



Філінюк Микола Антонович – доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії інженерних наук України, професор кафедри ЕНС Вінницького національного технічного університету. Підготував 4 докторів, 15 кандидатів технічних наук і 15 магістрів. Автор більше 700 наукових та науково-методичних робіт, у тому числі 32 монографій, посібників та навчальних посібників та більше 100 авторських свідоцтв та патентів на винаходи.



Лазарев Олександр Олександрович кандидат технічних наук, доцент кафедри ЕНС Вінницького національного технічного університету. Автор понад 250 наукових та методичних праць. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження електронних пристроїв на базі R-, L-, C- негатронів.



Войцеховська Олена Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри ТКСТБ Вінницького національного технічного університету. Автор понад 70 наукових і навчально методичних публікацій. Сфера наукових інтересів: розробка та дослідження імітансних інформаційних пристроїв.



Фурса Світлана Євгенівна кандидат технічних наук, доцент кафедри БМІ Вінницького національного технічного університету. В 2007 році захистила дисертацію кандидата технічних наук на тему "Елементи та пристрої автоматики на основі транзисторних оптонегатронів". На кафедрі працює з 2005р. Автор 30 наукових робіт і 9 патентів України.



Ткачук Яна Сергіївна аспірант кафедри ПКТА. Автор понад 40 наукових праць, в тому числі 11 статей у фахових виданнях України, декількох закордонних публікацій, а також понад 10 авторських свідоцтв та патентів на винаходи. Сфера наукових інтересів: радіочастотні давачі на базі динамічних негатронів.

ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ

ЧАСТИНА V

ОПТОЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Елементна база електронних апаратів
Частина 5**

Оптоелектронні компоненти

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК 621.382(075)
Е 50

Автори:
Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В., Фурса С. Є., Ткачук Я. С.

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 22.12.2016 р.)

Рецензенти:
Т. Б. Мартинюк, доктор технічних наук, професор
Л. Б. Ліщинська, доктор технічних наук, професор
К. В. Огородник, кандидат технічних наук, доцент

Елементна база електронних апаратів. Частина 5. Оптоелектронні компоненти / Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В. та ін. : під загальною редакцією М. А. Філінюка, О. О. Лазарєва. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 116 с.

Навчальний посібник присвячений ознайомленню студентів з принципом роботи, основними параметрами та характеристиками оптоелектронних компонентів при вивченні дисциплін «Елементна база радіоелектронних апаратів та електронні прилади», «Елементна база телекомунікаційних систем», «Технічна електроніка» студентами, що навчаються за напрямами підготовки «Телекомунікації», «Радіоелектронні апарати» та спеціальностями «Телекомунікації та радіотехніка», «Електроніка», «Мікро- та наносистемна техніка». Може бути корисним студентам інших спеціальностей, науковим співробітникам і аспірантам, які цікавляться проблемами елементної бази електронної апаратури.

УДК 621.382(075)

ВНТУ, 2018

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ОЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ.....	5
2 ФОТОПРИЙМАЧІ	8
2.1 Фоторезистор.....	12
2.2 Фотодіод.....	21
2.3 Фототранзистор	36
2.4 Фототиристор	46
2.5 Багатоелементні фотоприймачі – прилади з зарядовим зв'язком	53
3 СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЧІ	63
3.1 Світлодіод	64
3.2 Лазер	71
3.2.1 Лазерний діод	75
4 ОПТИЧНІ ІНДИКАТОРИ	81
4.1 Індикатори розжарювання.....	83
4.2 Газорозрядні індикатори (ГРІ).....	85
4.3 Катодолюмінесцентні індикатори	88
4.4 Напівпровідникові індикатори	92
4.5 Плівкові електролюмінесцентні індикатори	95
4.6 Рідкокристалічні індикатори.....	97
5 ОПТРОНИ (ОПТОПАРИ)	104
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	115

ВСТУП

Сучасні електронні, біомедичні та телекомунікаційні системи і мережі – це складні комплекси технічних засобів, що забезпечують передавання інформації на будь-які відстані із заданими параметрами якості. Усі вони містять в своєму складі засоби відображення інформації, основою яких є саме оптоелектронні компоненти.

Оптоелектронні компоненти є чутливими до електромагнітного випромінювання в спектральному діапазоні від інфрачервоного до ультрафіолетового, а також до приладів, що випромінюють електромагнітну енергію в даному діапазоні.

При цьому розробка та ефективне використання будь-якої апаратури неможливе без знання фізичних принципів дії основних радіоелектронних компонентів, їх особливостей та номенклатури.

Тому метою навчального посібника є систематичне викладення принципів роботи, основних різновидів, параметрів та характеристик, конструкцій, галузей застосування базових оптоелектронних компонентів – світловипромінювальних, фотоприймальних, оптопар та індикаторних пристроїв.

Навчальний посібник за своїм змістом відповідає програмам дисциплін «Елементна база радіоелектронних апаратів та електронні прилади», «Елементна база телекомунікаційних систем» та «Технічна електроніка».

Може бути корисним студентам, аспірантам та науковим співробітникам, які цікавляться проблемами елементної бази електронної апаратури.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ОЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ

Означення

Оптоелектронні компоненти – прилади, що використовують для своєї роботи електромагнітне випромінювання оптичного (видимого або невидимого) діапазону.

У оптоелектроніці як носії інформації використовуються електромагнітні хвилі оптичного діапазону. Довжини хвиль оптичного випромінювання лежать в діапазоні від 1 нм до 1 мм (рис. 1.1).

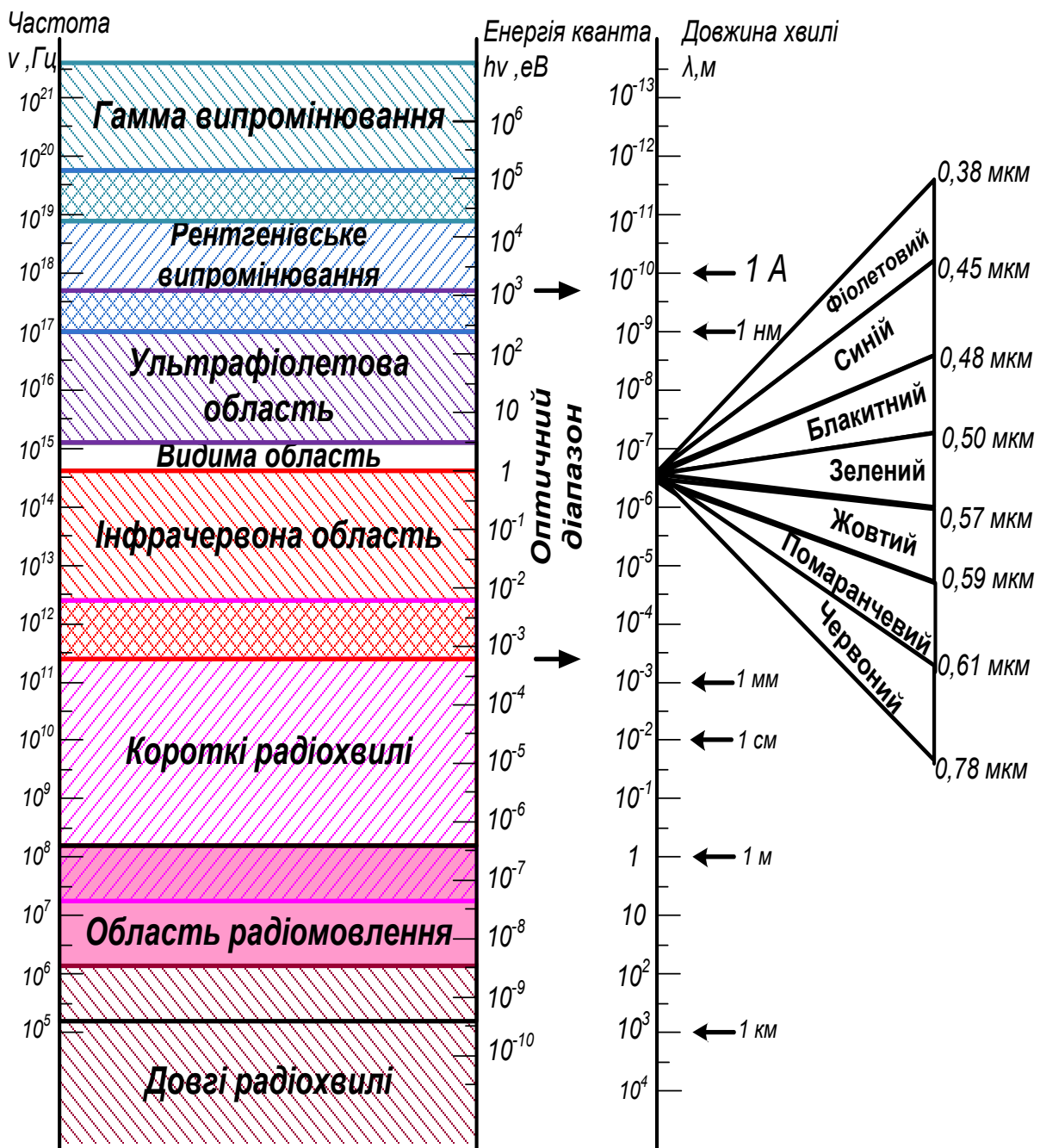


Рисунок 1.1 – Діапазони випромінювання

Класифікація

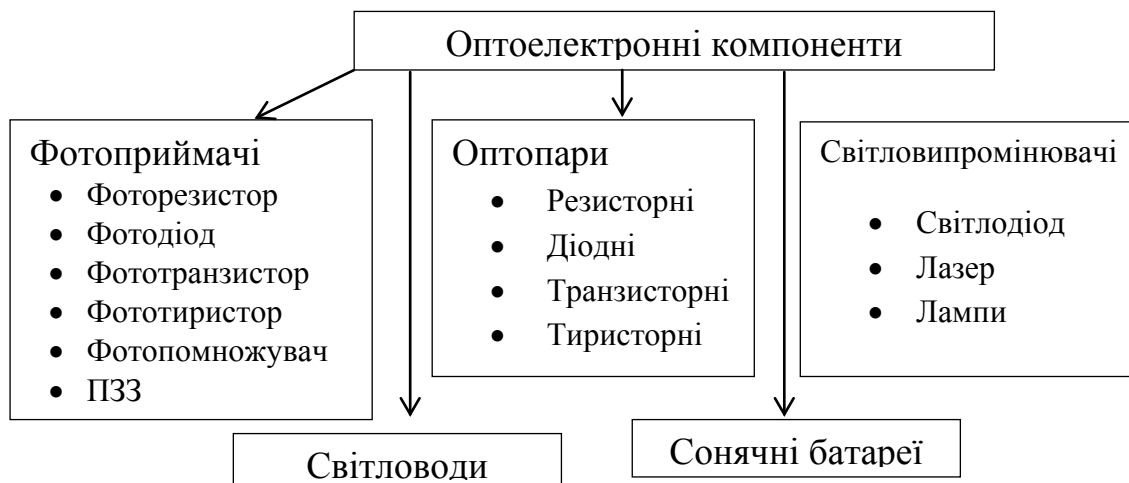


Рисунок 1.2 – Класифікація оптоелектронних компонентів

Переваги та недоліки

Оптоелектронним пристроям властиві такі переваги: можливість просторової модуляції світлових пучків, що в поєднанні зі змінами в часі дає три ступеня вільності (в чисто електронних колах – два); можливість значного розгалуження і перетину світлових пучків за відсутності гальванічного зв'язку між каналами; велике функціональне навантаження світлових пучків через можливість зміни багатьох їхніх параметрів (амплітуди, напрямку, частоти, фази, поляризації).

До недоліків оптоелектронних компонентів слід віднести погану часову та температурну стабільність характеристик, досить високу споживану електричну потужність, жорсткі вимоги до технології виготовлення.

Пристрої оптоелектроніки мають ряд відмінностей від інших пристроїв. Можна виділити нижчезказані:

1. Гостра спрямованість світлового випромінювання, обумовлена тим, що кутлова розбіжність променя пропорційна довжині хвилі і може бути меншою однієї мінуси. Це дозволяє концентровано і з малими втратами передавати електромагнітну енергію в задану область простору. У малогабаритних електронних пристроях лазерний промінь може бути спрямований на фоточутливі площадки мікронних розмірів;

2. Можливість подвійної – часової і просторової – модуляції світлового променя. Це дозволяє проводити паралельну обробку інформації, що дуже важливо при створенні високопродуктивних комплексів;

3. Оскільки джерело і приймач в оптоелектроніці не пов'язані один з одним електрично, а зв'язок між ними здійснюється тільки за допомогою світлового променя (електрично нейтральних фотонів), вони не впливають один на одного. І тому в оптоелектронні прилади потік інформації передається лише в одному напрямку – від джерела до приймача. Канали, по яких поширюється оптичне випромінювання, не впливають один на одного і

практично не чутливі до електромагнітних завад (звідси і висока завадостійкість);

4. Можливість безпосереднього оперування з візуально сприйнятими образами: фотозчитування, візуалізація (наприклад, на рідких кристалах).

Контрольні запитання

1. Що таке електромагнітне випромінювання? Назвіть його складові.
2. Що є основним носієм інформації в оптоелектроніці?
3. В якому діапазоні частот та довжин хвиль знаходиться видимий спектр?
4. Що входить до поняття оптоелектронних компонентів?
5. Назвіть основні групи оптоелектронних компонентів та їх складові.
6. Які ви знаєте переваги та недоліки оптоелектронних компонентів?
7. Назвіть діапазон частот, якому відповідає область радіомовлення.
8. Чи є оптоелектронні пристрої та системи чутливими до електромагнітних завад? Чому?
9. Яка довжина хвилі відповідає верхній межі оптичного діапазону?
10. Яка частка є носієм оптичної енергії?

2 ФОТОПРИЙМАЧІ

Означення

Фотоприймач – оптоелектронний прилад, в якому відбуваються зміни під дією оптичного випромінювання, такі, що дозволяють зафіксувати це випромінювання та виміряти його характеристики.

Фотоприймачі є обов'язковими та важливими елементами багатьох приладів та систем.

Призначення

Фотоприймач призначений для перетворення світлового випромінювання на електричні сигнали.

Класифікація

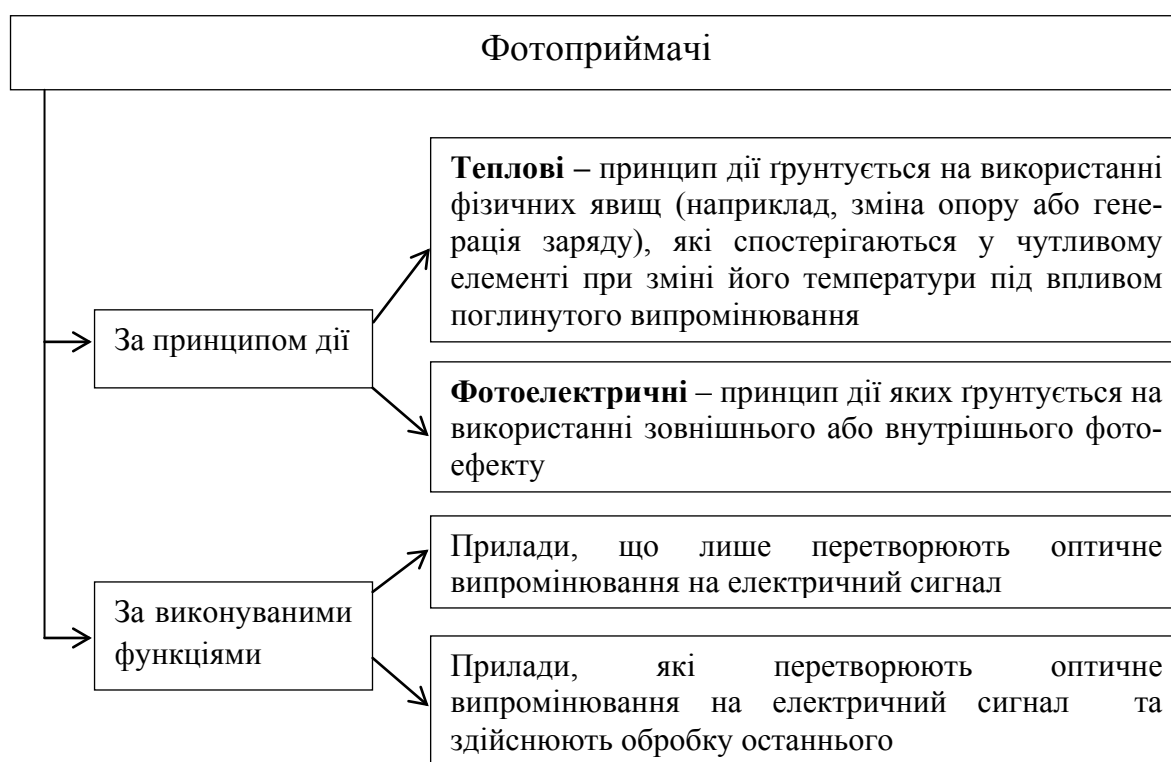


Рисунок 2.1 – Класифікація фотоприймачів

Як фотоприймачі можуть бути використані:

1. фоторезистори;
2. фотодіоди;
3. фототранзистори;
4. фототиристри;
5. фотопомножувачі та інші елементи.

Умовні графічні позначення (УГП) (рис. 2.2)

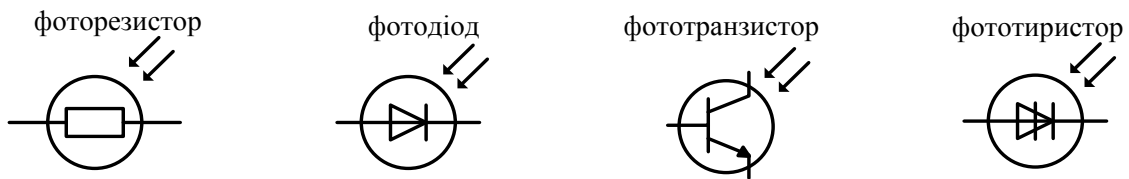


Рисунок 2.2 – УГП напівпровідникових фотоприймачів

Основні характеристики фотоприймачів

- Вольт-амперна характеристика відображає залежність струму, що проходить у колі фотоприймача, від напруги на ньому. Світловий (загальний) струм $I = I_T + I_\Phi$, де I_T – струм за відсутності освітлення; I_Φ – фотострум.

- Спектральна характеристика визначає реакцію фотоприймача на вплив випромінювання з різноманітною довжиною хвилі. Вона визначає спектральну область застосування приймача, а також його спектральну й інтегральну чутливості.

- Енергетична (світлова) характеристика відображає залежність фотовіддачі від інтенсивності збуджувального потоку випромінювання (амперватна, вольт-ватна, люкс-амперна характеристики). Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної або спектральної чутливості приймача від інтенсивності засвічування.

- Температурні характеристики визначають залежність ряду параметрів (темновий струм, темновий опір, чутливість і ін.) від температури навколишнього середовища. При цьому обумовлюються значення основних параметрів у крайніх точках робочого діапазону при робочій напрузі живлення фотоприймача. Температурний коефіцієнт фотоструму (TK) визначається відношенням

$$TK = [(I_2 - I_1) / I_1(T_2 - T_1)] \times 100\% ,$$

де I_1 і I_2 – світловий струм при температурі T_1 і T_2 , відповідно.

- Частотні характеристики визначають залежність фоточутливості від частоти модуляції світла. Вони є характеристикою інерційності фотоприймача.

Основні параметри фотоприймачів.

- Робоча напруга фотоприймача U_p – постійна напруга, прикладена до фотоприймача, при якій забезпечуються номінальні параметри при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах. Її вибирають із запасом відносно пробивної напруги.

- Максимально допустима напруга U_{max} – максимальне значення постійної напруги, при якому відхилення параметрів приладу від номінальних значень не перевищує встановлених меж. При роботі в імпульсному режимі U_{max} може бути збільшена.

- Потужність розсіювання, що виділяється при проходженні фотоструму та визначає розігрів фотоприймача. Велика потужність, що розсіюється, може призвести до необоротної зміни струмів I_m і I_ϕ . Кожний приймач характеризується певним значенням максимальної потужності розсіювання P_{don} , яке не повинно перевищуватися. Значення P_{don} залежить від умов тепловідводу, розмірів робочої площадки й інших чинників.

- Темновий опір R_m – опір фотоприймача за відсутності падаючого на нього випромінювання в діапазоні його спектральної чутливості.

- Диференціальний опір R_ϕ – відношення малих приростів напруги і струму на фотоприймачі.

- Темновий струм фотоприймача I_m – струм, що проходить через фотоприймач при зазначеній напрузі на ньому за відсутності потоку випромінювання в діапазоні спектральної чутливості.

- Короткохвильова (довгохвильова) межа спектральної чутливості – найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якому монохроматична чутливість фотоприймача дорівнює 0,1 її максимального значення.

- Динамічний діапазон лінійності (у децибелах) характеризує область значень променистого потоку Φ (від Φ_{max} до Φ_{min}), для якого енергетична характеристика лінійна: $\Delta = 10 \lg(\Phi_{max} / \Phi_{min})$.

- Максимум спектральної характеристики фотоприймача – довжина хвилі, що відповідає максимуму чутливості фотоприймача. Положення максимуму залежить від об'ємного часу життя незрівноважених носіїв, швидкості поверхневої рекомбінації, геометричних розмірів світлочутливої площадки й інших чинників.

- Струмова фоточутливість S_i (А/лк або А/Вт) визначає значення фотоструму, утворюваного одиничним потоком випромінювання. Нерідко замість потоку випромінювання, що падає на фотоприймач, задається щільність падаючого потоку, що вимірюється у Вт/м².

- Вольтова фоточутливість S_u характеризує значення сигналу у вольтах, віднесене до одиниці падаючого потоку випромінювання.

Струмова і вольтова чутливості називаються інтегральними, якщо вони характеризують чутливість до інтегрального потоку випромінювання і монохроматичними, якщо характеризують фоточутливість до монохроматичного випромінювання. Звичайно фотоприймачі описують або інтегральною фоточутливістю, або фоточутливістю в максимумі випромінювання ($S_{i \lambda max}$) із вказанням довжин хвиль, при яких чутливість зменшується вдвічі.

Інтегральні струмову і вольтову чутливості S_i і S_u обчислюють за формулами:

$$S_i = \frac{I - I_T}{\Phi}, \quad S_u = \frac{U - U_T}{\Phi},$$

де I , U і I_m , U_m – загальні і темнові струм та напруга на фотоприймачі, відповідно.

- Гранична чутливість P_{nop} визначає рівень потужності світлового потоку, при якому сигнал дорівнює шуму.

- Інерційність фотоприймачів характеризується сталими часу фронту наростання τ_n і спаду τ_{cn} фотовідповіді при імпульсному засвічуванні. Ними визначаються граничні робочі частоти модуляції світла, при котрих ще не відбувається помітного зменшення фотовідповіді. Як правило, $\tau_n < \tau_{cn}$. Стала часу τ_{cn} визначається як інтервал часу після припинення впливу випромінювання, після закінчення якого напруга фотосигналу, що спадає експоненціально, зменшується в e разів. Якщо використовується синусоїдальна модуляція світлового потоку, то швидкодія фотоприймача характеризується граничною частотою $f_{гр}$ на якій фотовідповідь зменшується до рівня 0,7 відносно стаціонарного значення.

- Напруга шуму фотоприймача $U_{ш}$ – середнє квадратичне значення флуктуації напруги на заданому навантаженні в колі фотоприймача в зазначеній смузі частот.

- Струм шуму фотоприймача $I_{ш}$ – середнє квадратичне значення флуктуації струму, що проходить через фотоприймач у зазначеній смузі частот.

- Ефективна фоточутлива площа S_{ef} – площа фоточутливого елемента, еквівалентного за фотосигналом фотоприймачу, чутливість якого рівномірно розподілена по фоточутливому елементу і дорівнює максимальному значенню локальної чутливості S_{max} даного фотоприймача.

- Ефективне поле зору фотоприймача Ω_{ef} – тілесний кут, обумовлений співвідношенням:

$$\Omega_{ef} = \frac{1}{S_{\theta=0}} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} S(\theta, \varphi) \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi,$$

де S – чутливість фотоприймача;

θ – кут між напрямком падаючого випромінювання і нормаллю до фоточутливого елемента;

φ – азимутальний кут.

- Коефіцієнт фотоелектричного зв'язку багатоеlementного фотоприймача $K_{\phi,z}$ – відношення напруги сигналу з неопроміненого елемента в багатоеlementному фотоприймачі до напруги фотосигналу із сусіднього опроміненого елемента, визначений на лінійній ділянці енергетичної характеристики і при робочій напрузі на всіх елементах.

2.1 Фоторезистор

Означення

Фоторезистор – це світлочутливий резистор, принцип дії якого ґрунтується на зміні провідності напівпровідникового матеріалу під дією світлового випромінювання.

Умовні графічні позначення

Резистори мають розміри 10 мм × 4 мм та позначаються літерою R (рис. 2.3). Зверху справа ставиться номер резистора. Коло позначає корпус (таким самим чином корпус позначають й на решті описаних елементів).

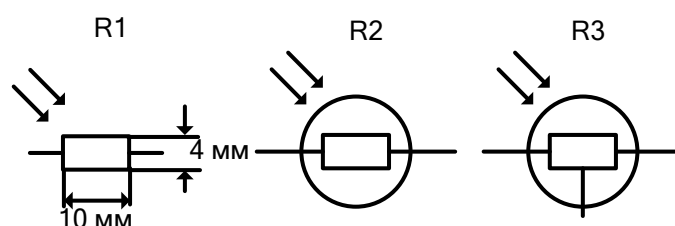


Рисунок 2.3 – Умовне позначення фоторезистора: а – загальне позначення фоторезистора без корпусу, б – в корпусі, в – диференціальний фоторезистор

Система маркування

Вітчизняна система (ГОСТ 17704-72 – Приборы полупроводниковые. Приемники лучистой энергии фотоэлектрические. Классификация и система обозначений.) позначень фоторезисторів ранніх випусків містить три букви і цифру. Перші дві букви – ФС (від. рос. фотосопротивление) або СФ, за ними слідує цифра, що позначає матеріал світлочутливого елемента: 2 – сірчистий кадмій, 3 – селенід кадмію; остання цифра вказує на номер розробки. У випусках попередніх років матеріал позначався літерами А – сірчистий свинець; К – сірчистий кадмій; Д – селенід кадмію.

Наприклад, СФ2-5 – фоторезистор сірчисто-кадмієвий, призначений для роботи в фотоелектричних автоматичних пристроях, в кіно- і фотоапаратурі.

Таблиця 2.1 – Типові позначення фоторезисторів

Вид фоторезисторів	Старе позначення	Нове позначення
Сірчисто-свинцеві	ФСА-0, ФСА-1, ФСА-6, ФСА-Г1, ФСА-Г2	
Сірчисто-кадмієві	ФСК-0, 1, 2, 4, 5, 6, 7, ФСК-Г1, ФСК-Г2, ФСР-Г7, ФСК-П1	СФ2-1, 2, 4, 9, 12
Селенисто-кадмієві	ФСД-0, ФСД-1, ФСД-Г1	СФ3-1, 8

Принцип дії

Фоторезистор являє собою (рис. 2.4) плівку зі спеціального напівпровідникового матеріалу 2 (сірчистий свинець, селенід кремнію, сірчистий кадмій), яка має дуже високу чутливість до променів світла. Плівку наносять на ізолювальну підкладку 1 зі скла або кераміки шляхом пульверизації вихідного матеріалу із суспензії (рідше – шляхом випаровування матеріалу у вакуумі або спікання в таблетки порошкоподібної маси). Як електроди 4 зазвичай застосовують плівки металів, які не піддаються корозії (золото, платина, срібло) та наносяться випаровуванням у вакуумі. Для захисту від вологи, повітря і інших зовнішніх впливів, чутливі елементи фоторезисторів покривають шаром захисного лаку 3 – герметика. При цьому потрібно, щоб шар лаку мав достатню прозорість в тій області спектра, для роботи в якій призначений фоторезистор, був вологостійким і не змінював своїх властивостей в межах усього діапазону робочих температур.

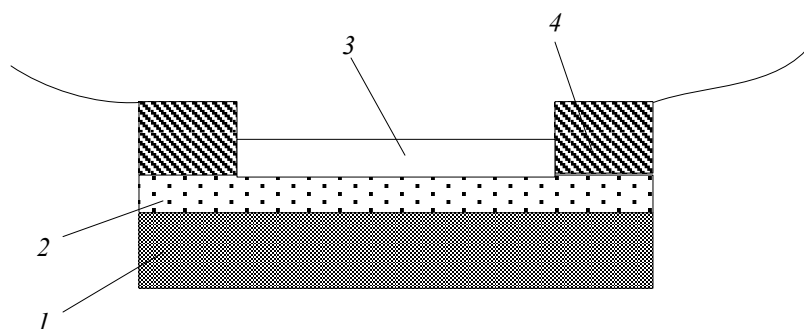


Рисунок 2.4 – Будова фоторезистора: 1 – підкладка, 2 – фоточутливий напівпровідниковий матеріал, 3 – герметик, 4 – електроди

Принцип дії фоторезистора базується на використанні явища фотопровідності напівпровідників, яка залежить від концентрації електронів в зоні провідності і дірок у валентній зоні.

Фотопровідність – це збільшення електричної провідності напівпровідника під дією світла. Причина фотопровідності – збільшення концентрації носіїв заряду – електронів у зоні провідності і дірок у валентній зоні. Оскільки світлочутливий шар напівпровідникового матеріалу в фоторезисторах розміщений між двома струмопровідними електродами, під впливом світлового потоку електричний опір шару змінюється в кілька разів (в деяких типів фоторезисторів він зменшується на два-три порядки).

Основні характеристики

- Вольт-амперна, для фоторезисторів практично лінійна (рис. 2.5, а).

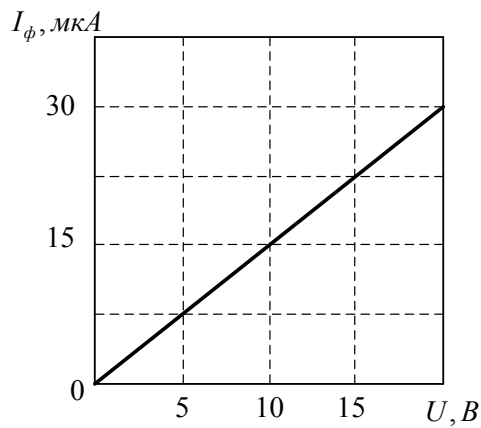
- Світлова (люкс-амперна), що характеризує залежність фотоструму від падаючого світлового потоку постійного спектрального складу. Напів-

провідникові фоторезистори мають нелінійну люкс-амперну характеристику (рис. 2.5, в). Найбільша чутливість у них при малих освітленостях. Це дозволяє використовувати фоторезистори для вимірювання дуже малих інтенсивностей випромінювання. При збільшенні освітленості світловий струм зростає приблизно пропорційно квадратному кореню з освітленості. Нахил люкс-амперної характеристики залежить від прикладеної до фоторезистора напруги.

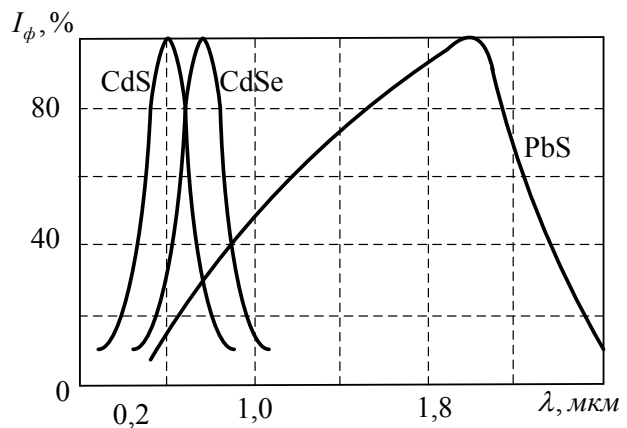
- Спектральна характеристика визначається матеріалом, який використовується для виготовлення світлочутливого елемента. (рис. 2.5, б).

- Частотна, що характеризує чутливість фоторезистора при дії на нього світлового потоку, який змінюється з певною частотою.

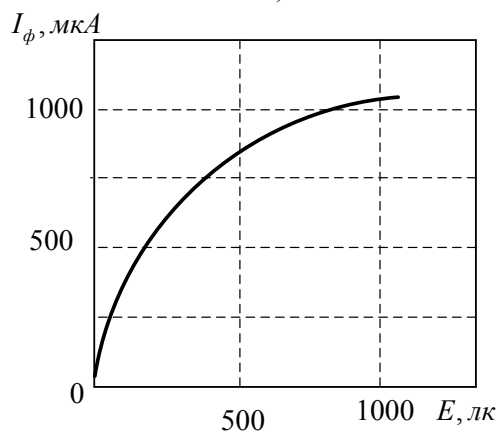
Наявність інертності у фоторезисторів приводить до того, що величина їхнього фотоструму залежить від частоти модуляції падаючого на них світлового потоку – зі збільшенням частоти світлового потоку фотострум зменшується (рис. 2.5, г).



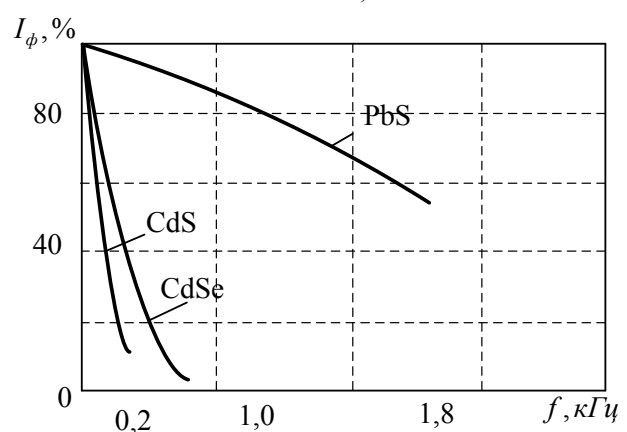
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.5 – Характеристики фоторезисторів:
а – вольт-амперна; б – спектральні; в – світлова (люкс-амперна);
г – частотні

Основні параметри

- Робоча напруга U_p – постійна напруга, прикладена до фоторезистора, за якої забезпечуються номінальні параметри при тривалій його роботі в заданих експлуатаційних умовах.

- Максимально допустима напруга фоторезистора U_{max} – максимальне значення постійної напруги, прикладеної до фоторезистора, за якої відхилення його параметрів від номінальних значень не перевищує зазначених меж при тривалій роботі в заданих експлуатаційних умовах.

- Темновий опір R_T – опір фоторезистора за відсутності освітлення (при прикладеній робочій напрузі U_p та темновому струмі I_T , $R_T = U_p / I_T$).

- Темновий струм I_T – струм, що протікає через фоторезистор, включений в коло з джерелом ЕРС, за відсутності освітлення.

- Світловий струм I_c – струм фоторезистора при робочій напрузі і освітленості 200 лк від джерела випромінювання з колірною температурою 2850 К. Тоді опір освітленого резистора $R_{cv} = U_p / I_{cv}$.

- Фотострум I_ϕ – різниця між світловим і темновим струмом фоторезистора.

- Кратність зміни опору – відношення R_T/R_{cv} , де R_{cv} – опір фоторезистора при освітленості 200 лк від джерела випромінювання з колірною температурою 2850 К.

- Питома чутливість K_0 – відношення фотоструму до добутку величини падаючого на фоторезистор світлового потоку на прикладену до нього напругу, мкА / (лм · В)

$$K_0 = I_\phi / (\Phi U) ,$$

де I_ϕ – фотострум, який дорівнює різниці струмів, що протікають по фоторезистору в темряві і при певній (200 лк) освітленості, мкА; Φ – падаючий світловий потік, лм; U – напруга, прикладена до фоторезистора, В.

- Інтегральна чутливість S_{int} – добуток питомої чутливості на граничну робочу напругу $S_{int} = K_0 \cdot U_{max}$.

- Стала часу t_ϕ – час, протягом якого фотострум змінюється на 63%, тобто в e разів. Стала часу характеризує інерційність приладу і впливає на вигляд його частотної характеристики.

Еквівалентна схема

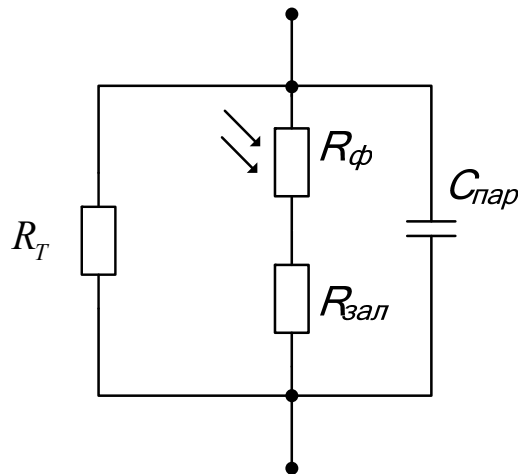


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема фоторезистора.

На схемі: R_m – темновий (великий) опір, $R_{зал}$ – залишковий (малий) опір, R_ϕ – фоточутливий опір (обернено пропорційний освітленості), $C_{пар}$ – паразитна ємність

Типова схема включення

Фоторезистор має однакову провідність в обох напрямках, включається послідовно з керованим ним пристроєм і джерелом енергії (рис. 2.7).

Фоторезистор може реагувати на появу та зникнення світлового потоку, тобто є світловим реле.

За відсутності освітлення або за постійного освітлення фоторезистор являє собою активний опір, і струм, що протікає по ньому, пропорційний прикладеній напрузі, а в разі постійної величини прикладеної напруги – величина струму пропорційна інтенсивності діючого світлового потоку.

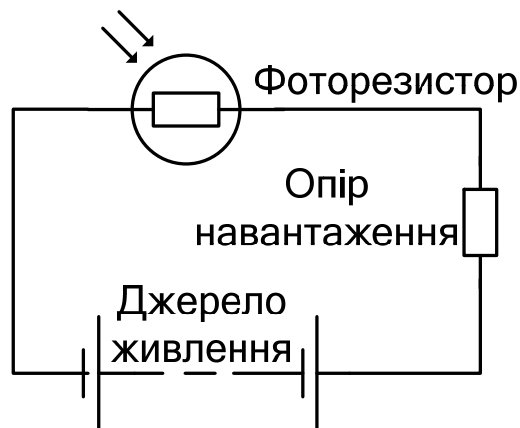


Рисунок 2.7 – Електрична схема включення фоторезистора

Конструкції

Для виготовлення серійних фоторезисторів сьогодні використовують, головним чином, два типи матеріалів: сірчистий кадмій та селенистий кадмій.

Світлочутливий елемент фоторезистора виготовляється у вигляді прямокутної або круглої пігулки, спресованої з напівпровідникового матеріалу (рис. 2.8, а) або тонкої плівки на скляній підкладці (рис. 2.8, б). Елемент може бути виконаний також з монокристалічних зразків напівпровідникових матеріалів. Світлочутливий елемент фоторезисторів зазвичай поміщають в пластмасовий або металевий корпус. Окремі типи фоторезисторів виконуються в безкорпусному виконанні (ФВА-1а, ФСК-7а, ФСД-1а і т. д.). Світлочутливий елемент в них захищений від дії зовнішнього середовища прозорою пластмасовою плівкою.

Залежно від призначення фоторезистори можуть бути одно- і багатоеlementні (мозаїчні), з охолодженням і без, відкриті і герметизовані, виконані у вигляді окремих виробів або у складі інтегральних схем.

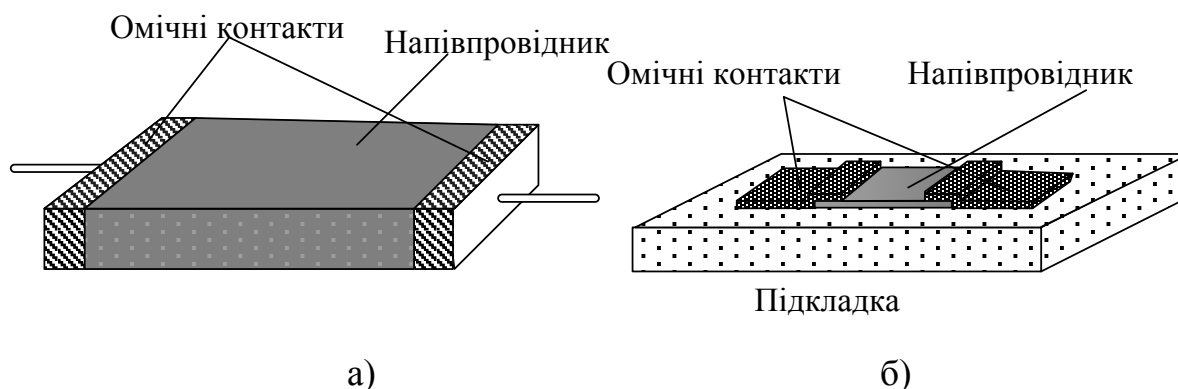


Рисунок 2.8 – Конструкції фоторезисторів: монокристалічна (а), плівкова (б)

Залежно від конструкції фоторезистори можна підрозділити на такі групи:

1. Фоторезистори, що не мають корпусу. До цієї групи відносяться фоторезистори, які мають типові позначення ФСК-1а, ФСК-5, ФСК-7а і ФСК-7б. Фоторезистор ФСК-5 є світлочутливим елементом, що має два електроди. Він призначений для складання блоків.

У фоторезисторів типів ФСК-1а і ФСК-7 світлочутливий елемент приєднаний до скляної пластини. Остання у ФСК-1а має срібні електроди, що допускають припаювання до них металевих провідників. З'єднання між

електродами елемента та пластини у ФСК-1а здійснено за допомогою контактуючої пасти на основі срібла;

2. Фоторезистори, які мають пластмасовий корпус. У пластмасових корпусах випускаються ФСК-1, ФСК-2, ФСК-4а і ФСК-6, а також ФСК-М1 і ФСК-М2. Світлочутливі елементи у них кріпляться на підставці, а зверху закриваються кришкою (крім ФСК-4а), що має вікно для освітлення робочої ділянки.

Фоторезистори ФСК-1, ФСК-2 і ФСК-6 мають зовнішні металеві виводи, які розраховані на включення в октальну радіолампову панель.

У ФСК-4а виводи розраховані на включення в спеціальну панель або під паяння до них провідників. З ФСК-4а зручно набирати блоки, що складаються з різної кількості фоторезисторів.

Фоторезистори ФСК-6 мають трохи специфічну конструкцію через їх цільове призначення. Вони призначені для роботи у відбитому світлі;

3. Фоторезистори у металевому корпусі. У них світлочутливий елемент поміщається в металевий корпус з вікном зі скла. У типовому позначенні фоторезисторів в герметизированому виконанні додається літера «Г» (ФСК-Г1), а в тропічному виконанні – літера «Т» (ФСК-Г1Т);

4. Малогабаритні фоторезистори з вологозахистом світлочутливого елемента. Зовнішній вигляд і габарити фоторезисторів СФ2-1, СФ2-2, СФ3-2 і ФСК-П1 вказані на рис. 2.9.

Фоторезистори СФ2-1 мають прямокутну пластмасову основу, на торці якої розміщений світлочутливий елемент з дуже малою робочою площею. Від вологи робоча частина фоторезистора захищена товстим шаром прозорого епоксидного клею. Світлочутливі елементи фоторезисторів ФСК-П1, СФ2-2 і СФ3-2 розміщені в пластмасових корпусах з вікном із фотоскла товщиною 0,17 мм.

Для розширення функціональних можливостей фоторезистори доповнюють фільтрами, лінзами, оптичними модуляторами, попередніми підсилювачами (у мікромініатюрному виконанні), термостатами, підсвічуванням, системами охолодження та ін.

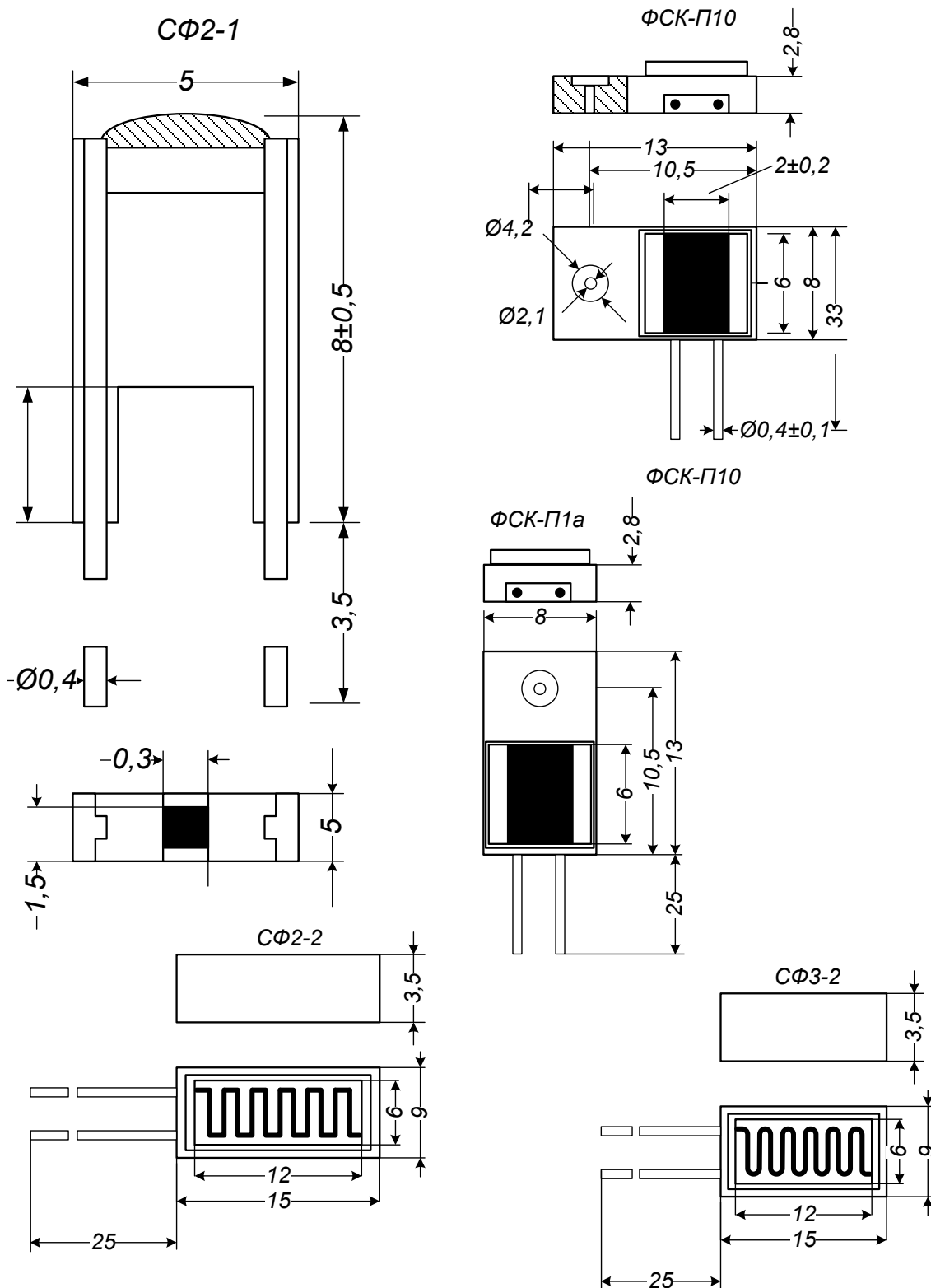


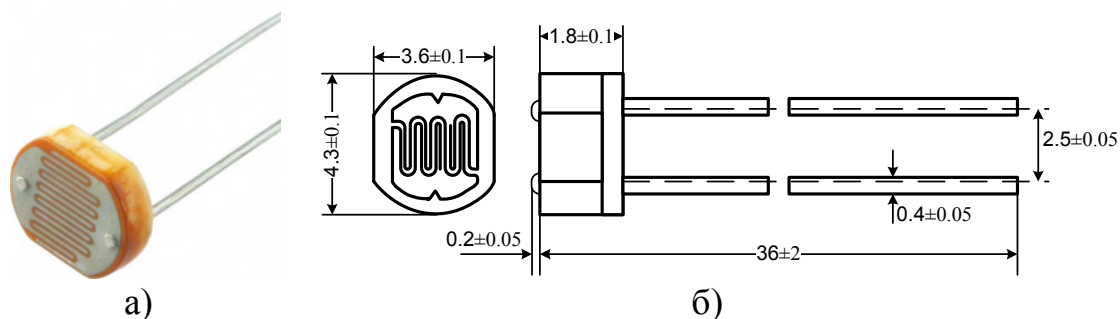
Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд і габарити фоторезисторів СФ2-1, СФ2-2, СФ3-2 і ФСК-П1

Приклади серійних приладів

1. Фоторезистори типу MLG, зокрема MLG4406 (рис. 2.10, а-в) (Виробник Mobicon Electronic components).
2. Фоторезистор ФСК-2 (рис. 2.10, г-д).

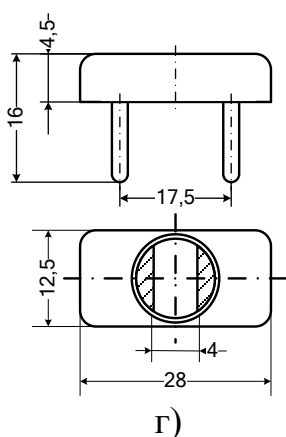
Таблиця 2.2 – Основні технічні параметри фоторезистора ФСК-2

Робоча напруга	50 В
Світловий струм	не менший 300 мкА
Темновий струм	не більший 15 мкА
Темновий опір	не менший 3,3 МОм
Кратність зміни опору	не менша 20
Стала часу за спадом струму	не більша 140 мс
Стала часу за наростанням струму	не більша 140 мс



MODEL NO.	DIMENSION	VOLTAGE APPLIED	POWER DISSIPATION	AMBIENT TEMPERATURE	LIGHT RESISTANCE		DARK RESISTANCE	100 γ 10	PEAK SENSITIVITY WAVELENGTH	RISE RESPONSE TIME	FALL RESPONSE TIME
	mm	V _{oc} max.	mW max.	°C	10 Lux (k Ω)	100 Lux (k Ω)	(M Ω)		(nm)	t _r (ms)	t _f (ms)
MLG 4406	4	150	90	-30 ~ +70	4 - 6	≤ 1	0.5	0.6	560	30	40

в)



г)

д)

Рисунок 2.10 – Конструкція корпусу фоторезистора MLG (а), зовнішній вигляд фоторезистора MLG (б), параметри фоторезистора MLG (в), конструкція корпусу фоторезистора ФСК-2 (г) та його зовнішній вигляд (д)

Галузі застосування

Завдяки високій чутливості, простоті і різноманітності конструкцій фоторезистори мають широке застосування в радіоелектроніці.

Основними галузями застосування є:

- системи фотоелектричної автоматики та телемеханіки;
- вимірювальні прилади;
- експонетричні прилади і фотодатчики;
- системи контролю;
- тепловізійна апаратура промислового, медичного та оборонного призначення.

У автоматичній фоторезистори з успіхом замінюють вакуумні та газонаповнені фотоелементи. Маючи підвищену допустиму потужність розсіювання порівняно з деякими типами фотоелементів, фоторезистори дозволяють створювати прості й надійні фотореле без підсилювачів струму.

Широко використовуються фоторезистори в поліграфічній промисловості при виявленні обривів паперової стрічки, контролі за кількістю аркушів, що подаються в друкарську машину.

У вимірювальній техніці фоторезистори застосовуються для вимірювання високих температур, для регулювання температури в різних технологічних процесах. Контроль рівня рідини і сипучих тіл, захист персоналу від входу в небезпечні зони, контроль за запиленістю і задимленістю найрізноманітніших об'єктів, автоматичні вимикачі вуличного освітлення та турнікети у метрополітені – ось далеко не повний перелік галузей застосування фоторезисторів. Фоторезистори знайшли застосування в медицині, сільському господарстві та інших галузях.

2.2 Фотодіод

Означення

Фотодіод – фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього підсилення, фоточутливий елемент якого містить структуру напівпровідникового діода.

Призначення – перетворює світло, яке потрапило на його фоточутливу ділянку, на електричний заряд за рахунок процесів в р-n-переході.

Класифікація:

- 1) р-і-n-фотодіод;
- 2) лавинний фотодіод;
- 3) фотодіод Шотткі;
- 4) фотодіод з гетероструктурою.

Умовні графічні позначення (рис. 2.11)

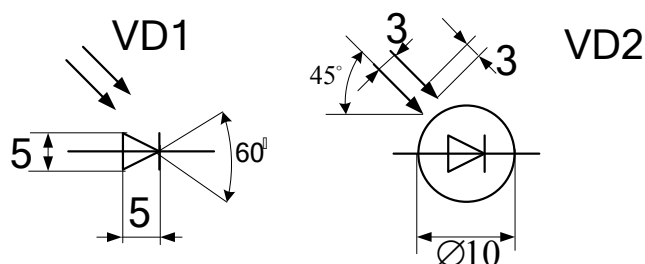


Рисунок 2.11 – Умовне графічне позначення фотодіода

Маркування

Вітчизняна система позначень діодів визначена галузевим стандартом ОСТ 11336.919-81.

В основу системи позначень покладено літерно-цифровий код.

Перший елемент (цифра або літера) позначає вихідний напівпровідниковий матеріал, другий (літера) – підклас приладів, третій (цифра) – основні функціональні можливості приладу, четвертий – число, що позначає порядковий номер розробки, п'ятий елемент – буква, умовно визначає класифікацію (розбракування за параметрами) приладів, виготовлених за єдиною технологією.

Для позначення *вихідного напівпровідникового матеріалу* використовуються такі символи:

Г або 1 – германій або його сполуки; К або 2 – кремній або його сполуки; А або 3 – сполуки галію; І або 4 – з'єднання індію.

Для визначення *підкласу* діодів використовують літери:

Л – випромінювальні оптоелектронні прилади; О – оптопари; Ф – фотоприлади.

Для позначення найхарактерніших експлуатаційних ознак приладів (їх функціональних можливостей) використовують такі цифри.

Для підкласу Л:

- 1 – випромінювальні діоди інфрачервоного випромінювання;
- 2 – випромінювальні модулі інфрачервоного випромінювання;
- 3 – світловипромінювальні діоди;
- 4 – знакові індикатори;
- 5 – знакові табло;

Для підкласу О:

Р – резисторні; Т – транзисторні; У – тиристорні; Д – діодні.

Для підкласу Ф:

- 1 – фотодіоди; 2 – фототранзистори.

Для позначення *порядкового номера* розробки використовується дво-значне число від 01 до 99. Якщо порядковий номер розробки перевищує число 99, то надалі застосовується тризначне число від 101 до 999.

Як *кваліфікаційні літери* використовуються літери російського алфавіту (за винятком букв З, О, Ч, И, Ш, Щ, Ю, Я, Ъ, Е).

Як *додаткові елементи* позначення застосовуються такі символи:

цифри 1 ... 9 – для позначення модифікацій приладу, що приводять до зміни його конструкції або електричних параметрів;

літера С – для позначення зборок – наборів однотипних приладів у загальному корпусі, не з'єднаних електрично або з'єднаних однойменними виводами;

цифри, написані через дефіс – для позначення таких модифікацій конструктивного виконання безкорпусних приладів:

1 – з гнучкими виводами без кристалотримача;

2 – з гнучкими виводами на кристалотримачі (підкладці);

3 – з жорсткими виводами без кристалотримача (підкладки);

4 – з жорсткими виводами на кристалотримачі (підкладці);

5 – з контактними площадками без кристалотримача (підкладки) і без виводів;

6 – з контактними площадками на кристалотримачі без виводів, літера Р після останнього елемента позначення – для приладів з парним підбором, літера Г – з підбором у четвірки, буква К – з підбором в шістки.

Розглянемо також варіанти маркування іноземних компонентів фірми «DC Components»:

<u>HIR</u>	<u>B</u>	<u>5</u>	-	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>D</u>	-	<u>C</u>
1	2	3		4	5	6		7

Розшифровка кожної позиції наведена нижче.

1. Тип приладу:

HIR – інфрачервоні світлодіоди; НРD – фотодіоди; НРТ – фототранзистори;

2. Форма: В – круглий тип; R – прямокутний тип; MIB – мініатюрний круглий тип; CL – для поверхневого монтажу;

3. Ідентифікаційний номер;

4. Лінза: 1 – чорна лінза; 2 – кольорова лінза; 3 – прозора лінза;

5. Тип вивідної рамки;

6. Відповідно до характеристик кристала А, В, С – табл. 2.3 – 2.5;

7. Кут випромінювання або приймання: А, В, С... (С>В>А).

Таблиця 2.3 – До пояснення системи маркування фотодіодів

Тип	Абсолютні максимальні значення			Електрооптичні характеристики								
	Чутлива площа	P_D	V_R	V_{OC}	I_{SC}	Пряма напруга			Швидкість реакції		Ємність виводів	Довжина хвилі
						тип.	макс.	при I_F	T_R	T_F		
	мм ²	мВт	В	мВ	мкА	В	В	мА	нс	нс	пФ	нм
A	7,16	150	33	350	35	1,3	1,6	100	45	45	72	900
C	1,55	100	30	410	16	1,3	1,8	100	10	10	42	900
D	0,19	50	20	390	2	1,0	1,5	40	6	6	50	900
E	0,66	70	30	410	7	1,0	1,5	40	10	10	42	900

Таблиця 2.4 – До пояснення системи маркування інфрачервоних світлодіодів

Тип	Матеріал	Абсолютні максимальні значення				Електрооптичні характеристики							
		P_D	I_F	I_{FM}	V_R	Пряма напруга			Зворотний струм		Довжина хвилі		
						тип.	макс.	при I_F	макс.	при V_R	λ_p	$\Delta\lambda$	при I_F
		мВт	мА	мА	В	В	В	мА	мА	В	нм	нм	мА
A	GaAs/GaAs	75	50	500	5	1,25	1,45	20	10	5	950	50	50
C	GaAlAs/GaAs	135	80	1000	5	1,21	1,40	20	10	5	940	50	50
D	GaAlAs/GaAs	150	100	1500	5	1,18	1,35	20	10	5	940	50	50
E	GaAlAs/GaA	170	100	1000	5	1,35	1,50	20	10	5	880	70	50
G	GaAlAs/GaAlAs	170	100	1000	4	1,47	1,60	20	10	4	850	45	50

Таблиця 2.5 – До пояснення системи маркування фототранзисторів

Тип	Абсолютні максимальні значення				Електрооптичні характеристики						
	P_C	V_{CEO}	V_{ECO}	I_C	Темновий струм		Швидкість реакції				Довжина хвилі
					I_{CEO}	при V_{CEP}	тип.	при V_{CE}	при I_C	при R_L	
	мВт	В	В	мА	нА	В	мкс	В	мА	Ом	нм
B	150	30	5	50	100	10	15/20	5	1	1000	900
D	150	30	5	50	100	10	15/20	5	1	1000	900
E	250	15	5	70	100	10	40/60	5	10	1000	900
H	300	30	5	25	100	20	15/18	5	1	1000	900

Європейська система позначення напівпровідникових приладів основана організацією Association International Pro Electron. За цією системою прилади для побутової апаратури широкого застосування позначаються двома літерами і трьома цифрами, для промислової і спеціальної апаратури – трьома літерами і двома цифрами. Так, у приладів широкого застосування після двох букв стоїть тризначний порядковий номер від 100 до 999. У приладів, використовуваних в промисловості і спеціальній апаратурі, третій знак – літера (літери використовуються у зворотному алфавітному порядку: Z, Y, X і т. д.), за якою йде порядковий номер від 10 до 99.

Якщо в одному корпусі є декілька однакових приладів, то позначення проводиться відповідно до коду (маркуванням) для одиночних дискретних приладів. За наявності в одному корпусі декількох різних приладів як друга літера позначення використовується літера G. До основного позначення може додаватися літера, яка вказує на відмінність приладу від основного типу за якими-небудь параметрами або корпусом.

В цій системі прийнято такі позначення (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Європейська система позначення напівпровідникових приладів

1 елемент Матеріал	2 елемент Тип приладу	3 елемент Серійний номер	4 елемент Модифіка- ція
A – германій B – кремній C – арсенід галію D – антимонід індію R – інші матеріали	A – детекторний, змішувальний діод B – варикап C – малопотужний низькочастотний транзистор D – потужний низькочастотний транзистор E – тунельний діод F – малопотужний високочастотний транзистор G – декілька приладів в одному корпусі H – магнітодіод K – генератори Холла L – потужний високочастотний транзистор M – модулятори та помножувачі Холла P – фотодіод, фототранзистор Q – випромінювальні прилади R – прилад, що працює в області пробую S – малопотужний перемикаючий транзистор T – потужний регульовальний чи перемикаючий прилад U – потужний перемикаючий транзистор X – помножувальний діод Y – потужний випрямляючий діод Z – стабілітрон	100–999 – прилади загального застосування Z10...A99 – прилади для промислового та спеціального застосування	Літера

Американською поширеною є система позначень JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council), прийнята Об'єднаною технічною радою з електронних приладів США (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Система позначень JEDEC

1 елемент число р-п переходів	2 елемент	3 елемент серійний номер	4 елемент модифікація
1 – діод 2 – транзистор 3 – тиристор 4 – оптопара	N	(100-9999)	Буква

За цією системою прилади позначаються індексом (кодом, маркуванням), в якому перша цифра відповідає числу р-п-переходів, за цифрою йдуть літера N та серійний номер, який реєструється асоціацією підприємств електронної промисловості (EIA). За номером можуть стояти одна або декілька літер, що вказують на розбивку приладів одного типу на типонімали за різними характеристиками. Однак цифри серійного номера не визначають тип вихідного матеріалу, частотний діапазон, потужність розсіювання і область застосування

Японська система JIS (Japanese Industrial Standard) (стандарт JIS-C-7012, прийнята асоціацією EIAJ-Electronic Industries Association of Japan). За нею можна визначити клас приладу, його призначення, тип провідності. Вид напівпровідникового матеріалу в цій системі не відбивається. Умовне позначення складається з п'яти елементів (табл. 2.8).

Таблиця 2.8 – Японська система JIS

1 елемент цифра	2 елемент літера	3 елемент тип приладу	4 елемент серійний номер	5 елемент модифікація
0 - фотодіод, фототранзистор 1 - діод 2 - транзистор 3 - тиристор	S	A - високочастотний PNP транзистор B - низькочастотний PNP транзистор C - високочастотний NPN транзистор D - низькочастотний NPN транзистор E - діод Есакі (чотиришаровий діод PNP) F - тиристор G - діод Ганна (чотиришаровий діод NPN) H - одноперехідний транзистор J - польовий транзистор з N-каналом K - польовий транзистор з P-каналом M - симетричний тиристор (семістор) Q - світловипромінювальний діод R - випрямляючий діод S - малосигнальний діод T - лавинний діод V - варикап Z - стабілітрон	10-9999	Одна або дві літери

У фототранзисторів і фотодіодів третій член маркування відсутній. Після маркування можуть бути додаткові індекси (N, M, S), що відображають вимоги спеціальних стандартів. Крім вищевказаних систем стандартних позначень, виробники приладів широко використовують внутрішні (внутрішньофірмові) позначення. У цьому випадку за основу літерного позначення найчастіше береться принцип скороченої назви фірми, коди матеріалу і застосування.

Принцип дії

Найпростіший фотодіод (рис. 2.12) являє собою звичайний напівпровідниковий діод, в якому забезпечується можливість впливу оптичного випромінювання на р-n-перехід.

У рівноважному стані, коли потік випромінювання повністю відсутній, концентрація носіїв, розподіл потенціалу та енергетична зонна діаграма фотодіода повністю відповідають звичайній р-n-структурі.

При впливі випромінювання в напрямі, перпендикулярному до площини р-n-переходу, в результаті поглинання фотонів з енергією, більшою, ніж ширина забороненої зони, в n-області виникають електронно-діркові пари. Ці електрони і дірки називають фотоносіями.

При дифузії фотоносіїв вглиб n-області основна частина електронів і дірок не встигає рекомбінувати і доходить до межі р-n-переходу. Тут фотоносії розділяються електричним полем р-n-переходу, причому дірки переходять в р-область, а електрони не можуть подолати поле переходу і скупчуються біля кордону р-n-переходу і n-області.

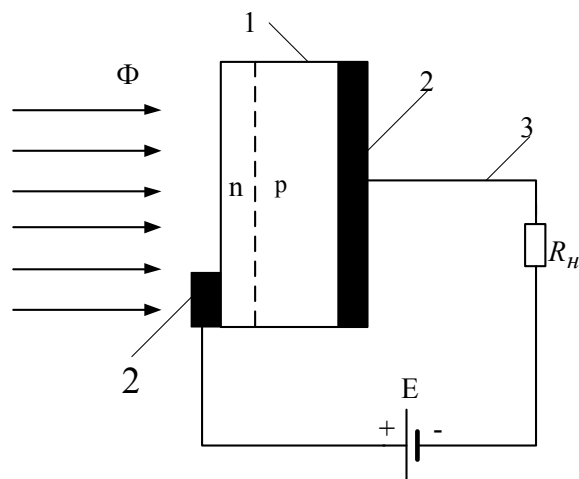


Рисунок 2.12 – Структурна схема фотодіода: 1 – кристал напівпровідника; 2 – контакти; 3 – виводи; Φ – потік випромінювання; E – джерело постійного струму; R_H – навантаження

Таким чином, струм через р-n-перехід зумовлений дрейфом неосновних носіїв – дірок. Дрейфовий струм фотоносіїв називається фотострумом. Фотоносії-дірки заряджають р-область позитивно відносно n-області, а фотоносії-електрони – n-область негативно відносно р-області. Виникаюча

різниця потенціалів називається фотоЕРС, а фізичний ефект – фотогальванічним. Генерований струм в фотодіоді – зворотний, він направлений від катода до анода, причому його величина тим більша, чим більша освітленість.

1. У р-і-п фотодіоді (рис. 2.13) середня і-область поглинання фотонів має власну провідність (і – intrinsic) та розташована між двома областями протилежної провідності – р⁺-базою та n⁺-колектором. Фотони вводяться в прилад крізь тонкошарове просвітлюване вікно.

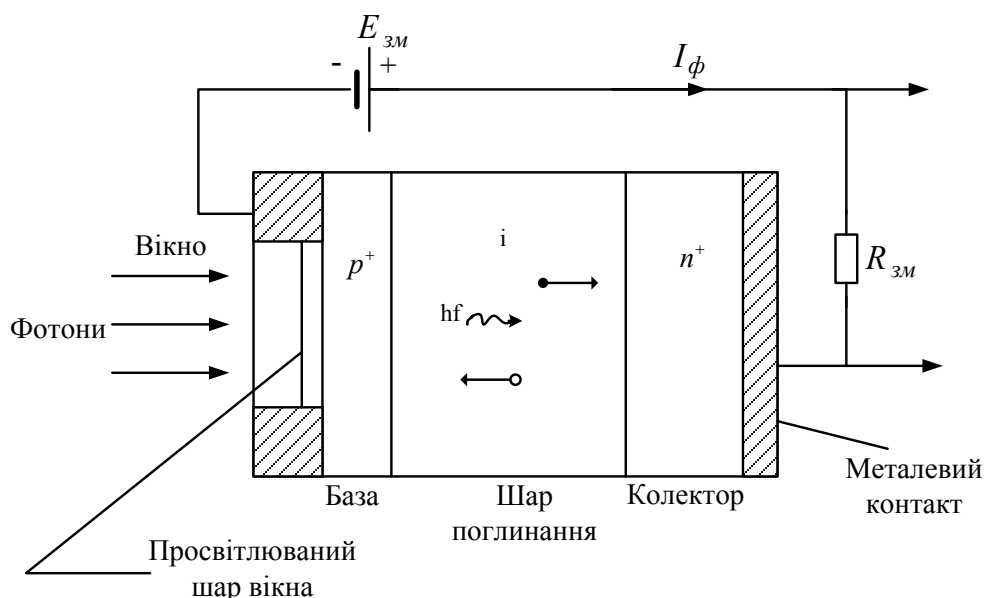


Рисунок 2.13 – Будова р-і-п-фотодіода

В основі роботи р-і-п-фотодіода лежить зворотно зміщений р-п-перехід. При нульовому змещенні ($E_{зм}=0$) струм дрейфу, що протікає через перехід, збалансований протилежними струмами через дифузію основних носіїв. За наявності змещення дифузія припиняється. Фотострум виникає при освітленні і-шару випромінюванням певної довжини хвилі. При цьому утворюються пари «електрон – дірка». На них впливає поле, створене джерелом $E_{зм}$ і зосереджене в і-шарі. Це поле змушує дрейфувати електрони і дірки. Створюється фотострум дрейфу.

Р-і-п-фотодіод є неефективним, якщо світлове випромінювання падає на сильно леговані шари n⁺ і р⁺. При цьому виникатиме дифузійний струм, який через більшу інерційності погіршує ефективність. З цієї причини шари n⁺ і р⁺ потрібно робити якомога тоншими, а і-шар (збіднений шар) – якомога товщим, щоб він поглинав всі падаючі промені.

Електричний струм буде текти, поки будуть утворюватися електронно-діркові пари, тобто поки буде падати світлове випромінювання.

2. Фотодіод Шоттки (фотодіод з бар'єром Шоттки). Спрощена структура фотодіода наведена на рис. 2.14. На підкладці з сильно легованого кремнію n⁺ вирощується тонка епітаксiальна плівка високоомного напівпровідника

n-типу. Потім на ретельно очищену поверхню матеріалу n-типу напиляють тонку ($\approx 0,1$ мкм) напівпрозору плівку, а на неї – антивідбивальне покриття.

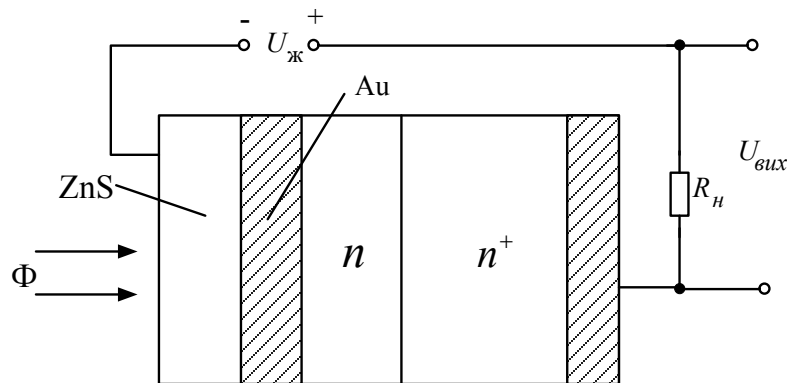


Рисунок 2.14 – Будова фотодіода Шотткі

Характерною рисою діодів Шотткі порівняно з діодами на р-n-переході є відсутність інжекції неосновних носіїв. Діоди Шотткі, як кажуть, «працюють на основних носіях», і в них відсутні відносно повільні процеси, пов'язані з накопиченням і розсмоктуванням неосновних носіїв в базі діода. Однак для фотодіодів Шотткі цей факт практично не має значення, оскільки вони працюють не при прямій напрузі. З точки зору застосування контакту метал-напівпровідник в фотодіодах слід підкреслити такі основні особливості. По-перше, в фотодіоді з бар'єром Шотткі з'являється можливість поглинання квантів випромінювання з енергією, меншою ширини забороненої зони. При цьому, якщо енергія кванта випромінювання більша висоти потенціального бар'єру, то збуджені електрони з металу можуть перейти в напівпровідник через потенційний бар'єр. В результаті довгохвильова межа спектральної характеристики фотодіода Шотткі зсувається в бік більш довгих хвиль. По-друге, в фотодіоді Шотткі із зростанням енергії квантів область поглинання випромінювання зсувається в шар об'ємного заряду, де існує поле, яке розділяє фотоносії. У фотодіоді з р-n-переходом при малій глибині поглинання фотострум практично дорівнює нулю. Отже, короткохвильова межа спектральної характеристики фотодіода Шотткі розташована при більш коротких хвилях. Взагалі спектральна характеристика фотодіода на основі контакту метал-напівпровідник ширша, ніж спектральна характеристика фотодіода з р-n-переходом з того ж напівпровідника.

3. Лавинний фотодіод (ЛФД). У структурі використовується лавинний пробій. Він виникає тоді, коли енергія фотоносіїв перевищує енергію утворення електронно-діркових пар. Цьому сприяє конструкція ЛФД (рис. 2.15). Лавинне множення виникає в шарі множення і досягається за рахунок збільшення напруги $E_{зм}$ до величини, близької до пробійної. При

цьому на р-n-переході встановлюється дуже сильне електричне поле ($E > 10^5$ В/см). Ця напруженість досягається у вузькій області. Фотони пролітають шар множення і не встигають взаємодіяти з кристалами. Носії зарядів утворюються в шарі поглинання і дрейфують до відповідних потенціалів. Рухаючись в сильному полі, носії набувають великої кінетичної енергії і, віддаючи частину її іншим носіям, звільняють нові носії (електрони і дірки).

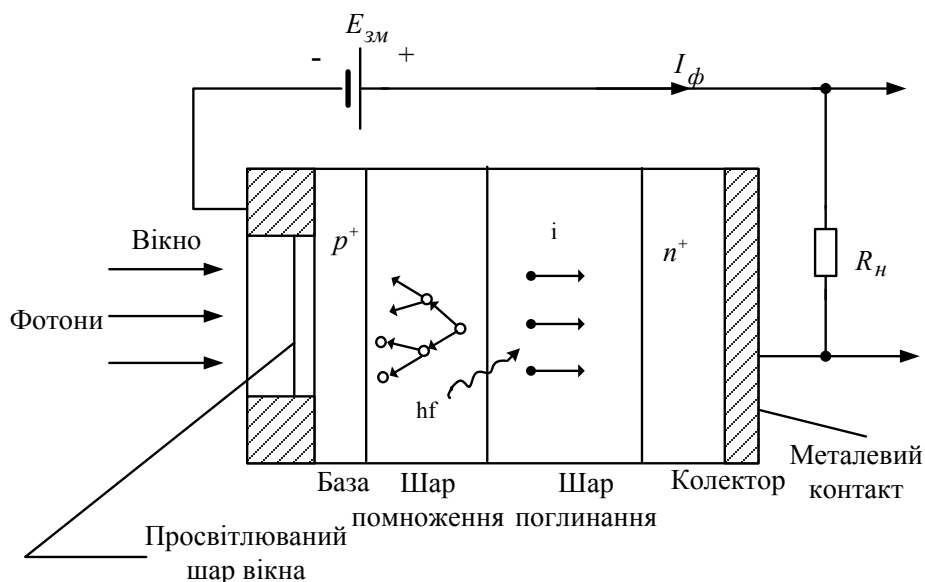


Рисунок 2.15 – Будова ЛФД

Кремнієві лавинні фотодіоди мають внутрішній механізм підсилення, швидкий час зчитування, низький темновий струм і високу чутливість в діапазоні від ультрафіолетової і до інфрачервоної області спектра. Компанія Hamamatsu виготовляє лавинні фотодіоди з розмірами активної області від 0,2 мм і до 5,0 мм в діаметрі. Ці фотодіоди поміщаються в герметичний металевий корпус.

4. Фотодіод з гетероструктурою (рис. 2.16). Гетеропереходом називають шар, що виникає на границі двох напівпровідників з різною шириною забороненої зони. Один шар p^+ відіграє роль «приймального вікна». Заряди генеруються в центральній області. За рахунок підбору напівпровідників з різною шириною забороненої зони можна перекрити весь діапазон довжин хвиль.

У конструкції будь-якого з гетерофотодіодів виділяються насамперед дві області: широкозонне вікно і активний фоточутливий шар. Широкозонне вікно без втрат пропускає випромінювання до активної області і в той же час є контактним шаром з малим послідовним опором. Процеси в активній області – поглинання випромінювання, накопичення (збирання) генерованих носіїв заряду – значною мірою протікають так само, як і в кремнієвої р-і-n-структури. Важлива відмінність полягає в тому, що вибо-

ром відповідного напівпровідникового з'єднання фоточутливого шару вдається забезпечити повне поглинання випромінювання (зокрема і в ІЧ-області) при товщині цього шару близько 1 мкм. Звідси поєднання високої швидкодії і високої фоточутливості при малих напругах живлення, що для Si-p-i-n-структур в довгохвильовій області принципово недосяжно: для повного поглинання випромінювання з $\lambda \approx 1$ мкм товщина і-області має становити близько 300 мкм, а робоча напруга – сотні вольт.

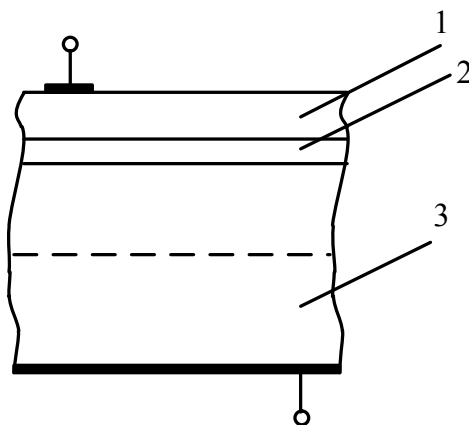


Рисунок 2.16 – Будова фотодіода з гетероструктурою (1 – широкозонне вікно; 2 – активна область; 3 – підкладка с перехідним шаром)

Таким чином, гетерофотодіоди певною мірою еквівалент кремнієвих р-і-n-діодів в довгохвильовій області, хоча їх значущість цим не вичерпується.

Основні характеристики

- Вольт-амперна характеристика фотодіода (рис. 2.17, а) являє собою залежність світлового струму при незмінному світловому потоці від напруги.

- Світлова характеристика фотодіода (рис. 2.17, б) відповідає прямій пропорційності фотоструму від освітленості. Це обумовлено тим, що товщина бази фотодіода значно менша дифузійної довжини неосновних носіїв заряду. Тобто практично всі неосновні носії заряду, що виникли в базі, беруть участь в утворенні фотоструму.

- Спектральна характеристика фотодіода (рис. 2.17, в) визначається зі сторони великих довжин хвиль шириною забороненої зони, при малих довжинах хвиль – великим показником поглинання і збільшення впливу поверхневої рекомбінації носіїв заряду із зменшенням довжини хвилі квантів світла. Тобто, короткохвильова межа чутливості залежить від товщини бази і від швидкості поверхневої рекомбінації. Положення максимуму в спектральній характеристиці фотодіода сильно залежить від ступеня зростання коефіцієнта поглинання.

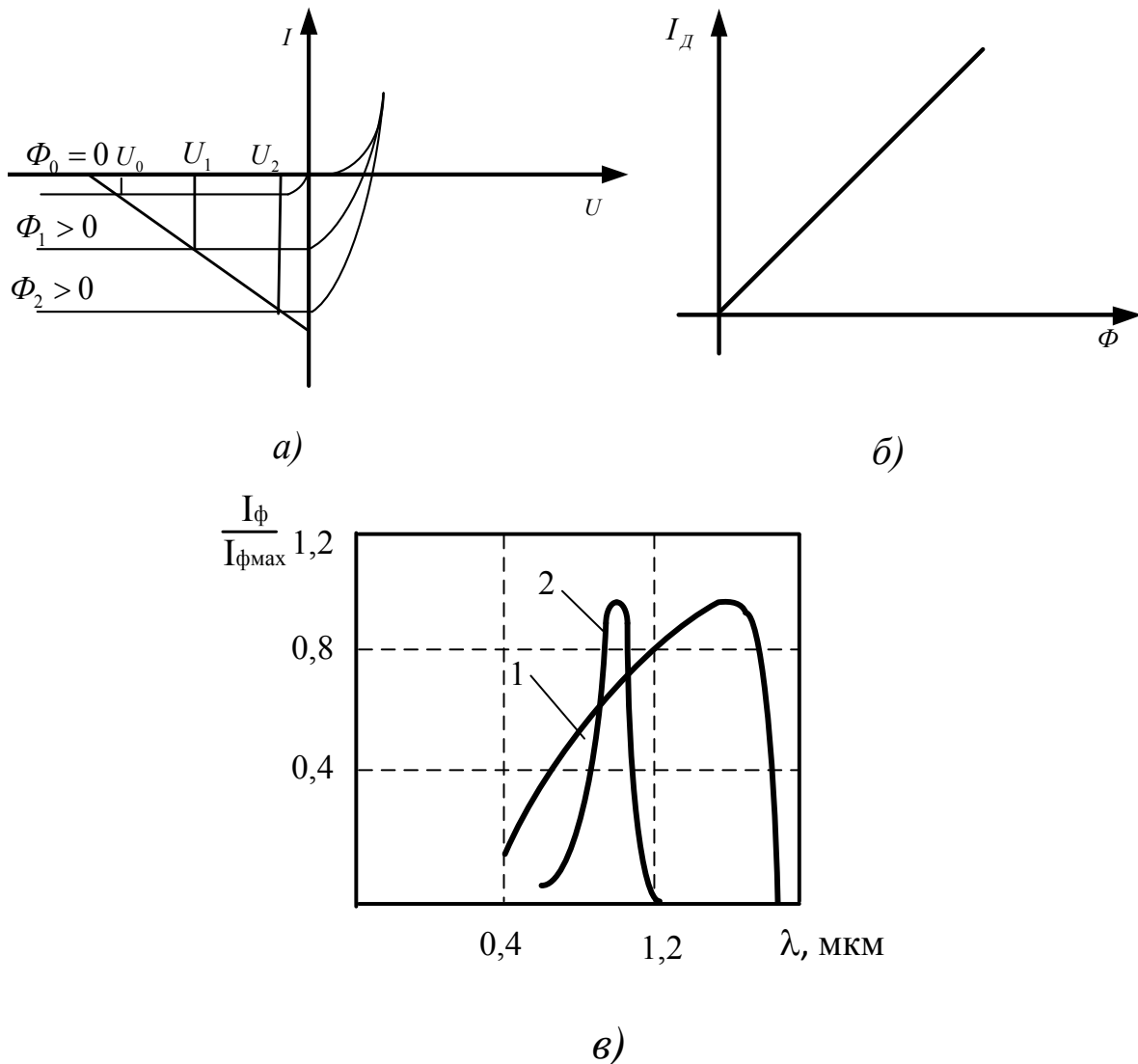


Рисунок 2.17 – Основні характеристики фотодіодів: ВАХ (а), світлова (б) та спектральна (в), 1 – германієвий фотодіод, 2 – кремнієвий фотодіод

Основні параметри

- Інтегральна струмова чутливість S_{int} — відношення фотоструму діода до інтенсивності падаючого немонохроматичного випромінювання заданого спектрального складу:

$$S_{int} = I_\phi / \Phi.$$

- Робоча напруга U_p — постійна напруга, прикладена до фотодіода, за якої забезпечуються номінальні параметри при тривалій його роботі в заданих експлуатаційних умовах.

- Темновий струм I_T — струм, що протікає через фотодіод при зазначеній на ньому нарузі під час відсутності потоку випромінювання в діапазоні спектральної чутливості.

- Стала часу τ – це час, протягом якого фотострум фотодіода змінюється після висвітлення або після затемнення фотодіода в e разів (63%) відносно сталого значення.

- Темновий опір R_T – опір фотодіода за відсутності освітлення.
- Діапазон спектральної чутливості, який лежить в межах 0,3–15 мкм.
- Довговічність — мінімальний термін служби фотодіода при нормальних умовах експлуатації.

- Інерційність, на яку впливає ряд фізичних факторів:

а) час дифузії або дрейфу нерівноважних носіїв через базу – t ;

б) час прольоту через р-п-перехід – τ ;

в) час перезарядки бар'єрної ємності р-п-переходу, що характеризується сталою часу – $RC_{бар}$;

г) товщина р-п-переходу, залежна від зворотної напруги і концентрації домішок у базі.

Еквівалентна схема

Еквівалентна схема фотодіода описує його основні властивості та зображена на рис. 2.18.

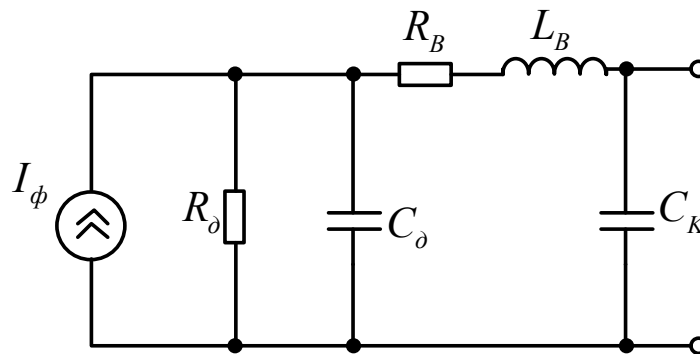


Рисунок 2.18 – Еквівалентна схема фотодіода: I_ϕ – генератор фотоструму, R_d – активний опір переходу діода, C_d – ємність переходу, R_B – опір виводів, L_B – індуктивність виводів діода, C_K – ємність контактів

Схеми включення

1. Фотодіоди можуть працювати в одному з двох режимів – без зовнішнього джерела електричної енергії (фотогальванічний режим, що використовують у сонячних батареях (рис. 2.19, а) або з зовнішнім джерелом електричної енергії (фотодіодний режим, що використовується в датчиках інтенсивності світлового потоку (рис. 2.19, б). При роботі фотодіода в режимі фотоперетворювача джерело живлення E включається в коло в зворотному напрямку.

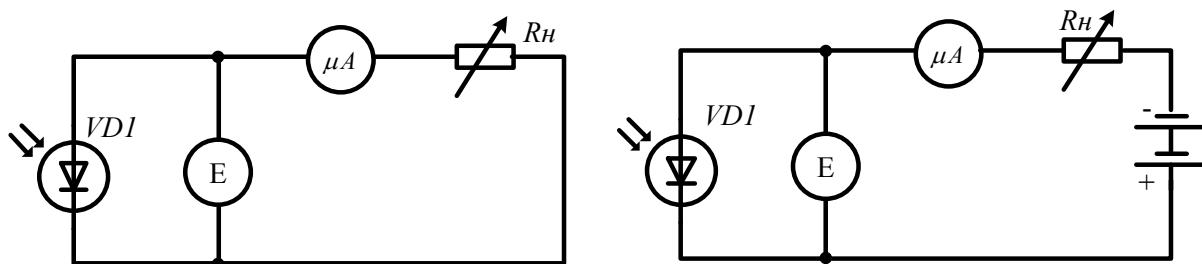


Рисунок 2.19 – Схеми включення фотодіода

Струм і напруга на навантажувальному резисторі R_n можуть бути визначені графічно за точками перетину ВАХ фотодіода і лінії навантаження відповідного опору резистора R_n . За відсутності освітленості фотодіод працює в режимі звичайного діода. Темновий струм у германієвих фотодіодів дорівнює 1 – 30 мкА, у кремнієвих 1нА – 3 мкА.

Якщо в фотодіодах використовувати зворотний електричний пробій, що супроводжується лавинним множенням носіїв заряду, як у напівпровідникових стабілітронах, то фотострум, а отже, і чутливість значно зростають.

2. Електрична схема включення р-і-п-фотодіода наведена на рис. 2.20.

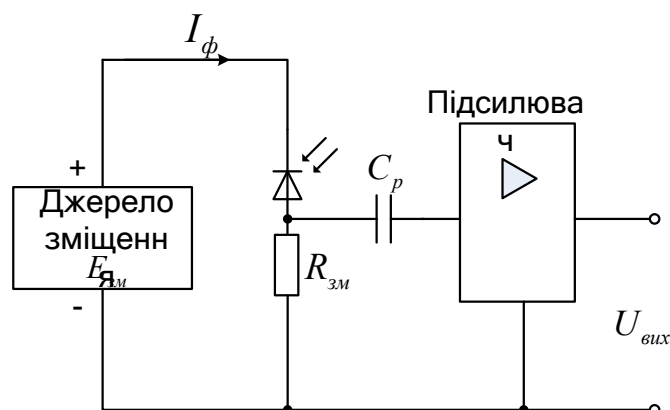


Рисунок 2.20 – Схема включення р-і-п-фотодіода

В схемі включення розділова ємність C_p дозволяє усунути високу напругу зміщення $E_{зм}$ (до 30 В) з входу малопотужного підсилювача.

3. Особливістю схеми включення ЛФД є регульоване через коло зворотного зв'язку джерело напруги зміщення.

Конструкція

Розглянемо типову конструкцію фотодіода (рис. 2.21). Основа корпусу складається з коварової втулки 6 і двох зовнішніх виводів 5, впаяних у втулку через скло-ізолятор. До одного з виводів приварений кристалотримач 4 із кристалом 3, а до іншого припаяний електродний вивід 1. Світло на кристал кремнію потрапляє через скляну лінзу 2.

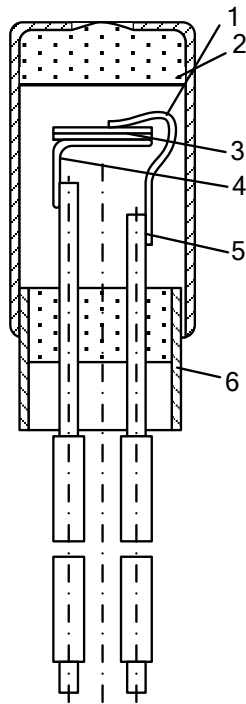
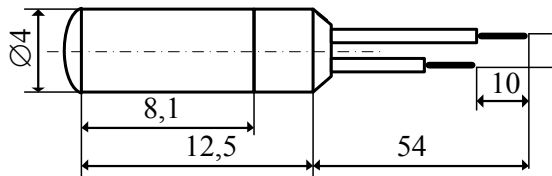


Рисунок 2.21 – Конструкція фотодіода: 1 – електродний вивід, 2 – скляна лінза, 3 – кристал, 4 – кристалотримач, 5 – зовнішній вивід, 6 – втулка

Приклади серійних пристроїв

1. Фотодіод ФД256 (рис. 2.22).



а)

б)

Рисунок 2.22 – Габарити (а) та зовнішній вигляд (б) ФД256

Таблиця 2.9 – Основні технічні параметри фотодіода ФД256

Робоча напруга, В	10
Діапазон спектральної чутливості, мкм	0,4 - 1,1
Максимум спектральної характеристики, мкм	0,8 - 0,9
Темновий струм, нА, не більше	5
Інтегральна струмова чутливість мкА/лк, не менше	0,02
Власна стала часу ($U = 10$ В), нс, не більше	10
Власна стала часу ($U = 60$ В), нс, не більше	2
Площа фоточутливого елемента (ефективна), мм ²	1,37 (4)
Корпус	металевий
Електрична щільність ізоляції В, не менше	180
Маса, г, не більше	1

2. BPW24R, кремнієвий p-i-n-фотодіод.

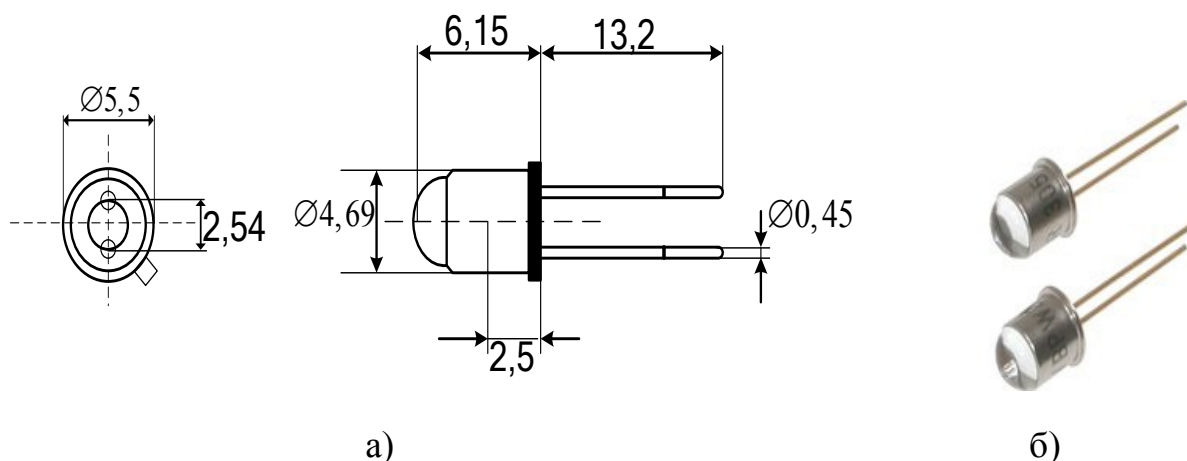


Рисунок 2.23 – Габарити (а), зовнішній вигляд (б) фотодіода BPW24R

Параметри приладу наведені нижче.

Зворотна напруга – 60 В.

Максимум спектральної характеристики – 900 нм.

Стала часу – 7 нс.

Кут половинної чутливості – 12 град.

Темновий струм – 2 нА.

Діапазон спектральної чутливості за рівнем 0,1 – 400-1100 нм.

Максимальна робоча температура – +125 °С.

Мінімальна робоча температура -55 °С.

Абсолютна спектральна чутливість на довжині хвилі 900 нм – 0,55 А/Вт.

Максимальний темновий струм – 10 нА.

Максимальна допустима розсіювана потужність – 210 мВт.

Галузі застосування

Фотодіод є складовим елементом у багатьох складних оптоелектронних пристроях. І тому він знаходить широке застосування в сенсорах оптичного потоку, оптопарах, оптоелектронних інтегральних мікросхемах та ін.

2.3 Фототранзистор

Означення

Фототранзистор – оптоелектронний напівпровідниковий прилад, подібний до класичного транзистора. Відрізняється від класичного варіанта тим, що область бази доступна для світлового опромінення, за рахунок чого з'являється можливість управляти підсиленням електричного струму за допомогою оптичного випромінювання.

Класифікація

1. Біполярний фототранзистор – напівпровідниковий прилад з двома р-n-переходами, призначений для перетворення світлового потоку в електричний струм.

2. Польовий фототранзистор.

3. МДН-фототранзистор – метал-діелектрик-напівпровідник-фототранзистор, що є польовим транзистором з ізольованим затвором, в якому світловий потік, що поглинається в підзатворній області, приводить до зміни провідності каналу між витоком і стоком.

4. Гетерофототранзистор.

Умовні графічні позначення

Літерний код транзисторів – латинські літери *VT*. На схемах ці напівпровідникові прилади позначають згідно з ГОСТ 2.730-73, як показано на рис. 2.24. Коротка риска з лінією від середини символізує базу, дві похилі лінії, проведені до її країв під кутом 60° – емітер і колектор. Про електропровідність бази судять за символом емітера: якщо його стрілка напрямлена до бази (рис. 2.24, а) – емітер має електропровідність типу *p*, а база – типу *n*; якщо ж стрілка напрямлена в протилежний бік (рис. 2.24, б), електропровідність емітера і бази зворотна. Транзистор, база якого має електропровідність типу *n*, позначають формулою *p-n-p*, а транзистор з базою, що має електропровідність типу *p*, позначають формулою *n-p-n*. У першому випадку на базу і колектор слід подавати негативну відносно емітера напругу, у другому – позитивну.

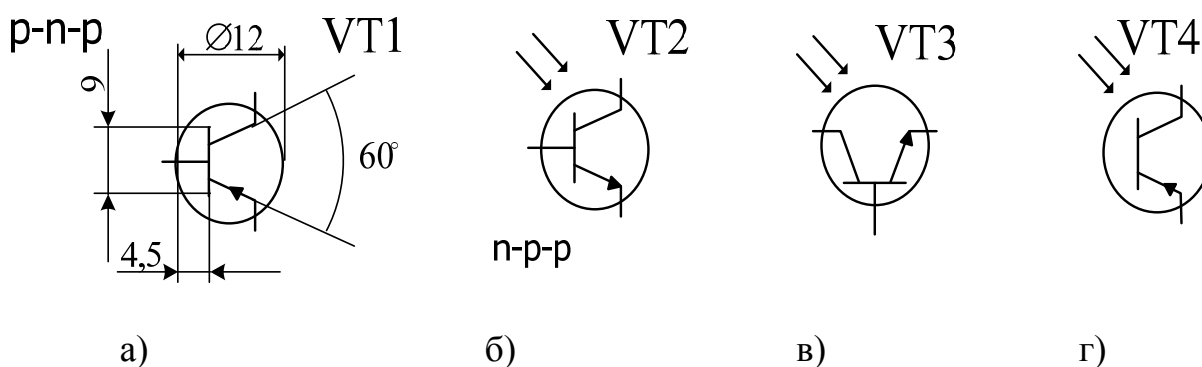


Рисунок 2.24 – УГП фототранзисторів

Коло символізує корпус транзистора. Фототранзистор може зображатися з базовим виводом (рис. 2.24, б-в) та без нього (рис. 2.24, г)

Маркування

Маркування фототранзисторів у вітчизняній та закордонних системах докладно описані у підрозділі 2.2 у підпункті «Маркування фотодіодів».

Принцип дії

1. Біполярний фототранзистор (рис. 2.25) має структуру $n-p-n$ або $p-n-p$ транзистора і може підсилювати струм. Дірки електронно-діркових пар, народжених випромінюванням, знаходяться в базі, а електрони переходять в емітер або колектор. При збільшенні позитивного потенціалу бази відбувається посилення фотоструму за рахунок інжекції електронів з емітера в базу. При потраплянні світлового потоку на n -область бази в ній генеруються нерівноважні електрони і дірки. Дірки будуть неосновними носіями, збільшення їх концентрації приведе до зростання дрейфової компоненти струму з бази в колектор. Величина первинного «затравочного» фотоструму буде виражатися такими ж співвідношеннями, як і фотострум діода на основі $p-n$ -переходу. Відмінність лише в тому, що нерівноважні носії, які беруть участь у фотострумі, збираються з області бази, ширина якої W менша, ніж дифузійна довжина L_p . Тому щільність первинного «затравочного» фотоструму буде:

$$j_{\phi} = q \frac{\Delta p \cdot W}{\tau_p}. \quad (2.1)$$

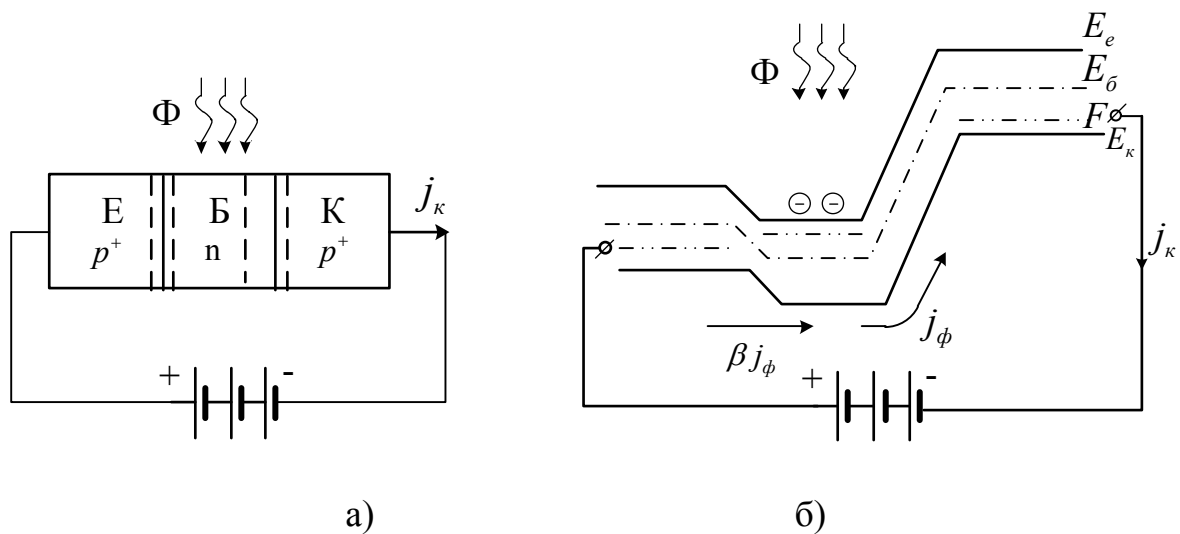


Рисунок 2.25 – Схема фототранзистора зі структурою $p-n-p$ (а) та зонна діаграма фототранзистора в активному режимі роботи (б)

Внаслідок того, що нерівноважні дірки йдуть з бази в колектор, база заряджена негативно відносно емітера, а це еквівалентно прямому зсуву емітерного переходу фототранзистора. При прямому зсуві емітерного $p-n$ -переходу з'являється інжекційна компонента струму з емітера в базу. При коефіцієнті передачі емітерного струму α в базі рекомбінують $(1-\alpha)$ інжектованих носіїв або в β разів менше, ніж загальне число інжектованих носіїв. В умовах стаціонарного струму кількість носіїв, що рекомбінували в базі, має дорівнювати їх кількості, яка пішла з первісним фотострумом. Тому інжекційний струм повинен бути в β разів більшим, ніж первинний фотос-

струм. Струм колектора I_K буде складатися з трьох компонент: первинного фотоструму I_ϕ , інжекційного $\beta \cdot I_\phi$ і теплового I_{K0} струму.

$$I_K = I_{\phi + \beta} I_\phi = (\beta + 1) I_\phi + I_{K0}. \quad (2.2)$$

Використовуючи вираз для коефіцієнта підсилення β базового струму через конструктивно-технологічні параметри біполярного транзистора, отримуємо:

$$I_K = I_\phi \frac{2L_p^2}{W^2} + I_{K0}. \quad (2.3)$$

Величина первинного фотоструму I_ϕ виражається через параметри світлового потоку і характеристики напівпровідникового матеріалу стандартним чином:

$$I_\phi = q \Delta p \frac{W}{\tau_p} = qGW = qW\eta\alpha\Phi. \quad (2.4)$$

При освітленні бази в ній виникають електронно-діркові пари. Так само як і в 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 щодо емітера. При цьому на емітерному переході створюється додаткова пряма напруга, що викликає додаткову інжекцію з емітера в базу і відповідне збільшення струму колектора.

2. Польовий фототранзистор з р-п-переходом базується на управлінні розмірами струмопровідної області каналу шляхом зміни напруженості поперечно прикладеного електричного поля та освітленості. Провідність його каналу визначається основними носіями заряду. Структура транзистора наведена на рис. 2.26.

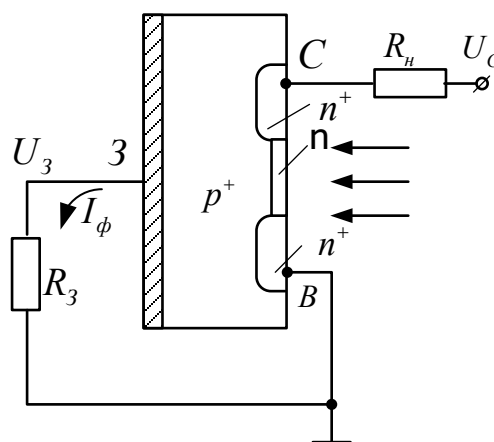


Рисунок 2.26 – Структура польового фототранзистора:
С – стік, В – витік, з – затвор

Транзистор складається з прямокутного напівпровідника з омичними контактами на кінцях та з р-п-переходом на бічній грані. Бічний р-п-перехід (затвор) вмикається в зворотному напрямку. Управління струмом стоку такого транзистора здійснюється з допомогою світла. Світловий потік генерує носії заряду в області переходу затвор–канал. Електричне поле цього переходу розділяє носії заряду. Концентрація електронів в каналі збільшується, опір каналу зменшується, струм стоку зростає. Концентрація дірок в області затвора також зростає. Виникає фотострум в колі затвора, який створює спад напруги на опорі затвору. Зворотна напруга на переході канал – затвор зменшується, ширина його також зменшується, що приводить до збільшення ширини каналу та додаткового збільшення струму стоку.

3. МДН фототранзистор (рис. 2.27) – це польовий транзистор з ізольованим затвором, в якому світловий потік, що поглинається в підзатворній області, приводить до зміни провідності каналу між виток і стоком. Викликане світлом збільшення струму приводить до зміни порогової напруги і крутизни передавальної характеристики. Електрод затвора повинен бути виготовлений з прозорого або напівпрозорого матеріалу. МДН – фототранзистор, таким чином, є аналогом фоторезистора, але може бути використаний в будь-якому режимі підзатворного каналу: збагачення, збіднення, інверсії.

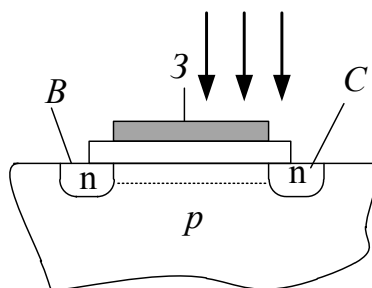


Рисунок 2.27 – Структура МДН-фототранзистора

При використанні у ролі фотоприймачів МДН-транзисторів їх доцільно застосовувати в поєднанні з фотодіодом на основі р-п-переходу. Технологічно фотодіод і МДН-транзистор виготовляються на одній пластині напівпровідника і фотодіод підключається до виток і затвору. Оскільки струм через затвор не протікає, то фотодіод працює в режимі генерації фотоЕРС. При одночасному освітленні р-п-переходу та МДН-транзистора змінюється як напруга відсічки, так і фотонапруга р-п-переходу. ФотоЕРС р-п-переходу змінює потенціал затвора, тому змінюється струм в колі витік–стік.

4. Гетерофототранзистори (рис. 2.28) побудовані на принципі дії звичайного біполярного фототранзистора, але в них використовуються і всі переваги гетероструктур: широкозонні емітерне та колекторне вікна (що дозволяє створювати конструкції з прямим і зворотним – через товстий ко-

латорний шар – засвіченням); тонка фотоактивна базова область, що повністю поглинає випромінювання; ідеальність гетерограниць, що перешкоджають просочуванню основних носіїв бази в колектор і накопиченню їх у ньому. Все це приводить до того, що гетерофототранзистори можуть мати не тільки високу чутливість в будь-якій заданій ділянці спектра, але і дуже високу швидкодію (в нано- та субнаносекундному діапазоні).

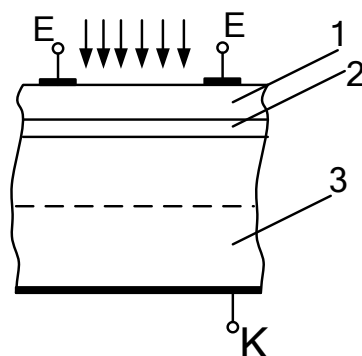


Рисунок 2.28 – Гетерофототранзистор: 1– n^+ -InP-емітер з кільцевим електродом; 2 – p -InGaAsP-база; 3 – n^+ - n -InP-колектор (підкладка).

Тонка фотоактивних базова область, обумовлена ідеальністю гетерограниць, забезпечує накопичення основних носіїв заряду в базі і відсутність просочування неосновних носіїв в емітер.

Основні параметри

Основні параметри фототранзисторів наведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Параметри фототранзисторів

Умовне позначення	Одиниця вимірювань	Означення
U_p	В	Робоча постійна напруга, прикладена до фототранзисторів, при якій забезпечуються номінальні параметри при тривалій роботі
$\Delta\lambda$	мкм	Інтервал довжини хвилі спектральної характеристики фототранзистора, в якому його чутливість дорівнює 10% від свого максимального значення
P_{max}	мВт	Максимально допустима розсіювана потужність – максимальна електрична потужність, що розсіюється фототранзистором, при якій відхилення його параметрів від номінальних значень не перевищує зазначених меж при тривалій роботі
I_m	мкА	Темновий струм – струм, що протікає через фототранзистор при заданій напрузі на ньому за відсутності потоку випромінювання
I_ϕ	мА	Фотострум (струм фотосигнала) – струм, що протікає через фототранзистор при зазначеній напрузі на ньому, обумовлений дією потоку випромінювання

Продовження таблиці 2.10

Умовне позначення	Одиниця вимірювань	Означення
$S_{I_{int}}$	А/лм або А/лк	Струмова інтегральна чутливість – відношення фотоструму до значення потужності (або освітленості) потоку випромінювання з заданим спектральним складом, який викликав появу фотоструму
Φ_n	Вт	Поріг чутливості – середньоквадратичне значення першої гармоніки діючого на фоточутливий елемент фототранзистора модульованого потоку випромінювання заданого спектрального розподілу, при якому середньоквадратичне значення першої гармоніки фотоструму дорівнює середньоквадратичному потоку шумового струму в заданій смузі на частоті модуляції потоку випромінювання
$K_{n,\phi}$	відн. од.	Коефіцієнт підсилення фотоструму – відношення фотоструму колектора при відключеній базі до фотоструму освітлюваного переходу, виміряного в фотодіодному режимі
φ	град	Плаский кут зору фототранзистора – кут в нормальній до фоточутливого елемента площині між крайніми напрямками падіння паралельного пучка випромінювання, при яких струм фотосигналу зменшується до заданого рівня

Основні характеристики

1. Вольт-амперна характеристика (рис. 2.29), схожа на ВАХ транзистора у схемі зі спільним емітером, тільки параметром виступає не струм бази, а світловий потік Φ або фотострум I_ϕ .

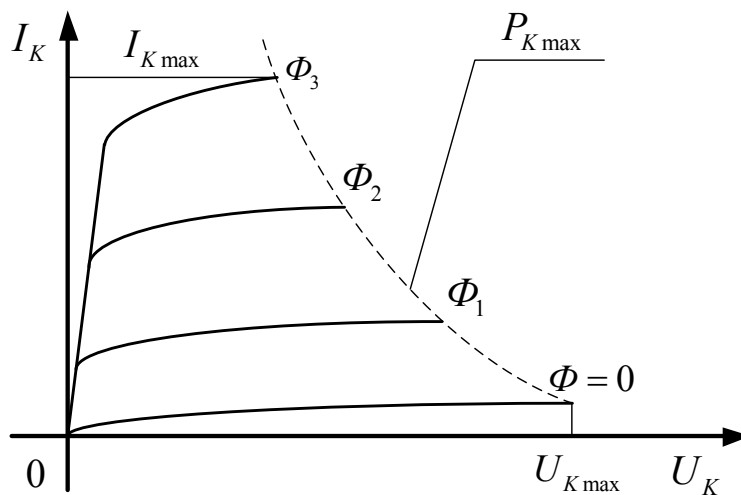


Рисунок 2.29 – Сімейство ВАХ фототранзистора

2. Енергетична та спектральна характеристики подібні до характеристик фотодіода.

Еквівалентні схеми

Фототранзистор можна уявити складеним з фотодіода і транзистора (рис. 2.30, а, б). 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. Напругу живлення підводять так, щоб колекторний перехід був закритий, а емітерний – відкритий. База може бути відключеною. На відміну від біполярного транзистора, у фототранзистора відсутній електричний контакт до бази, а керування струмом бази здійснюється шляхом зміни її освітленості. З цієї причини конструктивно фототранзистор має тільки два виводи – емітер і колектор.

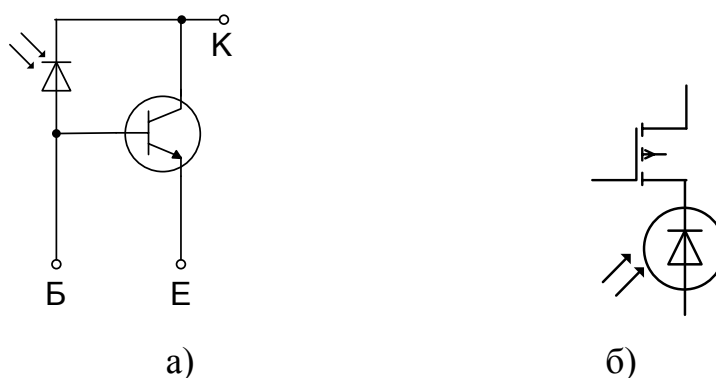


Рисунок 2.30 – Еквівалентна схема біполярного фототранзистора (а) та МДН-транзистора з фотодіодом на основі р-п-переходу (б)

Схеми включення

Фототранзистор можна розглядати як комбінацію фотодіода з транзистором, оскільки усі його характеристики є подібними до характеристик фотодіода, але з підсиленими в кілька разів струмами.

Біполярний фототранзистор застосовують у схемі з включеною базою (рис. 2.31, а), коли емітерний перехід зміщено в прямому, а колекторний, відповідно, в зворотному напрямку. Також застосовують включення з плаваючою базою (рис. 2.31, б), коли напругу прикладають між колекторним та емітерним переходами.

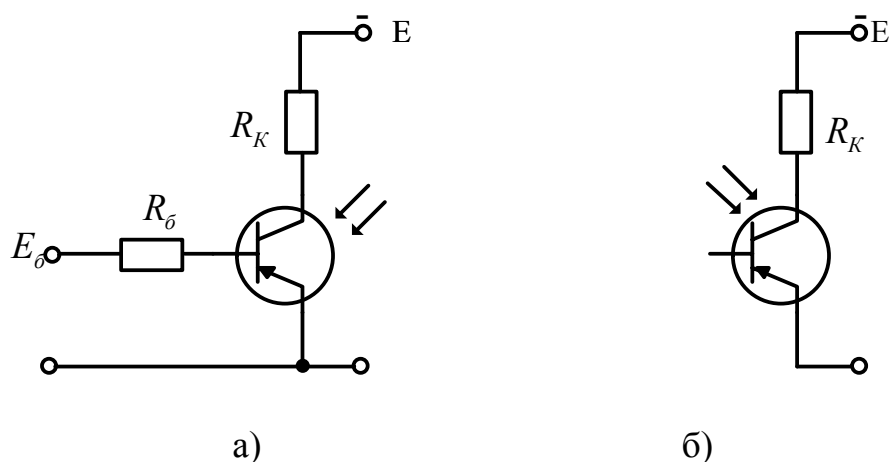


Рисунок 2.31 – Схеми включення біполярного фототранзистора

Оскільки польовий фототранзистор виконується з управляючим р-п-переходом, то перехід затвор–канал можна розглядати як фотодіод, фотострум якого викликає спад напруги на резисторі R_3 , що включений в коло затвору (рис. 2.32).

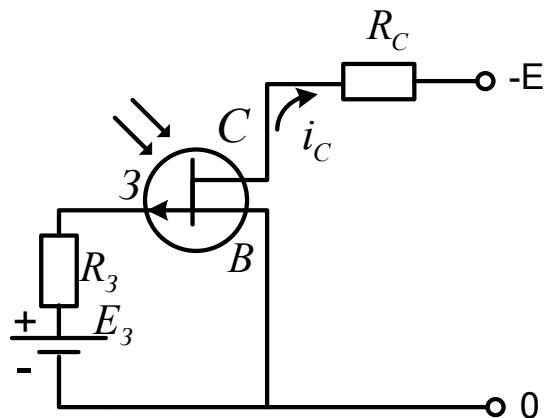


Рисунок 2.32 – Схема включення польового фототранзистора

Конструкції фототранзисторів

Існує два різновиди конструкцій фототранзисторів (рис. 2.33, 2.34): поперечна і поздовжня. Поздовжні транзистори мають більш просту конструкцію і технологію, зручні для включення в інтегральні схеми, але поступаються за своїми функціональними параметрами.

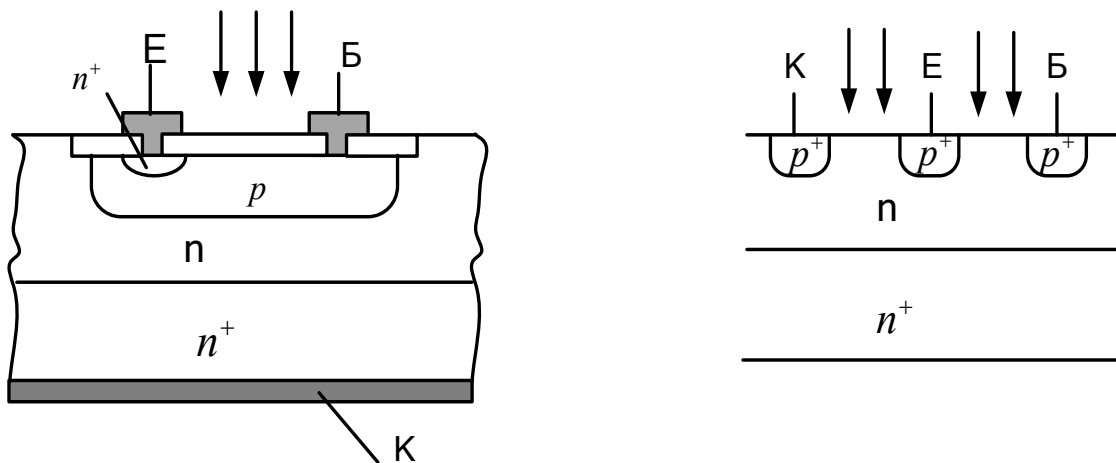
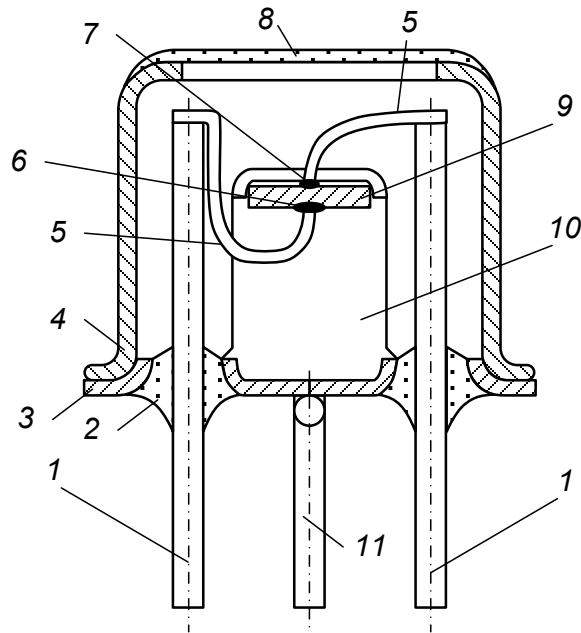


Рисунок 2.33 – Структура поперечного (а) і поздовжнього (б) фототранзисторів



1 – виводи емітера та колектора; 2 – скляні прохідні ізолятори; 3 – ніжка; 4 - герметичний корпус; 5 - з'єднувальний провідник; 6 – колектор; 7 – емітер; 8 – скляне вікно; 9 – пластинка германія; 10 – кристалотримач; 11 - базовий вивід

Рисунок 2.34 – Конструкція фототранзистора ФТ-1

Приклади серійних приладів

Фототранзистор L-51ROPT1xx – фототранзистор круглий, 5,0 мм (рис. 2.35).

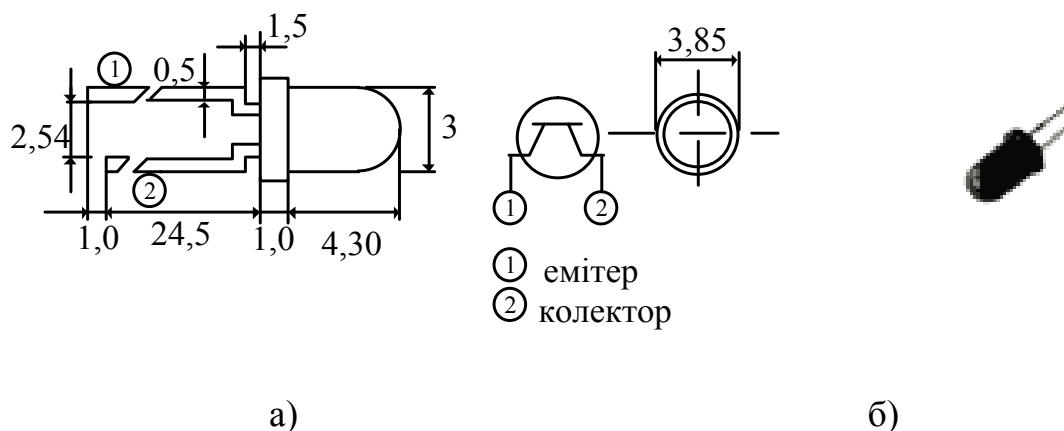


Рисунок 2.35 – Габарити (а) та зовнішній вигляд (б) фототранзистора L-51ROPT1xx

Таблиця 2.11 – Основні параметри L-51ROPT1xx (при $T_a=25\text{ C}$)

Найменування	Темновий струм колектора, нА ($V_E=20\text{ В}$, $E_E=0\text{ мВт/см}^2$)	Напруга насичення, В ($I_K=2\text{ мА}$, $E_E=0,5\text{ мВт/см}^2$)	Час спрацьовування, нс	Робочий струм колектора, мА ($V_{KE}=5\text{ В}$, $E_E=0,1\text{ мВт/см}^2$)	Довжина хвилі (пик.), нм
L-51ROPT1D1	100	0,4	15	2	940
L-51ROPT1D2	100	0,4	15	2	870

Галузі застосування

Застосовуються в мікроелектроніці поряд з фотодіодами для детектування оптичного випромінювання. Вихідні струми фототранзистора набагато вищі, ніж у фотодіода, що розділяє сфери застосування цих пристроїв.

Фототранзистори використовуються як складова частина оптрона – електричного пристрою, що складається з приймача і джерела випромінювання з тим чи іншим видом оптичного та електричного зв'язку між ними. Такий прилад виконує функцію елемента зв'язку, в якому здійснена електрична (гальванічна) розв'язка входу і виходу.

Недоліком фототранзисторів є інерційність, що обмежує їх застосування в ролі швидкодіючих вимикачів.

2.4 Фототиристор

Означення

Фототиристор – оптоелектронний прилад, що має структуру, схожу зі структурою звичайного тиристора і відрізняється від останнього тим, що вмикається не напругою, а світлом. При освітленні фототиристора в напівпровіднику генеруються носії заряду обох знаків (електрони і дірки), що приводить до збільшення струму через тиристор на величину фотоструму.

Призначення – застосовують в системах силової автоматики, системах дистанційного керування джерелами живлення РЕА, електронних реле для комутації світловим сигналом великих потужностей.

Умовні графічні позначення

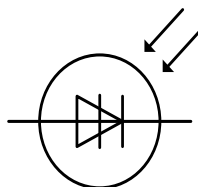


Рисунок 2.36 – Умовне графічне позначення діодного фототиристора

Маркування

Маркування тиристора відповідно до ГОСТ 20859.1-89 складається з дев'яти позицій, які ми розглянемо нижче.

1. Літера Т – «тиристор».
2. Літера, що позначає підвид тиристора: Б – швидкодійний; БИ – швидкодійний частотно-імпульсний; С – симетричний; А – асиметричний; Л – лавинний; О – оптронний; Ф – фототиристор.
3. Порядковий номер модифікації конструкції (цифра від 1 до 9).
4. Позначення модифікації за розміром шестигранника для штирьових тиристорів чи за діаметром корпусу для таблеткових тиристорів (цифра від 1 до 9)..
5. Позначення конструктивного виконання корпусу (цифра від 0 до 5).
6. Максимально допустимий середній прямий струм у відкритому стані, максимально допустимий діючий струм для симетричних тиристорів, максимально допустимий струм запирання для тиристорів, що запираються (А).
7. Клас за повторюваною імпульсною напругою в закритому стані.
8. Група цифр, що позначає сполучення класифікаційних параметрів за (dU_{zc}/dt). Нижній індекс «зс» позначає закритий стан.
9. Група за t_q .
10. Група за t_{gt} (для швидкодійних і частотно-імпульсних тиристорів).

Принцип дії

Фототиристор (рис. 2.37) має чотиришарову р-п-р-п-структуру, яку, як і в звичайному тиристорі, можна подати у вигляді комбінації двох транзисторів, що мають позитивний зворотний зв'язок за струмом.

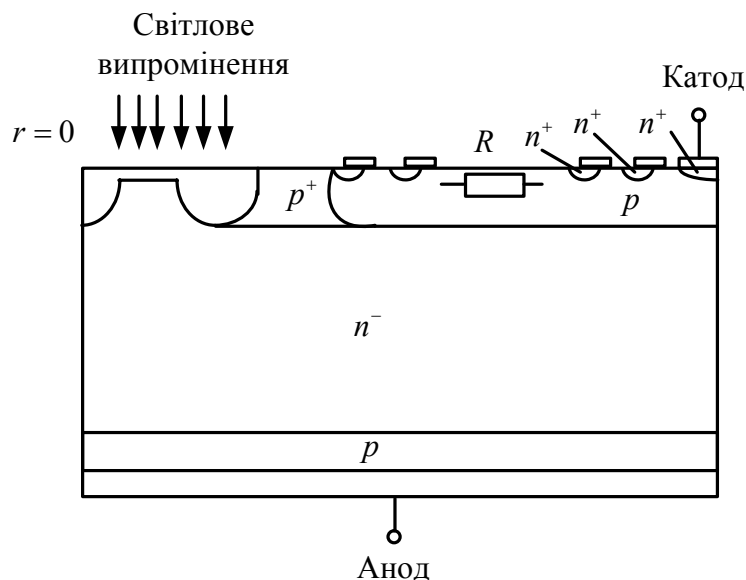


Рисунок 2.37 – Поперечний переріз центральної частини фототиристора з вбудованими захисними функціями

Тиристор включається так, щоб колекторний перехід був включений у зворотному напрямку, а обидва емітерних – у прямому (рис. 2.38). 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, що інжектуються емітерним переходом транзистора $VT1$, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора $VT2$ і створюють там позитивний заряд. Аналогічно, електрони, що інжектуються емітерним переходом транзистора $VT2$, переносяться полем колекторного переходу у базу транзистора $VT1$ і створюють там негативний заряд.

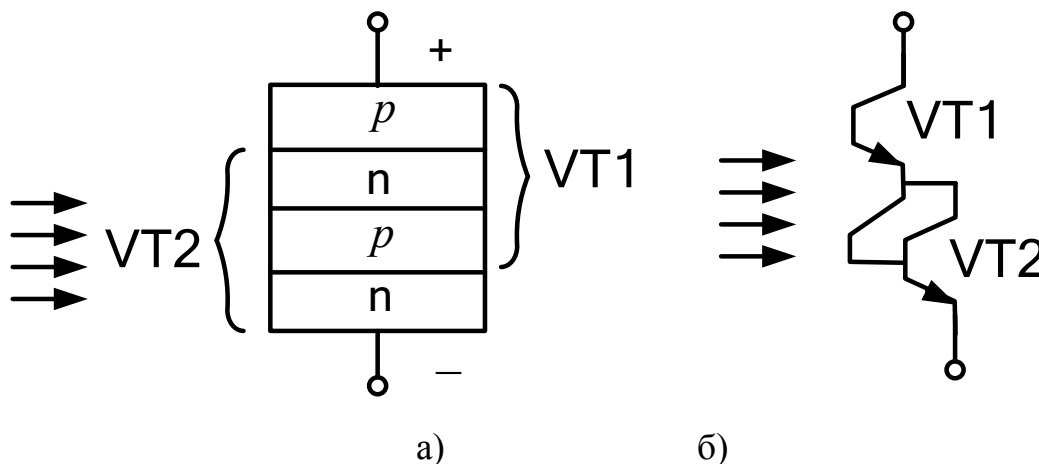


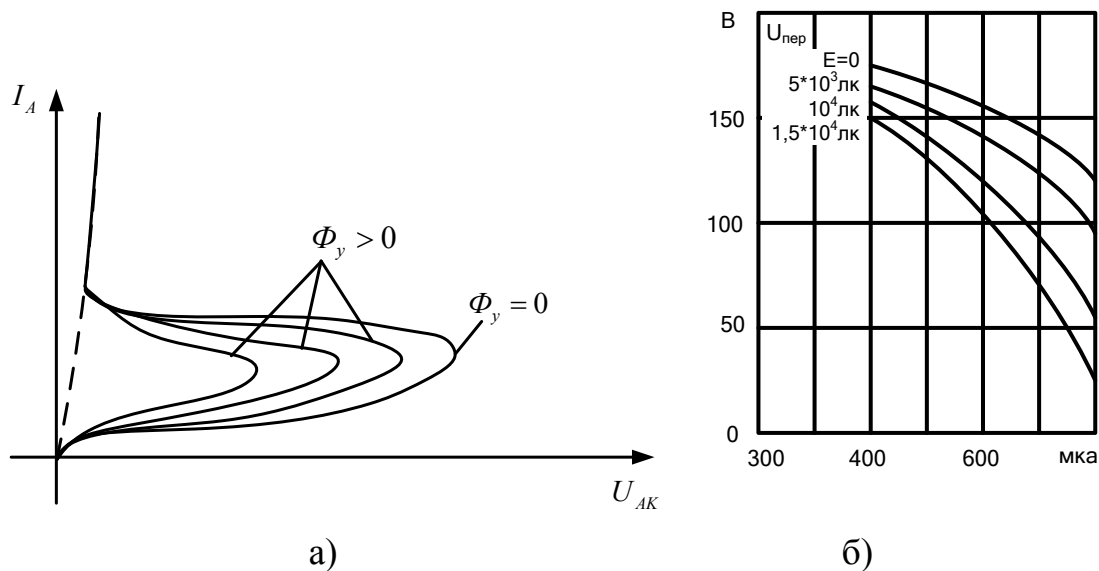
Рисунок 2.38 – Тиристор: структура (а), двотранзисторна модель (б)

Накопичення основних носіїв заряду в базах транзисторів розпочинає процес їх відкривання. 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 відкривання тиристора, у результаті чого усі три переходи виявляються зміщеними у прямому напрямі, 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 напрямі.

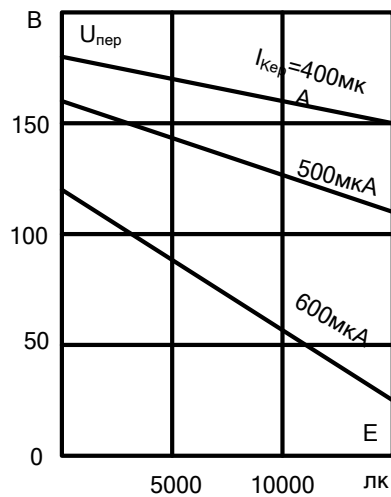
Основні характеристики

1. Вольт-амперна характеристика (рис. 2.39, а).



а)

б)



в)

Рисунок 2.39 – Характеристики фототиристора: ВАХ (а), управління (б), світлова (в)

2. Спектральна характеристика фототиристорів така ж, як у фотодіодів та фототранзисторів, виготовлених з тих же матеріалів.

3. Характеристика управління при різних рівнях освітленості (рис. 2.39, б).

4. Світлова характеристика (рис. 2.39, в)

5. Температурна характеристика.

6. Динамічні характеристики.

Основні параметри

- Частота управління – f_y .
- Неповторювана імпульсна напруга в закритому стані – U_{DSM} .
- Неповторювана імпульсна зворотна напруга – U_{RSM} .
- Періодична імпульсна напруга в закритому стані – U_{DRM} .
- Періодична імпульсна зворотна напруга – U_{RRM} .

- Робоча імпульсна напруга в закритому стані – U_{DWM} .
- Критична швидкість наростання напруги в закритому стані – $(du_D/dt)_{crit}$, В / мкс.
- Робоча імпульсна зворотна напруга, U_{RWM} .
- Постійна напруга в закритому стані U_D .
- Постійна зворотна напруга U_R .
- Повторюваний імпульсний струм в закритому стані – I_{DRM} .
- Максимально допустимий середній струм у відкритому стані – I_{TM} .
- Фактичний максимально допустимий середній струм у відкритому стані – I_{AVM} .
- Максимально допустимий діючий струм у відкритому стані – I_{TRMSM} .
- Імпульсна напруга у відкритому стані – U_{TM} .
- Гранична напруга у відкритому стані – $U_{T(TO)}$.
- Динамічний опір у відкритому стані – r_T .
- Тепловий опір перехід – корпус, °С / Вт – R_{thjc} .
- Максимально допустима температура переходу, °С – T_{jm} .
- Мінімумально допустима температура переходу, °С – T_{jmin} .
- Час включення – $t_{вкл}$.
- Час виключення – $t_{викл}$.
- Час затримки – $t_{зд}$.
- Тривалість імпульсу струму чи напруги у відкритому стані – t_i .
- Час наростання – $t_{нр}$.
- Тривалість імпульсу струму або напруги управління – t_y .

Еквівалентна схема

Як еквівалентну схему фототиристора використовують двотранзисторну модель, з двома транзисторами, позначеними VT1 та VT2 (рис. 2.40).

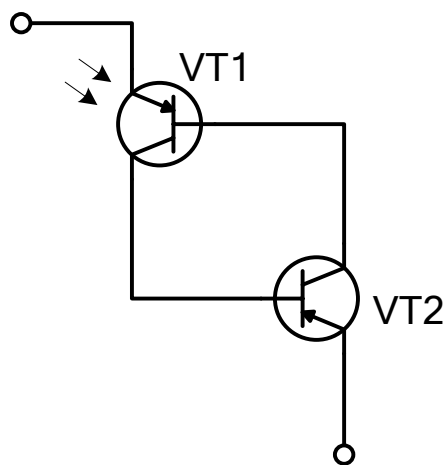


Рисунок 2.40 – Еквівалентна схема фототиристора

Типова схема включення

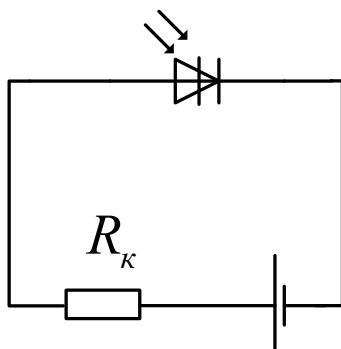


Рисунок 2.41 – Схема включення фототиристора

Конструкція

Конструкція фототиристора (рис. 2.42) аналогічна конструкції високовольтного таблеткового тиристора, але замість електричного керуючого виводу фототиристор має оптичний вхід. Розроблено дві модифікації приладів, що відрізняються системами введення світлового сигналу в корпус приладу.

У першому варіанті в центрі катодної основи фототиристора є оптичне вікно, розташоване поблизу фоточутливої області напівпровідникової структури. У даній конструкції для управління приладом застосовується оптичний інтерфейсний кабель – LTT-адаптер (LTT – Light Triggered Thyristor). Одним кінцем («гаком») він вставляється в паз катодної основи таблетки, другим кінцем через оптичний роз'єм з'єднується з лазерним діодом. Імпульс світла надходить у фоточутливу область кремнієвої структури від лазерного діода через оптоволоконний кабель, адаптер та оптичне вікно. Особливість цієї конструкції полягає в тому, що підключення LTT-адаптера необхідно виконувати до складання фототиристора з охолоджувачем.

Другий варіант конструкції фототиристора має оптичну розетку, яка розташована на бічній поверхні катодної основи. У цьому варіанті керуючий імпульс світла, що надійшов через оптоволоконний кабель на оптичну розетку, передається до фоточутливої області структури по відрізьку світловода всередині корпусу. Така конструкція введення сигналу керування дозволяє проводити підключення світловода до розетки фототиристора за допомогою стандартних оптичних роз'ємів як до, так і після складання приладу з охолоджувачем або навіть після монтажу всієї силової схеми перетворювача.

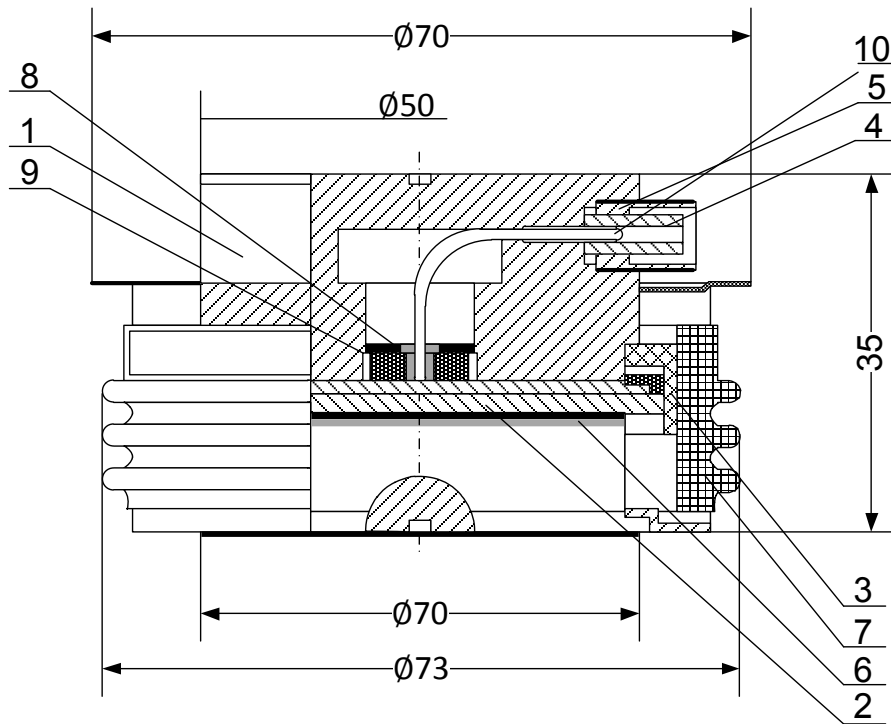


Рисунок 2.42 – Конструкція фототиристора:

1 – кришка, 2 – елемент напівпровідника, 3 – кільце фторпластова, 4 – втулка фторпластова, 5 – втулка, 6 – прокладка, 7 – корпус, 8 – шайба пружинна, 9 – шайба фторпластова, 10 – вивід оптичний

Приклади серійних приладів

1. Фототиристор ТФ 173-1000 (рис. 2.43, а).
2. Фототиристор ТФ 353-630 (рис. 2.43, б).



Рисунок 2.43 – Серійні фототиристори: а) –ТФ 173-1000, б) – ТФ 353-630

Таблиця 2.12 – Основні параметри та характеристики фототиристорів

Параметр	Умовне позначення	Фототиристор	
		ТФ 353-630	ТФ 173-1000
Напруга переключення, В	U_{BO}	6500	6500
Періодична імпульсна зворотна напруга, В	U_{RRM}	7000	7000
Повторюваний імпульсний струм в закритому стані, мА	I_{DRM}	150	200
Максимально допустимий середній струм у відкритому стані, А	I_{TM}	773	1406
Максимально допустимий діючий струм у відкритому стані, кА	I_{TRMSM}	12	24
Критична швидкість наростання струму у відкритому стані, А/мкс	$(dI_T / dt)_{crit}$	300	300
Критична швидкість наростання напруги в закритому стані, В/мкс	$(du_D / dt)_{crit}$	2000	2000
Оптична потужність управління, мВт	P_{LM}	40	40
Температура переходу, °С	$T_{jmin...} T_{jm}$	-60...+125	-60...+125
Динамічний опір, МОм	r_T	1,07	0,55
Час затримки включення, мкс	t_3	5	5
Час виключення, мкс	$t_{вукл}$	500	550
Тепловий опір перехід – корпус, °С/Вт	R_{thjc}	0,02	0,0112

Галузі застосування

- Високовольтні перетворюючі пристрої ЛЕП;
- Компенсатори реактивної потужності;
- Високовольтні електроприводи;
- Потужні імпульсні генератори;
- Різні силові установки з колами постійного і змінного струму.

2.5 Багатоелементні фотоприймачі – прилади з зарядовим зв'язком

Означення

Багатоелементний фотоприймач – фотоприймач, що складається з великої кількості об'єднаних у єдину мікросхему світлочутливих елементів.

Сьогодні для введення зображень використовуються багатоелементні фотоприймачі на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) та КМОП-фотоматриці.

ПЗЗ-фотоматриця (скор. «прилад із зарядовим зв'язком») або CCD-матриця – спеціалізована аналогова інтегральна мікросхема, що складається з світлочутливих фотодіодів, виконана на основі кремнію, що використовує технологію ПЗЗ-приладів із зарядовим зв'язком.

Зарядовий зв'язок – передача заряду від одного МОН-конденсатора іншому при їх розташуванні на одній кремнієвій підкладці.

Призначення

Фотоматриця призначена для перетворення спроектованого на неї оптичного зображення в аналоговий електричний сигнал або в потік цифрових даних (за наявності АЦП безпосередньо у складі матриці).

Класифікація

Якщо пікселі збудовані в один ряд, то приймач називається **ПЗЗ-лінійкою**, якщо ж ділянку поверхні заповнено рівними рядами – тоді приймач називається **ПЗЗ-матрицею**.

За типом буферизації ПЗЗ-матриці поділяють на:

1. Повнокадрові матриці;
2. Матриці з буферизацією кадру;
3. Матриці з буферизацією стовпців.

Існують також спеціальні види матриць, описані нижче.

1. Світлочутливі лінійки. Основна сфера застосування лінійних світлосприймальних пристроїв – сканери, панорамна фотоапаратура, а також спектроаналізатори та інше науково-дослідне обладнання.

2. Матриці із зворотним засвічуванням. У класичній схемі ПЗЗ-елемента, при якій використовуються електроди з полікристалічного кремнію, світлочутливість обмежена з причини часткового розсіювання світла поверхнею електрода. Тому при зйомці в особливих умовах, що потребують підвищеної світлочутливості у синій і ультрафіолетовій областях спектра, застосовуються матриці зі зворотним засвіченням (англ. back-illuminated matrix). У сенсорах такого типу реєстроване світло падає на підкладку, але для необхідного внутрішнього фотоефекту підкладка шліфується до товщини 10-15 мкм. Дана стадія обробки істотно збільшувала вартість матриці, пристрої виходили вельми крихкими і потребували підвищеної обережності при складанні і експлуатації. А при використанні світлофільтрів, що послаблюють світловий потік, всі дорогі операції із збільшення чутливості втрачають сенс. Тому матриці зі зворотним засвіченням застосовуються, в основному, в астрономічній фотографії.

Принцип дії

Типова будова ПЗЗ така (рис. 2.44): на напівпровідниковій поверхні знаходиться тонкий (0,1–0,15 мкм) шар діелектрика (зазвичай окисла), на якому розташовуються смужки провідних електродів (з металу або полікристалічного кремнію). Ці електроди утворюють лінійну або матричну регулярну систему, причому відстані між електродами настільки малі, що істотними є ефекти взаємного впливу сусідніх електродів. Принцип роботи ПЗЗ оснований на виникненні, зберіганні і спрямованій передачі зарядових пакетів в потенційних ямах, що утворюються в приповерхневому шарі напівпровідника при подачі до електродів зовнішніх електричних напруг.

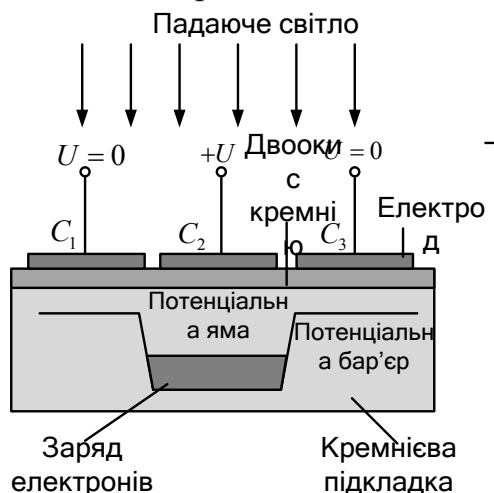


Рисунок 2.44 – Принципова будова ПЗЗ-матриці

На рис. 2.44 символами $C1$, $C2$ і $C3$ позначені МОН-конденсатори (метал-окисел-напівпровідник). Якщо до якогось електрода прикласти позитивну напругу U , то в МДН-структурі виникає електричне поле, під дією якого основні носії (дірки) дуже швидко (за одиниці пікосекунд) відходять від поверхні напівпровідника. В результаті біля поверхні утворюється збіднений шар, товщина якого становить частки або одиниці мікрметра. Носії (електрони), генеровані в збідненому шарі під дією деяких процесів (наприклад, теплових або внаслідок освітлення) або ті, що потрапили туди з нейтральних областей напівпровідника під дією дифузії, будуть переміщатися (під дією поля) до межі розділу напівпровідник–діелектрик і локалізуватися у вузькому інверсному шарі. Таким чином, біля поверхні виникає потенціальна яма для електронів, в яку вони скочуються зі збідненого шару під дією поля. Генеровані в збідненому шарі основні носії (дірки) під дією поля викидаються в нейтральну частину напівпровідника.

Протягом заданого інтервалу часу кожен піксел поступово заповнюється електронами пропорційно кількості світла, що потрапила в нього. Після закінчення цього часу електричні заряди, накопичені кожним пікселем, по черзі передаються на «вихід» приладу і вимірюються.

Розмір світлочутливого пікселя матриць становить від одного – двох до декількох десятків мікрон. Розмір же кристалів галоїдного срібла в світлочутливому шарі фотоплівки коливається від 0,1 (позитивні емульсії) до 1 мікрона (високочутливі негативні).

Основні характеристики

1. Квантова ефективність QE (рис. 2.45, а) – ефективність перетворення поглинутих фотонів (квантів) в фотоелектрони.

Оскільки енергія світлових квантів залежить від їх кольору (довжини хвилі), неможливо однозначно визначити, скільки електронів народиться в пікселі матриці при поглинанні нею, наприклад, потоку зі ста різнорідних фотонів. Тому квантова ефективність зазвичай подається в паспорті на матрицю як функція від довжини хвилі, і на окремих ділянках спектра може досягати 80%. Це набагато більше, ніж у фотоемульсії або ока, у яких квантова ефективність становить 1% та 3%, відповідно.

2. Світлочутливість матриці (рис. 2.45, б) складається зі світлочутливості всіх її фотодатчиків (пікселів) і в цілому залежить від:

- інтегральної світлочутливості, що являє собою відношення величини фото ефекту до світлового потоку (в люменах) від джерела випромінювання нормованого спектрального складу;
- монохроматичної світлочутливості – відношення величин фото ефекту до величини світлової енергії випромінювання (в міліелектронвольтах), відповідної певній довжині хвилі;
- набір всіх значень монохроматичної світлочутливості для вибраної частини спектра є спектральною світлочутливістю – залежністю світлочутливості від довжини хвилі світла.

Основні параметри

• Робоча амплітуда керуючих напруг на затворах визначається двома основними умовами. Вона повинна бути досить великою для забезпечення необхідної величини зарядового пакета і повного змикання збіднених шарів сусідніх елементів, щоб під їх затворами утворювалася загальна потенціальна яма при перенесенні зарядового пакета. Чим менша відстань між затворами і більша ємність діелектрика, тим нижча необхідна амплітуда керуючих напруг, типові значення якої 10 ... 20 В.

• Максимальна величина зарядового пакета $Q_{n \text{ макс}}$ є важливим параметром, що характеризує керуючу здатність ПЗЗ. Вона пропорційна амплітуді керуючої напруги і площі затвора. В елементі з розмірами затвора 10×20 мкм і $d = 0,1$ мкм за амплітуди керуючої напруги 5 В $Q_{n \text{ макс}} = 0,35$ пКл (або $2 \cdot 10^6$ електронів). На практиці вибирають вдвічі меншу величину для запобігання втрат зарядового пакета, викликаних відходом частини електронів з потенціальної ями в підкладку (маються на увазі електрони, енергія яких достатня для подолання потенціального бар'єру).

- Мінімальна тактова частота $f_{m.min}$ обернено пропорційна максимально допустимому часу зберігання зарядового пакета в одному елементі. Цей час обмежений, тому що поступово величина зарядового пакета змінюється внаслідок неконтрольованого накопичення електронів в потенційних ямах під затвором. Ці електрони з'являються в результаті теплової генерації носіїв заряду в збідненому шарі і на границі напівпровідника з діелектриком, а також за рахунок дифузії з підкладки.

- Розсіювана потужність елементів ПЗЗ, яка дуже мала. У стадії зберігання вона практично не розсіюється, оскільки течуть дуже малі струми термогенерації. Потужність розсіюється в елементах ПЗЗ тільки в режимі переносу зарядового пакета. Вона збільшується пропорційно тактовій частоті, амплітуді керуючої напруги і величині зарядового пакета. Розсіювана потужність елементів ПЗЗ менша 1 мкВт.

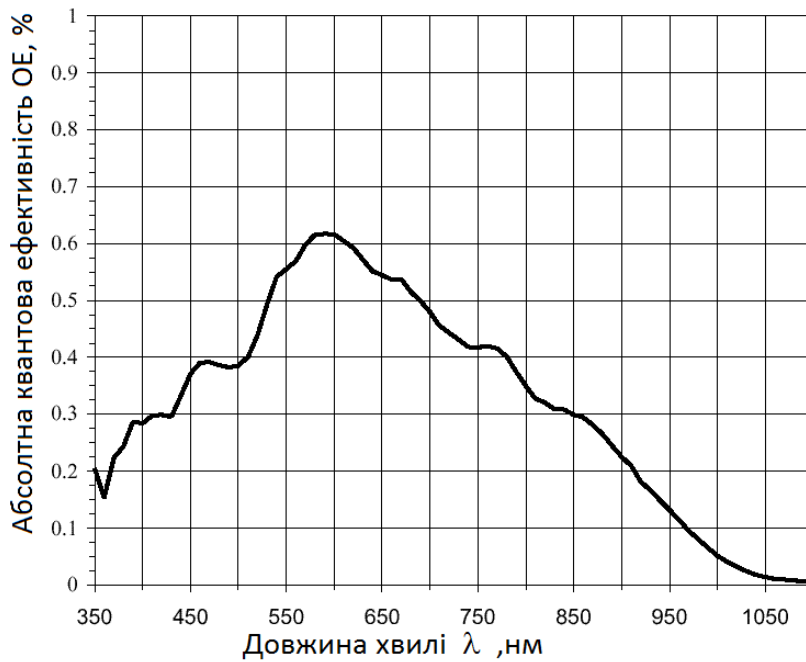
- Розміри пікселів. Чим більше розміри пікселя, тим більше фотоелектронів він може накопичити до насичення (переповнення). Так, наприклад, у SBIG ST5 з розмірами пікселів 10 мікрон, насичення настає при накопиченні 50 000 електронів, а ST6 при пікселях 23×27 мікрон дозволяє безнайнасиченим працювати з кількістю до 400 000 електронів на комірку. Надалі це число накопичених фотоелектронів має бути перетворено в придатний для роботи ЕОМ цифровий код за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

- Відношення сигнал/шум (англ. SNR, Signal-to-Noise Ratio) – безрозмірна величина, що дорівнює відношенню потужності корисного сигналу до потужності шуму. Чим більше це відношення, тим менш помітний шум

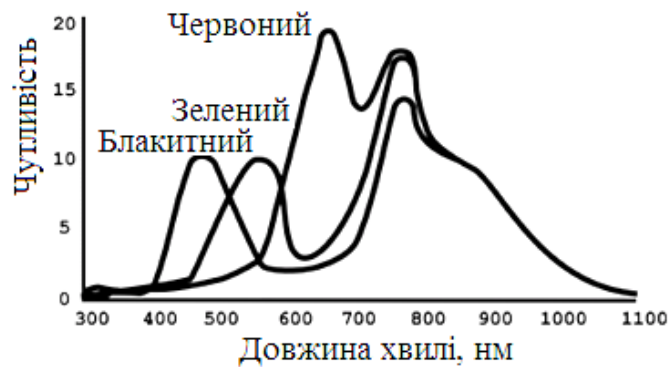
- Роздільна здатність.

- Фізичний розмір матриці. Загальноприйнято розмір матриці вимірювати по діагоналі, в частках дюйма ($4/3''$; $2/3''$; $1/1,8''$; $1/2,2''$). Чим більший фізичний розмір матриці, тим більше одержуване співвідношення сигнал–шум при заданій чутливості або тим вища чутливість при заданому співвідношенні сигнал-шум.

- Динамічний діапазон. Від матриці потрібна здатність реєструвати світло як при яскравому сонці, так і при слабкому кімнатному освітленні. Та й зображення, що формується об'єктивом, найчастіше складається як з яскраво освітлених ділянок, так і з глибоких тіней, а сенсор повинен вміти реєструвати всі їх відтінки. Можливість сенсора формувати гарний знімок визначається параметром «динамічний діапазон», що характеризує здатність матриці розрізняти в зображенні, проєційованому на її реєструючу поверхню, найтемніші тони від найсвітліших.



а)



б)

Рисунок 2.45 – Характеристики ПЗЗ-матриць: а – квантова ефективність, б – спектральна чутливість

Конструкції

1. Історично першими були розроблені матричні ПЗЗ з кадровим переносом (рис. 2.46, а). Цей прилад містить світлочутливу секцію накопичення, що складається з вертикальних ПЗЗ-регістрів, відокремлених один від одного областями стоп-каналів. Безпосередньо до секції накопичення приймає секція пам'яті, що має ту ж структуру і те ж число елементів, що і секція накопичення. Наприкінці секції пам'яті розташований горизонтальний ПЗЗ-регістр. Число елементарних комірок цього регістра дорівнює числу стовпців в секціях накопичення і пам'яті. Наприкінці горизонтального регістра розташовано вихідний пристрій. Секція пам'яті, вихідний горизонтальний регістр і вихідний пристрій екрануються від падаючого світла напиленням алюмінієвого покриття на поверхню кристала. Протягом часу накопичення на один або на кілька електродів секції накопичення подаєть-

ся позитивний потенціал, який утворює двовимірний масив збіднених областей. Генеровані падаючим світлом носії заряду збираються в збіднених областях, причому до переповнення потенціальної ями їх кількість лінійно залежить від експозиції. Після закінчення часу накопичення під час зворотного ходу по кадру на фазні електроди секції накопичення та секції пам'яті подаються імпульси перенесення. Накопичений двовимірний масив зарядових пакетів за час перенесення паралельно зсувається з секції накопичення в секцію пам'яті. Оскільки число комірок у секції пам'яті дорівнює числу комірок у секції накопичення, то кожен накопичений в секції накопичення зарядовий пакет займе відповідне місце в секції пам'яті. Після того як всі зарядові пакети перенесені в секцію пам'яті, процес накопичення зарядових пакетів поновлюється.

Одночасно з цим в секції пам'яті під час зворотного ходу по рядку зарядові пакети порядково переносяться в горизонтальний вихідний реєстр. Для цього на один з електродів горизонтального реєстра подається позитивний потенціал, який відповідає утворенню під ним потенціальної ями, а на електроди секції пам'яті подаються імпульси, які відповідають паралельному зсуву масиву зарядових пакетів на один трифазний елемент у напрямку до горизонтального реєстра. Таким чином черговий рядок зарядових пакетів виявляється в горизонтальному реєстрі, а наступний розташовується в тому рядку секції пам'яті, яка безпосередньо прилягає до реєстра. Далі, під час прямого ходу по рядку зарядові пакети зчитуються з горизонтального реєстра через вихідний пристрій, для чого на електроди цього реєстра подаються імпульси перенесення. Після закінчення зчитування рядка зарядових пакетів з секції пам'яті зсувається наступний рядок і процес повторюється. Після того як будуть зчитані всі рядки з секції пам'яті, в неї можливе перенесення масиву зарядових пакетів, накопиченого в секції накопичення.

2. Матричний ПЗЗ із рядковим переносом (рис. 2.46, б). Для накопичення зарядових пакетів в них використовуються стовпці зворотно-зміщених фотодіодів р-типу (Hole-accumulation diode, HAD). У безпосередній близькості від кожного рядка фотодіодів знаходиться нечутливий до світла вертикальний ПЗЗ-реєстр, відокремлений від фотодіодів фотозатвором. У перших матрицях ПЗЗ з рядковим перенесенням роль фотозатвора виконував окремий полікремнієвих електрод. На цей час його роль виконує частина затвора вертикального ПЗЗ-реєстра, яка виступає за край прихованого каналу перенесення зарядів. Наприкінці вертикальних ПЗЗ-реєстрів розташований горизонтальний ПЗЗ-реєстр з вихідним пристроєм. Всі реєстри ПЗЗ – вертикальні і горизонтальний – виконуються екранованими від падаючого світла. Під час накопичення зарядових пакетів в фотодіодах на фотозатвор подається низький потенціал, що забезпечує потенціальний бар'єр між фотодіодами і вертикальним ПЗЗ-реєстром. Після закінчення накопичення на фотозатвор короткочасно подається позитивний

потенціал, який дозволяє перенесення зарядових пакетів з фотодіодів в потенціальні ями, утворені у вертикальних ПЗЗ-регістрах. Потім з фотозатвора знімається позитивний зсув і накопичення зарядових пакетів в фотодіодах поновлюється. Зарядові пакети з вертикальних ПЗЗ-регістрів порядково переносяться в горизонтальний ПЗЗ-регістр, з якого поелементно зчитуються через вихідний пристрій. Перенесення зі світлочутливих фотодіодів у вертикальні регістри здійснюється під час зворотного ходу по кадру, а перенесення зарядових пакетів з вертикальних регістрів в горизонтальний регістр – під час зворотного ходу по рядку. Після того як всі рядки зарядових пакетів будуть зчитані, можливе перенесення наступного двомірного масиву зарядових пакетів з фотодіодів. Перевагою матричних ПЗЗ із рядковим переносом є малий рівень розмиття, пов'язаний з тим, що перенесення всіх зарядових пакетів в захищені від світла вертикальні ПЗЗ-регістри відбувається протягом короткого проміжку часу.

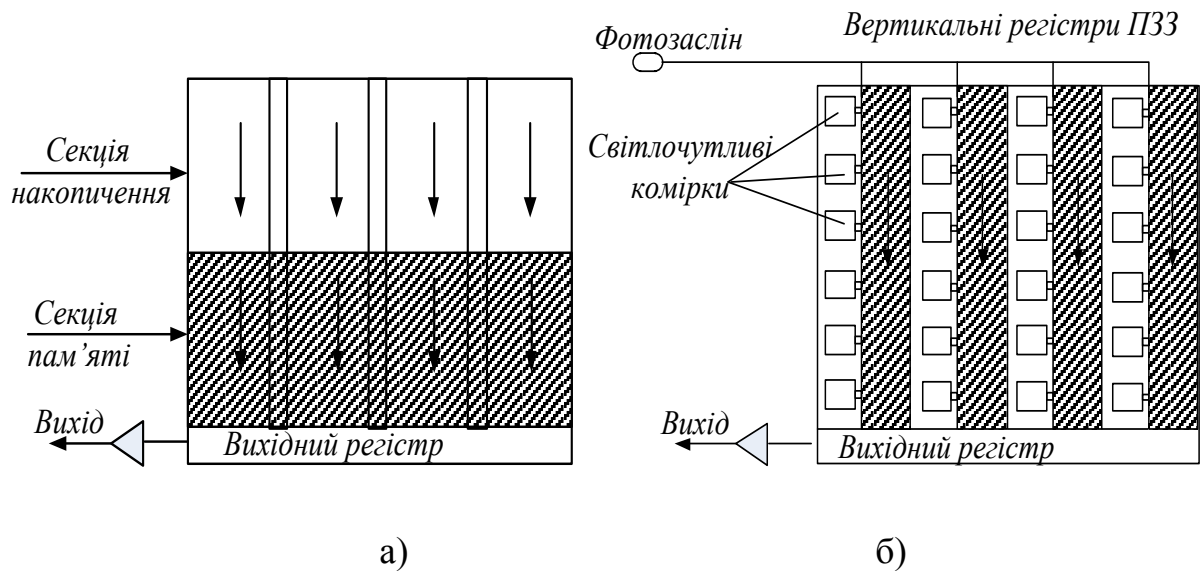


Рисунок 2.46 – Конструкції ПЗЗ-матриць: а – з кадровим переносом, б – з рядковим переносом

Приклади серійних приладів

Матриця ICX274AQ (рис. 2.47) – кольорова ПЗЗ-матриця формату 1/1,8" , з діагоналлю 8,9 мм та числом ефективних елементів $2,01 \cdot M$, виконана за технологією Super HAD CCD.

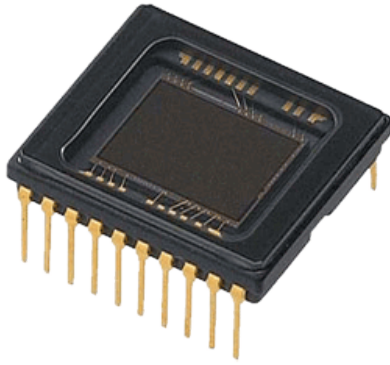


Рисунок 2.47 – Мікросхема ПЗЗ-фотоматриці

Таблиця 2.13 – Основні параметри та характеристики ПЗЗ-фотоматриці ICX274AQ

Розмір діагоналі – 8,923 мм, розмір пікселя – 4,4×4,4мкм.
Рекомендоване число елементів — 1600×1200 (формат 4:3), загальне – 1688×1248 (2,11 М)
Максимальна частота управління горизонтальним регістром (f_H) – 36 МГц (типова – 28,6364 МГц).
Напруга живлення – 15 В.
Струм споживання не більше 13 мА.
Чутливість (за зеленим кольором) – не менше 335 мВ (при часі накопичення заряду 1/30 с).
Розкид чутливості за R/B – 0,5/0,6 мВ.
Рівень насичення вхідного сигналу – не менше 400 мВ.

Галузі застосування

ПЗЗ-матриці є основним елементом цифрових фотоапаратів, сучасних відео- та телевізійних камер, фотокамер, вбудованих в мобільний телефон, камер систем відеоспостереження та багатьох інших пристроїв.

Застосовуються в оптичних детекторах переміщення комп'ютерних мишей, сканерах штрих-кодів, планшетних і проєкційних сканерах, системах астро- і сонячної навігації.

Контрольні запитання

1. Опишіть конструкцію фоторезистора. Чому товщина напівпровідникового шару не повинна бути великою?
2. Що таке вольт-амперна характеристика фоторезистора?
3. Чому у фоторезистора вольт-амперная характеристика зазвичай має лінійний вигляд, а у фотодіода – нелінійний?

4. Що таке світлова характеристика фоторезистора? Поясніть хід світлових характеристик.
5. Що таке фотодіод?
6. Як влаштований р-і-n фотодіод?
7. Яке призначення має просвітлюваний шар фотодіода?
8. Які характеристики має фотодіод?
9. Які переваги має ЛФД перед р-і-n-фотодіодом?
10. Яким чином може бути підвищена швидкодія фотодіода?
11. Чим визначається коефіцієнт множення ЛФД?
12. Що являє собою характеристика лінійності детектування ЛФД?
13. Чому ЛФД потребує регульованого джерела $E_{зм}$?
14. Поясніть принцип дії та будову фоторезистора.
15. Які складові еквівалентної схеми фоторезистора?
16. Дайте означення фотоструму.
17. Що таке зарядовий зв'язок?
18. Що являє собою фотоприймальний прилад з зарядовим зв'язком?
19. Які основні параметри ПЗЗ?
20. Чим відрізняються дві основні конструкції приладів з зарядовим зв'язком?

3 СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЧІ

Означення

Світловипромінювачі – прилади, які перетворюють електричну енергію в енергію оптичного випромінювання заданого спектрального складу і просторового розподілення.

Класифікація

Класифікація джерел випромінювання може здійснюватися за різними ознаками, наприклад:

- а) за розміром джерел випромінювання;
- б) за характером розподілу сили випромінювання в просторі (за формою фотометричного тіла);
- в) за спектральним розподілом потоку випромінювання (світлового потоку): когерентні і некогерентні (відповідно до цього розділяють когерентну і некогерентну оптоелектроніку). Когерентними світловипромінювачами називають оптичні квантові генератори (лазери), а некогерентними – світло діоди;
- г) за часом дії випромінювання;
- д) за колірною температурою.

Умовні графічні позначення

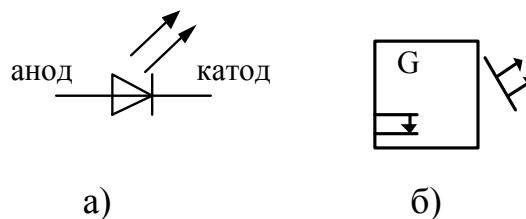


Рисунок 3.1 – Умовні графічні позначення: а – світлодіода, б – лазера

Основні параметри

1. Інтенсивність випромінювання – її характеризує потужність випромінювання $P_{випр}$ (мВт) (для лазерів і інфрачервоних випромінювальних діодів); сила світла J_v (мккд, мкд) (для світловипромінювальних діодів). Обидва параметри вимірюються при заданому номінальному або робочому струмі збудження $J_{роб}$ лазерів і прямому струмі $J_{пр}$ випромінювальних діодів. Зважаючи на суттєву залежність $P_{випр}(J_{роб})$ при вимірюванні лазерів, щоб уникнути виведення їх з ладу, встановлюється необхідна потужність і вимірюється струм накачування.

2. Спектральні властивості джерел випромінювання визначаються довжиною хвилі, відповідної максимальній інтенсивності спектра випромінювання λ_{max} , (мкм, нм); шириною спектральної смуги $\Delta\lambda$, (нм), яка визначається за 50%-м рівнянням спаду інтенсивності. Для випромінювальних діодів і лазерів цих параметрів зазвичай достатньо, для деяких застосувань

іноді потрібно задавати спектральний розподіл $P_{випр}(\lambda)$ або координати кольоровості x, y .

3. Для характеристики спрямованості вимірюють кут випромінювання α , що визначається за 50%-м рівнем спаду інтенсивності або діаграмі спрямованості.

$P_{випр}(\varphi)$ – залежність потужності випромінювання від кута огляду.

4. Швидкодія визначається імпульсними параметрами: часом наростання (спаду) імпульсу випромінювання при стрибкоподібному ввімкненні (вимкненні) імпульсу збудження $t_{нар(сп)}$, (нс), і часом затримки імпульсу випромінювання $t_{затр}$, (нс). Ці параметри вимірюються за рівнем 0,1 і 0,9 фронту і спаду імпульсу випромінювання. Іноді використовується стала часу релаксації (спаду) світіння $\tau_{рел}$, обумовлена як час зміни інтенсивності в e разів (при експоненційному спаді).

Як елемент електричного кола джерело випромінювання характеризується падінням прямої напруги (або напругою збудження) $V_{пр}$ при заданому струмі $J_{пр}$, а так само максимально допустимим режимами (безперервним і імпульсним) по струму, зворотній напрузі, потужності розсіювання.

5. Основні конструктивні параметри: розміри випромінювального вікна, тепловий опір R_T (К/Вт).

6. Основні експлуатаційні показники: максимальна і мінімальна робоча температура (T_{max}, T_{min}), гарантована довговічність T_d (визначається при 10, 30 або 50%-му спаді інтенсивності випромінювання).

3.1 Світлодіод

Означення та історія походження приладу.

Ще в 1907 році було вперше відзначено слабе світіння, що випускалося карбідокремнієвими кристалами внаслідок невідомих тоді електронних перетворень. У 1923 році співробітник Нижегородської радіолабораторії Олег Лосєв відзначав це явище під час проведених ним радіотехнічних досліджень з напівпровідниковими детекторами. Через п'ять років Лосєв спеціально зайнявся дослідженнями цього ефекту і продовжував їх майже до кінця життя. Відкриття «Losev Licht» (світіння Лосєва), як назвали ефект в Німеччині, де Лосєв публікувався в наукових журналах, стало світовою сенсацією. Після винаходу транзистора (в 1948 році) і створення теорії р-п-переходу (основи всіх напівпровідників) стала зрозуміла природа світіння.

У 1962 році американець Нік Холоньяк продемонстрував роботу першого світлодіода, а незабаром після цього повідомив про початок напівпромислового випуску світлодіодів.

Світлодіод або **світловипромінювальний діод** – напівпровідниковий прилад з електронно-дірковим переходом, який створює оптичне випромінювання при пропусканні через нього електричного струму.

Класифікація

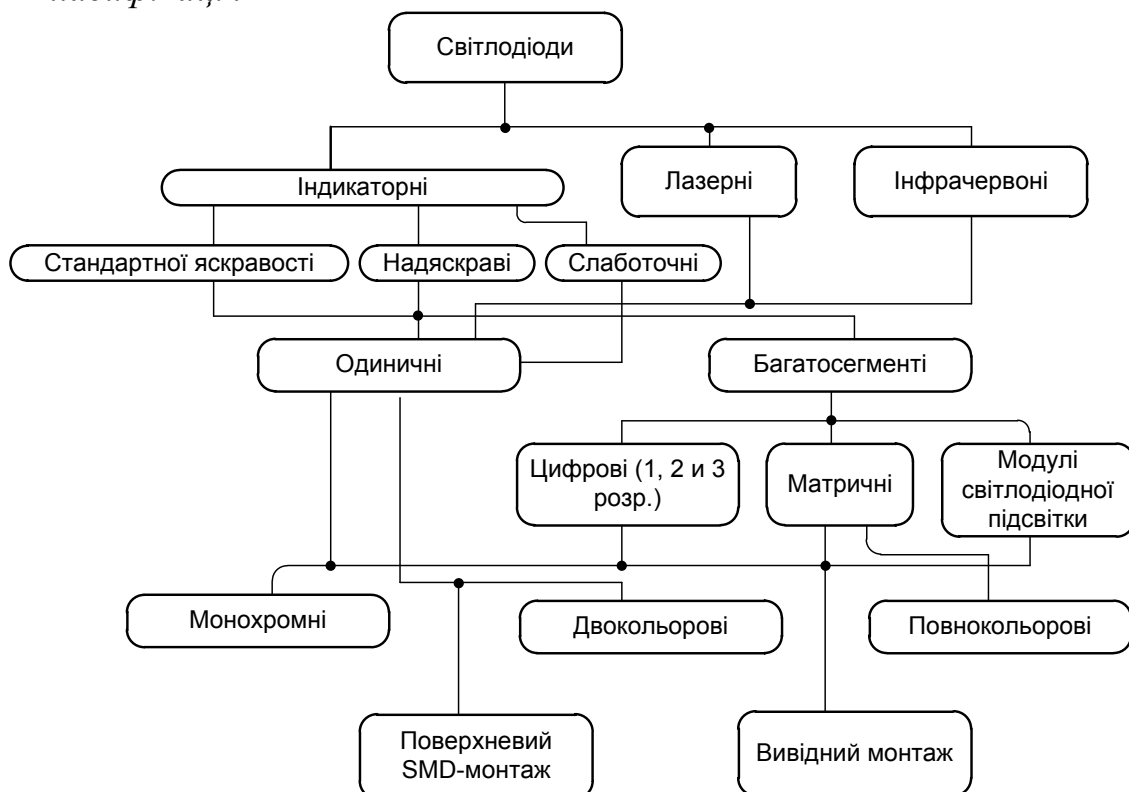


Рисунок 3.2 – Класифікація світлодіодів

Умовне графічне позначення



Рисунок 3.3 – Позначення на схемі: а – без корпусу, б – у корпусі

Маркування

Закордонні та вітчизняна системи маркування напівпровідникових приладів наведені у підрозділі 2.2. «Фотодіоди».

Принцип дії

Генерація світла (рис. 3.4) в світлодіоді відбувається за рахунок енергії, що виділяється при рекомбінації носіїв струму, електронів і дірок, на границі напівпровідникових матеріалів з різним характером провідності. Характер провідності визначається не тільки самим матеріалом, але і домішками (легуючими речовинами), що вводяться в основний матеріал в строго дозованих кількостях. Матеріал, у якого в результаті легування провідність визначається, в основному, надлишком електронів, називається напівпро-

відником типу n. Матеріал з нестачею електронів, тобто з надлишком позитивно заряджених іонів (так званих «дірок»), здатних поглинути електрон і стати нейтральним атомом, називається напівпровідником типу p. На межі таких матеріалів утворюється p-n-перехід. При подачі напруги прямої полярності (мінус – до матеріалу з електронною провідністю n, плюс – з дірковою провідністю p) через перехід потече струм, а при рекомбінації електронів і дірок буде виділятися енергія. Величина енергії квантів, що виділяються при рекомбінації, залежить від різниці енергетичних рівнів електронів у збудженому і нейтральних атомах, тобто від ширини забороненої зони. При ширині забороненої зони від 1,7 eV до 3,4 eV енергія випромінюваних квантів відповідає видимому діапазону спектра з довжинами хвиль від 700 до 400 нм. Ця енергія поширюється в усіх напрямках.

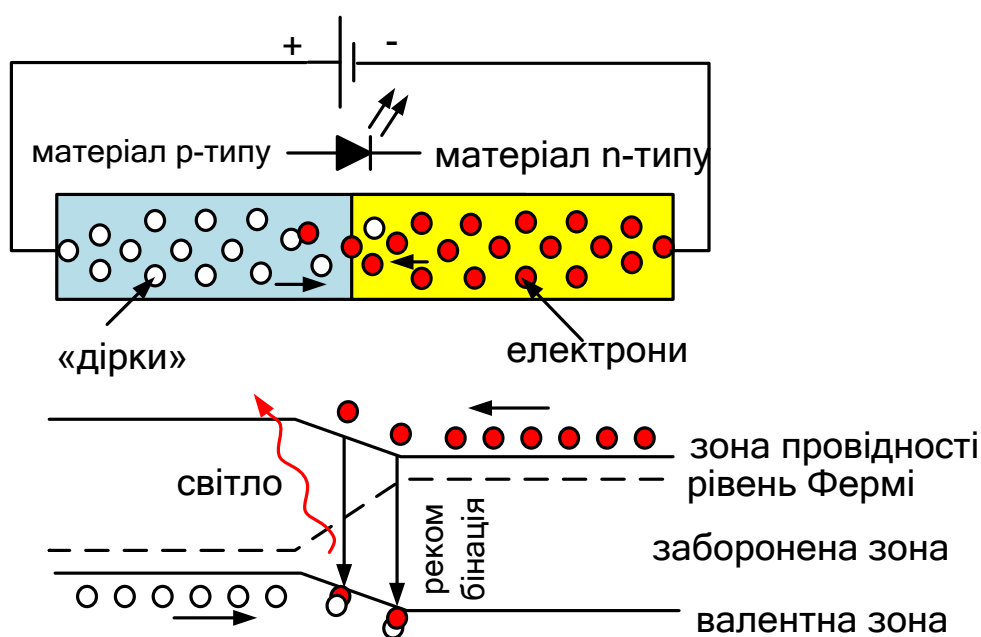


Рисунок 3.4 – Принцип дії світлодіода

Існує ряд умов, необхідних для виникнення світлової енергії при роботі світлодіода.

Умова 1. Ширина забороненої зони в активній області світлодіода має бути близькою до енергії квантів світла видимого діапазону.

Умова 2. Імовірність випромінювання при рекомбінації електронно-діркових пар має бути високою, для чого напівпровідниковий кристал має містити мало дефектів, через які рекомбінація відбувається без випромінювання.

Основні характеристики

- Вольт-амперна характеристика (рис. 3.5, а).

- Випромінювальна характеристика (рис. 3.5, б) – залежність потужності випромінювання (для інфрачервоних світлодіодів) або сили світла (для світлодіодів, що випромінюють видиме світло) від сили прямого струму світлодіода.

- Спектральна характеристика (рис. 3.5, в) – залежність інтенсивності випромінювання (потужності випромінювання або сили світла) від довжини хвилі випромінюваного потоку.

- Діаграма спрямованості (рис. 3.5, г) – характеризує залежність інтенсивності випромінювання від напрямку випромінювання (кута, що відраховується від нормалі до випромінювальної поверхні).

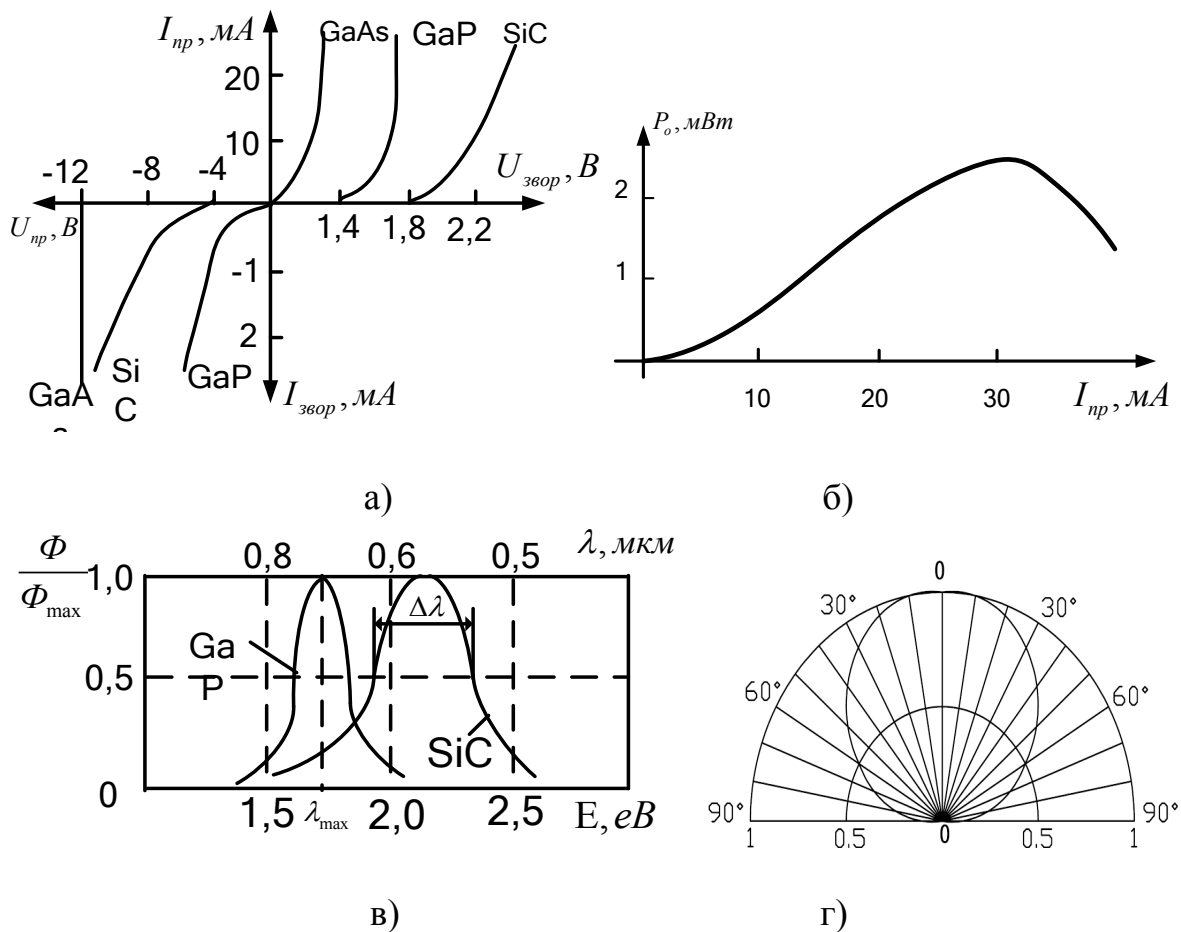


Рисунок 3.5 – Характеристики світлодіодів

Основні параметри

1. Інтенсивність випромінювання – характеризує потужність випромінювання $P_{вин}$ (для інфрачервоних світлодіодів) або силу світла I_v для світлодіодів, що випромінюють видиме світло) у напрямі, перпендикулярному до випромінювальної поверхні при заданому прямому струмі.

2. U_{np} – постійна пряма напруга – значення напруги на світлодіоді при протіканні крізь нього постійного прямого струму.

3. I_f – максимально допустимий постійний прямий струм – максимальне значення постійного струму, при якому забезпечується задана надійність під час тривалої роботи.

4. I_{Fmax} – максимально допустимий імпульсний прямий струм – максимальне значення струму, при протіканні якого протягом заданого часу τ як при однократній, так і при періодичній дії, забезпечується задана надійність під час тривалої роботи.

5. $U_{звор}$ – максимально допустима зворотна постійна напруга – максимальне значення постійної напруги, яка прикладена до світлодіода у зворотному напрямі, при якій забезпечується задана надійність під час тривалої роботи.

6. $U_{звор.i}$ – максимально допустима зворотна імпульсна напруга – максимальне пікове значення зворотної напруги на світлодіоді, враховуючи як однократні викиди, так і ті, що періодично повторюються.

7. P_d – максимально допустима потужність розсіювання – максимальна потужність розсіювання, при якій не настане тепловий пробій світлодіода.

8. Швидкодія – визначається імпульсними параметрами: часом наростання/спаду імпульсу випромінювання при стрибкоподібних змінах прямого струму світлодіода та часом затримки імпульсу випромінювання відносно імпульсу струму.

9. λ_{max} – довжина хвилі випромінювання – довжина хвилі, яка відповідає максимальній інтенсивності випромінювання, тобто довжина хвилі, на якій спектральна характеристика має максимум;

10. $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання – діапазон хвиль в спектрі випромінювання, для яких інтенсивність випромінювання є не нижчою за 0,5 максимуму спектральної характеристики.

11. I_v (при заданому I_f) – яскравість на осі симетрії світлодіода при заданому струмі через нього. Вимірюється в міліканделах (мкд).

Еквівалентна схема

На еквівалентній схемі (рис. 3.6): r_n – послідовний опір, r_d – активний опір діода, C_d – ємність діода, яка залежить від прикладеної до діода напруги, L – індуктивність діода, обумовлена провідниками, що підходять до нього.

$$C_d = \frac{C_0}{(U_\kappa - U_{np})^2},$$

де C_0 – ємність при нульовому зміщенні, U_{np} – напруга прямого зміщення, U_κ – напруга контактної різниці потенціалів, α – коефіцієнт, що залежить від характеру розподілу домішок в діоді.

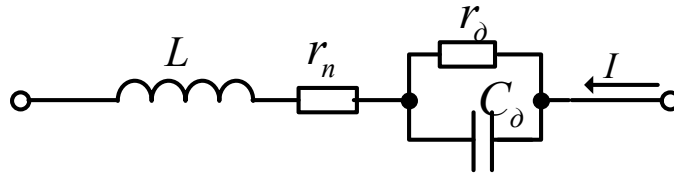


Рисунок 3.6 – Електрична модель світлодіода

Типова схема включення

Світлодіод світиться при проходженні через нього струму в прямому напрямку, тобто коли «плюс» джерела живлення підключений до анода, а «мінус» – до катода світлодіода. Безпосередньо до джерела живлення світлодіод підключати не можна, оскільки прямий струм через світлодіод може перевищити граничне значення (за рахунок експоненціального характеру ВАХ діодів) і в результаті світлодіод може вийти з ладу. Щоб цього не сталося, світлодіод потрібно включати через баластний струмообмежувальний резистор R_{δ} (рис. 3.7).

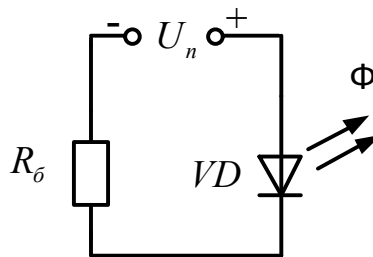


Рисунок 3.7 – Схема включення світлодіода

Опір та потужність струмообмежувального резистора визначають за формулами, наведеними нижче.

$$R_{\delta} = (U_{жс} - U_{cd}) / I_{cd} ,$$

де R_{δ} – опір струмообмежувального резистора; $U_{жс}$ – напруга джерела живлення; U_{cd} – спад напруги на світлодіоді; I_{cd} – робочий струм світлодіода.

$$P = (I_{cd})^2 \cdot R ,$$

де P – розрахункова потужність резистора R_{δ} ; I_{cd} – максимальний робочий струм світлодіода; R – вибраний опір резистора R_{δ} .

Конструкції

У світлодіодах плоскої конструкції (рис. 3.8, а) випромінювальний перехід виконаний або дифузійною, або епітаксією.

Для арсеніду галію і фосфіду галію – це конус з кутом біля вершини, не більшим 35° . Така конструкція є найдешевшою і простою. Однак вона найменш ефективна, їй відповідає вузька діаграма спрямованості випромінювання. Ефективність напівсферичної конструкції – найвища (рис. 3.8, б). Вона приблизно в десять разів перевищує ефективність плоскої конструкції. Однак вона набагато дорожча і складніша у виготовленні. У цьому випадку все випромінювання потрапляє на границю розділу під кутом, що збігається з нормаллю, і повністю виходить назовні.

Плаский кристал світлодіода може бути покритий краплею епоксидної смоли, що виконує роль лінзи (рис. 3.8, в). Смола має коефіцієнт заломлення, проміжний між повітрям і кристалом. Це дозволяє дещо збільшити поверхню діода, яка світиться. В останньому випадку смола підфарбовується під колір випромінювання світлодіода. Більшість сигнальних та відбивальних світлодіодів виконуються такої конструкції.

Світлодіоди можуть виготовлятися і безкорпусними.

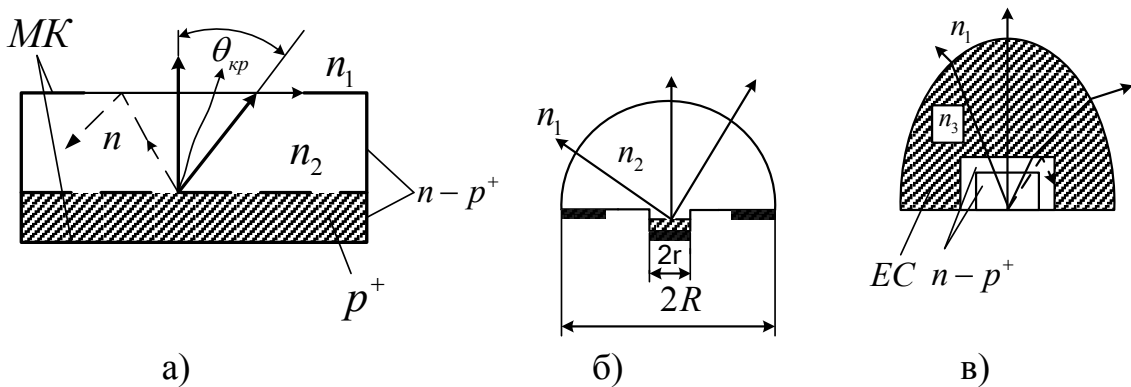


Рисунок 3.8 – Конструкція випромінювальної частини світлодіодів:

а – плоска, б – півсферична, в – з лінзою з епоксидної смоли.

МК – металевий контакт, ЕС – епоксидна смола,
 $n-p^+$ – випромінювальний перехід

Приклади серійних приладів

Світлодіод АЛ102А (рис. 3.9).

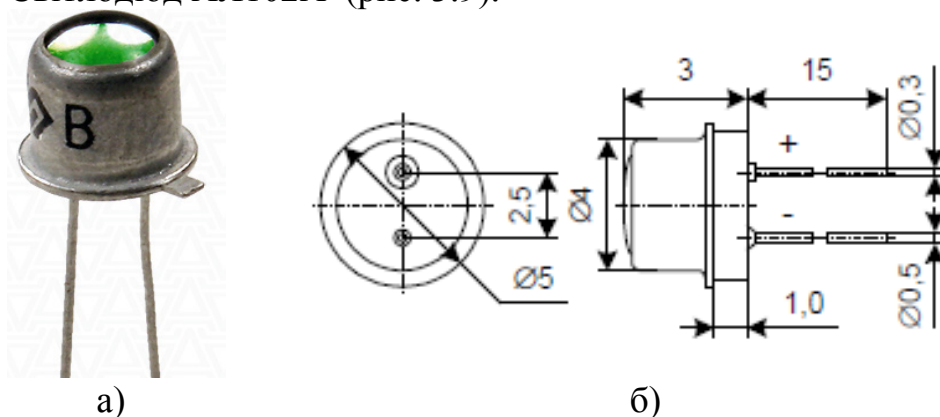


Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд (а) та габарити (б) світлодіода АЛ102А

Таблиця 3.1 – Параметри світлодіода АЛ102А

Тип приладу	Колір світіння	Значення параметрів при $T=25^{\circ}\text{C}$				$I_{np.max.}$ mA	$U_{звор}$ ($U_{звор.i}$) В	$T_{к.max}$ (T_n) $^{\circ}\text{C}$
		I_v . мккд (L , кд/м ²)	$U_{np.}$ В	$I_{np.ном.}$ mA	$\lambda_{max.}$ мкм			
АЛ102А	Червоний	40	2,8	5	0,69	10	(2,0)	70

Застосування світлодіодів

Світлодіоди застосовують у вуличному, промисловому, побутовому освітленні (в т. ч. світлодіодна стрічка).

Як індикатори – як у вигляді одиночних світлодіодів (наприклад, індикатор включення на панелі приладу), так і у вигляді цифрового або буквенно-цифрового табло (наприклад, цифри на годиннику).

Масив світлодіодів використовується у великих вуличних екранах, в біжучих рядках. Такі масиви часто називають світлодіодними кластерами або просто кластерами.

Потужні світлодіоди використовуються як джерело світла в ліхтарях і світлофорах.

Світлодіоди використовуються як джерела модульованого оптичного випромінювання (передача сигналу по оптоволокну, пульти ДУ, інтернет).

У підсвічуванні РК-екранів (мобільні телефони, монітори, телевізори і ін.).

У світлодіодних дорожніх знаках.

В оптичних лініях зв'язку.

3.2 Лазер

Означення

Лазер – джерело когерентного, монохроматичного і вузькопрямого електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, яке характеризується великою густиною енергії. Існують газові лазери, рідинні та на твердих тілах (діелектричних кристалах, склі, напівпровідниках).

Твердотільний лазер – лазер, у якому як активне середовище використовується речовина, що знаходиться в твердому стані (на відміну від газів у газових лазерах і рідин в лазерах на барвниках), це можуть бути стрижні з кристала штучного рубіна, скла з присадкою рідкоземельного елемента неодиму, алюмоітрієвого гранату з добавкою неодиму (АІГ: Nd).

Газовими називаються лазери, в яких активним середовищем є газ, суміш декількох газів або суміш газів з парами металу.

Призначення

Лазер призначений для генерування або підсилення монохроматичного світла, створення вузького пучка світла, здатного поширюватися на великі відстані без розсіювання і створювати винятково велику густину потужності випромінювання при фокусуванні (10^8 Вт/см² для високоенергетичних лазерів). Лазер працює за принципом, аналогічним принципу роботи мазера. Лазери використовуються для зв'язку (лазерний промінь може переносити набагато більше інформації, ніж радіохвилі), різання, пропалювання отворів, зварювання, спостереження за супутниками, медичних і біологічних досліджень і в хірургії.

Класифікація

За типом активної речовини:

- 1) твердотілі лазери;
- 2) напівпровідникові;
- 3) газові;
- 4) рідинні.

Залежно від режиму роботи:

- 1) лазери безперервного випромінювання;
- 2) лазери імпульсного випромінювання;
- 3) лазери зі змішаним режимом роботи, наприклад, напівпровідникові.

За способом збудження активної речовини:

- 1) зі збудженням за рахунок оптичного випромінювання;
- 2) зі збудженням потоком електронів;
- 3) зі збудженням сонячною енергією;
- 4) зі збудженням за рахунок енергії вибухаючих дротиків;
- 5) зі збудженням хімічною енергією;
- 6) зі збудженням за допомогою ядерного випромінювання.

Якщо випромінювання лазера зосереджене у вузькому інтервалі довжин хвиль, то лазер називають *монохроматичним*, якщо в широкому інтервалі, то говорять про *широкосмуговий* лазер.

Ще один тип класифікації оснований на використанні поняття вихідної потужності:

1. Лазери, у яких безперервна (середня) вихідна потужність більша 10^6 Вт, називають високо потужними;
2. При вихідній потужності в діапазоні $10^5 \dots 10^3$ Вт маємо лазери середньої потужності;
3. Якщо ж вихідна потужність менше 10^3 Вт, то говорять про малопотужні лазери.

Залежно від конструкції відкритого дзеркального резонатора розрізняють лазери з постійною добротністю і лазери з модульованою добротністю; у такого лазера одне із дзеркал може бути розташоване, зокрема, на осі електродвигуна, що обертає це дзеркало. В даному випадку добротність

резонатора періодично змінюється від нульового до максимального значення. Такий лазер називають лазером з Q-модуляцією.

Умовні графічні позначення

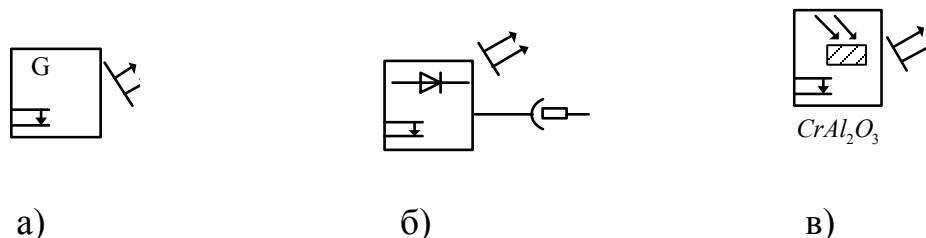


Рисунок 3.10 – Умовні графічні позначення лазера: а – загальне позначення, б – напівпровідниковий лазер із роз’ємним з’єднувачем, в – рубіновий із світловою накачкою

Основні характеристики

- Ват-амперна характеристика (ВтАХ) (рис. 3.11, а) – залежність потужності випромінювання від струму накачування.

На типовій ват-амперній характеристиці гетеролазера можна виділити три ділянки:

1. Світлодіодний режим – ділянка, на якій переважає спонтанне випромінювання, зсув структури ще невеликий і інверсна населеність не досягнута. Лазер в цьому режимі аналогічний світлодіоду з торцевим виходом випромінювання.

2. Режим суперлюмінесценції – частка індукованих переходів вже порівнянна з величиною спонтанного випромінювання.

3. Режим лазерної генерації – потужність випромінювання на цій ділянці істотно вища, ніж на перших двох, а залежність потужності випромінювання від сили струму практично лінійна.

- Спектральна характеристика (рис. 3.11, б) – залежність потужності випромінювання від довжини хвилі; визначається струмом накачування (режимом роботи лазера). У світлодіодному режимі ширина спектра максимальна, а сама крива має гладкий неперервний характер.

При наближенні величини струму накачування до $I_{пор}$ (відповідає режиму суперлюмінесценції), ширина спектра істотно зменшується. У режимі лазерної генерації крива має яскраво виражені спектри окремих мод, що виникають через неідеальності оптичного резонатора. Ширина спектра при цьому зазвичай не перевищує кількох нанометрів, а ширина спектральної лінії окремої моди менша 0,01 нм.

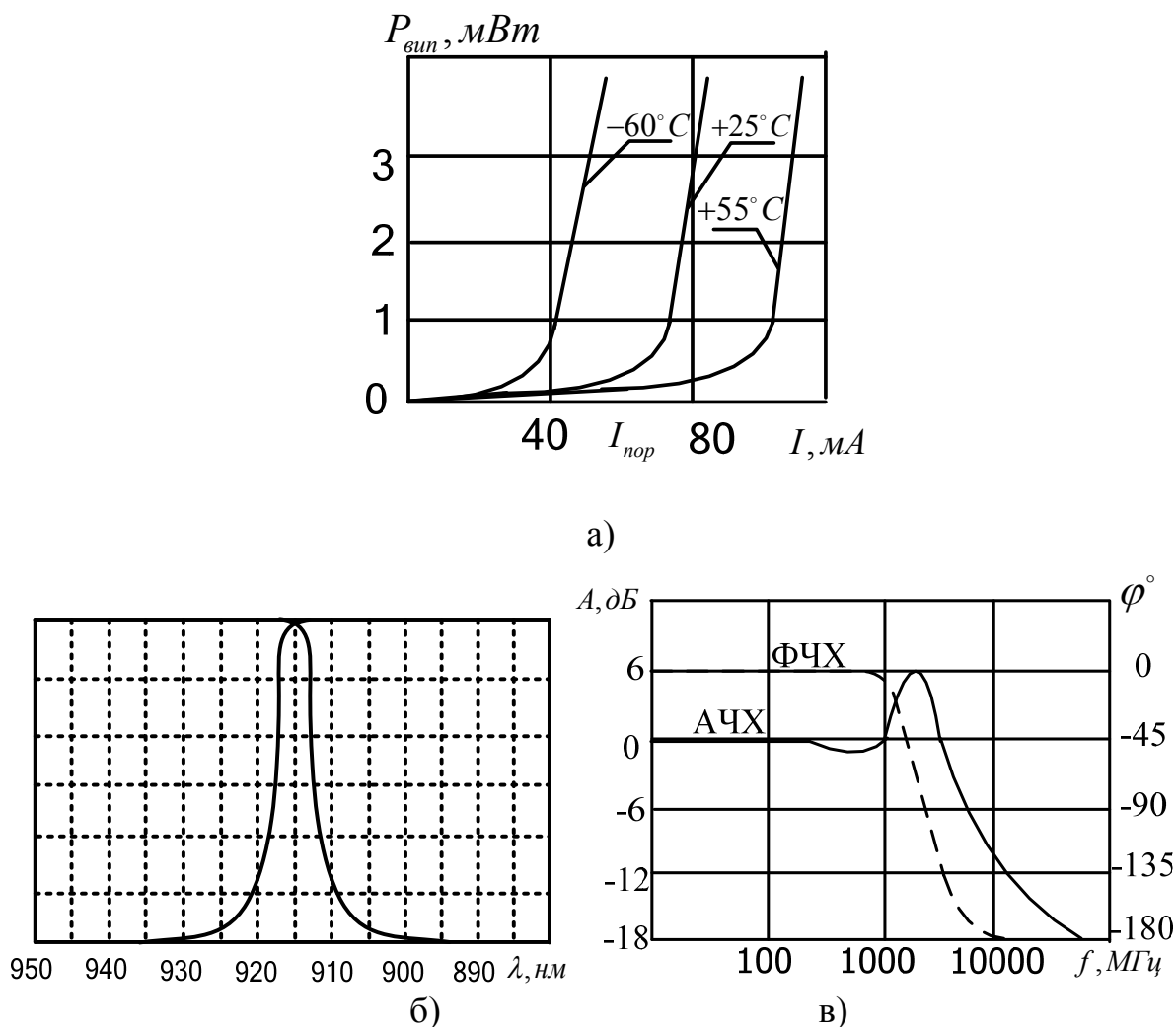


Рисунок 3.11 – Характеристики лазерів: а – ват-амперна, б – спектральна, в – частотна

• Частотна характеристика (рис. 3.11, в) – залежність значення амплітуди імпульсу оптичного випромінювання від частоти модуляції. Резонансний характер АЧХ лазера пояснюється тим, що зростання концентрації носіїв в активній області, викликане збільшенням модулювального струму, проходить з деякою затримкою. Підвищення концентрації викликає зростання рекомбінаційного випромінювання, яке, знову з затримкою, збільшує індуковану рекомбінацію, що призводить до зменшення концентрації носіїв. Наявність затримок приводить до переходу через рівноважний стан і процес стає коливальним – явище електрон-фотонного резонансу.

Основні параметри

Енергетичні параметри

1. Потужність випромінювання для неперервних лазерів.
2. Енергія випромінювання для імпульсних лазерів.
3. Середня потужність для імпульсно-періодичних лазерів.

4. Довгострокова і короткочасна нестабільності потужності лазерного випромінювання.

Просторово-енергетичні параметри

1. Діаметр і розхідність лазерного випромінювання.
2. Діаграма спрямованості.
3. Розподіл інтенсивності в поперечному перерізі.

Часові

1. Тривалість імпульсу.
2. Частота повторення імпульсів.

Спектральні

1. Довжина хвилі λ (частота ν) випромінювання.
2. Півширина спектральної лінії випромінювання D .
3. Модовий склад випромінювання.
4. Нестабільність частоти в часі.

Експлуатаційні

1. ККД лазера.
2. Споживана потужність $P_{\text{спож}}$.
3. Потужність системи накачування P_n .
4. Час готовності лазера до роботи $t_{\text{гот}}$.
5. Маса.
6. Габаритні розміри.
7. Термін служби.
8. Вартість.
9. Витрата газів, води.

3.2.1 Лазерний діод

Означення

Лазерний діод – лазер, в якому активним середовищем є електронно-дірковий газ, а робочою областю – напівпровідниковий р-п-перехід, аналогічний р-п-переходу звичайного світлодіода.

Призначення

Лазерні діоди – важливі електронні компоненти. Вони знаходять широке застосування як керовані джерела світла в оптоволоконних лініях зв'язку. Також вони використовуються в різному вимірювальному устаткуванні, наприклад лазерних далекомірах. Інше поширене застосування – зчитування штрих-кодів. Лазери з видимим випромінюванням, як правило червоні, а іноді і зелені – в цілевказівниках. Інфрачервоні і червоні лазери – в програвачах CD- і DVD-дисків. Сині лазери – в пристроях HD-DVD і Blu-Ray. Досліджуються можливості застосування напівпровідникових лазерів в швидких і недорогих пристроях для спектроскопії.

До моменту розробки надійних напівпровідникових лазерів в програвачах CD і зчитувачів штрих-коду розробники вимушені були використовувати невеличкі гелій-неонові лазери.

Система маркування

Така ж, як і у світлодіодів.

Принцип дії

Коли на анод звичайного діода подається позитивний потенціал, то говорять, що діод зміщений в прямому напрямі. При цьому дірки з р-області інжектуються в n-область р-n-переходу, а електрони з n-області інжектуються в р-область напівпровідника.

Якщо електрон і дірка виявляються «поблизу» (на відстані, коли можливе тунелювання), то вони можуть рекомбінувати (або анігілювати) з виділенням енергії у вигляді фотона певної довжини хвилі (через збереження енергії) і фонона (через збереження імпульсу, тому що імпульс фотона малий). Такий процес називається спонтанним випромінюванням і є основним джерелом випромінювання в світлодіодах.

Проте, за певних умов, електрон і дірка можуть знаходитися в одній області простору якийсь час перед рекомбінацією, вимірюваний мікросекундами. Якщо у цей момент через цю область простору пройде фотон потрібної частоти (резонансної частоти), він може викликати вимушену рекомбінацію з виділенням другого фотона, причому його напрям, вектор поляризації і фаза будуть у точності збігатися з тими ж характеристиками першого фотона. Такі процеси властиві лазерам.

Основні характеристики

Інжекційному струму на ВАХ лазерного діода відповідає ділянка з різким наростанням струму (рис. 3.12).

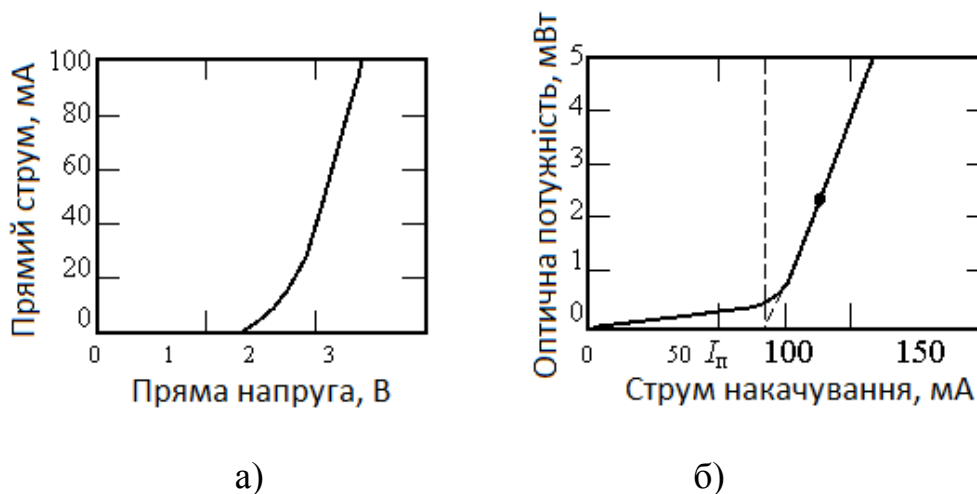


Рисунок 3.12 – Пряма гілка вольт-амперної характеристики (а) і ват-амперна характеристика (б) лазерного діода

Інжекційний струм різко зростає при напругах на р-n-переході

$$U > (E_g \cdot F) / q,$$

де E_g – ширина забороненої зони, F_n – рівень Фермі для електронів, F_p – рівень Фермі для дірок, F – найменше з F_n і F_p .

Величину $U_{\text{відкр.}} = (E_g \cdot F) / q$ – називають напругою відкриття р-n-переходу у прямому напрямку. На рис. 3.12, а), де показана ВАХ, ця величина вказує на початок різкого наростання струму.

Основні параметри

Лазерне випромінювання характеризується просторово-часовими та енергетичними параметрами.

У групі просторово-часових виділяють такі параметри:

1. *Частота лазерного випромінювання* – середня частота (або середня довжина хвилі) спектра лазерного випромінювання.

2. *Ширина лінії лазерного випромінювання* – відстань між точками контуру спектральної лінії лазерного випромінювання, відповідними половині інтенсивності лінії в максимумі.

3. *Розхідність лазерного випромінювання* – плоский або тілесний кут, що характеризує кутовий розподіл енергії або потужності лазерного випромінювання.

4. *Час готовності лазера* – час, необхідний для досягнення лазером експлуатаційних (номінальних) параметрів з моменту його включення.

До енергетичних параметрів лазера відносяться, перш за все, енергія E і потужність P лазерного випромінювання.

5. *Енергія лазерного випромінювання* визначає енергетичні можливості лазера.

6. *Потужність лазерного випромінювання* характеризує інтенсивність випромінювання енергії лазером, концентрацію енергії в часі.

Концентрація енергії (потужності) в просторі визначається густиною енергії (потужності) лазерного випромінювання, тобто енергією (потужністю) лазерного випромінювання, що припадає на одиницю площі перерізу пучка лазерного випромінювання.

Ефективність лазера як перетворювача енергії накачування в енергію випромінювання характеризується ККД, що дорівнює відношенню енергії або середньої потужності, випромінюваної лазером, відповідно до енергії або середньої потужності, що підводиться до лазера.

До енергетичних параметрів відноситься також поріг генерування лазера.

Еквівалентна схема

Еквівалентну схему лазерного діода можна подати у вигляді паралельно з'єднаних генератора струму $I(t)$ і елементів R і C (рис. 3.13).

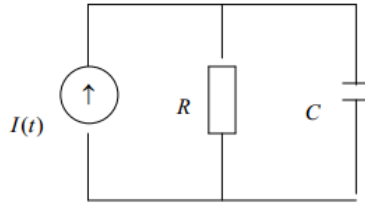


Рисунок 3.13 – Еквівалентна схема лазерного діода

Типова схема включення

Лазерні діоди повинні включатися в дуже надійне коло живлення, без перепадів струму і напруги. При роботі лазерного діода, якщо не забезпечується належний контроль температури і прямого струму, лазерний діод може вийти з ладу через перегрівання. Підвищення температури призводить до підвищення струму, підвищення струму, зі свого боку, до більшої розсіюваної потужності і так далі до виходу з ладу. У блоці живлення використовують демпфувальні кола для нейтралізації перепадів напруги і плавного виходу на робочий режим, а для контролю струму – зворотний зв'язок. Зворотний зв'язок реалізується схемотехнічно або за прямим струмом лазерного діода (ЛД), або за струмом фотодіода зворотного зв'язку, за його наявності в корпусі ЛД.

Конструкція лазерного діода

У лазерному діоді напівпровідниковий кристал виготовляють у вигляді дуже тонкої прямокутної пластинки (рис. 3.14). Така пластинка, по суті, є оптичним хвилеводом, де випромінювання обмежене у відносно невеликому просторі. Верхній шар кристала легується для створення n-області, а в нижньому шарі створюють р-область. В результаті виходить плоский р-n-перехід великої площі. Дві бічні сторони (торці) кристала поліруються для утворення гладких паралельних площин, які утворюють оптичний резонатор, званий резонатором Фабрі–Перро. Фотони, що випромінюють перпендикулярно до цих площин, пройдуть через весь оптичний хвилевід і кілька разів відіб'ються від них, перш ніж вийти назовні. Щоразу, коли фотон проходить уздовж резонатора, випромінювання підсилюватиметься завдяки механізму вимушеного випромінювання. І як тільки підсилення перевищить втрати – почнеться лазерна генерація.

З огляду на те, що випромінювальний елемент достатньо тонкий, промінь на виході діода, завдяки дифракції, практично відразу розходить. Для компенсації цього ефекту і отримання тонкого променя необхідно застосовувати збиральні лінзи.

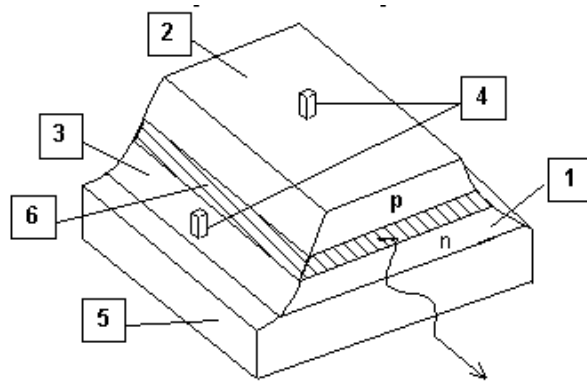


Рисунок 3.14 – Конструкція напівпровідникового лазерного діода:
 1 – поліровані торцеві поверхні; 2 – р-область; 3 – n-область;
 4 – електричні провідники; 5 – молибденова пластина, покрита шаром
 золота; 6 – область р-n-переходу

Для багатомодових широких лазерів найчастіше застосовуються циліндрові лінзи. Для одномодових лазерів, при використанні симетричних лінз, переріз променя буде еліптичним, оскільки розбіжність у вертикальній площині перевищує розбіжність в горизонтальній. Найнаочніше це видно на прикладі променя лазерної указки.

Приклади серійних приладів

FL-FCSE03-7-808 – волоконний лазерний діод. Доступний в різних типах корпусів. Цей лазерний діод підходить для застосування в різних оптико-електронних системах.

Зовнішній вигляд діода FL-FCSE03-7-808 наведено на рис. 3.15, а основні його параметри – у табл. 3.2.

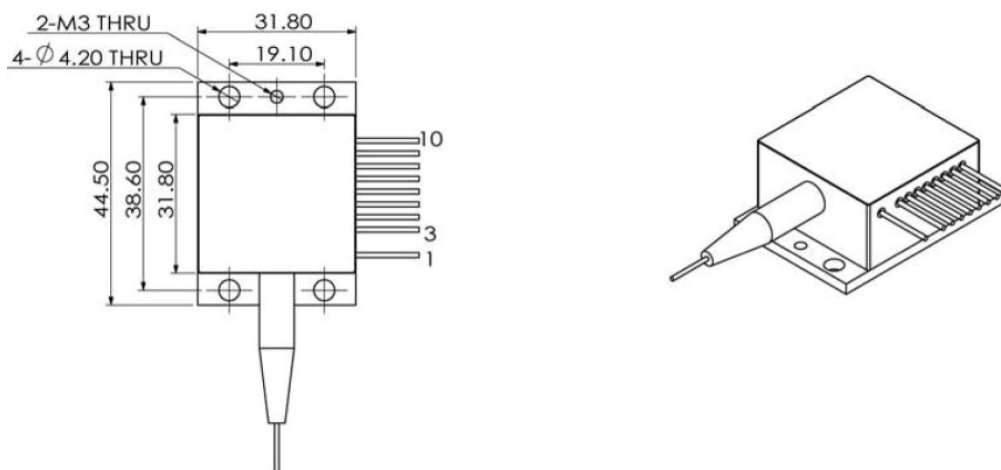


Рисунок 3.15 - Зовнішній вигляд лазерного діода FL-FCSE03-7-808

Таблиця 3.2 – Основні технічні параметри лазерного діода FL-FCSE03-7-808

Модель	Розмір-ність	FL-FCSE03-7-808
Оптичні		
Центральна довжина хвилі – λ	нм	808
Точність довжини хвилі	нм	± 3
Вихідна потужність	Вт	7
Ширина спектра FWHM	нм	< 3
Ширина спектра FW90%E	нм	< 4
Температурний коефіцієнт	нм/°C	-0.28
Параметри волокна		
Числова апертура	NA	0.22
Діаметр осердя	мкм	200/220
Конектор	-	SMA905
Довжина волокна	м	1.5/2
Електричні параметри		
Робочий струм – I_{op}	А	< 8.5
Пороговий струм – I_{th}	А	< 1.0
Робоча напруга – V_{op}	В	< 2.1
Нахил ВТАХ	Вт/А	> 0.9
ККД	%	> 40
Температура зберігання	°C	
Рекомендована потужність відведення тепла	Вт	

Контрольні запитання

1. Що таке джерело оптичного випромінювання?
2. Які вимоги висуваються до випромінювачів оптичних систем передачі?
3. Що являє собою світлодіод?
4. Які конструкції СВД застосовуються в системі зв'язку?
5. На чому оснований принцип дії СВД?
6. Яка принципова відмінність мають торцевий і поверхневий СВД?
7. Які характеристики має СВД?
8. Який пристрій називається лазером?
9. З яких елементів складається лазер?
10. Які умови лазерної генерації?
11. Які характеристики мають напівпровідникові лазери?

4 ОПТИЧНІ ІНДИКАТОРИ

Означення

Індикатори – пристрої, які перетворюють електричний сигнал на просторове розподілення яскравості (контраст).

Призначення

Пристрої призначені для перетворення електричних сигналів на візуальну інформацію.

Класифікація

За типом фізичного ефекту.

1. Світіння вольфрамової нитки, поміщеної в вакуум і розжареної пропусканням через неї електричного струму (індикатори розжарення).

2. Світіння, що супроводжує електричний розряд в газах (газорозрядні індикатори).

3. Передпробійна електролюмінесценція порошкових люмінофорів в змінному електричному полі (катодолюмінесцентні індикатори).

4. Інжекційна люмінесценція монокристалічних напівпровідників з р-п-переходами (напівпровідникові індикатори).

5. Електролюмінесценція тонких полікристалічних напівпровідникових плівок в постійному і змінному електричних полях (тонкоплівкові електролюмінесцентні індикатори (ЕЛП)).

6. Електрооптичні ефекти в рідких кристалах (рідкокристалічні індикатори).

Індикатори типів 1 – 5 працюють на світлогенераційних ефектах, в той час як рідкокристалічні прилади потребують зовнішнього підсвічування і оснований на зміні світлових характеристик.

Серед світлогенераційних індикаторів виділяються прилади з прямим (2, 3, 4, 5) і двоступінчастим (1) перетворенням електричної енергії на світлову. Індикатори типів 1, 4, 5 керуються електричним струмом, а типів 2, 3, 6 – напругою.

Як активні середовища в індикаторах виступають метал (1), напівпровідники (4, 5), порошки (3), рідкі кристали (6), гази (2).

Найпоширенішими є напівпровідникові, газорозрядні, люмінесцентні і рідкокристалічні індикатори.

Різні типи індикаторів можуть бути розбиті на такі групи:

1 – знакомодулювальні, в яких перетин світлового та електронного пучка повторює форму знака;

2 – знакогенерувальні, в яких зображення формується за допомогою мозаїки незалежно керованих елементів–перетворювачів сигнал–код.

За характером відображення інформації індикатори поділяються на одиничні (точкові), шкальні, цифрові і цифро-літерні (одно- і багаторозрядні), матричні та мнемонічні.

Система маркування

Маркування знакосинтезувальних індикаторів має восьмизначну літерно-цифрову систему умовних позначень. Вона охоплює такі елементи.

Перший: І – індикатор знакосинтезувальний.

Другий – тип індикатора: Н – розжарюваний; Л – люмінесцентний; П – напівпровідниковий; Ж – рідкокристалічний.

Третій – тип інформації, що відображається: Г – графічна; В – літерно-цифрова; Д – одинична; М – мнемонічна; Т – шкальна; Ц – цифрова.

Четвертий – номер розробки:

1 – 69 – індикатори без вбудованого керування;

70 – 99 – індикатори з вбудованим керуванням.

П'ятий – класифікація за групою параметрів:

Використовуються всі букви кирилиці від А до Я крім З, И, О, Ъ, Ч, Ш, Щ.

Шостий – кількісна характеристика інформаційного нуля індикатора:

Однорозрядні і багаторозрядні цифрові – в чисельнику кількість розрядів, в знаменнику кількість сегментів.

Однорозрядні і багаторозрядні матричні індикатори – в чисельнику кількість розрядів, в знаменнику – добуток кількості елементів в рядку на кількість елементів в стовпці.

Для матричних індикаторів без виділення знакомісця – добуток кількості елементів в рядку на кількість елементів в стовпці.

Для шкальних і мнемонічних індикаторів – кількість елементів в індикаторі.

Сьомий – колір світіння: Л – зелений, Г – блакитний, К – червоний, Ж – жовтий, С – синій, Р – помаранчевий; багатобарвні – М.

Восьмий – модифікація, цифра 1 – 8.

Спеціальне маркування мають індикатори, призначені для використання в апаратурі масового використання. Перед зазначеним восьмизначним позначенням в цьому маркуванні стоїть буква К.

Приклади маркування індикаторів:

КІПГ-02А 8Х8Л – індикатор масового вжитку (К), знакосинтезуючий (І), напівпровідниковий (П) з відображенням графічної інформації (Г), номер розробки 2 (02), група параметрів А, матричний розміром 8×8 елементів (8Х8), з зеленим світлом (Л);

ІЖЦ5–6/7 – знакосинтезувальний індикатор (І), рідкокристалічний (Ж), цифровий (Ц), номер розробки 5, багаторозрядних з числом розрядів 6 на 7 сегментів в кожному розряді (6/7).

Основні параметри та характеристики

До загальних параметрів індикаторів різних типів відносять:

- 1) яскравість;
- 2) контрастність;
- 3) кут огляду;
- 4) світлову віддачу;
- 5) споживану потужність;
- 6) час перемикання;
- 7) термін служби (ресурс).

Для електролюмінесцентних індикаторів також важливими є такі параметри як: ємність індикатора, опір ізоляції та опір струмопровідних шин. А однією з найважливіших характеристик є кандел-вольтова.

4.1 Індикатори розжарювання

Означення

Індикатори розжарювання – це електровакуумні прилади (рис. 4.1), всередині яких на ізольованій основі підвішені декілька самостійно керуванних ниток розжарювання з товщиною спіралі близько 60 мкм. Вакуумні розжарювані індикатори є одними з перших «дооптоелектронних» індикаторів, що є різновидом ламп розжарювання.

Класифікація

До розжарюваних індикаторів відносяться:

- лампи розжарювання;
- знакові розжарювані вакуумні індикатори.

Принцип дії

В вакуумному скляному балоні сформовано цифри (рис. 4.1) з вольфрамових ниток розжарювання, що мають високий опір та при пропусканні через них струму розігріваються до температури 1250 °С і починають випромінювати світло. Один вивід від всіх ниток розжарювання робиться загальним, а інший використовується при комутації, що здійснюється через спеціальну схему керування. Збудження індикаторів проводиться дією постійної, змінної або імпульсної напруги між загальним виводом і окремими выводами збуджуваних сегментів. У будь-якому випадку нагрівання елемента відображення запізнюється, так що час готовності (інтервал часу від моменту прикладення електричного сигналу до досягнення яскравістю 80% від сталого значення) становить в середньому 0,2 ... 0,25 с.

Конструкція

Конструктивно розжарюваний індикатор складається зі скляного балона 1, всередині якого на ізольованій основі 2 підвішені на опорах 3 нитки

розжарювання 4 у вигляді знаків або цифр. Кожна цифра може становити окрему нитку розжарювання, при цьому всі цифри просторово розділені.

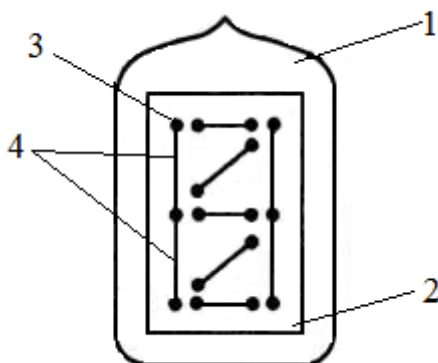


Рисунок 4.1 – Конструкція розжарюваного індикатора

Вакуумні розжарювані індикатори мають ряд цінних якостей: забезпечують висококонтрастне зображення цифр і знаків; не сприйнятливі до радіаційних, електричних і магнітних полів; працюють при низьких напругах живлення (близько 6 В) і добре узгоджуються з цифровими мікросхемами.

З недоліків слід зазначити відносно великий струм і підвищене виділення тепла при роботі, громіздкість.

В цілому вакуумні розжарювані індикатори малоперспективні.

Приклади серійних індикаторів.

Вакуумний індикатор розжарювання ИВ-16 (рис. 4.2) призначений для роботи в ролі візуального цифрового індикатора електричних сигналів.

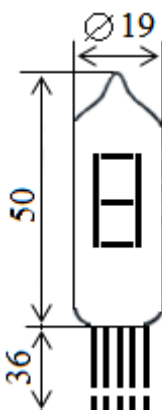


Рисунок 4.2 – Конструкція корпусу ИВ-16

Параметри індикатора наведено нижче.

Яскравість світіння – 1700-3000 кд/м².

Кут огляду $\geq 120^\circ$.

Струм розжарювання сегмента – $19,5 \pm 2,5$ мА.

Напруга розжарювання сегмента (постійна або змінна) – $3,15 + 1,35$ В.

Напруга розжарювання в імпульсному режимі ≤ 300 В.

Частота змінної або імпульсної напруги сегмента – менша 10^5 Гц або більша 1000 Гц.

Напрацювання ≥ 10000 год.

Розмір знакомісця: 6×12 мм.

Колір світіння – солом'яно-жовтий.

Маса 12 г.

4.2 Газорозрядні індикатори (ГРІ)

Означення

Газорозрядний індикатор – прилад, дія якого обумовлена світінням при електричному розряді в газовому середовищі.

Класифікація

Серед існуючих газорозрядних індикаторів можна виділити основні типи приладів:

- 1) сигнальні індикатори – точка або мала область, що світиться (наприклад, неонова лампочка);
- 2) знакові і лінійні (шкальні) індикатори;
- 3) індикаторні тиратрони;
- 4) матричні індикаторні панелі.

Знакові індикатори використовують слабке світіння тліючого розряду поблизу катода (світіння покриває весь катод, який має форму відображуваного символу). Сукупність незалежних катодів дозволяє отримувати різні зображення.

Індикаторні тиратрони мають кілька електродів управління: сіток і анодів, що дозволяє більш ефективно управляти електричним розрядом. На сьогодні практично не застосовуються.

Принцип дії

У газорозрядних індикаторах використовується випромінювання газового розряду. Як наповнювач газорозрядного проміжку використовуються або чисті інертні газы, або їхні суміші. Основною газовою сумішшю, що використовується в газорозрядних індикаторах, є суміш гелію з неоном (до них іноді в малих кількостях додаються і інші інертні газы).

Розрізняють основні типи газового розряду: темний, тліючий, дуговий. Усі газорозрядні індикатори працюють в режимі тліючого розряду з холодним катодом.

Скляний балон індикатора, в якому розташовані анод та катод, заповнений інертним газом. Анод приладу складається з двох розташованих на різних рівнях і електрично з'єднаних між собою тонких дротяних сіток.

Один з анодів розташований над катодами, а інший – між катодами, розбитими на дві групи. Катоди $1...n$ розташовуються стоячком, у глибину один за іншим.

При подаванні робочої напруги на анод і один з індикаторних катодів енергія електронів досягає значень, необхідних для іонізації атомів газу. Зіткнення електронів з атомами стають непружним, відбувається збудження й іонізація атомів. В результаті іонізації утворюються додаткові електрони і позитивно заряджені іони, в газі виникає самостійний розряд.

Вигляд світіння тліючого розряду має форму катода.

Для обмеження струму розряду і стабілізації його величини послідовно з розрядним проміжком включають обмежувальний резистор (рис. 4.3).

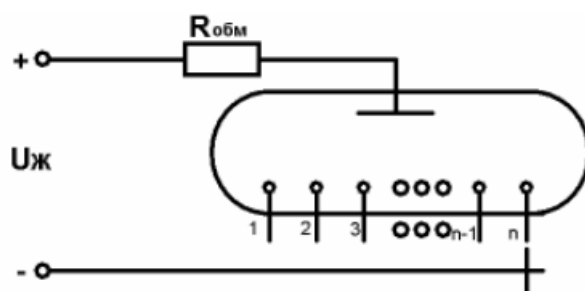


Рисунок 4.3 – Схема включення ГРІ

В однорозрядних ГРІ кожен катод являє собою певним чином задану геометричну деталь (цифри, літери). Крім цифр і літер катода можуть мати форму знаків «+», «-» і т. ін.

Основні параметри

Світловіддача індикаторів цього типу становить $\sim 0,2-0,3$ лм/Вт; в червоній області спектра, де 1 Вт відповідає приблизно 100 лм, енергетичний вихід дорівнює $\sim 0,2-0,3\%$.

Температурний діапазон роботи становить від -60 °С до $+70$ °С.

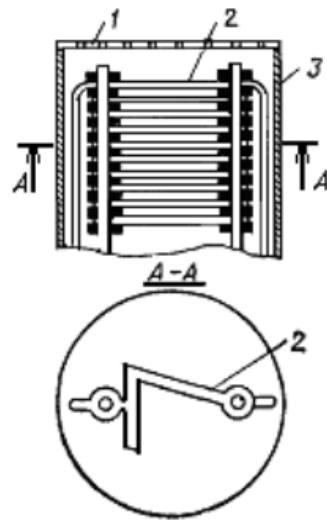
Світловіддача газорозрядних індикаторних приладів, які використовують світіння фотолюмінофору $\sim 0,5-1$ лм / Вт, енергетичний вихід $<1\%$.

Газорозрядні індикатори мають значний ($\sim 10\ 000$ годин) термін служби, який може бути ще підвищено, наприклад, введенням до складу газової суміші парів ртуті.

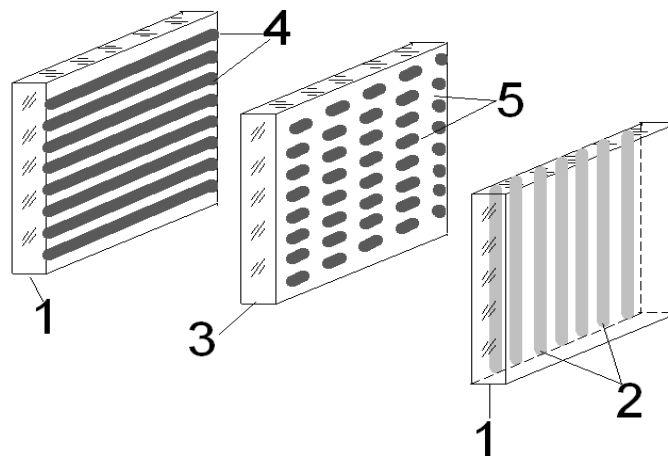
Конструкції

1. Розглянемо найпростіший за конструкцією та принципом дії знакомодельовальний газорозрядний індикатор (рис. 4.4, а). Він містить набір з десяти катодів 2, кожен з яких має форму цифри, оточеної з усіх боків анодним електродом 3. Для виведення випромінювання верхня частина анода 1 виконана у вигляді оптично прозорої сітки. Прилад працює в режимі тліючого розряду. Оскільки тиск газу в приладі становить кілька тисяч па-

скалів, то світіння тліючого розряду утворює тонку (товщиною в десяті частки міліметра) область, що щільно оточує катод. Через це область світіння має форму, досить близьку до контура відображуваної цифри (катода).



а)



б)

Рисунок 4.4 –Конструкція знакомодельовального газорозрядного індикатора (а), структура газорозрядної індикаторної панелі (б)

2. Конструкція газорозрядних індикаторних панелей, які також називають матричними індикаторами, що являють собою множину світлопроміньовальних елементів, утворюваних на перетині взаємно перпендикулярних електродів, наведено на рис. 4.4, б). Утворені в місцях перетину анодів 5 (які утворюють рядки) і катодів 2 (стовпці) світлопроміньовальні комірки електрично і оптично ізольовані одна від одної за допомогою діелектричної матриці 3, отвори 4 в якій з'єднані з місцями перетину електродів. Простір між підкладками 1 заповнено газом.

Приклади серійних індикаторів

ИН-14 – Індикатор тліючого розряду, що здійснює індикацію крізь бічну поверхню балона (рис. 4.5).

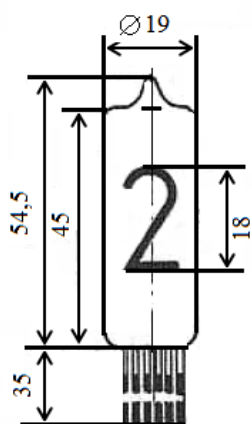


Рисунок 4.5 – Газорозрядний індикатор ИН-14: конструкція (а) та зовнішній вигляд (б)

Параметри індикатора такі.
Яскравість світіння – 50 кд/м^2 .
Кут огляду – 60° .
Напруга джерела живлення – 200 В.
Напруга виникнення розряду – не більше 170 В.
Робочий струм – не менше 2,5 мА.
Час запалювання – не більше 1 с.
Температура навколишнього середовища – від -60°C до $+70^\circ \text{C}$.
Напрацювання – не менше 5000 год.
Колір світіння – помаранчевий.

4.3 Катодолюмінесцентні індикатори

Означення

Катодолюмінісцентний індикатор (КЛІ) (або вакуумний люмінесцентний індикатор) – це електровакуумний прилад, який працює, використовуючи явище катодолюмінесценції, що виникає при збудженні люмінофора прискореними електронами. Якщо енергія електронів порівняно невелика (до декількох десятків електрон-вольт), то говорять про низьковольтну катодолюмінесценцію, яка застосовується в вакуумних люмінесцентних індикаторах (ВЛІ).

Катодолюмінесценція, що виникає в електронно-променевих трубках, характеризується набагато більшою енергією електронних пучків (десятки

кілоелектрон-вольт). При опроміненні люмінофора частина первинних електронів, що потрапляють на поверхню кристалів, відчуває пружне або непружне відбиття, інша частина проникає вглиб люмінофора на деяку глибину, тим більшу, чим більша їхня кінетична енергія. Ця енергія витрачається на створення елементарних збуджень кристалічної решітки – екситонів, електронно-діркових пар, плазмонів (колективних коливань вільних електронів) і т. ін., які, мігруючи по кристалу, можуть порушувати центри світіння.

Крім того, електрони високих енергій можуть іонізувати атоми, вибиваючи на своєму шляху вторинні електрони, здатні також взяти участь в створенні елементарних збуджень решітки. Як результат – область, в якій відбувається міграція екситонів та електронно-діркових пар, а також виникає люмінесценція, виявляється помітно ширшою за область, в яку проникають електрони з падаючого променя.

Класифікація

За типом інформації та способам управління ВЛІ можна розділити на дві групи:

- 1) цифрові, літерно-цифрові сегментні, шкальні, знакові (мозаїчні) індикатори зі статичним управлінням;
- 2) матричні індикатори (екрани) з динамічним (мультиплексним) управлінням.

Статичне управління зазвичай використовується для однорозрядних індикаторів. Кожен електрод індикатора (анодин-сегменти, сітка, катод) окремо підключається до джерел живлення (постійної або імпульсної напруги для анодів і сітки). Управління може здійснюватися за будь-яким з трьох кіл.

У динамічному режимі управління можуть працювати як однорозрядні, так і багаторозрядні індикатори. Режим характеризується тим, що відповідні анодин-сегменти кожного однорозрядного індикатора і кожного знакомісця в багаторозрядних індикаторах мають загальне підключення до джерел живлення (імпульсного напруги). Управління здійснюється за колами сітки і анодів.

Конструкція

Вакуумний люмінесцентний індикатор (ВЛІ) – вакуумний прилад діодної або тріодної конструкції. Найбільш поширеною є тріодна конструкція, що складається з катода прямого розжарювання, сітки і декількох анодів, покритих низьковольтним люмінофором та укладених у вакуумний балон (рис. 4.6).

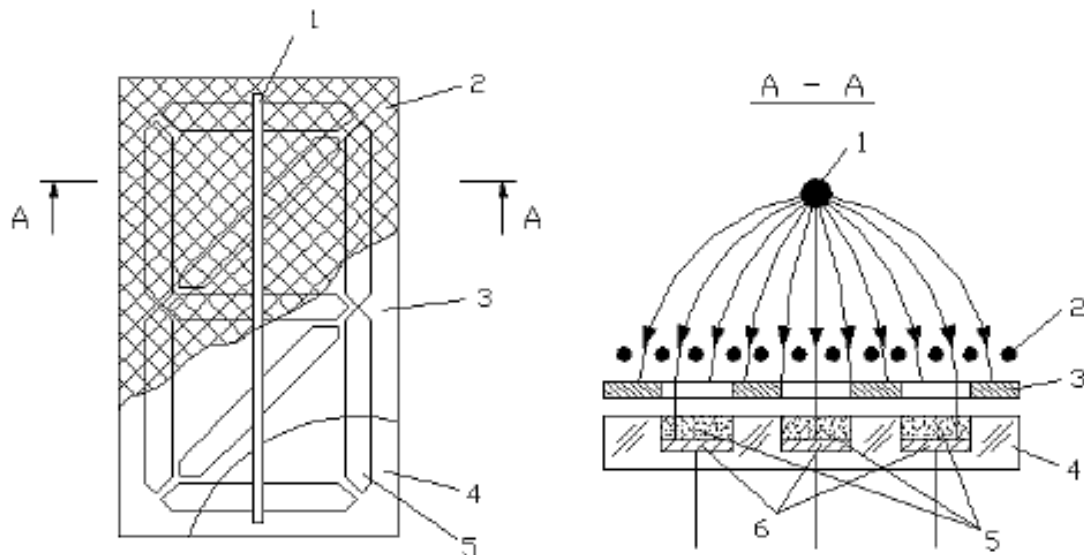


Рисунок 4.6 – Будова вакуумного люмінесцентного індикатора (а):
1 – катод, 2 – сітка, 3 – екран, 4 – підкладка, 5 – люмінофор, 6 – анод

Принцип дії

Принцип дії індикатора оснований на перетворенні кінетичної енергії електронів на видиме випромінювання люмінофорного покриття анодів-сегментів. Функції анода виконують кілька електродів, покритих люмінофором. Електрони, вилітаючи з катода 1, що має температуру 900–1000 К, прискорюються електричним полем сітки 2 і сегментів анода 6. Досягаючи цих сегментів, електрони збуджують люмінофор 5, викликаючи його світіння. Для керування індикатором напруга подається лише на ті сегменти анода, які формують потрібне зображення. Інші сегменти знаходяться під тою ж напругою, що і катод; електрони, відбиваючись від них, потрапляють на екран 3, з'єднаний з сіткою. На цей же екран потрапляє та частина електронів, що не досягає позитивно заряджених сегментів анода. Сітка 2 необхідна для того, щоб потік електронів в області анода був більш рівномірним, її потенціал зазвичай дорівнює потенціалу анода. У початковому стані, коли напругу управління не подано, для запобігання небажаного світіння сітка має негативний потенціал на кілька вольт нижчий, ніж катод. Всю систему електродів разом з підкладкою 4 поміщають в вакуумований скляний балон.

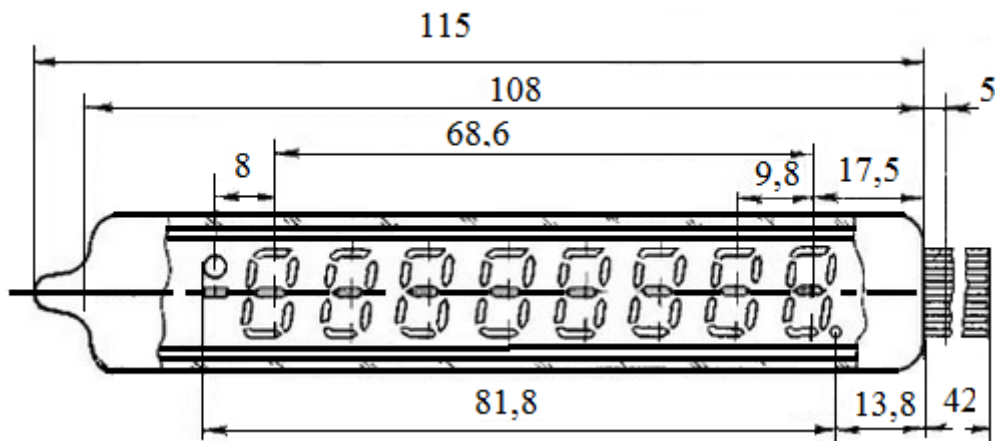
Застосування в вакуумних люмінесцентних індикаторах катодолюмінофорів різних типів дозволяє отримувати світіння від синьої ($\text{ZnS: Ag} + \text{In}_2\text{O}_3$) до червоної ($\text{ZnCdS: Ag} + \text{In}_2\text{O}_3$) областей спектра. У деяких люмінофорів спектр випромінювання виявляється залежним від прискорювальної напруги, при високих енергіях первинних електронів порушуються глибші центри світіння. Так, при збільшенні анодної напруги від 20 до 60 В, колір світіння індикаторів з $\text{SnO}_2: \text{Eu}$ і ZnS: Cl , Ag -люмінофорами змінюється від помаранчевого до жовто-зеленого. На практиці найбільшо-

го поширення набув порівняно дешевий люмінофор на основі ZnO: Zn, що дає інтенсивне випромінювання в синьо-зеленій області спектра (максимум спектра відповідає довжині хвилі 510 нм). Застосування спеціально підібраних світлофільтрів дозволяє урізноманітнити колір світіння індикаторів.

Оксидний катод являє собою тонку вольфрамову нитку, покриту потрійною сумішшю оксидів BaO, SrO, CaO. Технології вакуумної обробки матеріалів, герметизації, відкачування, формування параметрів вакуумних люмінесцентних індикаторів базуються на процесах, широко використовуваних в масовому виробництві електривакуумних приладів.

Приклади серійних індикаторів

Вакуумний люмінесцентний індикатор ИВ-18 (рис. 4.7) призначений для відображення інформації одночасно в восьми цифрових і в одному знаковому (службовому) розрядах у вигляді цифр, точки і знаків, які формуються в одній площині з окремих світних сегментів, в пристроях широкого застосування, що використовують принцип індикації з часовим ущільненням. Світіння – зелене.



а)



б)

Рисунок 4.7 – Конструкція корпусу (а), зовнішній вигляд (б) ИВ-18

Основні параметри.
Колір світіння: зелений
Номинальна яскравість індикатора одного цифрового розряду – 900 кд/м²,
службового розряду – 200 кд/м².
Напруга розжарення: 5 В.
Струм розжарення: 85 ± 10 мА.
Напруга анода-сегмента імпульсна: 50 В.
Струм анодів-сегментів імпульсний сумарний ИВ-18 (тип 1): 45 мА.
Струм анодів-сегментів імпульсний сумарний ИВ-18 (тип 2): 40 мА.
Напруга сітки імпульсна: 50 В.
Струм сітки 8-го і 9-го розрядів, сумарний: 10 мА.
Шпаруватість: 10 ± 1,0.
Мінімальне напрацювання: 10 000 год.
Яскравість індикації, не менше: 100 кд / м².
Термін зберігання, не менше: 4 р.
Гранично допустимий електричний режим індикатора ИВ-18 (тип 1, 2):
Найбільша напруга анодів-сегментів: 70 В.
Найбільша напруга сітки імпульсна: 70 В.
Найбільший струм анода-сегмента: 1,3 мА.

4.4 Напівпровідникові індикатори

Означення

Напівпровідникові індикатори (НПІ) – прилади, в яких використовується явище інжекційної електролюмінесценції в прямозмщеному р-п-переході на основі таких напівпровідників, як GaP, GaAsP, GaAlAs, GaN, InGaN, SiC. Вибір матеріалу визначається необхідністю отримання заданих кольорів світіння.

Перші напівпровідникові світловипромінювальні прилади (на основі карбиду кремнію) були створені в 1922 р. радянським вченим О. В. Лосєвим, який також заклав основи сучасних уявлень про механізми випромінювання (електролюмінесценції) і можливі застосування світловипромінювальних р-п-переходів.

Класифікація

НПІ класифікують за видом інформації, що відображається, за видом інформаційного поля і за способом управління таким чином.

1. Одиничні індикатори або світловипромінювальні діоди – складаються з одного елемента відображення і призначені, в основному, для відображення інформації у вигляді точки або інших геометричних фігур.

За конструктивним виконанням вони поділяються на три групи:

- а) безкорпусні;
- б) з полімерною герметизацією;

в) в герметичних металоскляних корпусах.

2. Шкальні індикатори мають елементи відображення у вигляді правильних прямокутників і призначені для відображення інформації у вигляді рівнів або значень їхніх величин. Окрему групу шкальних індикаторів становлять так звані лінійні формувачі зображення в високонадійних оптоелектронних реєстрах оперативної аерокосмічної інформації на фотоплівку.

За конструктивним виконанням поділяються на:

- а) в безкорпусному виконанні;
- б) з полімерною герметизацією без світлопроводів,
- в) зі світлопроводами;
- г) в герметичних склокерамічних корпусах.

3. Цифрові індикатори (ЦІ) – складаються з елементів відображення у вигляді сегментів і призначені для відображення цифрової інформації та окремих букв алфавіту.

За конструктивним виконанням поділяються на такі групи:

- а) безкорпусні монолітні;
- б) монолітні з полімерною герметизацією;
- в) гібридні з різними світлопроводами;
- г) монолітні в склокерамічному корпусі.

4. Літерно-цифрові (ЛЦІ) напівпровідникові індикатори призначені для відображення інформації у вигляді букв (російського, арабського, латинського і грецьких алфавітів) і цифр, інших знаків і символів. Одиночні елементи відображення таких індикаторів згруповані по рядках і стовпцях.

За конструктивним виконанням поділяються на дві групи:

- а) монолітної конструкції з світлопроводів;
- б) порожниста конструкція без світлопроводів.

5. Графічні (матричні) індикатори – дозволяють складати модулі з елементів екрана різного розміру без втрати кроку. Графічні індикатори призначені для відображення будь-якої інформації.

Цифрові і буквено-цифрові індикатори бувають одно- і багаторозрядні.

Принцип дії

Принцип дії світлодіодів різних типів описано у попередньому розділі.

Конструкція

Найпоширеніші такі конструкції напівпровідникових індикаторів.

1. Монолітна (рис. 4.8, а). Сегменти з типовим розміром 2×3 мм створюються методами фотолітографії на напівпровідниковому кристалі. Зображений на рис. 4.8, б) прилад складається з ряду р-областей, розташованих в підкладці n-типу.

n-шар є негативним контактом для всіх р-n-переходів. Інші контакти створюються осадженням металу на діелектричний шар, що покриває поверхню.

2. Гібридна (рис. 4.8, б). Кожен сегмент – окремий випромінювальний кристал на керамічній підкладці. При виготовленні індикаторів з розміром знака 7 мм або більше кращою є гібридна структура, що забезпечує помітну економію дорогого напівпровідникового матеріалу. Для перетворення точкового світіння з випромінювачів, розміром близько $0,3 \times 0,3 \text{ мм}^2$, на світіння сегмента в шарі пластмаси виготовляються поздовжні порожнини, заповнені світлорозсіювальним матеріалом і закриті зверху дифуззором. Іноді порожнину заповнюють повітрям, а її внутрішні стінки покривають відбивальним шаром. Гібридна конструкція також застосовується для багаторозрядних індикаторів.

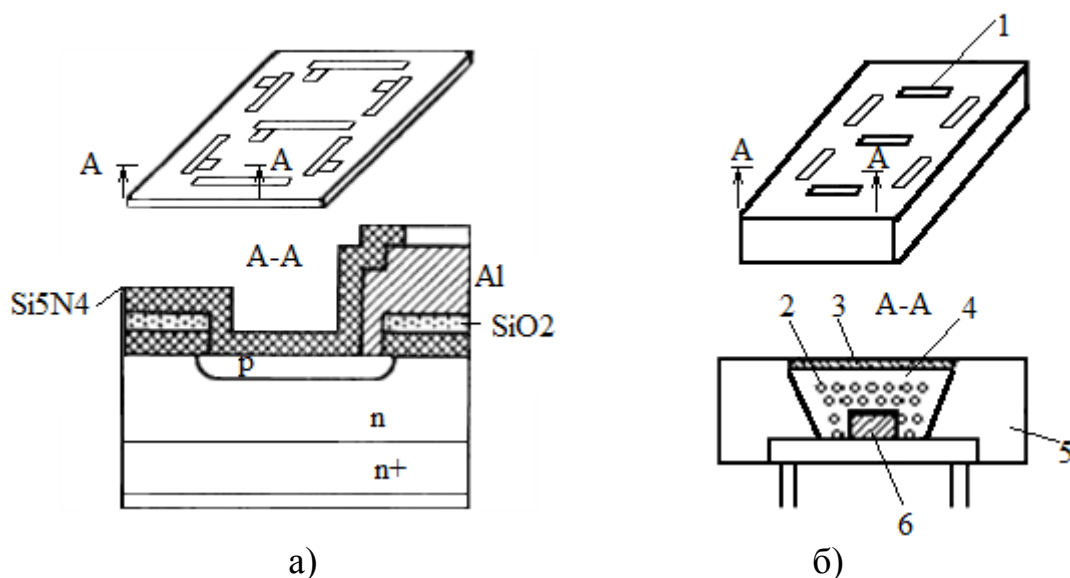


Рисунок 4.8 – Конструкція напівпровідникових індикаторів: а – монолітного, б – гібридного (1 – сегмент; 2 – світлорозсіювальний матеріал; 3 – дифуззор; 4 – порожнина; 5 – пластмаса; 6 – випромінювач)

У багаторозрядних монолітно-гібридних індикаторах використовується пластмасова моноблочна лінза (рис. 4.9, а).

Кристали розміщують в основі конічних розширених прорізів в пластмасовому корпусі (рис. 4.9, б).

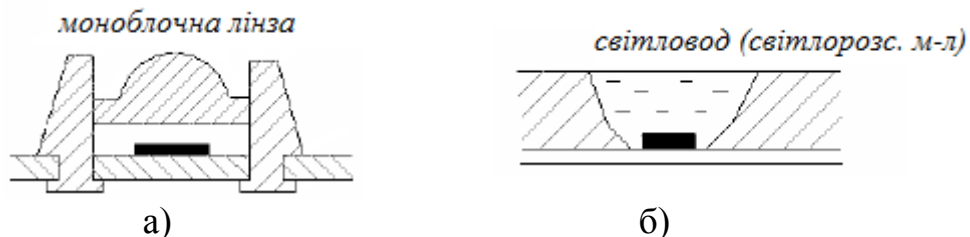


Рисунок 4.9 – Структура індикатора індикатора з моноблочною лінзою (а) та з світлорозсіювальним матеріалом (б)

Приклади серійних індикаторів

АЛС313А-5 – Знаковий напівпровідниковий індикатор планарно-епітаксціальний безкорпусний (рис. 4.10). Призначений для відображення цифрової та буквеної інформації, зокрема в електронних наручних годинниках.

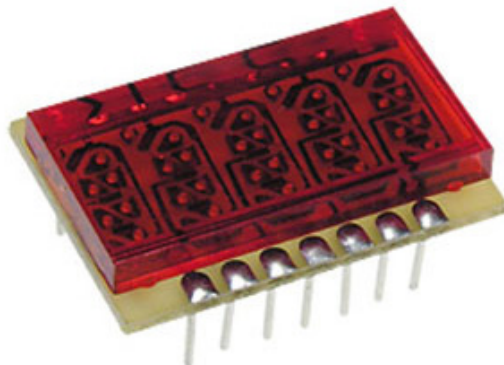


Рисунок 4.10 – Індикатор АЛС313А-5, зовнішній вигляд

Електричні та випромінювальні параметри.

- Сила світла елемента при струмі 5 мА, не менша 50 мккд.
 - Розкид сили світла елементів, не більший 30%.
 - Пряма напруга на елементі при прямому струмі 5 мА, не більша 1,65 В.
 - Типове значення довжини хвилі максимуму спектра випромінювання – 660 ± 10 нм.
 - Колір світіння – червоний.
- Граничні експлуатаційні дані.
- Імпульсний прямий струм при $f_i = 100$ Гц та температурі:
від 263 до 308 К – 20 мА;
від 308 до 333 К – 20-0,2, мА.
 - Середній прямий струм через елемент при температурі:
від 263 до 308 К – 5 мА;
від 308 до 333 К – 5-0,04, мА.
 - Зворотна напруга будь-якої форми і періодичності – 5 В.
 - Температура навколишнього середовища – від 263 до 333 К.

4.5 Плівкові електролюмінесцентні індикатори

Означення

Електролюмінесцентні індикатори – прилади, дія яких ґрунтується на використанні випромінювання світла тілами під дією електричного поля (електролюмінесценція).

Принцип дії

Електролюмінесцентний індикатор (рис. 4.11) являє собою плоский конденсатор, однією з обкладинок якого є суцільний прозорий електрод, а інший – електрично розділені металеві площадки (мозаїчний електрод).

Між електродами розміщується тонкоплівкова структура з люмінесцентного порошку, виготовленого на основі сульфїду цинку, легованого спеціальними активаторами. При подачі на електроди індикатора змінної напруги в шарі люмінесцентного порошку виникає світлове випромінювання. Залежно від застосованого активатора виходять різні кольори світіння: зелений, жовтий, блакитний, червоний. Технологічно для отримання індикатора використовують скляну підкладку, на яку методом електронно-променевого випаровування в вакуумі наноситься робоча плівка люмінесцентного порошку, укладена між двома ізолювальними шарами, наприклад плівками оксиду ітрію. Передній електрод виконується прозорим, задній – з непрозорої алюмінієвої плівки заданої конфігурації.

Конструкція

У плівкових ЕЛІ змінного струму на підкладку зі скла напильється прозорий електрод 5 (рис. 4.11), а на нього тим самим способом наноситься шар діелектрика 2 з високою діелектричною проникністю. Як світлопротинювальний шар 3 використовуються плівки люмінофора $ZnS:TbF_3$ або $ZnS:Mn$, або інший, завтовшки близько 0,2 мкм. На плівку наноситься другий непрозорий електрод 1. Активування люмінофора рідкоземельними фтористими з'єднаннями дозволяє досягти високої світловидатності і яскравості, а також змінювати колір світіння.

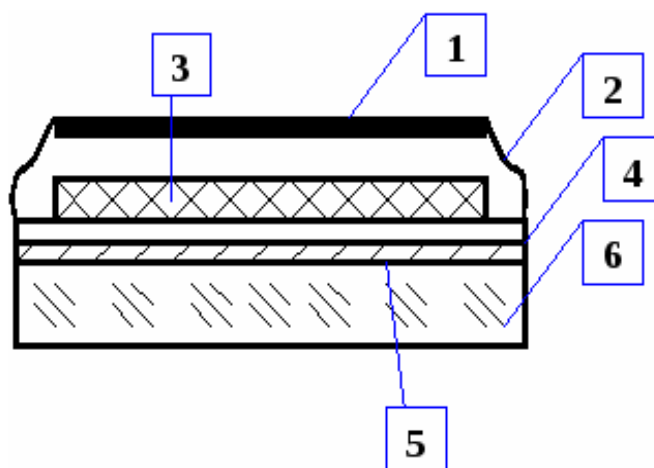


Рисунок 4.11 – Плівковий ЕЛІ: 1 – непрозорий електрод, 2 – ізоляційний матеріал (Y_2O_3), 3 – люмінофор ($ZnS:Mn$), 4 – ізоляційний матеріал (Si_3N_4), 5 – прозорий електрод (SnO_2), 6 – скляна пластина

4.6 Рідкокристалічні індикатори

Означення

Рідкими кристалами (РК) називають особливу групу речовин, які займають проміжне місце між твердими і рідкими станами. Ці речовини складаються із ланцюгових, ниткоподібних органічних молекул, які витягнуті у відповідних напрямках.

Рідкі кристали –діамагнітні матеріали, які відносяться до діелектриків: питомий опір приблизно становить $10^6 \dots 10^{10}$ Ом·см.

У звичайному стані рідкі кристали є органічними рідинами з упорядкованим розташуванням молекул, властивим кристалам. Рідкі кристали прозорі для променів світла. При подачі напруги структура рідких кристалів порушується, молекули розташовуються хаотично та рідина стає непрозорою.

Рідкокристалічні індикатори відносяться до оптоелектронних індикаторів з пасивним растром, в яких використовуються електрооптичні і термооптичні ефекти.

У індикаторах використовуються, в основному, нематичні рідкі кристали, які мають такі особливості:

1. Міжмолекулярні взаємодії слабкі, тому структура рідини (характер взаємної орієнтації молекул) може легко змінюватися під впливом зовнішніх факторів;
2. В'язкість незначна, переорієнтація відбувається досить швидко;
3. Оптична і електрична анізотропія: показник заломлення та діелектрична проникність в напрямку вздовж великих осей молекул (n_{\parallel} і ϵ_{\parallel}) і перпендикулярно до них (n_{\perp} і ϵ_{\perp}) мають різні значення, в таких матеріалах спостерігається подвійне променезаломлення;
4. Залежно від знака величини розрізняють позитивну ($\Delta\epsilon > 0$) і негативну ($\Delta\epsilon < 0$) діелектричну анізотропію, тобто молекули орієнтуються вздовж або поперек електричного поля;
5. Сильна анізотропія властивостей і можливість перебудови структури в ряді електрооптичних ефектів.

Принцип дії

Використовувані в індикаторах рідкі кристали є сумішшю складних органічних сполук з дуже високим питомим опором (до 10^{16} Ом·см). Такі матеріали застосовуються в приладах, керованих електричним полем, і мають мале енергоспоживання. Введення спеціальних домішок («легування» РК) дозволяє знизити значення опору до $10^{10} - 10^8$ Ом·см, що необхідно для використання в індикаторах, керованих електричним струмом.

Рідкокристалічний стан використовуваних матеріалів реалізується в обмежених діапазонах температур, що визначає значення $T_{\min} = -30 - 0$ °С і $T_{\max} = 50 - 80$ °С.

Основні ефекти, які використовуються в рідкокристалічних індикаторах.

1. Ефект динамічного розсіювання. Він полягає в тому, що в сильному електричному полі рідкокристалічний матеріал стає непрозорим. Ці індикатори управляються електричним струмом.

2. Твіст-ефект. Він полягає в зміні електричним полем орієнтації молекул рідкого кристала, що призводить до зміни напрямку площини поляризації світла. Для управління поляризацією світла додатково використовуються поляризаційні плівки.

Орієнтація структури рідкого кристала поблизу електродів забезпечується орієнтувальною дією їх поверхні, що створюється за допомогою механічного натирання пластин, косоного напилення плівок GeO_2 чи SiO_2 або нанесення орієнтованих шарів органічної поверхнево-активної речовини (ПАР).

Твіст-ефект є польовим ефектом, найбільш часто використовуваним в РКІ. Такі індикатори мають більший кут огляду і більш високу роздільну здатність.

3. Ефект «гість-господар» (G-H). У структуру рідкого кристала вбудовуються протяжні молекули барвника. При зміні електричним полем орієнтації молекул рідкокристалічного матеріалу відбувається переорієнтація молекул барвника, внаслідок чого змінюється забарвлення поверхні.

4. Термооптичний ефект фазового переходу в смектичних рідких кристалах. При проходженні через рідкий кристал імпульсу струму відбувається його нагрівання і перехід в ізотропну, безладно орієнтовану фазу.

Охолодження її в електричному полі забезпечує прозору структуру, при охолодженні за відсутності поля матеріал непрозорий.

Цей стан зберігається тривалий час, що використовується також в пристроях пам'яті. Для стирання пам'яті пропускається додатковий імпульс струму.

Розглянемо докладніше принцип дії кристалів з електрооптичним ефектом. За рахунок великої рухливості молекули РК в звичайному стані розміщені хаотично і рідкий кристал непрозорий (рис. 4.12, а).

Якщо рідкий кристал розмістити в електричне поле, то орієнтація молекул стане впорядкованою (молекули орієнтуються відносно ліній напруженості поля) і рідкий кристал стає прозорим (рис. 4.12, б). В рідкому кристалі виникає електрооптичний ефект динамічного розсіювання світла (як пройшовшого через речовину, так і відбитого). Оскільки рідкокристалічні комірки самі не випромінюють світло, то вони, як правило, використовуються сумісно з яким-небудь зовнішнім джерелом світла.

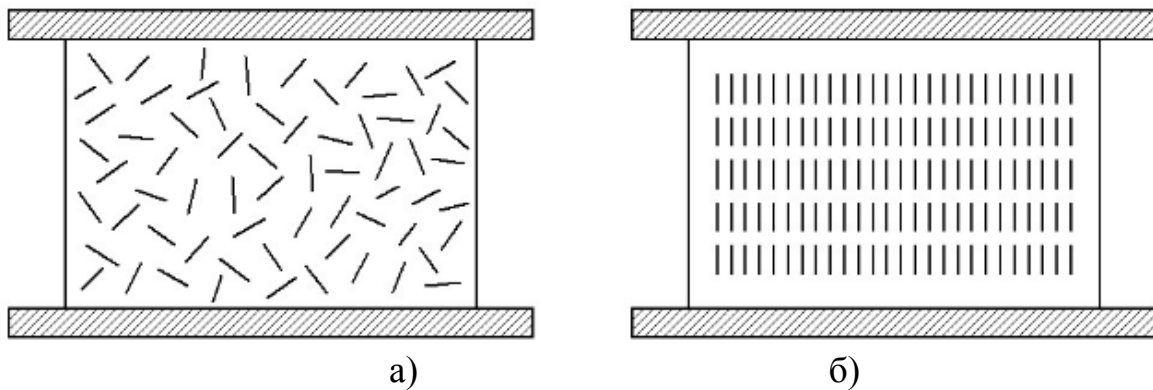
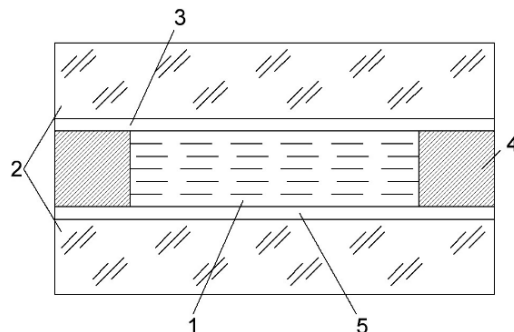


Рисунок 4.12 – Рідкокристалічна комірка: а – хаотична структура без електричного поля, б – впорядкована структура за наявності електричного поля

Конструкції

На рис. 4.13 наведено конструкцію елементарної рідкокристалічної комірки. Вона являє собою дві плоскі пластини 2, які покриті з внутрішньої сторони шаром електропровідного матеріалу 3 і 5. Простір між електродами заповнюється рідкокристалічною речовиною 1 товщиною 8...25 мкм. Один із електродів 3 прозорий і виконаний у вигляді рисунка знака, а другий 5 є спільним. Він може бути або прозорим, якщо індикатор працює на пропускання світла, або дзеркальним, якщо індикатор працює на відбивання. Електроди 3 і 5 розділяє електроізоляційна прокладка 4.



1 – рідкий кристал; 2 – скляні пластини;
3 – прозорий електрод; 4 – ізоляційна прокладка;
5 – прозорий або відбиваючий електрод.

Рисунок 4.13 – Конструкція елементарного рідкокристалічного індикатора

Незалежно від виду електрооптичного ефекту РКІ поділяються на два види:

1. Індикатори, що працюють на відбиття (рис. 4.14, а);
2. Індикатори, що працюють на просвіт (рис. 4.14, б). Вони відрізняються розташуванням джерела світла відносно користувача.

На рис. 4.14, а) наведено будову рідкокристалічного індикатора, що працює в прохідному світлі (на просвіт).

Між двома скляними пластинами з нанесеними на внутрішню поверхню прозорими електродами 1, 2, 3 з двоокису цинку наноситься тонкий (10–20 мкм) шар рідкого кристала. Під індикатором розміщуються джерело світла і матовий екран.

В індикаторі, що працює в відбитому світлі (рис. 4.14, б), нижній електрод повинен бути дзеркальним, добре відбивати світло. Як джерело падаючого світла може служити природне освітлення. Верхні прозорі електроди сегментного типу мають окремі виводи від кожного сегмента. Число розрядів в індикаторі може бути вісім і більше.

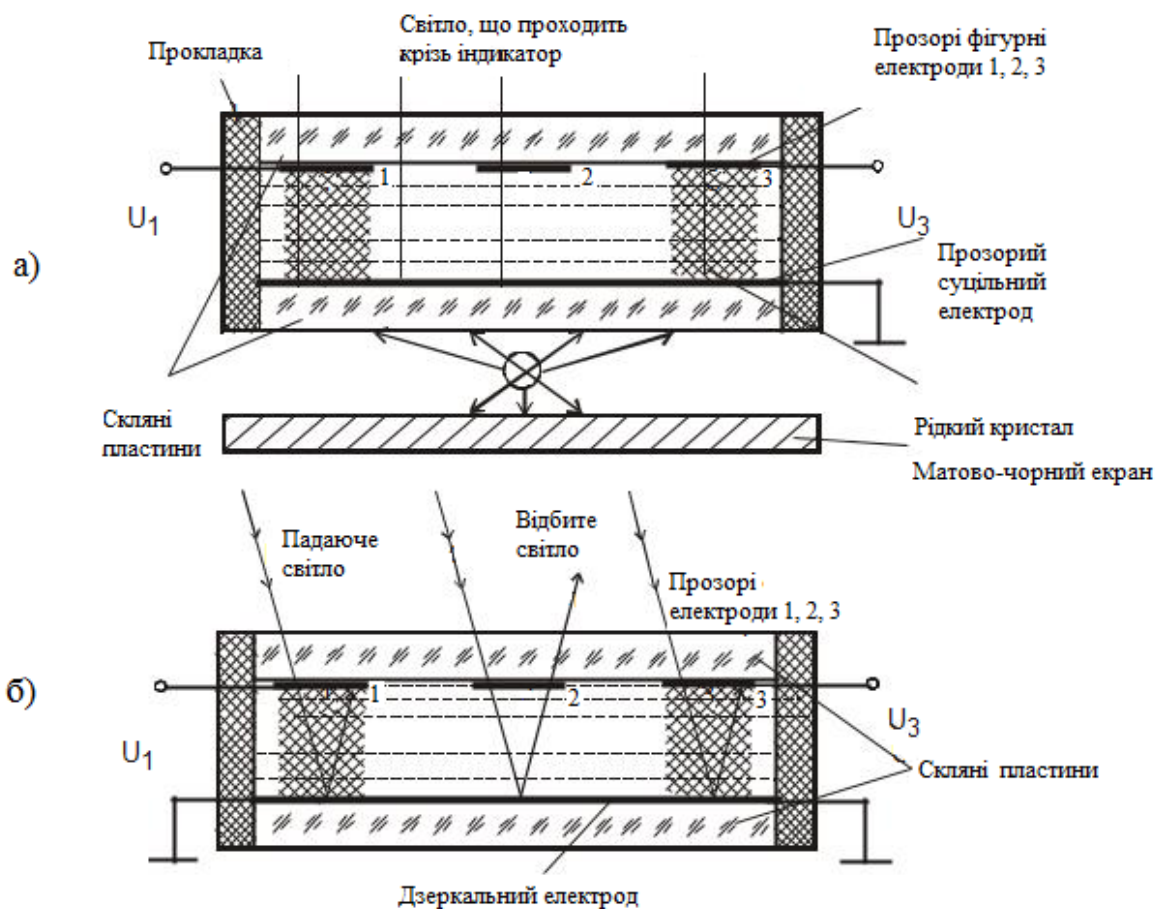


Рисунок 4.14 – Внутрішня будова рідкокристалічного індикатора (а, б)

Цифрові індикатори.

В основі роботи цифрових індикаторів використано електрооптичний ефект обертання площини поляризації поляризованого світла шаром нематичного рідкого кристала. Цей ефект називають твіст-ефектом (ТЕ).

В РКІ з використанням ТЕ, що працює на відбиванні, скляні пластини розміщені між двома схрещеними поляризаторами, один з яких роблять дзеркальним. Поверхні пластин, які повернуті до РК, поліруються для того щоб молекули РК в шарах, які прилягають до них, орієнтувалися у взаємно перпендикулярних напрямках; в проміжних шарах здійснюється поступовий поворот напрямів орієнтації.

На рис. 4.15 наведено конструкцію однорозрядного семисегментного РКІ. Індикатор складається із двох склеєних по перетину скляних пластин, зазор між якими заповнений рідким кристалом. Молекули рідкого кристала орієнтовані в зазорі гомогенно і мають закручену структуру. На одній із скляних пластин (знаковому електроді) 1 прозорим струмопровідним покриттям нанесено рисунок цифри 2, який являє собою набір семи сегментів, що дозволяють синтезувати цифри (від 0 до 9). На другій сигнальній пластині 6 (сигнальному електроді) прозорим струмопровідним покриттям нанесено рисунок електрода 7, що є загальним для цифр знакового електрода. Знаковий і сигнальний електроди покритими поверхнями повернуті один до одного. Складені електроди розміщені між двома схрещеними поляризаторами, на одному з яких нанесено дзеркальне покриття 5.

Як поляризатори використовуються органічні прозорі плівки, які наносяться на зовнішні сторони скляних пластин.

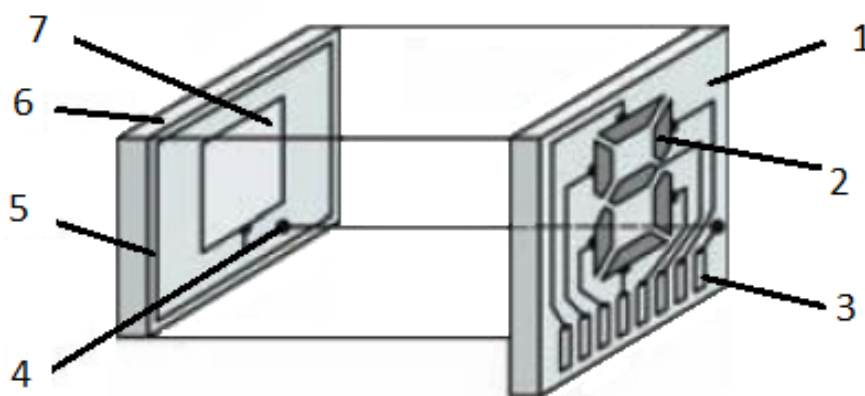


Рисунок 4.15 – Будова семисегментного РКІ

Виводи від сегментів знакового і сигнального електродів виконані у вигляді провідних доріжок 3, 4 на склі. З'єднання виводів індикатора з елементами зовнішньої схеми керування здійснюється, як правило, через роз'єм.

За відсутності електричного поля світло проходить через індикатор. За наявності електричного поля орієнтація молекул змінюється, площина поляризації світла, що пройшло через РК, не повертається і світло не проходить через індикатор, а на сірому фоні відображаються темні цифри. На рис. 4.16, а)–в) показано багаторозрядний рідкокристалічний індикатор. Такі індикатори являють собою рідкокристалічні дисплеї компактної плоскої конструкції, причому, крім цифрової індикації на них можуть бути синтезовані і інші знаки та символи.

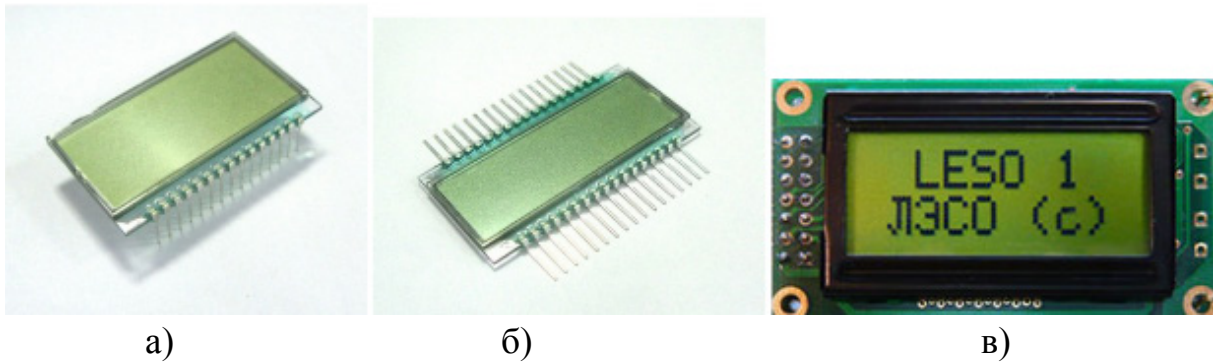


Рисунок 4.16 – Багаторозрядний РКІ

Переваги рідкокристалічних індикаторів:

- 1) мала потужність споживання (декілька мкВт/см²);
- 2) низькі робочі напруги (1,5...5 В) і прекрасна сумісність з КМОП-мікросхемами;
- 3) зручне конструктивне виконання – плоска форма екрана і обмежена товщина індикатора (до 0,5 мм);
- 4) можливість ефективною індикації в умовах сильної зовнішньої засвітки.

Основні недоліки – відносно низька швидкодія, обмежений кут огляду і необхідність зовнішнього освітлення.

Приклади серійних індикаторів

Індикатор рідкокристалічний ИЖЦ2-5/8 (рис. 4.17) використовується для відтворення цифрової інформації в вимірювальній апаратурі, працює на «твіст»-ефекті.

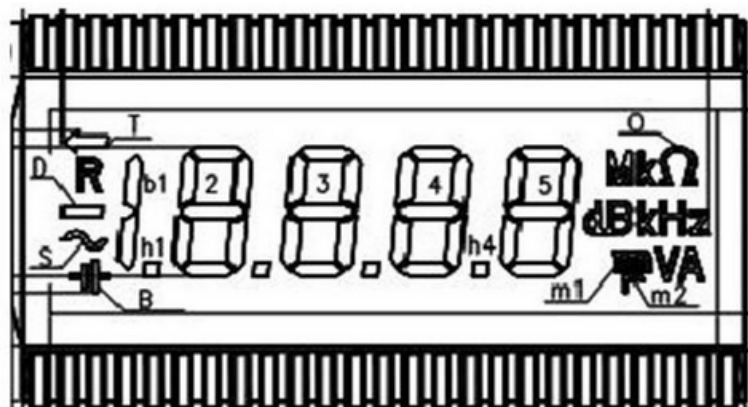


Рисунок 4.17 – Індикатор ИЖЦ2-5/8

Технічні характеристики

1. Кількість розрядів – 4.
2. Висота цифр – 10 мм.
3. Температура навколишнього повітря – від -40 °С до +80 °С.

4. Струм споживання – не більший 37 мкА.
5. Керуюча напруга – 3В–5 В.
6. Власна яскравість/контрастність – 90%.
7. Габаритні розміри – 90×140×3,5 мм.
8. Маса – не більша 12 г.
9. Час реакції індикатора становить 180 мс, а час релаксації – 220 мс.
10. Кут огляду (при нормі контрастності 67%) не менший 45°.
11. Колір зображення на пристрої ИЖЦ – темний, а фону – світло-сірий.
12. Робоче положення –горизонтальне.

Контрольні запитання

1. Перерахуйте типи індикаторних пристроїв.
2. Як влаштований рідкокристалічний індикатор?
3. Наведіть основні параметри індикаторів.
4. Опишіть принцип дії напівпровідникових індикаторів.
5. Опишіть основні конструкції напівпровідникових індикаторів.
6. Поясніть, що таке твіст-ефект.
7. Перелічіть основні ефекти РКІ.
8. Які ви знаєте конструкції напівпровідникових індикаторів?
9. Як побудований семисегментний індикатор?

5 ОПТРОНИ (ОПТОПАРИ)

Означення

Оптронами називають такі оптоелектронні прилади, в яких є джерело і приймач випромінювання (світловипромінювач і фотоприймач) з тим чи іншим видом оптичного та електричного зв'язку між ними, конструктивно пов'язані один з одним.

Елементарний оптрон містить джерело світла і приймач, тому носить назву **оптопара**, більш складні оптрони, об'єднані в ІМС з одним або декількома узгоджувальними або підсилювальними пристроями називають **оптоелектронними ІМС**.

Призначення

1. Оптрони з відкритим оптичним каналом, доступним для механічного впливу (перекриття), використовуються як датчики у детекторах, лічильниках і дискретних спідометрах на їх базі (наприклад, координатні лічильники в механічній миші, анемометри).

2. Оптрони використовуються для гальванічного розв'язку кіл – передачі сигналу без передачі напруги, для безконтактного управління і захисту. Розрізняють два основних типи оптронів, призначених для використання в колах гальванічного розв'язку: оптопари і оптореле. Основна відмінність між ними в тому, що оптопари, як правило, використовуються для передачі інформації, а оптореле використовується для комутації сигнальних або силових кіл.

Оптрони з польовим транзистором або фотосемістором іноді іменують оптореле або твердотілим реле.

Типи оптопар для гальванічного розв'язку:

1. Стандартні зі входом за постійним струмом.
2. Стандартні зі входом за змінним струмом.
3. З малими вхідними струмами.
4. З високою напругою колектор–емітер.
5. Високошвидкісні оптопари.
6. Оптопари з ізолювальним підсилювачем.
7. Драйвери двигунів і IGBT.

Типи оптореле:

1. Стандартні оптореле.
2. Оптореле з малим опором.
3. Оптореле з малим $C \times R$.
4. Оптореле з малою напругою зміщення.
5. Оптореле з високою напругою ізоляції.

Класифікація (рис. 5.1)

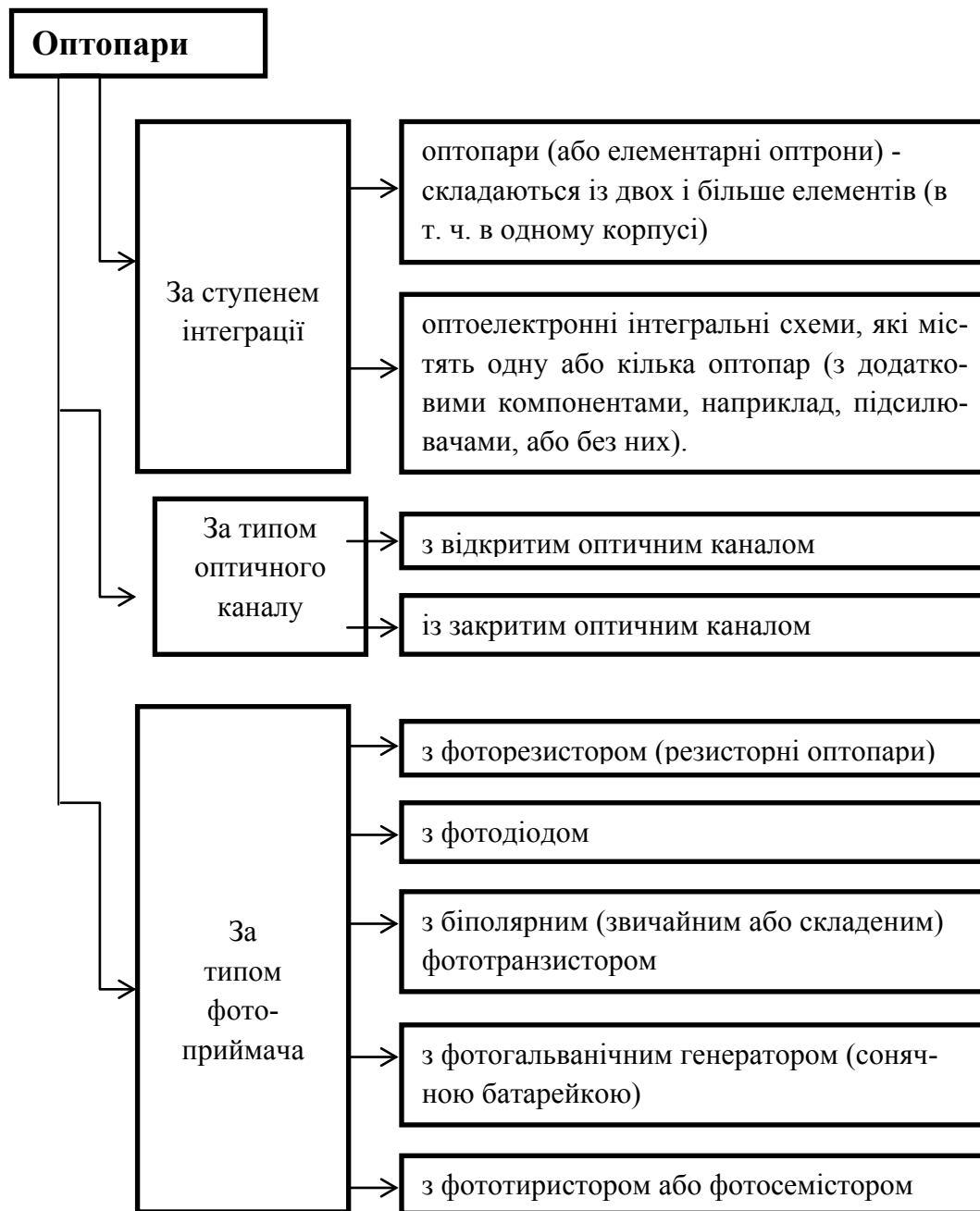


Рисунок 5.1. – Класифікація оптопар

Умовні графічні позначення

Оптичний зв'язок випромінювача (світлодіода) і фотоприймача показують двома стрілками, перпендикулярними до лінії електричного зв'язку – виводів оптрона. На схемах оптрон позначають літерою U. Фотоприймачем в оптроні можуть бути фотодіод (рис. 5.2, U1), фототиристор U2, фоторезистор U3, одиночний фототранзистор U4, складений фототранзистор U5. Взаємна орієнтація символів випромінювача і фотоприймача не регла-

ментується. За необхідності складові частини оптрона можна зображати окремо, але в цьому випадку знак оптичного зв'язку слід замінювати знаками оптичного випромінювання і фотоефекту, а належність частин до одного виробу показувати в позиційному позначенні (рис. 5.2, U6.1, U6.2).

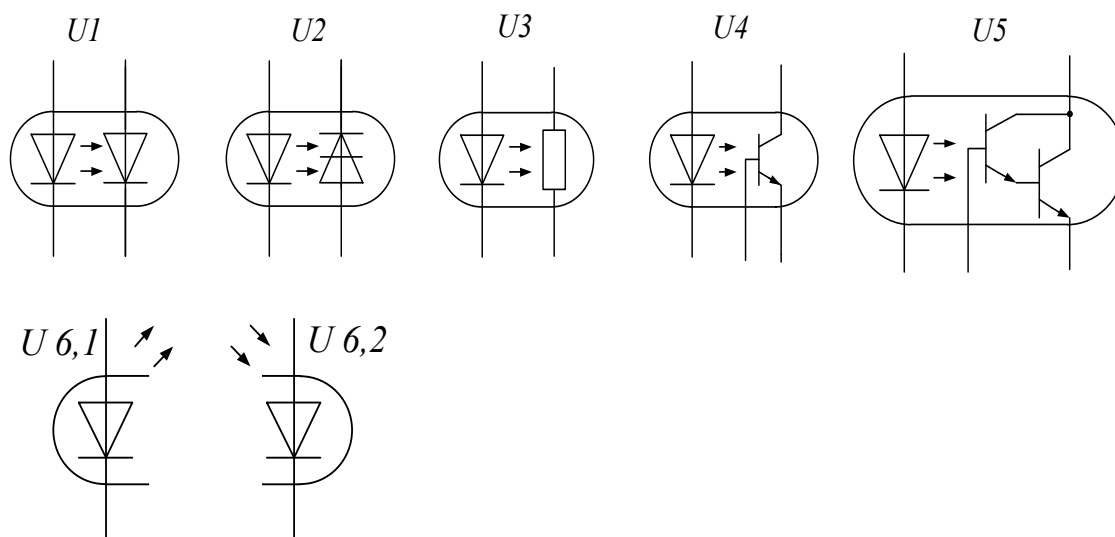


Рисунок 5.2 – УГП оптопар

Маркування

Маркування оптопар складається із семи символів.

Перший позначає вихідний матеріал (зазвичай це буква А – з'єднання галію чи цифра 3 – для приладів спеціального призначення).

Другий символ – буква О – оптопара.

Третій символ вказує тип приймача оптопар: Д – діод, Т – транзистор, У – тиристор, Р – з відкритим оптичним каналом.

Четвертий, п'ятий і шостий символи вказують номер приладу.

Сьомий символ – буква, що позначає класифікацію за групами параметрів.

Приклади маркування: АОД130А – оптопара діод-діод на основі сполуки галію, номер приладу 130, група параметрів А;

Принцип дії

Особливість оптрона полягає в подвійному перетворенні енергії, зазвичай електричної в оптичну і назад з електричним входом і виходом.

Принцип дії оптрона будь-якого виду оснований на такому.

У випромінювачі енергія електричного сигналу перетвориться на світлову, в фотоприймачі, навпаки, світловий сигнал викликає електричний відгук (рис. 5.3).

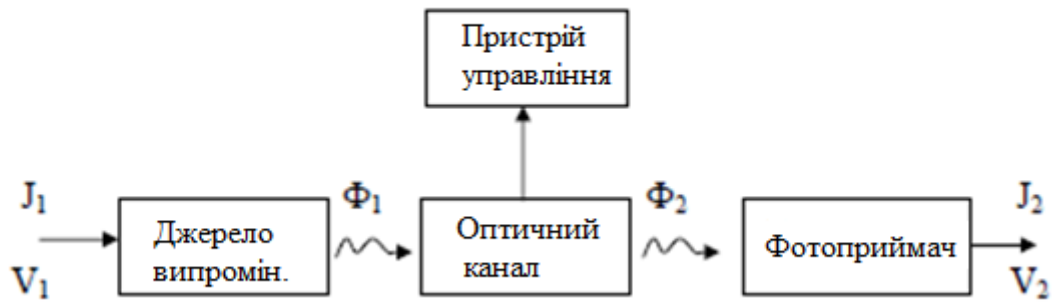


Рисунок 5.3 – Схема оптрона із електричним входом та виходом

Основні характеристики

Елементарний оптрон є чотирьополюсним приладом, властивості якого визначаються насамперед трьома основними характеристиками (рис. 5.4) – вхідною, передавальною і вихідною.

Вхідною є вольт-амперна характеристика випромінювача, а вихідною – відповідна характеристика фотоприймача (за заданого струму на вході оптопар).

Передавальною характеристикою називають залежність струму I_2 на виході оптрона від струму I_1 на його вході; в загальному випадку ця залежність є нелінійною, що призводить до деякого спотворення форми переданого сигналу.

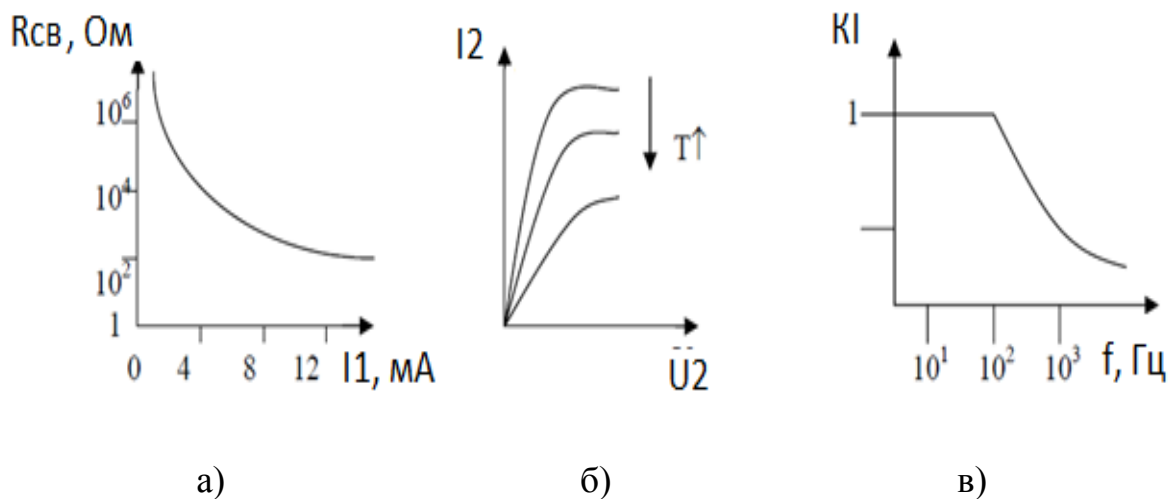


Рисунок 5.4 – Приклад основних характеристик резисторних оптопар: а – залежність світлового опору від вхідного струму, б – залежність вихідної ВАХ від температури, в – залежність коефіцієнта передачі за струмом від частоти

Основні параметри

В системі параметрів оптопар можна виділити чотири групи: вхідні параметри (електричні параметри випромінювача), вихідні параметри (електричні параметри фотоприймача), передавальні параметри (параметри передачі сигналу з входу на вихід) та параметри ізоляції.

1. Вхідний струм оптопари – $I_{вх}$.
2. Максимальний постійний вхідний струм оптопари – $I_{вх.макс}$.
3. Максимальний імпульсний вхідний струм оптопари – $I_{вх.і.макс}$.
4. Вихідний струм $I_{вих}$ – значення струму, що протікає в колі навантаження оптопари в заданому режимі.
5. Середня розсіювана потужність – $P_{сер.макс}$.
6. Тепловий опір – R_m .
7. Напруга ізоляції оптопари $U_{із}$ – значення напруги, прикладене між входом та виходом оптопари, при якому забезпечується її електрична міцність.
8. Комутована напруга оптопари – $U_{ком}$.
9. Передатні параметри характеризують ефективність передачі електричного сигналу з входу оптопари на вихід. Ефективність передачі енергії сигналу описують коефіцієнтом передачі (зазвичай за струмом), а швидкість передачі сигналу – часовими параметрами.
10. Коефіцієнт передачі K_I – основний параметр, який характеризує передачу електричного сигналу з входу оптопари на її вихід, і визначається відношенням вихідного струму оптопари $I_{вих}$ до її вхідного струму $I_{вх}$:

$$K_I = I_{вих} / I_{вх}$$

11. Залежність $I_{вих} = f(I_{вх})$ називається передавальною функцією.
12. Тиристорна оптопара працює лише у ключовому режимі, і параметр K_I для неї не має сенсу. Передавальна характеристика тут визначається вхідним струмом, при якому фототиристор вмикається.
13. Швидкодію оптрона характеризують часом перемикання

$$t_n = t_n + t_{сн},$$

де t_n та $t_{сн}$ – часи наростання і спаду сигналу на виході оптрона.

14. Швидкодія також може характеризуватися граничною частотою перемикання.
15. Параметрами електричної ізоляції оптопар є: максимально допустима пікова та статична напруги ізоляції між входом та виходом, опір ізоляції та прохідна ємність.

Еквівалентна схема

Розглянемо для прикладу еквівалентну схему діодної оптопари, яка має в своєму складі випромінювальний діод та фотодіод (рис. 5.5). Модель складається з моделей двох компонентів.

Динамічна модель випромінювального діода складається з: джерела струму I_D , динамічного опору діода з $r_{дин}$, що визначається опорами бази діода, омичних контактів та виводів, опору витoku $r_{вит}$, ємності діода C_D .

Модель фотоприймача складається з джерела фотоструму I_ϕ , джерела струму р-п-переходу I_{pn} , керованого напругою, бар'єрної ємності фотодіода $C_{б2}$ та бар'єрної ємності $C_{б1}$.

Параметри електричної ізоляції описано прохідною ємністю C_{np} та опором ізоляції R .

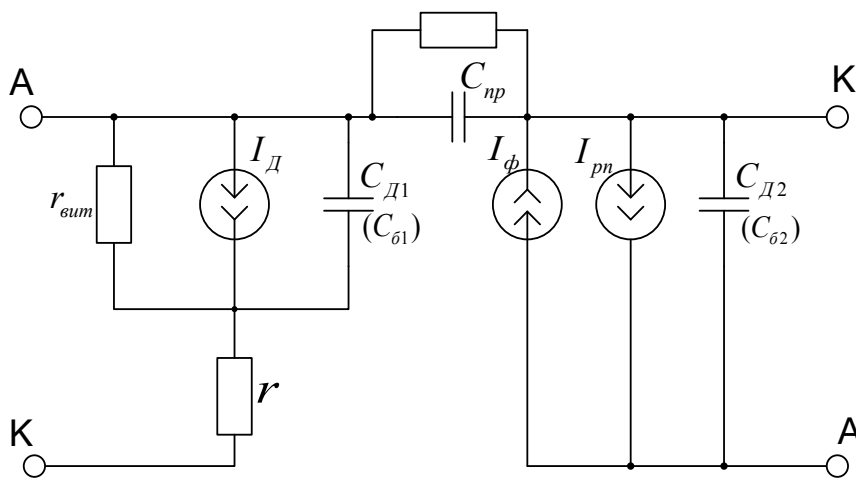


Рисунок 5.5 – Еквівалентна схема діодної оптопари

Конструкції

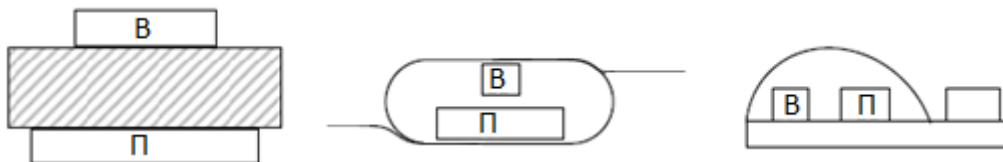


Рисунок 5.6 – Приклади типових конструкцій оптопар:

В – випромінювач, П – приймач

Для збільшення ефективності передачі світлового потоку від джерела до приймача використовують також більш складні конструкції (рис. 5.7).

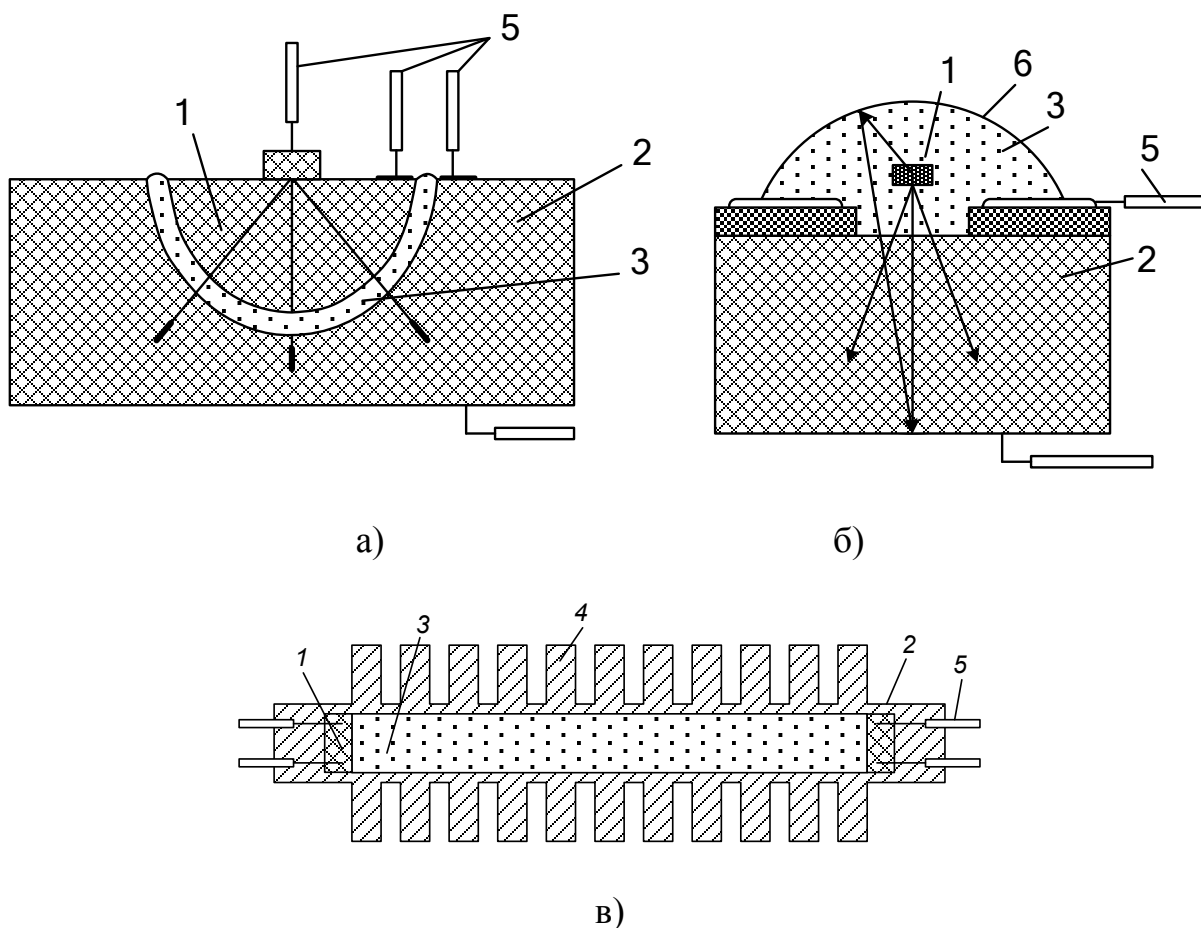


Рисунок 5.7 – Конструкції оптопар з більшою ефективністю передачі випромінювання: 1 – випромінювач, 2 – фотоприймач, 3 – оптичний канал, 4 – корпус, 5 – електричні виводи, 6 – відбивач

Оптоелектронні мікросхеми можуть містити в собі безкорпусні випромінювальні діоди, безкорпусні оптрони і ІМС.

Застосовувані в даний час оптрони – гібридні пристрої, що є конструктивним недоліком. Розробляються також монолітні оптопари, які являють собою інтегровані твердотілі випромінювальні та приймальні структури, що виготовляються в одному технологічному процесі. На рис. 5.8 показано варіанти монолітних пристроїв.

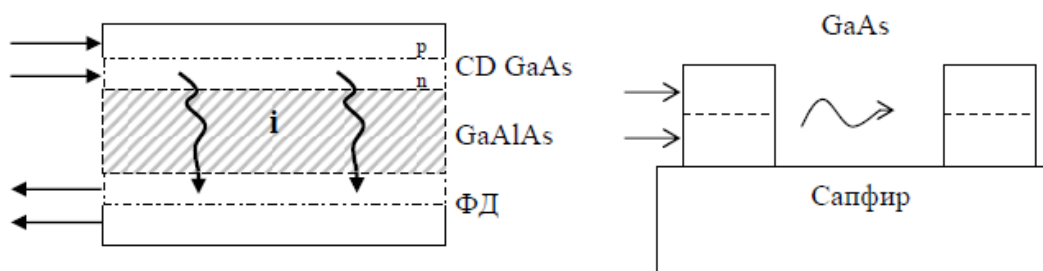


Рисунок 5.8 – Приклади конструкцій оптронів на основі монолітних пристроїв

Приклади серійних приладів

Оптопари ЗОТ110А, ЗОТ110Б (рис. 5.9). Оптопари транзисторні, що складаються з випромінювального діода на основі з'єднання миш'як - галій - алюміній і складеного кремнієвого фототранзистора. Призначені для використання в якості перемикача в гальванічно розв'язаних електричних колах радіоелектронної апаратури. Випускаються в металевому корпусі. Маса приладу не більше 1,5 м.

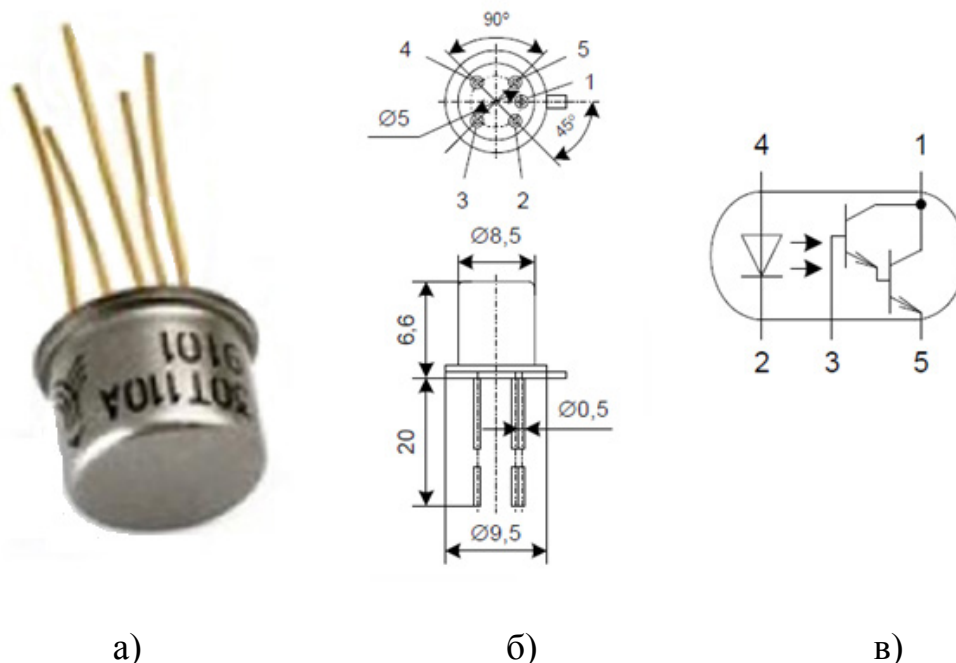


Рисунок 5.9 – Оптопари ЗОТ110А, ЗОТ110Б: а – зовнішній вигляд, б – габарити, в – умовне позначення

Основні параметри наведено у табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Електричні параметри оптопар ЗОТ110А, ЗОТ110Б

Найменування параметра, (режим вимірювання), од. вим.	Позначення параметра	Норма параметра			
		ЗОТ110А		ЗОТ110Б	
		не менше	не більше	не менше	не більше
Вхідна напруга, ($I_{\text{вх опт}}=25 \text{ мА}$), В	$U_{\text{вх опт}}$		2		2
Вихідна залишкова напруга, ($I_{\text{вх опт}}=25 \text{ мА}$, $I_{\text{вих опт}}=100 \text{ мА}$), В ($I_{\text{вх опт}}=25 \text{ мА}$, $I_{\text{вих опт}}=200 \text{ мА}$), В	$U_{\text{вих.зал опт}}$		1,5		1,5
Струм витоку на виході, ($I_{\text{вх опт}}=0$, $U_{\text{ком опт}}=15\text{В}$), мкА ($I_{\text{вх опт}}=0$, $U_{\text{ком опт}}=30\text{В}$), мкА ($I_{\text{вх опт}}=0$, $U_{\text{ком опт}}=50\text{В}$), мкА	$I_{\text{вит.вих}}$		100		100
Опір ізоляції ($U_{\text{із опт}}=100 \text{ В}$), Ом	$R_{\text{із опт}}$	10^9		10^9	

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі значення параметрів електричних режимів експлуатації оптопар 3ОТ110А, 3ОТ110Б

Найменування параметра, (режим вимірювання), од. вим.	Позначення параметра	Норма	
		3ОТ110А	3ОТ110Б
Максимально допустима комутована напруга, В	$U_{\text{ком макс опт}}$	30	50
Напруга ізоляції, В	$U_{\text{із опт}}$	100	100
Максимально-допустима зворотна вхідна напруга, В	$U_{\text{вх.звор. макс}}$	0,7	0,7
Максимальний допустимий постійний вхідний струм, мА - в діапазоні температур від -60 °С до +35 °С; - при температурі 70 °С.	$I_{\text{вх, макс опт}}$	30 15	30 15
Максимально допустимий імпульсний вхідний струм, мА; при $\tau_i \leq 10$ мкс; - в діапазоні температур від -60 °С до +35 °С, - при температурі 70 °С.	$I_{\text{вх.і. макс опт}}$	100 85	100 85
Максимально допустимий імпульсний вихідний струм, мА; при $\tau_i \leq 10$ мс;	$I_{\text{вих.і. макс опт}}$	200	100
Максимально допустимий постійний вихідний струм (температура навколишнього середовища від -60 °С до +35° С), мА	$I_{\text{вих. макс опт}}$	200	100
Максимально допустима середня розсіювана потужність, мВт - в діапазоні температур від -60 °С до +35 °С, - при температурі 70 °С.	$P_{\text{ср макс опт}}$	360 80	360 80

Галузі застосування

Як елементи гальванічного розв'язку оптрони застосовуються: для зв'язку блоків апаратури, між якими є значна різниця потенціалів; для захисту вхідних кіл вимірювальних пристроїв від перешкод і наведень і т. д.

Інша найважливіша галузь застосування оптронів – оптичне, безконтактне управління потужнострумівим і високовольтними колами. Запуск потужних тиристорів, триаків, семісторів, управління електромеханічними релейними пристроями.

Специфічну групу керуючих оптронів становлять резисторні оптрони, призначені для слабкострумівих схем комутації в складних пристроях візуального відображення інформації, виконаних на електролюмінесцентних (порошкових) індикаторах, мнемосхемах, екранах.

Створення «довгих» оптронів (приладів з протяжним гнучким волоконно-оптичним світловодом) відкрило зовсім новий напрямок застосування виробів оптронів техніки – зв'язок на коротких відстанях.

Різні оптрони (діодні, резисторні, транзисторні) знаходять застосування і в суто радіотехнічних схемах модуляції, автоматичного регулювання підсилення та ін. Вплив по оптичному каналу використовується тут для виведення схеми в оптимальний робочий режим, для безконтактного налаштування режиму і т. п.

Можливість зміни властивостей оптичного каналу при різних зовнішніх впливах на нього дозволяє створити цілу серію оптронних датчиків: датчики вологості і загазованості, датчика наявності в об'ємі тієї чи іншої рідини, датчики чистоти обробки поверхні предмета, швидкості його переміщення і т. п.

Досить специфічним є використання оптронів в енергетичних цілях, тобто робота діодного оптрона в фотовентильному режимі. У такому режимі фотодіод генерує електричну потужність в навантаження і оптрон дещо подібний до малопотужного вторинного джерела живлення, повністю розв'язаного з первинним колом.

Створення оптронів з фоторезисторами, властивості яких при освітленні змінюються за заданим складним законом, дозволяє моделювати математичні функції, є кроком на шляху створення функціональної оптоелектроніки.

Універсальність оптронів як елементів гальванічної розв'язки і безконтактного управління, різноманітність і унікальність багатьох інших функцій є причиною того, що сферами застосування цих приладів стали обчислювальна техніка, автоматика, радіотехнічна апаратура та апаратура зв'язку, автоматизовані системи управління, вимірювальна техніка, системи контролю і регулювання, медична електроніка, пристрої візуального відображення інформації.

Приклади застосування оптопар:

1. У телекомунікаційному обладнанні.
2. У колах з'єднання з виконавчими пристроями.
3. В імпульсних джерелах живлення.
4. У високовольтних колах.
5. У системах керування двигунами.
6. У системах вентиляції та кондиціонування.
7. У системах освітлення.
8. У електролічильниках.

Контрольні запитання

1. Наведіть класифікацію оптопар.
2. Охарактеризуйте оптопару як оптоелектронний прилад.
3. Проілюструйте декілька варіантів конструкції оптопар.
4. Поясніть основні характеристики оптопар.

5. Опишіть еквівалентну схему оптопари.
6. Що таке коефіцієнт передачі оптопари та від чого він залежить?
7. Поясніть термін «комутована напруга».
8. Чи будуть відрізнятися коефіцієнти передачі струму діодної та транзисторної оптопар? Відповідь поясніть.
9. Перелічіть галузі застосування оптопар.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кожем'яко В. П. Оптоелектронна схемотехніка : навчальний посібник / Кожем'яко В. П., Павлов С. В., Тарновський М. Г. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008 . – 189 с.
2. Цуканова Г. И. Прикладная оптика. Часть 1. : учебно-методическое пособие / Цуканова Г. И., Карпова Г. В., Багдасарова О. В. – СПб . : НИУ ИТМО, 2013. – 73 с.
3. Москалев В. А. Теоретические основы оптико-физических исследований / Москалев В. А. — СПб . : Машиностроение, 2007. – 318 с.
4. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы : учеб. для вузов. / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – 9-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2009. – 480 с.
5. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учебное пособие для вузов / Петров К. С. – СПб . : Питер, 2003. – 512 с.
6. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учебник для вузов / Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И.; под. ред. О. П. Глудкина. – М . : Горячая Линия–Телеком, 2002. – 768 с.
7. Акимов Н. Н. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА. Справочник / [Н. Н. Акимов, Е. П. Ващуков, В. А. Прохоренко, Ю. П. Ходоренок.]. – Мн. : Беларусь, 2005. – 591 с.
8. Оптоэлектронная схемотехника : [учебное пособие] / В. П. Кожем'яко, О. Г. Натрошвили, Т. Б. Мартинюк, Л. Ш. Имнашвили. – К . : УМК ВО, 1988. – 276 с.
9. Москатов Е. А. Электронная техника / Москатов Е. А. – Таганрог, 2004. – 121 с.
10. Коган Л. М. Современное состояние полупроводниковых излучающих диодов / Л. М. Коган // Электронные компоненты. – 2000. – № 2. – С. 22–27.
11. Диоды. Справочник / [Григорьев О. П., Замятин В. Я., Кондратьев Б. В., Пожидаев С. Л.] – М . : Радио и связь, 1990. – 336 с.
12. Замятин В. Я. Справочник . Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры / Замятин В. Я., Кондратьев Б. В., Петухов В. М. – М . : Радио и связь, 1987. – 576 с.
13. Самохвалов М. К. Конструкции и технология тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / Самохвалов М. К. – Ульяновск : УлГТУ, 1997. – 56 с.
14. Гершунский В. С. Основы электроники : учебник для ВУЗов / Гершунский В. С. – К . : Вища школа, 1982. – 424 с.
15. Жеребцов И. П. Основы электроники / Жеребцов И. П. – Л . : Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.

Навчальне видання

**Філінюк Микола Антонович
Лазарєв Олександр Олександрович
Фурса Світлана Євгенівна
Войцеховська Олена Валеріївна
Ткачук Яна Сергіївна**

**ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ
ЧАСТИНА 5
ОПТОЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ**

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек
Оригінал-макет підготовлено С. Фурсою

Підписано до друку 08.11.2017 р.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 6,67.
Наклад 50 (1-й запуск 1-20) пр. Зам. № 2018-003.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний
університет, інформаційний редакційно-
видавничий центр. ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua; e-mail: kivc.vntu@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р