

УДК 004.3

Оптичні інтерфейси цифрових інтегральних схем на *Si* підкладках.

М.П. Проскурін

Запорізький національний технічний університет (ЗНТУ), м. Запоріжжя.

Проведено аналіз сучасних напрацювань, рішень і технологій для створення оптичних інтерфейсів (ОІ) цифрових інтегральних схем (ІС) на *Si* підкладках, наведено варіанти їх можливої реалізації. Запропоновано підходи, конструкції і кроки для реалізації ОІ і їх компонентів у складі ІС з оптичними зв'язками на *Si* підкладках.

The analysis of modern works, decisions and technologies is conducted for creation of optical interfaces (OI) of the digital integrated circuits (IC) on *Si* linings, variants are resulted them possible realization. Offered approach, constructions and steps for realization of OI and their components in composition IC with optical copulas on *Si* linings.

Вступ. Існуючи типи оптичних зв'язків (ОЗ) між компонентами, платами цифрових пристроїв (ЦП), автоматів (ЦА) і апаратурою поки що мають характер фрагментарного їх використання у вигляді дослідно-експериментальних оптичних каналів (ОК) які мають достатньо привабливі параметри [1,2]. Обов'язковою складовою останніх є наявність трьох компонентів: активних- твердотільних оптичних випромінювачів (ОВ) і фотоприймачів (ФП), пасивних - ОК, які реалізовано (в більшості випадків) у вигляді стандартизованих конструктивних одиниць: оптичних шнурів, кабелів та світловодів (волноводів), в т.ч. на поверхні (або в середині) плат, підкладок і кристалів. Довжина λ використовуваних хвиль випромінювачів знаходиться в ІЧ діапазоні (0,8...1,6мкм), робоча частота f_p має значення від кількох десятків ГГц (ДВЧ і УВЧ: 0,03...0,3ГГц і 0,3...3,0 ГГц) до кількох десятків ГГц (НВЧ: 3,0...30ГГц). Створення планарних ОВ, ОК і ФП (елементів ОІ) на поверхні і в товщі кристалів ІС може бути здійснено на основі відомих інтегральних напівпровідникових (Н/П) технологій [3], елементи і підходи яких необхідно використати для досягнення цілі. Це забезпечить вирішення питання заміни дротового зв'язку - металевих (Ме) ліній в ІС (і між ними) на оптичні.

Аналіз останніх джерел дослідження і публікацій. Для забезпечення зв'язків між платами ЦП, ЦА з ІС у стійках використовують зв'язки по ОК (між пристроями, блоками, платами, компонентами, ін.) на основі випромінювачів світлодіодів (СД) і фотоприймачів (ФП) з робочою частотою f_p до 0,2 ...0,5 ГГц [1,2], як показано на Рис.1. В технології *Light Peak* фірми *Intel* реалізовано зовнішні зв'язки блоків персонального комп'ютера (ПК) зі швидкістю 10Гб/с (Рис.2). Відомі технічні рішення створення ІС на основі двох підходів: традиційний (вхідні/вихідні зв'язки оптичні, логічна обробка ведеться стандартними електронними блоками) [1,2]; нетрадиційний - на основі схем у вигляді оптоелектронних логічних елементів (ОЛЕ) типу *n*АБО-НІ (на елементах мікропотужних оптронів ДВЧ, УВЧ діапазонів) [4,5].

Автором статті запропоновані конструкції ІС з оптичними зв'язками (ІСОЗ) на основі СД з поверхневим двостороннім виходом випромінювання (ПВВ) [6,7], які складають «сендвіч» з 2 і більш підкладок, мають виключно оптичні зв'язки у вигляді ОК типу ІСД - 2...4ФП (з'єднанням поверхнь «сендвіч»), можуть бути розглянуті як варіант гібридних ІСОЗ (режим передавання - сімплекс). З відомих фірм-виробників оптоелектронних компонентів відкрито декларують проведення НДР в галузі оптичних інтерфейсів (ОІ) і їх практичні результати обмежена кількість - *Intel*, *Hewlett-Packard*, ін.. Тому аналіз стану питання створення ОІ для ІСОЗ, знаходження і ранжування прийнятних конструктивно-технологічних рішень (КТР), оцінки стану технологій виготовлення їх компонентів і напрямку розвитку є достатньо актуальним.

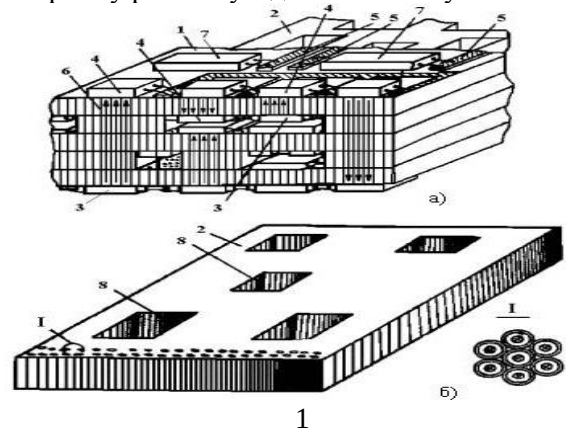
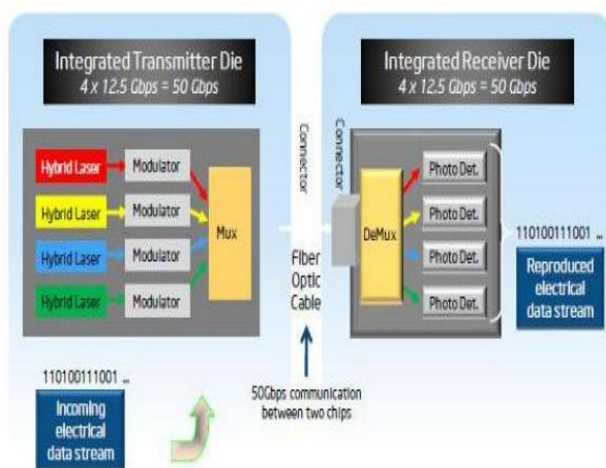
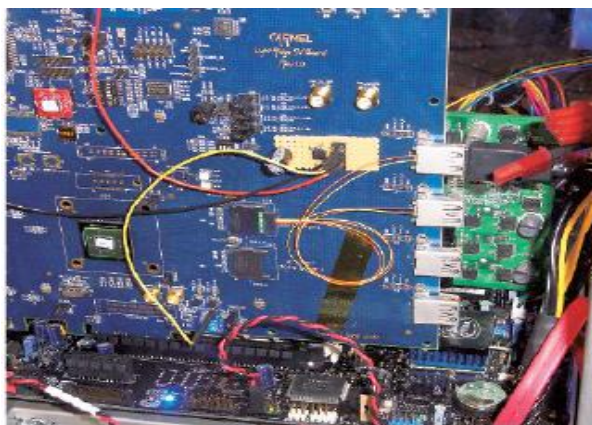


Рис.1 Реалізація оптичних міжблочних зв'язків на основі волоконнооптичних пластин (ВОП): а - зібрана конструкція; б: 1- плата; 2-ВОП з ОК; 3 - блок світловипромінювачів на СД; 4- блок фотоприймачів на ФД; 5 -струмоведучі доріжки; 6- хід оптичних променів; 7 - ІС; 8 - «вікна» для електричних зв'язків; І - збільшений вид зверху на ОК ВОП -1[1]. Аудіо плата розширення для ПК - оптичні (чорні) і коаксіальні (жовті) AES-EBU входи, виходи: межблочні зв'язки можуть реалізовуватися оптичними і коаксіальними шнурами - 2.



а



б

Рис.2 Прототип міжкристалного оптичного зв'язку технології Light Peak фірми Intel - а; фото варіанту його реалізації для блоків ПК (оптичні шнури – кольорові дроти), швидкість 10Гб/с – б [2].

Зазначення невіршених раніше частин загальної проблеми. Для зв'язку між кристалами і/або його частинами ІС використовують між- і внутрішньокристалльні ОК [1,2]. Але існуючи КТР і підходи вказують на те, що комплексність питання створення ОІ у вигляді ОК для планарних ІСОЗ розглянуто недостатньо: відсутня концепція їх побудови (на основі яких елементів і технологій), зв'язок між компонентами (як формується випромінювач, фотоприймач, ОК, підкладка), обраною технологією їх виготовлення (планарна, гібридна їх різновиди). Результатом цього є відсутність прийнятного КТР, варіантів виготовлення елементів ОІ і напрямків розвитку на перспективу.

Постановка завдання. Розглянути підходи для створення ОІ на базі існуючих рішень на основі відомих Н/П технологій виготовлення ІС. Огляд джерел підводить до висновку, що є потреба комплексного аналізу для пошуку, обґрунтування і реалізації запропонованих науковцями рішень по створенню елементної бази ОІ для імплементації їх в ІС. Спрощене завдання виглядає наступним чином: металеві (Ме) зв'язки ІС замінюються на оптичні, електронні каскади передавача (вихід підсилювача на Ме лінію) і приймача (вхід підсилювача з Ме лінії) на оптоелектронні по типу СВ(СД) - ОІ(ОК) - ФП(ФД) з варіантами їх КТР.

Основний матеріал аналізу, дослідження та результати. На прикладі запропонованих автором і іншими науковцями рішень, а також останніх досліджень і досягнень, провести аналіз шляхів, підходів і напрямів пошуку прийнятного КТР для досягнення реалізації оптичних одно- і двонаправлених зв'язків: інтерфейсів типу шина (один СД-кілька ФП) для ІСОЗ на базі існуючих Н/П технологій, а також оглянути варіанти їх створення.

Окреслимо відомі основні переваги передачі інформації за допомогою світла: оптичний сигнал не потребує «нульового» дроту (однонапрямність); має найвищу швидкість розповсюдження $V = C/n$ по ОК (коефіцієнт переломлення n в середині ОК повинен мати значення більш ніж його оболонки); ОК нечутливий до електромагнітних перешкод; є можливість передавання в ОК кількох сигналів одночасно (на різних довжинах хвиль λ_i).

По-перше, роботи автора цієї статті і інших вказують на переваги схем ОЛЕ КПТ пАБО-НІ (базис Пірса) у складі: передавач випромінювання - на основі UVЧ СД, фотоприймач (ФП) - $p-i-n$ ФД з $n-p-n$ ВЧ транзистором на Si при $\lambda \sim 0,8...0,9\mu\text{м}$ (використано мікропотужні оптрони ДВЧ, UVЧ діапазонів) [4,5,8]. В роботах наведено численні результати моделювання схем мікропотужних оптоелектронних логічних елементів (МОЛЕ) на основі оптронів СД - ФП ДВЧ, UVЧ діапазонів, запропоновані конструкції їх елементів (СД, ФП), вказані параметри їх моделей: частота перемикавання

$> 1\text{ГГц}$ ($P_{\text{МОЛЕ}} \sim 60\text{мкВт}$ з можливістю зниження). Прикладом відомих приладів з одним випромінювачем (СД) і $2...4$ ФП є дискретні оптрони виробництва СНД типу: АОД111А (1СД-2ФД), ОЕП-7 (1СД-2ФР), ЗОР125А (1СД-4ФР), ін. [9]. Оптрони мають коефіцієнт розгалуження по виходу $K_{\text{Р Вых.}} = 2...4$ і вказаний підхід може бути використано як прототип ОІ типу «шина» (вид зв'язку- сімплесний, один СД пов'язан з одним або з кількома ФП). Його різновидом є тип зв'язку, коли кілька СД пов'язані з одним або з кількома ФП. На Рис.3 наведено ескіз схеми «монтажного» пАБО-НІ, де кілька СД (наприклад $K = 2...8...$) пов'язані з одним ФП [10], коефіцієнт об'єднання по входу може мати значення $K_{\text{Об. Вх.}} \sim 2...4...$, дорівнює кількості зв'язків від означених СД до обраного ФП.

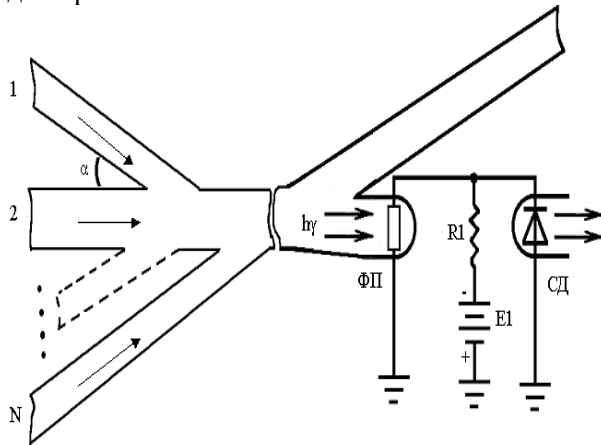


Рис.3 Варіант використання оптичних зв'язків у вигляді елементів ОІ в схемі ОЛЕ типу пАБО-НІ [10]. Кут α повинен мати значення не більш $1...2$ градусів.

Подальше підвищення $K_{\text{Об. Вх.}}$ і $K_{\text{Р Вых.}}$ до значень $K = 8...16...$ (реалізовано в Ме інтерфейсах типу «шина» - один передавач пов'язан з K приймачами, наприклад ISA, PCI, ін.), наштовхується на обмеження у вигляді відсутності прийомного КТР. Вони пов'язані з відмінностями розповсюдження оптичних сигналів в ОК, що значно відрізняється від механізму проходження електричних сигналів по дротах. Це суттєво підвищує вимоги до КТР, а саме: для ефективного входу/виходу оптичного випромінювання в/із одного ОК необхідно погодження значення апертур СД, ФД, ОК (повинні мати приблизно однакові значення); оптичне випромінювання розповсюджується без значного загасання лише по прямій лінії

(тобто кути $\alpha_{1,2,...m}$ між кількома ОК, які оптично з'єднуються бути менш ніж $1...2$ градуси - Рис. 3) [11].

По-друге, проаналізуємо варіанти створення на поверхні підкладки Si світлопровідного середовища, тобто ОК для оптронів (наприклад для МОЛЕ) на поверхні ІС, як альтернативи Ме з'єднанням. Варіанти їх створення в ІС по відомих технологіям не є прийнятними, бо використовують або готові ОВ (гібридний підхід), або достатньо коштовні матеріали підкладок (GaAs , LiNbO_3) замість доступного SiO_2 [11]. SiO_2 є ідеальним для розповсюдження випромінювання в ІС на підкладках Si, але при застосування технології окислювання поверхні Si підкладки напругу має місце збільшення об'єму SiO_2 в 1,5 рази, що призводить до тріщинуватості, сколів і т.п. і є неприйнятним для ОК. В той же час на основі технології з використанням пористого кремнію (ПК) можливо створити ОК, наприклад, на поверхні підкладки Si, так і в її товщині [12]. Основою є ефект формування з ПК (процес анодного травлення заданої топології на поверхні Si підкладки) SiO_2 , який розширюється в об'єм пор без тріщин і формує ОК. На Рис.4 наведено ескіз реалізованого симетричного оптичного розгалуджувача 1 в 2 у вигляді ОК на поверхні Si підкладки. Розгалуджувач може бути використаний і в зворотньому напрямку (тобто $2...4...8...$ в 1, з нарощуванням і розгалуженням структури (до n в 1), як показано у схемі ОЛЕ типу пАБО-НІ (Рис.3).

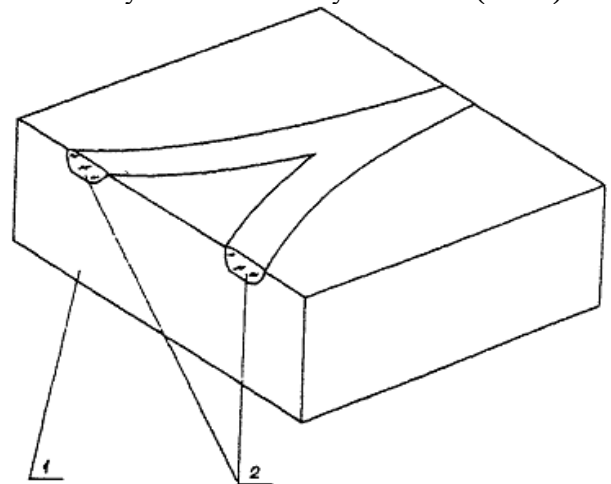


Рис.4 Ескіз симетричного оптичного розгалуджувача на основі ПК [12]: підкладка Si-1; світловод на її поверхні - 2 [12].

По-третє. Для вирішення питань функціональної і технологічної інтеграції в перетворенні ІС до ІСОЗ треба вказати на те, що в останніх мають використовуватися оптрони і/або їх елементи (які поєднанні в єдиному КТР): випромінювачі (СД на $GaAs$, GaN , ін.) і ФП ($p-i-n$ ФД на Si), які з'єднано з ОК, а це є фрагментом ОІ. В більшості випадків сучасні дискретні оптрони, як і елементи ОІ виконано наступним чином: випромінювач – СД на з'єднаннях A_3B_5 , A_2B_6 (внутрішній квантовий вихід до 20...34% від електричної потужності, зовнішній квантовий вихід 5...10%); ФП - у вигляді $p-i-n$ ФД (може доповнюватися біполярними і/або МДН транзисторами у вигляді підсилювача на Si) [4,5]. Випромінювач у вигляді СД (на основі $GaAs$, GaN , ін.) є прийнятним варіантом для мікроджерела світла в ІСОЗ і має наступні позитивні риси: мале споживання, прийнятний ККД, достатні параметри перемикачання (більш ніж 1ГГц), можливість виготовлення по планарних Н/П технологіях, ін.. Але СД на основі сполук Ga , як мікроджерела світла, мають і негативні риси: вузький температурний діапазон роботи ($-60^{\circ}C \dots +50^{\circ}C$), значний кут випромінювання (визначає апертуру N), наявність розкиду $\Delta\lambda$ від основної довжини хвилі λ_0 , ін.. Проте в більшості вони не є вкрай критичні. Основне технологічне протиріччя є в тому, що для випромінювачів використовують прямозонні Н/П матеріали на основі з'єднань A_3B_5 і їх різновидів: GaP , GaN , $GaAs$, $GaAsP$, $GaAsAl$, ін., які не зовсім поєднуються з Н/П матеріалом підкладки ІС - Si і його сполуками (SiO_2 , Si_3N_4 , ін.).

Ці питання ґрунтовно розглянуто у роботі [13], де досліджено кілька підходів щодо його вирішення, знайдено прийнятне КТР і отримані перші практичні результати. В роботі досліджено інтегральні оптрони типу $GaAs-SiO_2-Si$. Ескіз подвійного оптрону такого типу (два СД в одній мезі і два ФД навколо її) наведено на Рис.5. Основа оригінального КТР базується на вирощуванні острівків (мез) $GaAs$ через проведення процесу селективної епітаксії $GaAs$ у решічасту Si структуру, що поєднана з зародишевою пластиною $GaAs$ (знаходиться у контакті з Si підкладкою). Після отримання ізольованих острівків (мез) $GaAs$ на Si сформовано ФП на основі ФД.

Вказані оптрони виготовлені на Si підкладках (технологія зарощування $GaAs$ попередньо сформованих в них отвірів шляхом гомо- або гетероепітаксії) і мають прийнятне значення коефіцієнту передавання (1...3%), що достатньо для обробки наступним каскадом цифрової ІСОЗ. Автором цієї статті запропоновано вдосконалити означену структуру СД (на основі вказаного КТР) доведенням її до класичного вигляду СД з торцевим виходом випромінювання (ТВВ), але яка випромінює півколом або чвертьколом, контакти катодів СД у кожній мезі можуть бути під'єднано знизу і вони адаптовані для використання в ОІОЗ схем МОЛЕ. Такий СД з ТВВ має переваги в тому, що: а) струм по структурі $p-n$ переходу СД у мезі з $GaAs$ іде перпендикулярно товстій підкладки (покращення розсіювання тепла, зменшення значення ємності C і-го СД); б) найбільша потужність світла виходить паралельно поверхні підкладки (конус випромінювання СД з ТВВ менш, ніж 30 градусів); в) кількість напрямів випромінювання СД може мати значення 1,2...4...8...16... (по периметру плану фігури мези і сформованих $p-n$ переходів СД, яка може бути виконана як квадрат, шестикутник, вісьмикутник, шістнадцятикутник, т.д.).

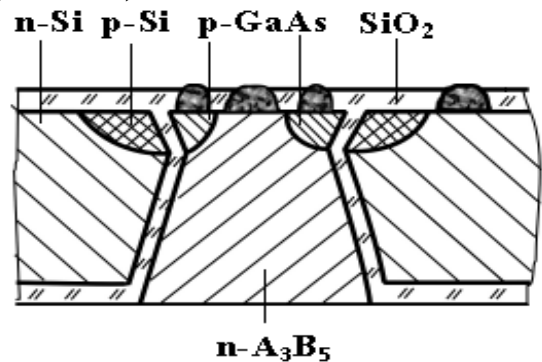


Рис.5 Ескіз структури інтегрального $GaAs-SiO_2-Si$ оптрона. В площині ескіза розташовано два СД і два ФД. Темним кольором в товщі SiO_2 показано металеві контакти катоду (спільний) і двох анодів СД, контакти ФД не показані [13].

Об'єднання означених підходів на основі використання схем ОЛЕ, планарних світловодів і інтегральних оптронів на ізольованих мезах $GaAs$ на Si підкладках створює підґрунтя для створення ОІ для ІСОЗ на основі запропонованого КТР.

Висновки. На основі проведеного аналізу результатів досліджень, отриманих даних із літературних і Internet джерел, патентного пошуку, матеріалів НТК, розглянутих КТР і наведених автором доводів, висновків зроблено наступні висновки.

1. За основу передавачів і приймачів оптичних інтерфейсів (ОІ) у складі ІСОЗ може бути прийняті елементи мікропотужних оптронів ДВЧ, УВЧ діапазонів з елементами: СД з $GaAs$ (GaN), ОК з SiO_2 (отримані з ПК) і ФП на Si ($p-i-n$ ФД з підсилювачем у вигляді ВЧ транзистора) і схеми ОЛЕ КІПТ $nABO-HI$.

2. На базі технології з використанням пористого кремнію (ПК) можливо створити ОК на поверхні і в товщині підкладок Si , як основні світлопроводні елементи ОІ. Ефект формування ОК з ПК (стандартний процесом анодного травлення заданої топології на поверхні Si підкладки) полягає в розширюванні SiO_2 в об'єм пор без тріщин.

3. Технологія виготовлення оптронів на Si підкладках базується на запропонованому українськими науковцями КТР на основі вирощування острівків (мез) $GaAs$ (проведенням процесу його селективної епітаксії у решітчасту Si структуру, що поєднана з зародишевою пластиною $GaAs$ і знаходиться у механічному контакті з Si підкладкою). Оптрони виготовлені на Si підкладках (технологія зарощування $GaAs$ попередньо сформованих в них отвірів шляхом гомо- або гетероепітаксії) і мають прийнятне значення коефіцієнту передавання (1...3%), що достатньо для обробки наступним каскадом цифрової ІСОЗ. Вдосконалення структури СД (на основі вказанного КТР) і доведенням його до класичного вигляду СД з ТВВ надає значні переваги: потужність випромінювання входить/виходить в/з ОК паралельно поверхні підкладки Si , кількість напрямів виромінювання може мати значення 1,2...4...8...16... відповідно до геометрії мези і кількості випромінювальних СД у ній, формування ОК і $p-i-n$ ФД виконується по відомим технологіям.

4. Вказаний підхід в запропонованому КТР по створенню ІСОЗ є обґрунтованим, зваженим і визначає можливості створення повноцінних ОІ в ІС (один СД випромінює до 1,2... n ФП, конфігурація зв'язку типу

«зірка»: використовується в технології *Light Peak* для реалізації ОІ типу «точка-точка» в шині типу *PCI Express* [2]). Він має достатню основу для типізації запропонованого КТР, а саме: світло в ІСОЗ має пройти малу відстань від малопотужних СД УВЧ діапазону до наступного ФП (зв'язки між каскадами сучасних ІС мають довжину менш ніж 0,01...10мм), формування ОК (зв'язків між СД і ФД) на основі ПК проводиться на підкладки з основного Н/П матеріалу Si , можливе поєднання Si (підкладка для ОК і ФП) з острівками $GaAs$ (СД), що забезпечить істотне зниження кількості коштовного матеріалу $GaAs$ в мезах (низька собівартість ІСОЗ) і використання для цього планарних Н/П технологій та відомих їх етапів.

5. Альтернативне означенню КТР рішення (у найближчому майбутньому) може бути у вигляді виконання елементів ІСОЗ виключно на основі сполук Si (без $GaAs$, GaN , ін.). В кількох джерелах вказується на результати дослідження електролюмінесценції на структурах на основі пористого кремнію (ПК), але для структур на ПК рівні досягнутого зовнішнього квантового виходу електролюмінесценції не є прийнятними, бо мають значення приблизно 0,1% [14,15]. Для матеріалу SiC зі стійкими повторенням параметрів поки не знайдено прийнятного КТР: кількість кристалофізичних модифікацій SiC налічує більш ніж 250 поліморфних форм (основні- α , β , γ), які при формуванні зерен їх монокристалів близькі по термодінамічним параметрам, але мають різні фізичні властивості (наприклад ширину забороненої зони ΔE). Вирішення цього завдання в майбутньому може суттєво покращити досягнення сучасної мікро-, нано- і оптоелектроніки, бо SiC є унікальним матеріалом [16].

Перелік літературних джерел.

- 1.Тесленко В.П., Щекотихин О.В., Полянский Г.А., Ройбул П.А. Радиоэлектронный блок с некондуктивными связями // Тр.7-й Междунар. конф. "Волоконная оптика в системах связи, промышленной автоматике, медицине". - Запорожье: ЗНТУ, 2002.- С.70-72.
2. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Thunderbolt ...Light Peak](http://ru.wikipedia.org/wiki/Thunderbolt...Light_Peak)
3. Технология СБИС / Под ред. Зи С. М. - М.: Мир, 1986. 1, 2 т. - 912 с.
4. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники / В.П. Кожемяко, Л.И. Тимченко, Г.Л. Лысенко, Ю.Ф. Кутаев. - К.: УМК ВО, 1990.- 251с.
- 5.Проскурін М.П. Мікропотужні оптоелектронні логічні елементи цифрових інтегральних схем на твердотільних світловопромінюючих і фотоелектричних пристроях: автореферат на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец. 05.27.01 «Твердотільна електроніка» / М.П.Проскурін. - Одеса, ОНПУ, 2007. – 20 с.
- 6.Декл. Пат. на корисну модель №10133 Україна, МКИ G02F 3/00. Цифровий пристрій з оптоелектронним блоком / Проскурін М.П., Білявська О.С., Демиденко О.О. - № у 2005 00239; Заявл.11.01.2005; Опубл. 15.11.2005, Бюл. №11 - 3 с.
- 7.Пат. на корисну модель №51219 Україна, МПК G02F 3/00. Оптоелектронна інтегральна схема для цифрових автоматів / Проскурін М.П. - № у 2009 13491; Заявл.24.12.2009; Опубл. 12.07.2010, Бюл. №13 - 3 с.
8. Проскурин Н.П., Грушко С.С. Моделирование оптоэлектронного инвертора на модели микромощной оптопары УВЧ диапазона для оптических интерфейсов цифровых автоматов. ISSN 1681-7710, Міністерство оборони України: Ж. Системи обробки інформації, №3(93), Харків 2011, С.72-75.
9. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Справочник: В 5т./ РадиоСофт.- М., 2000 - 2003. - Т.1- 512 с.
10. Декл. Пат. № 32921А Україна, МКИ G02F 3/00. Швидкодіючий універсальний оптоелектронний логічний елемент НАБО-НІ типу SUPROSTD / Проскурін М.П, Проскурін В.П. Дериведмідь В.М. - № 98073980; Заявл.21.07.98; Опубл. 15.02.2001, Бюл.№ 1.- 4 с.
11. Волновая оптоэлектроника / Под ред. Тамира Т. М. - М.: Мир, 1991. -575 с.
- 12.Интегральный оптический волновод на основе пористого кремния. В.П.Бондаренко, В.С.Вариченко, А.М. Дорофеев и др.. Письма в ЖТФ, т.19, в.14, 1993г., С.73-76.
- 13.Проблемы интеграции структур гетерозлектроники с кремниевыми ИС. В.И.Осинский, П.Ф.Олексенко, А.В.Палагин и др. .Технология и конструирование в электронной аппаратуре. №1, 1999г., С.3-17.
- 14.Люмениценция пористого кремния при электро- и фотовозбуждении. С.Н.Кузнецов, Л.Я. Березин, Г.Б.Стефанович. Письма в ЖТФ, т.18, в.22, 1992г., С.72-75.
15. Buchin E.Y., Churilov A.B., Prokaznikov A.V., Postnikov A.V., Svetovoy V.B. Influence of formation regimes on morphology and optical properties of porous silicon. Abstr. of MRS Symp., USA, Boston, 1994, v., pp.221.
16. [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Карбид кремния](http://ru.wikipedia.org/wiki/Карбид_кремния).

N.P. Proskurin. Optical interfaces of the digital integrated circuits on Si linings.

*Додатково.Перелік скорочень по тексту:

ОІ
ІС
ЦП
ЦА
ОК
ОВ
ФП
Н/П