

УДК 004.3

**ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПЕРЕХОДУ ДО МІКРОПОТУЖНИХ
ТВЕРДОТІЛЬНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ З ОПТОЕЛЕКТРОННИМИ КОМПОНЕНТАМИ
ДЛЯ ЦИФРОВИХ АВТОМАТІВ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ**

**ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕХОДА К МИКРОМОЩНЫМ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫМ ИНТЕГРАЛЬНЫМ СХЕМАМ С ОПТОЭЛЕКТРОННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ
ДЛЯ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**THE GROUNDING OF NECESSITY OF PASSING TO THE MICROPOWER SOLID
STATE INTEGRATED CIRCUITS WITH OPTRONIC COMPONENTS FOR DIGITAL
MACHINES AND COMPUTING DEVICES**

М.П. Проскурін, В.Л.Костенко, О.В. Щекотихін, С.С. Грушко

Н.П. Проскурин, В.Л.Костенко, О.В. Щекотихин, С.С. Грушко

N.P. Proskurin, V.L.Kostenko, O.V. Schekotihin, S.S. Grushko

Розглянуті проблеми передачі даних в металевих напрямних середовищах для систем обробки інформації, керування об'єктами та в цифрових інтегральних схемах. Проведено порівняльний аналіз типів схем електронної логіки та напрямних середовищ. Обґрунтована можливість використання мікропотужних оптоелектронних елементів для створення оптоелектронної логіки і інтегральних схем на їх основі.

Рассмотрены проблемы передачи данных в металлических направляющих средах для систем обработки информации, управления объектами в цифровых интегральных схемах. Проведен сравнительный анализ типов схем электронной логики и направляющих сред. Обоснована возможность использования микромощных оптоэлектронных элементов для создания оптоэлектронной логики и интегральных схем на их основе.

The problems of communication of data in the metallic directed environment of the systems of processing of information, management objects and in the digital integral schemes are considered. The comparative analysis of types of schemes of electronic logic and directed environments is conducted. The base of possibility of the use of micropowerful optoelectronic elements for creation of optoelectronic logic and integrated circuits on their basis are described.

Цифрові інтегральні схеми, оптоелектроніка, оптопара, напрямне середовище, світлодіод, фотоприймач, волоконнооптичний канал зв'язку, цифрові автомати.

Цифровые интегральные схемы, оптоэлектроника, оптопара, направляющая среда, светодиод, фотоприемник, волоконнооптический канал связи, цифровые автоматы.

Digital integral schemes, optoelectronics, optocoupler, directed environments, light-emitting diode, photoresiver, fiber-optic communication channel, digital machines.

Вступ. Обробка оптичної інформації набула широкого застосування у техніці, зокрема – у приладах і мережах передачі інформаційних потоків, у пристроях управління (ПУ) технологічним і бортовим обладнанням, персональних комп'ютерах (ПК) та цифрових автоматах (ЦА). Це пов'язано з перевагами оптичних і оптоелектронних пристроїв (способів зв'язку на їх основі) над електричними. В основі оптоелектроніки лежать ефекти взаємодії між електромагнітними хвилями (електронейтральними фотонами) і електронами речовин. У пристроях на основі систем випромінювач – фотоприймач (ФП), що з'єднані з волоконнооптичним каналом або кабелем (ВОК), оптичний сигнал від випромінювача без значних втрат проходить великі відстані ($10^2 \dots 10^3$ км) по волоконнооптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ). В останні 30 років пристрої, схеми обробки оптичної цифрової інформації одержали поширення і застосування у різних видах обладнання: системах зв'язку і телекомунікацій, об'єктовому (бортовому, наземному), медицині, військових і цивільних проектах і інш. [1, 2].

У статті проведено аналіз необхідності переходу до використання оптоелектронних компонентів в інтегральних схемах логіки для цифрових пристроїв і автоматів.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Логічна обробка потоків оптичних цифрових сигналів (ЦС), які передаються по ВОЛЗ, базується на використанні їх відображень у вигляді електричних сигналів (після перетворення типу випромінювання - фотострум: $L \rightarrow E$ за допомогою фотоприймачів). Для детектування оптичних ЦС використовують фоточутливі пристрої і напівпровідникові (НП) структури: фотодіоди (ФД), фото транзистори (ФТр). Сформовані за допомогою підсилювачів фотоструму у вигляді потоків електричних сигналів, вони обробляються НП цифровими інтегральними схемами (ІС) на базі схем вентилів T^2L , I^2L , E^2L , $T^2LШ$, $МОН$, $МЕН$ та інш. Для одержання вихідних оптичних цифрових сигналів (перетворення типу струм - випромінювання: $E \rightarrow L$) застосовують інші схеми. У них посилені ЦС із виходів ІС модулюють струм випромінювачів на твердотільних НП структурах, до яких відносять інжекційні лазери (ІЛ), лазерні діоди (ЛД) і світлодіоди (СД). Оптичні ЦС передаються на значні відстані по ВОК, що створені на основі оптичнопрозорих діелектричних матеріалів. За допомогою оптоелектронних пристроїв типу оптронів (оптопар), які містять у собі твердотільні випромінювачі і фотоприймачі, забезпечуються численні перетворення типу $L \leftrightarrow E$ [1, 2].

Увага до оптичних і оптоелектронних пристроїв пов'язана з трьома моментами:

1. Наявністю обмежень електронних цифрових ІС традиційного типу (табл. 1, рис. 1);
2. Перевагами оптичного зв'язку (основні: діапазон частот до 10^{15} Гц, гальванічна розв'язка каскадів перетворення, нечутливість до ЕМЗ, доступність матеріалу (SiO_2) і інш.;
3. Вимогами до цифрових систем телекомунікацій, що зростають: збільшенню обсягів цифрових потоків (кількісно і якісно) у всіх сферах життя і створення нової інформаційної сфери (знань, відомостей, даних), що доступна більшості бажаючих через Інтернет.

Параметри відомих типів логіки і напрямки розвитку ІС наведені в табл. 1, 2 [3, 4]. Незважаючи на успіхи в освоєнні нано- і субнаносекундного діапазонів, що відповідає частотам 1...5 ГГц, розвиток мікро- і нанoeлектроніки у вигляді цифрових ІС і їх різновидів (схеми логіки Т²ЛШ, І²Л, ЕЗЛ, К-МОН, МЕН та інш.) характеризується наближенням до кількох видів обмежень: **фізичних** - а, **конструктивно-технологічних** - б, а також **якостей НП матеріалів**, що використовуються (Si, GaAs) - в. Основними з них є [5, 6]:

1. Використання носія сигналу в ІС у вигляді зарядженої частки (електрона), що обумовлює обов'язкову наявність дводрової лінії (сигнальний - загальний дріт, тобто замкнутість контуру струму) при передаванні сигналу;

2. Властивості напрямних середовищ (НС) для електронів (металеві провідники з параметрами L , R , C , що мають характерний час перемикання $t_3 \sim RC$ при малому L : міжз'єднання довжиною $M_L = 10$ мм вносить затримку в поширення сигналу t_3 близько 1 нс);

3. Величина потужності, що споживається, розсіюється в ІС з $N \sim 10^7 \dots 10^8$, $S_{кр.} \sim 1 \dots 10$ см² (споживання логічного вентиля 0,01...20 мВт при коефіцієнті навантаження $\xi \sim 0,1 \dots 0,3$) становить декілька десятків Вт і більше, що наближається до меж фізичних характеристик НП матеріалів (Si, GaAs) і є обумовленою фундаментальними співвідношеннями;

4. Потужність, що витрачається на перезарядження металевої провідної лінії довжиною M_L сягає 80% значення потужності, що підводиться до кристалу ІС.

Істотно впливають наступні характеристики: максимальна кількість зовнішніх виводів K корпусу ІС (визначається розміром площі її кристалу $S_{кр.}$); зниження напруги у міжз'єднаннях (досягає значень десятків часток Вольта при значеннях струмів живлення 1...3 А). Це погіршує параметри фронтів імпульсу, знижує завадостійкість ІС, інші її характеристики.

Є питання, пов'язані з електричними зв'язками між кристалами, корпусами ІС, платами через дровові з'єднання і забезпеченням параметрів передачі ЦС (з урахуванням властивостей з'єднувачів: електричних, частотних, механічних, температурних та інш.):

- у лініях зв'язку, металевих НС всередині і зовні ІС має місце збільшення загасання ЦС від частоти перемикання (рис. 2) з урахуванням відомої залежності $t_{пер.} \sim k R_{НС} C_{НС}$;

- при впливі електромагнітних імпульсів від перемикачів ІС на металевих НС плат виникають електромагнітні перешкоди (ЕМП), амплітуда яких пропорційна довжині лінії M_L ;

- низька надійність з'єднувачів, що забезпечують контакт металевих дровів.

Зазначені фактори можна послабити спеціальними прийомами: зменшенням топологічного розміру, застосуванням знижених значень напруг живлення, струмів, оптимізацією трасування і охолодження кристала, застосуванням коаксіальних кабелів, екранування блоків, плат та інш. Але це не вирішує зазначених проблем ІС у цілому, а зі збільшенням рівня інтеграції N , ростом кількості зв'язків і підвищенням робочих частот ІС вони мають тенденцію накопичуватися і підсилювати свій негативний вплив.

Наведений аналіз вказує на те, що недоліки технології обробки потоків оптичних ЦС традиційними типами логіки на основі електронних цифрових ІС мають дві складові: використання обраних носіїв сигналів (у вигляді заряджених часток – електронів) і НС у вигляді металевих провідників, доріжок, контактних майданчиків [5, 6].

Таблиця 1 - Порівняльні характеристики параметрів логічних вентилів ІС

Тип логіки	Середні значення параметрів логічних елементів (ЛЕ) цифрових ІС			К _{об.} : коефіцієнт об'єднання по входу	К _{роз.} : коефіцієнт розгалуження по виходу
	P _{сер.} , мВт: спожи- вана потужність	t _{зт.сер.} , нс: час перемикання	A _{сер.} , пДж: робота перемикання		
T ² Л/T ² ЛШ	20/1	5-20/2-10	50-100/10-20	2-5	10
ЕЗЛ	20 – 50	0,5 – 2	20 – 50	2 – 5	10 – 20
I ² Л	0,01 – 0,1	10 – 100	0,2 – 200	1	3 -5
МОН	1 – 10	20 – 200	50 – 200	2 – 5	10 – 20
КМОН	0,01 – 0,1	10 – 50	0,5 – 5		
ВіКМОН	0,01 – 0,1	2 – 10	2 – 20	2 – 5	10 – 100
МЕН	0,1 – 0,5	0,15– 0,5	0,1 – 0,5	2 – 5	2 – 5

Таблиця 2 - Основні напрямки розвитку великих ІС

Надвеликі ІС	Мікро сбірки	Надшвид кісні ІС
N ≤ 10 ⁶ – 10 ⁸ t _b ≥ 50 -100 нс P _b = 0,1 – 0,01 мВт	N _Σ ≥ 10 ⁷ – 10 ⁹	N ≤ 10 ⁴ t _b ≥ 0,15 – 2 нс P _b = 0,1 – 20 мВт

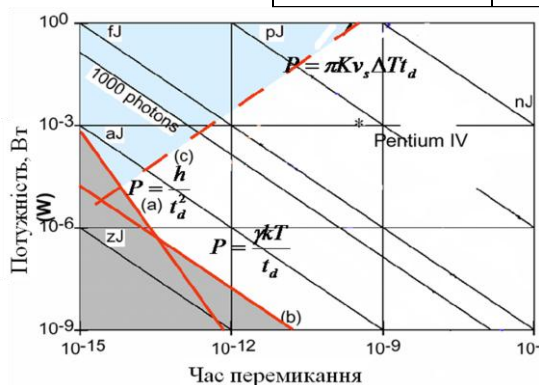


Рис. 1 - Графік досягнутих середніх значень параметрів логічних вентилів (біле поле праворуч): потужності ($P_{\text{вик.сер.}}$, Вт), часу ($t_{\text{зт.сер.}}$, нс) і роботи перемикання ($A_{\text{сер.}}$, пДж) та обмеження властивостей НП матеріалів для Si (сіре поле); * - параметри Pentium IV

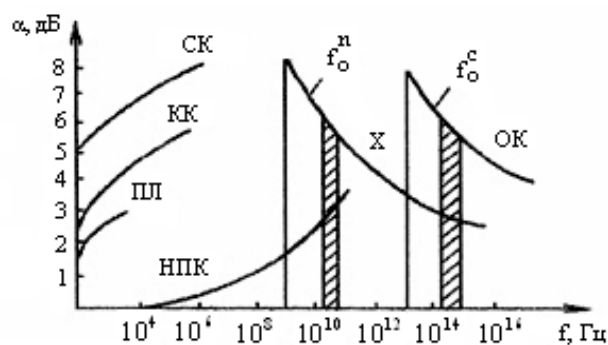


Рис. 2 - Частотні залежності загасання напрямних середовищ: КК – коаксіальний кабель, СК – симетричний кабель, ПЛ – повітряна лінія, НПК – надпровідний кабель, ОК – оптичний канал (кабель), X – хвилевід

На погляд авторів недоліки електронних цифрових ІС можуть бути вирішені через зміну *підходів до розробки схем логіки для ІС і ЦА*, а саме широким використанням оптоелектронних, оптичних явищ для створення альтернативних схем логічних елементів (ЛЕ) відносно електронних логічних вентилів, що вже існують (табл. 1) і їх впровадження в технології створення "оптичних" і "оптоелектронних" ІС нового покоління.

Постановка цілі і завдань статті для її вирішення. Рішення вказаних завдань для ІС і ЦА, пристроїв на їх основі можна сформулювати у вигляді цільової функції: *що потрібно зробити, щоб, використовуючи вже відомі типи зв'язку і розв'язати поставлені питання.* Відповідь є очевидною - *необхідна заміна електричного носія (електрона) і металевих НС зв'язком іншої природи*, що менш пов'язаний із двома (з трьох) обмеженнями: а - фізичним (обраний вид зв'язку між каскадами в ІС, рис. 2) і б - конструктивно-технологічним (основа перетворення сигналу: тип схем електронної логіки на досягнутому топологічному розмірі, табл. 1), але з урахуванням третього (в) - властивостей НП матеріалів Si, GaAs, що використовуються - див. рис. 1 (ліве штриховане поле). Це положення має принципове значення, бо з нього виходить, що третє обмеження (в) на даному етапі розвитку технології (рис. 1) ще не є настільки критичними, як а) і б) – тобто має достатньо великий резерв підвищення частоти перемикання (включно до сірого поля зліва рис. 1).

Можливість обійти означені обмеження ІС відкриває заміна електричного струму (засобу передачі інформації в сучасних ЦА і обчислювальних пристроях - ОП) на сигнали іншої фізичної природи. Переваги оптичного способу зв'язку базуються на використанні електронейтральних фотонів для переносу інформації і властивостях НС, у яких вони поширюються від джерела випромінювання до приймача, та характеру їх взаємодії з електронами твердих речовин [5 - 7]. Застосування оптичного випромінювання вирішує завдання збору, передачі, перетворення, індикації інформаційних потоків безконтактним (некондуктивним) способом - за допомогою формування інформаційних полів з електрично-непов'язаними ланцюгами джерел і приймачів сигналів (гальванічна розв'язка). Така якість важлива для інформаційних систем і ОП, що перебувають в умовах “забруднення” простору ЕМП (внутрішнього - комутація силових пристроїв, зовнішнього - грозові розряди, радіаційні впливи і інш.) для одержання неспотвореної інформації стану об'єкта, її обробки, видачі сигналів управління. Прилади на основі оптичних і оптоелектронних пристроїв використовуються у зв'язку, системах управління, промисловій автоматизації, техніці [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій за тематикою статті. Слід зазначити, що останнім часом з'явилася велика кількість нових розробок удосконалених пристроїв, що використовують оптичні і оптоелектронні прилади (ОЕП), ВОК як робочі елементи для пристроїв виміру і діагностики станів у промисловості, зв'язку, медицині, побуті. У приладах прийому, передачі електричних, оптичних ЦС все більше місце займають оптоелектронні, інтегрально-оптичні компоненти, виконані за планарними технологіями. Оптоелектроніка, інтегральна оптика перетворюються у напрямок, який характеризується багатофункціональністю (при використанні різних фізичних ефектів, їх комбінацій), багатоваріантністю технологічного виконання, способів втілення в прилади і пристрої. На рис. 3 а наведена узагальнена функціональна схема ОЕП [7], а в простішому випадку його

можна представити у вигляді оптопар (СД - ФП). На рис. 3 б показана спрощена схема оптоелектронного каналу. Залежно від конкретного застосування, вона подається у вигляді комбінації її частин (ОЕП, канал - ВОК, датчик, модулятор та інш.). Для забезпечення зв'язків у ОП, ЦА і ПК використовують зв'язок по ВОК між кристалами, приладами, компонентами, платами, блоками на основі випромінювачів (ІЛ, ЛД, СД) і ФП на р-і-n ФД із робочою частотою f_r до декількох ГГц. Реалізація одного з варіантів міжкомпонентних і міжплатних «вертикальних» зв'язків з ІС на основі СД-ВОП-ФП показана на рис. 4 [8]. У нових розробках матриць регулярних (систолічних) структур типу однорозрядних процесорів, що носять назву «пульсир», також використано подібні оптичні зв'язки між платами для нарощування структури ОП, ЦА за трьома вимірами [9]. Значним досягненням в практичній реалізації оптичних міжкомпонентних зв'язків є створення системної плати для ПК з виключно оптичними зв'язками («горизонтального» типу) російським винахідником [10]. Передавання сигналів оптичним волокном із застосуванням технології WDM (Wavelength Division Multiplexing: мультиплексування по довжині хвилі) дозволяє на 1...3 порядки підвищити продуктивність системи (збільшити пропускну здатність ділянки без прокладки нових кабелів) [1, 2]. Фірмою Bell Labs (корпарація Intel) здійснена передача 1024 оптичних потоків по одному експериментальному ВОК, створено прототип швидкісного оптичного інтерфейсу вводу/виводу для міжкомпонентних зв'язків кристал – кристал в корпорації Intel [11]. **Але найбільш «консервативною» у ОП, ЦА, ПК з використанням потоків оптичних ЦС залишається їх цифрова елементна база** обробки інформації і її основа: електронні ІС на відомих типах логіки (табл. 1).

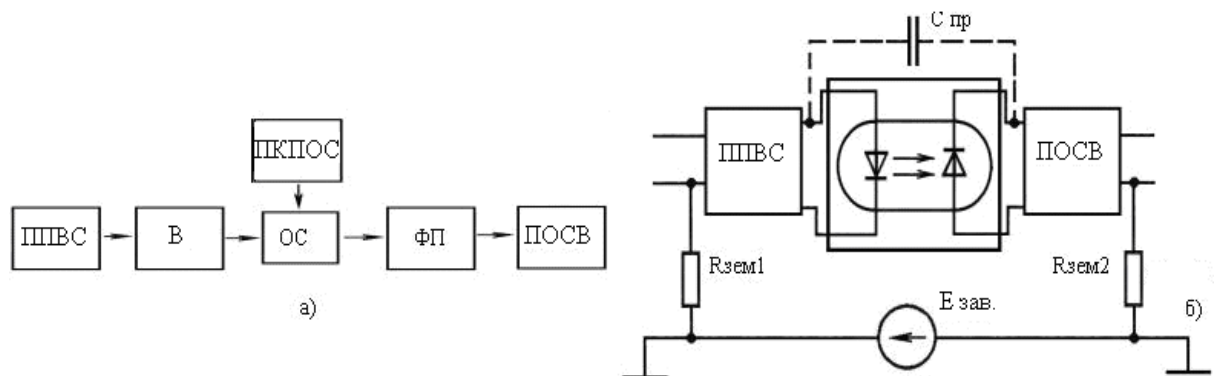


Рис. 3 - Узагальнена функціональна схема оптоелектронного пристрою – а; схема оптоелектронного каналу з урахуванням протікання струмів завад крізь паразитні зв'язки – б; ППВС – пристрій перетворення вхідного сигналу, В – випромінювач, ПКПОС – пристрій керування параметрами оптичного середовища, ОС – оптичне середовище, ФП – фотоприймач, ПОСВ – пристрій обробки сигналу на виході, Е зав. – ЕДС наведеної завади

Підсилені і сформовані у вигляді електронних сигналів - відображень оптичних ЦС, вхідні цифрові потоки обробляються НП ІС на базі схем логіки (табл. 1) [3, 4]. З підвищенням продуктивності П (визначається тактовою частотою ОП f_T і розрядністю металевих шин $K = 8...128$ на поверхні кристалу ІС: $\Pi = f_T \times K$), усе більше проявляються обмеження образного інструменту - електронних ІС - при обробці потоків оптичних ЦС. **В**

значній мірі це обумовлює неможливість подолання частотного бар'єру для обраного НС - металевих дротів (доріжок) в ОП і ЦА. Це, зокрема, проявляється в тому, що параметри частоти ядра процесора $f_{\text{яп}}$ в ІС сягають значень $\sim 2,5 \dots 5$ ГГц, тоді як частота системної шини $f_{\text{СШ}}$, що зв'язує інші частини (ПК, ОП, ЦА) і має більшу довжину (відповідні значення $R_{\text{НС}}, C_{\text{НС}}$: $1/f_{\text{СШ}} = t_{\text{пер.}} \sim k R_{\text{НСі}} C_{\text{НСі}}$) та є приблизно вп'ятеро...вдесятеро нижче - $0,5 \dots 1$ ГГц. Велика кількість металевих шин потребує використання багатошарових плат, що стає завадою як у технологічному виконанні, так і по швидкодії (будь який дріт має кінцеве значення параметрів R, C, L і, відповідно, кінцеве значення $t_{\text{пер.}} \sim k R_{\text{НСі}} C_{\text{НСі}}$).

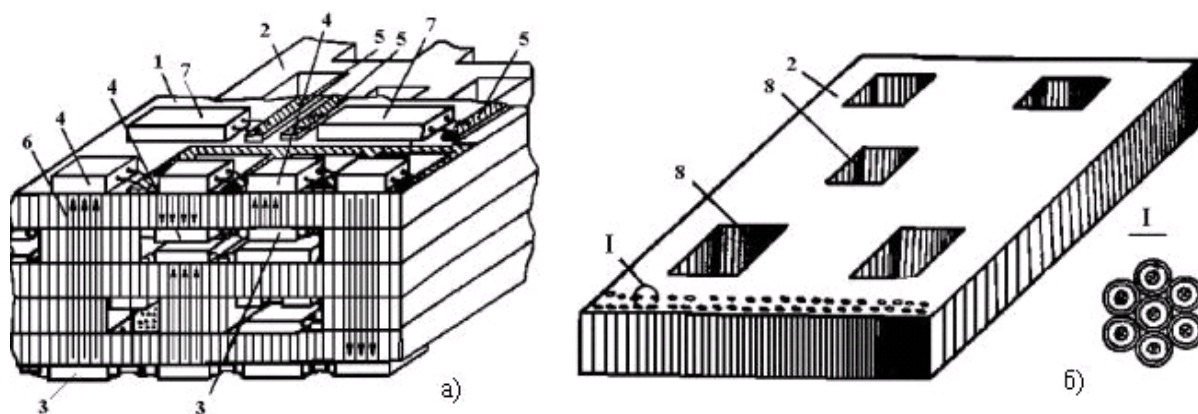


Рис. 4 - Реалізація оптичних міжблочних зв'язків на основі пристроїв типу волоконно-оптична пластина (ВОП): а - конструкція у зборі; б - ВОП із ВОК: 1 - плата; 2 - ВОП з ВОК; 3 - блок світлодіодів; 4 - блок ФП; 5 - струмопровідні доріжки; 6 - хід оптичних променів; 7 - мікросхема; 8 - вікна для електричних зв'язків; І - збільшений вид зверху на ВОК, що складають ВОП

Виділення невирішених раніше частин загального завдання та пропозиції щодо їх вирішення. Огляд досягнень та напрямків досліджень вказує на кілька можливих шляхів вирішення означених проблем електронних ІС. Основним напрямком є поступове збільшення використання оптичних компонентів в ІС і організацію не тільки входів-виходів у вигляді оптичних зв'язків, але і їх застосування для зв'язку зовні і в середині ІС [1, 2, 5 - 10]. Тут можливі кілька варіантів розвитку. Перший, що характеризується застосуванням планарних ВОК для більш довгих, ніж в ядрі процесора, зв'язків між каскадами ІС для організації системних шин вирішується без проведення зміни схем типів логіки (табл.1). З цим підходом все зрозуміло: концепції звичайних (на макрорівні) сучасних оптичних зв'язків треба втілити на поверхні кристалів ІС за планарними технологіями [2, 5]; між ІС на декількох платах і в блоках ЦА, ОП - наприклад по технічним рішенням, що подані в [11].

Другий напрямок, на наш погляд є більш перспективним і стосується заміни схем логіки, що використовуються для ІС, на альтернативну, наприклад, оптоелектронну або оптичну. Для цього підходу (що передбачає перехід до іншої фізикотопологічної моделі логічного елементу - ЛЕ і створення, наприклад, робочої схеми оптоелектронного або оптичного інвертора) формування позитивної чи негативної відповіді потребує додаткового

аналізу елементів оптопар, їх параметрів. Його ціль - дати відповідь на питання про можливості: - формування елементів оптопар (СД, ФП, ВОК) з розмірами, що досягнуті сучасними технологіями і що можуть функціонувати з параметрами не гірше ІС відомих типів логіки;

- вибору базової схеми (або базису) оптичного або оптоелектронного ЛЕ – ОЛЕ;
- досягнення частот перемикання і споживання ОЛЕ на рівні електронних ІС.

Оцінка твердотільних елементів оптопар, їх параметрів і типів (в т.ч. в інтегральному вигляді) достатньо глибоко проведена в [6, 7]. З неї виходить, що швидкодія перемикання СД і ФП може сягати $0,1 \dots 1$ ГГц, а в особливих режимах перемикання - ще вище. Все це вказує на те, що частка відомих конструкцій твердотільних елементів оптопар (СД, ФП і ВОК) може бути використана в схемах, наприклад, оптоелектронної логіки для ІС.

До недоліків оптопар СД-ФД відносять мале значення фотоструму, що становить одиниці відсотків від значення струму СД. Для підвищення $K_{ФД}$ в оптопарах СД-ФД використовують вбудовану електронну схему на одному (або декількох) транзисторах, що застосовано в оптопарах КОЛ201А (СНД), імпортних - TLP112, HCPL-0501, HCPL-0700 та інш. [12]. При значенні $K_{ФД} \sim 0,5 \dots 5\%$ для одержання вихідного струму $I_{Вих.}$ порядку струму $I_{СД}$, досить транзистора з коефіцієнтом підсилення $h \geq 21 \dots 210$ (наведено із запасом $\sim 5\%$). До параметрів, що впливають на частотні властивості оптопар, відносять значення ємностей ФП, розмір його області просторового заряду (ОПЗ), щільності струму ($J_{ФП} = I_{ФП}/S_{ФП}$) на робочій частоті f_p фотоперетворення. Наприклад, при модуляції СД інтегральної оптопарі ДВЧ діапазону ($0,03 \dots 0,3$ ГГц) на робочій частоті f_p необхідно, щоб параметри ФП (його час відгуку) відповідали перемикальним параметрам СД. Швидкодіючим ФП є р-і-п ФД. На основі таких ФП створені дискретні оптопарі в складі СД - р-і-п ФД (ЗОД120А-1), що відзначаються малими розмірами, високою швидкодією - від десятків нс [12]. Задовільного результату по збільшенню фотоструму домагаються, застосовуючи в оптопарі в якості ФП біполярні ФТр, які сполучають у собі функції ФД і елемента підсилювача-формуєвача (ПФ) вихідного сигналу. Але за швидкістю вони уступають оптопарам з окремими р-і-п ФД і ВЧ транзистором приблизно на порядок. На рис. 5 а - г наведені відомі схеми і ВАХ оптопарі СД-ФТр. Для порівняння на рис. 5 д наведено вихідні ВАХ оптопарі СД-ФР. Перевагою ВАХ (г) перед (д) є використання двох режимів: лінійної ділянки і насичення ФТр. В інтегральній оптопарі ДВЧ діапазону частіше застосовують роздільне фотоперетворення (ФП - р-і-п ФД із частотою детектування до декількох ГГц) і ПФ: ВЧ транзистор (Тр) з коефіцієнтом підсилення $h \geq 21 \dots 55$ на частоті f_p) [2, 7, 12], що співпадає зі схемою рис. 5 б. Передатні параметри оптопар у режимах малих струмів СД близькі до лінійних, а еквівалентні схеми п-р-п ФТр і ФД із п-р-п Тр ідентичні [7].

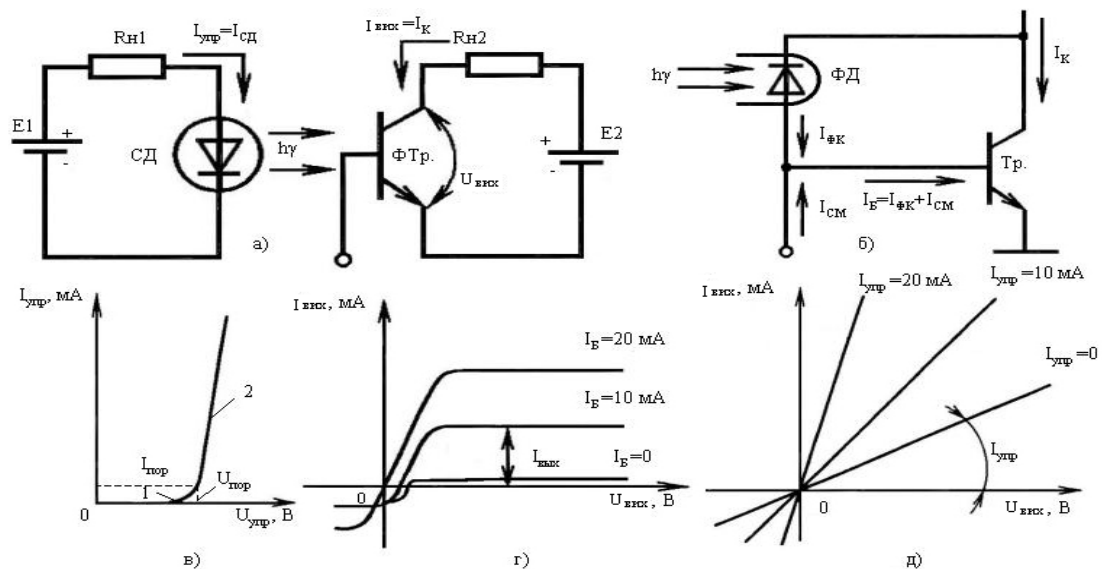


Рис.5 - Електрична схема ОЕП і його ВАХ: а – схема включення фототранзисторної оптопари (СД-ФТр); б – еквівалентна схема p-р-п фототранзистора; в – вхідна характеристика оптопари (ВАХ СД); г – характеристика фототранзисторної оптопари по виходу; д – характеристика фоторезисторної оптопари (СД-ФР) по виходу

Аналіз параметрів оптопар, елементів ОЕП [6 - 10], показує, що вони можуть бути використані для створення мікропотужної оптоелектронної елементної бази цифрових пристроїв ДВЧ, УВЧ діапазонів і подолання частини обмежень, що властиві сучасним ІС.

Основний матеріал дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Авторами було запропоновано кілька конструкцій структур швидкодіючих елементів мікропотужних оптопар нижньої частини УВЧ діапазону (0,3...3 ГГц) у складі СД - ФП у вигляді малорозмірних їх конструкцій. Інтегральний фотоприймальний пристрій (ІФП) на основі р-і-п ФД і ВЧ Тр є схемою з роздільним фотоперетворенням (що має максимальну спектральну чутливість при $\lambda \sim 0,8...0,9$ мкм) і підсиленням фотоструму планарним ВЧ p-р-п Тр на Si, що спроектовано з вимогами до ДВЧ приладів [13, 14]; випромінювач - швидкодіючий ІЧ СД на сполуках GaAs з поверхневим виходом випромінювання (ПВВ) і довжиною хвилі випромінювання $\lambda \sim 0,8...0,9$ мкм [15]. Розрахунок структур здійснено: СД (один р-п перехід) - на основі аналітичної моделі [16]; ІФП у складі р-і-п ФД з ВЧ p-р-п Тр (три р-п переходи) - методом чисельного моделювання (ПС «Дослідження»), що розроблена за методиками роботи [17].

Частина результатів розрахунків і моделювання параметрів елементів мікропотужної оптопари ДВЧ діапазону (СД - р-і-п ФД з ВЧ p-р-п транзистором) подана на рис. 6 – 8.

На рис. 6 подано результати моделювання ІК СД ПВВ у вигляді залежностей від напруги ІК СД на графіках: а) щільності оптичної потужності $P_{\text{опт}}$ для двох значень часу життя $t_{\text{нз}}$ основних носіїв заряду (НЗ) і б) струмів: повного - 1) і рекомбінації - 2) (при $\lambda = 0,84$ мкм, $I_{\text{СД макс.}} = 120$ мкА, $f_{\text{роб.}} \sim 0,333$ ГГц). Характерною особливістю наведених даних на рис. 6 а, в є те, що розрахунки проведено для двох значень фізичних параметрів НП структур: $t_{\text{нз}} = 0,1$ нс (1); $t_{\text{нз}} = 0,2$ нс (2). Значення струму рекомбінації 2 (внутрішній ККД потужності випромінювання) в робочому режимі моделі сягає до 20% від повного струму інжекції 1 СД (рис. 6 б). Модуляцію СД запропоновано проводити в режимі «малого сигналу», що забезпечує підвищення частоти перемикавання приблизно на порядок порівняно з режимом «великого сигналу»

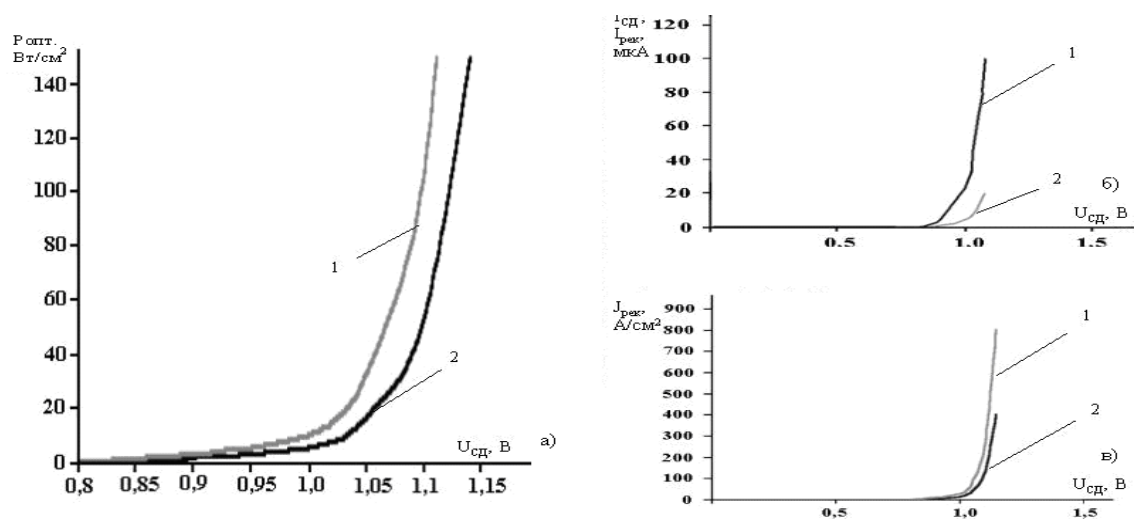


Рис. 6 - Частина результатів розрахунків параметрів мікропотужного ІК СД

На рис. 7 подано результати моделювання ІК р-і-п ФД: фоточутливість при $\lambda = 0,84$ мкм дорівнює $0,45$ А/Вт, гранична частота $f_{гр} \sim 5$ ГГц, коеф. перетворення до $2 \dots 2,25\%$, приймальне фотовікно $S \sim 25$ мкм². Наведено графіки: а - значення згенерованого фотоструму ФД (при дії 2 нс синусоїдального оптичного вхідного імпульсу) для двох значень об'ємної швидкості генерації G ; б - залежність зміни заряду Q р-і-п ФД від напруги U для розрахунку ємності $C_{ФД}$, що не перевищує $0,0045$ пФ.

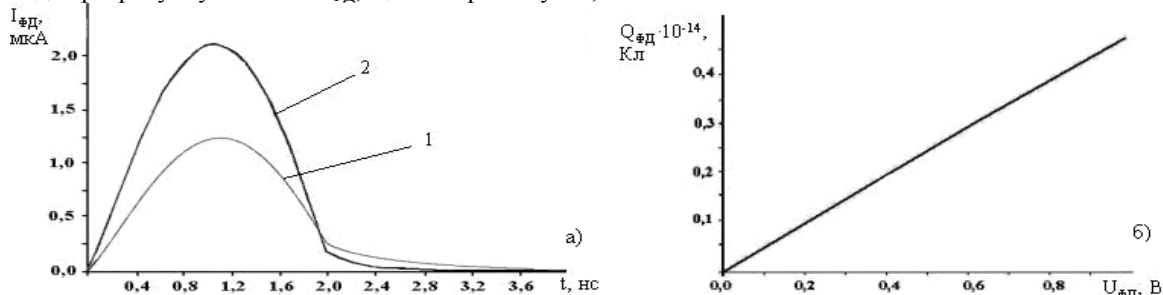


Рис. 7 - Частина результатів розрахунків параметрів ІК р-і-п ФД

На рис. 8 подано результати моделювання підсилювача фотоструму у вигляді ВЧ п-р-п Тр в схемі із загальним емітером: пряма (а) і зворотня (б) ВАХ; значення вихідного струму його колектора (1, 2) для двох трапецевидних вхідних імпульсів від р-і-п ФД амплітудою $I_{ФД} = I_{Б1} = 1$ мкА і $I_{ФД} = I_{Б2} = 2$ мкА (в), що задані таблицею. Особливістю їх є те, що з них видно, з якою динамікою перемикавання інтегральний ВЧ п-р-п Тр працює з двома значеннями фотоструму ФД ($I_{ФД} = I_{Б1} = 1$ мкА; $I_{ФД} = I_{Б2} = 2$ мкА): при значеннях коефіцієнту передачі по струму $h \sim 100$ ($I_{Б1} = 1$ мкА) і $h \sim 50$ ($I_{Б2} = 2$ мкА) робоча частота сягає $f_{роб} \sim 0,167$ ГГц (1) і $0,333$ ГГц (2) відповідно; розрахункова гранична частота перемикавання (при $h = 1$) $f_{гр} \sim 2,7$ ГГц.

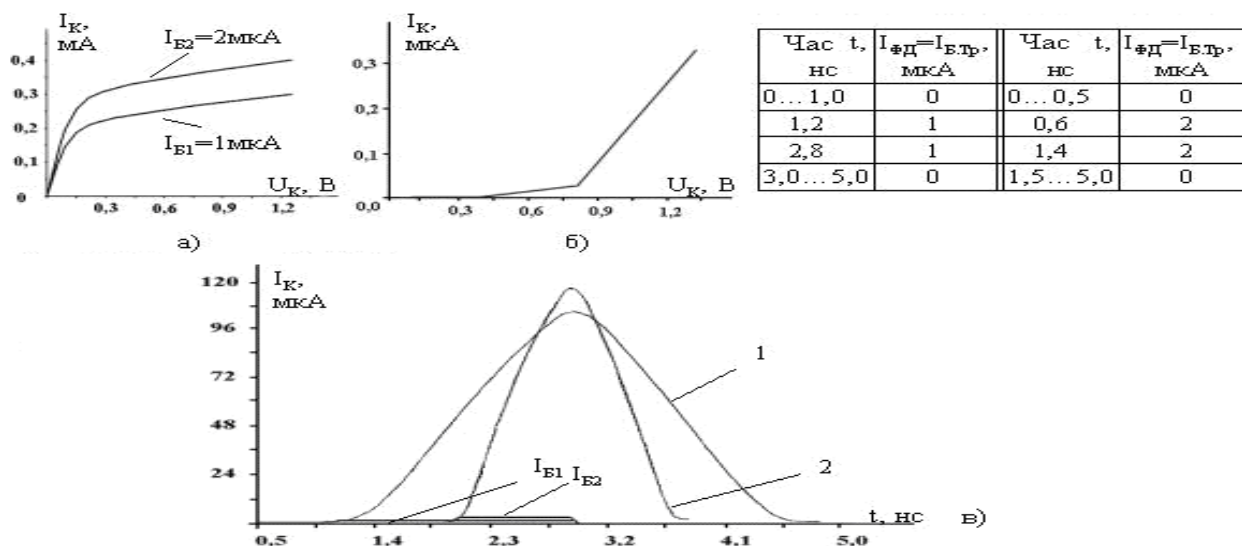


Рис. 8 - Частина результатів розрахунків параметрів інтегрального ВЧ п-р-п Тр

Результати аналізу, розрахунків і досліджень показали можливість функціонування таких пристроїв, як елементів оптопар при їх відповідних розмірах, в мікропотужних режимах у нижній частині УВЧ діапазону і можливість формування на їх основі ДВЧ, УВЧ оптопар. Параметри часу перемикання $t_{зт.пер.}$ запропонованих елементів оптопар (рис. 6 - 8) сягають значень електронних типів логіки (табл. 1) при достатньо малих значеннях $P_{сер.}$, мВт; $A_{сер.}$, пДж. Обговорення результатів дослідження проводилось на кількох МНТК [18 - 21].

Висновки з проведеного дослідження і перспективи подальших розробок в даному напрямі. На основі проведеного аналізу можна зробити такі висновки:

1. **Динаміка зміни параметрів електронних цифрових ІС** вказує на те, що вони наближаються до певної межі досягнутих параметрів. Вона є різною для відомих типів електрон-ної логіки, пов'язана з мінімальним розміром елемента ІС (топологічний розмір сучасної технології: 1 мкм; ...100 нм; ...10 нм), але зв'язана з загальними для ІС факторами, основними з яких є: фізичні властивості носіїв інформації, НС і технологічні обмеження.

2. **Фізичні обмеження НП матеріалів і структур**, що входять у склад ІС ще мають певний запас для підвищення частоти перемикання при заданому значенні $P_{сер.}$ (рис. 1).

3. **Є суттєві переваги ОЕП у складі ОП і ЦА** (для управління об'єктами: передавання, прийом, перетворення інформації в телекомунікаційній техніці та інш.), що засновані на використанні фотонів і діелектричних НС і відповідних перевагах оптичного засобу зв'язку.

4. **Аналіз випромінювачів у оптронів, ОЕП** вказує, що прийнятним рішенням для випромінювача у складі оптоелектронних логічних схем є твердотільні пристрої. Серед них виділяються СД - некогерентні випромінювачі на основі GaAs із прийнятним набором характеристик, що відзначаються: малою споживаною потужністю, швидкодією перемикання (10^{-9} с), ККД перетворення електричного струму у випромінювання у межах 10...20% значним часом функціонування (10^6 год) і роботі у ВЧ, ДВЧ і УВЧ діапазонах. Є можливість отримати вихід випромінювання як перпендикулярно площині р-п переходу (СД типу ПВВ) так і вздовж її (більш придатний для планарних технологій отримання ВОК).

5. **Оцінка ФП ДВЧ, УВЧ діапазону і їх параметрів** показує, що структура із роздільним фотоперетворенням і підсиленням типу ІФП (рис. 5 б) забезпечує прийнятну швидкодію на робочій частоті. В пристроях, що існують, схеми ФП сполучається із входами ІС (на основі T^2 ЛШ), не вимагають підвищених напруг живлення (звичайно 1...5 В), мають високу швидкодію - до 10^{-10} с і можливості вибору режиму T_r (ділянки: лінійна або насичення ВАХ) та реалізації адаптивних ФП (через вплив на струм бази T_r).

На основі аналізу можливо зробити припущення, що між етапом розвитку сучасної електронної і майбутньою «оптичною» логікою, може перебувати **період застосування оптоелектронної логіки**, наприклад, на базі використання мало- та мікропотужних режимів елементів оптопар ДВЧ і УВЧ діапазонів у складі оптоелектронних логічних схем (НІ, АБО-

НІ, І-НІ, їх комбінацій) для ІС, що можуть сполучати відомі фізичні процеси: оптичні, оптоелектронні і електронні та використовуватимуть їх переваги.

З вищевказаного випливає, що завдання створення мало- і мікропотужних цифрових ІС на елементах оптопар ВЧ, ДВЧ і УВЧ діапазонів (з малим енергоспоживанням для ОП і ЦА) практично назріли. Широке застосування в них елементів оптопар може привести до рішення частини питань, які вказані в перших частинах статті, а саме: зниження споживаної потужності ІС для ПК, ОП, ЦА (через зниження t_3 при поширенні оптичних ЦС по ВОК) і підвищення широкосмужності оптичних ліній зв'язку і інтерфейсів ІС. Такий підхід відкриє нові можливості розвитку елементної бази ОЕП і використання якостей оптичного середовища для організації міжз'єднань (оптичних інтерфейсів), створення оптоелектронних цифрових ІС для ПК, ОП, ЦА, що можуть конкурувати з відомими типами електронних ІС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2003.- 450 с.
2. Волоконные оптические линии связи - ВОЛС. Справочник под ред. С.В.Свечникова, Л.М. Андрушко.- К.: Техника, 1988.- 239 с.
3. Алексенко А.Г. Основы микросхемотехники. М.: Юнимедиа-стайл, 2009. - 448 с
4. Аванесян Г.Р. Цифровые интегральные микросхемы: Справочник. М.: Радиотехника; 2008г.- 272 с.
5. Г.С.Свечников. Интегральная оптика. К.: Наукова думка; 1988г.-166 с.
6. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника.- М.: Радио и связь, 1989.- 360 с.
7. А.К. Гребнев, В.Н.Гридин, В.П.Дмитриев. Оптоэлектронные элементы и устройства. М.: Радио и связь,1998.-336 с.
8. Радиоэлектронный блок с некондуктивными связями: тр.7-й Междунар. конф. "Волоконная оптика в системах связи, промышленной автоматике, медицине" / В.П. Тесленко, О.В. Щекотихин, Г.А. Полянский, П.А. Ройбул - Запорожье: ЗНТУ, 2002.- с.70-72.
9. В.И. Шмойлов, В.О. Бронзов. Южный научный центр РАН, НИИ многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ, г. Таганрог, Россия mvs@tsure.ru. Пульсирующие информационные решетки с матричной коммутацией Ж.«Штучный интеллект» 3'2008, с. 790-799. www.nbu.gov.ua/portal/natural/ii/2008_3/JournalAI_2008_3/Razdel8/23_Shmoylev_Bronzov.pdf
10. SciTecLibrary - Новости Науки и Техники. 13.08.2003. Российским специалистом разработана оптоэлектронная системная плата нового поколения, превосходящая даже современные аналоги компании IBM.www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/5833.htm
11. Корпорация Intel представляет прототип высокоскоростного оптического интерфейса ввода/вывода для межкомпонентных соединений кристалл – кристалл, с.3 - <http://www.intel.com/corporate/europe/emea/rus/country/update/contents/it04041.htm>
12. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. Справочник: в 5т. М.: РадиоСофт, 2000 - 2005. - Т.1 - 512 с.
13. Декл. Пат. №68540А. Україна, МКИ G02F 3/00. Интегральный фотоприемный пристрій / Білявська О.С., Костенко В.Л., Проскурин М.П. - № 20033076496; Заявл.11.07.2003; Опубл. 16.08.2004, Бюл.№ 8.- 3 с.
14. Костенко В.Л., Белявская Е.С., Проскурин Н.П. Модели фотоприемников для микромощных оптопар ВЧ диапазона и оптоэлектронных логических элементов, устройств на их основе // Нові технології. Науковий вісник Ін-ту економіки і нових технологій. Кременчук:- 2004.- №3 (6).- С.14-19
15. Декл. Пат. на корисну модель № 12865. Україна, МКИ G02F 3/00. Интегральный светодиод / Білявська О.С., Проскурин М.П. - № u 2005 04596; Заявл.17.05.2005; Опубл.15.03.06, Бюл.№ 3.- 4 с.
16. А. Берг, П. Дин. Светодиоды. Пер.с англ. под ред.А.Э. Юновича.-М.: Мир, 1979.- 688 с.
17. Моделирование и автоматизация проектирования силовых полупроводниковых приборов / В.П. Григоренко, П.Г. Кузьмин, В.А. Кузьмин, Т.Т. Мнацаканов - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.
18. Костенко В.Л., Проскурин Н.П. Модель интегрального фотоприемника, его параметры и характеристики // Труды Междунар. конф. «Сучасний стан та перспективи використання ВОЛЗ. Первинні мережі як транспортна основа телекомунікаційної інфраструктури України». - Запоріжжя: ЗНТУ.- 2003.- С.179-185.
19. Костенко В.Л., Проскурин Н.П., Белявская Е.С. Интегральное фотоприемное устройство // Труды Междунар. конф. «Современные информационные и электронные технологии» - Одеса: Од.НПУ.- 2003.- С.193.
20. Proskurin N.P., Belyavskaya E.S., Schekotihin O.V. The models of photoreceivers optocouples, micropowerful optoelectronic logic elements and devices of HF range // Труды 6-й Междунар. Конф. «Modern problem of radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» - Львів - Славське. НУ Львівська політехніка.- 2004.- С.549-550.
21. Демиденко Е.А., Проскурин Н.П. Результаты исследований мало- и микромощных оптоэлектронных логических элементов // Труды Междунар. Конф. «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». Запоріжжя: ЗНТУ.- 2006.- С.58-60.