

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, проведено 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 діапазон, конструктивно-технологічне рішення, фізико-топологічна модель, напівпровідникова структура, WDM технології.

Аннотация. В статье приведен обзор развития микро мощных 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 optocouplers, 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 обґрунтовано 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 діапазонів 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 напрямку. Фірми Intel, IBM, Siemens, Hewlett-Packard, Toshiba, Протон, ін. постійно розширюють номенклатуру виробництва різного типу оптоелектронних пристроїв та розробок (оптрони, оптореле, логічні ключі, ІС з використанням 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.

1. Випромінювачі на основі мікропотужних ІЧ СД. З появою в середині 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 (Е→L), питання їх широкого використання в сучасних інформаційних технологіях стало лише функцією часу (при стрімкому збільшенні телекомунікаційних мереж, попиту на інформаційне забезпечення, розвитку технологій «розуного» виробництва, зменшення собівартості виробів, появи на ринку сучасних електронних, оптоелектронних технологій і пристроїв, ін.). При виборі типу випромінювача для ІС з ОЗ існують **вагомні аргументи на користь СД** (light emitting diod - LED), як некогерентного джерела світла різних діапазонів (видимого, ІЧ, УФ). Перевагами твердотільних СД є: їх надмалі розміри, приємне значення ККД перетворення (Е→L -десятки відсотків), високе значення внутрішнього/зовнішнього коефіцієнта квантової ефективності (ККЕ) і виводу потужності випромінювання, кілька типів виводу випромінювання (відносно площини р-п 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 - OEMK [3], ін.), волоконнооптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) на малі і середні відстані (довжина 0,01мм...3км), LED панелі сучасних дисплеїв, 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 $\leq 1\text{км} \dots 10\text{мм}$ 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 випромінювачів створено на основі планарних гомогенних і/або гетерогенних НПС на основі р-п 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 р+ 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 р+ області, а далі - інтенсивне випромінювання на довжині λ з товщини НПС (слідuje з виразу для ΔE). Порівняно із СД, структури ІЛ, VCSEL є більш складними, мають менший зовнішній ККЕ (фізика їх функціонування потребує наявності оптичного резонатора, який формує «стоячу» хвилю за рахунок залишення частини світлової енергії в ньому, ін.), жорсткі вимоги до стабільності $U_{\text{живл.}}$, відносно високі порогові значення струму $I_{\text{п}}$, ін.. Слід акцентувати, що в питанні вибору випромінювача для ІСОЗ, ОЦС (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 - ПБВ, 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). Окреслено 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 перемикачів $F_{\text{р.сд}} \leq 2\text{ГГц}$ (перекриває більшу частину УВЧ діапазону 0,3...3,0 ГГц) [7, 10, 11];
- вибір конструкції мікропотужних ІЧ СД з огляду на напрям випромінювання: з ПБВ і/або з ТВВ;
- формування оптичних мікроканалів, їх напрямів і кількості на оптичних виходах ІЧ СД (з ПБВ і/або ТВВ);
- оптимізація ККД перетворення (Е→L), внутрішнього/зовнішнього ККЕ (відбір товщин активного шару р⁺).

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 колеґ [12-15],

один з варіантів яких наведено на рис.1. Особливістю цього КТР для планарного ІЧ СД з ПВВ є те, що випромінювання виходить назовні з обох його напрямів перпендикулярно поверхні (зверху і знизу), що зменшує 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 $\lambda \sim 0,84\mu\text{м}$ і зовнішнім ККЕ $\leq 10\%$ (на кожний з двох напрямків випромінювання) отримано частоту перемикавання $F_{Гр.} \sim 1,6\text{ГГц}$ (при $I_{СД \text{ макс}} \sim 60 \dots 80\text{мкА}$) [16], що перекирає 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].

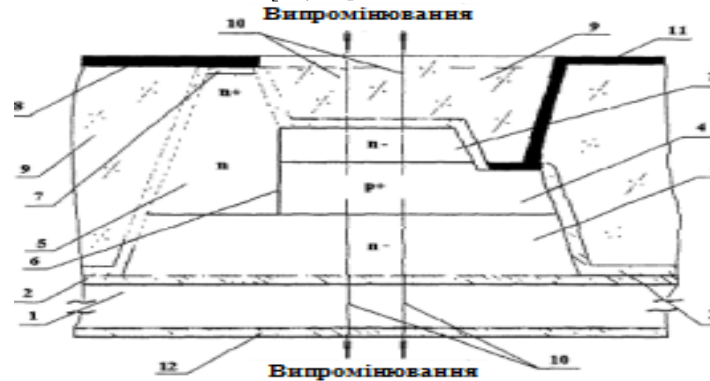


Рис.1- Ескіз КТР з ПВВ інтегрального СД з підвищеним ККД (патент на корисну модель UA №19211 [15])

Окремо слід відмітити КТР українських вчених у вигляді планарного мікропотужного оптрона (GaAs СД- р-і-п ФД), який створений по мікроелектронним технологіям на Si підкладці [17] (вирослено кристал GaAs в ізолюваній SiO₂ мезі методом гетерофазної епітаксії - ГФЕ), що дає можливість виконати НПС СД як із ПВВ, тобто перпендикулярно поверхні р-п переходу, так із ТВВ, тобто з торців р-п переходу: в другому варіанті випромінювання йде паралельно поверхні Si підкладки; ескіз цього КТР надано на рис.2.

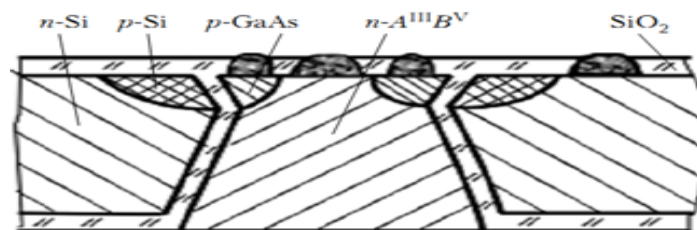


Рис.2- Ескіз планарного оптрона (GaAs СД- р-і-п ФД): Si підкладка і мікрокристал GaAs, ізоляція мези - SiO₂

Висновок по розділу 1. Окреслено етапи проектування мікропотужних ІЧ СД УВЧ діапазону (для інтегральних мікропотужних оптронів у складі ІСОЗ, ОЦС) і вказано підходи до реалізації 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 перемикавання на 1...2 порядки; 4- збільшення у ІЧ СД концентрації домішки робочої області випромінювання $p^+ \geq 10^{19}\text{см}^{-3}$; 5- оптимізації виводу випромінювання і підвищення ККД, внутрішньої/зовнішньої ККЕ (розрахункова товщина Z активного шару $p^+ \sim 1 \dots 3\ \mu\text{м}$).

2. Фотоприймачі на основі ІЧ р-і-п ФД з ВЧ транзистором. Для КТР мікропотужного оптрона УВЧ діапазону іншим важливим елементом є ФП, що здатен ефективно перетворювати світло від ІЧ СД в електричний сигнал ($L \rightarrow E$). Цим критеріям цілком відповідає ФД з достатньо простою конструкцією, а для перекриття УВЧ діапазону- його різновид у вигляді ІЧ р-і-п ФД. НПС ІЧ р-і-п 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 р-і-п 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 K_p , ін.) і створення ескізів її геометричної структури, т.д.. Далі тримають розрахункові набори параметрів: прямі і зворотні вольтамперні характеристики (ВАХ) НПС ІЧ р-і-п ФД (з урахуванням неідеальності ряду характеристик: рекомбінаційно-генераційних струмів, електрофізичних ефектів, ін.), їх зв'язку з геометрією НПС (профілі розподілення- PR, глибини р-п 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 р-і-п ФД (для різних PR його легування) - величини генерації G для НЗ, параметри часу $\tau_{вкл}/\tau_{вickl}$, ємність C_{p-i-n} ФД, ін.. На рис.3 наведено проміжний етап розрахунку ІЧ р-і-п ФД, що проводив автор: два розраховані PR його р+ області і їх порівняння [12, 18].

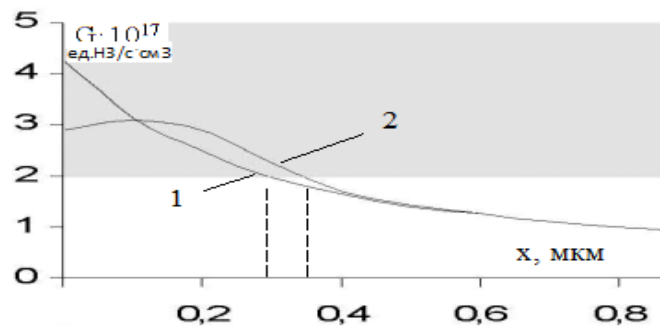


Рис.3 - Розрахункові PR ІЧ р-і-п ФД з розподіленням концентрації домішки в його аноді: по функції Гаусса- 1; з максимумом PR на глибині 0,2мкм- 2. Сірим фоном вказана зона прийнятних значень G.

Результат математичного моделювання НПС р-і-п ФД і ВЧ n-p-n Тр. представлено у вигляді рішення систем дифференціальних рівнянь: Пуассона (описує розподіл потенціала) 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 рекомбінацією електронно-діркових пар (формують електронний I_E і дірковий I_D компоненти струму $I_{ФД} = I_E + I_D$, урахування їх кінетичних коефіцієнтів, ін.). Розрахунок моделей ІЧ р-і-п 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 р-і-п 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 вирішено синтезом квазіоднорідної математичної моделі як для р-і-п ФД (один р-п перехід), так і для ВЧ n-p-n Тр. (два р-п переходи). Воно ведеться з урахуванням варіювання домішок, отриманих PR 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 $h \geq 50 \dots 10$ на частоті $F_{Гр.} = 0,5 \dots 1,6$ 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 $I_{ФД\text{ вих.}} = I_{Б\text{ вх.}} = 2$ мкА довжиною 1нс ($F_{Гр.} = 0,5$ ГГц), при цьому для ВЧ n-p-n Тр. коефіцієнт посилення $h \sim 50 \dots 60$ (режим К.З.). Пунктирна лінія на рис.4 (а) для імпульсу довжиною в 0,5нс ($F_{Гр.} = 1,0$ ГГц) дозволяє приблизно оцінити значення $h \sim 30 \dots 35$ (режим К.З.). При введенні 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 $I_{ФД\text{ вих.}}$ 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 р-і-п ФД з n-p-n ВЧ Тр..

Це було зроблено автором і його колегами і найшло відображення у деклараційному патенті UA (№68540A) «Інтегральний фотоприймальний пристрій» (ІФП) [20]. Приклади проектування, етапи розробки, статичні і динамічні характеристики, результати моделювання кількох варіантів ІФП (ІЧ р-і-п ФД з ВЧ n-p-n Тр.) UVЧ 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).

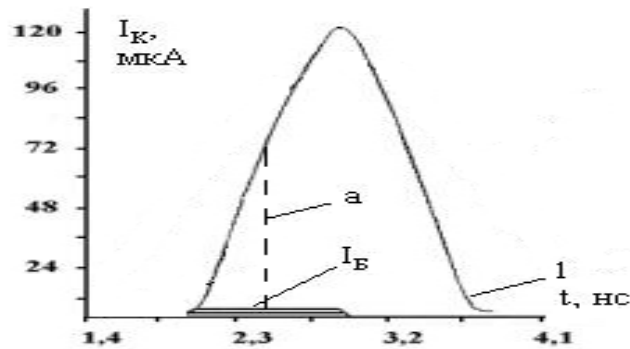


Рис.4- Розрахункова залежність вихідного струму (режим К.З.) I_K ВЧ n-p-n Тр. (1) від часу t для одного імпульсу довжиною в 1нс ($F_{Гр.} = 0,5ГГц$) при $I_{ФД\text{ вих.}} = I_{Б\text{ вх.}} = 2мкА$ і пунктирна лінія для оцінки I_K імпульсу довжиною в 0,5нс- а

Висновок по розділу 2. Запропоновано в якості основного КТР для інтегрального ІЧ p-i-n ФД з ВЧ Тр. УВЧ діапазону (для мікропотужних оптронів) застосувати: Si підкладку з концентрацією домішки p, 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 - «взгонки». 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 оптронів 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 i-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 оптронів (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 оптоелектронним 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 мікрівипромінювачами (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.

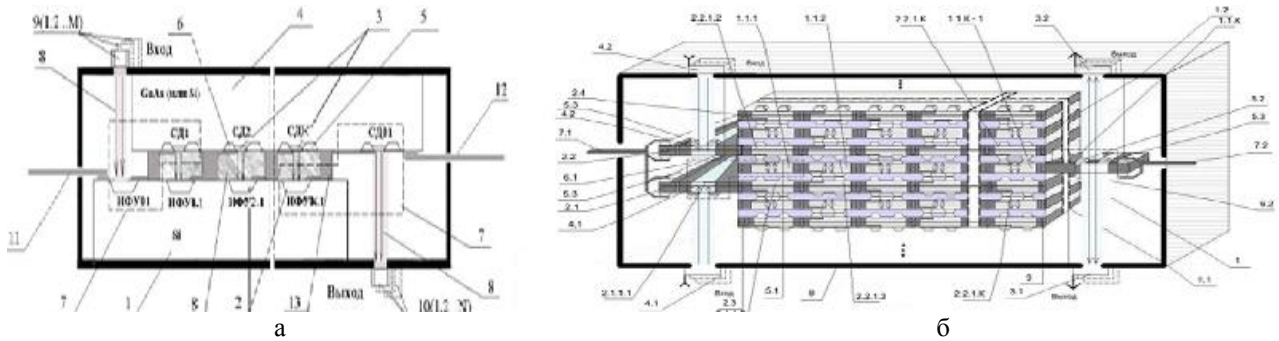


Рис.5 - Ескізи КТР у вигляді ІСОЗ. Оптикоелектронна цифрова ІС по патенту UA №10133 на корисну модель - а: 1 - підкладка матриці ФП; 2 - ІЧ УВЧ ІФП; 3 - ІЧ УВЧ СД; 4 - підкладка матриці ІЧ СД; 5 - резистори; 6 - Ме струмоведучі шини; 7 - ОЛЕ nАБО-nІ (перший, останній в ряду: наведено пунктиром); 8 - оптично прозоре НС; 9 (1,2...М) 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 керуемого (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 підкладки з Si (не перебувають в її площині); 2- в конструкції ОЦІС, ІСОЗ застосовано гібридну технологію їх збірки; 3- коефіцієнт розгалуження по виходу схем ОЛЕ в них є не більше 2...4. Відомо, що розробниками фірм Intel, Apple, ін. при реалізації оптикоелектронних 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).

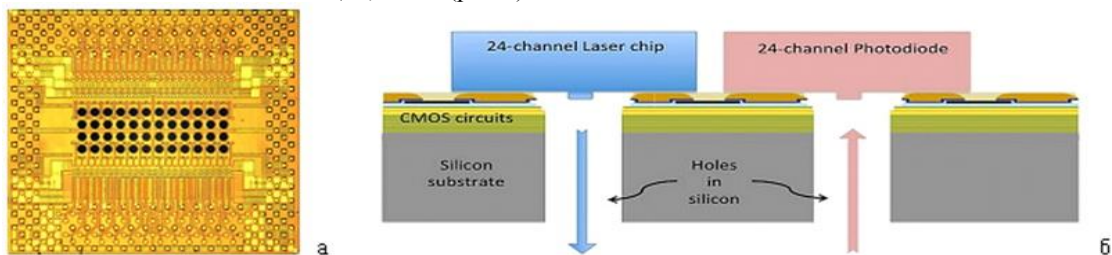


Рис.6- Фрагмент однієї сторони прототипа оптичного процесора IBM Holey optochip з організацією в центрі 24-х каналів передачі на основі НВЧ випромінювачів типу VCSEL: а- два верхніх ряди темних крапок та 24-х каналних фотоприймачів на основі ФД; два нижніх ряди темних крапок з сумарною швидкістю передавання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

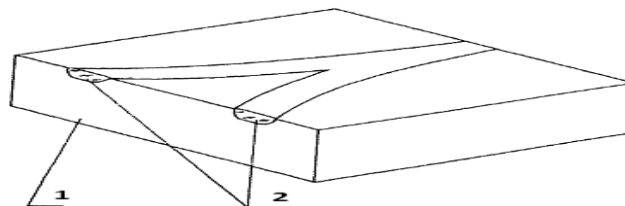


Рис.7- Ескіз сформованих планарних ОЗ (ІОХ) у вигляді Y- подібного планарного розгалужувача (технологія окислювання до SiO₂ пористого Si на поверхні підкладки): 1 - Si підкладка; 2 - ОЗ у вигляді ІОХ

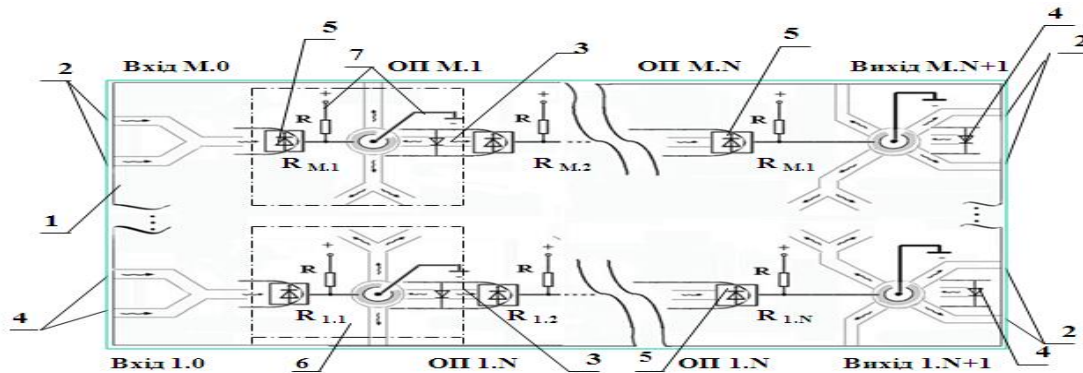


Рис.8 - Ескіз планарної оптоелектронної цифрової ІС (ПОЦІС) по патенту UA №123838 на корисну модель: 1- Si підкладка; 2 - ОЗ входів, виходів (у вигляді каналів SiO₂ типу ІОХ); 3- внутрішні ОЗ мікропотужних оптронів УВЧ діапазону; 4 - ІЧ СД; 5 - ІФП; 6 - схема оптоелектронного ЛП (типу пАБО-НІ), віділено пунктиром

Поєднання ІОХ (рис.7) із планарним мікропотужним оптронем з СЗ з ТВВ (рис.2) і спільне їх використання привело до прийнятного КТР для ІСОЗ, ОЦІС, яке оформлене автором патентом UA №123838 на корисну модель «Цифровий пристрій на планарній оптоелектронній цифровій 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 поставленому 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 складі мікропотужних інтегральних оптронів (ІЧ СД - ІФП) УВЧ діапазону із ПБВ, ТВВ (у вигляді НПС на основі Si, які розміщені в межах з мікрокристалами GaAs, що сформовані на підкладці Si-SiO₂ 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 гібридних 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 пАБО-НІ) в ІСОЗ, ОЦІС, які реалізовані на підкладках з Si по запропонованим КТР автора (рис.5, 8);
- використання інших напівпровідникових матеріалів (сполуки на основі С, графена, SiC, ін.), елементів (СД з SiC, ФД і МОП Тр. Шоткі, двомірні СД, трьомірні Тр., ін.) і надсучасних технологій (топология: 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 процессора IBM Holey optochip / Ж.Сип.
7. Y.Demir, Y.Pan, S.Song (2013). Galaxy A High-Performance Energy-Efficient 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. № у 2005 04596; Заявл. 17.05.2005; Опубл. 15.03.2006, Бюл. № 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. № у 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 ОБЧ, 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 р-і-п 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 №68540A 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. № у 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 / -№ у 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. № у 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-Performance Energy-Efficient 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.