

8. ПОНЯТТЯ ПРО ОПТОЕЛЕКТРОНІКУ

Під назвою «оптоелектроніка» розуміють область електроніки, яка розв'язує проблему одночасного використання електричних та оптичних сигналів для обробки, передачі і зберігання інформації.

Справа в тому, що в багатьох випадках виявляється необхідним або зручним вводити в лінії зв'язку ділянки, на яких передача інформації здійснювалася б не у вигляді електричних, а у вигляді оптичних (світлових) сигналів. Так, наприклад, при роботі з радіоелектронними вимірювальними приладами або з електронно-обчислювальними машинами, інформація, яку зчитує оператор, для зручності звичайно виводиться у вигляді світлових сигналів – світіння сигнальних ламп, світлових табло, світних цифрових індикаторів, дисплеїв, тощо.

І навпаки, при роботі із світловими сигналами часто на певному етапі виникає необхідність перетворення їх в електричні. Подібні задачі виникають у багатьох фізичних експериментах, в системах автоматики і контролю, коли первинну світлову інформацію потрібно ввести для обробки в радіоелектронні пристрої.

Основними елементами таких змішаних оптико-електронних систем є пристрої для перетворення сигналів одного виду в інший. Прилади, які перетворюють світлові сигнали в електричні називаються фотоприймачами, а ті, що виконують обернене перетворення – випромінювачами світла.

При цьому, як правило, під оптоелектронними приладами розуміють малогабаритні напівпровідникові прилади, а під світлом – електромагнітне випромінювання ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазонів в межах довжин хвиль від 0,2 до 50 мкм.

8.1. Фотоприймачі

В основі роботи усіх фотоприймачів лежить фізичне явище внутрішнього фотоефекту. Суть його полягає у тому, що при русі кванта світла в напівпровіднику, цей квант може бути поглинутим одним з атомів кристалічної ґратки. В результаті від атома відірветься один з валентних електронів, а в місці поглинання кванта виникнуть вільний електрон і дірка¹.

Для цього, однак, необхідно, щоб енергія кванта була більшою за енергію активації даного напівпровідника:

$$h\nu \geq \Delta E$$

тобто більше тієї енергії, котра необхідна для вивільнення валентного електрону. Так, наприклад, для кремнію $\Delta E = 1,12$ еВ, отже внутрішній фотоефект спроможні викликати лише ті фотони, довжина хвилі яких коротше 1,1 мкм. Для германію такою границею буде довжина хвилі 1,84 мкм, а для широко застосованого в оптоелектронних приладах з арсеніду гелію та твердих розчинів на його основі «червона границя» лежить у межах 0,6 - 0,9 мкм.

Утворені внаслідок внутрішнього фотоефекту вільні електрони та дірки збільшують електропровідність напівпровідника, опромінюваного світлом. Саме на цьому заснована робота фоторезистора, схематичне зображення якого подано на рис.8.1а. Основою фоторезистора є напівпровідниковий фоточутливий шар, який може являти

¹Фотоефект називається внутрішнім, оскільки вивільнені електрони залишаються всередині напівпровідника, тоді як при зовнішньому фотоефекті вони облишають напівпровідник і уходять в навколишній простір.

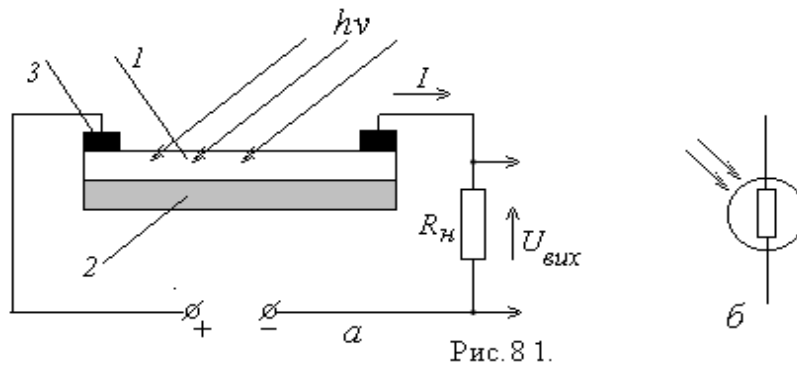


Рис. 8.1.

собою монокристалічну або полікристалічну платівку, або полікристалічну плівку (1), нанесену на діелектричну підкладку (2). На поверхню фоточутливого шару нанесено металеві електроди (3).

У відсутності освітлення фоторезистор має досить великий темновий опір, порядку 10^4 - 10^6 Ом. При опроміненні світлом опір фоторезистора зменшується і струм через нього зростає, що може бути зареєстровано як збільшення вихідної напруги на навантажувальному опорі R_n .

Спектральна чутливість фоторезисторів залежить від матеріалу, з якого вони виготовлені. Скажімо, у фоторезисторів, виготовлених з CdS, у якого $\Delta E = 8.4$ eV, максимум чутливості припадає на $\lambda = 0.5$ мкм (видиме зелене світло), а у фоторезисторів з PbS максимум чутливості лежить в інфрачервоному діапазоні в області $\lambda \approx 2$ мкм.

Особливим чином внутрішній фотоэффект проявляється на властивостях p - n переходу (рис.8.2). Якщо прикласти до цього переходу напругу заперіної полярності, то у відсутності світла ($\Phi=0$) його вольтамперна характеристика має звичайний вигляд (рис. 8.3, верхня крива) і через перехід тече малий зворотний струм I_0 , який називають темновим струмом. У германієвих діодів цей струм дорівнює здебільшого кільком десяткам мікроампер, у кремнієвих – одиницям мікроампер.

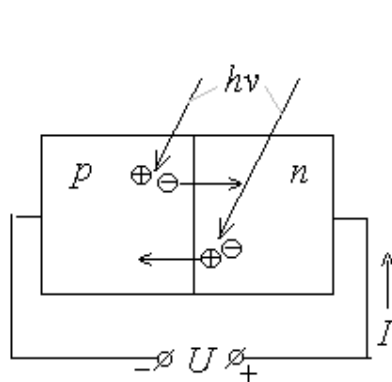


Рис.8.2.

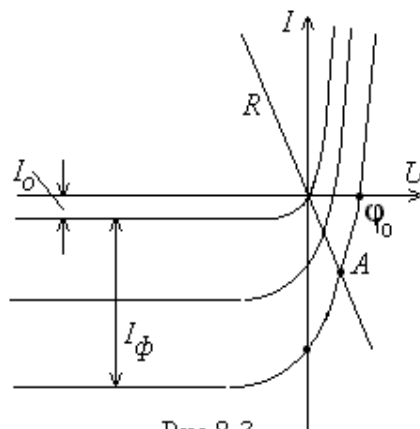


Рис.8.3.

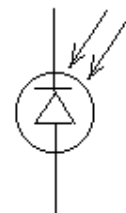


Рис.8.4.

При опроміненні світлом кванти, які поглинаються, створюють в об'ємі напівпровідника електронно-діркові пари. Електрони, що утворилися в p -області, та дірки, утворені в n -області, виявляються там неосновними носіями. В процесі свого дифузійного руху (якщо вони зародилися не надто далеко від входу в межу переходу) ці неосновні носії можуть потрапити на границю переходу, екстрагуватись наявним там полем і дати відчутну добавку I_ϕ до наскрізного струму I_0 , який тече через перехід. Фотострум I_ϕ майже не залежить від напруги, прикладеної до переходу, і пропорційний величині світлового потоку Φ .

Реальний прилад, який працює на цьому принципі називається фотодіодом. Його умовне зображення показано на рис.8.4. Фотодіодам притаманна досить висока чутливість, яка вимірюється у міліамперах на люмен. У деяких зразків фотодіодів з

германію ця чутливість досягає 20-30 мА/лм. Інерційність фотодіодів визначається часом дифузії неосновних носіїв від місця їх утворення до границі р-п переходу і дорівнює звичайно одиницям мікросекунд. У особливо малоінерційних фотодіодів ця величина може бути зменшена до $10^{-9} \dots 10^{-10}$ с.

Дальшим удосконаленням фотодіоду може вважатися фототранзистор. Це звичайна тришарова *pnp* (або *npn*) структура, в котрій світловим потоком опромінюється запертий колекторно-базовий перехід (рис.8.5а). База при цьому може залишатися відключеною. Фотострум I_ϕ (сумісно зі струмом I_o) тепер виконує роль некерованого

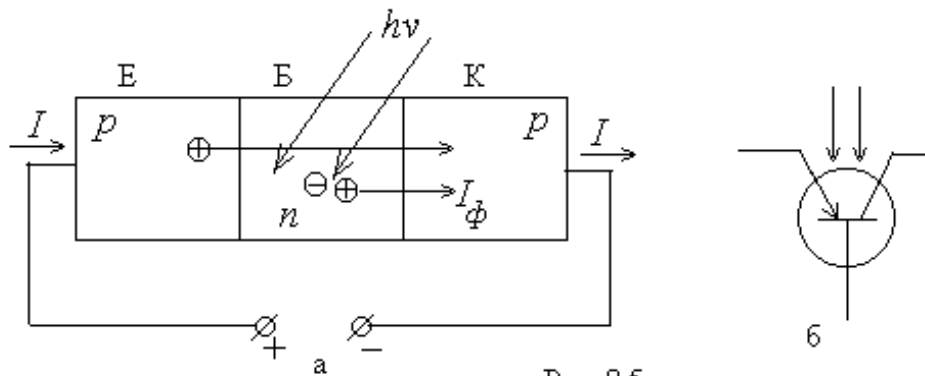


Рис.8 5.

зворотного струму $I_{кбо}$, запертого колекторного переходу. Особливості роботи транзистора з відключеною базою були досить ґрунтовно розглянуті вище в розділі 3.5. Там було показано, що наскрізний струм через транзистор при подібному включенні дорівнює $\frac{I_{кбо}}{1 - \alpha}$, і майже в β раз більший за струм $I_{кбо}$, яким він і обумовлений. Тому і в фототранзисторі слід чекати підсилення в $\beta \approx h_{21e}$ раз наскрізного струму I порівняно зі фотострумом I_ϕ .

Особливий інтерес становить робота фотодіода в режимі, що відповідає четвертому квадранту рис.8.3. В окремому випадку, при розриві кола живлення і роботі в режимі холостого ходу на фотодіоді виникає електрорушійна сила ϕ_o , величиною в кілька десятків вольт. Причина її появи в тому, що створювані світлом неосновні носії дифундують до р-п переходу і екстрагуються його електричним полем. В n-області накопичуються надлишкові електрони, а в p-області – надлишкові дірки. В результаті обидві області додатково заряджаються: n-область стає більш негативною, а p-область більш позитивною. Це призводить до зниження контактної різниці потенціалів між p- та n-областями і появи фото е.р.с.

При короткому замиканні фотодіоду в його колі потече струм $I_{кз}$, а при ввімкненні замість джерела живлення U навантажувального опору R , через останній протікатиме струм $I < I_{кз}$ і виділиться напруга $IR < \phi_o$. Такий режим відповідає точці А, утвореній перетином ВАХ фотодіода з прямою лінією, нахил якої визначається величиною опору R . Фотодіод стає таким чином джерелом потужності $I^2 R$, яка генерується за рахунок прямого перетворення енергії світлового потоку в електричну енергію. Явище це має назву фотогальванічного ефекту, а режим роботи фотодіода – фотогальванічним або вентильним.

Фотодіоди у вентильному режимі використовують як автономні (тобто такі, що не потребують джерел живлення) пристрої для реєстрації та вимірювання світлового потоку (наприклад, в автоматичних експонетрах фотоапаратів), а також як силові джерела живлення, які перетворюють енергію сонячного світла в електричну енергію. В останньому випадку вони називаються сонячними елементами і використовуються там, де одержати електричну енергію іншими способами неможливо.

Так, наприклад, сонячні елементи стали натеper основним джерелом електроживлення бортової апаратури космічних літальних апаратів, штучних супутників Землі, орбітальних станцій. Теоретично досяжний к.к.д. сонячних батарей становить 30-40%, однак поки що одержано значення лише порядку 10-12%.

Оскільки густина потоку сонячного випромінювання становить біля $1,4 \text{ кВт/м}^2$, сонячні елементи здатні з 1 м^2 корисної площі давати потужність в 150-200 Вт. Сонячні елементи виявилися настільки ефективними пристроями, що навіть існує проект створення на їх основі космічних електростанцій, які б передавали вироблену ними енергію на Землю у вигляді вузькоспрямованих потоків радіохвиль.

8.2.Випромінювачі світла

Явищем, зворотним до описаного вище внутрішнього фотоефекту, є випромінювання кванта світла при рекомбінації вільного електрона і дірки. Дійсно, при рекомбінації має виділитися енергія, що дорівнює енергії активації атомів напівпровідника, котра й визначає частоту та довжину хвилі виникаючого випромінювання.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \approx \frac{ch}{\Delta E}$$

Звичайно, не кожний акт рекомбінації завершується народженням фотона. Так, наприклад, в германію та кремнію великою є імовірність того, що при рекомбінації енергія буде передана безпосередньо атомам ґратки (безвипромінювальний перехід). Але в деяких напівпровідниках імовірність народження фотона наближається до 100%, що може бути використано для створення вельми ефективних джерел світла.

Задача полягає лише в тому, щоб утворити в об'ємі напівпровідника достатньо високу концентрацію неосновних носіїв. Найпростіший та вже знайомий нам шлях до цього – інжекція неосновних носіїв пропусканням струму через відкритий р-п перехід (рис.8.6а). Світіння, що при цьому виникає, зветься електролюмінісценцією (точніше, інжекційною електролюмінісценцією) і є основою роботи напівпровідникових випромінювачів світла – світлодіодів.

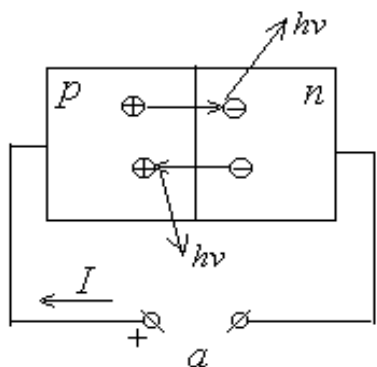


Рис. 8.6.

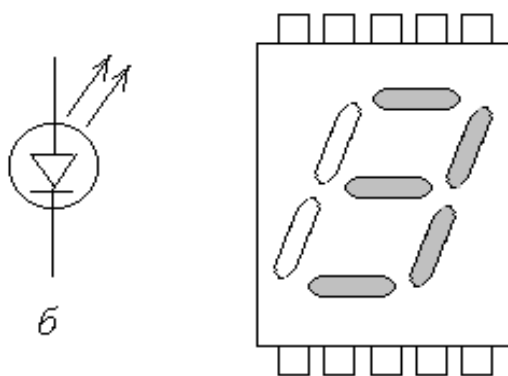


Рис.8.7.

Світлодіод являє собою кристал арсеніду галію GaAs, фосфіду галію GaP, карбіду кремнію SiC або інших складних напівпровідників. Спеціальною обробкою в кристалі створюється р - n перехід. Далі кристал встановлюється в герметичний корпус з виводами та прозорим вікном у формі лінзочки, яка концентрує випромінюваний світловий потік. Умовне зображення світлодіода показано на рис.8.6б. В залежності від складу напівпровідника свічення світлодіода може бути зеленим, жовтим, червоним або

лежати в області інфрачервоних хвиль. Інерційність світлодіодів мала і може бути доведеною до десятків і навіть одиниць наносекунд.

Світлодіоди використовують як сигнальні лампочки, з них можна зібрати матриці та панелі для висвітлювання знаків і цифр. Широко поширені семисегментні цифрові індикатори (рис.8.7), на яких відповідною комутацією мініатюрних світлодіодів видовженої форми можна висвітлювати цифри та літери. Такі індикатори застосовують, наприклад, у мікрокалькуляторах, електронних годинниках, цифрових радіовимірювальних приладах.

При акті рекомбінації кожний електрон видає короткий імпульс випромінювання незалежно від всіх інших електронів, які також рекомбінують. Фази коливань в цих імпульсах аж ніяк між собою не зв'язані, тому випромінювання буде некогерентним. Когерентне випромінювання вдається одержати в пристроях, які мають назву напівпровідникових лазерів. Схематичне зображення такого лазера дано на рис.8.8.

Напівпровідниковий лазер – це кристал міліметрових розмірів з арсеніду галію або інших подібних напівпровідників з p - n переходом. Кристал щільно затиснуто між

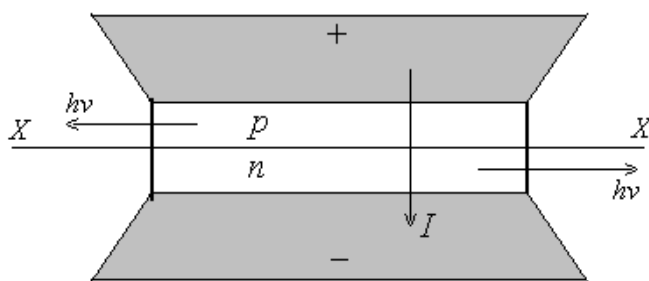


Рис 8.8.

струмопровідними електродами, які водночас служать і для відведення тепла, що виділяється в кристалі. Необхідною умовою роботи лазера (на відміну від звичайного світлодіода) є інверсія заселеності енергетичних рівнів, при якій кількість частинок у збудженому стані перевищує кількість незбуджених. В даному випадку це означає, що

концентрація вільних електронів (і дірок) повинна перевищувати концентрацію незбуджених атомів напівпровідника, які утримують «при собі» свої валентні електрони. Така висока концентрація неосновних носіїв може бути створеною лише при дуже великих густинах струму інжекції – порядку 10^3 А/см² та вищих.

При наявності інверсної заселеності квант світла, який виник у напівпровіднику, матиме більшу імовірність викликати рекомбінацію одного з вільних електронів, ніж бути поглиненим незбудженими атомами ґратки. При цьому випромінюється новий квант, який має ті ж частоту, фазу, поляризацію і напрям руху як і квант, що його породив, тобто буде когерентним з ним. Подібне явище, коли один квант «допомагає» народженню іншого, називається вимушеним випромінюванням, і саме на цьому ґрунтується робота всіх лазерів. Виниклий квант може викликати нові акти вимушеного випромінювання, так що описаний процес має тенденцію розвиватися лавиноподібно, приводячи до висвітлювання все нових і нових квантів. Імовірність того, що квант світла викличе акт вимушеного випромінювання пропорційний часу взаємодії кванта з інверсно-заселеним середовищем. Тому з метою збільшення тривалості цієї взаємодії бічні грані кристала роблять плоско-паралельними, так щоб кристал в напрямі вісі XX являв собою оптичний резонатор. Кванти світла, багаторазово відбиваючись від бічних граней, перебувають в об'ємі кристала досить тривалий час і сприяють зростанню лавинних квантів. Накопичене в об'ємі кристала випромінювання потроху витікає через напівпрозорі бічні грані в напрямі вісі XX .

Головна складність при здійсненні успішної роботи напівпровідникового лазера – це велика густина граничних струмів, починаючи з яких досягається інверсна заселеність, і випромінювання стає когерентним. Ці струми викликають сильне нагрівання кристалу, охолодити його не вдається навіть за допомогою щільно притиснутих до нього масивних електродів. Тому у більшості випадків вдається

реалізувати лише імпульсну роботу подібних лазерів, коли імпульси струму чергуються з тривалими паузами, протягом яких кристал остигає.

Більшість напівпровідникових лазерів працює в ІЧ діапазоні та довгохвильовій частині видимого діапазону. Коефіцієнт корисної дії напівпровідникових лазерів може сягати 50-70%, що набагато більше ніж у лазерів інших типів. Проте, зважаючи на мініатюрні розміри кристалу, абсолютні потужності випромінювання невеликі і складають звичайно доли Вт.

8.3.Оптрон

Оптрон – це оптоелектричний напівпровідниковий прилад, який складається з випромінювача світла та фотоприймача, між якими встановлений оптичний зв'язок. Самі ж випромінювач і фотоприймач електрично ізольовані один від одного. Сполучення випромінювача світла та фотоприймача в одному приладі – оптроні також називають оптоелектронною парою. Як випромінювачі звичайно застосовують світлодіоди; фотоприймачами можуть бути фоторезистор, фотодіод або фототранзистор (рис.8.9).

Імпульс струму i_1 через світлодіод спричиняє світловий імпульс, який створює пропорційний йому імпульс струму i_2 в колі фотоприймача.

Основне призначення оптронів – створення електричної розв'язки на шляху

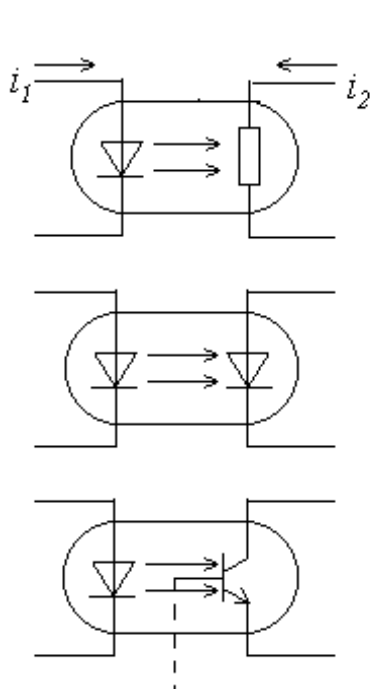


Рис. 8.9.

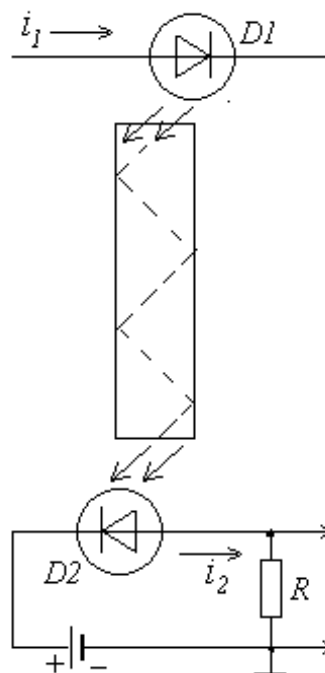


Рис. 8.10.

передачі сигналу, тобто здійснення передачі сигналу з одного електричного кола в інше, але без їх безпосереднього електричного з'єднання. Прикладом необхідності подібної розв'язки може бути потреба у вирішенні такої задачі: виміряти слабкий (порядку кількох міліампер) імпульс струму в провіднику, який знаходиться під високою напругою в кілька десятків кіловольт. Пряме приєднання вимірювальних приладів до цього провідника неприпустиме за правилами техніки безпеки.

Задача легко розв'язується застосуванням оптоелектронної пари (рис.8.10), в якій струм i_1 , що підлягає виміру, пропускається через світлодіод D_1 , а утворений світловий імпульс вловлюється і перетворюється знову на електричний сигнал фотодіодом D_2 . Відстань між діодами можна зробити досить великою, щоб задовольнити вимоги техніки

безпеки, а щоб світло не розсіювалося в боки, воно пропускається по світловоду – стриженку із прозорого матеріалу з великим коефіцієнтом заломлення, по якому світло поширюється шляхом повного внутрішнього відбиття від стінок.

Наведений приклад є одним з багатьох випадків, коли застосування розв'язки через оптрон дозволяє досить просто вирішити здавалося б нерозв'язну задачу спільного провідника для різних частин електричної системи. Інша область застосування оптронів – розв'язка в колах електронно-обчислювальних машин, коли через небезпеку взаємних завад і наводок ці кола не можуть бути електрично сполученими між собою.

Широке застосування оптронні пари знаходять і в автоматиці, де вони служать безконтактними датчиками інформації про просторове положення об'єктів, які впливають на хід світлового променя від джерела світла до фотоприймача. Потрапляючи в промінь світла та затіняючи його, відбиваючи або не відбиваючи світловий промінь, рухомий предмет створює електричний сигнал в колі фотоприймача. Далі цей сигнал підсилюється і приводить у дію відповідні виконавчі сервомеханізми. Такого роду пристрої досить численні: вони можуть лічити кількість людей, які проходять повз датчик, кількість рухомих предметів на конвейєрі, вибраковувати деталі в залежності від їх розмірів і забарвлення, працювати в системах захисту від потрапляння предметів або людей в небезпечні зони.

Особливе значення оптоелектронні системи передачі інформації набули останнім часом у зв'язку з удосконаленням технології виготовлення світлодіодів малого перерізу. Такий світлодіод являє собою тонку кварцеву нитку діаметром у кілька десятків мікрон, оточену оболонкою з речовини з меншим коефіцієнтом заломлення. Подібні волокна стійкі до розтягу та скручування; світло в них може поширюватися з малим згасанням (порядку 1 дБ/км) на великі відстані за рахунок повного внутрішнього відбиття від стінок кварцового волокна. Приєднавши до торців такого волокна світлодіод та фотоприймач, ми одержимо волоконно-оптичну лінію зв'язку (ВОЛЗ), по якій інформація у вигляді світлових сигналів може передаватися на великі відстані.

Подібними світловодами передбачається замінити мідні провідники в телефонних кабелях внутріміського та міжміського зв'язку. Перевагою ВОЛЗ є малий поперечний переріз світловодних волокон, значно більша у порівнянні з звичайною телефонною лінією смуга пропускання частот, нечутливість до електричних завад і наводок, а також можливість економії дефіцитних кольорових металів, застосовуваних в існуючих телефонних кабелях.

8.4.Оптоелектронні пристрої з зарядовим зв'язком

Вище нами було розглянуто застосування приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) для затримки сигналів у часі. Але найбільшого успіху ці прилади здобули при їх комбінації з внутрішнім фотоефектом. В результаті було створено новий клас оптоелектронних приладів, за допомогою яких вдається розв'язувати цілу низку практично-важливих задач по сприйманню і обробці світлових сигналів.

Схематичне зображення оптоелектронного фотоприймача з застосуванням ефекту зарядового зв'язку подано на рис.8.11. Верхня частина зображеного пристрою являє собою ряд затворів, на які подається хвиля від'ємної напруги. Тонкий шар напівпровідника має бути напівпрозорим і здатним до внутрішнього фотоефекту у видимому світлі. Напівпровідникові платівки опромінюються світлом з боку протилежного до затворів.

Принцип дії подібного приладу заснований на тому, що при освітленні у напівпровідник поблизу його поверхні утворюються пари носіїв заряду електрон - дірка, котрі розділяються полем

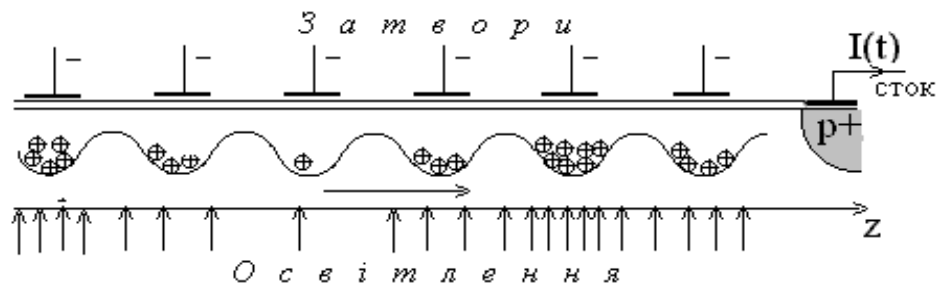


Рис.8.11.

дірки заповнюють потенціальні ями пропорційно до освітленості даного місця. Після того, як процес накопичування дірок закінчено їх починають зсувати (напр. праворуч) і виводити на електрод стоку. Струм $I(t)$ у колі цього електроду буде повторювати закон розподілу вздовж вісі z кількості дірок, накопичених у потенціальних ямах, тобто закон розподілу інтенсивності світла вздовж вісі z .

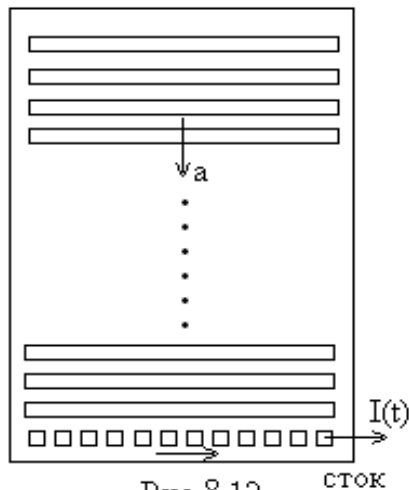


Рис.8.12.

Таким чином можна перетворити у електричний сигнал одномірне лінійне світлове зображення. Для перетворення у електричний сигнал двомірною світлового зображення систему треба ускладнити (рис.8.12). Поверхня напівпровідникової платівки покривається рядом затворів-смужок, під якими шляхом освітлення утворюється поле розподілу дірок, що повторює поле освітлення платівки.

За допомогою хвилі негативного потенціалу, що подається на затвори - смужки і біжить напрямку стрілки "а", це поле дірок стрибками переганяється вниз. Внизу знаходиться лінійний ряд затворів подібна до зображеної на рис.8.11, котра переганяє рядок зарядів праворуч до стоку. Таким способом одна за однієї перетворюються у вихідний струм стоку рядки світлового зображення, що були зпроектовані на напівпровідникову платівку. Отже робиться те, що досі здійснювалось лише в складних і дорогих електронно - проміневих трубках: іконоскопах, ортиконах, суперіконоскопах і відіконах.

Існуючі фото - ПЗП дозволяють створювати зображення, що мають кілька сотень рядків і кількома сотнями елементів у рядку, тобто за якістю зображення не поступаються вищезгаданим вакуумним електронно-променевим приладам, а по габаритам, вазі і вартості набагато переважають.

**Контрольні питання до розділу
"Поняття про оптоелектроніку"**

1. Для яких цілей використовуються прилади оптоелектроніки?
8. На якому фізичному явищі ґрунтується принцип дії фоторезистора? Опишіть основні закономірності цього явища.
3. В якій області фотодіода (р чи n) відбувається народження електронно-діркових пар, які обумовлюють його фотострум?
4. Чому фотодіоди потрібно виготовляти з монокристалів, тоді як фоторезистори можуть бути полікристалічними?
5. Чи залежить величина фотоструму фотодіоду від прикладеної до нього напруги? Поясніть як та чому.
6. Яка інерційність фотодіодів? Якими явищами вона визначається?
7. Яка фізична причина виникнення фото-е.р.с. в фотодіоді, який працює у вентильному режимі?
8. Вкажіть області практичного використання фотодіодів у вентильному режимі.
9. Чому у фототранзистора відсутній (або вимкнений) вихід бази?
10. В чому суть явища інжекційної електролюмінесценції, яке є основою дії світлодіодів?
11. Чим визначається колір світіння світлодіодів?
18. Чому спектр випромінювання світлодіодів має вигляд не спектральної лінії, а смуги?
13. Як в напівпровідниковому лазері досягається інверсна населеність рівнів?
14. Чому більшість сучасних напівпровідникових лазерів працює в імпульсному, а не в неперервному режимі?
15. Чи буде напівпровідниковий лазер випромінювати світло, якщо струм через нього буде меншим порогового?
16. Для чого в напівпровідниковому лазері торці кристала слід шліфувати та робити їх строго плоско-паралельними?
17. Що таке оптрон? Для яких цілей використовуються оптрони? Наведіть приклади.
18. Чи може вихідний струм оптрона бути більшим за вхідний?
19. Що таке волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ)? Які переваги вона має у порівнянні з існуючими лініями зв'язку?
20. Навіщо у фотоелектронному ПЗЗ робиться велика кількість затворів?
21. Якими фізичними процесами визначається швидкодія фото-ПЗЗ?
22. Які переваги фото-ПЗЗ порівняно з електро-променевими фотоелектронними приладами?