

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

УДК 621.383.8

СТАХІРА

Павло Йосипович

ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
НА ОСНОВІ СТРУКТУР
ПМОН- ТРАНЗИСТОР- ФОТОПРИЙМАЧ

Спеціальність: 05.27.05 — інтегральні радіоелектронні пристрої

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ — 1994

АВ 30,714

Робота виконана на кафедрі "Електронні прилади" Державного університету "Львівська політехніка",

Науковий керівник доктор технічних наук, професор Готра В.Д.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук,
професор Говалешко М.П.

доктор технічних наук,
професор Олексенко П.Ф.

Провідне підприємство: Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут

Захист дисертації відбудеться "30" 09 1994 р
в 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої ради Д 068.36.06. при
Державному університеті "Львівська політехніка" (290013, м. Львів,
ул. Бандери, 12). 226 вуз. 2.14

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці
Державного університету "Львівська політехніка", (вул.
Професорська, 1)

Автореферат розіслано "25" 08 1994 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
Д.Т.Н.



Вобіцький Я.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00756644 (W)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність роботи. Створення напівпровідникових фоточутливих приладів, призначених для приймання та перетворення оптичних сигналів є перспективним для радіоелектроніки. В основу їх виробництва покладені базові технологічні процеси виробництва великих і надвеликих метал-оксид-напівпровідник (МОН) інтегральних мікросхем. Це дозволяє доповнювати фотоприймачі розвинутими МОН схемами, які реалізували б ті чи інші апаратні функції обробки оптичних сигналів. Для підвищення ступеня інтеграції та надійності перспективним є створення однокристальних схем, в яких фоточутливі елементи узгоджуються з потужними транзисторами типу метал - оксид-напівпровідник (МОН-транзистор) з допомогою гальванічного зв'язку, що дає змогу комутувати великі струми і напруги під дією оптичного сигналу. Створення оптоелектронної системи фотоприймач МОН - транзистор можливе при формуванні МОН - структур з стабільними електричними параметрами (низьким значенням порогової напруги, малим значенням опору стік - витік у відкритому стані, високою гранично допустимою напругою стоку). З ряду причин (в тому числі і конструктивно - технологічних) дослідження структур, в яких реалізується оптичне керування вихідних струмів ПМОН-транзисторними структурами, до сьогодняшнього часу необхідного розвитку не одержало. Особливо це стосується впливу властивостей окремих структурних областей і функціональних елементів на характеристики і параметри даних систем. Отже розв'язок проблем, пов'язаних з технологічними труднощами, розширення функціональних можливостей перетворювачів оптичного сигналу є актуальним і повинно вирішуватися шляхом розширення фронту досліджень фізичних процесів і на цій основі вдосконалення технології виготовлення і оптимізації конструкції.

Метод роботи в створення оптоелектронних перетворювачів на основі структур метал-оксид-напівпровідник виготовлених методом подвійної дифузії (ПМОН) - транзистор - фотоприймач, здатних здійснювати керування струмами ПМОН- транзистора.

Основні задачі досліджень.

Для досягнення мети роботи розв'язувались наступні задачі :

- числове моделювання електрооптичних характеристик

приймальних елементів оптоелектронної пари;

- розробка лазерних методів формування потенціальних бар'єрів і омичних аліміній-кремнієвих контактів фоточутливих елементів;
- створення кремнієвого фотодіодного перетворювача оптичного сигналу на ПМОН - транзисторі;
- проведення комплексу експериментальних досліджень фізичних характеристик оптоелектронного перетворювача;
- дослідження фоточутливих напівпровідників групи A^2B^6 ($ZnSe$, $CdSe$, CdS , $CdTe$), створення і вивчення функціональних можливостей приймальних елементів оптоелектронних пар фоторезистори - ПМОН - структури, фотодіоди ПМОН-структури.

На 'захист виносяться наступні положення:

1. Модель оптронної приймальної системи ПМОН транзистор - фотодіодна лінійка для розрахунку електричних параметрів при нерівномірному розподілі домішки вдовж довжини каналної області ПМОН- транзистора.
2. Умови формування мілковалягачих фоточутливих p-n-переходів у напівпровідниковому кристалі імпульсом лазера з енергією кванта $h\nu < E_g$ і послідовною іонною імплантацією акцепторними домішками, що забезпечують збільшення спектральної чутливості в ультрафіолетовій області.
3. Конструктивно - технологічні особливості створення оптоелектронних перетворювачів на основі структур ПМОН - транзистор - фотоприймач.
4. Можливість використання фотодіодних ПМОН - перетворювачів як приймально перемикачих та приймально підсилюючих елементів оптронної пари.
5. Фоторезистивні елементи на основі напівпровідників групи A^2B^6 з заданою спектральною чутливістю є компонентами запропонованої системи фоточутливі елементи-ПМОН-структура.
6. Розроблена технологія створення Zn-Se діодів, одержаних з застосуванням іонної імплантації фосфору, струмопроходження в яких обумовлено тунельними процесами при низьких зміщеннях і дифузії над бар'єром при високих напругах.

Наукова новизна

1. За рахунок складного розподілу донорної домішки область спектральної чутливості запропонованого кремнієвого ПМОН фотодіодного перетворювача розширена в ультрафіолетовий діапазон спектра. Спектр фоточутливості містить два максимуми.

2. Визначений аналітичний вираз для ефективної порогової напруги системи ПМОН-транзистор-фотодіоди, що залежить від освітленості.

3. Має місце незначна температурна залежність нахилу початкових ділянок ВАХ для Zn-Se діодів, характерна для тунельного струму і при достатньо великих зміщеннях можливе надбар'ярне проходження носіїв. Визначена висота потенціального бар'єру.

4. Встановлено, що за допомогою системи fotocутливі елементи групи $A^{2}B^{6}$ - ПМОН структура можна змінювати спектральну струмову чутливість фоторезистивних елементів.

Практична цінність роботи

- розроблений оптоелектронний перетворювач на основі структур ПМОН - транзистор - фотоприймач, що виконує функції приймального елемента оптронної пари;

- запропоновано в якості приймально-перемикаючих, приймально-регулюючих або приймально-інвертуючих елементів оптронної пари використовувати системи, в яких напівпровідникові fotocутливі елементи групи $A^{2}B^{6}$ гальванічно з'єднані з затвором ПМОН структури.

- розроблена методика управління потенціальним бар'єром на поверхні кремнію в застосуванні лазерного випромінювання з енергією кванта, яка менше від ширини забороненої зони напівпровідника.

Результати роботи використані на підприємстві ВО "Травітон" (м. Чернівці) і ВО "Родон" (м. Івано - Франківськ).

Апробація роботи. Матеріали роботи викладені і обговорені на наступних конференціях і нарадах:

- Всесоюзная научная конференция "Фотоелектрические явления в полупроводниках" - Ташкент, 1989.

- Научное совещание по люминисценции АН СССР, Вильнюс, 26-29 сент. 1989.

- I Всесоюзный семинар "Низкотемпературное легирование полупроводниковых многослойных структур микроэлектроники", Устинов, 1987.

- Отраслевая конференция "Новые техпроцессы, обеспечивающие прогресс производства полупроводниковых приборов ИС и улучшения их надежности", Черновцы, 1986.

- Всесоюзная конференция "Физико-химические основы электронного материаловедения", Новосибирск, 1988.

Крім того матеріали роботи неодноразово доповідалися на

загальноінститутських конференціях Державного університету "Львівська політехніка".

Публікації. По темі дисертації опубліковано 8 робіт.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, основних висновків, описку використаної літератури. Матеріали, викладені на 160 сторінках машинописного тексту містять 53 рисунки і 4 таблиці. Список літератури містить 87 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі, обґрунтовано актуальність вибраного напрямку досліджень, формується мета роботи, визначається наукова новизна, практична цінність одержаних результатів, а також положення, що виносяться на захист.

В першій главі наведений аналітичний огляд електрооптичних властивостей МДН-фоточутливих перетворювачів оптичного сигналу, перемикачою структурою яких є МДН транзистор з індукованим або вбудованим каналом. Проведений порівняльний аналіз параметрів МДН-фоточутливих перетворювачів з ПЗЗ перетворювачами сигналів зображення. Обґрунтована перспективність використання сполук A^2B^5 з великою шириною забороненої зони та заданими електричними і оптичними властивостями в якості елементів оптоелектроніки. Показано, що найбільш перспективними є перемикачі ПМОН-транзисторної структури з низьким значенням порогової напруги, які можуть працювати безпосередньо від рівня вихідних сигналів лінійки фотодіодів, яка формує ізолювану напругу. Узагальнення літературних відомостей дає змогу сформулювати актуальність задачі по дослідженню можливості використання низькопорогових ПМОН-транзисторів у розробці оптимальних конструкцій і технологій виготовлення оптоелектронних перетворювачів на основі структур ПМОН- транзистор- фотоприймач.

В другій главі числовими методами досліджені електрооптичні властивості кремнієвих фотодіодів в субмікроннов глибинов залегання р-п-переходу. Наведена модель вихідних вольт-амперних характеристик в системі ПМОН-транзистор-фотодіодна лінійка.

Фоточутлива система являє собою польовий транзистор, виготовлений методом подвійного легування, що має

гальванічний зв'язок з фотодіодами. Роль фотодіодів у цій системі зводиться до того, що напруга на затворі (в залежності від полярності вмикання фотодіодів) збільшується чи зменшується на величину фото-е.р.с., яка виникає під дією освітленості р-п-переходів фотодіодів системи. Якщо в фотодіодна лінійка з г-фотодіодів, то напруга на затворі

$$U_z = U_{zo} + rU_{xx}$$

де U_{zo} - падіння напруги на затворі і фотодіодах у відсутності освітленості; U_{xx} - фото-е.р.с.

Зменшення глибини залегання р-п-переходу фотодіодів до 0,3-2 мкм від поверхні кремнію приводить до збільшення чутливості в ультрафіолетовій області спектра. Для одержання такого мілкового р-п-переходу застосовується процес іонної імплантації, однією з переваг якої є можливість точного керування концентрацією і глибиною залегання домішки в кристалі. Для моделювання електрофізичних і технологічних параметрів фотодіода, сформованого іонною імплантацією, нами використовувалось моделювання рівномірних профілів розподілу імплантованих іонів за допомогою функції Пірсона.

Формування рівномірного профілю розподілу домішки на заданому рівні концентрації доцільно проводити, використовувачи багаторазову іонну імплантацію. Підбір доз випромінювання іонів Φ_1 проводиться чисельним моделюванням сумарного профілю:

$$C(x) = \sum_{i=1}^n \Phi_i f_i(x)$$

де $f_i(x)$ - частотна функція Пірсона.

Нижче наведені дози опромінення для створення профілю з рівномірною концентрацією імплантованих іонів бору на рівні $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

$E_1, \text{ кеВ}$	65	85	110	140	180	225	280
$\Phi_1 \cdot 10^{11}, \text{ см}^{-2}$	6,4	7,3	8,3	9,3	10,3	11,6	12,9

де E_1 - енергія іонів бору, Φ_1 - доза опромінення іонів бору.

Для розробки математичної моделі ПМОН - транзистора - фотодіодів скористаємось представленням транзистора з нерівномірно легованою р - каналною областю, що працює в лінійній області вольт - амперних характеристик як послідовне з'єднання п - МОН - транзистора з рівномірно легованою підкладков. Концентрація домішки в підкладці довільного к -транзистора розглядається як середня величина

$$N_k = \frac{1}{L_k} \int_{y_k}^{y_{k+1}} N(y) dy$$

де L_k - довжина каналу к-го транзистора.
 $N_k = N(y_k) = N(y_{k+1})$

При малих напругах $U_{св}$ - к-го-транзистора $U_{св} < U_{в} - U_{порк}$. Струм стоку в каналі можна записати у вигляді:

$$I_{сфд} = \frac{\mu_{nk} C_0 Z}{L_k} (U_{з0} - U_{порк}) (U_{k+1} - U_k) - 1/2 (U_{k+1}^2 - U_k^2)$$

де $U_{порк}$ - порогова напруга к-го-транзистора; U_k - напруга витoku к-го-транзистора рівна напрузі стоку (к-1) транзистора; U_{k+1} - напруга стоку к-транзистора; $L_k = L/n$ - довжина каналу к-транзистора.

Рухливість електронів $\mu_{ЕК}$ - має своє значення для кожного з послідовно з'єднаних транзисторів

$$\mu_{ЕК} = \frac{\mu_{k0} U_0}{1 - \frac{U_{з0} - U_{порк}}{U_0}}$$

де $\mu_{к0}$ - рухливість електронів для слабого електричного поля, $U_0 = 24$ В - емперичний параметр.

Величина порогової напруги $U_{порк}$ визначається виразом

$$U_{порк} = 2\phi_{Fk} + U_{FB} + \left(\frac{2\epsilon_0 \epsilon \lambda_1 N_k (2\phi_{Fk} + U_k)}{C_0} \right)^{1/2}$$

де U_{FB} - напруга плоских зон; ϕ_{Fk} - потенціал, який відповідає рівню Фермі.

Таким чином, рівняння струму для системи к-го - транзистора фотодіодів запишеться у вигляді

$$I_{сфд} = \mu_{nk} C_0 \frac{Z}{L_k} (U_{з0} - U_{порк}) (U_{k+1} - U_k) - \frac{1}{2} (U_{k+1}^2 - U_k^2)$$

Розв'язуючи систему рівнянь

$$I_{\text{од}} = \frac{\mu_{n1} a_0 z}{L_k} \left[(U_{\text{зо}} \pm r U_{\text{xx}} - U_{\text{пор}_1}) (U_2 - U_1) - \frac{1}{2} (U_2^2 - U_1^2) \right]$$

$$I_{\text{о}} = \frac{\mu_{nk} a_0 z}{L_k} \left[(U_{\text{зо}} \pm r U_{\text{xx}} - U_{\text{пор}_k}) (U_{k+1} - U_k) - \frac{1}{2} (U_{k+1}^2 - U_k^2) \right]$$

$$I_{\text{о}} = \frac{\mu_{nn} a_0 z}{L_k} \left[(U_{\text{зо}} \pm r U_{\text{xx}} - U_{\text{пор}_n}) (U_{n+1} - U_n) - \frac{1}{2} (U_{n+1}^2 - U_n^2) \right]$$

відносно $U_2, U_3 \dots U_k$ з врахуванням того, що $U_{n+1} = U_0$; $U_1 = U_B$ де U_0 і U_B - напруга стоку і витоку відносно підкладки системи, одержимо залежність $I_{\text{о}} = I_{\text{о}}(U_B, U_0, U_B)$.

На рис.1 наведені розрахункові ВАХ системи ПМОН - структура-фотодіоди, що має наступні електрофізичні і конструктивні параметри:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \text{ см};$$

$$z = 90 \text{ см};$$

$$d_{\text{SiO}_2} = 10^{-6} \text{ см};$$

$$\mu_{\text{во}} = 200 \text{ см}^2/\text{Вс};$$

$$U_{\text{FB}} = -2 \text{ В};$$

$$a_0 = 5.5 \cdot 10 \text{ см};$$

$$U_{\text{во}} = 2.5 \text{ В};$$

$$U_{\text{xx}} = 0.5 \text{ В};$$

$$r = 1; 3; 5; 7; 9.$$

В третьій главі наведені конструктивно - технологічні особливості кремнієвого ПМОН-фотодіодного перетворювача, а також результати досліджень характеристик і аналіз результатів експериментальних зразків фотодіодного перетворювача.

При розробці фотодіодного перетворювача оптичного сигналу увага акцентувалась на одержанні сукупності характеристик і параметрів, що задають робочу здатність системи польовий транзистор-фотодіоди: низьке значення порогової напруги, крутизна характеристики, розширення області спектральної чутливості в

ультрафіолетову область спектра при забезпеченні прийнятних значень темнового струму фоточутливих елементів схеми.

ПМОН - транзистор виготовлявся за технологією, що сумісна з стандартними процесами виготовлення фотодіодів. Конструктивно ПМОН - транзистор в схемі фотодіодного перетворювача - це структура з вертикальним каналом, в якій здійснене паралельне ввімкнення елементарних транзисторних комірок, геометричні розміри яких становлять 18 мкм. Короткі канали одержуються шляхом послідовної дифузії акцепторної і донорної домішки для утворення р-канальної області і n-витоку під одним і тим же шаром оксиду. Характерною особливістю ПМОН-структури є двомірний розподіл електродів.

Фотодіодна лінійка, як датчик оптичного сигналу, представляє собою послідовне розміщення в кристалі діелектрично ізольованих один від одного фотодіодів. Фотодіод являє собою кристал з площею фоточутливої поверхні $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ (діаметр 500 мкм). Конструкція фотодіодів передбачає створення двох р-n-переходів. Перший р-n-перехід сформований на глибині, меншій 0,2 мкм, з низьким значенням концентрації донорної домішки (приблизно $N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). При такій концентрації глибина залягання n-p-переходу менша ширини області об'ємного заряду (приблизно 0,2 мкм). Тобто в даному випадку забезпечується умова досягнення високої фоточутливості в ультрафіолетовій області спектра. Другий р-n-перехід знаходиться на глибині 3-4 мкм від поверхні.

Спектр фоточутливості фотодіодів містить два максимуми: один при 0,45 мкм, другий при 0,93 мкм. Границя фоточутливості в довгохвильовій області спектра визначається границею фундаментального поглинання і дифузійною довжиною неосновних носіїв носіїв заряду в кремнії. Короткохвильова границя фоточутливості фотодіодів відповідала приблизно 0,30 мкм. Спад чутливості в короткохвильовій області спектра обумовлений сильним поглинанням світлового випромінювання в приповерхневому шарі. Зменшення глибини р-n-переходу приводить до збільшення темнового струму, що погіршує порогові характеристики фотодіода. Зменшення струмів витоку по поверхні досягається шляхом створення охоронного кільця, яке формуєть дифузійну фосфору на глибині 1,5 мкм.

В роботі визначені режими лазерного легування, що дозволяють формувати субмікронні р-n-переходи для розширення спектральної

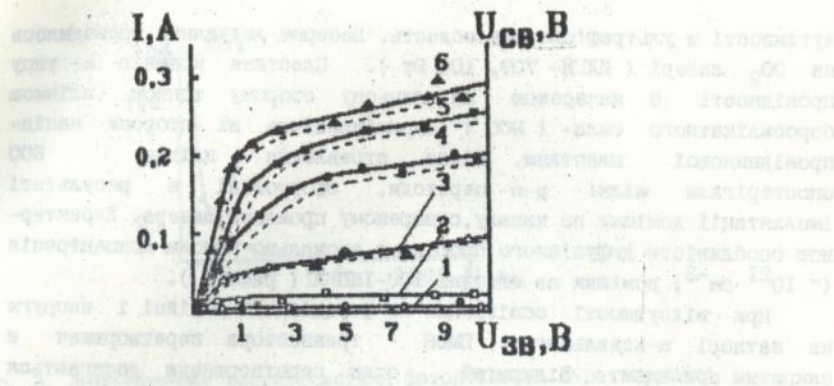


Рис. 1. Початковий вигляд експериментальних стокових вольт-амперних характеристик системи ПМОН - транзистор - фотодіоди при:

$r = 0$ (крива 1), $r = 1$ (крива 2), $r = 3$ (крива 3),
 $r = 5$ (крива 4), $r = 7$ (крива 5), $r = 9$ (крива 6),
 розрахункові криві позначені пунктиром.

Освітленість 3600 лк.

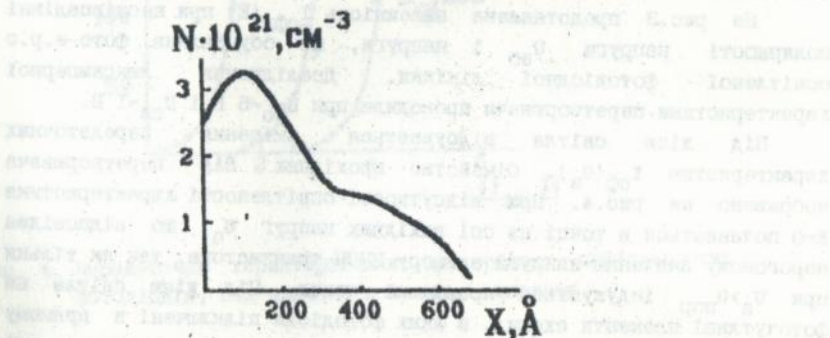


Рис. 2. Профіль розподілу лазерно-імплантованої домішки бору в кремнії.

чутливості в ультрафіолетову область. Лазерне легування проводилось на CO_2 лазері (ИЛН-709, 100 Вт). Пластини кремнію n-типу провідності в нанесеною на лицьову сторону тонкою плівкою боросилікатного окла (BCO) опромінювались зі сторони напівпровідникової пластини. Після стравлення плівки BCO спостерігали мілкі p-n-переходи, сформовані в результаті імплантації домішки по каналу, створеному променем лазера. Характерною особливістю дифузійного профілю є аномально висока концентрація ($\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$) домішки на глибині 100-160 Å (рис. 2).

При відсутності освітлення на фотодіодній лінійці і напруги на затворі n-канального ПМОН - транзистора перетворювач в закритий приладом. Відкритий стан перетворювача досягається створенням інверсного шару в каналній області транзистора, для чого на затвір подається сумарна напруга U_3 з генератора і фото-е.р.с. з фотодіодної лінійки. При освітленні фотодіодів включених в пряму або в зворотньому напрямку можна збільшувати або зменшувати величину $I_{\text{сфд}}$.

Зміну напруги U_3 можна розглядати як величину, що залежить від освітленості, оскільки величина фото-ерс є функцією освітленості. Отже величина вихідного струму транзистора схеми $I_{\text{сфд}}$ теж залежить від освітленості.

На рис.3 представлена залежність $I_{\text{сфд}}(E)$ при неспівпадінні полярності напруги $U_{\text{зо}}$ і напруги, що обумовлена фото-е.р.с освітленої фотодіодної лінійки. Дослідження лксамперної характеристики перетворювача проводили при $U_{\text{зо}}=5 \text{ В}$ і $U_{\text{св}}=1 \text{ В}$.

Під дією світла відбувається зміщення передаточних характеристик $I_{\text{сф}}(U_3)$. Сімейство прохідних ВАХ перетворювача зображено на рис.4. При відсутності освітленості характеристика $E=0$ починається в точці на осі вихідних напруг U_3 , що відповідає пороговому значенню напруги затвору ПМОН-транзистора, так як тільки при $U_3 > U_{\text{пор}}$ індукуються провідний канал. Під дією світла на фоточутливі елементи схеми, в яких фотодіоди підключені в пряму напрямку, відбувається зсув початкових точок прохідних ВАХ по осі напруг. Тут зручно користуватись ефективною пороговою напругою системи ПМОН-транзистор-фотодіоди, що залежить від освітленості. Вираз для порогової напруги перетворювача запишеться у вигляді

$$U_{\text{пор.эф}}(E) = U_{\text{пор}} + rU_{\text{zx}}$$

Зміна освітленості від нуля до 1340 лк приводить до зменшення ефективною порогової напруги на $2,5 \text{ В}$, при подальшому збільшенні

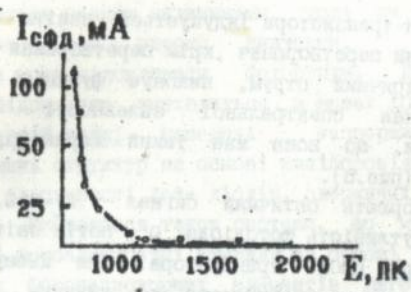


Рис. 3. Лекс-амперна характеристика фотодіодного перетворювача при зворотньому в'єднанні фотодіодів.

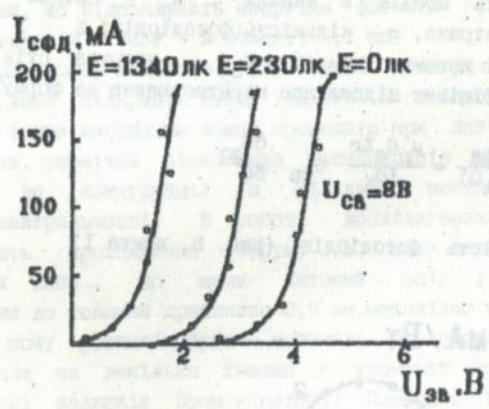


Рис. 4. Передеточні характеристики при різних освітленостях фотодіодів, під'єднаних в прямому напрямку.

освітленості канал ПМОН-транзистора індукуються навіть при $U_B=0$. Інтегральний фотодіодний перетворювач, крім перетворення оптичного випромінювання в електричний струм, виконує функцію підсилення фотоструму. Дослідження спектральної залежності чутливості перетворювача, показали, що вона має такий характер, як і чутливість фотодіодів (рис.5).

Фотодіоди перетворюють оптичний сигнал $I_L=S_\lambda Q$, (де S_λ - спектральна струмова чутливість фотодіода, Q - потік світла) в вихідний сигнальний струм ПМОН - транзистора. При цьому зміна напруги ($\Delta U_{XX} = r U_{XX}$) на затворі транзистора, що виникає під дією фотосигналу, моделює струм через транзистор схеми:

$$\Delta I_{сф} = \frac{\mu_n C_0 Z r}{L} U_{св} U_{XX}$$

де μ_n - рухливість носіїв в каналі, C_0 - питома ємність підзатворного діелектрика, r - кількість фотодіодів, Z і L - відповідно, ширина і довжина каналу, $U_{св}$ - напруга стік-витік. Можна визначити коефіцієнт підсилення перетворювача за формулою

$$K = \frac{\delta I_{сф}}{\delta(S_\lambda Q)} = \frac{\mu_n C_0 Z r}{I S_\lambda} U_{св} \frac{\delta U_{XX}}{\delta Q}$$

Спектральна чутливість фотодіодів (рис. 5, крива 1)

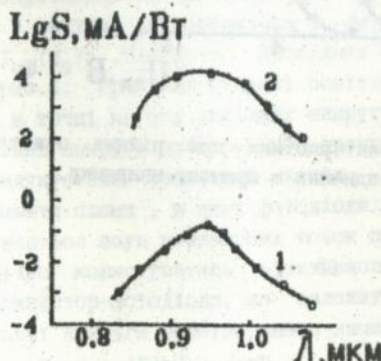


Рис. 5. Спектральна чутливість фотодіодів (крива 1). Спектральна чутливість ПМОН - фотодіодного перетворювача (крива 2).

характеризується малими величинами, тоді як чутливість системи (рис. 5, крива 2) має високе значення. Отже фотодіодний перетворювач може підсилити фотострум. Для нашого випадку коефіцієнт підсилення знаходиться в межах $10^4 - 10^6$.

В четвертій главі наведені експериментальні дослідження фоторезистивних структур на основі напівпровідників A^2B^6 , досліджені електричні властивості ZnSe діодів, одержаних методом іонної імплантації. Вивчається також системи, що містять в собі МОН - транзистор і фотоелектричні прилади на основі CdS, CdSe, CdTe.

Плівки фоторезисторних елементів виготовлялися напиленням CdS або CdSe у вакуумі на підкладки SiO_2 . Для збільшення fotocутливості плівок здійснювалась їх термічна обробка в порошок того ж напівпровідникового матеріалу з домішкою $SiCl_2$ при температурі 733...753 K на протязі 40 хв.

Спектральні характеристики фоторезисторів в CdS мають два максимуми, що відповідають енергіям фотонів 2,15 і 1,83 еВ, а фоторезисторів в CdSe - в області 1,7 еВ.

Принципову можливість управління електричними властивостями сполук ZnSe відкриває метод іонного легування. Це пов'язано з тим, що іонне легування можна проводити при низьких температурах, при яких термічна рівноважна концентрація вакансії мала і не вдатна до конкуренції з вільними носіями в підтримці електронейтральності. В роботі досліджувались процеси, що визначають проходження струму в р-п- переходах на ZnSe. Пластики ZnSe, що мали питомий опір ($\rho \sim 0,1 \text{ Ом см}$) шліфували до товщини приблизно 0,5 мм, механічно полірували, травили в 1% - ному розчині бром - метанолу на протязі 20-30сек, потім занурювали на декілька хвилин в хромовий травник для зняття з поверхні залишків бром - селену. Поверхню ZnSe бомбардували пучками іонів фосфору в дозові 10^{15} см^{-2} з енергією 60кВ. Імплантований зразок послідовно відпалювали в насичених парях селену і під плівкою золота, що виконує одночасно функцію омного контакту до р-області діодів. Зворотню сторону кристалу шліфували і піддавали травленню. Контакт до п- шару створювали напиленням In в потоці водню при 623 K. Створені р-п- переходи мали чітко виражені діодні характеристики.

Початкові ділянки ВАХ ZnSe діодів при різних температурах представлені на рис. 6. Можна зауважити слабку температурну залежність нахилу прямих, яка характерна для тунельного

струму.

$$I_T = I_T^0 \cdot \exp(\alpha U + \beta T)$$

де α і β - параметри не залежні від напруги і температури, I_T - струм відсічки при $U=0$.

Як видно з вищевикладеної формули при незмінно му струмі повинна виконуватись залежність $\ln I_T$ приблизно рівне U , що спостерігається (див. рис. 6). Крім того, при постійній напрузі. $\ln I_T = f(T)$ вираховується прямою (див. рис. 6, вставка).

Експериментальні значення параметрів α і β для досліджуваних діодів $18 \dots 20 \text{ В}^{-1}$ і $(1,6 \dots 1,18) \times 10^{-2} \text{ К}^{-1}$ відповідно. Ця залежність $I(U)$, можливо, обумовлена одноступеневом і багатоступеневом рекомбінацією через локальні рівні і серії послідовних тунельних переходів в рівня на рівень крізь область об'ємного заряду. Такі процеси цілком ймовірні, оскільки низькотемпературний відпал не "заліковує" повністю радіаційні дефекти, генеруючи ряд рівнів в забороненій зоні ZnSe.

Залежність $I(U)$ в області великих напруг спотворюється падінням напруги на послідовному опорі кристалу і омичних контактах R_0 на декілька десятків ом. В результаті прямий струм через діод росте значно повільніше, ніж потребує вираз для надбар'єрного проходження носіїв. Враховуючи, що напруга прикладена до зразка $U = U_0 + IR_0$, одержимо

$$\ln I - eU/kT = \ln I_s - eR_0 I/kT$$

де U і I - змінні напруги і струму, I_s - струм насичення. На рис. 7 представлені експериментальні результати в координатах, зручних для порівняння з попередньою формулою. Всі залежності в досліджуваному температурному інтервалі мають лінійні ділянки, а відхилення експериментальних точок від прямих в області малих зміщень обумовлено впливом тунельного струму. Струм насичення легко знайти з допомогою екстраполяції прямолінійних ділянок до пересікання з віссю ординат при $I=0$. Температурна залежність I_s визначається множителем $\exp(-\phi_0/kT)$, що підтверджується експериментальними даними (див. рис. 7, вставка). Знайдений нахил цієї прямої висота потенціального бар'єру ϕ_0 відповідає 2,0 еВ.

Якщо створити структуру, еквівалентна схема якої зображена на рис. 8, то можливим стає керування величиною вихідного струму з допомогою оптичного сигналу. Застосування однакових фоторезисторних

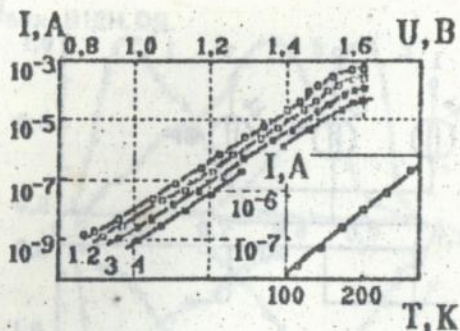


Рис. 6. Прямі гілки вольт-амперних характеристик при різних температурах: 1 - 300 К; 2 - 223 К; 3 - 173 К; 4 - 80 К. На вставці - температурна залежність прямого струму при $U = 1,2$ В.

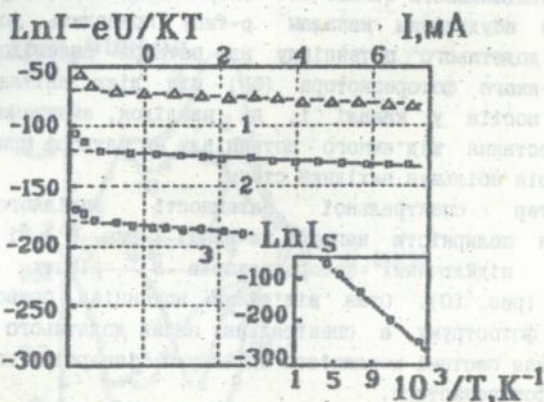


Рис. 7. Співвідношення прямої гілки в області великих струмів з виривом $(\ln I - eU/KT)$ при різних температурах: 1 - 300 К; 2 - 173 К; 3 - 123 К. На вставці - температурна залежність струму насичення.

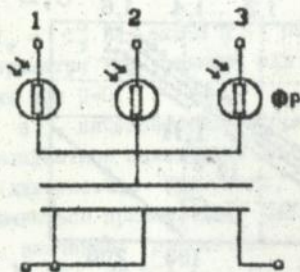


Рис. 8. Еквівалентна схема системи МОН - транзистор - фоторезистори (1 - CdS , 2 - ZnTe , 3 - CdTe).

елементів 1 МОН-транзисторної структури з вбудованим каналом дозволило одержати значну зміну вихідного струму від освітленості. При $E=250 \text{ лк}$ і $S=0,5 \text{ А/В}$ відношення максимального вихідного струму до мінімального більше 200. Використання МОН - транзисторної структури з вбудованим каналом р-типу приводить до того, що збільшення додатнього потенціалу на затворі внаслідок зменшення опору будь-якого фоторезистора (ΦP) під дією світла обумовлює зменшення носіїв у каналі 1, як наслідок, зменшення струму на виході. Зростання від'ємного потенціалу на затворі при освітленні фоторезисторів збільшує вихідний струм.

Характер спектральної залежності вихідного струму визначається полярністю напруги на вході (рис. 9) і кількістю паралельно підключених фоторезисторів з різних напів - провідників (рис. 10). Отже від'ємний потенціал приводить до підсилення фотоструму, а спектральна зміна додатнього потенціалу на затворі дає системі можливість здійснити інверсію спектральної чутливості фоторезистора.

Якщо в першому випадку (від'ємний потенціал на затворі) струм на виході

$$I_{\text{вих}} = I_0 + aI_{\Phi},$$

то в другому (мінус на затворі)

$$I_{\text{вих}} = I_0 - bI_{\Phi},$$

де I_0 - вихідний струм, поля $U_{\text{з}}=0$, I_{Φ} - фотострум, а a і b - додатні коефіцієнти.

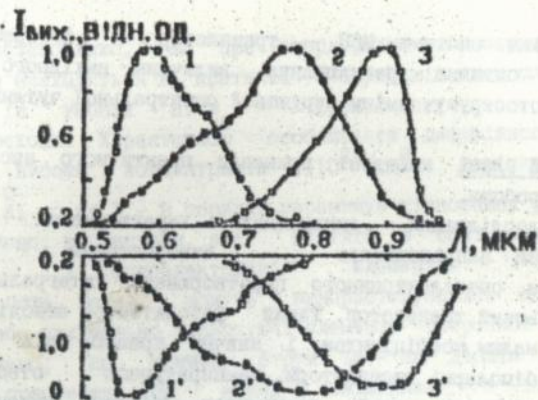


Рис. 9. Спектральні характеристики вихідного струму системи
 МОН - транзистор - фоторезистори (1 1' - CdS;
 2 1 2' - ZnTe; 3 1 3' - CdTe).

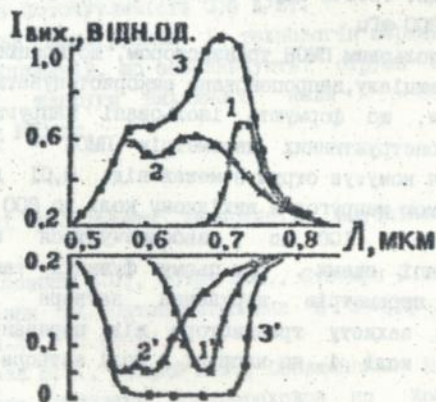


Рис. 10. Спектральні характеристики системи МОН-транзистор-
 фоторезистори (1 1' - CdS; 2 1 2' - CdSe;
 3 1 3' - CdTe і CdSe).

Розроблена система МОН - транзистор - фоторезистори забезпечує: оптичне регулювання величини вихідного струму, підсилення фотоструму, зміну струмової спектральної чутливості.

В п'ятій главі наведені приклади практичного застосування результатів роботи.

Для дослідження динамічних характеристик лазерного випромінювання запропоновано використання в якості фотодетектора, оптоелектронного перетворювача інтегральної схеми фотодіод-польовий транзистор. Такий фотодетектор володіє високою швидкістю, малим коефіцієнтом і значно кращою, ніж лавинні фотодіоди і біполярні транзистори, температурною стабільністю. В системі фотодіод - польовий транзистор можливе високоефективне автоматичне керування по затвору, яке може застосовуватись для збільшення динамічного діапазону фотоперетворювача.

Фотоперетворювач складається з фотодетектора і широкосмугового підсилювача. Струмова фоточутливість відповідає 0,5 А/Вт, причому спектральний діапазон майже такий самий, як і у кремнієвого фотодіода. Робоча смуга частот у такому фотоприймачі становить від 0 до 300 МГц.

Для керування польовим ПМОН транзистором, що працює як ключ в точках високого потенціалу, запропоновано використовувати послідовне в'яднання фотодіодів, що формують ізольовані напруги до 5 В. В залежності від конструктивних параметрів ПМОН - транзистора, оптоелектронний ключ комутує струм в межах від 0,01 до 10 А в максимально допустимій напрузі в вихідному колі до 800 В. Велика швидкість перемикача (100 нс) забезпечується за рахунок використання буферної схеми. При цьому функція такої схеми крім забезпечення параметрів керування затвора транзистора передбачає функцію захисту транзистора від перевантаження по струму у вхідному колі і по напрузі в колі затвора.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ І ВИСНОВКИ

1. Формування двох р - п - переходів в глибині залегання одного <0,2 мкм, другого >4 мкм в конструкції ПМОН - перетворювача оптичного сигналу забезпечує збільшення струмової фоточутливості і розширення спектрального діапазону.

2. Вперше встановлено, що при твердофазному лазерному легуванні кремнію, що знаходиться в контактi з боросилікатною плівкою, через підкладку (в умовах $h\nu < E_g$) формуються міжзоналягаччі р - n - переходи. Характерною особливістю дифузійного профілю є аномально висока концентрація (10^{21} см^{-3}) домішки на либiні $100 \dots 150 \text{ \AA}$, що на 1 - 2 порядки перевищує рівноважну розчинність.
3. Встановлено, що системи, які містять в собі потужний ПМОН транзистор і фотоелектричні елементи (фоторезистори CdS , CdSe , CdTe , ZnTe), можуть використовуватись як приймально регулюючі або приймально інвертуючі елементи оптронної пари.
4. Встановлено; що прямий струм Zn - Se діодів визначається тунельними процесами при малих зміщеннях і інжекцією над бар'єром при високих зміщеннях напруги. Експериментальні ВАХ задовільно підтверджуються теоретичними розрахунками.
5. Розроблений фотодетектор (на польовому транзисторі - фотодіодах) швидкодіючого фотоперетворювача:
 - крутизну перетворення $0,1 \dots 0,001 \text{ А/лк}$;
 - робочу смугу частот: $0 \dots 300 \text{ МГц}$;
 - струмову fotocутливість $0,5 \text{ А/Вт}$.
6. Розроблена конструкція і технологія перемикаючих оптоелектронних перетворювачів, що забезпечують: струми комутації $0,01 - 10 \text{ А}$, максимальні напруги вихідного кола 800 В , швидкодію перемикання 100 нс .

Основні результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Лихобабин М.П., Готра З.Ю., Стахира П.И. Приемные элементы оптронной пары // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. - 1994. - Вып.29. - С.24-27.
2. Козак Е.Н., Махний В.Г., Собищанский В.М., Стахира П.И. Электрические свойства р-n-переходов на ZnSe // Физическая электроника. - Львов, 1993. - Вып.37. - С.19-24.
3. Стахира П.И., Савчин В.П. Дослідження систем ПМОН - польвий транзистор-фотодіод. // Вісник Львівського університету. - сер. Фізична. - Вып.26. - 1993. - С.93-96.
4. Лихобабин Н.П., Политанский Л.Ф., Стахира П.И. Приемно-переключающий элемент оптоэлектронной пары // Тезиси

докладов Всесоюзной научной конференции "Фотоэлектрические явления в полупроводниках". - Ташкент. - 1989. - С.24.

5. Махний В.Г., Стахира П.И. Свойства р-п-переходов в широкозонных соединениях A^2B^6 . Тезисы докладов I Всесоюзного семинара по микроэлектронике. - Устиков, 1987. - С.102.

6. Махний В.Г., Лилик В.В., Стахира П.И. Электролюминесцентные диоды на основе сульфаселенидов цинка. Тезисы докладов: Собрание по люминесценции АН СССР. - Еильнюс, 26-29 сентября 1989 г., с. 212.

7. Готра З.В., Бобицкий Я.В., Стахира П.И. Про створення омичних контактів Al-Si // Вісник Львівського політехнічного інституту. - Вип.264. Теорія і проектування напівпровідникових та радіоелектронних пристроїв. - С.78-81.

8. Махний В.Г., Стахира П.И. Получение и свойства слоев сульфаселенидов цинка с дырочной проводимостью. Тезисы докладов конференции "Радиохимические основы электронного материаловедения". - Новосибирск, 1988. - С.109.



Підписано до друку 15.08.94р. Формат 60x84/16.

Обєм Ідрук.ліст. Зап.520. Тир.100. Безплатно.

Львів. Друкарня УПІ ім. Ів. Федорова, Личаківська, 3

158886

Безплатно

AB30.714

AB 30.714