

КОЛЬОРОДЕТЕКТУЮЧИЙ ФОТОПРИЙМАЧ НА ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ $p(\text{Cu}_2\text{O})-n(\text{CdS})$ З РЕГУЛЬОВАНОЮ СПЕКТРАЛЬНО-КООРДИНАТНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ

Розглянуті можливості сполучення кольоророзрізнення та спектрально-координатної чутливості в одному фотоприймальному пристрої. Описаний тонкоплівковий фотогетерорезистор (ФГР) з симетричною 3-шаровою структурою на основі гетеропереходу $p(\text{Cu}_2\text{O})-n(\text{CdS})$, який забезпечує спектральну чутливість у червоній та зеленій областях власної фотопровідності напівпровідників. Наведені конструкційна та технологічна схеми виготовлення ФГР. Розроблена схема включення та еквівалентна схема ФГР з урахуванням його розподілених параметрів. Одержані аналітичні вирази контурних струмів еквівалентної схеми, за допомогою яких пояснюється принцип багатофункціональної дії пристрою.

Напрямок по створенню та дослідженню фотоприймачів (ФП), здібних проводити обробку інформації про колір в одному пристрої та одному каналі, є актуальним. Необхідність у таких приладах пов'язана з розвитком техніки телевізювання та кольорового телебачення, де потребують вирішення питання кольороподілу та сполучення зображень.

Ідея створення багатоспектрального ФП, чутливого в області видимого та інфрачервоного спектра, належить Г. Герхарду. Прилад складається з бездомішкового фотодіода та домішкового фоторезистора, створених на одній кремнієвій підкладці та чутливих у двох різних областях спектра. Таким чином, сформовано двоспектральний матричний ФП.

Раніше повідомлялось про можливість створення двоколірної системи виявлення, яка складається з InAs-фотодіода, розміщеного за платівкою GaAs, оптично прозорою в області спектра 1—5 мкм.

Існує функціональний ФП, який дозволяє визначати координату світлового зонда за відомим функціональним законом розташування електродів [1]. Дія його заснована на явищі повздовжнього або бокового фотоефекту, що виникає при нерівномірному освітленні гетеропереходу. Проте, цей фоторезистор не можливо використовувати у схемах кольоророзрізнення та кольоророзрізнення, а застосування його у якості координатно-чутливого датчика обмежено необхідністю гострого фокусування світлової плями.

Найбільш близьке технічне рішення міститься у ФП, що складається з гетеропереходу між шарами p - та n -типу провідності з омичними контактами по одному до кожного із шарів [2]. Позиційно-чутливий гетерофотоелемент $n\text{-Si-}p\text{-Ge}$ [3] виявляє лінійне зміщення світлового променя $\sim 100 \text{ \AA}$ і кутове зміщення джерела на $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ градусів. Однак, цей ФП не здібний сполучати властивості кольоророзрізнення та спектрально-координатної чутливості.

Метою дослідження є розширення функціональних можливостей приладу, зокрема, поєд-

нання кольоророзрізнення та регулювання спектральної чутливості в одному пристрої.

Розрізнення кольорів в існуючих системах засновано на двох принципах:

1. Розрізнення кольорів за допомогою одного ФП, що володіє спектральною чутливістю в області довжин хвиль відповідних кольорів. Сигнал з ФП знімається в момент освітлення крізь відомий світлофільтр, що вирізає потрібну ділянку області спектра.

2. Застосування двох або декількох ФП, кожний з котрих чутливий у визначеній області спектра, в якій фіксується корисний сигнал з відповідного приймача.

У ФП, що пропонується, об'єднуються обидва принципи. Він являє собою багат шаровий плівковий фотогетерорезистор (ФГР), в якому верхні шари напівпровідника чутливі у короткохвильовій області спектра (зеленій), а нижні — у довгохвильовій області (червоній). Причому верхні шари структури по відношенню до нижніх виконують роль оптичного фільтра. За допомогою спеціальних схем включення ФГР здійснюється розрізнення кольорів за поляриністю сигналу ФП.

Поставлена мета досягнута у ФП з симетричною 3-шаровою структурою, зображеною на рис. 1. На скляну підкладку 1 нанесено шари 2 та 4 широкозонного напівпровідника — CdS, матеріалу n -типу провідності з шириною забороненої зони 2,4 еВ. Між ними створений шар 3 вузькозонного напівпровідника — Cu_2O , матеріалу p -типу провідності з шириною забороненої зони 2,0 еВ. До шарів напівпровідників 2—4 виконані омичні контакти 5. Між шарами напівпровідників утворюються гетеропереходи $n-p-n$ -типу.

Чутливість CdS у зеленій області спектра, а Cu_2O — у червоній області надає ФП на їх основі здатності розрізняти та детектувати зелені та червоний кольори.

Зразки ФП виготовлялись методом термічного випарювання напівпровідникових речовин у вакуумі $\sim 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Товщина зовнішніх шарів CdS обрана однаковою, у межах 1—4 мкм,

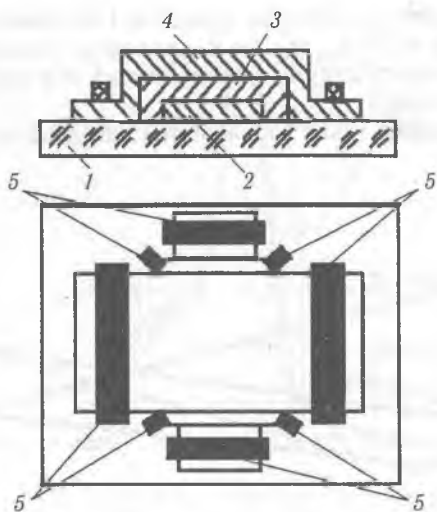


Рис. 1. Схематична конструкція ФП

що забезпечує їм найбільшу фоточутливість. Середній шар Cu_2O має товщину на порядок менше — 0,1—0,2 мкм. Це дає можливість неосновним носіям заряду долати його практично без рекомбінації.

Виконання приладу на прозорій підкладці дозволяє освітлювати його з боку як першого, так і другого широкозонного шару. Симетричність структури дає можливість використовувати прилад у різних схемах порівняння.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) приладу вздовж и впоперек структури ФГР лінійні (рис. 2). Найбільшою фоточутливістю володіють

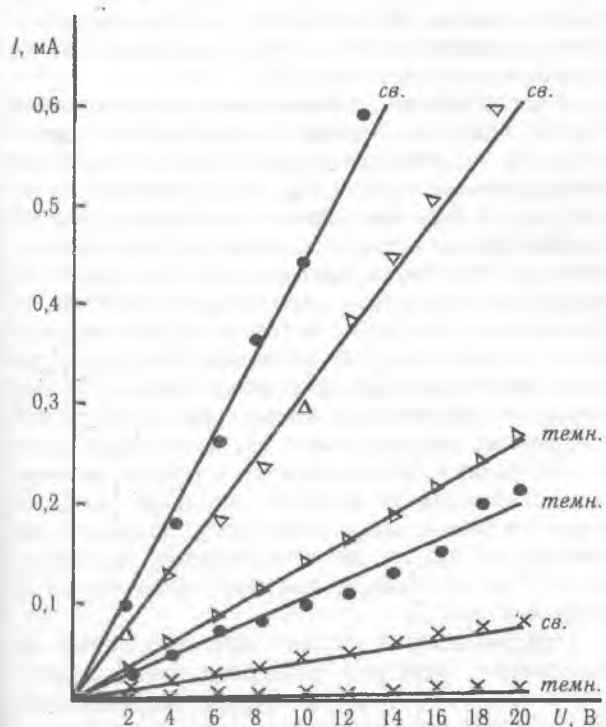


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики ФГР:

- — уздовж верхнього шару CdS;
- × — уздовж нижнього шару CdS;
- Δ — поперек структури

верхній шар CdS або перехід $\text{CdS}-\text{Cu}_2\text{O}-\text{CdS}$. Пояснюється це розподіленими параметрами ФГР, величина котрих залежить від технології напilenня та термообробки шарів.

Відомо, що орієнтація кристалітів відносно підкладки в значній мірі визначає поперечний та поздовжній опір шарів. При наявності орієнтованих перпендикулярно площині підкладки кристалітів темновий опір верхнього шару CdS складає десятки кілоом, а нижнього шару і поперечний опір — сотні кілоом. Відповідно, при освітленні з боку верхнього шару CdS його опір зменшується удвоє, а нижнього шару і поперечний опір — на порядок. Коли ж кристаліти у шарах роз'орієнтовані, то при тому ж порядку темнових опорів фоточутливість нижнього шару та переходу значно менші.

У першому випадку питома чутливість шарів CdS порядку десятків $\text{мкА/лм}\cdot\text{В}$, а поперечного переходу $\sim 1000 \text{ мкА/лм}\cdot\text{В}$. У другому випадку вона досягає 20 $\text{мкА/лм}\cdot\text{В}$.

Люкс-амперні характеристики ФГР у різних напрямках структури мають лінійний характер при малих рівнях освітленості. Ділянки насичення фотоструму у діапазоні досліджених інтенсивностей не спостерігались.

Спектральні характеристики ФГР вимірні при включенні приладу у спеціальну схему (рис. 3), в якій R_k — керувальний опір, R_n — опір навантаження, з котрого знімається сигнал, С — розділовий конденсатор, ПР — поляризоване реле. Виводи нижнього шару з'єднані між собою.

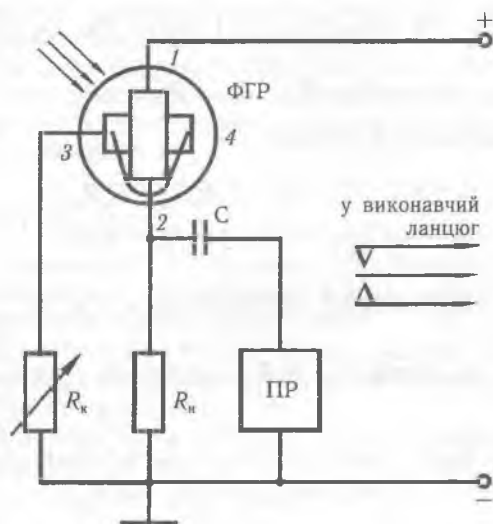


Рис. 3. Схема включення ФГР

Попередня настройка схеми передбачає регулювання R_k з метою компенсації струму у ланцюгу R_n у темряві і при освітленні.

Оскільки ФП володіє деякою кінцевою площею, принцип його роботи можливо пояснити за допомогою еквівалентної схеми, що урахує розподілені параметри ФГР та елементи схеми включення. Найпростіша еквівалентна схема ФП показана на рис. 4.

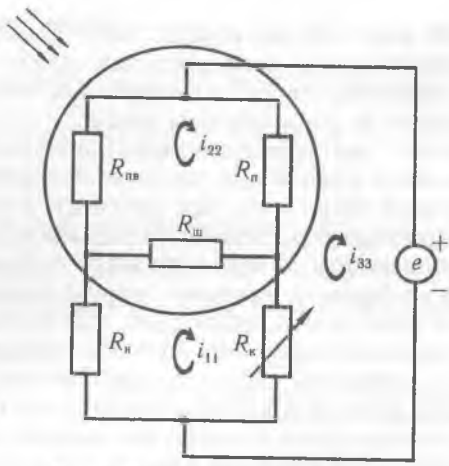


Рис. 4. Еквівалентна схема ФГР

Схема складається з $R_{пв}$ — поздовжнього опору ФП уздовж верхнього шару CdS, $R_н$ — поперечного опору ФП поблизу позитивного електрода, $R_ш$ — поперечного опору ФП поблизу негативного електрода, e — джерела живлення схеми.

Матриця контурних струмів такої схеми має вид:

$$i_{11}R_{11} + i_{22}R_{12} + i_{33}R_{13} = e_{11};$$

$$i_{11}R_{21} + i_{22}R_{22} + i_{33}R_{23} = e_{22};$$

$$i_{11}R_{31} + i_{22}R_{32} + i_{33}R_{33} = e_{33},$$

де

$$R_{11} = R_к + R_ш + R_н; \quad R_{12} = R_{21} = -R_ш; \quad e_{11} = e_{22} = 0;$$

$$R_{22} = R_н + R_{пв} + R_ш; \quad R_{13} = R_{31} = -R_н; \quad e_{33} = e;$$

$$R_{33} = R_к + R_{пв}; \quad R_{23} = R_{32} = -R_{пв}.$$

Визначники системи:

$$\Delta = R_н(R_кR_{пв} + R_кR_ш + R_нR_ш + R_кR_{пв}) + R_{пв}(R_кR_н + R_кR_ш + R_нR_ш + R_нR_н);$$

$$\Delta_{11} = e(R_шR_{пв} + R_нR_н + R_нR_{пв} + R_нR_ш);$$

$$\Delta_{22} = e(R_шR_н + R_кR_{пв} + R_нR_{пв} + R_шR_{пв});$$

$$\Delta_{33} = e(R_кR_{пв} + R_кR_н + R_кR_ш + R_нR_н + R_шR_{пв} + R_нR_ш + R_шR_н + R_нR_{пв}).$$

Струм через опір навантаження

$$i_{R_н} = \frac{\Delta_{33} - \Delta_{11}}{\Delta}$$

або

$$i_{R_н} = \frac{R_кR_н + R_кR_{пв} + R_кR_ш + R_нR_ш}{R_н(R_кR_н + R_кR_ш + R_нR_ш + R_нR_{пв}) + R_{пв}(R_кR_н + R_кR_ш + R_нR_ш + R_нR_н)} \dots \rightarrow$$

$$\leftarrow \dots \frac{R_кR_н + R_кR_{пв} + R_кR_ш + R_нR_ш}{R_н(R_кR_н + R_кR_ш + R_нR_ш + R_нR_{пв})}.$$

Задаючи значення темнових і світлових параметрів ФГР $R_н$, $R_ш$ та $R_{пв}$ можливо розрахувати залежності струму навантаження від керувального опору.

Графіки таких залежностей наведені на рис. 5.

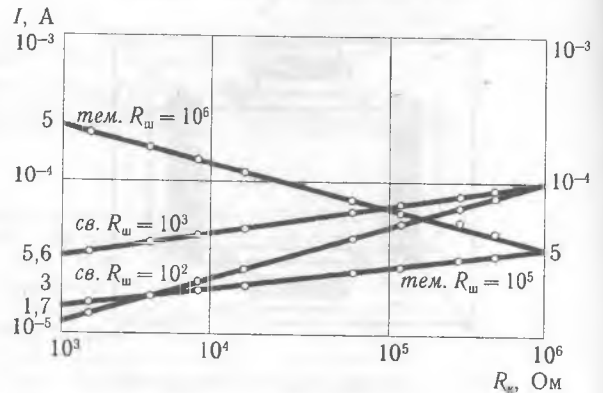


Рис. 5. Залежність струму через $R_н$ від $R_к$

Із них видно, що криві світлових та темнових струмів перехрещуються при деяких значеннях $R_к$, котрі залежать від інтенсивності освітлення, спектрального складу і координати світлової плями на робочій площині приладу.

Виходячи з еквівалентної схеми, принцип роботи ФГР пояснюється таким чином.

Випромінювання з довжиною хвилі менш λ_0 , яка відповідає темновому струму через $R_н$, поглинається у широкозонному напівпровідникові, верхньому шарі CdS, не доходячи до нижніх шарів, і зменшує переважно $R_{пв}$. При цьому струм через $R_н$ збільшується. Більш довгохвильове, ніж λ_0 , випромінювання поглинається у нижніх шарах і зменшує $R_ш$, що приводить до зменшення струму через $R_н$.

Аналогічну дію учиняє переміщення світлової плями відносно нульового положення. Переміщення до позитивного електрода викликає переважне зменшення $R_{пв}$, а до негативного — зменшення $R_ш$ з відповідними змінами струму $R_н$.

Кольородетектування, спектральна та координатна чутливість реалізуються при подачі на керувальний електрод другого шару CdS позитивної напруги зміщення, що не досягає за величиною половини напруги живлення. При цьому під дією світла (випадок освітлення поверхні білим світлом) відбувається збільшення концентрації неосновних носіїв у шарах 4 і 3, що приводить до відмикання гетеропереходу у районі негативного електрода та інжекції основних носіїв із шару 4 в шар 3. Це, в свою чергу, приводить до компенсації бар'єра на гетеропереході між шарами 3 і 2 та протіканню основних носіїв заряду із шару 4 в шар 2.

При зміщенні локальної світлової плями до позитивного робочого електрода канал шунтування біля негативного електрода закривається, концентрація основних носіїв заряду у верхньому шарі зростає відносно темної. При зміщенні світлової плями до негативного електрода шунтувальний канал збільшується і концентрація основних носіїв у верхньому шарі зменшується.

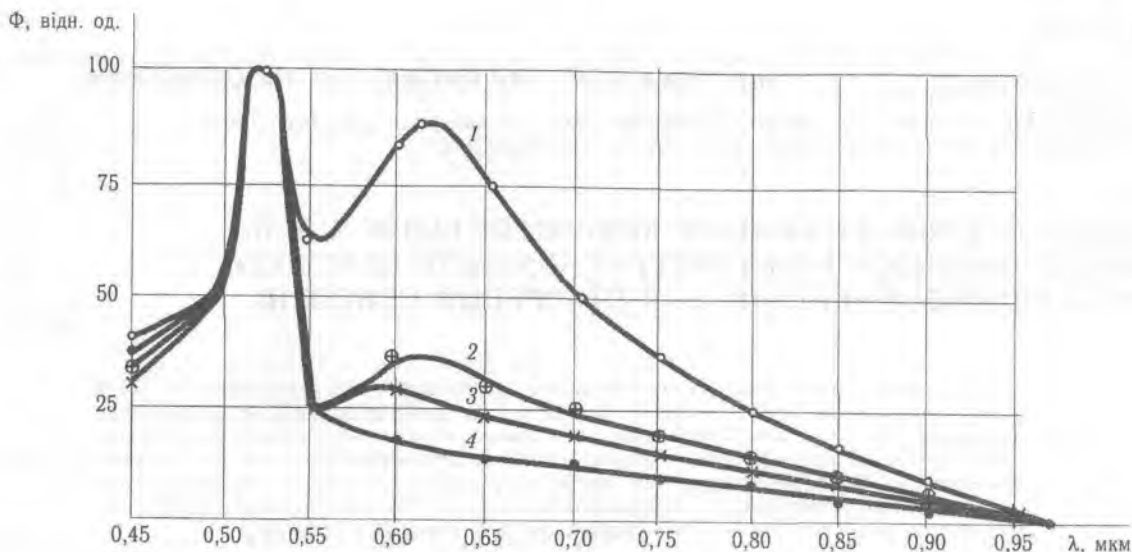


Рис. 6. Спектральні характеристики ФП:
1 — уздовж структури; 2, 3, 4 — поперек структури

Для кольородетектування необхідно встановити напругу зміщення в положення, коли на фотоприймач падає випромінювання двох кольорів однакової інтенсивності. Зміщення від рівноважного стану в ту або іншу сторону викличе збільшення або зменшення концентрації основних носіїв струму у верхньому шарі.

Спектральні характеристики ФП (рис. 6) уздовж і впоперек структури мають два максимуми в областях 0,52 і 0,62 мкм, близьких до областей власної фотопровідності CdS і Cu_2O відповідно. Зменшення R_k викликає зменшення міжелектродного максимуму внаслідок відгалуження струму через шар закису міді у ланцюг R_k . Це дозволяє, обравши середнє значення R_k , що відповідає близькій до нульової спектральній чутливості, потому викликати квантами з більшою енергією збільшення фотоструму, а квантами з меншою енергією — зменшення його.

Кінетики фотовідповіді, виміряні при частоті модуляції ~ 30 Гц, свідчать, що імпульс позитивної полярності відповідає зменшенню випромінювання або зсуву світлової плями до позитивного електрода. Негативний імпульс з'являється при збільшенні довжини хвилі випромінювання або зсуві світлової плями до негативного електрода. Поява імпульсу позитивної або негативної

полярності викликає спрацювання реле у відповідну сторону.

Таким чином, ФП дає можливість одержати змінні координатну та спектральну чутливість. Змінюючи величину зміщення на керувальному електроді, можливо переміщувати нульову точку відносно геометричного центру робочої площі ФП до позитивного або негативного електрода. Точно так можна зміщувати і область нульової спектральної чутливості у межах загальної спектральної чутливості широкозонного освітленого і вузькозонного середнього шару.

На основі розглянутого ФП спроектовано та виготовлено макет кольоророзрізняючого пристрою з регульованою спектрально-координатною чутливістю.

Література

1. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В. Источники и приемники излучения. Политехника, СПб. (1991).
2. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения. Справочник. — М.: Радио и связь, 1987.
3. Юшин А. М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. — М.: Радиософт, 1998.