A detailed photograph of a microelectronics circuit board, showing various components like integrated circuits, resistors, and capacitors. The board is populated with several integrated circuits, including a 9051 WP microcontroller, an M9005 M1881K component, and two HEF4051B 821802T 14-bit multiplexers. Various resistors and capacitors are also visible, with labels like 104572, 9051 WP, 10K K63, and 100K K63. The background is a close-up of the board's surface, showing the intricate wiring and component placement.

**О.В. Андріянов  
В.А. Мокрицький**

**ПРИНЦИПИ ДІЇ, ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ  
МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ**

**Навчальний посібник**

О.В. Андріянов  
В.А. Мокрицький

**ПРИНЦИПИ ДІЇ, ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ  
МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ**

Навчальний посібник

Одеса  
Наука і техніка  
2016

УДК 621.38-022.532(075)

ББК 32.85я7

А65

*Рекомендовано до друку кафедрою інформаційних технологій  
проектування в електроніці та телекомунікаціях,  
протокол №4 від 14 жовтня 2015 р.*

**Андріянов О.В.**

А65 Принципи дії, характеристики та параметри елементної бази мікро- та наноелектроніки: навч. посіб. / О.В. Андріянов, В.А. Мокрицький. – Одеса: Наука і техніка, 2016. – 56 с.

У даному посібнику викладено роботи лабораторного практикуму для вивчення елементної бази мікро- та наноелектроніки.

Наука і техніка, 2016

## ВСТУП

Даний посібник є другою частиною лабораторного практикуму, який призначений для практичного закріплення теоретичних знань, що викладені у підручнику «Фізико-технічні основи мікро- та наноелектроніки». [1].

У посібнику розглянуті принципи дії, характеристики та параметри елементної бази мікро- та наноелектроніки. Лабораторні стенди, на яких проводяться дослідження, виконані кафедрою «Мікроелектроніка» Одеського національного політехнічного університету.

# 1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР

**Мета роботи** – вивчення фізичних процесів у біполярних транзисторах, їх статистичних характеристик, графічного визначення параметрів.

## 1.1 Теоретичні відомості

### 1.1.1 Основні визначення

**Біполярні транзистори** – це прилади з двома  $p-n$ -переходами і трьома зовнішніми виводами. В радіоелектроніці біполярні транзистори використовуються у підсилювачах, генераторах, ключових схемах. Крім того, вони входять у склад різних інтегральних схем.

Відмінною ознакою біполярних транзисторів є те, що для забезпечення їхньої нормальної роботи необхідно мати одночасно носії заряду двох типів: основні і неосновні.

Розрізняють транзистори типів  $p-n-p$  (рис. 1.1а) і  $n-p-n$  (рис. 1.1б). Принцип дії обох транзисторів однаковий і оснований на керуванні величиною струму одного з переходів шляхом змінювання струму іншого переходу.

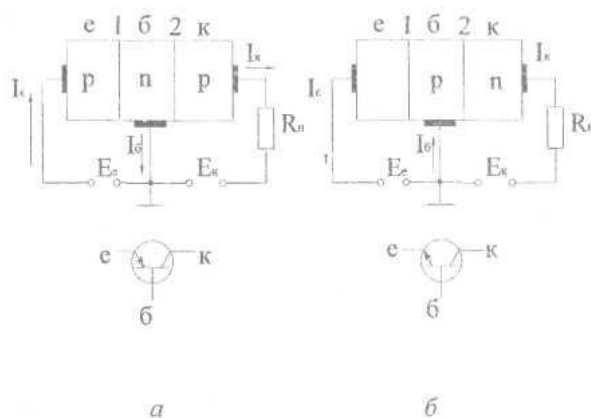


Рис. 1.1. Конструкції та умовне позначення транзисторів (ДСТ 2730-73):  
а –  $p-n-p$ ; б –  $n-p-n$

Крайня область біполярного транзистора, яка призначена для інжекції носіїв заряду, називається *емітером*. Друга крайня область називається *колектором* і служить для екстракції носіїв. Середня область називається *базою*. Відповідно електронно-дірковий перехід емітер-база

називається *емітерним*, а перехід колектор-база – *колекторним*. Кожний із переходів може включатися як у прямому, так і зворотному напрямках. В залежності від цього розрізняють три режими роботи транзистора:

а) режим відсічки – обидва переходи закриті, у цьому випадку через транзистор протікають невеликі струми;

б) режим насичення – обидва переходи відкриті, струми, які протікають через транзистор, великі;

в) активний режим – один перехід відкритий, другий – закритий.

У режимі відсічки і насичення керування струмами транзистора практично відсутнє. В активному режимі керування струмами відбувається більш ефективно. Якщо емітерний перехід зміщений у прямому напрямку (відкритий), а колекторний – у зворотному (закритий), то таке включення біполярного транзистора називається *нормальним* (рис. 1.1). Якщо емітерний перехід закритий, а колекторний відкритий, то включення біполярного транзистора називається *інверсним*. Для поліпшення якісних показників біполярних транзисторів при їх виготовленні забезпечують виконання наступних вимог:

- база виготовляється якомога тоншою (зазвичай 1...20 мкм);
- концентрація основних носіїв у базі є значно меншою, ніж у емітері (тобто база слабше легована домішками);
- площа колекторного переходу більша за площею емітерного (тобто біполярний транзистор несиметричний).

Принцип дії транзисторів обох типів однаковий. Розглянемо принцип дії на прикладі транзистора *p-n-p* (рис. 1.2).

Коли напруга джерел живлення  $E_e = E_k = 0$ , то обидва переходи знаходяться у рівноважному стані. Струми транзистора  $I_e = I_k = I_d = 0$ , тому що дифузійні та дрейфові струми переходів рівні і протилежні за напрямком. Включення запірної напруги  $E_k$  колекторного переходу (зазвичай у межах 10...30 В) порушує рівноважний стан.

Струм дифузії різко зменшується, а струм дрейфу, зумовлений неосновними носіями бази та колектора, зростає. В результаті у колі база-колектор буде протікати струм дрейфу  $I_{ko}$ , який називається *тепловим струмом колектора*. Включення напруги  $E_e$  позитивної полярності (порядку десятих часток вольт, іноді одиниць вольт) збільшує дифузійну складову цього переходу, тобто приводить до інжекції основних носіїв в область бази. В результаті через емітерний перехід буде протікати струм:  $I_e = I_{ep} + I_{en}$ , де  $I_e$  – сумарний струм емітера;  $I_{ep}$ ,  $I_{en}$  – діркова та електронна складові струму емітера, відповідно.



Рис. 1.2. Схема  $p-n-p$  транзистора, що пояснює принцип його роботи

Концентрація дірок в емітері ( $p_e$ ) значно більше концентрації електронів у базі ( $n_p$ ), тому  $I_{ep} \gg I_{en}$ . Отже, струм емітера, в основному, зумовлений дірковою складовою. Струм  $I_{en}$  замикається у колі база-емітер і є однією із складових струму бази. Інжектвані емітерним переходом в область бази дірки за рахунок градієнту концентрації переміщуються до колекторного переходу. При цьому частина дірок рекомбінує з електронами – основними носіями в області бази. В результаті з'являється струм рекомбінації  $I_p$ , який протікає по колу емітер-база.

Повний базовий струм дорівнює:  $I_{\delta} = I_{en} + I_p - I_{ko}$

Товщина бази  $W$  набагато менше дифузійної довжини неосновних носіїв (дірок), тому їх основна частина  $I_{ep} = I_p + I_{kr}$  досягає колекторного переходу. В результаті екстракції цих дірок повний струм колектора буде дорівнювати:  $I_k = I_{ep} - I_{рек} + I_{ко} = I_{kr} + I_{ко}$ .

Струми через зовнішні виводи транзистора пов'язані між собою рівністю:

$$I_k = I_e - I_{\delta} = \alpha_{em} \cdot I_e + I_{ко}, \quad (1.1)$$

де  $\alpha_{ст} = \frac{I_k}{I_e} < 1$  – статичний коефіцієнт передачі струму емітера.

Він показує, яка частина носіїв, що інjektуються емітером, досягає колектора. Змінюючи струм емітера, тим самим змінюють струм колектора.

Підсилення електричних коливань за допомогою транзистора засновано на залежності струму колектора від величини напруги, прикладеної до ділянки емітер-база. При підключенні до емітера джерела напруги із змінною величиною (вхідний сигнал) послідовно з  $E_e$  струм у колі емітера буде змінюватися у відповідності до зміни сигналу. Отже, буде мінятися і колекторний струм. Цей струм, проходячи по опорі навантаження  $R_n$ , створює на ньому змінну напругу, яка повторює по формі вхідний сигнал.

Підсилення напруги за допомогою транзистора відбувається за рахунок енергії джерела живлення, а транзистор виконує роль регулятора, який під дією малого вхідного сигналу, введеного в коло з малим опором, змінює струм у вихідному колі, що має більший опір.

### 1.1.2 Схеми включення транзистора

У електронних схемах транзистор використовують, в основному, як чотирихвилюсник. Тому один з його електродів (емітер, колектор, база) включається таким чином, що є загальним і для входу, і для виходу. Звідси виникає назва схем включення з загальною базою (рис. 1.3а), з загальним емітером (рис. 1.3б), з загальним колектором (рис. 1.3в).

У вхідних колах включені джерела сигналу  $e_c$  з внутрішнім опором  $R_c$ , а у вихідних колах – опір навантаження  $R_n$ . Кожна з схем (рис. 1.3) характеризується коефіцієнтами підсилення по напрузі, струму, потужності. Розглянемо докладніше особливості 3-х систем включення біполярних транзисторів.

#### *Схема включення транзистора з загальною базою (рис. 1.3а)*

У такій схемі загальним електродом для вхідних і вихідних кіл являється база, вхідним струмом – струм емітера  $i_e$ , вихідним – струм колектора  $i_k$ .



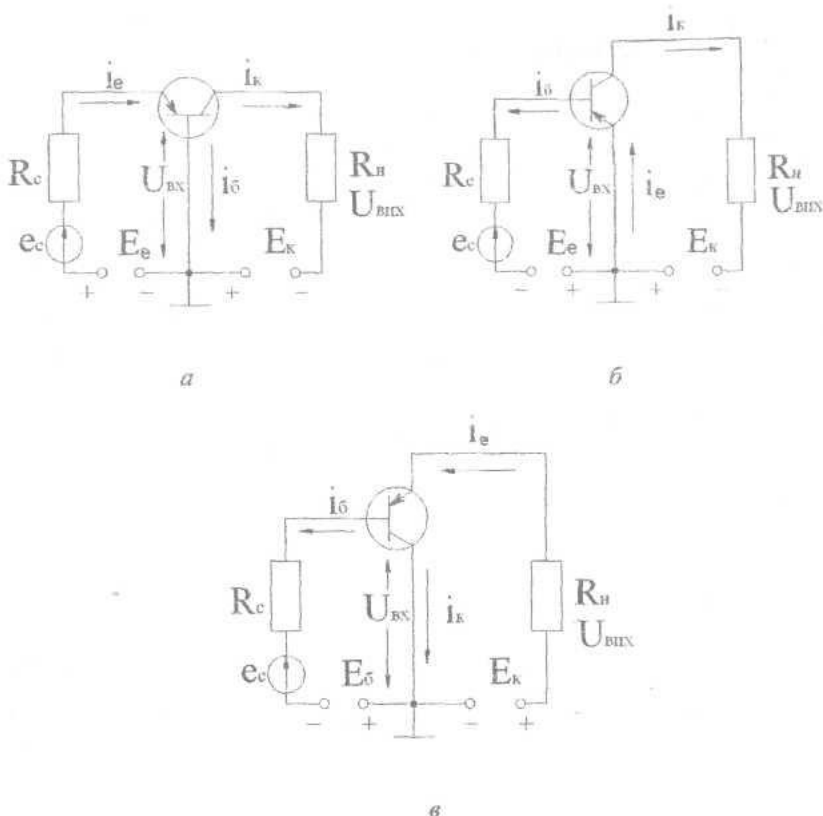


Рис. 1.3. Схеми включення  $p-n-p$ -транзисторів:  
 а – з загальною базою (ЗБ), б – з загальним емітером (ЗЕ),  
 в – з загальним колектором (ЗК)

Коефіцієнт підсилення по струму для схеми з загальною базою (ЗБ) дорівнює:

$$k_{iБ} = \frac{dI_{вих}}{dI_{вх}} = \left. \frac{di_k}{di_e} \right|_{U_{KB} = const} = \alpha.$$

Диференціюванням виразу для струму колектора (1.1), легко знайти зв'язок між диференціальним значенням коефіцієнта підсилення  $\alpha$  та статичним  $\alpha_{cm}$ :

$$\alpha = \alpha_{cm} + i_e \frac{d\alpha_{cm}}{di_e}. \quad (1.2)$$

В активному режимі при малих рівнях інжекції зміна струму емітера мало впливає на  $\alpha \approx \alpha_{cm}$ , тобто  $K_{UB} < 1$ . Вхідний опір схеми визначається виразом:  $R_{вхБ} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta I_e} \approx r_e$ , де  $r_e$  – опір прямозміщеного (відкритого) емітерного переходу.

Низький вхідний опір схеми ЗБ (одиниці-десятки Ом) – її істотний недолік. Вихідний опір транзистора при включенні по схемі з загальною базою  $R_{вихБ}$  визначається, в основному, опором зворотно зміщеного (закритого) колекторного переходу. Його величина порядку сотень кілоом. Отже,  $R_{вихБ} \gg R_{вхБ}$ .

Коефіцієнт підсилення по напрузі:

$$K_{UB} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_{вих} R_n}{\Delta I_{вх} R_{вхБ}} = \frac{\Delta I_k R_n}{\Delta I_e R_{вхБ}} = \frac{\alpha R_n}{R_{вхБ}} \gg 1.$$

*Схема включення транзистора з загальним емітером* (рис. 1.3б)

У цій схемі вхідним струмом є струм бази, а вихідним – струм колектора. Загальний електрод – емітер. Знайдемо аналітичний вираз, який характеризує зв'язок між  $I_k$  та  $I_b$ . Для цього вираз (1.1) перетворимо наступним чином:

$$I_k = \alpha_{cm} (I_k + I_b) + I_{ко} = \frac{I_b \alpha_{cm}}{(1 - \alpha_{cm})} + \frac{I_{ко}}{(1 - \alpha_{cm})}.$$

Запровадивши значення  $\frac{I_{ко}}{(1 - \alpha_{cm})} = I_{кое}$  та  $\beta_{cm} = \frac{\alpha_{cm}}{(1 - \alpha_{cm})}$ ,

одержуємо: 
$$I_k = \beta_{cm} I_b + I_{кое},$$

де  $\beta_{cm}$  – статичний коефіцієнт передачі струму бази;  $I_{кое}$  – зворотний струм колекторного переходу у схемі з загальним емітером при  $I_b = 0$ .

Для аналізу роботи транзистора при малих сигналах (сигнал рахується малим, якщо при зміні його амплітуди в 2 рази величина вимірюваного параметру залишається незмінною в межах точності вимірювань)

використовуємо, як і в схемі ЗБ, поняття диференційного коефіцієнту передачі базового струму:

$$k_{ie} = \left. \frac{di_k}{di_b} \right|_{U_{ke} = \text{const}} = \beta.$$

Зв'язок між статичним та диференційним коефіцієнтами передачі визначається співвідношенням:

$$\beta = \beta_{cm} + (I_b + I_{ko}) \frac{d\beta_{cm}}{dI_b} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}.$$

Хоча залежність  $\beta_{cm}(I_b)$  більш істотна, ніж залежність  $\alpha_{cm}(I_e)$  (1.2), без великої похибки можна рахувати, що  $\beta_{cm} = \beta$ . Оскільки величина  $\alpha \approx 0,95 \dots 0,99$ , то  $\beta$  складас декілька десятків і навіть сотень. Вхідний опір транзистора в схемі з загальним емітером (ЗЕ) значно більший, ніж у схемі ЗБ. Це витікає з очевидної нерівності:

$$\frac{\Delta U_{ex}}{\Delta I_b} \gg \frac{\Delta U_{ex}}{\Delta I_e}.$$

Враховуючи, що  $\Delta I_b = \Delta I_e - \Delta I_k = \Delta I_e (1-\alpha)$ , одержимо:

$$R_{axe} = R_{axb} (1+\beta).$$

Коефіцієнт підсилення по напрузі у схемі ЗЕ буде дорівнювати:

$$K_{UE} = \frac{\Delta I_k \cdot R_n}{\Delta I_b \cdot R_{axe}} = \frac{\beta \cdot R_n}{R_{axe}} \gg K_{UB}.$$

Коефіцієнт підсилення по потужності:

$$K_{PE} = \frac{\beta^2 R_n}{R_{axe}} \gg K_{PB}.$$

Вихідний опір схеми ЗЕ являє собою опір проміжку колектор-емітер і, в основному, визначається опором зворотнорозміщеного колекторного переходу.

Схема включення транзистора з загальним колектором (рис. 1.3в)

У схемі з загальним колектором (ЗК) вхідний змінний сигнал подається між базою і колектором. Вхідним струмом у цьому випадку є струм бази, а вихідним – емітера. Тому:

$$K_{ik} = \frac{di_e}{di_b} \Big|_{U_{ек} = const} = \beta + 1.$$

Вхідний опір транзистора в схемі ЗК значно більший, ніж у схемі ЗЕ, тому що:

$$U_{ax} \approx \Delta I_b R_{axe} + \Delta I_e R_n = \Delta I_b [R_{axe} + (\beta + 1)R_n],$$

звідки  $R_{axk} \approx R_{axe} + (\beta + 1)R_n.$

Коефіцієнт підсилення по напрузі:

$$K_{UK} = \frac{\Delta I_e R_n}{\Delta I_b R_{axk}} = \frac{(\beta + 1)R_n}{R_{axk}} \approx \frac{R_n}{(R_{axb} + R_n)},$$

тобто коефіцієнт підсилення по напрузі при будь-яких  $R_n$  та  $\beta$  менше одиниці.

Коефіцієнт підсилення по потужності  $K_{PK} = \frac{(1 + \beta)^2 R_n}{R_{axk}}$  менший,

ніж у схемах ЗБ і ЗЕ.

### 1.1.3 Порівняння параметрів різних схем включення біполярного транзистора

Аналіз параметрів, одержаних за формулами для різних схем включення, показує, що підсилювальні властивості, вхідні і вихідні опори для одних і тих же транзисторів в різних схемах включення сильно відрізняються. В таблиці 1.1 приводяться усереднені дані транзисторів в різних схемах включення.

З таблиці і формул, наведених у попередніх підрозділах, можна зробити наступні висновки:

Таблиця 1.1 – Дані транзисторів

Схема включення	Параметри схеми				
	$K_i$	$K_u$	$K_p$	$R_{ex}$ , Ом	$R_{вих}$ , Ом
ЗБ	1	$10^2 \dots 10^3$	$10^2 \dots 10^3$	$10 \dots 10^2$	$10^5 \dots 10^6$
ЗЕ	$10 \dots 100$	$10^2$	$10^3 \dots 10^4$	$10^2 \dots 10^3$	$10^4 \dots 10^5$
ЗК	$10 \dots 100$	1	$10 \dots 10^2$	$10^3 \dots 10^6$	$10^2 \dots 10^4$

1. Схема ЗЕ забезпечує велике підсилення по напрузі, струму і потужності. При цьому вхідний опір відносно невеликий. Вихідний опір порівняно великий.

2. Включення по схемі ЗБ забезпечує велике підсилення напруги, не підсилює струм і має коефіцієнт підсилення по потужності менший, ніж схема з ЗЕ. Вхідний опір схеми – найменший із усіх схем включення біполярних транзисторів, а вихідний – найбільший.

3. Схема ЗК має найбільший вхідний опір, самий низький вихідний опір, не підсилює напруги. В результаті цього транзистор в схемі ЗК має невеликий коефіцієнт підсилення по потужності, так як коефіцієнт підсилення по струму не перевищує 100.

На практиці схема ЗЕ найбільш розповсюджена. Необхідно відмітити, що в схемі ЗЕ фазовий зсув між  $U_{ex}$  і  $U_{вих}$  дорівнює  $180^\circ$ , тоді як у останніх схемах  $U_{вих}$  знаходиться у фазі з  $U_{ex}$ .

Схема ЗК на практиці відома як емітерний повторювач. Вона являється як би трансформатором опору, що дозволяє погодити різні радіоелектронні схеми між собою.

### Система $h$ – параметрів транзистора

Пристрій, який має два вхідних та два вихідних контакти і володіє здатністю підсилити потужність підведених до нього електричних сигналів, одержав назву *активного чотирьохполюсника*.

Транзистор у загальному випадку представляє собою активний нелінійний чотирьохполюсник (рис. 1.4), один з виводів якого (емітер, база чи колектор, в залежності від схеми включення) є загальним для вхідного і вихідного кола. При цьому його струми і напруги зв'язані нелінійними функціональними залежностями. Як відомо, зв'язок між струмами і напругами у чотирьохполюснику може бути представлений двома функціональними залежностями, причому у якості аргументів можуть бути вибрані дві будь-які з чотирьох величин:  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ . Таким чином, можна одержати шість пар функціональних залежностей.

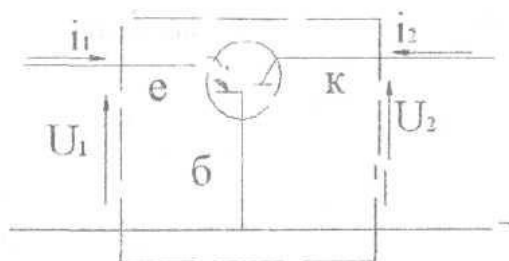


Рис. 1.4. Транзистор, як активний чотирьохполюсник

Проте найбільш часто для опису транзистора як активного чотирьохполюсника використовується наступна пара функціональних залежностей:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= f_1(i_1; U_2), \\ i_2 &= f_2(i_1; U_2) \end{aligned} \right\}$$

Ці функції можна записати і у вигляді повних диференціалів:

$$\left. \begin{aligned} dU_1 &= \frac{\partial U_1}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2, \\ di_2 &= \frac{\partial i_2}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial i_2}{\partial U_2} dU_2 \end{aligned} \right\}$$

На основі цих рівнянь можна одержати систему рівнянь зі змішаними параметрами у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} dU_1 &= h_{11} di_1 + h_{12} dU_2, \\ di_2 &= h_{21} di_1 + h_{22} dU_2 \end{aligned} \right\}$$

Коефіцієнти  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ , які входять у ці рівняння, називаються  $h$ -параметрами транзистора. Параметри  $h_{12}$  і  $h_{21}$  безрозмірні,  $h_{11}$  має розмірність опору, а  $h_{22}$  – розмірність провідності.

Фізичний сенс цих коефіцієнтів можна усвідомити, приймаючи почергово в останніх рівняннях  $di_1 = 0$  і  $dU_2 = 0$ , що відповідає режиму холостого ходу на вході транзистора і режиму короткого замикання на його виході:

$$h_{11} = \left. \frac{dU_1}{di_1} \right|_{dU_2=0} \text{ - вхідний опір транзистора;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{dU_1}{dU_2} \right|_{di_1=0} \text{ - коефіцієнт зворотного зв'язку по напру-}$$

зі;

$$h_{21} = \left. \frac{di_2}{di_1} \right|_{dU_2=0} \text{ - коефіцієнт передачі струму;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{di_2}{dU_2} \right|_{di_1=0} \text{ - вихідна провідність.}$$

$h$ -параметри називаються *малосигнальними параметрами*. Вони широко використовуються при аналізі і розрахунку різних радіоелектронних схем.

#### 1.1.4 Статичні характеристики біполярних транзисторів

Основними залежностями між напругами і струмами, які використовуються при інженерних розрахунках схем на транзисторах, є статичні характеристики. Зв'язок між струмами та напругами у транзисторах у системі  $h$ -параметрів прийнято представляти 4-ма сімействами характеристик:

1. Сімейство вхідних характеристик:

$$U_1 = f(i_1) \Big|_{U_2 = \text{const}}$$

2. Сімейство характеристик зворотного зв'язку по напрузі:

$$U_1 = f(U_2) \Big|_{I_1 = \text{const}}$$

3. Сімейство характеристик прямої передачі струму:

$$i_2 = f(i_1) \Big|_{U_2 = \text{const}}$$

4. Сімейство вихідних характеристик:

$$i_2 = f(U_2) \Big|_{I_1 = \text{const}}$$

В залежності від схеми включення транзистора у якості вхідних і вихідних струмів та напруг використовуються струми і напруги відповідного електроду.

В інженерній практиці найбільше застосування знаходять вхідні та вихідні характеристики. Два інших сімейства використовуються значно менше і можуть бути побудовані по сімействам вхідних і вихідних характеристик.

*Вхідні характеристики біполярного транзистора у схемі ЗБ.*

Вхідні характеристики транзистора в схемі ЗБ представляють собою залежність вхідного струму  $i_E$  від напруги між емітером і базою  $U_{EB}$  при постійній величині напруги між колектором і базою  $U_{KB}$ , тобто:  $i_E = f(U_{EB}) \Big|_{U_{KB} = \text{const}}$

Сімейство вхідних характеристик приведено на рисунку 1.5а. При  $U_{KB} = 0$  вхідна характеристика аналогічна вольт-амперній характеристиці прямозмщеного  $p-n$ -переходу.

При  $U_{KB} \neq 0$  вхідні характеристики зміщуються ліворуч, тобто відбувається збільшення струму  $i_E$  при постійній  $U_{KB}$ .

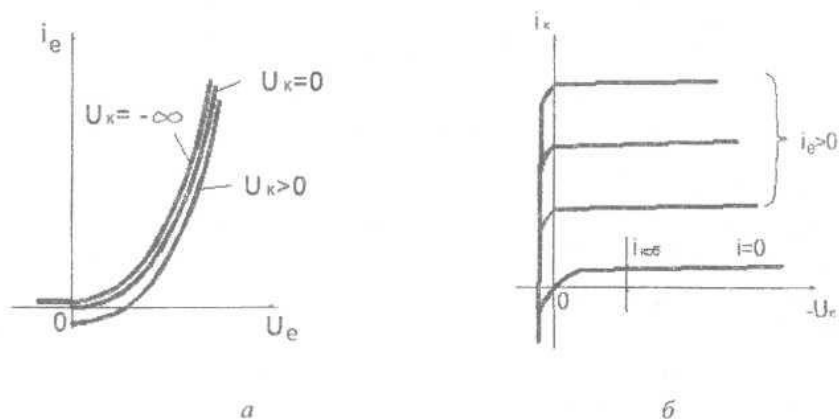


Рис. 1.5. Сімейство статичних характеристик  $p-n-p$ -транзистора у схемі ЗБ:  
а – вхідні; б – вихідні

Збільшення напруги зворотного зміщення  $U_{KB}$  приводить до розширення колекторного переходу, тобто до зменшення ефективної ширини бази. В результаті відбувається збільшення  $I_{KO}$  і зменшення  $I_p$ , тобто зменшення  $i_b$  і відповідно  $i_b r_b$ . При постійному  $U_{eб}$ , напруга



$U_e$ , прикладена безпосередньо до емітерного переходу, зростає, що приводить до збільшення струму емітера.

#### Вихідні характеристики транзистора в схемі ЗБ.

Із системи рівнянь для чотирьохполосника при умові дії малих сигналів змінних напруг і струмів можна записати:

$$\left. \begin{aligned} U_{EB} &= h_{11B} \cdot i_e + h_{12B} \cdot U_{KB} \\ i_K &= h_{21B} \cdot i_e + h_{22B} \cdot U_{KB} \end{aligned} \right\}$$

Друге рівняння системи описує вихідні кола біполярного транзистора в схемі ЗБ через  $h$ -параметри. Доданок  $h_{21B} \cdot i_e$  визначає дію вхідного сигналу на струм  $i_K$ , а доданок  $h_{22B} \cdot U_{KB}$  – вихідної напруги на цей струм.

Отже, у системі  $h$ -параметрів вихідні характеристики представляють собою залежність:

$$i_K = f(U_{KB}) \Big|_{I_e = \text{const}}$$

Сімейство вихідних характеристик приведено на рисунку 1.56. Відмітимо деякі особливості, що мають практичне значення.

1. В системі  $h$ -параметрів  $i_K = I_{KOB} + h_{21B} \cdot i_e$  або, враховуючи, що  $h_{21B} = \alpha$ , можна записати:

$$i_K = I_{KOB} + \alpha \cdot i_e$$

Як показано раніше  $I_{KOB} = I_{KO}$  – тепловому струму при  $I_e = 0$ .

2. Вихідні характеристики, як це видно з виразу  $I_K = I_{KO} + \alpha I_e$ , майже не залежать від напруги  $U_{KB}$  і йдуть з малим нахилом до осі  $U_{KB}$  (рис. 56).

3. Коефіцієнт передачі струму  $\alpha$  залежить від величини струму  $I_e$ .

4. При великій напрузі  $U_{KB}$  відбувається лавинний пробій колекторного переходу. При дуже великих значеннях  $U_{KB}$  може відбутися замикання бази за рахунок розширення колекторного переходу.

### 1.1.5 Параметри біполярного транзистора при включенні ЗЕ в режимі малого сигналу

Система рівнянь, що визначає параметри біполярного транзистора в схемі ЗЕ в режимі малого сигналу, може бути записана наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{\bar{b}e} &= h_{11e} \cdot \Delta I_{\bar{b}e} + h_{12e} \cdot \Delta U_{ke} \\ \Delta I_e &= h_{21e} \cdot \Delta I_{\bar{b}e} + h_{22e} \cdot \Delta U_{ke} \end{aligned} \right\}$$

Вхідний опір  $h_{11e}$  в  $(1+\beta)$  разів більше, ніж в схемі ЗБ і складає величину порядку одиниць кілоом.

Коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі  $h_{12e}$  складає приблизно  $10^3$ . Коефіцієнт передачі струму бази  $h_{21e} \approx \beta$ . Вихідна провідність  $h_{22e}$  складає приблизно  $5 \cdot 10^{-5}$  Ом.

#### *Вхідні характеристики.*

Вхідні характеристики біполярного транзистора при включенні в схемі ЗЕ представляють собою залежність вхідного струму від напруги між базою і емітером  $U_{\bar{b}e}$  при постійній напрузі на вході  $U_{ke}$ , тобто

$$I_{\bar{b}} = f(U_{\bar{b}e}) \Big|_{I_{ke} = const}$$

Величину струму бази можна визначити як:

$$i_{\bar{b}} = i_e - i_k = i_e - (\alpha \cdot i_e + I_{ko}) = (1-\alpha) \cdot i_e - I_{ko}$$

При  $U_{ke} = 0$  складова  $I_{ko}$  дорівнює нулю, і вхідна характеристика зовнішньо проходить аналогічно вхідній характеристиці в схемі ЗБ (рис. 1.6). Проте струм  $I_{\bar{b}} \ll I_e$  і його приріст на одиницю напруги  $U_{\bar{b}e}$  значно менший.

При  $U_{ke} \neq 0$  вхідні характеристики, на відміну від схеми ЗБ, змінюються праворуч, тобто  $I_{\bar{b}}$  зменшується, так як при збільшенні  $U_{ke}$  відбувається розширення колекторного переходу і зменшення ефективної ширини бази. Отже, зростає складова струму, зумовлена струмом  $I_{ko}$ , і зменшується  $I_p$ . Нагадуємо, що  $I_{\bar{b}} = I_{e\bar{b}} - I_p - I_{ko}$  і при  $U_{ke} \neq 0$  у базовому колі протікає струм  $I_{\bar{b}} = -I_{ko}$ .

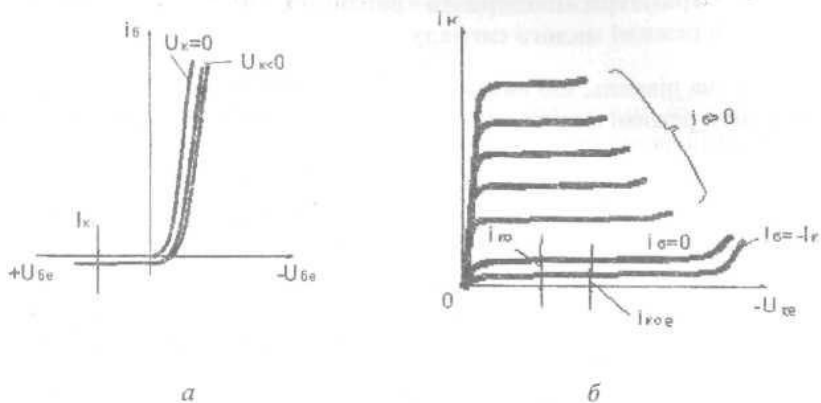


Рис. 1.6. Сімейство статичних характеристик  $p-n-p$  - транзистора в схемі ЗЕ:  
а - вхідні; б - вихідні

#### Вихідні характеристики.

Із приведеної вище системи рівнянь при умові дії малих сигналів змінних напруг і струмів можна записати:

$$\left. \begin{aligned} U_{be} &= h_{11e} \cdot i_b + h_{12e} \cdot U_{ke} \\ i_k &= h_{21e} \cdot i_b + h_{22e} \cdot U_{ke} \end{aligned} \right\}$$

Друге рівняння цієї системи описує вихідне коло біполярного транзистора в схемі ЗЕ в системі  $h$ -параметрів. Отже, вихідні характеристики зображують залежність  $I_k = f(U_{ke})|_{I_b = const}$ . Сімейство вихідних характеристики у системі  $h$ -параметрів наведено на рисунку 1.6б.

#### 1.2 Завдання

1. Виміряти сімейство вихідних характеристик транзистора в схемах ЗЕ і ЗБ.
2. Виміряти сімейство вхідних характеристик транзистора в схемах ЗЕ і ЗБ.
3. Лабораторна робота виконується на приладі для спостереження характеристик транзисторів типу ПНХТ-1, що дозволяє досліджувати сімейство характеристик на екрані приладу. Порядок роботи на приладі ПНХТ-1 приведено у додатку.

### 1.3 Основні контрольні запитання

1. Розкажіть про принципи дії транзисторів, ролі переходів і області бази.
2. Накресліть енергетичну діаграму транзистора  $n-p-n$  у активному режимі.
3. Вкажіть на вихідних характеристиках активну область і області відсічки та насичення.
4. Що таке струм  $I_{коє}$ ? Вкажіть його напрямок для транзисторів  $p-n-p$  і  $n-p-n$ .
5. Побудуйте сімейство вихідних характеристик транзисторів ЗБ і ЗЕ. Розкажіть про основні особливості сімейства. Чому характеристики проходять через початок координат?
6. Побудуйте сімейство вхідних характеристик транзисторів ЗБ і ЗЕ. Розкажіть про основні особливості цього сімейства.
7. Розкажіть про методи визначення  $h$  – параметрів за статичними характеристиками транзистора.

## 2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР З КЕРУЮЧИМ $p-n$ - ПЕРЕХОДОМ

**Мета роботи** – вивчити фізичні процеси, статичні вольт-амперні характеристики; графічне визначення параметрів польового транзистора, що керується  $p-n$ -переходом.

### 2.1 Теоретичні відомості

#### 2.1.1 Принцип дії

В напівпровідниковій електроніці використовують два типи польових транзисторів. Перший – це прилади, що керуються  $p-n$ -переходом. Другий – це транзистори із структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН), що керується електричним полем, створеним затвором.

Польові транзистори (ПТ) з  $p-n$ -переходом – це прилади, що керуються напругою і мають вхідний опір, середній між значеннями вхідного опору польових транзисторів без  $p-n$ -переходу і біполярних транзисторів. Цим приладам властиві нелінійна вольт-амперна характеристика і нульова напруга зрушення.

Такі властивості роблять ПТ з  $p-n$ -переходом цінним приладом для застосування в електронних схемах. Крім того, нововведення у конструкціях дозволяють виготовляти ПТ з  $p-n$ -переходом з такими параметрами, які в теперішній час не доступні ні біполярним приладам, ні польовим транзисторам без  $p-n$ -переходу.

На рисунку 2.1 зображена структура  $n$ -канального ПТ з  $p-n$ -переходом. Зворотне зміщення  $p-n$ -переходу забезпечує існування достатньо масивних збіднених шарів ( заштриховані ділянки) у слабо легovanому каналі  $n$ -типу. Товщину збідненого шару, а отже, товщину каналу можна регулювати підбиранням напруги затвор – витік або стік – витік. На рисунку 2.1 затвор і витік заземлені, а на стік подається позитивна напруга. Якщо  $U_c$  мала, то канал  $n$ -типу діє як простий резистор.

Ширина збідненого шару  $p-n$ -переходу із зворотним зміщенням змінюється в залежності від ступеня легування ділянок  $p$ - і  $n$ -типу і від прикладеної до  $p-n$ -переходу напруги. Ширина каналу, замкненого між двома збідненими шарами, також залежить від ступеня легування і від прикладеної напруги.

Якщо збільшити  $U_c$ , тоді лінійно буде збільшуватися  $I_c$ . Прилад працює на лінійній ділянці характеристики. По мірі віддалення від витіку до стоку падіння напруги  $I_c R$  зростає і збільшується товщина збудненого шару в діоді затвор – канал із зворотним зміщенням. При збільшенні  $U_c$  канал стає тонше і його опір збільшується, тому зменшується позитивний нахил вольт-амперної характеристики. При  $U_c = U_{co}$  канал перекривається.

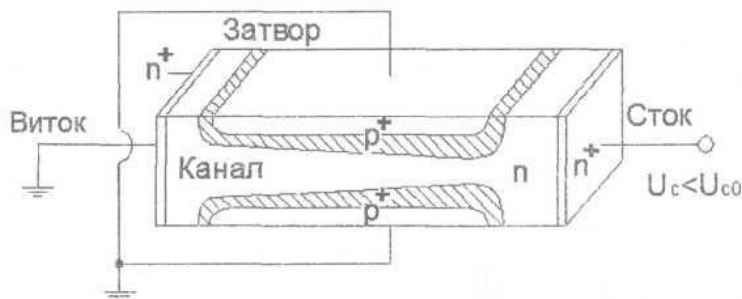


Рис. 2.1. n – каналний польовий транзистор, який керується p-n – переходом, із заземленим затвором і витіком:  $U_c < U_{co}$  – існує резистивний канал між витіком і стоком

Поблизу точки перекриття співвідношення горизонтального і вертикального електричних полів з щільністю струму буде дуже складним. У точці перекриття збуднені шари змикаються, ізолюючи витік від стоку. Прийемо також, що струм каналу проходить через збуднений шар так само, як проходять носії заряду через область колекторного переходу у біполярному транзисторі. Струм стоку у цих умовах позначимо  $I_{co}$ . Якщо напругу стоку збільшувати далі, збуднений шар стає ширше, але струм у каналі залишається приблизно рівним  $I_{co}$ , тому що основна частина росту напруги прийдеться на збуднений шар. У цьому випадку ПТ, який керується p-n – переходом, працює в області насичення.

Щоб з'ясувати дію напруги затвор – витік  $U_z$ , задаємо  $U_c = 0$  і  $I_c = 0$ , змінюючи  $U_z$ . Так як в каналі немає падіння напруги через струм, збуднений шар буде однорідним.

По мірі збільшення негативної напруги  $U_з$  збіднені шари розширюються. Якщо зробити  $U_з = U_{з\text{нотс}}$ , то можна повністю перекрити канал.

Якщо тепер одночасно подати напруги  $U_с$  і  $U_з$ , то можна змінювати вольт-амперну характеристики (рис. 2.2). При малих значеннях  $U_с$  вольт-амперна характеристика лінійна. При збільшені  $U_с$  канал перекривається, і вольт-амперна характеристика попадає в область постійного струму, або область насичення. При збільшені негативної напруги  $U_з$  струм в каналі зменшується. При достатній негативній напрузі затвору ( $U_з \approx -5\text{ В}$ ) струм стоку спадає до нуля.

Співвідношення між  $I_с$  і  $U_з$  буде нелінійним, як і у польових транзисторів без  $p-n$ -переходу.

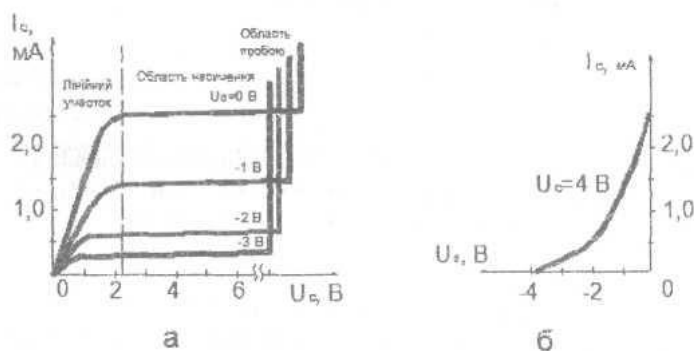


Рис.2.2. Вольт-амперні характеристики польового транзистора, який керується  $p-n$ -переходом: а – вихідні, б – передаточні

На рисунку 2.3 зображені схемні позначення  $n$ -канального і  $p$ -канального ПТ з  $p-n$ -переходом. Напрямок стрілки „ всередину ” значить, що у цього приладу затвор  $p$ -типу і він, отже,  $n$ -канальний. Стрілка „ назовні ” значить, що прилад  $p$ -канальний. Як і у випадку МОН – транзисторів,  $n$ -канальні прилади мають перевагу через більшу рухливість електронів.

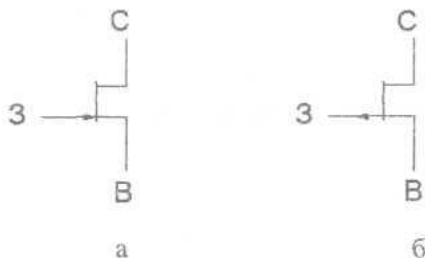


Рис. 2.3. Позначення польового транзистора, який керується  $p-n$ -переходом, в схемах: а –  $n$ -канальний; б –  $p$ -канальний.

### 2.1.2 Вольт-амперні характеристики ідеалізованого ПТ з $p-n$ -переходом

Вольт-амперна характеристика  $n$ -канального ПТ з  $p-n$ -переходом, тобто  $I_c$  як функції від  $U_c$  і  $U_3$  на лінійній ділянці і в області насичення описується наступними виразами:

$$I_c \approx G_0 \left[ 1 - \left( \frac{U_p - U_k}{U_{зптмс}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] U_c, \quad (2.1)$$

де  $G_0 = \frac{Z}{L} q \mu_n N_D d_M C_M$  – провідність каналу;

$U_3 = U_{зптмс} = \frac{e \cdot N_D \cdot d}{8\epsilon \cdot \epsilon_0} + U_k$  – напруга на затворі;

$U_{зптмс} = U_{зптмс} - U_k$ .

В області насичення одержимо:

$$I_{co} = I_{сни} \left[ 1 - 3 \left( \frac{U_3 - U_k}{U_{зптмс} - U_k} \right) + 2 \left( \frac{U_3 - U_k}{U_{зптмс} - U_k} \right)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (2.2)$$

де

$$I_{сни} = -\frac{1}{3} G_0 (U_{зптмс} - U_k). \quad (2.3)$$



Зокрема, при  $(U_3 - U_k) = 0$

$$I_{cни} = I_c. \quad (2.4)$$

Провідність каналу між витоком і стоком

$$g_c = \left. \frac{\partial I_c}{\partial U_c} \right|_{U_c = const}. \quad (2.5)$$

Крутизна характеристики

$$S = \left. \frac{\partial I_c}{\partial U_3} \right|_{U_c = const}. \quad (2.6)$$

Важливою перевагою польових транзисторів, які керуються  $p-n$ -переходом, є висока стабільність характеристик в часі і малий рівень власних шумів. Причина в тому, що канал відокремлено від поверхні збідненим шаром, який відіграє роль діелектрика. У результаті на межі каналу відсутні дефекти кристалічної ґратки, поверхневі канали і забруднення – все те, що у МДН – транзисторах служить причиною нестабільності і шумових флуктуацій. З тієї ж причини відбувається зменшення рухливості носіїв заряду, властиве МДН – транзисторам.

### 2.1.3 Умовні позначення, вольтамперні характеристики і параметри польових транзисторів

Систему позначень польових транзисторів визначають за ГОСТ 10862-72 «Приборы полупроводниковые. Система обозначений» і формулою  $KCzxyD$ , де  $K$  – буквенні або цифрові позначення вихідного напівпровідникового матеріалу;  $C$  – позначення підкласу приладу (для польових транзисторів буква П);  $z$  – цифрове позначення призначення чи область основних параметрів для польових транзисторів:

$z = 1...3$	– малопотужні	$(p_c < 0,3 \text{ Вт});$
$z = 4...6$	– середньої потужності	$(0,3 < p_c < 1,5 \text{ Вт});$
$z = 7...9$	– великої потужності	$(p_c > 1,5 \text{ Вт});$
$z = 1...4,7$	– низькочастотні	$(f < 3 \text{ МГц});$
$z = 2, 5, 8$	– середньої частоти	$(3 < f < 30 \text{ МГц});$
$z = 3, 6, 9$	– високої частоти	$(f < 30 \text{ МГц});$

ху – цифри від 01 до 99 – порядковий номер розробки технологічного типу; *D* – позначення параметричних груп.

Приклад системи позначення: КПП03Л – кремнієвий (К), польовий (П) транзистор, малопотужний, низької частоти (П), помер розробки (03), група Л.

Основні електричні параметри деяких польових транзисторів наведені в таблиці, а ВАХ показані на рисунку 2.2.

Параметр	КП03Е	КП03Ж	КП03И	КП03К	КП03Л	КП03М
Струм стоку мА, при $U_{си} = 10 \text{ В};$ $U_{зи} = 0$	0,3-2,5	0,35-3,8	0,4-4	1,0-5,5	2,7-10,5	3,0-12,0
Крутизна, мА/В, при $U_{си}$ $= 10 \text{ В};$ $U_{зи} = 0$	0,4-2,4	0,5-2,8	0,6-2,9	1,0-3,0	1,2-4,2	1,3-4,4
Напруга відсічки, В, при $U_{си} = 10 \text{ В};$ $I_c = 10 = \text{мкА}$	0,4-1,5	0,5-2,2	0,8-3,0	1,4-4,0	2,3-6,0	2,8-7,0

Граничні експлуатаційні дані вказаних приладів.

Сумарна напруга сток – затвор:

для груп Е, Ж, И, К – 15 В;

для груп Л, М – 17 В;

напруга стоку – витоку – 10 В.

Розсіювальна потужність – 120 мВт.

Діапазон температури навколишнього середовища від -55 до +85<sup>0</sup>С.

## 2.2 Схема вимірювань

На рисунку 2.4 зображена спрощена схема для зняття статичних характеристик польового транзистора з загальним витоком. Напруга  $U_{зи}$  подається від регульованого джерела Д2 і вимірюється ламповим вольтметром  $V_2$ . Напруга  $U_{си}$  подається від регульованого джерела Д1 і вимірюється ламповим вольтметром  $V_1$  у позиції „2” перемикача „Контроль”. Для вимірювання струму стоку  $I_c$  використовують міліамперметр.

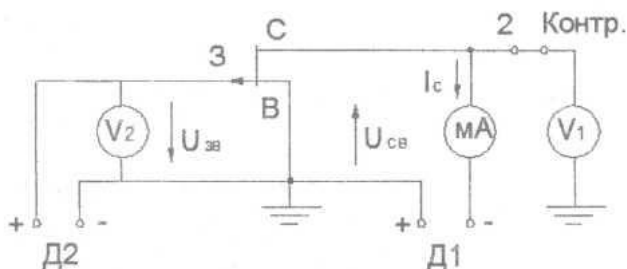


Рис. 2.4. Спрощена схема для зняття статичних характеристик польового транзистора з загальним витоком

У лабораторії вимірювання характеристик проводять на приладі для спостереження характеристик транзисторів типу ПНХТ-1. Прилад дозволяє спостерігати на екрані сімейство характеристик одночасно. Масштаб координатної сітки задається відповідними перемикачами. Перед виконанням роботи необхідно ознайомитися з інструкцією по експлуатації приладу ПНХТ-1.

### 2.3 Завдання

Знаючи тип транзистора та його граничні паспортні параметри, виміряти:

1. Сімейство  $I_c = f(U_{cn})$  при кімнатній температурі і фіксованих значеннях напруги  $U_{zn}$ , заданих викладачем; сімейство  $I_c = f(U_{zn})$  при фіксованих значеннях напруги  $U_{cn}$ .

2. Характеристику  $I_c = f(U_{cn})$  при підвищеній температурі для заданого  $U_{zn}$ .

3. Характеристику  $I_c = f(U_{zn})$  при підвищеній температурі для заданого  $U_{cn}$ .

### 2.4 Основні контрольні запитання

1. Опишіть конструкцію польового транзистора з керуючим  $p-n$ -переходом з каналом  $p$ -типу. Поясніть його принцип дії.

2. Як позначити на схемах польові транзистори з керуючим  $p-n$ -переходом і з каналом  $n$ -типу і  $p$ -типу?

3. Накресліть схеми включення з загальним витоком польового транзистора з каналами  $n$ -типу і  $p$ -типу. Вкажіть на схемах полярності джерел живлення.
4. Що таке напруга відсічки?
5. Зобразіть характеристику прямої передачі польового транзистора з каналом  $p$ -типу і  $n$ -типу для схеми з загальним витоком.
6. Що таке напруга насичення?
7. Як залежить напруга насичення від напруги на затворі?
8. Накресліть вихідні характеристики польового транзистора з керуючим  $p-n$ -переходом в схемі з загальним витоком.
9. Які існують різновиди польових транзисторів?
10. Чим пояснити високий диференційний опір польових транзисторів з керуючим  $p-n$ -переходом?
11. Які параметри польових транзисторів ви знаєте? Як вони можуть бути визначені за характеристиками?
12. Які переваги польових транзисторів в порівнянні з біполярними і електронними лампами?
13. Що таке термостабільна точка польового транзистора?
14. Наведіть загальні міркування щодо можливостей застосування польового транзистора в якості резистора в інтегральних схемах.

## 3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ

**Мета роботи** – вивчити фізичні процеси і статичні характеристики польового транзистора з ізольованим затвором; вміти графічно визначати його параметри.

### 3.1 Теоретичні відомості

#### 3.1.1 Принцип дії

Польові транзистори з ізольованим затвором мають класичну структуру метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) і часто називаються МДН – транзисторами.

Реальна структура МДН – транзистора з  $n$ -каналом, виконаного на основі напівпровідника  $p$ -типу зображена на рисунку 3.1.

Металевий електрод, що створює ефект поля, називають затвором (З). Два інших електроди називають витоком (В) і стоком (С). Ці електроди в принципі оборотні. Стоком являється той з них, на який (при відповідній полярності напруги) поступають робочі носії каналу. Якщо канал  $n$ -типу, то робочі носії – електрони і полярність стоку позитивна. Виток зазвичай з'єднують з основною пластиною напівпровідника, яку називають підкладкою (П).

В ідеальному випадку, коли рівноважний потенціал поверхні дорівнює нулю ( $U_{so} = 0$ ), МДН – транзистор з  $n$ -каналом працює наступним чином. Нехай затвор з'єднаний з витоком, тобто  $U_{zn} = 0$ . При цьому канал відсутній, і на шляху між стоком і витоком існують два зустрічно включених  $p-n^+$ - переходи. Тому при подачі напруги  $U_{cn}$  струм у колі стоку буде незначний.

Якщо подати на затвор негативну напругу  $U_{zn} < 0$ , то приповерхневий шар збагачується дірками; при цьому струм у робочому колі мало зміниться. Якщо ж подавати на затвор усе більше позитивне зміщення  $U_{zn} > 0$ , то спочатку утвориться збіднений дірками шар (об'ємний заряд акцептора), а потім – інверсійний шар електронів, тобто провідний канал. Після цього струм стоку приймає кінцеве значення і буде залежати від напруги на затворі. Це і буде робочий режим МДН – транзистора. Оскільки вхідний струм (у колі затвору) незначний, відбувається значне підсилення потужності, набагато більше, ніж у біполярних транзисторів.

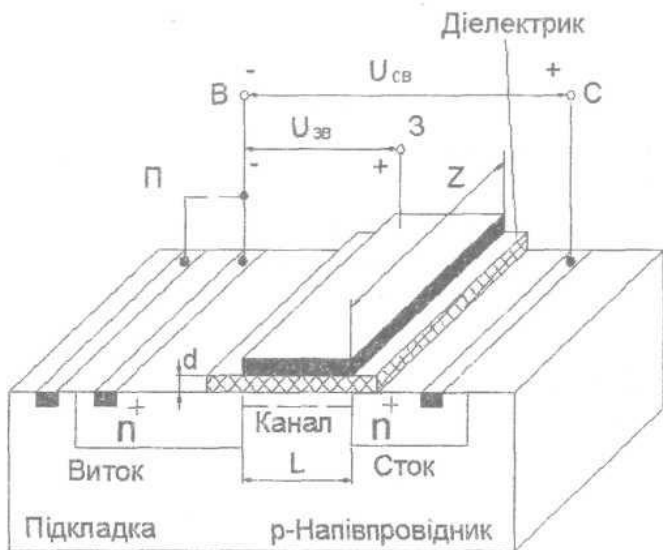


Рис. 3.1. Структура МДН-транзистора з індукованим каналом  $n$ -типу провідності

Канали, відсутні у рівноважному стані і які утворюються під дією зовнішньої напруги, називають індукованими. Товщина індукованого каналу практично незмінна (1-2 нм), тому модуляція його провідності зумовлена змінами концентрації носіїв. Напругу на затворі, при якій утворюється канал, називають пороговою напругою і позначають  $U_0$ . Довжина каналу  $L$  дорівнює відстані між шарами витoku і стоку, а ширина  $Z$  – протяжності цих шарів (рис. 3.1).

Якщо вибрати підкладку  $n$ -типу, а шари витoku і стоку зробити  $p^+$ -типу, то вийде МДН-транзистор з індукованим  $p$ -каналом. Він характеризується зворотними полярностями порогової і робочих напруг:  $U_0 < 0, U_{зи} < 0, U_{си} < 0$ .

Електронні схеми, у яких використовується з'єднання транзисторів з  $n$ - і  $p$ -каналами, називають комплементарними – так же, як і у випадку біполярних транзисторів.

Напруга затвору наводить у напівпровіднику тим більший питомий заряд (на одиницю площі), чим більша питома ємність між металом та поверхнею напівпровідника. Значить, питома ємність затвор – канал визначає керуючу здібність затвору і тому являється одним із важливих параметрів МДН-транзистора:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n}{d}, \quad (3.1)$$

де  $d$  – товщина діелектрика (рис. 3.1);  $\varepsilon_n$  – його діелектрична проникність.

Зменшення значення  $d$  бажано, але обмежено пробоем діелектрика. Типове значення товщини діоксиду кремнію складає  $d = 0,1 \dots 0,15$  мкм. Якщо покласти  $d = 0,15$  мкм і  $\varepsilon_n = 3,5$  для  $SiO_2$ , то  $C_0 \approx 200$  пФ/мм<sup>2</sup>.

Порогову напругу  $U_0$  можна розділити на дві складові:

$$U_0 = U_{0f} + U_{0B}. \quad (3.2)$$

Складова  $U_{0f}$  – це напруга спрямлення зон; вона зводить до нуля рівноважний поверхневий потенціал  $\varphi_{so}$ .

Складова  $U_{0B}$  – це напруга вигину зон, при якому рівень електростатичного потенціалу  $\varphi_{sm}$  пересікає рівень Фермі.

Таким чином, напруга  $U_{0f}$  характеризує «підготовленість» напівпровідника до утворення каналу; якщо  $\varphi_{so} = 0$ , тоді  $U_{0f} = 0$ , а якщо рівноважні зони викривлені униз, тоді  $U_{0f} < 0$ . Напруга  $U_{0B}$  визначає значення порогової напруги в „ідеальних умовах”, коли поверхневий потенціал дорівнює нулю.

### 3.1.2 Статичні характеристики

При деякій критичній напрузі на стоку, яку називають напругою насичення, різниця потенціалів між затвором і поверхнею у точці  $x = L$  буде дорівнювати нулю. Одночасно у цій точці дорівнюють нулю напруга електричного поля в діелектрику і питомий заряд носіїв у каналі. Утворюється, так звана, „горловина” каналу при напрузі насичення:

$$U_{cn} = U_{zn} - U_0 \quad (3.3)$$

Після утворення «горловини» каналу струм у робочому колі практично перестає залежати від напруги на стоку – настає насичення стру-

му, звідки і назва напруги  $U_{сн}$  (рис. 3.2а). На практиці користуються апроксимаціями ВАХ, з яких найбільш проста і розповсюджена наступна:

$$I_c = b[(U_{зп} - U_0)U_{сн} - \frac{1}{2}U_{сн}^2], \quad (3.4)$$

де

$$b = \mu C_0 \frac{Z}{L} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_n}{d} \frac{Z}{L} \quad (3.5)$$

питома крутизна МДН – транзистора (один із його основних параметрів);  $\mu$  – приповерхнева рухливість носіїв (зазвичай в 2-3 рази менше об'ємної);  $Z$  – ширина каналу (рис. 3.1).

При значеннях  $\mu = 550 \text{ см}^2 / (\text{Вс})$ ,  $\frac{Z}{L} = 10$  і  $C_0 = 2 \cdot 10^8 \text{ Ф/см}^2$  одержуємо типове значення  $b \approx 0,1 \text{ мА/В}^2$ .

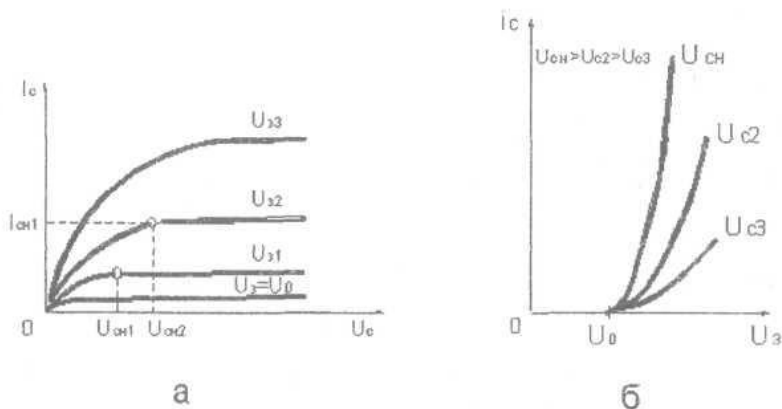


Рис. 3.2. Вихідні (а) і стокково – затворні (б) характеристики МДН – транзистора з індукованим каналом  $n$ -типу провідності

Вираз (3.4) дійсний тільки при умові  $U_{сн} < U_{сн}$ , тобто на початкових крутих ділянках ВАХ (рис. 3.2а). Якщо  $U_{сн} > U_{сн}$ , то струм не змі-



ноється і залишається рівним тому значенню, яке він має при  $U_{сн} = U_{сн}$ . Тому, підставляючи (3.3) у (3.4), одержуємо вираз для області насичення, тобто для пологих ділянок ВАХ:

$$I_c = \frac{1}{2} b (U_{зн} - U_0)^2. \quad (3.6)$$

Цьому виразу відповідає на рисунку 3.26 крива з параметром  $U_{сн}$ .

Зазвичай номінальним струмом МДН – транзистора враховується струм при напрузі  $U_{зн} = 2U_0$ :

$$I_{сном} = \frac{1}{2} b U_0^2. \quad (3.7)$$

Як бачимо, чим менша порогова напруга, тим менший робочий струм. Номінальному режиму, тобто значенню  $U_{зн} = 2U_0$ , згідно (3.3), відповідає напруга насичення  $U_{сн} = U_0$ . Отже, малі значення  $U_0$  забезпечують і малі струми, і малі робочі напруги транзистора.

Розглянемо початкові круті ділянки ВАХ, які широко використовуються у ключових (імпульсних) схемах. Враховуючи  $U_{сн} \ll U_{зн} - U_0$ , можна знехтувати квадратичним членом у виразі (3.4).

Тоді одержимо лінійну залежність виду:

$$I_c = b (U_{зн} - U_0) U_{сн}. \quad (3.8)$$

Коефіцієнт при  $U_{сн}$  в правій частині називається провідністю каналу, а зворотна величина – опором каналу:

$$R_0 = \frac{1}{b (U_{зн} - U_0)}. \quad (3.9)$$

Як бачимо, опір каналу можна регулювати в широких межах, змінюючи напругу на затворі. Така можливість використовується на практиці. Якщо покласти  $U_{зн} - U_0 = 4$  В і  $b = 0,1$  мА/В<sup>2</sup>, то  $R_0 = 2,5$  кОм.

### 3.1.3 Параметри МОН – транзистора

У підсилювальній техніці використовуються пологі ділянки ВАХ – область насичення. Цій області властиві найменші нелінійні перекручування сигналів і оптимальні значення малосигнальних параметрів, істотних для підсилювання.

До малосигнальних параметрів МДН – транзистора відносяться:

- крутизна  $S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зн}} \right|_{U_{сн} = const}$ ;
- внутрішній опір  $r_c = \left. \frac{dU_{сн}}{dI_c} \right|_{U_{зн} = const}$ ;
- коефіцієнт підсилення  $K = \left. \frac{dU_{сн}}{dU_{зн}} \right|_{I_c = const}$ .

Ці три параметри зв'язані співвідношенням:

$$K = S r_c. \quad (3.10)$$

Крутизну в області насичення визначають із виразу (3.6):

$$S = b(U_{сн} - U_0). \quad (3.11)$$

Звідси видно, що крутизна пропорційна параметру  $b$ . Назва останнього (питома крутизна) зумовлена тим, що при  $U_{зн} - U_0 = 1$  В значення  $b$  чисельно дорівнює крутизні.

На закінчення відзначимо, що розглянуте у всіх попередніх розділах включення МДН – транзистора з загальним витоком найбільш розповсюджене, але не єдине можливе (рис. 3.3а). Іноді використовується включення з загальним затвором (рис. 3.3б). Для нього характерно досить низький вхідний опір (близький до величини  $\frac{1}{S}$ ) і тому застосовується тільки у деяких спеціальних схемах.

Якщо порівняти польові транзистори, які керуються  $p-n$ -переходом, з МДН – транзисторами, можна відмітити, що в принципі перехідні і частотні характеристики їх можуть бути однаковими. Проте практично довжину каналу у польових транзисторів з  $p-n$ -переходом не вдається зробити такою ж малою, як у сучасних МДН – транзисторах. Тому в даний час швидкодія польових транзисторів, які керуються  $p-n$ -переходом, нижче, ніж у МДН – приладах. Польові транзистори з  $p-n$ -переходом уступають МДН транзисторам за величиною вхідного опору: воно визначається зворотним струмом  $p-n$ -переходу і зазвичай не перевищує  $10^{11}$  Ом. Зі зростанням температури цей опір шви-

дко зменшується і на межі робочого діапазону ( $+125^{\circ}\text{C}$ ) може дійти до  $10^7$  Ом і менше.

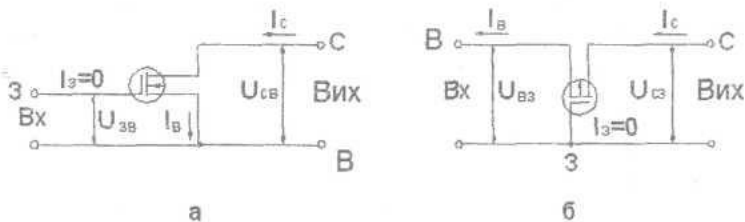


Рис. 3.3. Схеми включення МДН – транзистора:  
а – з загальним витоком; б – з загальним затвором

### 3.1.4 Умовні позначення

Умовні графічні позначення польових транзисторів з ізолюваним затвором зображені на рисунку 3.4.

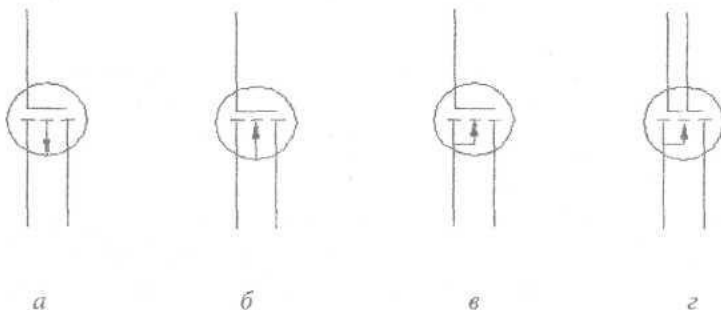


Рис. 3.4. Умовні графічні позначення польових транзисторів з ізолюваним затвором:  
а – з виводом від підкладки збагаченого типу з р-каналом; б – збідненого типу з n-каналом; в – збагаченого типу з n-каналом і з внутрішнім з'єднанням підкладки і витоку; г – з двома ізолюваними затворами збідненого типу з n-каналом і з внутрішнім з'єднанням підкладки і витоку

Систему позначень польових транзисторів визначає ГОСТ 2.730-73 ЕСКД. В даній роботі досліджуються транзистори КП 301 різних параметричних груп.

Основні електричні параметри деяких типів МДН – транзисторів з індуктованим каналом зведені в таблицю.

Параметр	Тип транзистора			
	КП 301	КП 304	КП 305	КП 310
Максимальна робоча частота, МГц	100	-	250	1 ГГц
Кругозна характеристики не менше, мА/В	0,5	4,0	4,0	3,0
Початковий струм стоку, мкА	0,5	0,2	-	0,03-5,0
Струм витоку затвору не більше, нА	0,5	20,0	5,0	3,0
Порогова напруга, В	2,7-5,4	5,0	-	-
Вихідна провідність (не більше), мкСм	250	-	150	-

Граничні експлуатаційні дані вказаних приладів:

Напруга затвор – виток – 30 В;

Напруга стік – виток – 20 В;

Струм стоку – 15 мА;

Розсіювальна потужність – 200 мВт;

Температура навколишнього середовища – -55...+70 °С.

### 3.2 Опис вимірювальної установки

Спрощена схема вимірювальної установки для зняття статичних характеристик МДН – транзистора з індукованим каналом  $p$ -типу буде так. Напруга затвор – витік  $U_{zn}$  подається від джерела Д2 і вимірюється вольтметром  $V_2$ . Напруга стік – виток  $U_{cn}$  подається від джерела Д1 і вимірюється ламповим вольтметром у позичії „2” перемикачем „Контроль”. Струм стоку  $I_c$  вимірюється міліамперметром. Характеристика МДН – транзистора в даній схемі знімається по точкам і потребує великих затрат часу, особливо при знятті сімейства характеристик.

При вимірюванні сімейства характеристик в даній лабораторній роботі використовується прилад для спостереження характеристик транзисторів ПНХТ-1. Він дозволяє спостерігати на екрані одночасно сімейство із 12 вихідних характеристик. Інструкція по експлуатації приладу ПНХТ-1 додається до методичних вказівок.

### 3.3 Завдання

Польові транзистори повинні бути захищені від дії статичної електрики, яка викликає пробій. Для цього технологічну перемичку, яка закорочує усі електроди, дозволяється знімати тільки після підключення транзистора до гнізд вимірювального приладу. Вимірювальні прилади,

пінцети і інші робочі інструменти повинні бути ретельно заземлені. Студент, який підключає МДН – транзистор до вимірювального приладу, повинен падіти на руку заземлене кільце-браслет.

При знятті характеристик необхідно слідкувати, щоб значення струму і напруги не перевищували граничних експлуатаційних параметрів МДН – транзисторів.

1. Виміряти при кімнатній температурі сімейство вихідних характеристик  $I_c = f(U_{en})$  при фіксованих значеннях напруги  $U_{zn}$ , заданих викладачем.

2. Виміряти при кімнатній температурі сімейство передаточних характеристик  $I_c = f(U_{zn})$  при фіксованих значеннях напруги  $U_{en}$ , заданих викладачем.

3. Виміряти при підвищених температурах характеристику  $I_c = f(U_{en})$  для заданого  $U_{zn}$ .

4. Виміряти при підвищених температурах характеристику  $I_c = f(U_{zn})$  для заданого  $U_{en}$ .

### 3.4 Основні контрольні запитання

1. Структура і принцип дії польового транзистора з індукованим каналом  $n$ - і  $p$ -типів.

2. Структура і принцип дії польових транзисторів з вбудованим каналом  $n$ - і  $p$ -типів.

3. Як позначаються на схемах польові МДН – транзистори з каналами  $n$ - і  $p$ -типів.

4. Накресліть схеми включення польового транзистора з індукованим каналом  $n$ - і  $p$ -типів з загальним витоком. Вкажіть на схемах полярності джерел живлення.

5. Накресліть стокові і стоково-затворні характеристики МДН – транзистора з вбудованим каналом і поясніть їх характер.

6. Накресліть вихідні (стокові) і прямої передачі (стоково-затворні) характеристики МДН – транзистора з індукованим каналом і поясніть їх характер.

7. Дайте визначення термінам: напруга насичення, порогова напруга, напруга відсічки.

8. Які різновиди польових транзисторів ви знаєте?

9. Як залежать параметри МДН – транзисторів від температури?

10. Як визначити параметри МДН – транзистора за його статичними характеристиками?

11. Які параметри польових транзисторів з ізолюваним затвором ви знаєте?

12. Розкажіть про переваги польових транзисторів у порівнянні з біполярними.

13. Чим пояснюється високий вхідний опір польового транзистора з ізолюваним затвором? Порівняйте польовий транзистор із затвором у вигляді  $p-n$ -переходу з МДН – транзистором з ізолюваним затвором по вхідному опору.

14. Дайте порівняльну характеристику властивостей польового транзистора з керуючим  $p-n$ -переходом і МДН – транзистора як активного елементу інтегральних схем.

15. Наведіть загальні міркування щодо можливості застосування польового транзистора у якості резистора в інтегральних схемах.

## 4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Мета роботи – вивчення основних фізичних закономірностей, що визначають властивості і параметри фотодіодів, і дослідження вольт-амперних, світлових і інерційних характеристики цих приладів.

### 4.1 Теоретичні відомості

#### 4.1.1 Фотодіоди

Фотодіод являється напівпровідниковим приладом, в якому використовується ефект поділу на межі електронно-діркового переходу нерівноважних носіїв, створених світлом.

Схематично фотодіод зображено на рисунку 4.1а. Фотодіод виконується зазвичай на основі монокристалів напівпровідників. Освітлювальна область (на рис. 4.1а  $n$ -область, яка зазвичай мало легована) має великий час життя носіїв заряду  $\tau_p$ , отже, велику дифузійну довжину  $L_p$ . Якщо ширина  $n$ -області  $W$  значно менше дифузійної довжини дірок  $L_p$  в цій області, то більша частина цих носіїв не встигне прорекомбінувати і дійде до межі  $p$ - $n$ -переходу. Існує можливість використання такого приладу у двох варіантах: перший – у якості фотодіода, другий – вентильного фотоелемента. Розглянемо більш детально роботу фотодіоду.

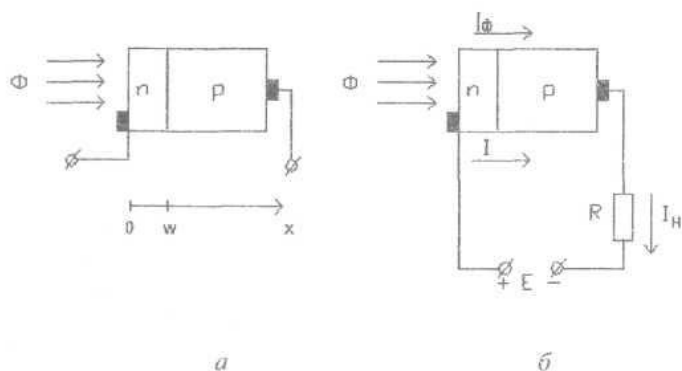


Рис. 4.1. Схема фотодіоду: а – режим роботи фотодіоду; б – режим роботи вентильного фотоелемента

При відсутності освітлення існує рівноважний стап між тепловими потоками носіїв через перехід із  $n$ -області у  $p$ -область і в зворотному напрямку. При освітлені  $n$ -області в ній утворюються нерівноважні електрони і дірки. Зміну концентрації електронів в  $n$ -області можна не враховувати, так як ця зміна у порівнянні з рівноважною концентрацією зазвичай невелика і тільки незначна частка електронів, долаючи потенційний бар'єр, може проходити в  $p$ -область напівпровідника. Підвищення концентрації дірок приводить до того, що у переході з'являється дірковий струм, напрямлений у  $p$ -область. Величину діркового струму, зумовленого освітленням, позначимо через  $I_f$ . Наявність струму  $I_f$  порушує теплову рівновагу і приводить до того, що  $p$ -область напівпровідника заряджається позитивно відносно  $n$ -області. Виникаюча таким чином різниця потенціалів  $\varphi$  зменшує потенційний бар'єр, що відповідає зміщенню  $p$ - $n$ -переходу у прямому напрямку. Ця різниця потенціалів  $\varphi$  викликає прямиий струм дірок, який протидіє дифузійному струму неосновних носіїв  $I_f$ . Якщо різниця потенціалів на  $p$ - $n$ -переході  $\varphi$ , то інжекційний струм дорівнює:

$$I = I_S \left( e^{\frac{\varphi}{kT}} - 1 \right), \quad (4.1)$$

де  $I_S$  - струм насичення  $p$ - $n$ -переходу;  $\varphi_T = \frac{kT}{e}$  - температурний потенціал.

В результаті встановиться динамічна рівновага між струмом  $I_f$  і інжекційним струмом  $I$ :

$$I_f = I_S \left( e^{\frac{\varphi}{kT}} - 1 \right) = 0. \quad (4.2)$$

Якщо підключити до виводів фотодіоду джерело напруги  $U$ , то у колі потече струм, величина якого визначається різницею зустрічних струмів через  $p$ - $n$ -перехід:



$$I = I_f(\Phi) - I_S \left( e^{\frac{U}{\varphi T}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Омічним опором областей нехтуємо, тому зміщення переходу визначається тільки впливом зовнішнього джерела напруги  $U$ .

Рівняння (4.3) описує сімейство вольт-амперних характеристик фотодіоду (рис. 4.2). Параметром сімейства характеристик є величина світлового потоку  $\Phi$ .

Нехай послідовно з фотодіодом включено джерело напруги  $E$  і зовнішній опір  $R$  (рис. 4.1б). Струм через перехід у цьому випадку також буде визначатися рівнянням:

$$I = I_f - I_S \left( e^{\frac{U}{\varphi T}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

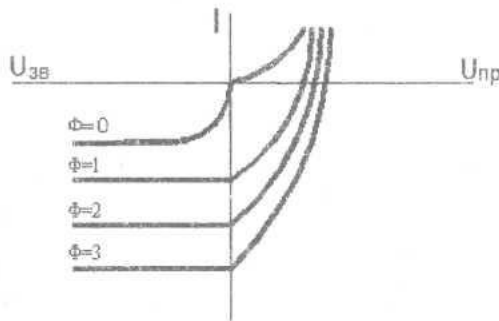


Рис. 4.2. Вольт-амперні характеристики фотодіоду

Величина напруги на переході  $U$  буде результатом спільного впливу світлового потоку  $\Phi$  і зовнішньої напруги  $E$ . Величина струму  $I$  через опір навантаження дорівнює:

$$I = \frac{U + E}{R}, \quad (4.5)$$

де  $E$  – напруга джерела живлення у колі фотодіоду.

Підставивши вираз (4.5) для  $I$  у рівняння (4.4), одержимо основне рівняння фотодіоду за наявності зовнішнього зміщення:

$$I_f - I_s \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) = \frac{U + E}{R} = I \quad (4.6)$$

Розрізняють два режими роботи фотодіоду: вентильний і фотодіодний.

*Вентильний режим* характеризується відсутністю джерела зовнішньої напруги в колі фотодіоду. При цьому зовнішній опір  $R$  у загальному випадку може бути включеним у зовнішнє коло.

Рівняння (4.6) для вентильного режиму роботи фотодіоду має вигляд:

$$I_f - I_s \left( e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right) = \frac{U}{R} = I \quad (4.7)$$

При розімкнутому зовнішньому колі ( $R = \infty$ ) величину напруги на переході  $\varphi$  називають вентильною фото-е.р.с. і позначають  $\varphi_B$ . Із рівняння (4.7) одержимо:

$$\varphi_B = \varphi_T \ln \left( \frac{I_f}{I_s} + 1 \right) \quad (4.8)$$

В режимі короткого замикання ( $R = 0$ ) напруга на виводах фотодіоду  $U = 0$  і струм у зовнішньому колі  $I = I_f$ , що виходить із рівняння (4.7). У цьому випадку струм короткого замикання  $I$  утворюється тільки потоком нерівноважних дірок, викликаних світлом.

Розглянемо світлову характеристику фотодіоду. Вона представляє собою залежність фотоструму від величини світлового потоку  $\Phi$ , що падає на фотодіод. У фотодіодному режимі світлова характеристика строго лінійна у великому діапазоні величин світлових потоків, що являється перевагою фотодіоду (рис. 4.3). В режимі короткого замикання фотодіоду його світлова характеристика виявляється нелінійною за раху-

нок порушення цього режиму неврахованим опором товщини напівпровідника (крива 2, рис. 4.3).

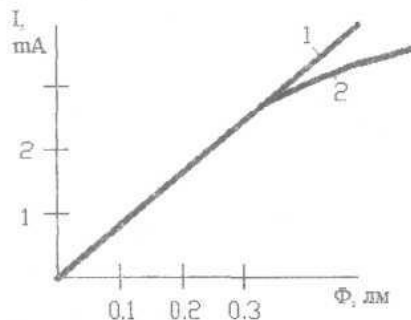


Рис. 4.3. Світлова характеристика фотодіоду

Важливими характеристиками фотодіодів являються його спектральна і інтегральна чутливість. Чутливістю фотодіоду називають відношення фотоструму до величини світлового потоку:

$$K = \frac{I_f}{\Phi} \quad (4.9)$$

Зазвичай чутливість  $K$  фотодіодів вимірюється в міліамперах на люмен (мА/лм). Чутливість фотодіоду – величина постійна, яка не залежить від величини світлового потоку  $\Phi$  і напруги, прикладеної до фотодіоду.

Світло, яке використовується для освітлення фотодіоду, може бути як монохроматичним, так і складного спектрального складу. Чутливість фотодіоду до монохроматичного світла різна для різних довжин хвиль. Залежність чутливості діоду від довжини хвилі називається спектральною характеристикою ФД.

Порівняємо фотодіодний і вентиляльний режими роботи фотодіоду.

Для перетворення світлових сигналів в електричні фотодіодний режим має істотні переваги у порівнянні з вентиляльним режимом.

Перша перевага полягає у можливості одержання великих перепадів напруги на навантажувальному опорі, так як повна світлова добавка струму  $I_f$  може бути одержана в колі за наявності великого навантажувального опору. Відповідно величина сигналу, який знімається з цього опору, може бути великою, в той час як у вентиляльному режимі повна світлова добавка струму  $I_f$  може бути одержана тільки в режимі короткого замикання.

Друга перевага фотодіодного режиму полягає в меншій інерційності фотодіоду. Інерційність у фотодіодному режимі визначається часом прольоту  $t_0 = \frac{W^2}{2D_p}$ . Помноживши чисельник і знаменник цього виразу

на  $\tau_p$  та враховуючи відоме співвідношення  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ , одержимо:

$$t_0 = \tau_p \frac{1}{2} \left( \frac{W}{L_p} \right)^2, \quad (4.10)$$

де 
$$\tau_p = \varphi_T \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \varphi_B} \quad (4.11)$$

У вентильному режимі при розімкнутому зовнішньому колі інерційність визначається часом життя  $\tau_p$ . У правильно сконструйованих фотодіодах ширина бази  $W \ll L_p$ , тому  $t_0 \ll \tau_p$ .

## 4.2 Опис вимірювальної установки

На рисунку 4.4 дана принципова схема експериментальної установки. Установка призначена для зняття вольт-амперних і світлових характеристик, а також для дослідження інерційних властивостей фотодіодів і фоторезисторів.

Оптична система установки складається з двох частин. Перша частина призначена для зняття статичних характеристик фотоприладів. До її складу входять освітлювач 1 і колодка для підключення фотоприладу 5, змонтовані на оптичній лаві і вміщені у світлонепроникний корпус. Освітленість змінюється шляхом змінювання відстані між фотоприладом і джерелом світла. Світловий потік, що падає на фотоприлад, обчислюється за формулою:

$$\Phi = \frac{SI}{\ell^2}, \quad (4.12)$$

де  $S$  – активна площа фотоприладу,  $\text{м}^2$ ;  $I$  – сила світла лампи накаливання,  $\text{кд}$ ;  $\ell$  – відстань між ниткою лампи і вікном колодки фотоприладу,  $\text{м}$ .

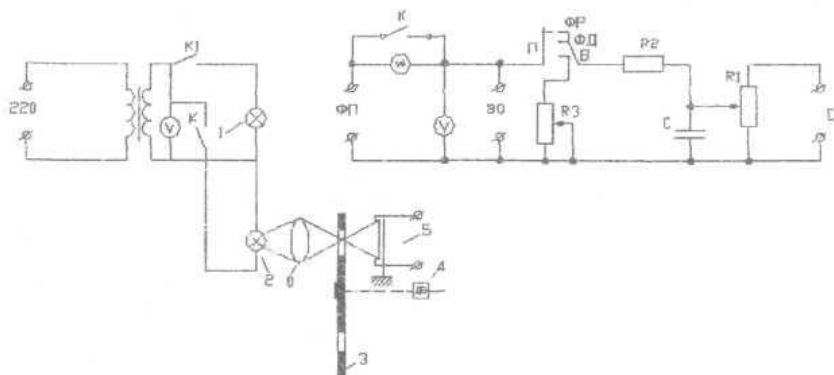


Рис. 4.4. Схема вимірювальної установки

Друга частина оптичної системи установки призначена для дослідження інерційних властивостей фотоприладів. До її складу входять освітлювач 2, об'єктив 0 і секторний диск 3, розташований на валу двигуна 4, а також колодка 5 для кріплення досліджуваного фотоприладу. Ця оптична система вміщена в окремий світлонепроникний корпус. При обертанні секторного диска 3 світловий потік модулюється і на фотоприлад подаються прямокутні світлові імпульси.

Для того, щоб світлові імпульси мали круті фронти, світловий потік фокусується об'єктивом 0 і переривається секторним диском у точці фокусу.

Електрична частина вимірювальної установки одна та сама, що і при дослідженні статичних характеристик і інерційних властивостей фотоприладів (рис. 4.4). Схема живиться постійною напругою  $E$ . Перемикач  $\Pi$  дозволяє досліджувати характеристики фоторезистора ФР та фотодіоду у фотодіодному ФД і вентильному В режимах. Різні величини опору навантаження у вентильному режимі фотодіоду встановлюються опором  $R_3$ . Вольтметр  $V$  і мілівольтметр  $mA$  служать для виміру напруги і струму, що протікає через фотоприлад. При дослідженні інерційних властивостей фотоприладу ключ  $K$  повинен бути замкнений, а паралельно досліджуваному приладу необхідно підключити електронний осцилограф ЕО.

При вимірах фотоприлад встановлюється у відповідну колодку і підключається до входу електричної схеми. Усі параметри елементів вказані на стенді.

### 4.3 Завдання

1. Виміряти сімейство вольт-амперних характеристик фотодіоду при чотирьох різних світлових потоках  $\Phi$ .
2. Виміряти світлову характеристику фотодіоду у фотодіодному режимі при трьох різних напругах на фотодіоді (2, 5 і 10 В).
3. Виміряти світлову характеристику фотодіоду у вентильному режимі короткого замикання і при опорі навантаження, що дорівнює 10 кОм.
4. Обчислити інтегральну чутливість фотодіоду за даними п. 2 і 3.

### 4.4 Основні контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії фотодіоду (ФД)?
2. Який принцип дії фотоперетворювача (ФП)?
3. Наведіть основні параметри і характеристики ФД і ФП.
4. Накресліть конструкції ФД і ФП.
5. Перелічіть області застосування ФД і ФП.

## 5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОРЕЗИСТОРИ (ОПТРОНИ)

**Мета роботи** – вивчення фізичних та технічних основ оптоелектроніки і фотопровідності; дослідження характеристик фоторезисторів; визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду.

### 5.1 Теоретичні відомості

Оптоелектронікою називається область електроніки, яка оснований на застосуванні подвійних електричних і оптичних засобів обробки інформації. Наукову основу оптоелектроніки складають процеси перетворення електричних сигналів у світлові і світлових у електричні, а також процеси одержання, передачі, переробки і зберігання інформації за допомогою світла.

Практичне здійснення двох основних елементарних процесів оптоелектроніки можливо за допомогою різних фізичних явищ. Прикладом можуть служити електролюмінесценція, катодолімінесценція, фотопровідність, фотодіодний ефект, вентильний фотовольтанічний ефект. Застосування фоторезисторів в оптоелектроніці зумовлено широким діапазоном їх параметрів і різноманітністю характеристик. Важливе значення має також конструктивна і технологічна простота фоторезисторів. Основою їх є монокристали або полікристалічні плівки. Як джерела світла у поєднанні з фоторезисторами використовуються інжекційні діоди, електролюмінесцентні конденсатори, мініатюрні лампочки розжарювання.

На рисунку 5.1 приводяться позначення оптронів у схемах: а – діодного, б – резисторного, в – тиристорного, г – діодного, зображеного рознесеним способом.

Вихідна характеристика резисторного оптрона визначається характеристикою фоторезистора, тому розглянемо фізичні процеси і параметри фоторезисторів.

Процес внутрішньої іонізації напівпровідника під дією світла, що приводить до утворення додаткових, нерівноважних носіїв заряду, називається внутрішнім фотоелектом. Додаткову провідність, зумовлену внутрішнім фотоелектом, називають фотопровідністю. Причиною виникнення фотопровідності являється те, що під дією випромінювання звільняються зв'язані носії струму, причому, якщо енергія фотону така, що  $h\nu \geq \Delta E$  ( $\Delta E$  – ширина забороненої зони), то під дією світла звільнені із валентної зони електрони переходять у вільну зону, залишаючи там вільну дірку. При цьому звільнені електрон і дірка можуть прийма-

ти участь у провідності. Фоторезисторами називають напівпровідникові прилади, провідність яких змінюється під впливом світла.

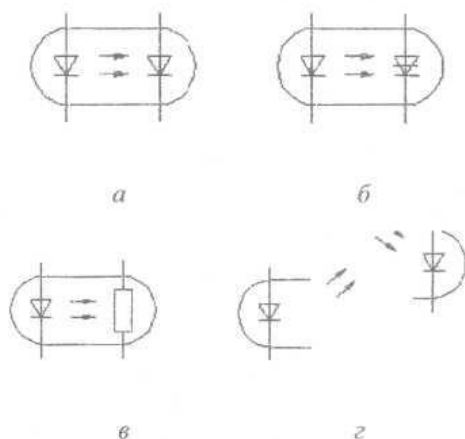


Рис. 5.1. Позначення оптронів у схемах

Основним елементом фоторезистора, конструкція якого показана на рисунку 5.2, являється тонкий шар напівпровідника 3, розташований на ізоляційній підкладці. На шар напівпровідника націляються металеві контакти 1, 2.

Якщо фоторезистор включений послідовно з джерелом напруги і не освітлений, то в його колі буде протікати темновий струм (рис. 5.3).

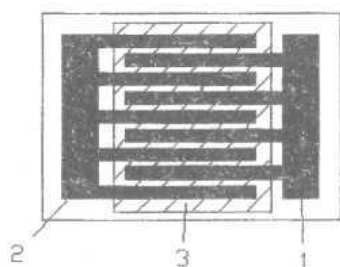


Рис. 5.2. Конструкція фоторезистора

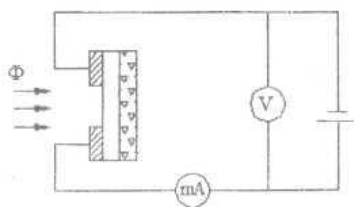


Рис. 5.3. Схема включення фоторезистора



$$I_T = B \cdot \sigma_0 \cdot U, \quad (5.1)$$

де  $B$  – постійний коефіцієнт, що визначається тільки геометричними розмірами фоточутливого шару.

$$\sigma_0 = q n_0 \mu_n + q p_0 \mu_p, \quad (5.2)$$

де  $\sigma_0$  – темнова електропровідність напівпровідника;  $\mu_n, \mu_p$  – рухливості електронів і дірок.

При освітленні фоторезистора провідність світлочутливого шару зростає і через прилад протікає світловий струм:

$$I_c = B \cdot \sigma \cdot U, \quad (5.3)$$

$$\sigma = \sigma_0 + (q \Delta n \mu_n + q \Delta p \mu_p), \quad (5.4)$$

де  $\sigma$  – електропровідність матеріалу при освітленні;  $\Delta n, \Delta p$  – концентрації нерівноважних електронів і дірок, що виникають за рахунок квантів світла.

Вольт-амперна характеристика фоторезистора, яка обумовлена виразом (5.3), має лінійний характер (рис. 5.4).

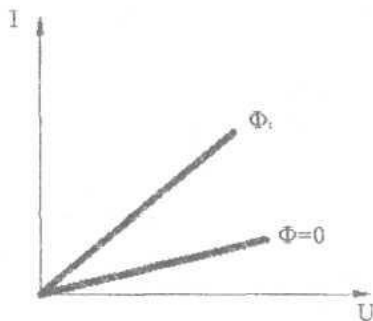


Рис. 5.4 Вольт-амперні характеристики фоторезистора

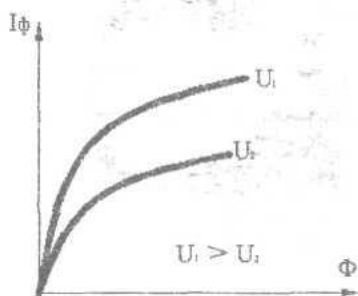


Рис. 5.5 Світлові характеристики фоторезистора

Закон Ома порушується тільки за високих напруг на фоторезисторі.

Величина світлового струму  $I_c$  складається з двох доданків: темного струму  $I_T$  і фотоструму  $I_\Phi$ , пов'язаного зі зміною провідності напівпровідника при його освітленні:

$$I_c = I_T + I_\Phi. \quad (5.5)$$

При малій величині світлового потоку  $\Phi$  фотострум  $I_\Phi$  залежить від нього лінійно  $I_\Phi \sim \Phi$ . При більшій величині світлового потоку  $\Phi$  фотострум  $I_\Phi \sim \sqrt{\Phi}$ . У загальному випадку можна представити залежність фотоструму від інтенсивності світла у вигляді:

$$I_\Phi = A \cdot \Phi^\alpha \cdot U, \quad (5.6)$$

де  $A$  і  $\alpha$  – деякі константи.

Постійна  $\alpha$  лежить у межах  $0 < \alpha < 1$ .

Типова світлова характеристика фоторезистора приведена на рисунку 5.5.

Важливими характеристиками фоторезистора являються його інтегральна і спектральна чутливості. Чутливістю фоторезистора називають величину фотоструму, що приходиться на одиницю світлового потоку.

$$K = \frac{I_\Phi}{\Phi}. \quad (5.7)$$

Скориставшись рівнянням (4.6), вираз для чутливості можна записати таким чином:

$$K = A \cdot \Phi^{\alpha-1} \cdot U. \quad (5.8)$$

Із виразу (5.8) видно, що чутливість фоторезистора залежить як від величини світлового потоку  $\Phi$ , так і від величини напруги, прикладеної до фоторезисту. Тому при порівнянні властивостей фоторезисторів необхідно вказувати величини світлового потоку  $\Phi$  і напруги  $U$ , при яких вимірювалась чутливість. У видимій частині спектру чутливість вимірюють у мікроамперах на люмен  $\left(\frac{\mu A}{lm}\right)$ .

Залежність чутливості фоторезистора від довжини хвилі називається його спектральною характеристикою. Чутливість фоторезистора до світла складного спектрального складу називається інтегральною чутливістю.

Істотне значення при різному використанні фоторезисторів мають їх частотні характеристики. При опроміненні модульованим світлом чутливість фоторезистора зменшується із збільшенням частоти модуляції. Частотна залежність пояснюється інерційністю процесів, які відбуваються при вмиканні і вимиканні світла.

При вмиканні і вимиканні світла фотострум зростає до максимуму і падає до мінімуму не миттєво (рис. 5.6). Характер і протяжність кривих наростання і спаду фотоструму з часом істотно залежать від механізму рекомбінації нерівноважних носіїв у даному матеріалі, а також від величини інтенсивності світла. При малому рівні інжекції наростання і спад фотоструму з часом можна представити експонентами з постійною часу  $\tau$ , що дорівнює часу життя нерівноважних носіїв у напівпровіднику.

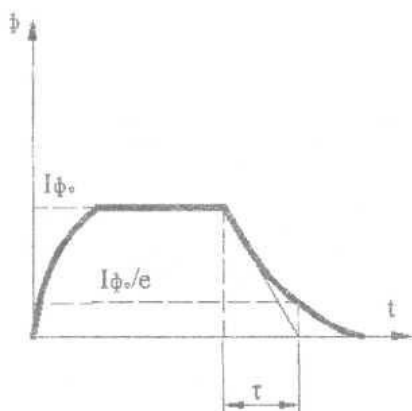


Рис. 5.6. Крива релаксації фотоструму

У цьому випадку при включенні світла фотострум  $I_{\Phi}$  буде зростати і спадати в часі по закону:

$$I_{\Phi} = I_{\Phi_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad I_{\Phi} = I_{\Phi_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.9)$$

де  $I_{\Phi_0}$  – стаціонарне значення фотоструму при освітленні.

За кривими спаду фотоструму з часом можна визначити час життя  $\tau$  нерівноважних носіїв.

## 5.2 Опис вимірювальної установки

На рисунку 5.7 дана принципова схема експериментальної установки, яка призначена для зняття вольт-амперних і світлових характеристик, а також для дослідження інерційних властивостей фоторезисторів.

Оптична система установки складається з 2-х частин. Перша частина призначена для зняття статичних характеристик фотоприладів. До її складу входять освітлювач 1 і колодка для підключення фотоприладу 5, змонтовані на оптичній лавці і розміщені у світлонепроникному корпусі.

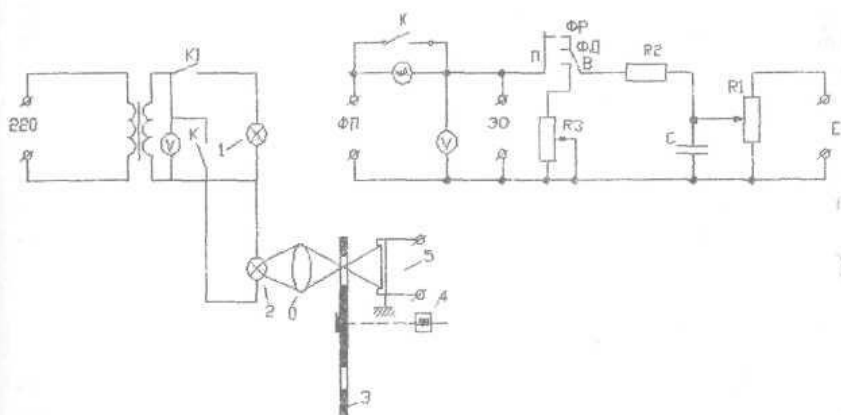


Рис. 5.7. Принципова схема експериментальної установки

Освітленість змінюється шляхом зміни відстані між фотоприладом і джерелом світла. Світловий потік, що падає на фотоприлад, обчислюється за формулою:

$$\Phi = \frac{S \cdot I}{\ell^2}, \quad (5.10)$$

де  $S$  – активна площа фотоприладу;  $I$  – сила світла лампи;  $\ell$  – відстань між ниткою лампи і вікном колодки фотоприладу.

Друга частина оптичної системи установки призначена для дослідження інерційних властивостей фотоприладів. До її складу входять освітлювачі 1,2, об'єктив 0 і секторний диск 3, розміщений на валу двигуна 4, а також колодка 5 для кріплення досліджуваного фотоприладу. Ця оптична система розміщена у той же світлонепропускний корпус. При збертанні секторного диска 3 світловий потік модулюється, і на фотоприлад подаються світлові імпульси.

Для того щоб світлові імпульси мали круті фронти, світловий потік фокусується об'єктивом 0 і переривається секторним диском у точці фокусу. Електрична частина вимірювальної установки одна та сама, що і при дослідженні статистичних характеристик і інерційних властивостей фотоприладів. Схема живиться постійною напругою  $E$ , що подається від стабілізованого джерела.

Перемикач  $П$  дозволяє досліджувати не тільки характеристики фоторезистора  $\Phi P$ , але і фотодіода  $\Phi D$  у вентильному і фотодіодному режимах.

Вольтметр  $V$  і міліамперметр  $mA$  служать для вимірювання напруги і струму, що протікає через фотоприлад. При дослідженні інерційних властивостей фотоприладу ключ  $K$  повинен бути замкнений, а паралельно досліджуваному приладу необхідно підключити електронний осцилограф  $EO$ . При вимірюваннях фотоприлад вставляється у відповідну колодку і підключається до входу електричної схеми.

### 5.3 Завдання

1. Виміряти сімейство вольт-амперних характеристик фоторезистора при різних світлових потоках. Величину світлового потоку змінювати фільтрами.
2. Виміряти світлову характеристику фоторезистора при двох різних напругах на фоторезисторі за вказівкою викладача.
3. Накреслити криві релаксації фотоструму  $I_{\Phi}$  при освітленні фоторезистора прямокутними світловими імпульсами. Використовуючи генератор міток, визначити масштаб по осі часу.
4. За експериментальними даними і формулою (5.9) оцінити час життя нерівноважних носіїв заряду у фоторезисторі.

### 5.4 Основні контрольні запитання

1. Пояснити механізм виникнення фотопровідності.
2. Які характеристики властиві фоторезистору?
3. Пояснити спектральні характеристики фоторезистора.
4. Чому світлові характеристики фотопровідників нелінійні?
5. Чим обумовлена інерційність фоторезисторів?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Мокрицький В.А., Дранчук С.М., Андріянов О.В., Лєнков С.В., Зубарєв В.В. Фізико-технічні основи мікроелектроніки: Підруч. – Одеса: ТЕС, 2002. – 712 с.
2. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. Изд. 2, испр. и доп. – Москва: Изд-во „Советское радио”, 1969. – 592 с.
3. Конспект лекцій з ОМЕ (викладач В.А. Мокрицький).
4. Конспект лекцій „Фізичні основи електронних приладів” (викладач Г.Ю. Щербакова).

ВСТУП .....	3
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР .....	4
1.1 Теоретичні відомості .....	4
1.1.1 Основні визначення .....	4
1.1.2 Схеми включення транзистора.....	7
1.1.3 Порівняння параметрів різних схем включення біполярного транзистора .....	11
1.1.4 Статичні характеристики біполярних транзисторів.....	14
1.1.5 Параметри біполярного транзистора при включенні ЗЕ в режимі малого сигналу.....	17
1.2 Завдання.....	18
1.3 Основні контрольні запитання.....	19
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР	
3 КЕРУЮЧИМ <i>p-n</i> - ПЕРЕХОДОМ .....	20
2.1 Теоретичні відомості .....	20
2.1.1 Принцип дії.....	20
2.1.2 Вольт-амперні характеристики ідеалізованого ПТ з <i>p-n</i> -переходом .....	23
2.1.3 Умовні позначення, вольтамперні характеристики .....	24
і параметри польових транзисторів .....	24
2.2 Схема вимірювань.....	25
2.3 Завдання .....	26
2.4 Основні контрольні запитання.....	26
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. ПОЛЬОВИЙ ТРАНЗИСТОР	
3 ІЗОЛЮВАНИМ ЗАТВОРОМ.....	28
3.1 Теоретичні відомості .....	28
3.1.1 Принцип дії.....	28

3.1.2 Статичні характеристики.....	30
3.1.3 Параметри МОН – транзистора.....	32
3.1.4 Умовні позначення.....	34
3.2 Опис вимірювальної установки.....	35
3.3 Завдання.....	35
3.4 Основні контрольні запитання.....	36
<b>4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. НАПІВПРОВІДНИКОВІ</b>	
<b>ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....</b>	<b>38</b>
4.1 Теоретичні відомості.....	38
4.1.1 Фотодіоди.....	38
4.2 Опис вимірювальної установки.....	43
4.3 Завдання.....	45
4.4 Основні контрольні запитання.....	45
<b>5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА. НАПІВПРОВІДНИКОВІ</b>	
<b>ФОТОРЕЗИСТОРИ (ОПТРОНИ).....</b>	<b>46</b>
5.1 Теоретичні відомості.....	46
5.2 Опис вимірювальної установки.....	51
5.3 Завдання.....	52
5.4 Основні контрольні запитання.....	52
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>53</b>



*Навчальне видання*

**Андріянов Олександр Вікторович**  
**Мокрицький Вадим Анатолійович**

**ПРИНЦИПИ ДІЇ, ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТА ПАРАМЕТРИ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ  
МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ**

Навчальний посібник

Верстка К.М. Терзі  
Обкладинка К. М. Терзі

Підписано до друку 25.02.16. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 3,26.  
Обл.-вид. арк. 2,67. Наклад 300 пр. Зам. № 1986.

Видавництво «Наука і техніка»  
(свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1196 від 15.01.2003)  
65044, Україна, м. Одеса, просп. Шевченка, 1 тел.(048)705-86-40

Віддруковано в друкарні видавництва ЛО БАХВА  
(свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 145 від 11.08.2000)  
65044, Україна, м. Одеса, просп. Шевченка, 1, корп.5  
тел./факс (048) 777-43-50, e-mail: mail@bahva.com,  
www.bahva.com, www.vuzkniga.ua