипа оптичного процесора IBM Holey optochip з організацією в центрі 24-х каналів передачі на основі НВЧ випромінювачів типа VCSEL: а- два верхніх ряди темних крапок та 24-х канальних фотоприймачів на основі ФД; два нижніх ряди темних крапок з сумарною швидкістю передавання від 40Гбіт/с (1 канал) до 1-го Террабіта/с (24 канали); б- розділення вхідних/вихідних оптичних потоків: отвори в Si підкладці, ескіз КТР- гибридна цифрова ІС (сірі прямокутники) і її поєднання з елементами СВЧ оптронів (кольорови прямокутники)

Для вирішення питання створення ОЗ для планарної ОЦІС автор проаналізував різні варіанти і підходи. В результаті запропоновано реалізувати ОЗ і/або інтерфейс ІС на основі розробки [23], де отримано інтегральні оптичні хвилеводи (ІОХ) на основі поверхневого окислення пористого Si, як зображено на рис.7.

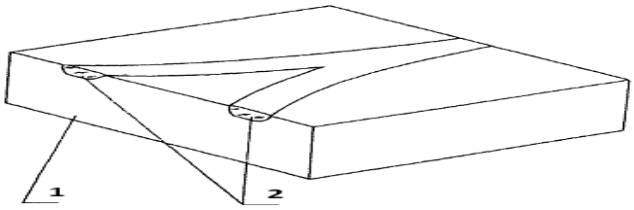


Рис.7- Ескіз сформованих планарних ОЗ (ІОХ) у вигляді Y- подібного планарного розгалужувача (технологія окислювання до SiO_2 пористого Si на поверхні підкладки):1 - Si підкладка; 2 - ОЗ у вигляді ІОХ

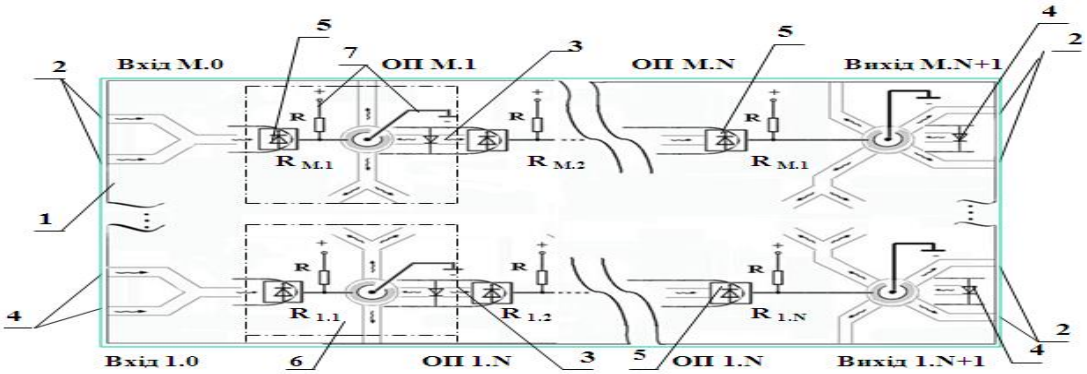


Рис.8 - Ескіз планарної оптоелектронної цифрової ІС (ПОЦІС) по патенту UA №123838 на корисну модель: 1- Si підкладка; 2 - ОЗ входів, виходів (у вигляді каналів SiO_2 типу ІОХ); 3- внутрішні ОЗ мікропотужних оптронів УВЧ диапазона; 4 - ІЧ СД; 5 - ІФП; 6 - схема оптоелектронного ЛП (типу nАБО-НІ), віділено пунктиром

Поєднання ІОХ (рис.7) із планарним мікропотужним оптроном з СЗ з ТВВ (рис.2) і спільне їх використання привело до прийнятного КТР для ІСОС, ОЦІС, яке оформлене автором патентом UA №123838 на корисну модель «Цифровий пристрій на планарній оптоелектронній ціфровій інтегральній схемі» [24], як показано на рис.8. В ньому використано технологічні прийоми, підходи і етапи створення НПС мікропотужних оптронів УВЧ діапазону (по Si, GaAs технологіям) і формування планарних ОЗ (ІОХ) - рис.7, де ІЧ СД (варіант з ТВВ) випромінюють у двох напрямках паралельно поверхні Si підкладки.

Висновок3. Використання ІОХ (на основі поверхневого окислення пористого Si) відповідає поставленному завданню створення ОЗ для планарних ІСОЗ, ОЦІС в яких можуть бути сформовані як внутрішні, так і зовнішні ОЗ. Однак особливості розповсюдження випромінювання в них мають деякі обмеження (лише в одному і/або двох напрямках з наступним розгалуженням типу Y- подібного ІОХ (рис.7) [23]. Тому вони можуть забезпечити ОЗ типу «point-to-point», що характерно для сучасних ВЧ металевих інтерфейсів (типу PCI, SATA, ін.), які широко використовуються в цифрових ІС [25].

Загальні висновки. У роботах автора [12-16, 20-22, 24] акцентована можливість використання планарних ІЧ СД (рис.2) у складіі мікропотужних інтегральних оптронів (ІЧ СД - ІФП) УВЧ діапазону із ПВВ, ТВВ (у вигляді НПС на основі Si, які розміщені в мезах з мікрокристалами GaAs, що сформовані на підкладці Si-SiO_2 за методом ГФЕ [17]) для ІСОЗ і ОЦІС і ПОЦІС. Такі оптрони мають ОЗ між їх елементами у вигляді ІОХ (на основі поверхневого окислення пористого Si, рис.7 [23]) і можуть бути використані як в планарних ІСОЗ, ОЦІС, ПОЦІС, ін., так і в гибридних ІС різних конструкцій. Перспективним напрямком подальшого їх розвитку досліджень можуть бути:

- розробка математичних моделей, моделювання СД мікровипромінювачів і ФП для освоєння СВЧ діапазону (3,0 …30ГГц) і створення на їх основі нанопотужних оптронів СВЧ діапазону;
- використання оптоелектронних ЛП (типу nАБО-НІ) в ІСОЗ, ОЦІС, які реалізовані на підкладках з Si по запропонованим КТР автора (рис.5, 8);
- використання інших напівпровдникових матеріалів (сполуки на основі С, графена, SiC, ін.), елементів (СД з SiC, ФД і МОП Тр. Шотткі, двомірні СД, трьомірні Тр., ін.) і надсучасних технологій (топологія: min. розмір в 8..10 нм, отримання ОЗ у вигляді ІОХ, ін.) для впровадження ОЗ при позробці ІС нового покоління.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Белкин М., Сигов А. (2012). Оптические межсоединения в интегральных схемах. Н-Т Ж. Наноиндустрия, 1, 8-14.
2. Юшин А.М. (2000-2005) Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Справочник: в 5т. М.: РадиоСофт.
3. Гребнев А.К., Гридин В.Н., Дмитриев В.П. (1998). Оптоэлектронные элементы и устройства. - М.: Радио и связь.
4. С.Никифоров. (2011). Исследование параметров светодиодов CREE XLamp XP-E/XP-G/XM-L. Ж. Полупроводниковая светотехника, 2.
5. http://macspoon.ru/apple/light-peak / LightPeak -новая технология передачи данных от Intel и Apple.

6. После кремния: электроника будущего. Фрагмент прототипа оптического процесора IBM Holey optochip / Ж.Chip.
7. Y.Demir, Y.Pan, S.Song (2013). Galaxy A High-Perfomance Energy-Effitient Multi-Chip Architecture Using Photonic Interconnects, DOI: 10.1145/2597652.2597664
8. Шуберт Фред Е. (2008). Светодиоды. М.: Физматлит.
9. http://electronics.dit.ie/staff/Ysemenova/oc.s/ Dublin Institute of Technology. School of electronic and Communications Engineering Optical Communications Systems. Optical Sources: The Light Emitting Diode.
10. Носов Ю.Р. (1989). Оптоэлектроника.- М.: Радио и связь.
11. Кожемяко В.П., Тимченко Л.И., Лысенко Г.Л., Кутаев Ю.Ф. (1990). Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники. К.: УМК ВО.
12. Проскурін М.П. (2007). Мікропотужні оптоелектронні логічні елементи цифрових інтегральних схем на твердотільних світловипромінюючих і фотоелектричних пристроях. Автореферат на здобуття наукового ступеня к.т.н: спец. 05.27.01 «Твердотільна електроніка». Одеса, ОНПУ.
13. Проскурін М.П. (2016). Особливості проектування, розрахунку і моделювання інтегральних мікропотужних світлодіодів УВЧ діапазону для оптоелектронних цифрових ІС. Науковий Вісник ЧНУ, Комп`ютерні системи та компоненти, Chernivtsi: ChNU, 1, 7, 38-44.
14. Проскурін М.П., Білявська О.С. (2006). Декл. Пат. UA № 12865, Україна. Інтегральний світлодіод. № u 2005 04596; Заявл. 17.05.2005; Опубл. 15.03.2006, Бюд. №. 3 - 3 с.
15. Проскурін М.П., Білявська О.С. (2006). Пат. на корисну модель UA № 19211, Україна. Інтегральний світлодіод з підвищеним коефіцієнтом корисної дії. № u 2006 05080; Заявл.10.05.2006; Опубл. 15.12. 2006, Бюл. №.12- 3 с.
16. Проскурин Н.П., Костенко В.Л., Касьяненко И.В. (2011). Микромощная оптоэлектронная логика и интерфейсы: параметры моделей ОВЧ, УВЧ схем для цифровых автоматов и компьютерных систем. НВ ЧНУ, Комп`ютерні системи та компоненти, 4, 2, 30-37.
17. В.И. Осинский, П.Ф. Олексенко, А.В. Палагин и др. (1999). Проблемы интеграции структур гетероэлектроники с кремниевыми ИС.Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 1, 3-17.
18. Проскурин Н.П. (2014). Расчет, оптимизация характеристик модели интегрального p-i-n фотодиода микромощного оптрона УВЧ диапазона для переключательных схем. Науковий вісник КУЕІТУ "Нові технології", 43-44, 1-2, 31-38
19. В.П. Григоренко, П.Г. Кузьмин, В.А. Кузьмин, Т.Т. Мнацаканов (1988). Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергоатомиздат.
20. Білявська О.С., Кос-тенко В.Л., Проскурін М.П. (2003). Декл. Пат. UA №68540А Україна. Інтегральний фотоприймальний пристрій. № 2003 3076496; Заявл. 11.07.2003; Опубл. 16.08.2004, Бюл. №8. - 3 с.
21. Проскурін М.П., Білявська О.С., Демиденко О.О. (2005). Пат. на корисну модель UA №10133 Україна, МКИ G02F 3/00. Цифровий пристрій з оптоелектронним блоком. № u 2005 00239; Заявл.11.01.2005; Опубл. 15.11.2005, Бюл. №11.- 3с.
22. Проскурін М.П. (2009). Пат. на корисну модель UA №51219 Україна, МПК G02F 3/00. Оптоелектронна інтегральна схема для цифрових автоматів / -№ u 2009 13491; Заявл.24.12.2009; Опубл.12.07.2010, Бюл.№13-3 с.
23. В.П.Бондаренко, В.С.Вариченко, А.М. Дорофеев и др. (1993). Интегральный оптический волновод на основе пористого кремния. Письма в ЖТФ, 19, 14, 73-76.
24. Проскурін М.П. (2017). Пат. на корисну модель UA № 123838 Україна, МПК G02F 3/00, H01L 27/00, H01L 31/00. Цифровий пристрій на планарній оптоелектронній цифровій інтегральній схемі. № u 2017 09447; Заявл. 26.09.2017; Опубл. 12.03.2018, Бюл. №5 - 5 с.
25. https://ru.wikipedia.org/wiki/SATA... Сравнение с другими шинами (табл.)

REFERENCES

1. Belkin M., Sigov A. (2012). Optical interconnects in integrated circuits. N-T Zh. Nanoindustriya, 1, 8-14.
2. Yushin AM (2000-2005) Optoelectronic devices and their foreign counterparts. Directory: in 5t. M .: RadioSoft.
3. Grebnev AK, Gridin VN, Dmitriev VP (1998). Optoelectronic elements and devices. - M .: Radio and communication.
4. S. Nikiforov. (2011). Investigation of the parameters of the CREE XLamp XP-E / XP-G / XM-L LEDs. J. Semiconductor Lighting Technology, 2.

5. http://macspoon.ru/apple/light-peak/ LightPeak is a new technology for transferring data from Intel and Apple.
6. After silicon: the electronics of the future. The fragment of the prototype of the optical processor IBM Holey optochip / J.Chip.
7. Y.Demir, Y.Pan, S.Song (2013). Galaxy A High-Perfomance Energy-Effitient Multi-Chip Architecture Using Photonic Interconnects, DOI: 10.1145 / 2597652.2597664
8. Schubert Fred E. (2008). LEDs M .: Fizmatlit.
9. http://electronics.dit.ie/staff/Ysemenova/oc.s/ Dublin Institute of Technology. School of Electronic and Communications Engineering Optical Communications Systems. Optical Sources: The Light Emitting Diode.
10. Nosov Yu.R. (1989). Optoelectronics. - M .: Radio and communication.
11. Kozhemyako VP, Timchenko LI, Lysenko G.L., Kutaev Yu.F. (1990). Functional elements and devices of optoelectronics. K .: UMK VO.
12. Proskurin MP (2007). High-strength optoelectronic logic elements of digital integrated circuits on solid-state light-emitting and photovoltaic devices. Abstract for the scientific degree of the candidate of technical sciences: specialty. 05.27.01 «Solid-state electronics». Odessa, ONPU.
13. Proskurin MP (2016). Features of design, calculation and simulation of integral microwave UHF LEDs for optoelectronic digital IS. Scientific Bulletin of ChNU, Computer Systems and Components, Chernivtsi: ChNU, 1, 7, 38-44.
14. Proskurin MP, Bilyavskaya O.S. (2006). Deck Stalemate. UA № 12865, Ukraine. Integrated LED. № u 2005 04596; Declared 17.05.2005; Published by March 15, 2006, Bude. No. 3 - 3 s.
15. Proskurin MP, Bilyavskaya O.S. (2006). Stalemate. to utility model UA № 19211, Ukraine. Integrated LED with high efficiency. No. 2006 05080; Declared.10.05.2006; Published by 15.12. 2006, Bull. No. 12-3.
16. Proskurin N.P., Kostenko V.L., Kasyanenko I.V. (2011). Microphone optoelectronic logic and interfaces: parameters of VHF models, UHF circuits for digital automata and computer systems. NT ChNU, Computer Systems and Components, 4, 2, 30-37.
17. VI Osinsky, P.F. Alekseenko, AV Palagin et al. (1999). Problems of Integration of Structures of Heteroelectronics with Silicon IS. Technology and Design in Electronics, 1, 3-17.
18. Proskurin N.P. (2014). Calculation, optimization of the characteristics of the model of the integral p-i-n photodiode of the microwave optocoupler of the UHF band for switching circuits. Scientific Bulletin of KUEITU "New Technologies", 43-44, 1-2, 31-38
19. VP Grigorenko, P.G. Kuzmin, VA Kuzmin, T.T. Mnatsakanov (1988). Modeling and automation of designing power semiconductor devices. M .: Energoatomizdat.
20. Bilyavskaya OS, Kos-tenko VL, Proskurin MP (2003). Deck Stalemate. UA №68540A Ukraine. Integrated photodetector. No. 2003 3076496; Declared 11.07.2003; Published by Aug 16, 2004, Bul. No. 8 - 3 s.
21. Proskurin MP, Bilyavskaya O.S., Demidenko O.O. (2005). Stalemate. to utility model UA №10133 Ukraine, МКИ G02F 3/00. Digital device with optoelectronic unit. No. 2005 00239; Declared.11.01.2005; Published by Nov 15, 2005, Bul. No. 11.- 3s.
22. Proskurin MP (2009). Stalemate. to utility model UA №51219 Ukraine, МПК G02F 3/00. Optoelectronic integrated circuit for digital machines / -№ u 2009 13491; Declared.24.12.2009; Published on July 12, 2010, Bulletin No. 13-3 with.
23. VP Bondarenko, V.S.Varichenko, A.M. Dorofeev et al. (1993). Integrated optical waveguide based on porous silicon. Letters to the ZhTF, 19, 14, 73-76.
24. Proskurin MP (2017). Stalemate. to utility model UA № 123838 Ukraine, МПК G02F 3/00, H01L 27/00, H01L 31/00. Digital device on planar optoelectronic digital integrated circuit. No. 2017 09447; Declared 09/26/2017; Published by Mar 12, 2012, Bul. No. 5 - 5 s.
25. https: //ru.wikipedia.org/wiki/SATA ... Comparison with other buses (tab.)

Надійшла до редакції 23.11.2018р.

МИКОЛА ПЕТРОВИЧ ПРОСКУРІН – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп`ютерних систем і мереж Запорізького національного технічного університету.