

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Жагловська**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2016

УДК 621.383; 621.317

ББК 32.854.2

О-72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 30.11.2015 р.)

Рецензенти:

К. С. Підченко, доктор технічних наук, професор

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

**Осадчук, В. С.**

О-72 Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі потужності оптичного випромінювання з частотним виходом : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Жагловська. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 168 с.

ISBN 978-966-641-652-3

В монографії проаналізовано сучасний стан оптичних перетворювачів, подано основи побудови мікроелектронних перетворювачів потужності оптичного випромінювання з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Розглянуто принципи побудови, електричні схеми і експериментальні дослідження основних параметрів мікроелектронних оптичних перетворювачів. Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних оптичних перетворювачів, а також на аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

**УДК 621.383; 621.317**  
**ББК 32.854.2**

**ISBN 978-966-641-652-3**

© В. Осадчук, О. Осадчук, О. Жагловська, 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	6
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ .....	9
1.1 Прилади на основі оптоелектронних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання .....	9
1.2 Фотоелектронні сенсори.....	13
1.3 Напівпровідникові прилади для вимірювання оптичної потужності .....	17
1.4 Прилади на основі частотних перетворювачів оптичного випромінювання .....	28
1.5 Класифікація приладів для вимірювання оптичної потужності та постановка задач дослідження.....	34
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФОТОРЕАКТИВНОГО ЕФЕКТУ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДАХ.....	36
2.1 Математична модель фотореактивного ефекту в діодних структурах та сонячних елементах.....	36
2.2 Математична модель фотореактивного ефекту в польових транзисторних структурах.....	45
2.3 Математична модель фотореактивного ефекту в МДН-транзисторних структурах з двостороннім освітленням каналу .....	54
3 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ ТА ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР.....	65
3.1 Визначення вольт-амперної характеристики приладу на основі оптичного перетворювача з фотодіодом .....	65
3.2. Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з фотодіодом .....	72
3.3. Визначення вольт-амперної характеристики приладу на основі оптичного перетворювача з двома МДН-транзисторами та з кремнієвим сонячним елементом.....	78
3.4. Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з двома МДН-транзисторами та з кремнієвим сонячним елементом.....	84

3.5. Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з біполярним, МДН-транзистором та з сонячною батареєю .....	92
3.6 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з МДН-транзистором з двостороннім освітленням каналу .....	102
<b>4 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ.....</b>	<b>107</b>
4.1 Визначення вольт-амперної характеристики приладу на основі оптичного перетворювача з фотодіодом та активним індуктивним елементом.....	107
4.2 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з фотодіодом та активним індуктивним елементом.....	111
4.3 Визначення вольт-амперної характеристики приладу на основі оптичного перетворювача з двома МДН-транзисторами, сонячним елементом та активним індуктивним елементом.....	119
4.4 Визначення функції перетворення та рівняння чутливості вимірювального каналу приладу на основі оптичного перетворювача з МДН-транзисторами, сонячним елементом та активним індуктивним елементом.....	123
<b>5 МІКРОПРОЦЕСОРНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ДИСТАНЦІЙНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ РЕЗУЛЬТАТІВ .....</b>	<b>131</b>
5.1 Застосування мікропроцесорів у системах вимірювання потужності оптичного випромінювання.....	131
5.2 Розробка передавального та приймального блоків системи вимірювання потужності оптичного випромінювання .....	133
5.3 Розрахунок похибок приладу для вимірювання потужності оптичного випромінювання.....	145
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>156</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АБ	акумуляторна батарея
АІЕ	активний індуктивний елемент
БІЗПН	бізмичений перехід з інжекційною нестійкістю
БПОВ	багатоелементні перетворювачі оптичного випромінювання
ВАХ	вольт-амперна характеристика
ЕОМ	електронно-обчислювальна машина
ЕРС	електрорушійна сила
КСБ	кремнієва сонячна батарея
КСЕ	кремнієвий сонячний елемент
МДН	метал–діелектрик–напівпровідник
ОПЗ	область просторового заряду
ОФТ	одноперехідний фототранзистор
ПЗЗ	прилад із зарядовим зв'язком
ФСКС	фотостимульовані коливання струму
ФТ	фототранзистор
ЧГВО	частотний генератор з від'ємним опором

## ВСТУП

На сучасному етапі науково-технічного прогресу відбувається стрімкий розвиток аналітичного приладобудування на основі використання досягнень сучасної мікроелектронної технології та елементної бази. Це дає змогу за допомогою нових фізичних явищ і нових принципів реалізації приладів розробляти та створювати сенсори для вимірювання параметрів навколишнього середовища. Однією із актуальних проблем сьогодення є створення радіовимірювальних приладів на основі перетворювачів. Виявляє зацікавленість до цієї галузі й бізнес, який забезпечує інженерно-технічне оформлення ідей, сприяє їхній прикладній реалізації.

Загальна тенденція в розвитку радіовимірювальних приладів на основі перетворювачів, зокрема, оптичних, зумовлена збільшенням вимог точності до них при одночасному ускладненні експлуатаційних умов. Існуюча ситуація обумовлює пошук і розробку нових методів вимірювання, які б дозволили вирішити задачі, що з'являються.

Одну з провідних позицій в науковому світі по розробці приладів на основі первинних перетворювачів займає Україна. Це, насамперед, стало можливим завдяки роботі відомих українських вчених І. М. Богаєнка [1], І. М. Вікуліна [2, 3], З. Ю. Готри [4–7], В. Л. Костенка [8–9], М. Д. Кошового [10], В. В. Кухарчука [11], Я. І. Лепіха, С. В. Ленкова [12, 13], Я. Т. Луцика [14], В. П. Манойлова [15, 16], В. С. Осадчука [17–23], О. В. Осадчука [17, 19–25], В. О. Поджаренка [26], В. О. Романова [27], Г. С. Свєчнікова [28], Б. І. Стадника [14], Ю. О. Скрипника [16, 29], В. М. Шарапова [30, 31], Ю. М. Шварца [32, 33], а також закордонних вчених Ж. Аша [34], А. І. Бутурліна [35], В. І. Бусуріна [36], Г. Виглеба [37], А. І. Галушкова [38], Ф. Д. Касімова [39, 40], Д. Легмана [41], П. В. Новицького [42], Ю. А. Полякова [43], В. І. Стафєєва [2, 3], Ю. О. Чаплигіна [44] та інших.

На даний час розвиток мікроелектроніки і перспективи наноелектроніки сприяють проведенню широкомасштабних наукових досліджень на основі нових принципів побудови, нових функціональних, в тому числі наноструктурованих матеріалів з використанням нових фізичних, хімічних ефектів для створення мікроелектронних сенсорів нового покоління. Це питання досліджується в багатьох наукових центрах України, зокрема, в НТУУ «Київський політехнічний інститут» (м. Київ), Інституті Кібернетики НАН України (м. Київ), Інституті теплофізики НАН України (м. Київ), Київському національному університеті імені Тараса Шевченка (м. Київ), Інституті фізики напів-

провідників НАН України (м. Київ), Інституті метрології (м. Харків), Національному технічному університеті «Львівська політехніка» (м. Львів), Харківському національному технічному університеті (м. Харків), Одеському національному університеті ім. І. І. Мечникова (м. Одеса), ВАТ «Український науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування» (м. Київ), Державному науково-дослідному інституті індикаторних приладів Міністерства промислової політики України (м. Вінниця), Вінницькому національному технічному університеті (м. Вінниця).

Подальші наукові дослідження цього напрямку розвинуті в науковій школі Вінницького національного технічного університету, а саме: дослідження теоретичних основ реактивних властивостей і від'ємного опору у напівпровідникових приладах подано у монографіях проф. В. С. Осадчука [17–23], розвиток теорії від'ємного опору і оцінки ефективності пристроїв з його використанням розглянуто в працях М. А. Філінюка [45–47], розробка теорії мікроелектронних частотних перетворювачів на основі транзисторних структур з від'ємним опором і її використання подано у працях проф. О. В. Осадчука [17, 19–23].

Одним з ключових факторів у досягненні високої якості продукції та забезпеченні автоматизації технологічних процесів є оперативний контроль їх параметрів. Розвиток контрольно-вимірювальних систем, основою яких є сенсори, насамперед обумовлений швидким розвитком науково-технічного прогресу, а також удосконаленням технологій мікроелектроніки. Вдосконалення систем автоматичного контролю і управління різними об'єктами, процесами в більшості визначається досягненням в області радіовимірювальних приладів на основі перетворювачів. На даний час виникла проблема перетворення сонячної енергії в енергію електричного поля, яку потрібно передавати на відстань. Важливим питанням є сприймання, обробка, зберігання і передача вимірних даних в інформаційні центри, які можуть бути віддаленими (іноді на великі відстані) від об'єкта вимірювання. Зокрема, це стосується метеорологічних вимірювань (сонячна радіація, інтенсивність УФ променів). Ефективно вирішити таку задачу можна за допомогою приладів для вимірювання оптичної потужності, до яких висуваються жорсткі вимоги: вони повинні бути економічними, забезпечувати низьке енергоспоживання, мати мінімальні габарити і вагу, бути сумісними з сучасними ЕОМ, забезпечувати високу точність та чутливість вимірювання. Існуючі сенсори оптичної потужності не відповідають цим вимогам в повному обсязі, а саме, є низькочутливими. Так, чутливість подібних приладів варіює від  $2 \cdot 10^{-7}$  В/мкВт/см<sup>2</sup> (Climartonics Co., USA) до  $1,67 \cdot 10^{-5}$  В/мкВт/см<sup>2</sup> (Davis Instruments, USA), що недостатньо при подальшій обробці інформаційного сигнала

лу. Тому виникає задача підвищення чутливості вимірювання оптичної потужності. Значного підвищення чутливості можна досягнути шляхом перетворення інформативного сигналу в частотний.

Одним із перспективних наукових напрямів в розробці приладів на основі оптичних перетворювачів є використання залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором від дії оптичного випромінювання і створення на цій основі частотних перетворювачів оптичного випромінювання, що дозволяє значно підвищити чутливість запропонованих приладів. З другого боку, це дає можливість виготовляти фоточутливі перетворювачі у відповідності з мікроелектронною технологією, для підвищення їх точності, надійності і швидкодії. Крім того, об'єднання на одному кристалі вимірювального перетворювача сумісно з схемами обробки інформації дозволить створити «інтелектуальний» сенсор. Використання частоти, як інформативного параметра, характеризується підвищеною завадостійкістю передачі інформації, простотою і значною точністю перетворення в цифровий код, можливістю бездротової передачі на відстань, зручністю при комутації в багатоканальних інформаційно-вимірювальних системах.

Тому, стає очевидною необхідність розробки принципів роботи і теоретичних засад створення радіовимірювальних приладів на основі оптичних перетворювачів у системі вимірювання потужності оптичного випромінювання з дистанційною передачею результатів, а також необхідність розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінювання їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи вимірювання величини потужності оптичного випромінювання та впровадження їх у виробництво.



# **1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПРИЛАДІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Складність задач автоматизації в різних галузях сучасної науки і техніки при керуванні, контролі якості та діагностиці технічних і нетехнічних процесів, що постійно зростає, обумовлює відповідне підвищення рівня вимог до параметрів вимірювальної апаратури, зокрема, первинних вимірювальних перетворювачів, які є складовою частиною вимірювальних приладів [2, 48]. Таким чином, велика потреба сучасної контрольної-вимірювальної техніки в створенні мініатюрних, чутливих інтегральних перетворювачів фізичних величин із параметрами, що задовольняють високий рівень вимог, поряд з умовою ефективного використання матеріальної, технологічної і елементної баз мікроелектроніки, слугує стимулюючим фактором при розробці приладів на основі інтегральних перетворювачів оптичного випромінювання.

Високий ступінь розвитку сучасних контрольної-вимірювальних приладів і систем визначається широким поширенням систем із засобами обчислювальної техніки, використанням мікропроцесорних засобів вимірювань з вбудованими цифровими блоками опрацювання і керування [48, 49, 50]. Конструктивне об'єднання інтегральних первинних вимірювальних перетворювачів з цифровими мікропроцесорними пристроями дозволяє здійснити їх інтелектуалізацію; крім зняття вимірюваної інформації відбувається її практично одночасне опрацювання, фільтрація, стиск і коригування [48, 49].

За таких умов вирішення задачі створення ефективних і надійних сенсорів оптичного випромінювання можливе шляхом застосування нетрадиційних підходів як в процесах реєстрації інформаційних сигналів, так і їх обробленні.

Проблематика цих питань розглядається у цьому розділі.

## **1.1 Прилади на основі оптоелектронних багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання**

Використання приладів на основі оптоелектронних вимірювальних перетворювачів (ОЕВП) в автоматизованих системах управління є однією із істотних тенденцій розвитку сучасних технічних засобів інформатизації [51]. Завдяки унікальним властивостям оптичного випромінювання за допомогою ОЕВП можна розв'язувати багатфункціональні завдання управління з високими характеристиками по точності, швидкодії, надійності, пропускну здатності і практично необ-

меженими можливостями математичної і логічної обробки інформації [52, 53].

Координатні фоторезистори (фотопотенціометри) є тонкоплівковими багатошаровими структурами, які для одержання необхідного функціонального перетворення мають профільований резистивний шар. Довжина чутливого шару фотопотенціометра може досягати декількох десятків міліметрів за роздільної здатності в десятки мікрометрів [54]. Сучасні фотопотенціометри мають недостатню часову і температурну стабільність, хоча є доволі надійними і технологічними. Координатні фотоприймачі, які працюють на поперечному фотоэффекті, називаються диференційними. Вихідний сигнал такого фотоприймача дорівнює різниці сигналів із фоточутливих елементів і пропорційний до зміщення зображення щодо «нульового» положення. До таких фотоприймачів належать секторні чи квадратні фоторезистори і фотодіоди [55]. Загальний недолік розглянутих координатних фотоприймачів полягає у залежності координатної характеристики від розмірів і форми світлового зонда (зображення) і від розподілу освітленості у зонді.

Прилади на основі багатоелементних перетворювачів оптичного випромінювання (БПОВ) характеризуються багатьма параметрами і характеристиками, які застосовуються для описання властивостей одноелементних фотоприймачів. Однак специфіка конструкторського виконання зумовила і низку нових параметрів. Похибки БПОВ зумовлені нерегулярністю розміщення елементів, розкидом чутливості елементів і паразитними міжелементними зв'язками. До найбільш досконалих БПОВ належать пристрої із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Схеми управління ПЗЗ поділяють на дво-, три- і чотиритактні, їх детальний опис наведено в [56].

У роботі [57] наводиться розгляд багатоелементних фотоприймачів на основі фоторезисторів [58]. Можливі структури побудови багатоелементних приймачів на основі фоторезисторів показані на рис. 1.1. За своїми характеристиками і можливостями застосування в апаратурі наведені структури неоднакові. Причина – перехресні зв'язки між чутливими елементами, що проявляються при опитуванні структури. Перехресні зв'язки знижують порогові і погіршують часові характеристики структур.

Спрощена оцінка деяких найбільш перспективних фоторезистивних структур наведена в [59].

Найбільш поширеними матеріалами для отримання фотодіодних БПОВ слугують кремній та германій. За останні роки [60] отримані позитивні результати в розробці фотодіодів і багатоелементних структур на їх основі з застосуванням з'єднань групи  $A^{III}B^V$ : GaAs, GaAlAs,

InAs, InSb, CdSe, що функціонують при температурі 77–200 К. Отримані фотодіодні БПОВ з високими фотоелектричними параметрами на основі CdHgTe, PbSnTe, PbS, PbSe, PbTe [59].

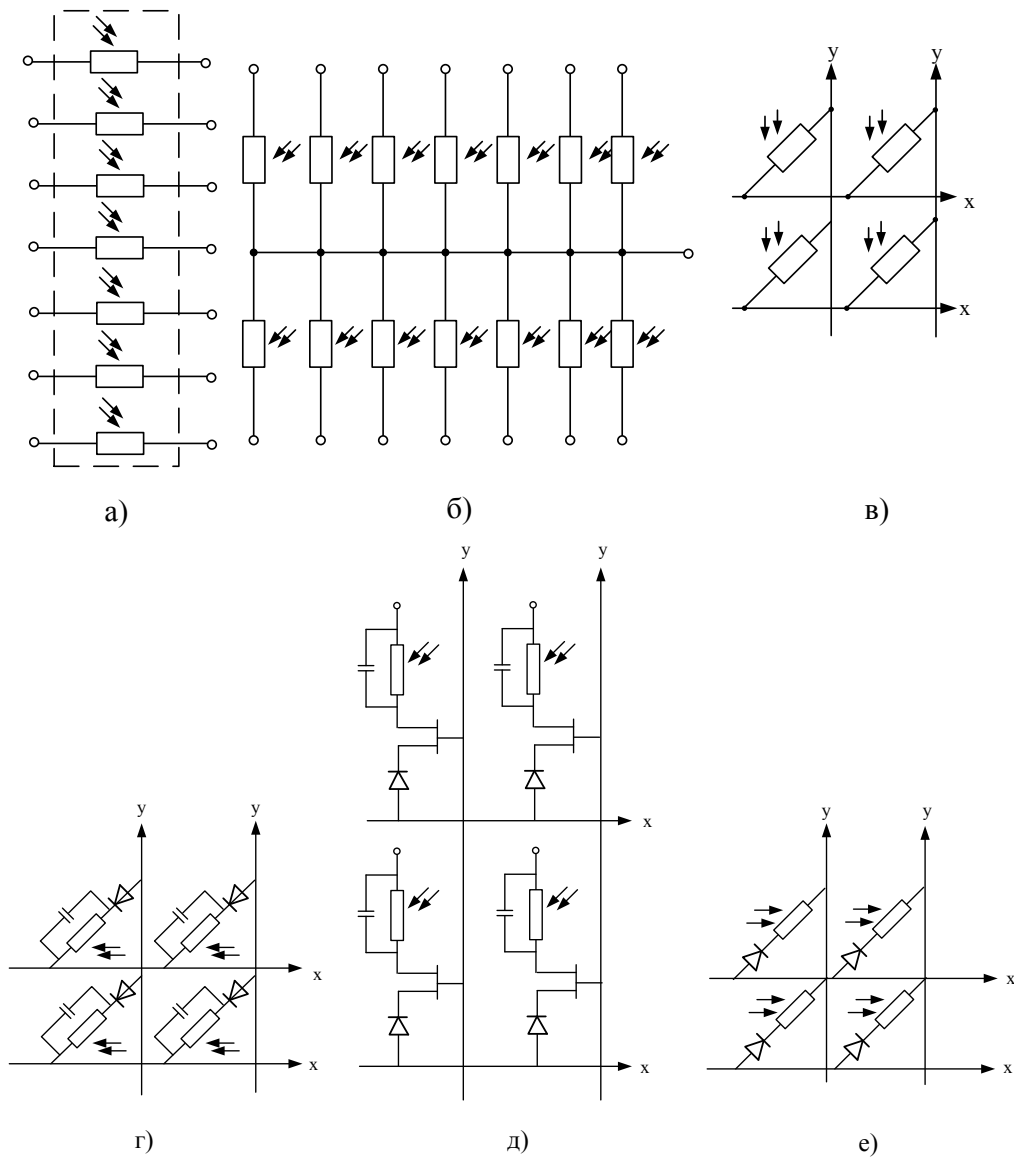


Рисунок 1.1 – Структури побудови фоторезистивних БПОВ

В основному чутливість до потоку випромінювання фотодіодного елемента визначається характеристиками напівпровідникового матеріалу і структурою р-п переходу. Використання фотодіодних елементів в режимі накопичення дозволяє отримати більшу величину електричного сигналу, що виділяється на  $R_n$ , в порівнянні з режимом постійного струму. Однак режим накопичення заряду знижує швидкодію БПОВ. Вказана різниця в величині вихідного сигналу призводить до необхідності мати в кожному елементі в режимі постійного струму

при виявленні порогових сигналів малощумові підсилювачі (порядку  $0,01 \text{ мкВ} / \text{Гц}^{1/2}$ ).

Включення фотодіодних елементів в матрицю показано на рис. 1.2а. Найбільший інтерес викликає випадок двох освітлених елементів і опитування неосвітленого елемента, індекс якого збігається з індексом рядка одного із освітлених елементів, а індекс його стовпця – з індексом стовпця другого освітленого елемента.

В теперішній час існують фототранзисторні БПОВ як на основі біполярних, так і на основі уніполярних фототранзисторів. В реальних схемах фототранзисторні елементи можуть підключатись не лише за схемою обірваної бази (рис. 1.3), але і за схемою стабілізації режиму роботи фототранзистора (рис. 1.4).

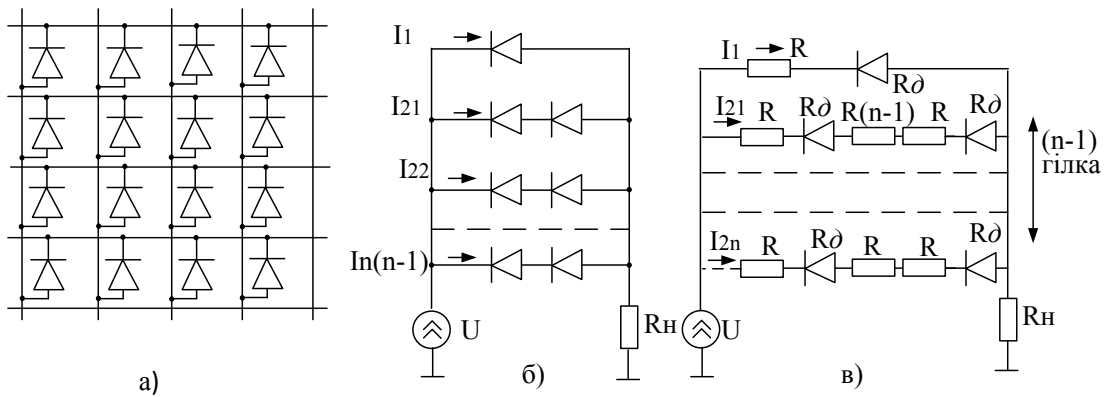


Рисунок 1.2 – Схема включення елементів в матрицю (а), спрощена еквівалентна схема опитування елемента в матриці (б, в)

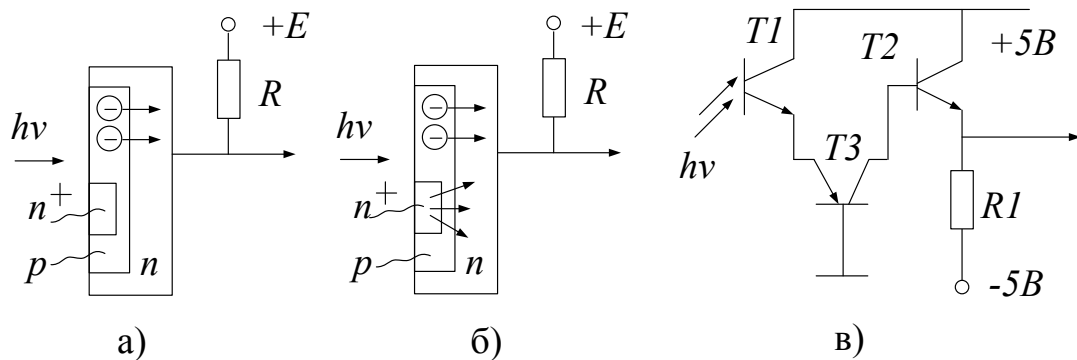


Рисунок 1.3 – Включення елемента за схемою «обірваної бази»:  
а) фотодіодний режим; б) фототранзисторний режим;  
в) схема з підвищеною швидкодією

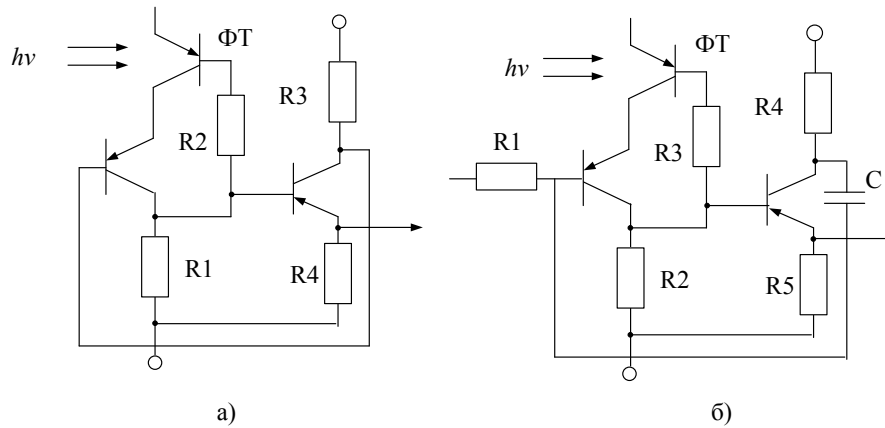


Рисунок 1.4 – Схеми стабілізації режиму роботи фототранзисторного елемента: а) зворотний зв'язок за постійним струмом; б) зворотний зв'язок за змінним струмом

Матеріалами для виготовлення фототранзисторних БПОВ слугують германій, кремній і арсенід галію. Ця обставина обмежує область спектральної чутливості фототранзисторних елементів видимим і ближнім ІЧ-діапазоном спектра. Пояснюється це тим, що до теперішнього часу не вдалось отримати прилад з двома р-п переходами на інших fotocутливих матеріалах, що мають бодай задовільні параметри [57].

Таким чином, фізичні моделі фоторезистивних і фотодіодних елементів БПОВ дозволяють забезпечити виявлення оптичних сигналів у видимому та ближньому ІЧ-діапазоні довжин хвиль. Фізична модель фототранзисторного БПОВ показує, що цей діапазон для такого виду взаємодії дещо звужується.

## 1.2 Фотоелектронні сенсори

Фотоелектронні сенсори переважно застосовуються у двох напрямках: для безпосереднього детектування випромінювання від різних джерел та в оптико-електронних пристроях з відкритим або закритим каналом. В усіх цих випадках виникає потреба підсилення одержуваних первинних, постійних чи змінних електричних сигналів, часто дуже слабких на фоні різного типу електромагнітних завад. Так, в роботі [61] представлені розробки, метою яких було створення ефективних електронних схем для підсилення слабких електричних сигналів порядку  $10^{-8} - 10^{-2} A$  від фотодіодів та фототранзисторів в оптико-електронних пристроях. В якості випромінювачів, використали GaAlAs-світлодіоди та лазери. Фотоприймачами слугували кремнієві фотодіоди та фототранзистори. Результати, одержані під час випробувань цих оптоелектронних сенсорів, довели ефективність спроектованих схемних рішень [61] та придатність використання їх в детекто-

рних системах найрізноманітнішого призначення – від наукових до промислових.

Для фотоелектронних сенсорів в складі комп'ютерних системам пріоритетно застосовувати цифрову схемотехніку, зокрема, для одержання дискретного вихідного сигналу [62]. Так, в роботі [61] представлено принципову схему цифрового фотосенсора із використанням логічних КМОП мікросхем в якості схеми попередньої обробки сигналу з фотоприймача, що доцільно за рахунок їх високої швидкодії, великого вхідного опору та можливості безпосереднього під'єднання до цифрових пристроїв. Структурну схему цього цифрового заводостійкого фотосенсора зображено на рис. 1.5.

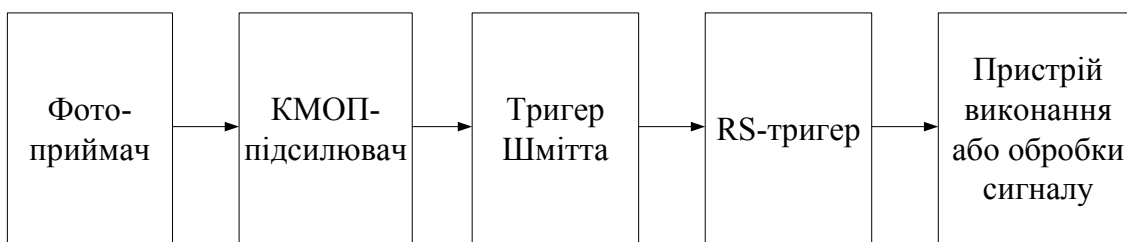


Рисунок 1.5 – Структурна схема цифрового фотосенсора

Введення регульованого тригера Шмітта в схему фотосенсора дозволяє підвищити заводостійкість та точність спрацювання при порівняно тривалих в часі імпульсах сигналу, що у випадку використання дзеркальних відбиваючих растрів відповідає як високим, так і низьким швидкостям їх переміщення (до 3 мм/хв), або ж наявності сильних вібрацій.

Принципова схема з урахуванням запропонованого вище, зображена на рис. 1.6, де в якості фотоприймача використано фототранзистор. У схемі тригер Шмітта реалізований на елементах DD2.1., DD2.2. Величиною опору резисторів R5, R6 можна регулювати петлю гістерезису тригера. RS-тригер утворює елементи DD2.3, DD2.4. Інвертування сигналів, які подаються на входи RS-тригера, здійснюється елементом DD2.2.

В залежності від алгоритму роботи пристрою, з якими використовуватимуть фотосенсор, вихідний сигнал останнього можна знімати з виходів А або В (рис. 1.6). Ширину петлі гістерезиса  $\Delta U_{n.e.}$  для конкретних умов використання фотосенсора вираховують з умови

$$\Delta U_{n.e.} = U_1 - U_2 = (U^1 - U^0) \frac{R_6}{R_5},$$

де  $U_1$  – напруга спрацювання тригера Шмітта;  $U_2$  – напруга виключення тригера Шмітта;  $U^1$  – напруга логічної 1 для використаного типу мікросхем;  $U^0$  – напруга логічного 0 для використаного типу мікросхем.

Використання фотосенсорів з відкритим каналом при вимірюванні параметрів світлових сигналів різної форми та часових характеристик, коли потрібно отримати підсилений, точний та неперервний сигнал, обумовлює застосування аналогової схемотехніки, зокрема операційних підсилювачів (ОП) [63].

На рис. 1.7 зображена схема підсилювача сигналу фотодіода, що являє собою перетворювач струм-напруга, де лінійність вихідної напруги забезпечується за допомогою резистора R1 в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача.

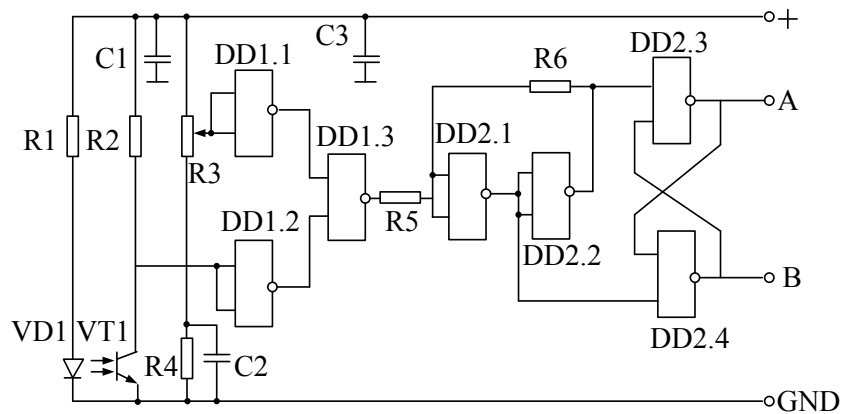


Рисунок 1.6 – Принципова схема цифрового фотосенсора

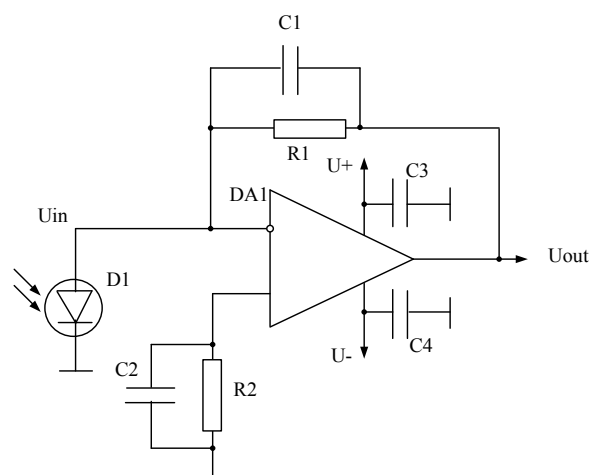


Рисунок 1.7 – Принципова схема підсилювача сигналу з фотодіода

VD1 працює у фотогальванічному режимі. Особливість цього режиму – значно нижча залежність фотоструму діода від температури [64]. Для зменшення перехідних процесів за рахунок ємності фотоприймача застосовано конденсатор С1.

Вихідний сигнал цієї схеми визначається як

$$U_{out} = -I_d(R1 + R2) = -AE_d(R1 + R2) = -e_d K_y,$$

де  $-I_d = -AE_d$  – струм, який генерує фотодіод в фотогальванічному режимі;  $A$  – коефіцієнт перетворення фотодіода;  $E_d$  – освітленість фотодіода;  $e_d$  – фото ЕРС діода;  $K_y$  – коефіцієнт підсилення схеми.

Коли фотосенсор використовується в умовах широкодіапазонної зміни освітленості, доцільно використовувати логарифмічні підсилювачі [61].

Схема логарифмічного підсилювача фотосенсора зображена на рис. 1.8. Вихідний сигнал визначається як

$$U_{out} = \frac{\Delta\psi \ln I_d}{I_0},$$

де  $\Delta\psi$  – різниця потенціалів переходу база–емітер транзистора VT1.1;  $I_0$  – темновий струм транзистора VT1.1.

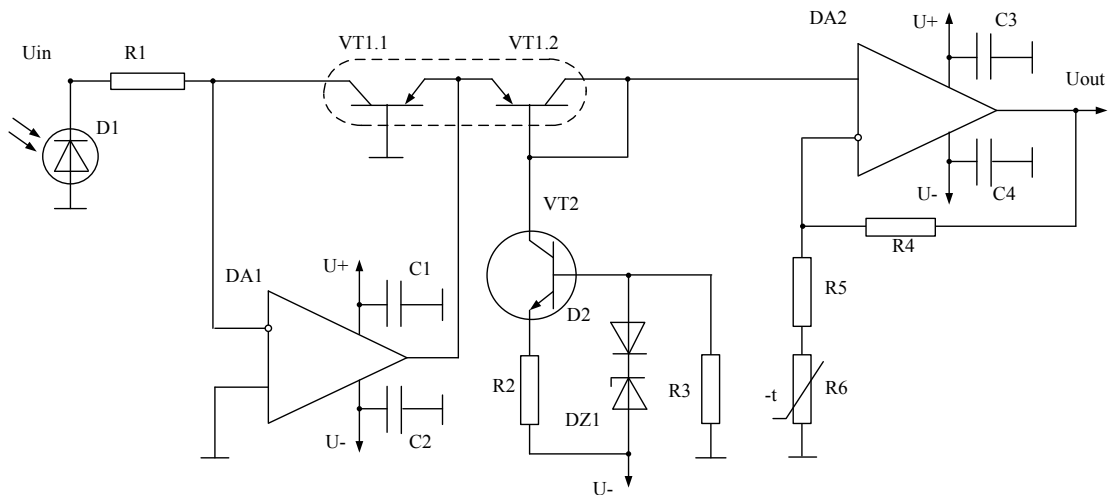


Рисунок 1.8 – Принципова схема логарифмічного підсилювача фотосигналу

Останнім часом у більшості оптронів фотоприймачами є фотодіоди. Але при великих електромагнітних завадах мають перевагу фото-



транзистори, за рахунок власного внутрішнього коефіцієнта підсилення. Оскільки швидкодія фототранзистора визначається процесами перезарядки колекторно-емітерної ємності [64], то для збільшення смуги пропускання необхідно зменшувати опір навантаження фототранзистора. Реалізація цієї умови найефективніше виконується при застосуванні ОП [65].

Таким чином, з вищесказаного випливає, що при використанні приймачів оптичного випромінювання в умовах високих електромагнітних завад виникає необхідність у створенні пристроїв підсилення слабких електричних сигналів від фотодіодів та фототранзисторів.

### **1.3 Напівпровідникові прилади для вимірювання оптичної потужності**

Як відомо, напівпровідники мають високу чутливість до оптичного впливу [2, 18]. В роботі [66] розглянуті фоточутливі прилади з інжекційним підсиленням фотоструму. Експериментальні дослідження показали, що чутливість інжекційних фотоприймачів до освітленості набагато вища, ніж у безінжекційних, тому такі фотоперетворювачі мають хороші порогові характеристики.

В сенсорі потужності оптичного випромінювання [67] з метою підвищення термостабільності джерело струму виконане у вигляді двох резисторів та двох польових і одного біполярного транзистора. Така схема дозволяє керувати струмом через фоторезистор, при чому як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення. При зміні температури напруга на фоторезисторі зменшується. Однак, враховуючи дію каналу корекції і те, що його приріст протилежні основному каналу, струм через фоторезистор збільшується і напруга залишається тієї ж величини. Температурна компенсація не буде повною, бо зміни будуть близькими, але не зовсім ідентичними навіть для однакових типів фоторезисторів.

Незмінно актуальною задачею при розробці нових напівпровідникових приладів для вимірювання оптичної потужності є забезпечення високих значень порогової чутливості [68]. Існують декілька вирішень цієї задачі, серед яких використання вихідного напівпровідникового матеріалу з максимально високим початковим часом життя неосновних носіїв заряду, оптимізація конструкції приладу і технології його виготовлення. Підвищення виявленої здатності фотоприймача може бути досягнуто також за допомогою пригнічення власного теплового випромінювання чутливого елемента і деталей приладу, що межують з ним [69–72]. Це досягається охолодженням приймача до

температури, при якій величина шуму суттєво зменшується. Крім того, охолодження малих за площею фоточутливих елементів з малою теплоємністю дозволяє попередити надмірний їхній нагрів під дією інтенсивного і тривалого опромінення [73].

В [74] пропонується отримати спрощення конструкції і зменшити час виходу напівпровідникового термостатованого фотоприймача на робочу температуру охолодження за допомогою об'єднання ТЕМ і кристала фотодіода в один прилад, в якому на зворотній стороні кристала фотодіода формується шар діелектрика з електрокомутаційними доріжками, до яких приєднані гілки термоелектричного модуля. Такий прилад дозволяє управляти часом виходу на режим охолодження термоелектричного модуля за рахунок того, що цей час залежить від товщини комутаційного шару, який в цьому випадку виконується у вигляді шару діелектрика на зворотній стороні фотоприймача.

Запропоноване технічне рішення [74] було покладено в основу створення іншої розробки, а саме – термостабілізованого кремнієвого р-і-п фотодіода зі стабілізованими значеннями густини струму шуму в діапазоні температур 20–85 °С [68]. На рис. 1.9 наведено схематичне зображення запропонованого термостатованого р-і-п фотодіода. На тильній стороні кристала фотодіода 5 розташований діелектричний шар 7, на якому сформовані електрокомутаційні доріжки 4. До них приєднані гілки термоелектричного модуля 3, які з'єднані з електрокомутаційними доріжками 11 теплопоглинаючою керамічною пластиною модуля 10, з'єднаною з цоколем приладу 12, що здійснює функцію тепловідводу. За допомогою мідно-лудних 9 і золотих 8 провідників термоелектричний модуль і фотоприймач з'єднуються з виводами приладу 1. Зібраний на цоколі прилад герметизується кришкою 2 зі скляним вхідним вікном 6.

Цей напівпровідниковий термостатований фотоприймач працює таким чином. Знаходячись в робочому режимі при зміщенні на р-п переході близько 130 В при 85 °С, він розігрівається. При відсутності спеціального охолодження його темновий струм і величина густини струму шуму збільшуються, що призводить до погіршення порогових характеристик. При включенні термоелектричного модуля через його гілки протікає електричний струм, що викликає зниження температури холодної грані модуля і зниження температури кристала фотодіода, який розташований на цій грані модуля. Завдяки малій товщині діелектричного шару на зворотній стороні фотоприймача зміна температури на ньому проходить швидко, практично одночасно з охолодженням холодних спайв модуля.

На сьогоднішній день створено напівпровідникові квантово-розмірні структури, які використовують хвильову природу носіїв заряду для отримання принципово нового класу приладів [75]. Використання польових транзисторів, в каналах яких використовується вказана особливість, є транзистори з високою рухливістю електронів (НЕМТ), гетеробіполярні транзистори та тунельно-резонансні структури. Область використання зазначених вище приладів можлива в оптоелектроніці в якості перетворювачів інфрачервоного діапазону. В роботі [76] розглянуті можливості інтеграції різних по функціональним призначенням приладів на основі гетероструктур і створення в одній епітаксильній структурі фотоприймачів та лазерних передавальних пристроїв.

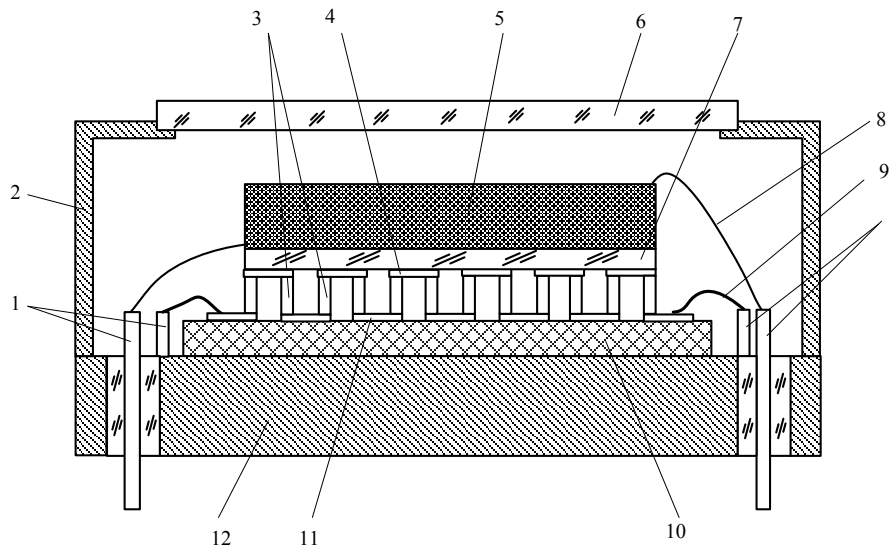


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення напівпровідникового термостатованого фотоприймача

В роботі [77] пропонується новий польовий фототранзистор, який є фоточутливим електричним приладом з трьома виводами. Фототранзистор заснований на інтегральній МДН-технології. Особливістю приладу є високий вихідний опір, що дає можливість використовувати його в якості фотосенсору. На відміну від біполярного фототранзистора, який є добре відомим приладом, польовий фототранзистор є більш сумісним з MOS VLSI технологією (Надвеликі інтегральні схеми), оскільки, по суті, він являється уніполярним приладом.

Автори публікації [78] повідомляють про першу інтеграцію резонансного тунельного діода і лазера з оптичним зв'язком, що діє на довжині хвилі близько 1,5 мкм. Показано низькочастотний бістабільний режим такого пристрою і змодельовано його електричні характерис-

тики. Резонансний тунельний діод (RTD) виступає в якості керуючого елемента по відношенню до напівпровідникового лазера. Це є новим альтернативним вирішенням в порівнянні з традиційними схемами, заснованими на транзисторному управлінні. RTD працює як керований напругою перемикач для лазера і спричиняє те, що прилад (RTD-LD) стає електрично бістабільним, роблячи його особливо придатним для цифрової модуляції «без повернення до нуля».

Концепція прямої інтеграції подана в роботі [79]. Інтегровані прилади розглядаються для формування простих приладів, що створюють нові функції. Головними приладами в оптичному зв'язку є напівпровідниковий лазер, оптичне волокно, фотодатчик. В цій роботі показаний шлях реалізації приладів для вимірювання оптичної потужності, чиї функції максимально наближені до транзистора. Вертикальна інтеграція має перевагу для обробки оптичного сигналу: вхідні світлові сигнали, що падають на одну сторону підкладки, виходять з іншої сторони підкладки. Інтегрований прилад, що складається з лавинного фотодіода і світловипромінювального діода, показує «антистоксове» перетворення оптичної довжини хвилі. Інтегрований прилад на основі фототранзистора з гетеропереходом і світловипромінювального діода показує перетворення довжини хвилі з інфрачервоного до видимого діапазону з підсиленням оптичної потужності. Коли додатний оптичний зворотний зв'язок сильно впливає на роботу приладу, виникає негативна диференціальна характеристика в вольт-амперній залежності. Функція оптичної бістабільності і автогенерації є можливим.

Двосторонні сонячні елементи, тобто прилади, які можуть приймати сонячне світло від обох поверхонь і перетворювати його ефективно в електричну потужність, були винайдені ще в 1960 р. Робота [80] відстежує перші кроки двосторонніх сонячних елементів в історії кремнієвих сонячних елементів і описує як їхній дизайн еволюціонував: від приладів з подвійним р-п переходом до приладів з одним р-п переходом, і від польової до діелектричної зовнішньої пасивації. Двосторонні елементи сприяли успіху конструкції кремнієвого сонячного елемента завдяки вирішенню двох сумнівних проблем: уникнення рекомбінації на поверхні, віддаленій від р-п переходу, і забезпечення ефективного перенесення носіїв через товщину кристалічної пластини. Ці проблеми є характерними для сьогоденних вискоефективних приладів. Японський дослідник Морі запропонував в 1960 році перший підхід до створення двосторонніх сонячних елементів, а саме: створення збираючого р-п переходу на кожній поверхні кремнієвої підкладки, формуючи, таким чином,  $p^+np^+$  структуру. Двосторонні елементи знаходять своє найбільш важливе застосування в двосторон-

## ЛІТЕРАТУРА

1. Системы функции-управления / [В. И. Архангельский, И. Н. Богаенко, Г. Г. Грабовский, Н. А. Рюмшин]. – К. : Техника, 1997. – 208 с.
2. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И Стафеев. – М. : Советское радио, 1975. – 104 с.
3. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 263 с.
4. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – Т. 1. – 475 с.
5. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – Т. 2. – 592 с.
6. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес, 2007. – Т. 3. Кн. 1. – 246 с.
7. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / [за ред. З. Ю. Готри]. – Львів : Ліга-Прес, 2007. – Т. 3. Кн. 2. – 364 с.
8. Костенко В. Л. Специализированные сети на основе твердотельных датчиков / В. Л. Костенко, С. О. Жаровцев, Г. А. Чигаев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). – 2008. – № 2. – С. 14–16.
9. Измерительные преобразователи на основе комбинированных твердотельных структур / [В. Л. Костенко, Е. Я. Швец, Е. Н. Киселёв, Н. А. Омельчук]. – Запорожье : ЗГИА, 2001. – 101 с.
10. Кошовий М. Д. Пристрої та системи для вимірювання тиску / М. Д. Кошовий, Т. Г. Рожнова // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 157–158.
11. Кухарчук В. В. Элементы теории контролю динамических параметров электрических машин / Василь Васильович Кухарчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 1998. – 125 с.
12. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем : монографія / [за ред. Я. І. Лепіха]. – Одеса : Астропринт, 2010. – 296 с.
13. Напівпровідникові оптичні та акустоелектронні сенсори і системи : монографія / [за ред. С. В. Ленкова]. – Одеса : Астропринт, 2009. – 256 с.
14. Вимірювання температури: теорія та практика / [А. Т. Луцик, О. П. Гук, О. І. Лах, Б. І. Стадник]. – Л. : Бескід БІТ, 2006. – 559 с.
15. Манойлов В. Ф. Неинвазивный метод определения вязкостных свойств крови по параметрам пульсовой волны / В. Ф. Манойлов, Т. Н. Никитчук // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии : Ма-

тер. 15-й международной Крымской конференции, 12–16 сентября 2005 г. – Севастополь, 2005. – Т. 2. – С. 902–903.

16. Скрипник Ю. О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону / Ю. О. Скрипник, В. Ф. Манойлов, О. П. Яненко. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 374 с.

17. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2001. – 195 с.

18. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / Владимир Степанович Осадчук. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.

19. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2003. – 208 с.

20. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 1999. – 275 с.

21. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2005. – 207 с.

22. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2007. – 162 с.

23. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2009. – 184 с.

24. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением / Александр Владимирович Осадчук. – Вінниця : Континент, 1998. – 129 с.

25. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Олександр Володимирович Осадчук. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2000. – 302 с.

26. Поджаренко В. О. Оцінка статистичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук // Вісник державного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – № 420. – С. 37–47.

27. Інтелектуальні сенсори: особливості та проблеми проектування / В. О. Романов, В. М. Груша, Д. М. Артеменко [та ін.] // Комп'ют. засоби, мережі та системи : зб. наук. пр. – 2008. – № 7. – С. 146–152.

28. Морозовская А. Н. Наноразмерность материалов в современных микросистемных технологиях / А. Н. Морозовская, Г. С. Свечников // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2010. – Т. 1 (7), – № 3. – С. 14–26.

29. Головки Д. Б. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин: навч. посіб. для студ. техн. спец. вищ. навч. закл. / Д. Б. Головки, Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко. – К. : Либідь, 2004. – 328 с.
30. Шарапов В. М. Преобразователи с пьезотрансформаторами в схемах электрических фильтров верхней частоты / В. М. Шарапов, В. В. Туз, Ж. В. Сотула и др. / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – № 2. – С. 96–99.
31. Шарапов В. М. Пьезоэлектрический преобразователь механических величин с пьезоэлементом в схеме фильтра нижних частот / В. М. Шарапов, Р. В. Трёмбовецкая / Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 1. – С. 86–89.
32. Шварц Ю. М. Микроэлектронные термодиодные сенсоры и их применение в экстремальной электронике / Ю. М. Шварц, М. М. Шварц / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 3. – С. 30–33.
33. Иващенко А. Н. Аппроксимация термометрических характеристик кремниевых диодных сенсоров температуры / А. Н. Иващенко, Ю. М. Шварц / Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 2003. – Вып. 38. – С. 61–70.
34. Аш Ж. Датчики измерительных систем: в 2 т. / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – Т1. – 424 с.
35. Бутурлин А. И. Микроэлектронные датчики влажности : Сборник обзоров / А. И. Бутурлин, С. А. Крутоверцев, Ю. Д. Чистяков // Зарубежная электроника. – 1984. – № 9. – С. 3–54.
36. Бусурин В. И. Интегрированный преобразователь давления и температуры на основе оптического туннельного эффекта / В. И. Бусурин, К. В. Шток // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 2. – С. 68–73.
37. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб – М. : Мир, 1989. – 196 с.
38. Галушков А. И. Микросистема для прецизионного измерения индукции магнитного поля / А. И. Галушков, М. О. Рапидов / Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Датчик 2002 : XIV научно-технической конференция с участием зарубежных специалистов: тезисы докладов. – М., 2002. – С. 155.
39. Касимов Ф. Д. Магнитокоммутируемая микросхема и датчик измерения скорости ветра на ее основе / Ф. Д. Касимов, Р. А. Ибрагимов, Н. М. Свихнушин / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 2. – С. 21–24.
40. Касимов Ф. Д. Микроэлектронные преобразователи на основе негатронных элементов и устройств / Ф. Д. Касимов, Я. Ю. Гусинов, О. Н. Негоденко, К. Е. Румянцев. – Баку : ЭЛМ, 2001. – 236 с.

41. Пат. 2002017607 США, МКИ G 01J 5/00. Domain engineered ferroelectric optical radiation detector having multiple domain regions for acoustic dampening / Lehman J. H., Aust J. A. (США). – № 0849959 ; заявл. 04.05.2001 ; опубл. 14.02.2002. – 19 с.
42. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников. – М. : Энергия, 1970. – 424 с.
43. Поляков Ю. А. Синтез и оптимизация газовых сенсоров раннего обнаружения малых концентраций водорода / Ю. А. Поляков, А. Е. Иванов, Д. Г. Кабанов // Технологии техносферной безопасности. – 2010. – № 4 (32).
44. Конструктивно-технологическая оптимизация интегральных преобразователей физических величин / В. В. Амеличев, А. Ю. Павлов, А. И. Погалов, Ю. А. Чаплыгин / Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 3. – С. 14–17.
45. Філінюк М. А. Аналіз впливу зворотнього зв'язку на параметри негatronу в польовому транзисторі / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 6. – С. 94–97.
46. Філінюк Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника» / Николай Антонович Філінюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 3. – С. 38–43.
47. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної індуктивності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 2. – С. 44–46.
48. Геролд Г. Современные интеллектуальные измерительные преобразователи / Г. Геролд // Экспресс-информация: Контрольно-измерительная техника. – М. : ВИНТИ, – 1990. – № 28. – С. 1–8.
49. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // Приборы и системы управления. – 1996. – № 11. – С. 24–27.
50. Физика твердого тела: энциклопедический словарь: в 2 т. / под ред. В. Г. Барьяхтара ; Национальная академия наук Украины. – К. : Наукова думка, 1998. – 648 с.
51. Литвин І. С. Інформація на виробництві та в управлінні // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон, 1998. – № 2 (3). – С. 151–155.
52. Литвин І. С. Оптоелектронні перетворювачі для попередньої обробки інформації в системах управління // Вісн. Держ. ун-ту «Львівська політехніка». – 1998. – № 325. – С. 97–100.



53. Литвин І. С. Вплив первинних перетворювачів оптичного випромінювання та їх характеристик на ефективність обробки зображень // Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2007. – № 581. – С. 64–70.
54. Грязин Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства. – Л. : Машиностроение, 1988. – 218 с.
55. Техническое зрение роботов / В. И. Мошкин, А. А. Петров, В. С. Титов и др. ; под общ. ред. Ю. Г. Якушенкова. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
56. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигналов на приборах с зарядовой связью / Ф. П. Пресс. – М. : Радио и связь, 1978. – 136 с.
57. Физические основы создания многоэлементных полупроводниковых приемников излучения / В. В. Данилов, В. В. Жук, А. Ю. Липинский, А. Н. Рудякова // Вісник Донецького університету. Природничі науки, – 2005. – Вип. 2. – С. 135–156.
58. Шевцов Э. А. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи / Э. А. Шевцов, М. Е. Белкин. – М. : Радио и связь, – 1992. – 234 с.
59. Аксененко М. Д. Микроэлектронные фотоприемные устройства / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников, О. В. Смолин. – М. : Энергоатомиздат. – 1984. – 208 с.
60. Интегральные схемы на МДП-приборах / под ред. У. Пеннея ; пер. с англ. под ред. Кармазинского Н. М. – М. : Мир. – 1975. – 527 с.
61. А. Г. Швец. Некоторые аспекты схемотехники оптикоэлектронных сенсоров / А. Г. Швец, И. М. Паренко // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2006. – № 4. – С. 24–27.
62. У. Томпкинс. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC / У. Томпкинс, Дж. Уэбстер. – М. : Мир, 1992. – 592 с.
63. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. – М. : Радио и связь, 1992. – 400 с.
64. У. Тсанг. Техника оптической связи : Фотоприемники / : У. Тсанг. – М. : Мир, 1988. – 526 с.
65. Достал И. Операционные усилители. / И. Достал. – М. : Мир, 1982 – 512 с.
66. Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики : физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
67. А. с. 911173 СССР, МКИ G 01J 1/44. Фотодатчик / В. М. Гладаревский, Я. А. Вакулюк, И. К. Дзус, М. И. Коновал – № 2947257/18-25 ; заявл. 27.06.80 ; опубл. 07.03.82, Бюл. № 9. – 3 с.

68. Добровольский Ю. Г. Кремниевый термостатический p-i-n фотодиод / Ю. Г. Добровольский // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2003. – № 4. – С. 39–41.
69. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства : справочник / Л. И. Анатычук. – Киев: Наук. думка, 1979. – 176 с.
70. Оптимизация надежности кремниевых p-i-n фотодиодов по температурному току / А. А. Ащеулов, В. Н. Годованюк, Ю. Г. Добровольский [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 1999. – № 1. – С. 35–38.
71. Вайнер А. Л. Совмещенные приборы крио-термоэлектрической электроники / А. Л. Вайнер, В. Ф. Моисеев. – Одесса: Негоциант, 2000. – 203 с.
72. Охладители Пельте повышенной надежности для фотоприемников / А. А. Ащеулов, И. С. Романюк, Ю. Г. Добровольский [и др.] // *Прикладная физика*. – 2003. Вып. 2. – С. 114–117.
73. Пат. 39347А УКРАЇНА, МПК 6 H01L 31/06. Фотоэлектричний приймач лазерного випромінювання / А. А. Ащеулов, Ю. Г. Добровольський, І. С. Романюк, заявник та патентовласник Чернів. держ. унів. ім. Ю. Федьковича. – № 2000052887 ; заявл. 22.05.2000 ; опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5.
74. Пат. 87584 УКРАЇНА, МКІ G 01 J 1/44. Мікроелектронний сенсор оптичної потужності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № а200712812 ; заявл. 19.11.2007 ; опубл. 27.07.2009 ; Бюл. № 14.
75. Долманов И. Н. Полупроводниковые приборы с резонансным туннелированием электронов / И. Н. Долманов, В. И. Толстыхин, В. Г. Еленский / *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1990. – № 7. – С. 66–89.
76. McKinnon W. R., Hurd C. M. Conduction in illuminated GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures // *J. Appl. Phys.* – 1987. – V. 61, № 6. – P. 2250–2256.
77. Патент США № 5939742, МПК5 H01L 31/062. Field-effect phototransistor / Aristides A. Yiannoulos. – № 08/798327 ; заявл. 10.02.1997 ; опубл. 17.08.1999.
78. Integration of a Resonant Tunneling Diode and an Optical Communications Laser / Slight T. J., Ironside C. N., Stanley C. R. [та інш.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2006. – V. 18. № 14. – P. 1518–1520.
79. Sasaki A. Optoelectronic integrated devices. Part 1. Principle, technology and applications / A. Sasaki // *Opto-Electr. Rev.* – 1996. – V.4. № 1/2 – P.1–12.
80. Andrés Cuevas. The early history of bifacial solar cells / Andrés Cuevas // *Proc. 14<sup>th</sup> Photovoltaic Science and Engineering Conf., Bangkok*, – 2004. – P. 719–722.

81. Hunter Fanney A. Building integrated photovoltaic test facility/ Hunter Fanney A., Dougherty Brian P. // International Solar Energy Conference, Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy (Madison, Wisconsin, USA). – 2000. – P. 1–9.

82. Smestad G. Luminescence and current-voltage characteristics of solar cells and optoelectronic devices / Smestad G., Ries H. // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 1992. – V. 25. – P. 51–71.

83. Пат. 36423 УКРАЇНА, МКІ 6 G01J 5/24. Фотоприймальний пристрій / О. Б. Шевчук, заявник та патентовласник Укр. держ. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. – № 99126859 ; заявл. 16.12.1999 ; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3.

84. Пат. 85367 УКРАЇНА, МПК 6 H01G 9/20. Фоточутливий пристрій / Ю. Ю. Бачеріков, заявник та патентовласник Інст. фізики напівпров. ім. В. С. Лашкарьова НАНУ. – № 2004032273 ; заявл. 29.03.2004 ; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2.

85. Пат. 2368926 РФ, МПК G02F 1/015. Полупроводниковый преобразователь оптического излучения / А. Ф. Монахов, А. А. Монахов, заявитель и патентообладатель А. Ф. Монахов, А. А. Монахов. – № 2007108897/28 ; заявл. 12.03.2007 ; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27.

86. Пат. 2296303 РФ, МПК G01J 1/44. Photoreceiver / А. Н. Червяков, Ю. И. Зеленюк, Л. Н. Костяшкин, В. П. Семенов, С. Ф. Стрепетов, заявитель и патентообладатель Федер. гос. унит. предпр. «Гос. Рязанский приборн. завод». – № 2005134336/28 ; заявл. 07.11.2005 ; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9.

87. Пат. 2244365 РФ, МПК H01L 31/09. Фотоприемное устройство / А. В. Гусаров, Е. Б. Володин, И. Ю. Ларцев, О. В. Смолин, Е. В. Сусов, заявитель и патентообладатель Федер. гос. унит. предпр. «Альфа». – № 2003135570/28 ; заявл. 09.12.2003 ; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.

88. Ковтонюк Н. Ф. Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображения / Н. Ф. Ковтонюк, Е. Н. Сальников. – М. : Радио и связь, 1990. – 160 с.

89. Костенко В. Л. МДП-фототранзистор с непрозрачным затвором / В. Л. Костенко, Е. Н. Киселев // Волоконно-оптические линии связи и системы передачи информации : VI Междунар. н.-т. конф. : тез. докл. – Запорожье, 1995. – С. 48–49.

90. Пат. 40236 УКРАЇНА, МКІ G 01K 7/01. Мікроелектронний вимірювач температури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, заявник та патентовласник Він. нац. техн. унів. – № 2000106038 ; заявл. 26.10.2000 ; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.

91. Гольдман В. С. Индуктивно-частотные преобразователи неэлектрических величин / В. С. Гольдман. – М. : Энергия, 1968. – 96 с.

92. Алимпиев В. Н. Об индуктивных свойствах квазимонополярных полупроводников / В. Н. Алимпиев, Л. И. Баранов // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, № 12. – 256 с.

93. Носов Ю. Р. Фотоприемники в оптоэлектронике / Ю. Р. Носов. – М. : ЦНИИ «Электроника», 1986. – С. 24–42.

94. Викулин И. М. Фотоприемники на однопереходном транзисторе / И. М. Викулин [и др.] // Приборы и техн. эксперимента. – 1973. – № 3. – С. 7–20.

95. Бабичев Г. Г. Преобразователь давления с частотным выходом на основе однопереходных тензотранзисторов / Г. Г. Бабичев [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 3. – С. 48–51.

96. Викулин И. М. Фотоприемник на основе однопереходного и полевого фототранзисторов / И. М. Викулин, Ш. Д. Курмашев, В. А. Мингалев // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. – 2006. – № 4. – С. 28–30.

97. Викулин И. М. Многофункциональный сенсор с цифровой индикацией / И. М. Викулин, С. В. Ильин, В. А. Мингалев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 6. – С. 46–47.

98. Sun H. J. Photoeffect in common-source and common-drain GaAs MESFET oscillator / H. J. Sun, P. J. Gutmann, J. M. Borrego // Solid-State Electron. – 1981. – V. 24 – P. 935.

99. Lorigou B. Optical frequency modulated GaAs oscillator / B. Lorigou, J. Guena, J. F. Sautereau // Electronics Letters. – 1981. – Т. 24, № 24. – P. 901–902.

100. Пат. 40903 УКРАЇНА, МКИ G 01R 27/26. Фоточутливий гіраторний вимірювальний перетворювач / П. А. Молчанов, А. В. Бурехін, П. С. Муляр, заявник та патентовласник Він. нац. техн. унів. – № 2000105974 ; заявл. 23.10.2000 ; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7.

101. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / под ред. Дж. Кисса. – М. : Радио и связь, 1985. – 325 с.

102. Кнаб О. Д. Эффект фотостимулированной генерации колебаний тока в полупроводниковой структуре / О. Д. Кнаб, В. Д. Фролов // Письма в ЖТФ. – 1983. – Т. 5, № 5. – С. 244–246.

103. Малахов Б. А. К вопросу об эффекте фотостимулированной генерации колебаний тока в полупроводниковой структуре / Б. А. Малахов, Г. В. Степанов // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39, № 3. – С. 138–140.

104. Исследование возможности создания оптогенераторов на основе эффективности фотостимулирования колебаний тока в полупроводниковых структурах : Научно-технический отчет. – М., 1985.

105. Иллис Б. Г. Инжекционная неустойчивость в полупроводниковых структурах с p-n переходом / Б. Г. Иллис, О. Д. Кнаб, В. Д. Фролов //

IX Всесоюзная конференция по физике полупроводников : тезисы докладов. – Кишинев, 1988. – Ч. 1. – С. 111–112.

106. Исследование возможности создания новых типов фотоприемников и оптронов на основе эффективности фотостимулирования колебаний тока в полупроводниковых структурах : Научно-технический отчет. – М., – 1985.

107. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы : теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб; под ред. М. М. Колтуна. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

108. Агейкин Д. И. Датчики на основе технологии микроэлектроники / Д. И. Агейкин, Д. С. Тухачев // Приборы и системы управления. – 1983. – № 10. – С. 43–44.

109. Верещагин И. К. Введение в оптоэлектронику / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Кокин. – М. : Высшая школа, 1991. – 191 с.

110. Зуев В. А. Фотоэлектрические МДП-приборы / В. А. Зуев, В. Г. Попов. – М. : Радио и связь. – 1983. – 160 с.

111. А. с. N 862753 (СССР). М. кл<sup>3</sup>. Н 01 L 31/10. Фототранзистор / Костенко В. Л., Клименко В. А. – Заяв. 5.07.81 г.

112. Okatoto K. Photocurrent and spectral characteristics of field induced junctions / K. Okatoto // Sol. St. Elect., 1974, – V.17, № 11. – P. 1155–1161.

113. Salles A. A. Optical control of GaAs MESFET's / A. A. Salles // IEEE Trans on Microwave Theory and Techn. – 1983. – V. 31, № 10. – P. 812–820.

114. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. Кн. 2 / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 456 с.

115. Jakubowski A. Subthreshold range of MIS transistor under illumination conditions / A. Jakubowski, S. Krawczyk // Bullet. De l'academie Polonaise des sciences. – 1978. – V. 26, № 10. – P. 921–927.

116. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов / Р. Кобболд. – Л. : Энергия, 1975. – 304 с.

117. Гусев В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. школа, 1982. – 495 с.

118. Дулин В. Н. Электронные и квантовые приборы / В. Н. Дулин. – М. : Энергия, 1972. – 220 с.

119. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – Вып. 2: Модели компонент аналоговых устройств. – 72 с.

120. Mathew X. Photovoltaics, Solar Energy Materials / X. Mathew // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2009. – № 1. – С. 1.

121. Ферри Д. Электроника ультрабольших интегральных схем / Д. Ферри, Л. Эйкерс, Э. Гринич. – М. : Мир, 1991. – 327 с.

122. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем: Учебное пособие для вузов / А. С. Березин, О. Р. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1992. – 320 с.
123. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л. А. Коледов. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
124. Chu F. Chemische Sensoren : Grundlagen, Trends und Anwendungen / F. Chu, K. Zucholl // Technische Rundschau. – 1988. – № 42. – P. 154–159.
125. Сысоева С. Актуальные технологии и применение датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 1. Новые технологии и применение датчиков автомобильных систем помощи водителю / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 8.
126. Корнеев В. В., Киселев А. В. Современные микропроцессоры / В. В. Корнеев, А. В. Киселев. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 448 с.
127. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.
128. Сысоева С. Датчики. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Часть 3. Элементная база датчиков света и цвета / С. Сысоева // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
129. Шалимов Ю. Н. Современная альтернативная энергетика с точки зрения экономики и экологии / Ю. Н. Шалимов, А. Л. Гусев, Г. А. Мхиторян, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 10. – С. 114–139.
130. Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебное пособие / [под. ред. В. Ф. Нефедова] – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.
131. Кукуш В. Д. Электрорадиоизмерения : учеб. пособие для вузов / В. Д. Кукуш. – М. : Радио и связь, 1985. – 368 с.
132. USB-частотомір / О. В. Осадчук, С. В. Барабан, О. С. Звягін, Р. В. Криночкін // Матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції "Дні науки - 2010" : міжнар. наук.-тех. конф., Прага 27 бер. – 5 квітня. 2010 р. : тези доповіді. – 2010. – С. 32–34.
133. Метрологія та вимірювальна техніка / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, В. П. Долгополов, Л. В. Грумінська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.
134. Пождаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка / В. О. Пождаренко, В. В. Кухарчук. – Київ : НМК ВО, 1991 – 240 с.

135. Шагурин Н. Н. Микропроцессоры и микроконтроллеры фирмы Motorola: Справочное пособие / Н. Н. Шагурин. – М. : Радио и связь, 1998. – 560 с.
136. Гринфилд Дж. Транзисторы и линейный ИС / Дж. Гринфилд. – М. : Мир, 1992. – 545 с.
137. Электрические измерения: учебник для вузов. / под. ред. А. В. Фремке. – 4-е изд. – М. : Энергия, 1973. – 474 с.
138. Осадчук В. С. Фотореактивный эффект в МДН-транзисторных структурах з двостороннім освітленням каналу / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 4. – С. 92–98.
139. Осадчук В. С. Вольт-амперна характеристика радіовимірювального оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4. – С. 85–89.
140. Осадчук В. С. Розробка математичної моделі мікроелектронного перетворювача оптичного випромінювання / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1(15). – С. 160–170.
141. Осадчук В. С. Мікроелектронний частотний перетворювач густини оптичної потужності з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – № 2(20). – С. 210–218.
142. Осадчук В. С. Визначення вольт-амперної характеристики оптичного перетворювача на основі МДН-транзисторної структури з від'ємним опором та з активним індуктивним елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 3. – С. 166–171.
143. Осадчук В. С. Мікроелектронний перетворювач густини оптичної потужності на основі кремнієвих сонячних елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 151–157.
144. Пат. 31974 УКРАЇНА, МКІ G 01 J 1/44. Мікроелектронний вимірювач оптичного випромінювання / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200714925 ; заявл. 27.12.2007 ; опубл. 25.04.2008 ; Бюл. № 8.
145. Пат. 30180 УКРАЇНА, МКІ G 01 J 1/44. Мікроелектронний пристрій для виміру оптичної потужності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № 200712810 ; заявл. 19.11.2007 ; опубл. 11.02.2008 ; Бюл. № 3.

146. Пат. 31603 УКРАЇНА, МКІ G 01 J 1/44. Мікроелектронний пристрій для виміру оптичного випромінювання / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, С. В. Барабан, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200714881 ; заявл. 27.12.2007 ; опубл. 10.04.2008 ; Бюл. № 7.

147. Пат. 42210 УКРАЇНА, МКІ G 01 J 1/44. Транзисторний фоточутливий сенсор з двостороннім освітленням каналу / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200900890 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 25.06.2009 ; Бюл. № 12.

148. Пат. 42207 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 27/00, G 01 J 1/44. Мікроелектронний сенсор оптичного випромінювання на основі транзисторної фоточутливої структури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. - № u200900878 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 25.06.2009 ; Бюл. № 12.

149. Пат. 92244 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 27/00, G 01 J 1/44. Пристрій для вимірювання оптичного випромінювання з активним індуктивним фоточутливим елементом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № a200900876 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 11.10.2010 ; Бюл. № 19.

150. Пат. 42205 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 27/00, G 01 J 1/44. Мікроелектронний сенсор оптичної потужності з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200900874 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 25.06.2009 ; Бюл. № 12.

151. Пат. 42212 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 27/00, G 01 J 1/44. Пристрій для вимірювання оптичної потужності з частотним виходом на основі фоточутливих транзисторів/ В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200900893 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 25.06.2009 ; Бюл. № 12.

152. Пат. 42211 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 27/00, G 01 J 1/44. Мікроелектронний вимірювач оптичного випромінювання з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u200900892 ; заявл. 06.02.2009 ; опубл. 25.06.2009 ; Бюл. № 12.

153. Пат. 55474 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 27/00, G 01 J 1/44. Мікроелектронний частотний сенсор оптичної потужності / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, заявник та патентовласник Вінн. нац. техн. ун-т. – № u201008378 ; заявл. 05.07.2010 ; опубл. 10.12.2010 ; Бюл. № 23.



*Наукове видання*

**Осадчук Володимир Степанович  
Осадчук Олександр Володимирович  
Жагловська Олена Миколаївна**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПОТУЖНОСТІ ОПТИЧНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. В. Осадчуком

Підписано до друку 14.01.2016 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 9,7.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-03

Вінницький національний технічний університет,

КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

**publish.vntu.edu.ua**; *email*: [kivc.vntu@gmail.com](mailto:kivc.vntu@gmail.com).

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.