

Лекция 10

Тема лекции: Биполярные транзисторы

Цель лекции:

Изучить устройство, принцип работы и характеристики биполярных транзисторов, рассмотреть физические процессы, происходящие в областях эмиттера, базы и коллектора, а также зависимость тока и усилительных свойств транзистора от его параметров и режимов включения.

Основные вопросы:

1. Строение и типы биполярных транзисторов (р–n–р и n–р–n структуры).
2. Назначение и функции эмиттера, базы и коллектора.
3. Принцип действия транзистора и механизм усиления тока.
4. Основные режимы работы транзистора: активный, насыщения, отсечки, инверсный.
5. Вольтамперные характеристики и зависимость токов от напряжения.
6. Основные параметры транзистора: коэффициенты усиления α и β , сопротивления, частотные свойства.
7. Схемы включения транзистора: с общим эмиттером, базой и коллектором.
8. Влияние температуры на характеристики и усилительные свойства.

Краткие тезисы:

Общие сведения. История вопроса.

В 1958 г. американские ученые Дж. Бардин и В. Браттейн создали полупроводниковый триод, или транзистор. Это событие имело громадное значение для развития полупроводниковой электроники. Транзисторы могут работать при значительно меньших напряжениях, чем ламповые триоды, и не являются простыми заменителями последних: их можно использовать не только для усиления и генерации переменного тока, но и в качестве ключевых элементов. Определение «биполярный» указывает на то, что работа транзистора связана с процессами, в которых принимают участие носители заряда двух сортов (электроны и дырки).

Транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя электронно-дырочными переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов. В транзисторе используются оба типа носителей – основные и неосновные, поэтому его называют **биполярным**.

Биполярный транзистор состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: *эмиттера, базы и коллектора* (рис. 5.1).

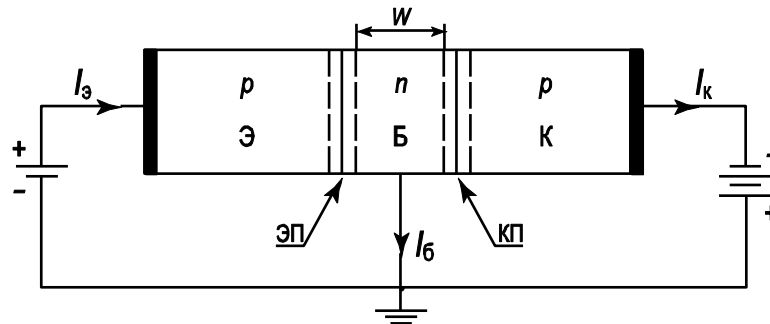


Рис. 5.1. - Схематическое изображение транзистора типа *p-n-p*:
Э – эмиттер, Б – база, К – коллектор, W – толщина базы, ЭП – эмиттерный переход, КП – коллекторный переход

Переход, который образуется на границе эмиттер – база, называется эмиттерным, а на границе база – коллектор – коллекторным. В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n*.

Условные обозначения обоих типов транзисторов, рабочие полярности напряжений и направления токов показаны на рисунке 5.2.

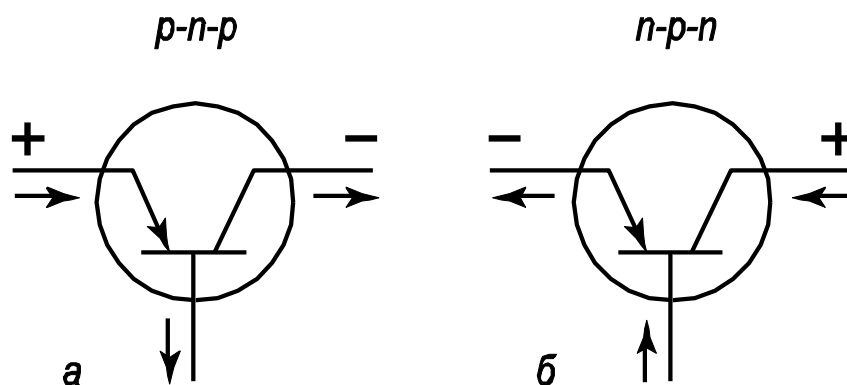


Рис. 5.2. - Условные обозначения транзисторов:
а) транзистор *p-n-p*, б) транзистор *n-p-n*

По технологии изготовления транзисторы делятся на *сплавные, планарные*, а также *диффузионно-сплавные, мезапланарные* и *эпитаксиально-планарные* (рис. 5.3).

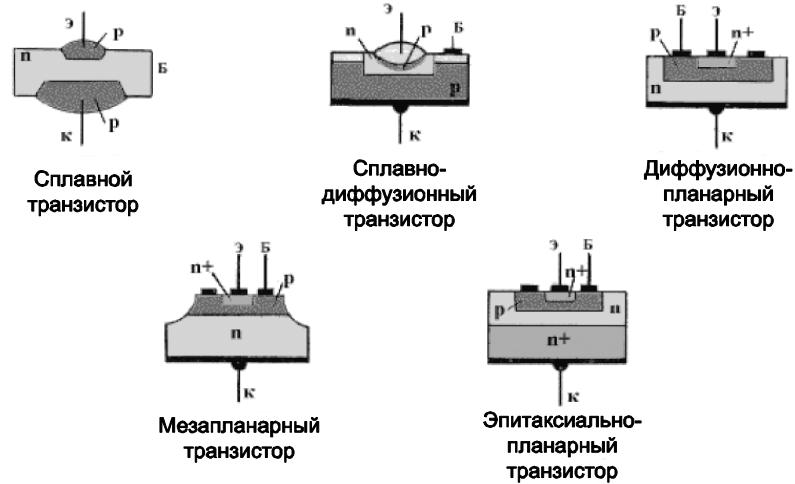


Рис. 5.3. - Разновидности транзисторов по технологии изготовления

Конструктивно биполярные транзисторы оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах (рис. 5.4).

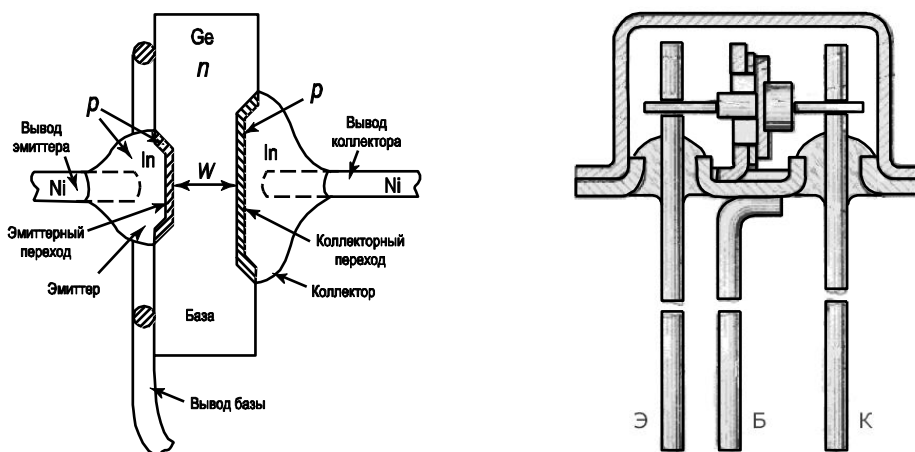


Рис. 5.4. - Конструктивное оформление биполярного транзистора

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

1. Режим **отсечки** – оба $p-n$ перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идет сравнительно небольшой ток;
2. Режим **насыщения** – оба $p-n$ перехода открыты;
3. **Активный** режим – один из $p-n$ переходов открыт, а другой закрыт.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором невозможно. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причем транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы.

Область транзистора, расположенная между переходами, называется **базой** (Б). Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из них изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно происходила инжекция в базу, а другую – так, чтобы соответствующий переход наилучшим образом осуществлял экстракцию инжектированных носителей из базы.

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером (Э), а соответствующий переход – эмиттерным.

Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы, называют коллектором (К), а переход – коллекторным.

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном переходе – обратное, то включение транзистора считают **нормальным**, при противоположной полярности – **инверсным**.

По характеру движения носителей тока в базе различают диффузионные и дрейфовые биполярные транзисторы.

Основные характеристики транзистора определяются в первую очередь процессами, происходящими в базе. В зависимости от распределения примесей в базе может присутствовать или отсутствовать электрическое поле. Если при отсутствии токов в базе существует электрическое поле, которое способствует движению неосновных носителей заряда от эмиттера к коллектору, то транзистор называют **дрейфовым**, если же поле в базе отсутствует – бездрейфовым (**диффузионным**).

Основные физические процессы в биполярных транзисторах.

В рабочем режиме биполярного транзистора протекают следующие физические процессы: **инжекция, диффузия, рекомбинация и экстракция**.

Рассмотрим p - n переход эмиттер – база при условии, что длина базы велика. В этом случае при прямом смещении p - n перехода из эмиттера в базу инжектируются неосновные носители. Закон распределения инжектированных дырок $p_n(x)$ по базе описывается следующим уравнением:

$$p_n(x) = p_{n0} \cdot \exp(\beta V_G) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right).$$

Схематически распределение инжектированных дырок $p_n(x)$ показано на рисунке 5.5.

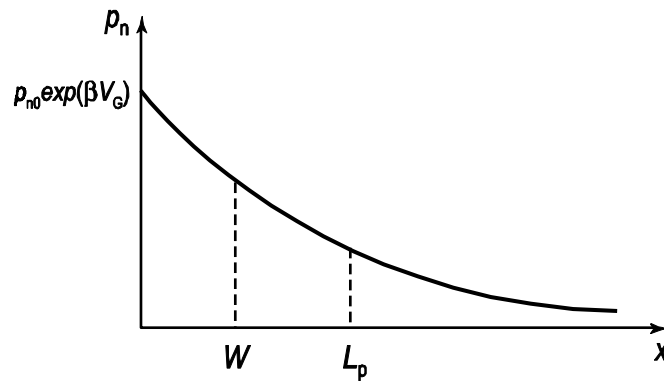


Рис. 5.5. - Распределение инжектированных дырок в базе

Процесс переноса инжектированных носителей через базу – диффузионный. Характерное расстояние, на которое неравновесные носители распространяются от области возмущения, – диффузионная длина L_p . Поэтому если необходимо, чтобы инжектированные носители достигли коллекторного перехода, длина базы W должна быть меньше диффузионной длины L_p . И условие $W < L_p$ является необходимым для реализации транзисторного эффекта – управления током во вторичной цепи через изменение тока в первичной цепи.

В процессе диффузии через базу инжектированные неосновные носители рекомбинируют с основными носителями в базе. Для восполнения прорекомбинировавших основных носителей в базе через внешний контакт должно подойти такое же количество носителей. Таким образом, ток базы – это рекомбинационный ток.

Продиффундировавшие через базу без рекомбинации носители попадают в электрическое поле обратно смещенного коллекторного p - n перехода и экстрагируются из базы в коллектор. Таким образом, в БТ реализуются четыре физических процесса:

- инжекция из эмиттера в базу;
- диффузия через базу;
- рекомбинация в базе;
- экстракция из базы в коллектор.

Эти процессы для одного типа носителей схематически показаны на рисунке 5.6а, б.

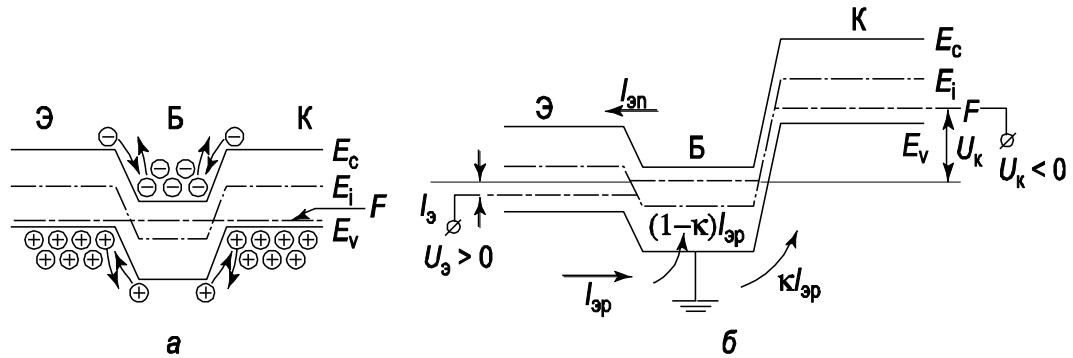


Рис. 5.6. - Зонная диаграмма биполярного транзистора:
а) в равновесном состоянии; б) в активном режиме

Биполярный транзистор в схеме с общей базой. Зонная диаграмма и токи.

На рисунке 5.6а показана зонная диаграмма биполярного транзистора в схеме с общей базой в условиях равновесия. Значками (+) и (–) на этой диаграмме указаны основные и неосновные носители.

Для биполярного транзистора в схеме с общей базой активный режим (на эмиттерном переходе – прямое напряжение, на коллекторном – обратное) является основным. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться транзистор в активном режиме, для $p-n-p$ биполярного транзистора $U_э > 0$, $U_к < 0$.

Для биполярного транзистора $p-n-p$ типа в активном режиме эмиттерный переход смещен в прямом направлении, и через него происходит инжекция дырок, как неосновных носителей, в базу. База должна иметь достаточно малую толщину W ($W \ll L_p$, где L_p – диффузионная длина неосновных носителей), чтобы инжектированные в базу неосновные носители не успевали прорекомбинировать за время переноса через базу. Коллекторный переход, нормально смещенный в обратном направлении, "собирает" инжектированные носители, прошедшие через слой базы.

Рассмотрим компоненты токов в эмиттерном и коллекторном переходах (рис. 5.7). Для любого $p-n$ перехода ток J определяется суммой электронного J_n и дырочного J_p компонент, а они в свою очередь имеют дрейфовую и диффузионную составляющие:

$$J = J_p + J_n = J_{pD} + J_{pE} + J_{nD} + J_{nE} = \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) (e^{\beta V_G} - 1).$$

При приложении к эмиттерному переходу прямого напряжения $U_э > 0$ в биполярном транзисторе $p-n-p$ происходит инжекция дырок из эмиттера в базу $I_{эп}$ и электронов из базы в эмиттер $I_{эн}$. Ввиду того, что эмиттер легирован

намного сильнее базы, ток инжектированных дырок $I_{\text{эп}}$ будет значительно превышать ток электронов $I_{\text{эп}}$. Инжектированные в базу дырки в результате диффузии будут перемещаться в коллекторному переходу, и если ширина базы W много меньше диффузионной длины L_p , почти все дырки дойдут до коллектора и электрическим полем коллекторного p - n - p перехода будут переброшены в p -область коллектора. Возникающий вследствие этого коллекторный ток лишь немного меньше тока дырок, инжектированных эмиттером.

Вольтамперные характеристики БТ в активном режиме ($U_k < 0$, $|U_k| \gg 0$):

$$I_y = I_{\text{э}} + I_{\text{а}},$$

где $I_{\text{э}}$ – ток в цепи эмиттера, I_k – ток в цепи коллектора, I_6 – ток на базовом выводе.

В активном режиме к эмиттеру приложено прямое напряжение и через переход течет эмиттерный ток $I_{\text{э}}$, имеющий две компоненты:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{эп}} + I_{\text{эн}},$$

где $I_{\text{эп}}$ – ток инжекции дырок из эмиттера в базу, $I_{\text{эн}}$ – ток инжектированных электронов из базы в эмиттер. Величина «полезной» дырочной компоненты равняется $I_{\text{эп}} = \gamma \cdot I_{\text{э}}$, где γ – эффективность эмиттера. Величина дырочного эмиттерного тока, без рекомбинации дошедшая до коллектора, равняется $\gamma k I_{\text{э}}$.

Ток базы I_6 транзистора будет состоять из трех компонент, включающих электронный ток в эмиттерном переходе $I_{\text{эн}} = (1 - \gamma) \cdot I_{\text{э}}$, рекомбинационный ток в базе $(1 - \kappa) \gamma I_{\text{э}}$ и тепловой ток коллектора I_{k0} .

Тепловой ток коллектора I_{k0} имеет две составляющие:

$$I_{\text{э0}} = I_0 + I_g,$$

где I_0 – тепловой ток, I_g – ток генерации.

На рисунке 5.7 приведена схема биполярного транзистора в активном режиме, иллюстрирующая компоненты тока в схеме с общей базой.

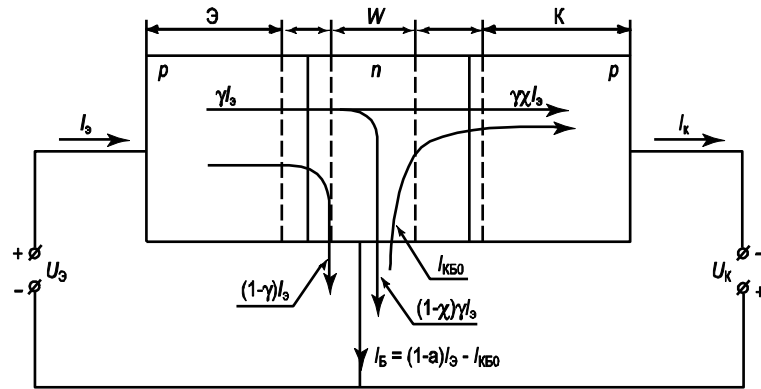


Рис. 5.7. - Схема, иллюстрирующая компоненты тока в биполярном транзисторе в схеме с общей базой

Формулы Молла – Эберса

Формулы Молла – Эберса являются универсальными соотношениями, которые описывают характеристики биполярных транзисторов во всех режимах работы [28, 5, 19].

Для такого рассмотрения представим БТ в виде эквивалентной схемы, приведенной на рисунке 5.8.

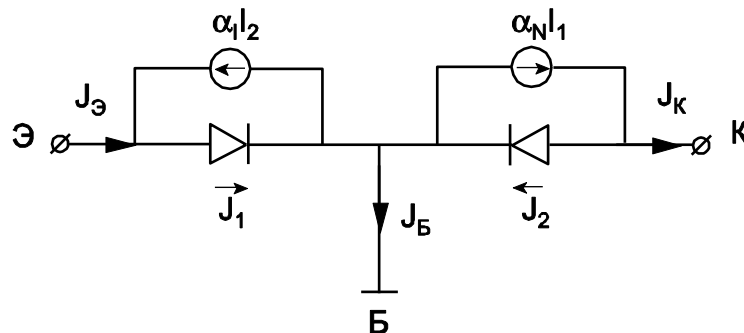


Рис. 5.8. - Эквивалентная схема биполярных транзисторов во всех режимах работы

При нормальном включении через эмиттерный p - n переход течет ток I_1 , через коллекторный переход течет ток $\alpha_N I_1$ – меньший, чем I_1 , вследствие рекомбинации части инжектированных носителей в базе. На рисунке 5.8 этот процесс изображен как генератор тока $\alpha_N I_1$, где α_N – коэффициент передачи эмиттерного тока. При инверсном включении транзистора прямому коллекторному току I_2 будет соответствовать эмиттерный ток $\alpha_1 I_2$, где α_1 – коэффициент инверсии. Таким образом, токи эмиттера J_3 и коллектора J_k в общем случае состоят из инжектируемого (I_1 или I_2) и экстрагируемого ($\alpha_N I_1$ или $\alpha_1 I_2$) токов:

$$\begin{aligned} J_{\dot{y}} &= I_1 - \alpha_1 I_2, \\ J_{\dot{e}} &= \alpha_N I_1 - I_2. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Величины токов I_1 и I_2 выражаются для p - n переходов стандартным способом:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{y0}' (\exp(\beta U_{\dot{y}}) - 1), \\ I_2 &= I_{e0}' (\exp(\beta U_{\dot{e}}) - 1), \end{aligned} \quad (5.2)$$

где I_{y0}' и I_{k0}' – тепловые (обратные) токи p - n переходов. Отметим, что токи I_{y0}' и I_{k0}' отличаются от обратных токов эмиттера I_{y0} и коллектора биполярного транзистора.

Оборвем цепь эмиттера ($J_{\dot{y}} = 0$) и подадим на коллекторный переход большое запирающее напряжение U_k . Ток, протекающий в цепи коллектора при этих условиях, будем называть тепловым током коллектора I_{k0} . Поскольку $I_{\dot{y}} = 0$, из (5.1) следует, что $I_1 = \alpha_1 I_2$, а из (5.2) $I_2 = -I_{k0}'$, поскольку $U \gg kT/q$.

Полагая $I_k = I_{k0}$, получаем в этом случае:

$$\begin{aligned} I_{\dot{e}} &= \alpha_N \alpha_1 I_2 I_1 = I_2 (\alpha_N \alpha_1 - 1) = (1 - \alpha_N \alpha_1) = I_{e0}, \\ I_{e0}' &= \frac{I_{e0}}{1 - \alpha_N \alpha_1}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Обозначим ток эмиттера при большом отрицательном смещении и разомкнутой цепи коллектора через I_{y0}' – тепловой ток эмиттера:

$$I_{y0}' = \frac{I_{y0}}{1 - \alpha_N \alpha_1}. \quad (5.4)$$

Величины теплового эмиттерного и коллекторного токов значительно меньше, чем соответствующие тепловые токи диодов.

Подставляя (5.2) в (5.1), получаем:

$$\begin{aligned} J_{\dot{y}} &= I_{y0}' (\exp(\beta U_{\dot{y}}) - 1) - \alpha_1 I_{e0}' (\exp(\beta U_{\dot{e}}) - 1), \\ J_{\dot{e}} &= \alpha_N I_{y0}' (\exp(\beta U_{\dot{y}}) - 1) - I_{e0}' (\exp(\beta U_{\dot{e}}) - 1), \\ J_{\dot{a}} &= (1 - \alpha_N) I_{y0}' (\exp(\beta U_{\dot{y}}) - 1) + (1 - \alpha_1) I_{e0}' (\exp(\beta U_{\dot{e}}) - 1), \end{aligned} \quad (5.5)$$

где $J_{\dot{a}}$ – ток базы, равный разности токов эмиттера $I_{\dot{y}}$ и коллектора I_k .

Формулы (5.5) получили название формул Молла – Эберса и полезны для анализа статических характеристик биполярного транзистора при любых сочетаниях знаков токов и напряжений.

При измерении теплового тока коллектора $I_{к0}$ дырки как неосновные носители уходят из базы в коллектор: $J_k = J_0$ ($J_n = 0$). При этом поток дырок из базы в эмиттер не уравновешен и их переходит из эмиттера в базу больше, чем в равновесных условиях. Это вызовет накопление избыточного положительного заряда в базе и увеличение потенциального барьера на переходе эмиттер – база, что, в конце концов, скомпенсирует дырочные токи.

Таким образом, необходимо отметить, что при изменении теплового тока коллектора эмиттер будет заряжаться отрицательно по отношению к базе

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Из каких областей состоит биполярный транзистор и каково назначение каждой из них?
2. Какова физическая причина усилительного эффекта транзистора?
3. Чем отличаются активный, насыщенный и отсечённый режимы работы?
4. Как связаны токи эмиттера, коллектора и базы?
5. Что показывает коэффициент β и от чего он зависит?
6. Нарисуйте и объясните выходные характеристики транзистора.
7. Какие существуют схемы включения транзистора и в чём их различия?
8. Как влияет температура на параметры биполярного транзистора?

Список литературных источников:

1. Трифонов Е. Н. Электронные процессы в твёрдых телах. — М.: Наука, 2015.
2. Соколов В. И. Физика и технология полупроводников. — М.: МИФИ, 2018.
3. Streetman, B. G., Banerjee, S. Solid State Electronic Devices. — Prentice Hall, 2016.
4. Pierret, R. F. Semiconductor Device Fundamentals. — Addison-Wesley, 1996.
5. Millman, J., Halkias, C. Electronic Devices and Circuits. — McGraw-Hill, 2010.
6. Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Wiley, 2007.
7. Sedra, A., Smith, K. Microelectronic Circuits. — Oxford University Press, 2015.