

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

В.А. Шалимов, А.М. Заболоцкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

Руководство к лабораторной работе

Томск 2023

Шалимов В.А., Заболоцкий А.М. Исследование вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов: руководство к лабораторной работе. Учебно-методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2023. – 11 с.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол 3 от 15.02.2023

© Шалимов В.А., Заболоцкий А.М., 2023

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Общее положение.....	4
2. Описание лабораторного макета.....	7
3. Порядок выполнения работы.....	9
Список литературы.....	11

## Введение

Цель работы – исследование статических вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером, оценка статических параметров транзисторов.

### 1. Общие положения

#### 1.1 Разновидности транзисторов

В настоящее время транзисторы и созданные на их основе линейные и цифровые интегральные схемы получили самое широкое распространение и стали основой современной радиоэлектроники. Отечественная промышленность выпускает биполярные транзисторы  $n-p-n$  и  $p-n-p$  типов, представляющие собой трехэлектродные двухпереходные полупроводниковые приборы, которые могут работать в трех схемах включения: общая база (ОБ), общий эмиттер (ОЭ), общий коллектор (ОК), причем в каждой из схем включения в трех режимах работы.

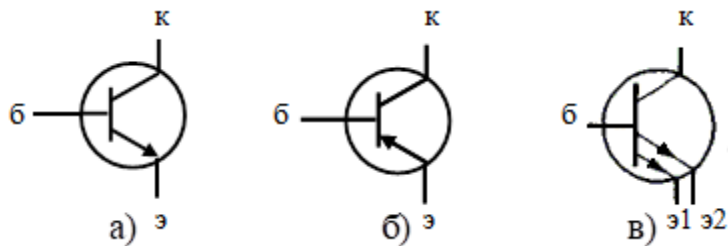


Рис. 1.1 Обозначения биполярных транзисторов:  $n-p-n$  (а) и  $p-n-p$  (б) типов, многоэмиттерный (в)

#### 1.2 Статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов в схеме с ОБ

Статические вольтамперные характеристики идеализированных биполярных транзисторов в схеме с общей базой описываются формулами Эберса – Молла

$$I_{\text{Э}} = I'_{\text{Э0}} \left( e^{U_{\text{ЭБ}}/\varphi_T} - 1 \right) - \alpha_1 I'_{\text{К0}} \left( e^{U_{\text{КБ}}/\varphi_T} - 1 \right), \quad (1.1)$$

$$I_{\text{К}} = \alpha_N I'_{\text{Э0}} \left( e^{U_{\text{ЭБ}}/\varphi_T} - 1 \right) - I'_{\text{К0}} \left( e^{U_{\text{КБ}}/\varphi_T} - 1 \right), \quad (1.2)$$

$$I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{К}}$$

где  $I_{\text{К}}$ ,  $I_{\text{Э}}$  – токи коллектора и эмиттера;  $I'_{\text{Э0}}$ ,  $I'_{\text{К0}}$  – тепловые токи коллекторного и эмиттерного переходов, измеренные при  $U_{\text{ЭБ}} = 0$  и  $U_{\text{КБ}} = 0$  соответственно;  $\alpha_1$  и  $\alpha_N$  – коэффициенты передачи коллекторного и эмиттерного токов.

Так как задать прямое напряжение на эмиттерном  $p-n$  переходе трудно, целесообразно считать заданной величиной эмиттерный ток, а не эмиттерное напряжение.

Решив уравнение (2.2) относительно  $I_{\text{К}}$ , получим для схемы ОБ:

$$I_K = \alpha_N I_{\mathcal{E}} - I_{K0} (e^{U_{KB}/\varphi_T} - 1), \quad (1.3)$$

полагая, что  $\alpha_N I_{\mathcal{E}0} = \alpha_I I_{K0}$  и  $\alpha_N \approx \alpha_I$

Это уравнение описывает выходные характеристики транзистора  $I_K = f(U_{KB})$  с параметром  $I_{\mathcal{E}}$  (рис. 1.2, а).

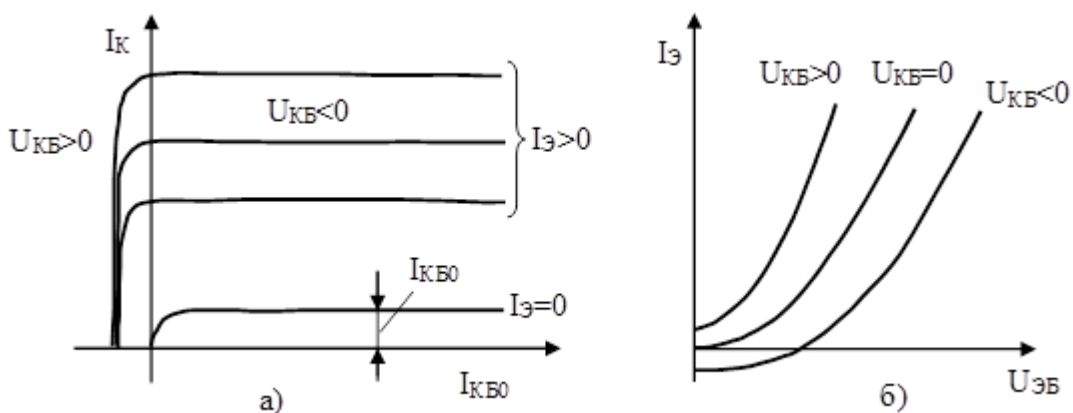


Рис. 1.2 – Статические характеристики идеализированного транзистора, включенного по схеме с ОБ: а – выходные; б – входные

Уравнение (1.4), решенное относительно  $U_{\mathcal{E}B}$ , дает выражение, характеризующее идеализированные входные характеристики транзистора  $U_{\mathcal{E}B} = f(I_{\mathcal{E}})$ :

$$U_{\mathcal{E}B} = \varphi_T \ln \left[ I_{\mathcal{E}} / I'_{\mathcal{E}0} + 1 + \alpha_N (e^{U_{KB}/\varphi_T} - 1) \right], \quad (1.5)$$

Входные характеристики транзистора показаны на рис. 1.2б.

На (рис. 1.2, а) ясно видны две области: активного режима ( $U_{KB} > 0$ ) и режима насыщения ( $U_{KB} < 0$ ).

Для активного режима, когда  $(1 - \alpha_N) \approx 0$ ,  $U_{KB} \gg \varphi_T$  и ( $U_{KB} < 0$ ), выражения (1.3) и (1.5) можно упростить и записать в виде:

$$I_K = \alpha I_{\mathcal{E}} + I_{K0}, \quad (1.6)$$

$$U_{\mathcal{E}B} \approx \varphi_T \ln(I_{\mathcal{E}} / I'_{\mathcal{E}0}), \quad (1.7)$$

### 1.3 Реальные статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов в схеме с ОБ

В формулах Молла – Эберса не учитывается целый ряд факторов, таких, как эффект Эрли (модуляция толщины базы при изменении коллекторного напряжения), пробой перехода, зависимость  $\alpha$  от тока и др. Реальные коллекторные характеристики показаны на рис. 1.3. Кривые коллекторного семейства имеют конечный, хотя и очень небольшой, наклон, который в области, близкой к пробую, резко увеличивается. Расстояние между кривыми немного уменьшается при больших токах из-за уменьшения  $\alpha$ .

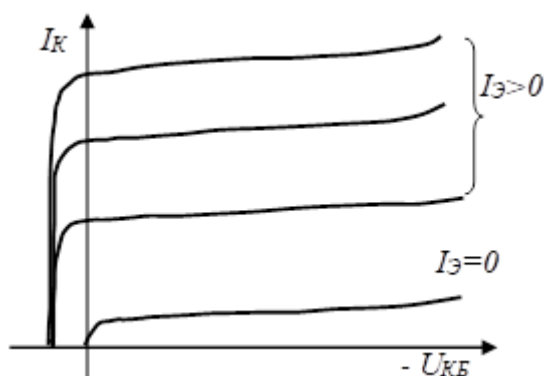


Рис. 1.3 – Реальные вольтамперные характеристики биполярного транзистора в схеме с ОБ

В активном режиме (1-й квадрант), усредняя нелинейное сопротивление  $r_{к}$ , можно характеризовать коллекторное семейство в схеме с ОБ достаточно строгим соотношением:

$$I_K = \alpha I_E + I_{КБ0} + (U_{КБ} / r_{кдиф}), \quad (1.8)$$

где  $r_{кдиф} = \frac{\partial U_{КБ}}{\partial I_K} |_{I_E=const}$  - дифференциальное сопротивление коллекторного  $p-n$ -перехода.

#### 1.4 Статические вольт-амперные характеристики биполярных транзисторов при включении с общим эмиттером

При включении транзисторов с общим эмиттером входным током является ток базы, который и принят за параметр семейства выходных характеристик рис. 1.4.

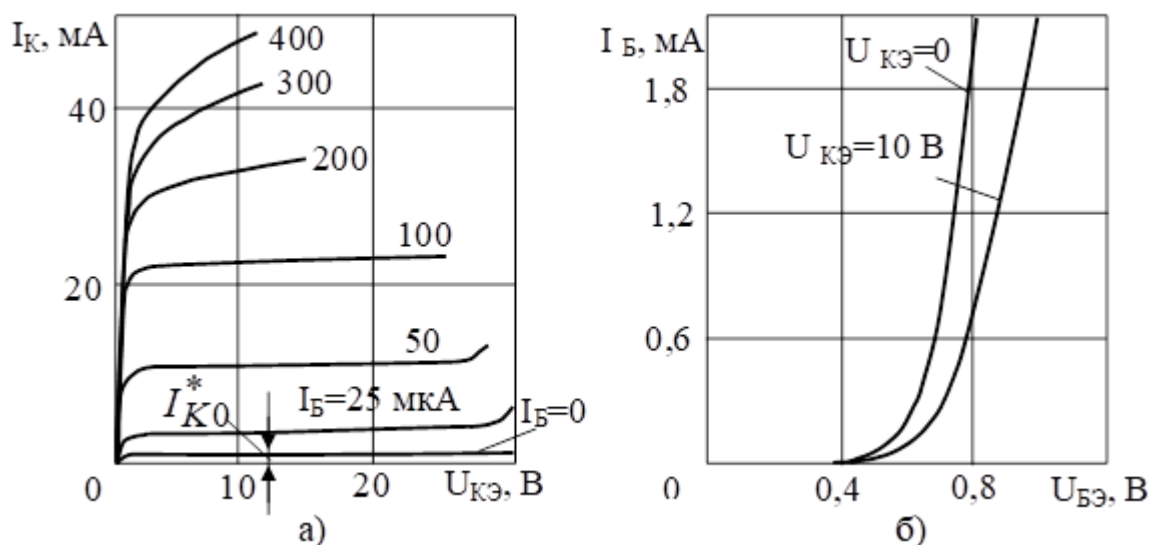


Рис. 1.4 – Выходные (а) и входные (б) характеристики транзистора для схемы с ОЭ

$$I_K = \beta I_B + I_{К0}^* + U_{КЭ} / r_{кдиф}^*, \quad (1.9)$$

где  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ ;  $I_{К0}^* = I_{КБ0} (1 + \beta)$ ;  $r_{кдиф}^* = r_{кдиф} / (1 + \beta)$ ;  $I_{К0}^*$  - обратный ток коллекторного перехода при  $I_B = 0$ .

Семейства входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ, приведены на рис. 1.4.

Следует обратить внимание на то, что в схеме с ОЭ влияние тока  $I_{КБ0}$  и сопротивления  $r_{к\text{ диф}}$  на коллекторный ток увеличивается в  $1+\beta$  раз по сравнению со схемой с ОБ.

Коллекторный ток  $I_K = I_{КБ0}$  получается, если  $I_B = -I_{КБ0}$ . Следовательно, в диапазоне от  $I_B = 0$  до  $I_B = -I_{КБ0}$  транзистор управляется «отрицательным» входным током.

## 2. Описание лабораторного макета

Для исследования статических вольт-амперных характеристик биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером используется схема, изображенная в правой части лабораторного макета рис. 2.1. С помощью переключателя П5б выбирается исследуемый транзистор. С помощью переключателя П3, меняя сопротивление резистора  $R_B$  (грубо), и переменного резистора  $R_{Б\text{ под}}$  (плавно) можно установить ток базы  $I_B$  при работе с биполярными транзисторами. Измерение тока базы производится стрелочным миллиамперметром, включаемым в базовую цепь переключателем П7. Чувствительность прибора устанавливается переключателем Пб.

При работе с полевым транзистором с помощью переключателей П3 и П8 (грубо) и переменного резистора  $R_{Б\text{ под}}$  (плавно) можно установить управляющее напряжение на затворе транзистора.

Изменять величину коллекторного напряжения можно переключателем П4, меняя величину резистора ( $R_{К1} \div R_{К10}$ ) в цепи коллектора. Напряжение на коллекторе транзистора измеряется осциллографом, а ток, протекающий через транзистор, измеряется стрелочным миллиамперметром, включаемым в коллекторную цепь переключателем П7.

Перечень биполярных транзисторов, исследуемых при проведении лабораторной работы, приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Наименование	T1	T2
Тип	МП16	МП104

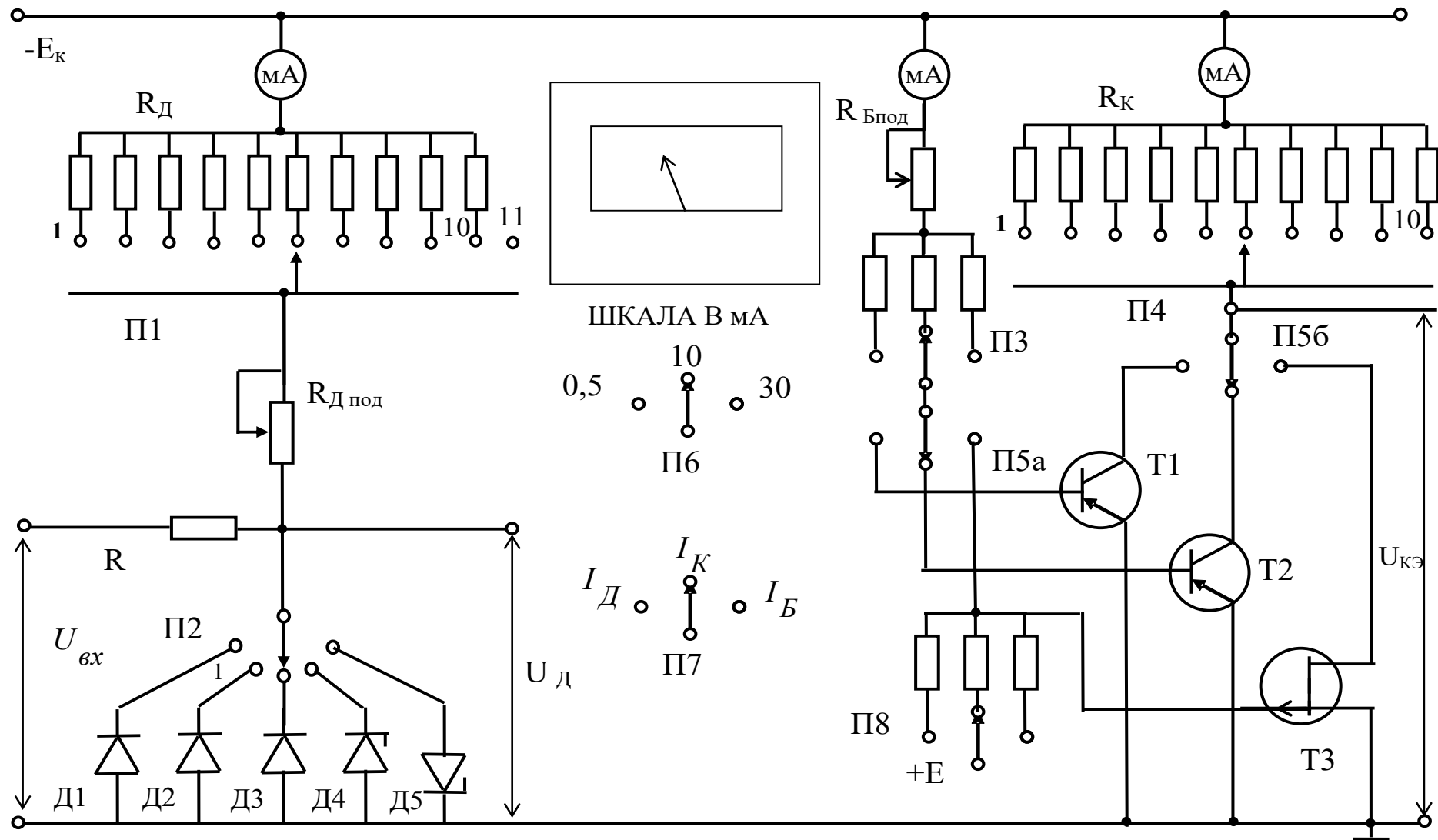


Рис. 2.1 – Лицевая панель макета для исследования диодов и транзисторов



### 3. Порядок выполнения работы

Для исследования выходных вольтамперных характеристик транзисторов в схеме с общим эмиттером необходимо:

- 1) Включить источник питания макета;
- 2) Переключатель П5б установить в положение 1, подключив транзистор Т1;
- 3) Переключатель П7 установить в положение ток базы  $I_b$ ;
- 4) Переключатель П6 установить в положение 0,5 мА;
- 5) С помощью переключателя П3 (грубо) и переменного резистора  $R_{b\text{ под}}$  (плавно) установить ток базы  $I_B$  равным 50 мкА;
- 6) Переключатель П6 установить в положение 10 мА, переключатель П7 в положение ток коллектора  $I_K$ ;
- 7) Вход осциллографа присоединить к коллектору исследуемого транзистора для измерения постоянного напряжения на коллекторе  $U_{KЭ}$ ;
- 8) Изменяя переключателем П4 резисторы  $R_{K1} \div R_{K10}$  и тем самым величину коллекторного напряжения, снять зависимость  $I_K = f(U_{KЭ})$  при токе базы  $I_b$  равном 50 мкА. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Положение переключателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Примечание
$I_K$ , мА											$I_b=50$ мкА
$U_{KЭ}$ , В											
$I_K$ , мА											$I_b=100$ мкА
$U_{KЭ}$ , В											
$I_K$ , мА											$I_b=150$ мкА
$U_{KЭ}$ , В											

9) Снять зависимости  $I_K = f(U_{KЭ})$  при токе базы  $I_B$  равном 100 и 150 мкА. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

10) Переключатель П5б установить в положение 2, подключив транзистор Т2 и повторить пункты 3 – 9 для транзистора Т2. Результаты измерений занесите в таблицу 2, аналогичную таблице 1.

11) Выключить источник питания макета.

12) Построить выходные вольт-амперные характеристики транзисторов Т1 и Т2.  $I_K = f(U_{KЭ})$ , при  $I_B = const$ .

13) По построенным графикам для одного из транзисторов определить дифференциальную и интегральную величины коэффициента усиления тока базы  $\beta$  при напряжении  $U_{КЭ} = 5$  В.

14) Построить зависимость дифференциального сопротивления коллекторного  $p$ - $n$ -перехода  $r_{\kappa}^* = f(U_{КЭ})$  при токе базы транзистора Т1  $I_B = 100$  мкА, где дифференциальное сопротивление  $r_{\kappa}^* = \frac{\partial U_{КЭ}}{\partial I_{\kappa}}$  при  $I_B = const$ .

15) Оформить отчет и сделать выводы по работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
2. Электроника. Часть 1: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 209 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7278> (дата доступа:08.05.2023)
3. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
4. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
5. Электроника. Часть 2: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 120 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7279> (дата доступа:08.05.2023)
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.- 488 с.
7. Учебное пособие «Микроэлектроника» : Для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н.С. - 2013. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4280> (дата доступа:08.05.2023)
8. Гусев В.Г. Электроника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. (73): Библиотека ТУСУР.