

The background features several large, overlapping, semi-transparent shapes in shades of green, purple, and blue. Interspersed among these are numerous small, yellow, triangular rays pointing outwards, creating a sunburst or starburst effect. The overall aesthetic is clean, modern, and vibrant.

ОСНОВИ СЕНСОРИКИ

**ТВЕРДОТІЛЬНІ ФОТОГАЛЬВАНІЧНІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ФОТОСЕНСОРИ**

ФОТОСЕНСОРИ

- Чутливий елемент *перетворювачів з внутрішнім фотоефектом (фоторезисторів)* виконаний у вигляді пластинки, на яку нанесений шар напівпровідникового фоточутливого матеріалу.
- Як фоточутливий матеріал зазвичай використовується сірчистий кадмій, селенистий кадмій або сірчистий свинець.
- Електропровідність напівпровідникових матеріалів зумовлена збудженням електронів у валентній зоні і домішкових рівнях.
- При збудженні електрони переходять в зону провідності і у валентній зоні з'являються дірки.
- При освітленні збудження електронів збільшується, що спричиняє збільшення електропровідності.
- Червона межа фотоефекту для фоторезисторів знаходиться в інфрачервоній області, наприклад, для сірчисто-свинцевих $\lambda_{gr} = 2.7$ мкм.
- При невеликій освітленості перетворювача число збуджених світлом електронів пропорційне освітленості, його електрична провідність також пропорційна освітленості:

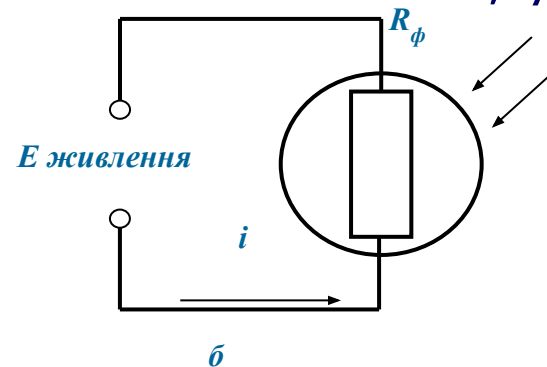
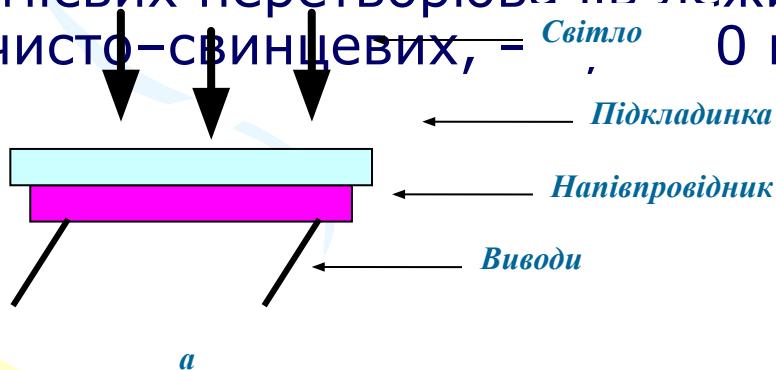
$$G = I\phi / U,$$

де $I\phi$ – фотострум;

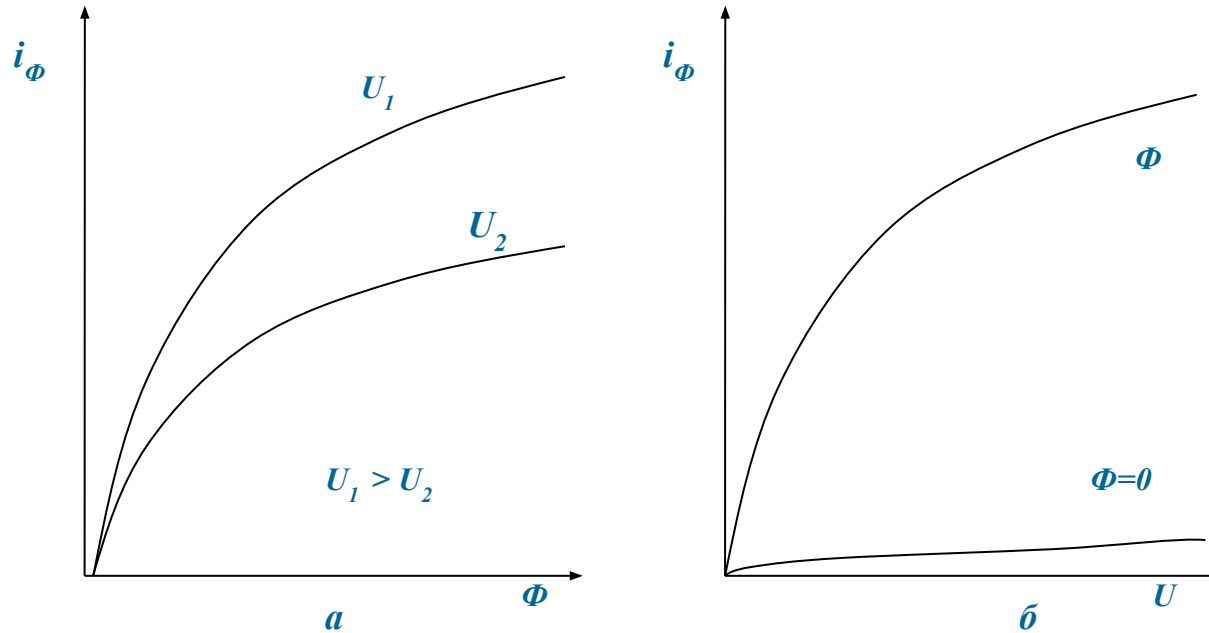
U – напруга, прикладена до перетворювача...

ФОТОСЕНСОРИ

- Однак при великій освітленості пропорціональність порушується.
- Чутливість фоторезисторів визначається кратністю зміни їх опору.
- Для деяких типів вона досягає значення $K = R_T / R_{200} = 10000$, де R_T темновий опір, тобто опір неосвітленого перетворювача R_{200} опір при $E = 200 \text{ Лк}$.
- Інерційність характеризується постійною часу (у сірчисто-кадмієвих перетворювачів лежить в межах 1...140 мс, у сірчисто-свинцевих, $\tau = \frac{0,1}{E}$ мс)



ФОТОСЕНСОРИ



Залежність струму фото резистора від світлового потоку (а) і прикладеної напруги (б)

A decorative graphic in the top-left corner featuring a stylized sun with yellow rays and a green balloon. In the bottom-left corner, there is a purple balloon and a yellow sun-like shape. The background is white with faint, light-colored circular patterns.

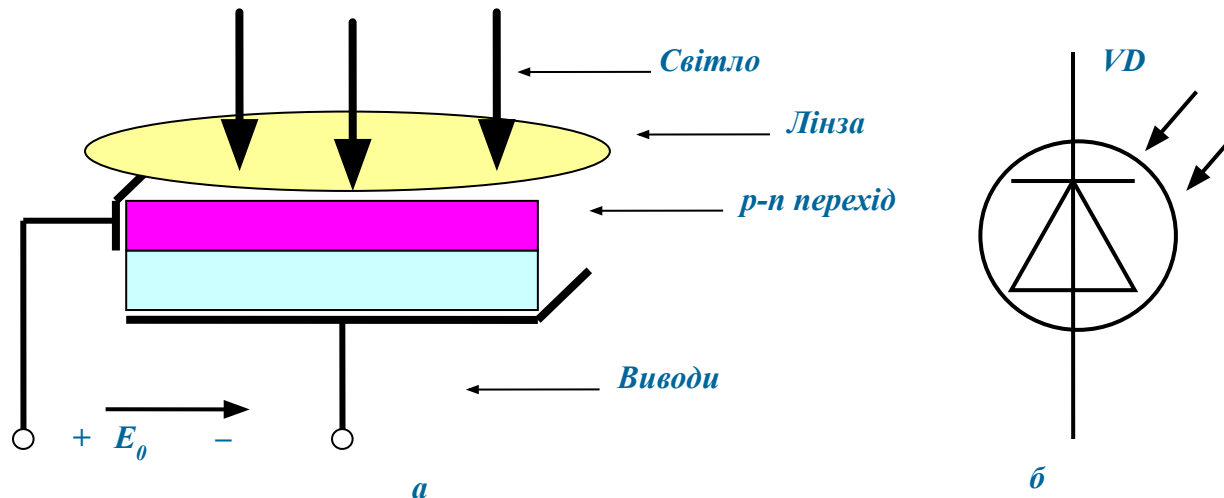
ФОТОСЕНСОРИ

- Незважаючи на великий коефіцієнт перетворення оптичного сигналу в електричний струм, простоту, малі габаритні розміри і масу *фоторезистори* знаходять обмежене застосування внаслідок низької швидкодії і значною температурної нестабільності параметрів.
- Їх опір залежить від температури подібно опору термісторів.
- *Для зменшення температурної похибки фоторезистори включаються разом з термістором в суміжні плечі моста.*

ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

- **Фотодіод** – фотоприймач, який використовує для перетворення світлової енергії в електричну фотогальванічний ефект.
- З точки зору технології фотодіод є звичайним напівпровідниковим діодом, в якому забезпечується можливість впливу оптичного випромінювання на $p - n$ – перехід, тобто його корпус має вікно з лінзою, що спрямовує зовнішній світловий потік перпендикулярно площині $p - n$ – переходу.
- Спрощена структура фотодіода і його УГП показані на рис...
- У рівноважному стані, коли потік випромінювання повністю відсутня, концентрація носіїв і розподіл об'ємного заряду фотодіода повністю відповідають звичайній $p - n$ –структурі.

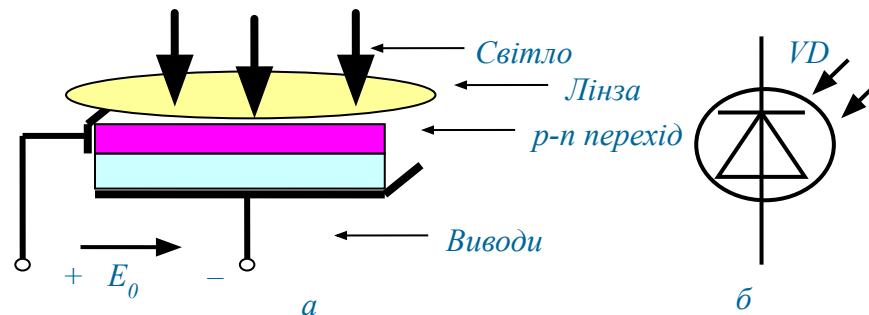
ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ



- При впливі опромінення в напрямку, перпендикулярному площині $p-n$ -переходу, в результаті поглинання фотонів з енергією, більшою, ніж ширина забороненої зони, в n - області виникають електронно-діркові пари.
- При дифузії фото носіїв вглиб n - області основна частка електронів і дірок не встигає рекомбінувати і доходить до кордону $p - n$ - переходу.
- Тут фотоносії поділяються електричним полем $p - n$ - переходу, причому дірки переходять в p - область, а електрони не можуть подолати поле переходу і скупчуються біля кордону $p - n$ - переходу в n - області.

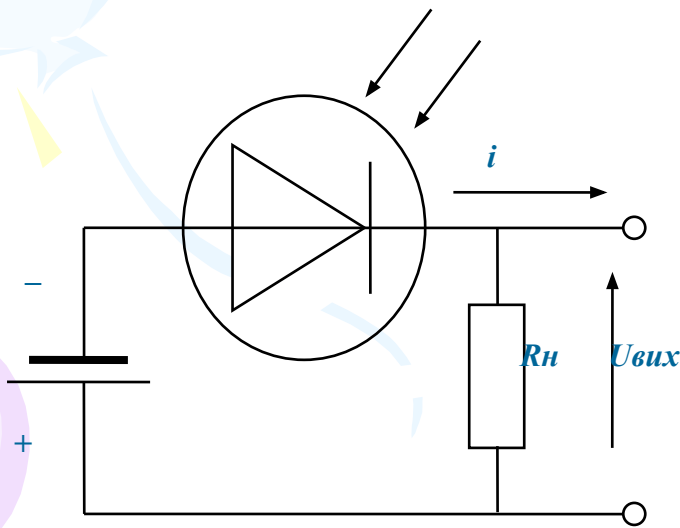
ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

- Таким чином, струм фотоносіїв через $p - n$ - перехід обумовлений дрейфом неосновних носіїв - дірок.
- Дрейфовий потік фотоносіїв називається *фотострумом*.
- Фото носії - дірки заряджають p - область позитивно щодо n - області, а фото носії - електрони - n - область негативно по відношенню до p - області.
- Виникає різниця потенціалів ($E\Phi$), що називається фотоЕРС.
- Для забезпечення високої чутливості до випромінювання необхідно, щоб в фотодіоді дифузійна складова струму була мінімальною.
- Тому фотодіод працює або взагалі без зовнішньої напруги (*фотогальванічний режим*), або при зворотному зовнішній напрузі (*режим фотодіода*).

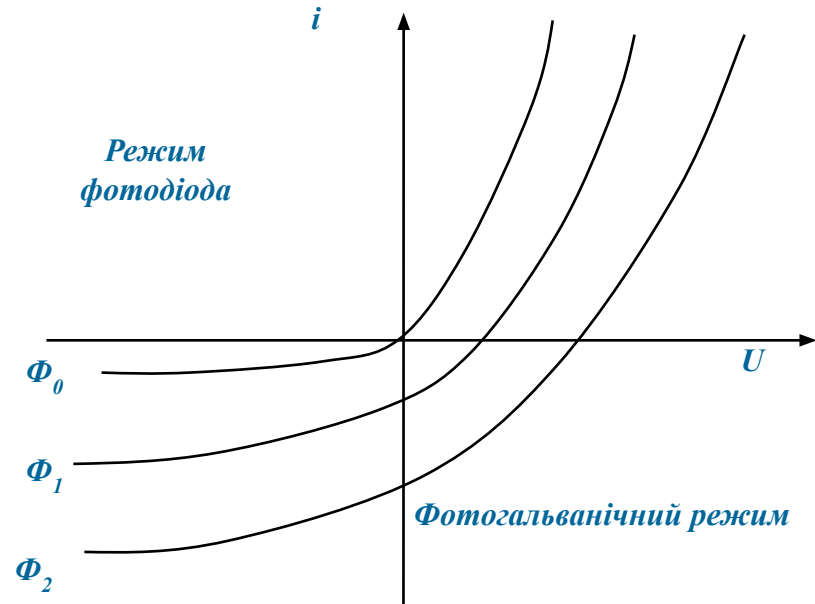


ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

- Режими роботи без зовнішньої напруги (фотогальванічний режим), та при зворотній зовнішній напрузі (режим фотодіода).
 - Схема підключення фотодіода (а)
 - та сімейство ВАХ фотодіода в залежності від величини світлового потоку (б)



а)



б)

ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

- При використанні фотодіода в фотогальванічних режимі джерело зовнішньої напруги відсутнє, і діод працює як генератор *фотоЕРС*, значення якої пропорційно інтенсивності світлового потоку Φ .
- Значення *фотоЕРС* не може перевищити контактну різницю потенціалів $25\text{мА/см} \div 0,55\text{ В}$, а значення струму короткого замикання при середньому сонячному освітленні складає десятки, або сотні мкА.
- У режимі фотодіода пристрій працює спільно з зовнішнім джерелом електричної енергії $U_{\text{зов}}$, позитивний полюс якого підключається до n – шару, а негативний – до p – шару.
- Під дією джерела напруги в колі фотодіода, включеного в зворотному напрямку, навіть при відсутності освітлення протікає невеликий темновий струм I_t .
- В цьому випадку фотодіод нічим не відрізняється

ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

- Однією з головних характеристик фотодіода є його частотна характеристика, яка показує зміну інтегральної чутливості в залежності від зміни частоти світлового потоку.
- Іноді інерційні властивості фотодіода характеризують граничною частотою, на якій інтегральна чутливість зменшується в разів у порівнянні зі своїм статичним значенням.
- Гранична частота швидкодіючих кремнієвих фотодіодів – близько 10 МГц.
- *Для підвищення швидкодії і збільшення чутливості розроблені деякі типи фотодіодів зі структурою, відмінною від структури фотодіода з $p - n$ - переходом.*

ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

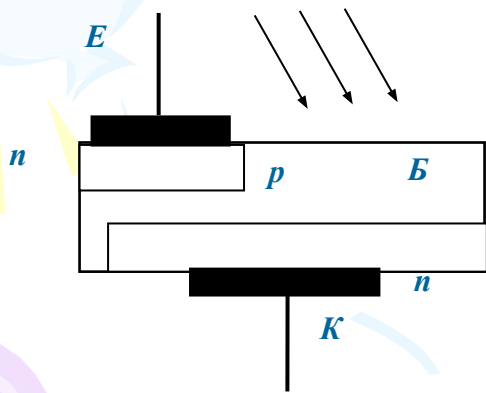
- *Фотодіоди, виконані на основі $p - i - n$ -структур, мають значно більшу товщину області, збідненого основними носіями заряду, так як між $p - i - n$ -областями є i - область з власної електропровідністю.*
- До переходу без ризику пробити його можна докласти значних напруги.
- Виникає ситуація, коли світлове випромінювання поглинається безпосередньо в області, збідненого основними носіями заряду, в якій створено електричне поле високої напруженості.
- Електрони і дірки, що виникають в області переходу при світловому опроміненні, миттєво перекидаються до відповідних області.
- В результаті швидкодія різко зростає, і гранична частота таких діодів досягає 1...10 ГГц.

ФОТОДІОДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

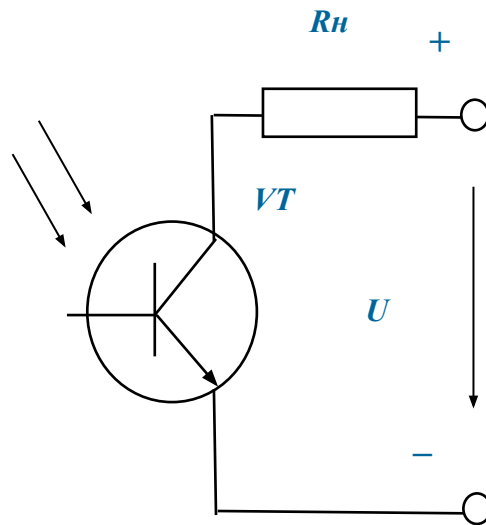
- Аналогічними за швидкістю є *фотодіоди на основі бар'єру Шотткі*.
- Вони виконуються з кремнію, на поверхню якого нанесено прозоре металеве покриття з плівок золота ($d=0,01$ мкм) і сірчистого цинку ($d=0,05$ мкм), що створює бар'єр Шотткі.
- Завдяки мінімальному опору бази та відсутності процесів накопичення і розсмоктування надлишкових зарядів, швидкість цих структур досить висока (гранична частота сягає 10 ГГц).

ФОТОТРАНЗИСТОРИ

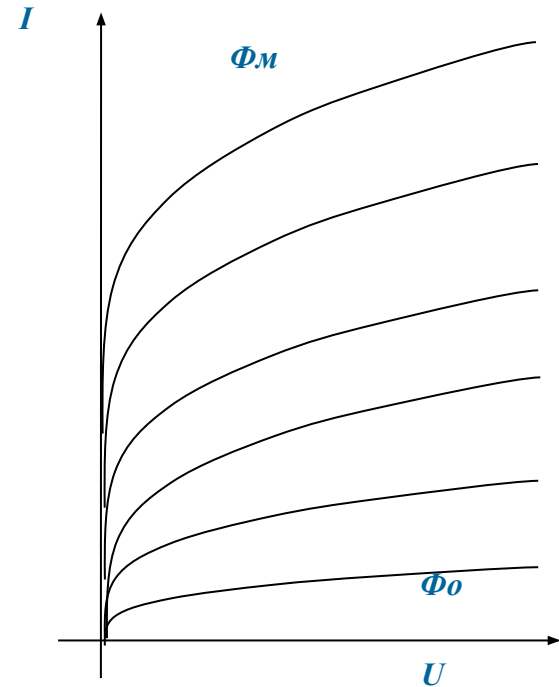
- **Фототранзистор** має структуру, аналогічну структурі біполярного транзистора



а)



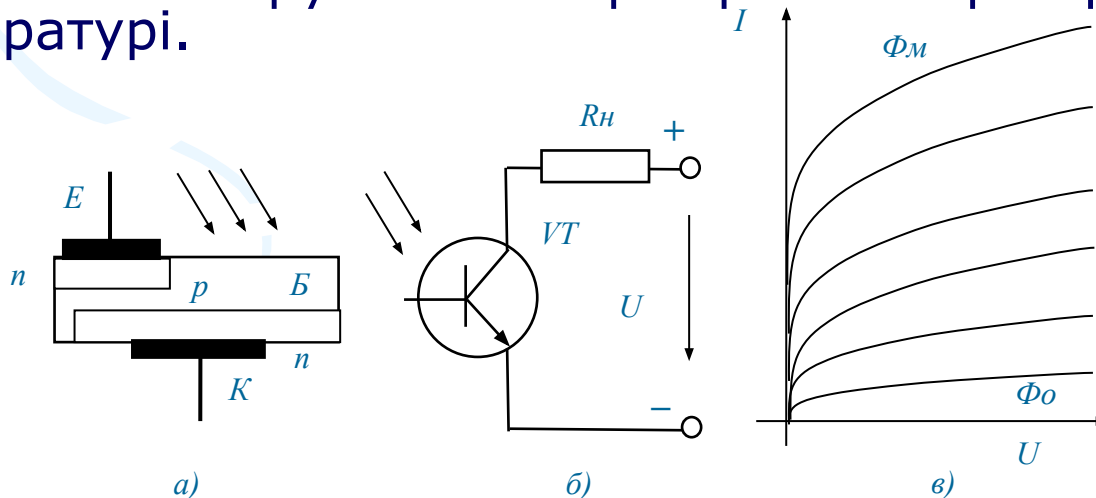
б)



в)

ФОТОТРАНЗИСТОРИ

- Як і у звичайного біполярного транзистора, тут є два $p - n$ - переходи: емітерний і колекторний.
- Напругу живлення на транзистор подають так само, як і на звичайний біполярний транзистор, тобто емітерний перехід зміщують в прямому
- Таке включення називають *включенням з плаваючою базою*, і воно характерно тільки для фото транзисторів.
- При включенні з плаваючою базою фото транзистор завжди знаходиться в активному режимі, проте при $\Phi = 0$ (і невисокій температурі) через нього протікає невеликий струм.
- Це темновий струм колектора транзистора при заданій температурі.



ФОТОТРАНЗИСТОРИ

- Розглянемо явища в фототранзисторі на прикладі $n - p - n$ – структури.
- Конструктивно фототранзистор виконаний так, що світловий потік опромінює область бази.
- В результаті поглинання енергії в ній генеруються електронно–діркові пари.
- Неосновні носії заряду в базі (електрони) дифундують до колекторного переходу і перекидаються електричним полем переходу в колектор, збільшуючи струм останнього.
- Цей процес аналогічний процесу в фотодіоді.
- Якщо виводи розімкнуті, то основні носії заряду (дірки), що утворилися в процесі опромінення, не можуть покинути базу і накопичуються в ній.

ФОТОТРАНЗИСТОРИ

- Об'ємний заряд цих дірок знижує потенційний бар'єр емітерного переходу, в результаті чого збільшується дифузійний рух електронів через емітерний перехід.
- Дірковий струм з бази в емітер рівноцінний звичайному базовому струму біполярного транзистора.
- Інжектвані електрони, потрапивши в базу, рухаються, як і в звичайному транзисторі, до колекторного переходу і, переходячи в область колектора, збільшують його струм.
- Таким чином, носії заряду, що генеруються в результаті опромінення світлом, безпосередньо беруть участь у створенні фотоструму.
- Особливістю фототранзистору є те, що відносно малі значення фотоструму бази за рахунок посилення транзистора по току призводять до значно більшого (в β раз) зміни колекторного струму.

ФОТОТРАНЗИСТОРИ

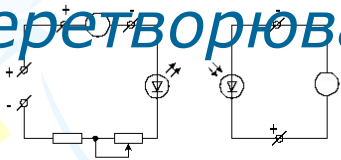
- Режим роботи з плаваючою базою є досить нестабільним, тому в ряді випадків на базу фототранзистору подають зовнішнє зміщення, що частково компенсує залежність струму від температури і спрямляє його ВАХ.
- До основних параметрів фототранзисторів, що приводяться в технічній документації і довідковій літературі, відносяться:
- **вольт-амперні характеристики** (рис. в) – нагадують вихідні характеристики біполярного транзистора в схемі із загальним емітером, тільки параметром служить не струм бази I_b , а світловий потік Φ ;
- **струмова чутливість** – це відношення зміни струму колектора фототранзистор до зміни «вхідного» світлового потоку, що його викликав, при холостому ході на вході і короткому замиканні на виході;
- **коефіцієнт посилення фотоструму**. У промислових фототранзисторах він досягає 100...200 і визначається як відношення фотоструму колектора транзистора з вільною базою до фотоструму колекторного переходу $p - n$ – переходу, виміряного в діодному режимі (при відключеному емітер) при тому ж значенні світлового потоку.
- Ширина смуги пропускання у біполярних фототранзисторів сягає 1...100 МГц і вище для сучасних компонентів.

ФОТОТРАНЗИСТОРИ

- Важливою характеристикою перетворювачів оптичного випромінювання є так звана діаграма спрямованості – залежність вихідного параметра перетворювача від кута напрямку на джерело випромінювання при незмінних відстані до цього джерела та інтенсивності його випромінювання.
- Зрозуміло, що діаграма спрямованості фотодіодного перетворювача не залежить від режиму його роботи.
- Внутрішній фотоефект в напівпровідниках може бути використаний для побудови і інших напівпровідникових приладів: *фототиристри, одноперехідний фототранзистор* та ін.
- Слід зазначити, що широкого самостійного застосування прилади з внутрішнім фотоефектом не отримали.
- Пояснюється це тим, що значення фотоструму залежить не тільки від інтенсивності світлового потоку, але і від його спектрального складу.
- Зміна спектрального складу призводить до неоднозначних результатів в роботі пристроїв, що містять зазначені прилади.
- *Цього недоліку позбавлені оптоелектронні прилади – оптрони.*

ПРИКЛАД

- В якості вимірювальних перетворювачів оптичного випромінювання використовуються різні типи напівпровідникових та електронно-вакуумних приладів – фоторезистори, фотоелементи, фотодіоди, фототранзистори, фотоелектронні помножувачі та ін.
- *Електрична принципова схема лабораторної установки для дослідження фотодіодного перетворювача у фотогальванічному режимі.*



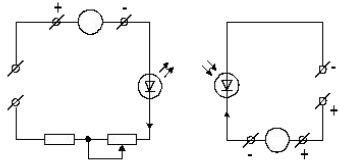
Перетворювачі оптичного випромінювання

- Джерелом оптичного випромінювання у цьому режимі є світлодіод $VD1$, інтенсивність випромінювання якого пропорційна протікаючому через нього струму в діапазоні від 2 до 10 мА.
- Змінний резистор $R2$ служить для регулювання цього струму, а амперметр A для його контролю.
- Освітленість фотодіода $VD2$ прямо пропорційна інтенсивності випромінювання світлодіода $VD1$, а, відповідно, і протікаючому через нього струму.
- Таким чином, амперметр A показує величину, пропорційну освітленості фотодіода.
- А електрорушійна сила, яка створюється фотодіодом $VD2$ під дією фотоефекту, фіксується вольтметром V .

Перетворювачі оптичного випромінювання

- При роботі у фотодіодному режимі до фотодіода прикладається зовнішня напруга зворотної полярності.
- В результаті під дією фотоефекту опір фотодіода змінюється при зміні його освітленості та, відповідно, змінюється і струм, який протікає через нього.
- До переваг фотодіодного режиму відносяться: більш висока чутливість по напрузі; менша інерційність; кращі частотні характеристики.

Перетворювачі оптичного випромінювання



- *Електрична принципова схема лабораторної установки для дослідження фотодіодного перетворювача у фотодіодному*
- Вона відрізняється наявністю додаткового джерела живлення, що запирає фотодіод.

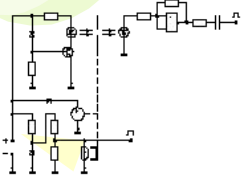
Схема лабораторної установки для дослідження тахометричного перетворювача

- Тахометричні вимірювальні перетворювачі призначені для перетворення частоти обертання механічного об'єкта у електричний сигнал, який може безпосередньо реєструватися вимірювальним приладом.
- Природною вихідною величиною таких перетворювачів може бути амплітуда електричного сигналу або його частота.
- Найбільше поширення дістали тахометричні вимірювальні перетворювачі частоти обертання у частоту слідування імпульсів (частотно-імпульсні перетворювачі), оскільки частоту слідування імпульсів можливо визначити з більшою точністю (за допомогою електронно-лічильних методів), ніж виміряти амплітуду сигналу.
- Існують різні типи тахометричних перетворювачів частоти обертання в частоту слідування імпульсів – контактні, індуктивні, ємнісні, герконові, фотоелектронні (оптоелектронні) та ін.
- Найбільш простими за конструкцією та дешевими є герконові та фотоелектронні перетворювачі.

Схема лабораторної установки для дослідження тахометричного перетворювача

- Фотоелектронний перетворювач уявляє собою відкриту оптичну систему, між елементами якої (випромінювачем та приймачем) обертається непрозорий диск з отвором, насаджений на вал, що обертається. Коли отвір проходить між випромінювачем та приймачем оптичної системи, випромінювання першого приймається другим, і на виході перетворювача з'являється електричний імпульс.
- Кількість імпульсів, яку перетворювач видає за один оберт вала, дорівнює кількості отворів у диску.
- Тривалість імпульсу у даному перетворювачі визначається шириною діаграм спрямованості випромінювача та приймача оптичної системи, розмірами отвору в диску та швидкістю обертання вала.
- Перевагами фотоелектричних тахометричних перетворювачів є відсутність механічних контактів і пов'язаних з ними труднощів, а також дуже мала інерційність, що дозволяє їх використовувати для вимірювання високих частот обертання.

Схема лабораторної установки для дослідження тахометричних перетворювачів



- В якості випромінювача оптопари використовується світлодіод VD3.
- Транзисторний каскад зі стабілітроном VD1 забезпечує стабільність струму живлення світлодіода.
- В якості приймача світлових імпульсів оптопари використаний фотодіод VD5, працюючий у фотогальванічному режимі.
- Елемент DD підсилює електричні імпульси фотодіода та покращує їх форму, наближаючи її до прямокутної.
- Конденсатор C запобігає проходженню постійної

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ І ЗАВДАННЯ

- Яке явище називають фотоелектричний ефект?
- Від чого залежить величина фотоструму насичення? Наведіть приклад вольт-амперної характеристики для фотоелектронів.
- Що таке робота виходу електронів? Від чого вона залежить?
- Чим визначається максимальна кінетична енергія фотоелектронів?
- Яке застосування фотоелектричного ефекту в науці та техніці?
- Що лежить в основі квантової теорії світла, запропонованої Ейнштейном?
- Наведіть схему дослідження фотоелектричного ефекту.
- Як впливає зміна потоку світла на катод на величину фотоструму?
- Яке явище називають фотоелектричний ефект?
- Від чого залежить величина фотоструму насичення? Наведіть приклад вольт-амперної характеристики для фотоелектронів.
- Що таке робота виходу електронів? Від чого вона залежить?
- Чим визначається максимальна кінетична енергія фотоелектронів?
- Яке застосування фотоелектричного ефекту в науці та техніці?
- Принципова схема ФЭП.