

*Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потєбні*

*Кафедра: Електроніки, інформаційних систем та програмного
забезпечення*

Практичне заняття 8

з дисципліни Аналогова та оптоелектроніка

Оптоелектронні схеми з фотоприймачами

Студента (ки) 2 курсу, групи _____

(прізвище та ініціали)

Викладач _____

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

м. Запоріжжя – 2023 рік

Метою вивчення теми є засвоєння методів реєстрації та попередньої обробки оптичних сигналів, оснований на використанні напівпровідникових дискретних фотоприймачів: фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів.

Ключові терміни та поняття: фотодетектор, фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, фототиристор, фотореле.

План самостійного опрацювання теми.

1. Схемотехнічне використання фоторезисторів.
2. Схемотехнічне використання фотодіодів.
3. Схемотехнічне використання фототранзисторів.

Методичні вказівки до вивчення питань та виконання завдань.

Фоторезистор – оптоелектронний напівпровідниковий приймач випромінювання, принцип дії якого оснований на використанні ефекту фотопровідності. Іншими словами, фоторезистор являє собою опір, значення якого змінюється під впливом оптичного випромінювання. Для виготовлення фоторезисторів використовують напівпровідники з одним типом провідності, зазвичай електронним.

Перевагами фоторезисторів є лінійність вольт-амперної характеристики та двостороння провідність, основним недоліком – мала швидкодія.

Зовнішній вигляд і умовне позначення фоторезисторів приведені на рисунку 8.1.

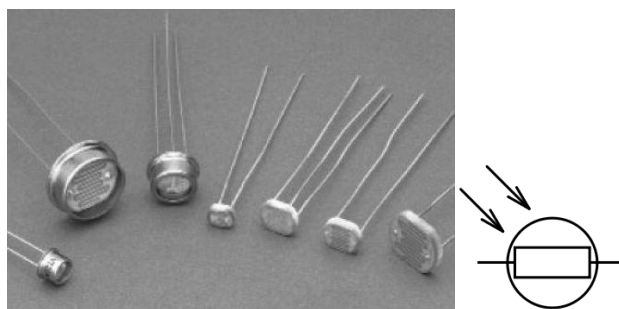


Рисунок 8.1 – Фоторезистор

Фотодіод – напівпровідниковий прилад з внутрішнім фотоелементом який має один p-n перехід і два виводи. Може працювати в двох режимах: генераторному (без зовнішнього джерела живлення) і режимі фотоперетворювача (із зовнішнім джерелом енергії). Зовнішній вигляд і умовне графічне позначення фотодіода представлені на рисунку 8.2.

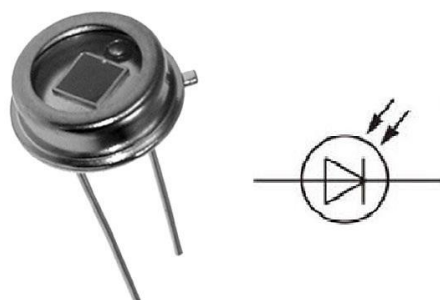


Рисунок 8.2 - Фотодіод

Фотодіоди, які працюють в режимі фото генератора (без зовнішнього джерела), часто застосовують як джерела живлення, що перетворюють енергію сонячного випромінювання в електричну. Вони називаються сонячними елементами і входять до складу сонячних батарей.

При роботі фотодіода у режимі фотоперетворювача джерело живлення включається в коло в замикаючому напрямі.

Фотодіоди є більш швидкодіючими приладами в порівнянні з фоторезисторами. Вони працюють на частотах 10^7 – 10^{10} Гц. Фотодіод часто використовують в оптопарах світлодіод-фотодіод. В цьому випадку різні характеристики фотодіода відповідають різним струмам світлодіода (який при цьому створює різні світлові потоки).

Дифузійні фотодіоди являють собою структуру з однорідним розподіленням домішки в р- та n-областях. Тому в такому фотодіоді рух згенерованих світлом носіїв заряду до р-n переходу відбувається за рахунок дифузії.

У дрейфовому фотодіоді застосовують неоднорідний розподіл домішки, внаслідок чого виникає внутрішнє електричне поле, яке прискорює рух носіїв до р-n переходу.

Фотодіод зі структурою р-і-n являє собою тонкі низькоомні р- та n- області, між якими розташований протяжний збіднений і-шар. Розміри збідненого шару вибираються так, щоб у ньому поглинулося усе оптичне випромінювання, що досягнуло його. Питомий опір і-області у 10^6 - 10^7 разів більший, ніж опір областей р- та n-типів. Тому практично вся прикладена зворотна напруга падає на і-шарі, створюючи область сильного поля, яке прискорює утворені під дією оптичного випромінювання носії. Така структура створює основу для отримання швидкодіючого та чутливого фотоприймача, оскільки процес дифузії фотоносіїв до р-n переходу, який є характерним для звичайної діодної структури, замінюється дрейфом носіїв через і-область у сильному електричному полі. Завдяки цьому р-і-n фотодіоди найбільш поширені фотоприймачі, які знаходять широке застосування.

Фотодіоди з бар'єром Шотткі (контакт метал-напівпровідник) є ще одним типом фотоприймачів з високою швидкодією та чутливістю. Подібні бар'єри можуть бути отримані на різних напівпровідникових матеріалах, у тому числі і тих, для яких неможливо створити р-n переходи.

Як напівпровідникові матеріали для реалізації фотодіодів з бар'єром Шотткі найбільше практичне використання отримали кремній та арсенід галію. Як метал найчастіше використовується плівка золота товщиною до 0,01 мкм.

Якщо електронний напівпровідник контактує з металом, у якого робота виходу електронів менша за роботу виходу для напівпровідника, то певна кількість електронів переходить з напівпровідника в метал. Іонізована донорна домішка у напівпровіднику утворює шар позитивного просторового заряду, який має високий опір. При вмиканні діода у зворотному напрямку (мінус на металі) ширина області просторового заряду збільшується.

Світло на прилад спрямовують з боку металевої плівки. При достатньо малій товщині плівки, вона виявляється практично прозорою, і основна час-

тина випромінювання поглинається в області просторового заряду, в якій існує сильне електричне поле. Електронно-діркові пари, які виникають у результаті поглинання випромінювання, швидко розділяються полем.

Особливістю бар'єрів Шоттки є можливість реєстрації випромінювання з енергією фотонів, меншою за ширину забороненої зони напівпровідника. Таке випромінювання не утворює у напівпровіднику додаткові електронно-діркові пари, але збуджує електрони металу. При енергії фотонів, більшій за висоту потенціального бар'єра контакту метал-напівпровідник, електрони металу набувають енергію, достатню для подолання бар'єра і переходу у напівпровідник. Відповідно довгохвильова межа спектральної чутливості фотодіода з бар'єром Шоттки зсувається у бік більш довгих хвиль.

З іншого боку, мала товщина металевої плівки створює умови для генерації фотоносіїв заряду в області об'ємного заряду короткохвильовим випромінюванням, для якого характерна мала глибина поглинання. Тому короткохвильова межа спектральної характеристики для фотодіодів з бар'єром Шоттки знаходиться на менших довжинах хвиль.

Таким чином, за порівнянням з фотодіодом на основі р-n переходу, фотодіоди з контактом метал-напівпровідник характеризуються значно більшою шириною спектральної характеристики.

Фотодіоди з гетероструктурою (гетерофотодіоди) є одним з найперспективніших типів напівпровідникових фотоприймачів. Типова конструкція гетерофотодіода зображена на рисунку 8.3

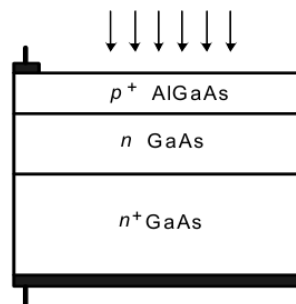


Рисунок 8.3 - Зонна діаграма фотодіода з гетеропереходом

З боку освітлюваної поверхні знаходиться шар з напівпровідникового матеріалу з широкою забороненою зоною та високою концентрацією домішки. За широкозонним шаром знаходиться активний фоточутливий шар з матеріалу з вузькою забороненою зоною. Далі іде контактний шар з такою ж шириною забороненої зони, як і в активному шарі, але з більшою концентрацією домішки.

Така структура нагадує структуру р-і-n фотодіода з тією різницею, що для її реалізації використані напівпровідникові матеріали з різною шириною забороненої зони.

При освітленні гетерофотодіода оптичним випромінюванням з енергією фотонів, меншою за ширину забороненої зони першого широкозонного шару, воно з мінімальними втратами досягає активного шару. Товщина активного шару вибирається так, щоб забезпечити

поглинання у ньому усього випромінювання.

Фотодіоди з гетеропереходом зберігають основні переваги розглянутих вище структур - поєднання високої швидкодії та високої чутливості, малі робочі напруги.

Лавинний фотодіод відноситься до фотоприймачів з внутрішнім підсиленням. Він працює при зворотній напрузі, близькій до пробивної. Внаслідок цього утворені під дією оптичного випромінювання носії заряду прискорюються сильним електричним полем, набуваючи достатньої енергії для ударної іонізації атомів. Електрони та дірки, утворені при зіткненні, у свою чергу продовжують процес іонізації. Процес збільшення концентрації носіїв заряду, а значить і струму, має лавиноподібний характер. Лавинне множення концентрації нерівноважних електронів та дірок у сильному електричному полі шару просторового заряду р-п переходу буде мати місце тоді, коли ширина області просторового заряду перевищує довжину вільного пробігу носіїв заряду.

Перевагами лавинних фотодіодів є: наявність внутрішнього великого підсилення та висока швидкодія.

Інжекційні фотодіоди відносяться до фотоприймачів з внутрішнім підсиленням. Структуру діода характеризує наявність довгої базової області. Довжина бази з високоомного напівпровідника в кілька разів перевищує довжину дифузії неосновних носіїв струму. Фотодіод працює при прямому зміщенні.

У темновому режимі більша частина прикладеної до діода напруги спадає на бази. При дії оптичного випромінювання фотони, поглинаючись у базі, утворюють нові додаткові носії заряду. Опір бази зменшується, що приводить до перерозподілу напруги між базою та р-п переходом. З підвищенням напруги р-п перехід інжектує більший струм, який, у свою чергу, ще більше зменшує опір бази і т.д. В результаті цього процесу відбувається підсилення первинного фотоструму.

В інжекційних фотодіодах з високоомного матеріалу (Ge, Si, GaAs) чутливість на 5 - 6 порядків вища, ніж у звичайних фотодіодів, а пороговий струм та інерційність приблизно такі, як і у фоторезисторів. Крім того, порівняно з лавинними фотодіодами для інжекційних фотодіодів знижуються вимоги до стабільності напруги живлення та струму.

Структура та принцип дії S-фотодіодів аналогічні інжекційному фотодіоду. Фотони світла створюють носії струму в довгій базовій області, що стимулює ріст інжекційного струму та приводить до підсилення фотоструму.

На S-фотодіоді зручно створювати фотореле. Для цього на фотоприймач подають напругу зміщення, яка відповідає вибраному порогу освітленості, при перевищенні якого різко зростає струм через S-фотодіод. Фотоприймач переходить у другий стійкий стан, який зберігається після затемнення приладу.

Фототранзистор - напівпровідниковий приймач випромінювання, що за структурою подібний до транзистора та забезпечує внутрішнє підсилення си-

гналу. Зовнішній вигляд і умовні позначення фототранзистора представлені на рисунку 8.4.



Рисунок 8.4 - Фототранзистор

Фототранзистор можна представити таким, що складається з фотодіода і транзистора (рис. 8.5). Фотодіодом є освітлювана частина переходу база-колектор, транзистором - частина структури, розташована безпосередньо під емітером. Оскільки фотодіод і колекторний перехід транзистора конструктивно об'єднані, то фотострум підсумовується з колекторним струмом. Базовий електрод може бути вимкненим

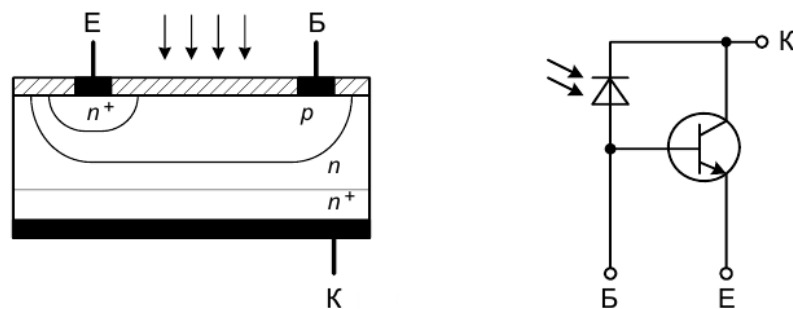


Рисунок 8.5 – Будова фототранзистора

При освітленні бази в ній виникають електронно-діркові пари. Так само як і у фотодіоді, пари, які досягли в результаті дифузії колекторного переходу, розділяються полем переходу, неосновні носії з бази рухаються в колектор, при цьому його струм збільшується. Основні носії залишаються в базі, знижуючи її потенціал відносно емітера. При цьому на емітерному переході створюється додаткова пряма напруга, що викликає додаткову інжекцію з емітера в базу і відповідне збільшення струму колектора

Ще більше підсилення і, як наслідок, ще більше збільшення чутливості, може бути досягнуто у складеному фототранзисторі (рис. 8.6).

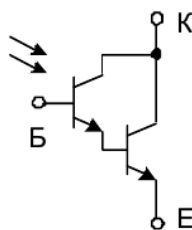


Рисунок 8.6 – Складений фототранзистор

Перевагами фототристорів є: наявність внутрішнього підсилення (висока фоточутливість), схемотехнічна гнучкість, яка обумовлена наявністю третього електрода.

Фототиристор - напівпровідниковий приймач випромінювання з двома стійкими станами (високоомним та низькоомним), перемикання якого у стан низького опору відбувається під дією оптичного сигналу. Зовнішній вигляд і умовні позначення фототиристора представлені на рисунку 8.7.



Рисунок 8.7 - Фототиристор

Структура фототиристора є подібною до структури звичайного тиристора (рис. 8.8), яка містить три р-п переходи, з яких середній називають колекторним, а два крайніх - емітерними. Зовнішні області називаються емітерами, а внутрішні - базами.

Тиристор вмикається так, щоб колекторний перехід був ввімкнений у зворотному напрямку, а обидва емітерних - у прямому. При такому вмиканні переходів тиристор можна зобразити у вигляді двох послідовно ввімкнених транзисторів р-п-р і п-р-п з позитивним зворотним зв'язком через загальні бази і колектори (рис. 8.8).

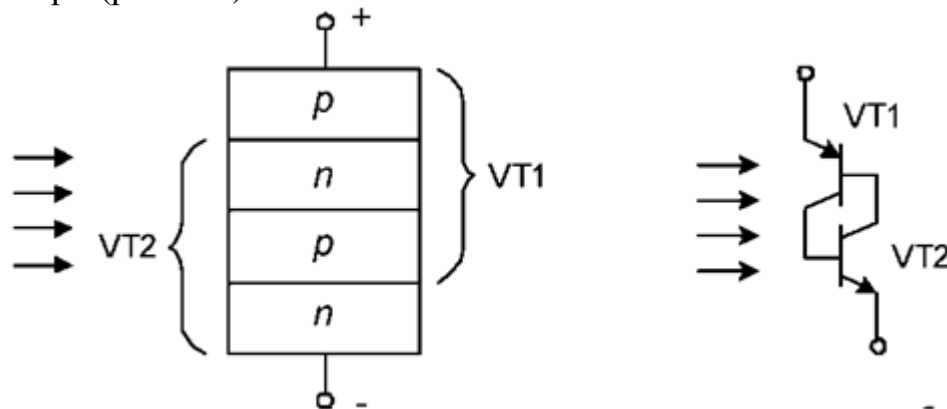


Рисунок 8.8 – Структура фототиристора та двохтранзисторна модель

При збільшенні напруги на тиристорі зворотний струм колекторного переходу, який є струмом фототиристора, зростає. Зростання струму веде до накопичування об'ємних зарядів в базових областях тиристора. Дірки, які інжектуються емітерним переходом транзистора VT1, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора VT2 і створюють там позитивний заряд. Аналогічно, електрони, які інжектуються емітерним переходом транзистора VT2, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора VT1 і створюють там негативний заряд. Накопичення основних носіїв заряду

в базах транзисторів розпочинає процес їх відкриття. При деякому значенні напруги на тиристорі накопичені у базах заряди стають достатніми для того, щоб транзистори почали працювати в активному режимі. У результаті коефіцієнт підсилення у колі зворотного зв'язку стає більшим за одиницю. Базові струми транзисторів лавиноподібно зростають (незначне збільшення базового струму кожного транзистора через коло зворотного зв'язку повертається ще більшим збільшенням) і обидва транзистори швидко відкриваються. Лавиноподібне зростання струму через структуру призводить до відкриття тиристора, у результаті чого усі три переходи виявляються зміщеними у прямому напрямку, і загальний опір фототиристора стає малим.

Для переведення фототиристора у високоомний стан, необхідно зменшити його струм до деякого значення. При цьому розпочнеться зворотний процес лавиноподібного перемикавання, який завершиться тим, що обидва транзистори виявляться закритими, а колекторний перехід буде зміщений у зворотному напрямку.

Багатоелементні фотоприймачі. В ряді випадків необхідно не тільки відмітити наявність пучка світла або його інтенсивність, але й зафіксувати фотоелектричним способом оптичне зображення, яке має певний розподіл інтенсивності світла по площині. Це можна досягнути, виготовивши екран, який містить багато мініатюрних фотоприймачів, які перетворюють світлові потоки у відповідні електричні сигнали. Записана таким чином оптична інформація деякий час зберігається, а потім "зчитується" тим або іншим способом. Електричні сигнали від різних комірок екрана можуть бути послідовно передані в інше місце і використані для відтворення зображення об'єкта.

Для введення зображень використовуються багатоелементні фотоприймачі на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ). З фізичної точки зору ПЗЗ цікаві тим, що електричний сигнал у них поданий не струмом або напругою, як у більшості інших твердотільних приладів, а зарядом.

Спрощено прилад із зарядовим зв'язком можна розглядати як матрицю близько розташованих конденсаторів, утворених структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) (рис. 8.9).

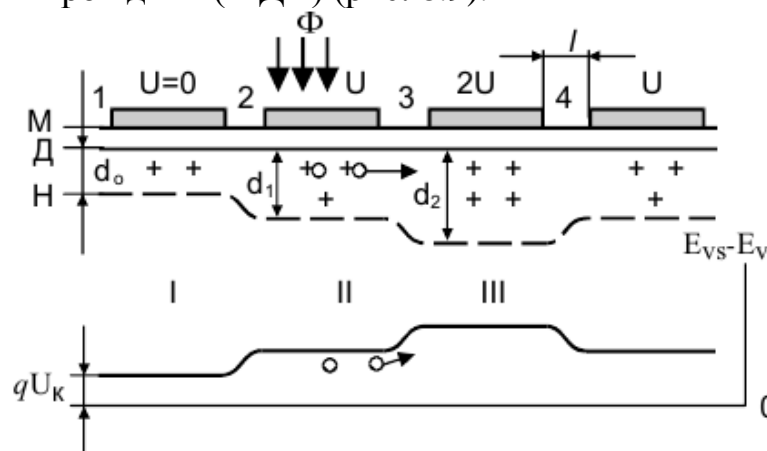


Рисунок 8.9 – Серія взаємодіючих фотоелементів, до яких прикладені різні напруги

Штрихова лінія - границя області просторового заряду, $E_{vs}-E_v$ - глибини потенціальних ям для дірок

При відповідній послідовності тактових імпульсів напруги на електродах МДН конденсаторів зарядові пакети можна переносити між сусідніми елементами приладу. Структура складається із шару кремнію n-типу (підкладка), шару двоокису ізолювального кремнію і набору пластин електродів.

Якщо в структурі прикладають напругу U (мінус на металі), то частина домішкових електронів виводиться з напівпровідника n-типу, що призводить до появи шару позитивного об'ємного заряду товщиною d . Товщина цього шару збільшується з ростом U .

Електрони, які виникають при освітленні МДН-структури, відводяться в об'єм напівпровідника, а дірки накопичуються біля межі з діелектриком. Кількість цих дірок (тобто загальний позитивний заряд) залежить від інтенсивності світла і часу його дії. Якщо теплова генерація пар незначна, накопичений заряд (тобто інформація, задана світлом) може зберігатись тривалий час, оскільки електронів у збідненій області немає. Носії, які генеруються за межами збідненої області, повільно рухаються – дифундують і рекомбінують перш, ніж потрапляють під дію поля збідненої області. Носії, які генеруються поблизу збідненої області, можуть дифундувати в сторони і можуть потрапити під сусідній електрод. У червоному та інфрачервоному діапазонах довжин хвиль ПЗЗ мають роздільну здатність гіршу, ніж у видимому діапазоні. Це обумовлено тим, що фотони інфрачервоного та червоного випромінювання проникають глибше в кристал кремнію і зарядовий пакет розмивається.

На рисунку 8.9 зображене коло МДН-структур, яке являється частиною рядка багатоелементного фоточутливого екрана. У випадку I на структуру не подана зовнішня напруга і наявність збідненого електронами шару товщиною d_0 пов'язана з контактною різницею потенціалів U_k . Випадок II відповідає присутності зовнішньої напруги і освітлення структури крізь напівпровідниковий металевий електрод (затвор). Накопичений за час освітлення заряд дірок може бути зсунутий вздовж кола структур, якщо на сусідній елемент подано більш високу напругу (випадок III). У цьому випадку глибина потенціальної ями для дірок більша, і вони внаслідок дифузії перейдуть від другого елемента до третього. У проміжку між затворами 2 і 3 присутнє прискорювальне поле дірки, яке проникає і в область накопичення дірок, тому перетікання дірок до елемента 3 може бути достатньо швидким.

Таким чином, електричний сигнал від елемента 2, пропорційний інтенсивності Φ і часу дії світла, яке падає на цей елемент, може бути проведений по колу елементів і виведений у зовнішнє коло. Аналогічним чином можуть бути отримані відеосигнали від інших елементів рядка і елементів інших рядків.

Мікроскопічні фоточутливі елементи розміщені в рядку так близько ($l \approx 3$ мкм), що вони можуть взаємодіяти, передаючи один одному заряди.

Звідси назва подібних пристроїв - прилади із зарядовим (або об'ємним) зв'язком. Цей зв'язок між МДН-структурами здійснюється через загальну для всіх структур товщину напівпровідників.

Двовимірний масив (матрицю) пікселів одержують за допомогою стоп-каналів, які розділяють електродну структуру ПЗС на стовпці. Стоп-канали - це вузькі області, сформовані спеціальними технологічними прийомами в приповерхневій області, які перешкоджають розтіканню заряду під сусідні стовпці.

Якість усіх фотоприймальних матриць ПЗЗ залежить від ефективності переносу зарядів від комірок до кінцевого підсилювача. Оскільки заряди з пікселів, які розташовані далеко від кінцевого підсилювача, повинні перенестися на сотні і тисячі кроків, то ефективність передачі зарядів повинна бути максимально наближеною до одиниці. Ця вимога набуває особливого значення при низьких рівнях зарядів (наприклад, при слабкому освітленні), коли мала втрата зарядів може призвести до суттєвого спотворення зображення.

Основними типами приладів із зарядовим зв'язком є ПЗЗ із поверхневим каналом і ПЗЗ з прихованим каналом. У ПЗЗ із поверхневим каналом заряди зберігаються і переносяться біля межі розділу напівпровідник-діелектрик. Для поверхневого шару характерна велика кількість дефектів, що негативно впливає на ефективність переносу зарядів. Оскільки повністю усунути поверхневі дефекти неможливо, характеристики приладів покращують за рахунок того, що зарядові пакети зберігаються і передаються на деякій відстані від поверхні. Це реалізується у ПЗЗ з прихованим каналом. Завдяки спеціальному легуванню підкладки в ній формується канал з протилежним типом провідності.

Більшість типів ПЗЗ матриць, які виготовляються на промисловій основі, орієнтовані на застосування в телебаченні. Як правило, такі матриці складаються з двох ідентичних областей - області накопичення та області збереження. Область збереження захищена від впливу світла світлонепроникним покриттям. Під час зворотного ходу променя кадрової розгортки зображення, сформоване в області накопичення, швидко переноситься в область збереження і, потім, поки експонується наступний кадр, зчитується порядково з частотою рядкової розгортки. Такі прилади називаються ПЗЗ із кадровим переносом. Завдяки низькій ціні вони знаходять широке використання в побутовій відеотехніці. Проте прилади з кадровим переносом можна використовувати для зйомок у добре освітлених умовах.

Питання для закріплення вивченого матеріалу та самоконтролю.

1. В чому полягає принцип дії фоторезистора?
2. Які матеріали використовуються для виготовлення фоторезисторів?
3. Перелічіть основні характеристики фоторезисторів.
4. Чим обумовлений максимум на спектральній характеристиці фоточутливості фотоприймачів резистивного типу?
5. В чому полягає принцип дії фотодіода?
6. Які матеріали використовуються для виготовлення фотодіодів?
7. Перелічіть основні характеристики фотодіодів.

8. Чим обумовлений максимум на спектральній характеристиці фоточутливості фотоприймачів діодного типу?
9. Які режими роботи фотодіодів Ви знаєте?
10. Перелічіть переваги р-і-n структури фотодіода.
11. В чому полягає принцип дії фототранзистора?
12. Які матеріали використовуються для виготовлення фототранзисторів?
13. Перелічіть основні характеристики фототранзисторів.
14. Які режими роботи фототранзисторів Ви знаєте?
15. Вкажіть переваги та недоліки фотоприймачів – фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів

Практичне завдання.

1.1 Зібрати експериментальний стенд 1. Розташувати на креслярському полі Proteus: джерело живлення (Компоненти: P → Miscellaneous (Різне) → BATTERY (12В)), земляну клему (ліва панель: Terminal → GROUND), змінний резистор (Компоненти: P → Resistors → Variable → POT HG), фоторезистор (P → Miscellaneous → TORCH LDR), резистори (Компоненти: P → Resistors → 0,6w Metal Film → MINRES 4.7к, 3.3к), вимірювальні прилади (ліва панель: Віртуальні інструменти → DC VOLTMETER, DC AMMETER), реле (Компоненти: P → Switches & Relays → Relays (Generis) → RALAY), транзистори (Компоненти: P → Transistors → Bipolar → BC549), конденсатори (Компоненти: P → Capacitors → Electrolytic Aluminum → A700V826M2R5ANE028) З'єднати компоненти у схему віртуального лабораторного стенда (рис. 11.3).

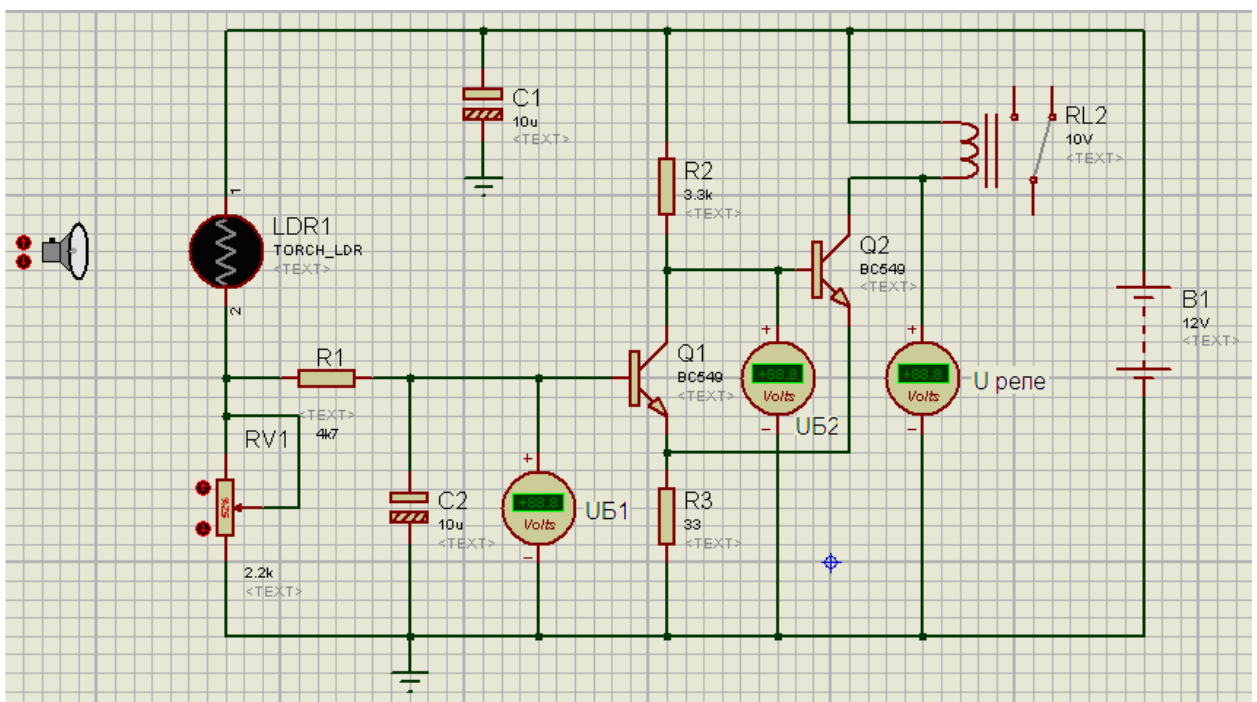


Рисунок 11.1 – Експериментальний стенд 1

1.3 Збільшуючи освітленість фоторезистора (покроково), зняти показання вимірювальних приладів і занести їх у експериментальну таблицю 11.1.

Таблиця 11.1 – Результати проведених вимірів на лабораторному стенді

Крок освітленості	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UB1										
UB2										
U реле										

1.4 Змінюючи опір змінного резистора (чутливість) та резистора R2 експериментально досягти оптимального результату чутливості схеми реєстрації світлових сигналів.

1.5 Зробити розгорнутий висновок.

2.1 Зібрати експериментальний стенд 2. Розташувати на креслярському полі Proteus замість TORCH LDR, фоторезистор (Компоненти: P → Transducers → LDR), індикаторну лампу (Компоненти: P → LAMP) (рис. 11.2)

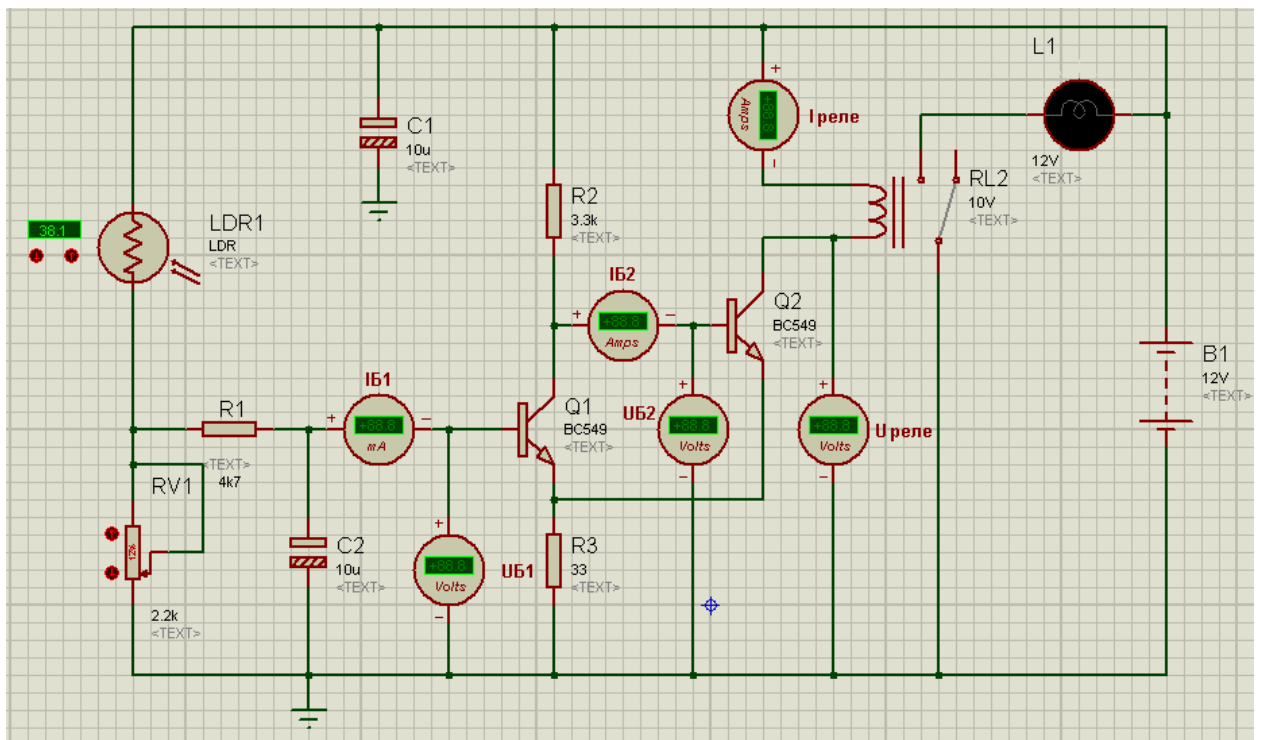


Рисунок 11.1 – Експериментальний стенд 2

2) Зняти параметри UB1, IB1, UB2, IB2, U реле для різних значень освітленості E лк (табл. 11.2).

Таблиця 11.1 – Результати проведених вимірів на лабораторному стенді

Ужив = 12В										
E = 100лк										
UB1										
I реле										
E = 200лк										
UB1										
I реле										
E = 500лк										
UB1										
I реле										
E = 800лк										
UB1										
I реле										
E = 1000лк										
UB1										
I реле										

3) Побудувати графіки залежностей $U_{B1} = f(I_{\text{реле}})$ для різних значень освітленості E лк.

Контрольні питання

1. Фоторезистор. Явища внутрішнього фотоефекту.
2. Основні параметри фоторезисторів. Темновий струм.
3. Вольт-амперні характеристики фоторезисторів.

Література

1. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
2. Бойко В.І., Жуйков В.Я., Співак В.М. та ін. Основи технічної електроніки: Підручник. Київ : Вища школа., 2007. 510 с.