

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ, РОЗРАХУНКУ І МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОПОТУЖНИХ ІЧ СВІТЛОДІОДІВ УВЧ ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ЦИФРОВИХ ІС

Розглянуто етапи проектування, розрахунку та моделювання інтегральних мікропотужних ІЧ світлодіодів (СД) УВЧ діапазону для цифрових ІС з оптичними зв'язками (ISO3). На основі вхідних параметрів отримані вихідні параметри моделі ІЧ СД для розрахунку його ВАХ в режимі модуляції типу «малий сигнал», залежності вказаних параметрів від концентрацій і товщин р+ активного прошарку (для двох з'єднань типу $Al_xGa_{1-x}As$), а саме: ВАХ ІЧ СД для двох значень часу рекомбінації, значення ширин забороненої зони (ЗЗ), коефіцієнтів поглинання, залежності прямих і рекомбінаційних струмів ІЧ СД, ін., що дає змогу отримати його дієву модель у складі мікропотужного оптрону УВЧ діапазону.

We consider the design stages, calculation and simulation of integrated micropower IR light emitting diodes (LEDs) of the UHF band for digital IS with optical links (ISOL). On the basis of inputs received by the output parameters of the IR LED model for calculating its CVC in the modulation mode of the "small signal", according to the specified parameters on the concentration and thickness of the p + active layer (two $Al_xGa_{1-x}As$ type compounds), namely: CVC IR LED for two values of the recombination time, the value of the band gap ~~(BG)~~, the absorption coefficients, depending on the direct recombination of IR LED currents, et al., that allows you to get it as part of an effective model of micropower optocoupler UHF range.

Вступ. Швидкодіючі некогерентні випромінювачі типу світлодіодів (СД) широко використовуються в оптоелектронних пристроях в якості гальванічних розв'язок (оптопарі) та оптичних ліній зв'язку довжиною 1мм...3км, а також в пристроях: освітлення, світлофори, СД екрани, ІЧ підсвітка, планшети, смартфони, ін.. Значними перевагами СД є їх малі розміри, твердотільність, приемне значення ККД (до 10...35% і більше) [1], помірна вартість, можливість виробництва по планарним технологіям, що визначає їх широке застосування в сучасному житті, техніці та технологіях. Останній час більше приділяється уваги до використання надшвидкісних інтегральних мікропотужних ІЧ СД для створення **оптичних каналів зв'язку, інтерфейсів** на малих відстанях 1мкм...10мм в ІС і/або розробки оптоелектронних логічних елементів і ІС на їх основі [2-4]. У попередній роботі автора цієї статті наведено послідовність розробки і розрахунок інтегрального фотоприймача (ФП)- ІЧ р-і-n фотодіода (ФД) УВЧ діапазона на основі Si у складі мікропотужного оптрону [5]. Перелік бажаних параметрів,

зазвичай, надається набором комплексу характеристик такого ФП у вигляді технічного завдання (ТЗ). Відповідно для проектування ІЧ СД можливо зробити теж саме- **сформувані набір вимог** (найменування параметрів ТЗ) та формалізувати їх, як наведено в табл.1. Означені типи ІЧ СД представляють собою планарні гомогенні або гетерогенні напівпровідникові структури- НПС (на основі прямозонних матеріалів A_3B_5 , наприклад, GaAs і/або з домішкою алюмінію: $Al_xGa_{1-x}As$, ін.) з р-n переходом. Перебіг через нього прямого струму певної величини (основних НЗ, інжектуємих в активний прошарок СД, зазвичай р+ область) викликає спонтанну рекомбінацію неосновних НЗ у вказаній р+ області і інтенсивне випромінювання (люмінесценцію) з товщини НПС. Характеристики GaAs (основний прямозонний матеріал для СД ІЧ діапазону) та етапи, методики розрахунку його НПС структури, вхідних/вихідних параметрів та оптимізації наведено в роботах [6-8]. Для випромінювання НПС такого типу характерні два механізми випромінювальної рекомбінації: **головний**- рекомбінація

Таблиця 1. Електричні, фізичні, випромінювальні, частотні параметри ТЗ проектуємого інтегрального СД УВЧ діапазона для мікропотужного оптрона, $T = 25^\circ$.

Найменування параметра	Значення параметра	
	Згідно ТЗ	Розрахункове
Щільність потужності випромінювання, не менше	$7 \dots 10 \text{ Вт/см}^2$	8 Вт/см^2
Потужність випромінювання (при $I_{\text{СД}} = 100 \text{ мкА}$), не менше	$2,0 \text{ мкВт}$	$2,5 \text{ мкВт}$
Пряма напруга при $I_{\text{пр СД}} = 100 \text{ мкА}$, не більше	$1,0 \dots 1,1 \text{ В}$	$1,05 \text{ В}$
Ємність СД, не більше	$0,01 \text{ пФ}$	$0,005 \text{ пФ}$
Максимум спектрального розподілу	$0,8 \dots 0,9 \text{ мкм}$	$0,84 \text{ мкм}$
Ширина спектра випромінювання,	$0,78 \dots 0,86 \text{ мкм}$	$0,8 \dots 0,88 \text{ мкм}$
Робоча частота перемикавання, не менше	$250 \dots 300 \text{ МГц}$	333 МГц

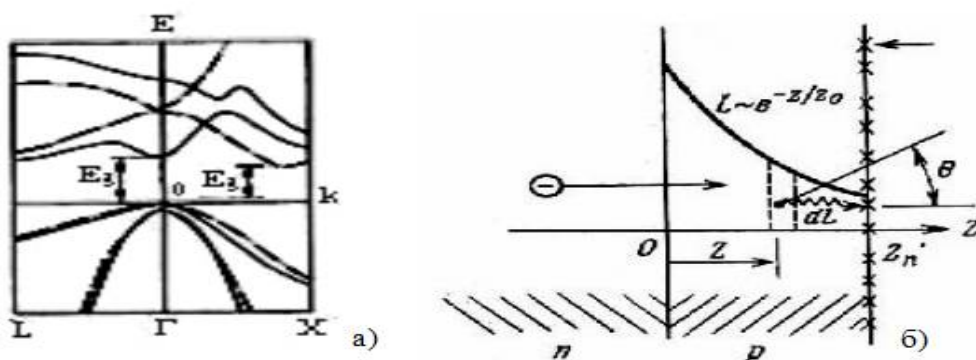


Рис.1 Прямозонна структура GaAs (суцільна лінія) і непрямоzonнаSi (пунктирна лінія) – а; спрощена схема р-п переходу в прямозонних НПС постійного складу ($Z \dots Z_n$ товщина р прошарку, dL і L – параметри інтенсивності випромінювання, θ – кут відхилення випромінювання від перпендикуляру до р-п переходу – б.

неосновних НЗ на основі квантових переходів ЗП-ЗВ (прямоzonні з'єднання типу A_3B_5) з утворенням кванта випромінювання, довжина хвилі λ якого обернено пропорційна ширині ЗЗ в еВ); **другорядний**- рекомбінація електронів і дірок у складі екситонів, пов'язаних з домішковими ізоелектронними центрами(пастками) в ЗЗ прямоzonних НПС з високим вмістом домішки (в більшості моделей може не враховуватися). Різниця між прямо зонною GaAs (суцільна лінія) і непрямо зонною Si (пунктирна лінія) (з урахуванням моделі ширини E_{33})наведена на рис.1а, а спрощена схема випромінювання р-п переходу в прямоzonних НПС постійного складу (типу СД)- на рис.1б.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі автора цієї статті [3] наголошено на можливості створення інтерфейсів для ІС з оптичними зв'язками (ІСОЗ) на основі планарних мікропотужних інтегральних оптронів із торцевими випромінювачами (наприклад, ІЧ СД і р-і-п ФД) у вигляді НПС, які можуть бути

розміщені в GaAsмезах, що сформовані на поверхні підкладок Si-SiO₂ методом гетерофазної епітаксії (ГФЕ) [9]. Оптрони такого типу можуть бути використані в експериментальних ІС з **перспективними планарними оптоелектронними зв'язками** (на відміну від ІСОЗ гібридних конструкцій [3] автора цієї статті, де СД і ФП розташовані на різних підкладках). Означені планарні конструкції оптронів можуть мати симетричну структуру, прийнятний коефіцієнт фотоперетворення (від 3%, який конструктивно можливо підвищити до 6...12% і більше, розмістивши концентрично 2...4шт. ІЧ р-і-п ФД навколо кожної мези із одним СД). Дані джерел і розробки відомих фірм виробників ІС [10-12] вказують на актуальність питання і інтерес провідних компаній до альтернативного способу передачі оптичних цифрових сигналів по мікроканалах ВОЛЗ, інтерфейсів на їх основі, які розташовані на поверхні НПС ІС (наприклад, на SiO₂).



Рис.2 Відомі ескізи конструкцій інтегральних СД на основі НПС: поверхневий (а), торцевий (б) вихід випромінювання (ПВВ, ТВВ). Різні шари НПС СД позначені цифрами для їх функціональної ідентифікації (при створенні технологічної карти процесу та їх виготовлення)

Невирішені раніше частини проблематики. Завданнями аналізу, проектування і створення випромінювачів типу ІЧ СД УВЧ діапазону (у складі інтегральних мікропотужних оптронів) є визначення та відбір відомих, прийнятних підходів до їх розробки, розрахунків НПС СД і ФП, їх режимів роботи та моделювання з кінцевою метою отримання перспективних інтегральних конструкцій оптронів. Після попереднього огляду можливо окреслити **три основні складові вибору конструктивно-технологічного рішення (КТР) для мікропотужного оптрона УВЧ діапазону і його інтегральної моделі:** 1 - тип модуляції ІЧ СД (режими: «малий» чи «великий» сигнал); 2- конструкції мікропотужних СД по технологіям створення планарних НПС: а- СД (поверхневий або торцевий вихід випромінювання - ПВВ або ТВВ: рис.2 а,б); б- ФП з підсилювачем детектованого оптичного сигналу від СД (наприклад: р-і-п ФД з ВЧ підсилювачем - біполярний або МДН транзистор, ін.); 3- спосіб формування оптичних мікроканалів ВОЛЗ на поверхні НПС (від СД до ФП). Аналіз кожної означеної складової можливо знайти в окремих фахових публікаціях; але їх об'єднання і комплексне застосування в єдиному КТР ще не проводилось та може привести до розв'язання завдання: створення дієвих конструкцій мікропотужних інтегральних оптронів УВЧ діапазону для ІСОЗ і їх інтерфейсів.

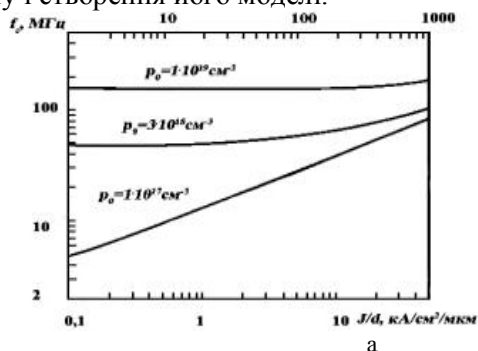
Основна частина. Розглянемо означені вище перші дві складові вибору КТР інтегральної моделі ІЧ СД для мікропотужного оптрона УВЧ діапазону. **По-перше**, відомо, що знижений рівень значень напруги включення, виключення (модуляції) СД та підвищену частоту його перемикавання має режим "малий сигнал" [8, с.144]. Для цього на ВАХ СД визначається граничний струм $I_{СД0}$ (напруга

$U_{СД0}$) прямозмщеного р-п переходу та накладається сигнал модуляції на робочій частоті f_p при значенні его в кілька відсотків (5 ... 10%) від величини $I_{СД0}$ ($U_{СД0}$). Реалізувати режим "малого сигналу" може схема з шунтуванням прямого струму $I_{СД0}$. Процесом шунтуванням СД зазвичай керує ВЧ транзистор (Тр.), який працює в ненасиченому режимі. При цьому СД має підвищену швидкодію: більш ніж на порядок вище, ніж в схемах з модуляцією типу "великий сигнал". Це пов'язано з тим, що при перемиканні СД не відбувається повної перезарядки ємностей його р-п переходів, а також внаслідок малої різниці в значеннях напруг включення $U_{СД\text{ вкл.}}$ і виключення $U_{СД\text{ викл.}}$, де різниця напруг становить лише кілька сотих часток Вольт (залежить від параметрів схеми перемикавання, типів СД, шунтуючого Тр., значення $E_{жив.}$, ін.). Граничну частоту $f_{гр.СД}$ визначають на рівні значення 0,7 величини потужності $P_{випр.СД}$ в режимі "малий сигнал" накладенням на струм прямого зміщення $I_{пр.СД0}$ гармонійної модуляції частотою f згідно виразу: $I_{пр.СД}(t) = I_{пр.СД0} + dI_{пр} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$, (1)

де: $I_{пр.СД}$ - миттєве значення прямого струму СД; $dI_{пр}$ - амплітудна величина приросту значення струму СД, $f_{гр.}$ - частота модуляції СД). При цьому потужність оптичного випромінювання СД напряму пов'язана з електричною потужністю $P_{СД} = I_{СД0} \cdot U_{СД0}$ і складає, приблизно до 5...35% в залежності від конструкції СД, їх типу (ПВВ або ТВВ) і ККД виводу випромінювання [1].

По-друге, для виходу на режим типу "малий сигнал" і суттєвого зниження споживання СД для дискретних оптронів використовується відомий прийом, а саме: зменшення прямого струму $I_{СДін.}$ у 10...100разів у порівнянні з номінальним (застосовується, наприклад, при дослідженні передавальних характеристик натурних зразків

оптоелектронних матричних комутаторів на дискретній оптичній АОД110, ін. [13, с.321, 332], оптоелектронних перемикачів, пристроїв обробки оптичних сигналів в мало-мощових оптоелектронних логічних елементах, перемикачах і схемах, ін. [14]). З початку для аналізу була обрана конструкція ІЧ СД з ПВВ, яка має деякі переваги (за рахунок технологічності планарної конструкції у вигляді шаруватої НПС та виводу випромінювання в одному або двох перпендикулярних до р-п переходу напрямках з мінімізацією втрат на поглинання) і зображена на рис.2а. Щільність струму $J_{CD} = I_{пр.СД}/S_{CD}$ в такій конструкції обмежена верхньою межею теплового розсіювання матеріалу і визначається рівнями від 1...5кА/см² (в основному розраховується для конструкцій потужних інжекційних лазерів – ІЛ). Відома конструкція ІЧ СД з ПВВ (діаметр джерела випромінювання $d = 50\mu\text{м}$, товщина р-області $Z = 1\mu\text{м}$, концентрація домішки більш ніж $p_0 \sim 10^{18}\text{см}^{-3}$) відповідає струму $I_{CD} \geq 100\text{ мА}$ і робочій частоті перемикання порядку $f_r \text{ СД} \sim 50\text{МГц}$ [15]. Для СД з ПВВ і ТВВ некогерентне випромінювання можливо отримати зі значень J_{CD} від 100 А/см² [15] і нижче до значень, наприклад, 17А/см² [16]. Відповідно, для вирішення поставленого завдання автором було запропоновано: **на першому кроці** - "віртуально" зменшити лінійні розміри такого СД на порядок, тобто $D \sim 5\mu\text{м}$ (при цьому зміняться: площа S_{CD} - на два порядки; постійна перемикання $\tau_{CD} \sim RC$ на три порядки), а значення струму складе $I_{CD пр.} \geq 1\text{мА}$ при збереженні його щільності і тієї ж частоті перемикання $f_r \geq 50\text{МГц}$. **На другому кроці** запропоновано зменшити значення $I_{CD пр.}$ ще в 10 (і більше) разів, як вказано в [13] для забезпечення виходу на режим типу "малий сигнал" [8]. Такі прийоми "віртуальних" змін геометричних параметрів НПС задають напрямки розробки і вдосконалення КТР, якісно відповідають поставленому завданню: отримання мікропотужного режиму ІЧ СД, але ще не вирішують питання значного підвищення робочої частоти перемикання $f_{р.СД}$ до УВЧ діапазону і створення його моделі.



По-третє, для суттєвого підвищення робочої частоти f_r перемикання мікропотужного СД використовуємо ряд відомих залежностей [17, с.81-83], які вказують, що коли концентрація домішки більш ніж $p_0 \sim 10^{19}\text{см}^{-3}$, то смуга модуляції СД може сягнути частот порядку кілька сотень МГц навіть при малих значеннях щільності струмів в ППС. На рис.3а наведені залежності смуги модуляції f_c від щільності струму інжекції ($J_{інж.}/Z$) для діаметра $D \sim 50\mu\text{м}$ СД при визначеному коефіцієнті рекомбінації; на рис.3б приведена залежність максимальної потужності випромінювання L від смуги модуляції f_c в режимі "великого сигналу" для дискретних СД з ПВВ). Данні графіка рис.3б (ліва частина) показують, що в таких СД зі збільшенням смуги модуляції f_c та досягнення нижньої межі УВЧ діапазона (0,3ТГц і більше) струм і потужність випромінювання СД може бути знижена приблизно на порядок і більше. Джерело [6, т.2 с.295] надає рекомендації щодо підвищення значень f_c : необхідно зменшувати товщину Z рекомбінаційної області ІЧ СД (рис.1б), збільшуючи концентрацію НЗ p_0 (рис.2а). Таким чином, **поєднання усіх трьох підходів в єдиний** підводить розробника до обрису КТР якісно-кількісної моделі ІЧ СД УВЧ діапазона: для модуляції СД використано режим "малий сигнал" [8] і надмалий розмір НПС (через «віртуальне» зменшення площини S_{CD} в 10 разів і більше порівняно з відомими конструкціями), знижено номінальний струм в 10 і більше разів для наближення до нього [12]; використано особливі властивості матеріалів НПС СД: підвищено рівень домішок до значень більш ніж $p_0 \sim 10^{19}\text{см}^{-3}$; обрано оптимальне значення товщини активної зони Z (рис.1б) [6, 7, 15, 18] і мінімізовано затухання в товщі НПС.

2. Деякі вхідні данні до розрахунку параметрів СД, отримання чисельних залежностей, їх інтеграція в модель. Розрахунок інтегрального мікропотужного СД ІК діапазону, його електричних, оптичних параметрів проведено на основі аналітичного методу з урахуванням основних рівнянь для розрахунку НПС [6, 7, 19].

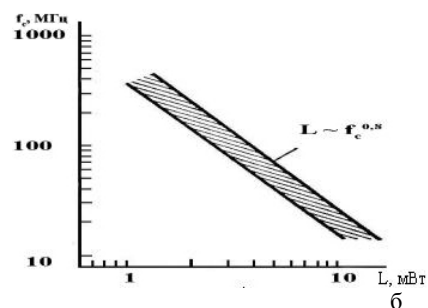


Рис.3. Відомі залежності полоси модуляції для НПС з $d=50\mu\text{м}$ від: а - приведеної щільності струму інжекції до діаметру джерела випромінювання J_{CD}/d ; б - потужності оптичного випромінювання (при $I_{CD} = 300\text{ мА}$).

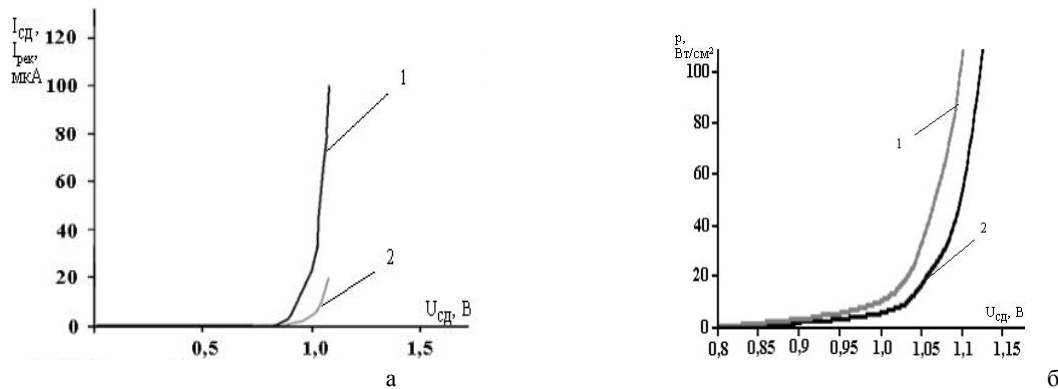


Рис.4. Розрахункові ВАХ: струмів інжекції (1) і рекомбінації (2) проектуємого ІЧ СД – а; щільності п-тужності випромінювання СД ($\rho = P_{\text{випр.}} / S$) при $p_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при: 1- час життя НЗ 0,1нс і 2- час життя НЗ 0,2нс.

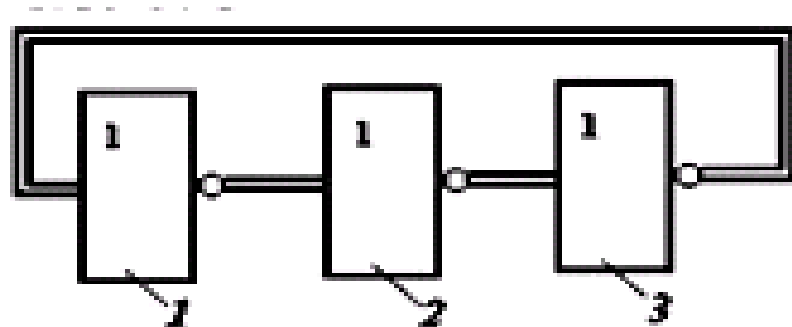


Рис. 5. Спрощена схема КГІ на основі ОІ на трьох оптронах:позначки 1, 2, 3 вказують номер ОІ в ланцюгу КГІ.

Найбільший квантовий вихід ІЧ СД спостерігається при довжинах хвиль $\lambda \sim 0,7 \dots 0,9 \text{ мкм}$ [17], наприклад, при використанні випромінювача типу СД на GaAsi або з домішкою алюмінію $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, (з урахуванням максимальних значень характеристики спектральної чутливості ФП на основі Si на означеній довжині хвилі λ). Джерелом випромінювання для СД обране потрібне з'єднання $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Для розрахунку величини ширини E_{33} і довжини хвилі λ СД використано емпіричну формулу: $E_{33} = 1,424 + 1,266x + 0,26x^2 \text{ (eV)}$ [18]. В результаті для двох значень x ($x_1 = 0,1$ і $x_2 = 0,2$), визначаємо, що активний p^+ шар СД повинен мати вигляд: $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ і $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$, а енергія випромінювання $E_{33} \sim 1,55$ і $1,69 \text{ eV}$ (відповідає між зонної рекомбінації НЗ з довжиною хвилі випромінювання $\lambda \sim 0,8$ і $0,73 \text{ мкм}$). Відомо, що потужність оптичного випромінювання $P_{\text{випр.}}$ пропорційна струму інжекції $I_{\text{інж.}}$ [6]. Але не всі інжектвані НЗ в p^+ область беруть участь у генерації фотонів, а тільки ті, які приймають участь в процесі рекомбінації НЗ. Отже, саме струм рекомбінації $I_{\text{рек.}}$ визначає **ефективність генерації випромінювання СД**: розрахункові значення ВАХ струму інжекції (1) і рекомбінації (2) наведено на рис.4а. При цьому пропорційно зміні щільності струму рекомбінації $J = I_{\text{рек.}} / S$ змінюється щільність оптичного потоку випромінювання $\rho = P_{\text{випр.}} / S$, яка залежить від часу життя НЗ при випромінювальній рекомбінації (рис.4б). Проаналізуємо отримані розрахункові залежності ВАХ на рис.4а, б.

Якщо час життя випромінювальної і безвипромінювальної рекомбінації позначити τ_r, τ_{nr} (відповідно), то ККД виведення випромінювання визначається виразом $\eta_{\text{спон}} = 1 / (1 + \tau_r / \tau_{nr})$ [6, 19]. З нього видно, що зі збільшенням складової безвипромінювальної рекомбінації ККД СД падає. З іншої сторони відомо, що щільність струму рекомбінації для GaAs залежить також від значення часу життя НЗ в активній p^+ області. На графіках рис.4а,б показані розрахункові залежності ВАХ проектуємого СД: струму інжекції $I_{\text{сд}}$ і рекомбінації $I_{\text{рек.}}$ і щільності потужності випромінювання ρ від напруги $U_{\text{сд}}$ (для двох різних часів життя НЗ: 0,1нс і 0,2нс в активній p^+ області при концентрації активного шару $p_0 = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, і відповідних їм товщин активного шару Z : 1,17мкм і 1,74мкм, див. рис.1б. При невеликій концентрації домішки (до $p_0 \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$) в активному шарі смуга модуляції зростає пропорційно $\sqrt{J/Z}$ (де: J – щільність струму, Z – товщина активної області СД). Для підвищення швидкодії СД збільшують струм інжекції $I_{\text{сд}}$ інж. (тобто його складову – $I_{\text{сдрек.}}$, рис.4а) або зменшують товщину Z активного p^+ шару СД [18] (рис.3а, характер зміни нижньої кривої). Встановлено (рис.4а), що значення струму рекомбінації $I_{\text{сд рек.}}$ (крива 2) при прямому струмі СД порядку 100мкА становить приблизно 20% від $I_{\text{сд інж.}}$ (крива 1), що вказує на **прийнятне значення внутрішньої квантової ефективності його моделі**. Дані розрахунку СД для двох різних складів потрібних сполук

типу $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ і ряду значень концентрації домішки в активній p^+ області від $10^{17}\text{см}^{-3} \leq N_a \leq 10^{20}\text{см}^{-3}$ наведені в роботі автора [19], де показано залежності: робочої частоти СД, ширини E_{33} і зміни товщини активного шару Z від концентрації домішки p_0 для двох складів активного p^+ шару. З наданих розрахункових даних витікає, що для отримання необхідної довжини хвилі випромінювання ІЧ СД $\lambda = 0,84\text{мкм}$ (з урахуванням зміни смуги модуляції СД від нижньої частини УВЧ діапазону і вище) від концентрації домішки в активній p^+ області можливо варіювати зміст алюмінію від 0,1 до 0,2 частин в з'єднанні $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$; також для неї наведені значення коефіцієнтів власного поглинання α НПС в залежності від концентрації домішки p_0 . Розрахунки підтверджують, що для створення КТР мікропотужного ІЧ СД УВЧ діапазону слід виконати активну p^+ область сильно легованою ($p_0 \geq 10^{19}$), контролювати значення часів життя рекомбінації (відповідно випромінювальної і безвипромінювальної: τ_r і τ_{nr}) та оптимізувати товщину Z активної p^+ області для зниження власного поглинання. Що стосується вибору КТР для реалізації мікропотужних оптронів УВЧ діапазону (обрана технологія: планарна [3] чи гібридна [4]) у складі інтерфейсів і/або перемикачів, логічних елементів, то його вибір визначається розробником і/або виробником [12, табл.1]. Для ІСОЗ (на погляд автора) перспективним є планарна технологія, хоча для сучасних ІСОЗ використовується гібридна технологія (для внутрішніх інтерфейсів на основі оптронів, їх елементів [10, 11]).

3. Моделювання ІЧ СД УВЧ діапазону і його характеристики. Значення розрахункових параметрів ІЧ СД (відповідно ТЗ та розрахункових) наведено в правій частині табл.2. З них видно, що отримані його розрахункові параметри відповідають значенням ТЗ і/або перевершують їх.

Моделювання мікропотужного оптоелектронного інвертора (ОІ), до складу якого входить спроектований вихідний СД (рис.5) проведено на основі **відомої тестової схеми** (в складі трьох ОІ на трьох оптронах) в програмному середовищі (ПС) МАЕС-П, яка розроблена в НВО «Хартрон» і застосовується в ряді ВНЗ України [20, 21]. На основі трьох ($K = 3$) схем ОІ, з'єднаних послідовно виходить універсальна випробувальна схема- кільцевої генератор імпульсів (КГІ) з виключно оптичними зв'язками між ОІ (класичний інструмент визначення параметрів логічних елементів типу «інвертор», що входять в базиси Буля, Пірса, Шеффера). При цьому період коливання $T_{\text{КГІ}} = 1 / f_{\text{КГІ}} = 2 K t_{\text{зат.ОІ}}$, де K - кількість ОІ, $t_{\text{зат.ОІ}}$ - середня затримка одного ОІ (перехід «0» в «1» або «1» в

«0»). За основу «будівельного матеріалу» схеми КГІ на трьох ОІ взятий оптрон К249КП1С (СД - ФТр.) і його базова математична модель, яка включає в себе вхідні моделі його складових: СД і p -і- n ФД з ВЧ Тр.[19]. Результати моделювання досягли значень УВЧ діапазона (від 0,333ГГц до 1,6ГГц) та були наведені в роботі автора [22].

Висновки. 1. В статті було висвітлено етапи аналізу, проектування, розрахунку і моделювання параметрів мікропотужних ІЧ СД УВЧ діапазону (0,3...3,0 ГГц) для планарних інтегральних оптронів. Наголошено, що для досягнення цієї цілі і виходу на прийнятне КТР, необхідно використати комбінацію з трьох підходів: 1-зменшення робочих струмів СД у 10...100 разів (порівняно з номінальним струмом); 2- використання режиму модуляції типу «малий сигнал»; 3- збільшення концентрації домішки $\geq p_0 \sim 10^{19}\text{см}^{-3}$ p^+ області (товщина активного шару Z 1,0...2,0 мкм).

2. Отримані данні при проектуванні мікропотужних ІЧ СД УВЧ діапазону було формалізовано і інтегровано в модель СД, яка базується на оптроні К249КП1С (СД-ФТр.), модель якого промодельовано в ПС МАЕС-П.

3. Проведене моделювання ІЧ СД УВЧ діапазону в двох схемах КГІ (на основі трьох ОІ) показало, що поставлене завдання створення прийнятного КТР для елементу мікропотужного оптрона досягнуто: отримані частоти перемикачів ІЧ СД в УВЧ діапазоні від 0,333ГГц до 1,6ГГц (при значенні струмів СД: $I_{\text{СД1макс}} \sim 113\text{мкА}$ і $I_{\text{СД2макс}} \sim 84\text{мкА}$ відповідно).

4. При виборі типу КТР для створення мікропотужних оптронів УВЧ діапазону для ІСОЗ і їх інтерфейсів перспективним є планарна технологія, деякі етапи якої є близькими до сучасних технологій ІС.

Література.

1. С. Никифоров. Исследование параметров светодиодов CREE XLamp XP-E/XP-G/XM-L. Ж. Полупроводниковая светотехника, №2-2011, [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.lede.ru/articles/svetodiod/2011_2_12.php
2. В.П.Бондаренко. 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.
3. Проскурін М.П. Оптичні інтерфейси цифрових інтегральних схем на Si підкладках / Проскурін М.П. Науковий вісник ЧНУ. Вип.4, Т.4: Комп'ютерні системи та компоненти – Чернівці: ЧНУ, 2013. – С.125-133.
4. Проскурін М.П. Пат. на корисну модель №51219 Україна, МПК G02F 3/00. Оптоелектронна інтегральна схема для цифрових автоматів / Проскурін М.П. - № u 2009 13491; Заявл.24.12.2009; Опубл. 12.07.2010, Бюл. №13 - 3 с.
5. Н.П. Проскурин. Расчет, оптимизация характеристик модели интегрального p-i-n фотодиода

микромощного опторона УВЧ диапазона для переключательных схем / Н.П. Проскурин. Науковий вісник КУЕІТУ «Нові Технології», №1-2 (43-44) – Кременчук: 2014.- С.31-38.

6. А. Берг, П. Дин. Светодиоды. Пер.с англ. под ред. А.Э. Юновича.-М.: Мир, 1979.- 688 с.

7. С.М.Зи. Физика полупроводниковых приборов: В 2 т./ Мир.- М., 1984.- 912 с.

8. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника.-М.: Радио и связь, 1989.-360с.

9. В.И.Осинский. 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.

10. LightPeak -новая технология передачи данных от Intel и Apple. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://macspoon.ru/apple/light-peak/>– Загл. с экрана.

11. После кремния: электроника будущего. Фрагмент прототипа оптического процессора IBM Holey optochip (фото) / Ж.Сhip №11, 2013.- С. 122-125.

11.Марков, О.Абдуллаев, Р.Курочкин. «Оптоэлектронные интегральные схемы» - это просто, как оптопара. Электронный журнал: ООО «Рынок микроэлектроники» - [Электронный ресурс] –Режим доступа: <http://gaw.ru/html.cgi/txt/publ/opto/opto.htm>.

12. А.К.Гребнев, В.Н.Гридин, В.П.Дмитриев. Оптоэлектронные элементы и устройства. - М.: Радио и связь, 1998.-336с.

13. 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.

14. Хорунжий В.А., Письменецкий В.А., Коровников Б.А. Функциональная микроэлектроника. Опто- и акустоэлектроника. – Киев: УМК ВО, 1988. – 216 с.

15. С. Никифоров. Повесть о «вечной молодости светодиодов». Ж. Полупроводниковая светотехника, №4-2010, [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://led-e.ru/articles/svetodiod/2010_4_32.php

16. Основы оптоэлектроники. Пер. с яп. под ред. К.М.Голанта - М.:Мир, 1988.-287с.

17. Волоконные оптические линии связи-ВОЛС. Справочник под ред. С.В.Свечникова, Л.М.Андрушко.- К.: Тэхника, 1988.- 239 с.

18. Проскурін М.П. Мікропотужні оптоелектронні логічні елементи цифрових інтегральних схем на твердо тільних світловипромінюючих 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. №2 (25), с.15-23.

19. Программа моделирования аналоговых электронных схем / Лугин А.И., Мальцева Л.Д., Тимовский А.К., Шендерович В.Н.. Руководство пользователя. Запорожье: Филиал КБ Электроавтоматика, 1996. - 100 с.

20. Піза Д.М., Тімовський А.К., Лугін О.І. Застосування програми МАЕС-П для моделювання радіоелектронних пристроїв. Навч. посібник.- Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. -133 с.

21. Проскурин Н.П. Микромощная оптоэлектронная логика и интерфейсы: параметры моделей ОВЧ,УВЧ схем для цифровых автоматов и компьютерных систем /Проскурин Н.П. Науковий вісник ЧНУ. Вип.4, Т.2: Комп'ютерні системи та компоненти – Чернівці: ЧНУ, 2011. – С.30-37.