ФГБОУ ВО «АГУ»	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Адыгейский государственный университет»
	Рабочая программа дисциплины (модуля)
	СМК. ОП-2/РК-7.3.3

«УТВЕРЖДАЮ»

Декан инженерно-физического факультета

_____/**Аракелов А.В.**

«28» августа 2018 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Б1.Б.12 Физика полупроводников

направление подготовки: 27.03.04 "Управление в технических системах"

направленность (профиль): Управление и информатика в технических системах

Факультет: Инженерно – физический

Кафедра: теоретической физики

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры теоретической физики
протокол № 13 от «28» августа 2018 г.

Заведующий кафедрой: д.ф.- м.н., доцент Тлячев В.Б.

Составитель (разработчик) программы: д.ф.-м.н., доцент Тлячев В.Б.

РПД адаптирована для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Содержание

1 Пояснительная записка 3

2 Цели и задачи дисциплины (модуля) 3

3 Объем дисциплины (модуля) по видам учебной работы 4

4 Содержание дисциплины (модуля) 4

5 Самостоятельная работа обучающихся 12

6 Учебно-методическое обеспечение дисциплины (модуля) 26

7 Методические рекомендации по дисциплине (модулю) 27

8 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля) 29

9 Обеспечение образовательного процесса для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов 30

10 Лист регистрации изменений 32

1 Пояснительная записка

Рабочая программа дисциплины составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) 27.03.04 Управление в технических системах.

РП представляет собой совокупность дидактических материалов, направленных на реализацию содержательных, методических и организационных условий обучающихся.

Дисциплина относится базовой части Блока 1.

Трудоемкость дисциплины: _6_ з.е./_216_ ч.;

контактная работа:

занятия лекционного типа – _36_ ч.,

занятия семинарского типа (практические занятия) – 36 ч.,

контроль самостоятельной работы – _4_ ч.,

иная контактная работа – _0,3_ ч.,

контролируемая письменная работа – ___ ч.,

самостоятельная работа (СР) – 113 ч.,

контроль – 26,7 ч.

Ключевые слова: полупроводники, зонная теория, запрещенная зона, уровень Ферми, подвижность носителей, полупроводниковые приборы, интегральные схемы.

Форма контроля: экзамен

Составитель: д.ф.-м.н., профессор, Тлячев В.Б

2 Цели и задачи дисциплины (модуля)

Изучение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

ОПК-1 – способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики.

ОПК-2 – способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат.

Показателями компетенций являются:

Знания:

- Современной физической теории строения твердого тела.
- Явлений происходящих в полупроводниковых материалах и приборах на их основе.
- Принципов работы полупроводниковых приборов, их основных параметров и внутренней структуры.

Умения:

- Объяснять поведение носителей зарядов в твердом теле на основе зонных диаграмм.

Навыки:

- Расчета микроскопических параметров полупроводниковых материалов на основе их макроскопических параметров.

3 Объем дисциплины (модуля) по видам учебной работы

Таблица 1. Объем дисциплины по видам учебной работы
(общая трудоемкость в зачетных единицах: 6)

Виды учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах
		V
Общая трудоемкость дисциплины	216	216
Контактная работа:		
Аудиторные занятия	72	72
занятия лекционного типа	36	36
занятия семинарского типа (семинары)	36	36
контроль самостоятельной работы	4	4
иная контактная работа	0,3	0,3
контролируемая письменная работа		
контроль	26,7	26,7
Самостоятельная работа (СР)	113	113
Курсовая работа (проект)		
Вид промежуточного контроля (зачет, экзамен, диф. зачет)		**экзамен**

4 Содержание дисциплины (модуля)

Таблица 2. Распределение часов по темам и видам учебной работы

Номер раздела	Наименование разделов и тем дисциплины (модуля)	Объем в часах					
		Всего	Л	ПЗ	КПР	Контроль	СР и ИКР
1	**Введение в зонную теорию**	**45**	**6**	**6**		**8**	**25**
1.1	Квантово-механическое описание строения атома	14	2	2		2	8
1.2	Зонная теория строения твердого тела	15	2	2		3	8
1.3	Металлы, диэлектрики и полупроводники с точки зрения зонной теории. Примесные полупроводники. Полуметаллы.	16	2	2		3	9
2	**Явления в полупроводниках**	**80.6**	**14**	**14**		**9,3**	**43.3**
2.1	Электропроводность полупро-	12	2	2		1	7

	водников. Дырки. Подвижность носителей. Функция распределения Ферми.						
2.2	Теплопроводность полупроводников. Фононы.	12	2	2		2	6
2.3	Контактные явления. Работа выхода. Контактная разность потенциалов.	11,3	2	2		1,3	6
2.4	Выпрямление на контакте двух металлов, металла и полупроводника и двух полупроводников. p-n переход.	11	2	2		1	6
2.5	Термоэлектрические явления (эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона).	12	2	2		2	6
2.6	Гальваномагнитные и термомагнитные явления.	11	2	2		1	6
2.7	Фотопроводимость	11.3	2	2		1	6.3
3	**Полупроводниковые приборы**	**86,4**	**16**	**16**		**9,4**	**45**
3.1	Полупроводниковые диоды. Выпрямительные диоды. Диоды Шоттки.	12	2	2		1	7
3.2	Явления пробоя. Стабилитроны. Туннельные и обращенные диоды. Быстродействие диодов.	12	2	2		1	7
3.3	Биполярные транзисторы. ВАХ и параметры.	12	2	2		1	7
3.4	Режимы работы биполярных транзисторов. Быстродействие. Транзисторы Шоттки.	12	2	2		1	7
3.5	Полевые транзисторы. Типы, ВАХ и параметры.	12,4	2	2		1,4	7
3.6	Быстродействие полевых транзисторов. Мощные полевые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором.	13	2	2		2	7
3.7	Многослойные структуры. Тиристоры, тринисторы и симисторы.	12	2	2		1	7
3.8	Другие типы полупроводниковых приборов (диоды Ганна,	11	2	2		1	6

	лавинно-пролетные диоды, фотодиоды, светодиоды и др.)						
Итого		**216**	**36**	**36**		**26,7**	**113.3**

Семинарское-занятие -1

Задачи и решения

Задание 1. Покажите, что зеленый свет ($\lambda = 5 \times 10^{-7}$ м) может возбуждать электроны, которые могут пройти через запрещенную зону кремния (Si).

Решение. Пользуясь формулой де Бройля, найдем что

$$\lambda_{крит} = \frac{hc}{E_g} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{1.1 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.13 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Таким образом, критическое значение длины волны для кремния составляет $1{,}13 \times 10^{-6}$ м. По условию задачи излучение с $\lambda = 5 \times 10^{-7}$ м $= 0{,}5 \times 10^{-6}$ м имеет даже большую энергию, чем та, которая необходима для прохождения электронов через запрещенную зону.

Задание 2. (a) Кристалл германия (Ge) освещается электромагнитным излучением частотой $3{,}091 \times 10^{14}$ Гц. Вычислите фотоэмиссию на длине волны, генерируемую этим взаимодействием. Германий - это простой полупроводник с шириной запрещенной зоны E_g , равной 0,7 эВ.

(b) Изобразите спектр поглощения германия, то есть график зависимости поглощенной энергии в % в зависимости от длины волны λ.

Решение. (a) Сначала сравним энергию падающего фотона $E_{фотона}$ с энергией запрещенной зоны Eg:

$$E_{фотона} = h\nu = 6{,}6 \times 10^{-34} \times 3{,}09 \times 10^{14} = 2{,}04 \times 10^{-19} \text{ Дж}$$

По условию Eg = 0,7 эВ = $1{,}12 \times 10^{-19}$ Дж , что меньше, чем $E_{фотона}$. Поэтому движение электронов сопровождается испусканием нового фотона с энергией равной Eg, и частью энергии, превышающая Eg, которая рассеивается в кристалле в виде тепла (см. рис. 1).

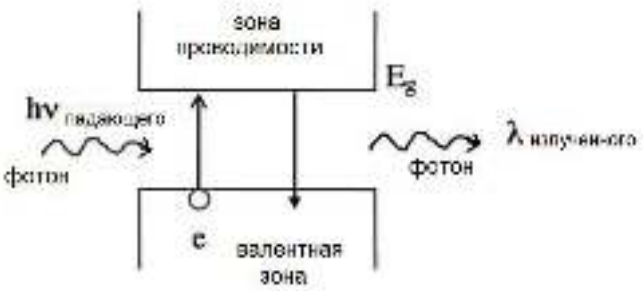


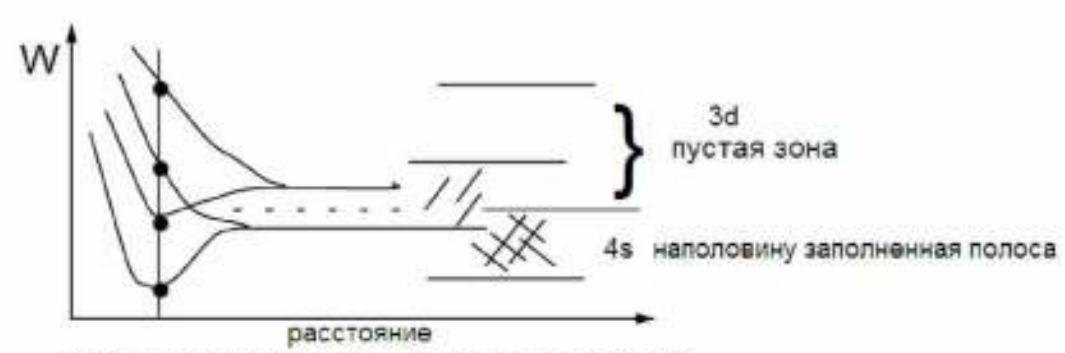
Рис. 1.

$$\lambda_{излучен.} = \frac{hc}{E_g} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^{8}}{0.7 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.77 \times 10^{-6} \text{ м}$$

Задание 3. На основе зонной теории объясните хорошую электропроводность калия (K) и бериллия (Be).

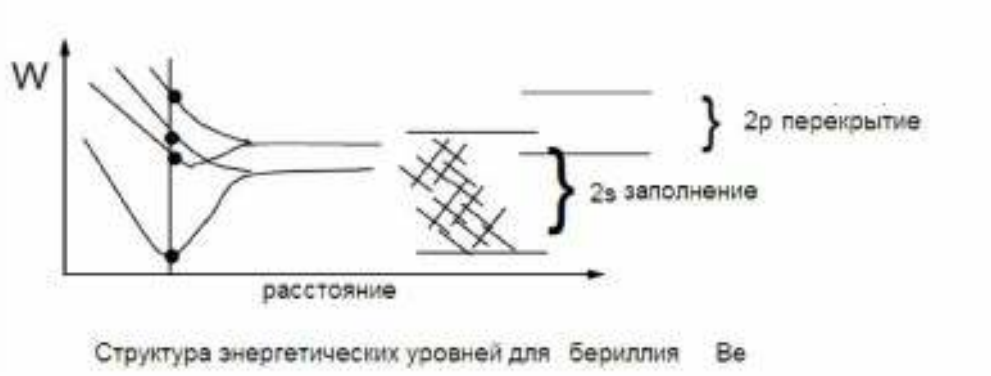
Решение.

В калии (K) каждый атом вносит один электрон и одну орбиталь в зону проводимости (4s-зону). Согласно принципу запрета Паули, каждая “молекулярная орбиталь” может вместить два электрона. Поэтому зона проводимости лишь наполовину заполнена электронами, что обеспечивает электрическую проводимость.



Структура энергетических уровней для калия (K)

У бериллия (Be) каждый атом, находящийся в узле кристаллической решетки вносит два электрона и одну орбиталь в зону проводимости (2s-зону). При наличии двух электронов на орбиталь (от каждого атома) 2s зона проводимости заполняется. Наблюдаемая электропроводность обусловлена перекрытием полосы 2p, которая является пустой и, таким образом, обеспечивает пустые энергетические состояния, необходимые для электронной проводимости.



Задание 4.

В проходящем белом свете чистый кристаллический материал (без примесей или с очень малым количеством примесей) выглядит красным.

a) Объясните, является ли этот материал проводником, полупроводником или изолятором?

(b) Какова приблизительная ширина запрещенной зоны для этого материала в эВ?

Решение.

a) По шкале электромагнитных волн “белый свет” содержит излучение в диапазоне длин волн от 4000 Å (фиолетовый) до 7000 Å (темно-красный). Кристаллический материал, кажущийся красным при пропускании, имеет следующие характеристики поглощения:

а) если кристаллический материал чистый (без примесей), то его следует классифицировать как полупроводник, поскольку он обладает конечной «запрещенной зоной». Поэтому для активации носителей заряда требуются кванты света (фотоны) с энергиями, превышающими энергию излучения фотонов красного цвета.

(б) Принимая длину волны красного цвета λ = 6500 Å как пограничную в качестве края оптического поглощения для этого материала, можно найти энергию фотонов красного цвета:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = 3.05 \times 10^{-29}\ \text{Дж} \times \frac{1\ \text{eV}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{Дж}} = 1.9\ \text{эВ}$$

Таким образом, ширина запрещенной зоны для данного кристаллического материала составляет **E=1.9 эВ.**

Задание 5.

Неизвестный материал прозрачен для света с частотой (ν) вплоть до 1,3 х 10^{14} Гц. Нарисуйте (изобразите) схематично зонную структуру полосы для этого материала.

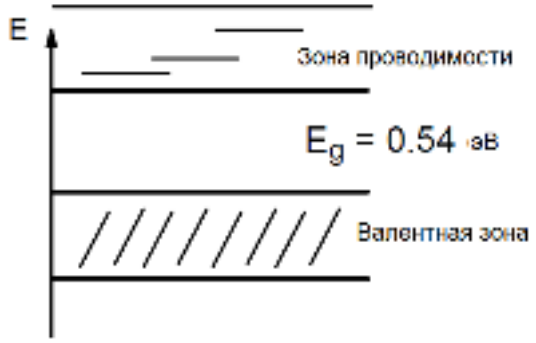
Решение.

По формуле Планка $E = h\nu$ находим энергию фотонов с частотой 1,3 х 10^{14} Гц**:**

$$E = h\nu = (6.63 \times 10^{-34}\ \text{Дж}\cdot\text{с}) \times (1.3 \times 10^{14}\ \text{с}^{-1}) \times \frac{1\ \text{эВ}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{Дж}} = 0.54\ \text{эВ}$$

Таким образом получаем, что материал прозрачен для фотонов с энергиями меньше, чем 0.54 эВ.

Полученное значение энергии позволяет схематично построить запрещенную зону и зонную структуру.



Задание 6.

Некоторый кристаллическое вещество демонстрирует, так называемый «оптический край полосы» (переход от поглощения света к пропусканию) при частоте света $\nu = 5x10^{14}$ Гц (c^{-1}).

(a) Нарисуйте (изобразите схематично) диаграмму, которая отражает указанное в условии задания оптическое поведение.

b) Какого цвета, по вашему мнению, должен быть этот материал при дневном свете?

(в) Какова ширина запрещенной зоны (E_g) этого материала?

Решение.

(a) Конкретное значение длины волны света связано с частотой по формуле

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^{8}\ \text{м/с}}{5 \times 10^{14}\ \text{с}^{-1}} = 6 \times 10^{-7}\ \text{м} = 600\ \text{нм}$$

(b) Цвет будет оранжевым или «красноватым».

(в)

$$E_g = E_{фотона} = h\nu = 6.63 \times 10^{-34}\ Дж \cdot с \times 5 \times 10^{14}\ Гц$$

$$= 3.315 \times 10^{-19}\ Дж \times \frac{1\ эВ}{1.6 \times 10^{-19}\ Дж} = 2.07\ эВ$$

Задание 7.

а) определить количество (в граммах) бора (B), которое, будучи замещенным в 1 кг германия (Ge), установит плотность носителей заряда 3,091 x 10^{17} $см^{-3}$.

б) нарисуйте схематично структуру энергетических зон этого материала, а также обозначения всех важных свойств (особенностей).

Решение

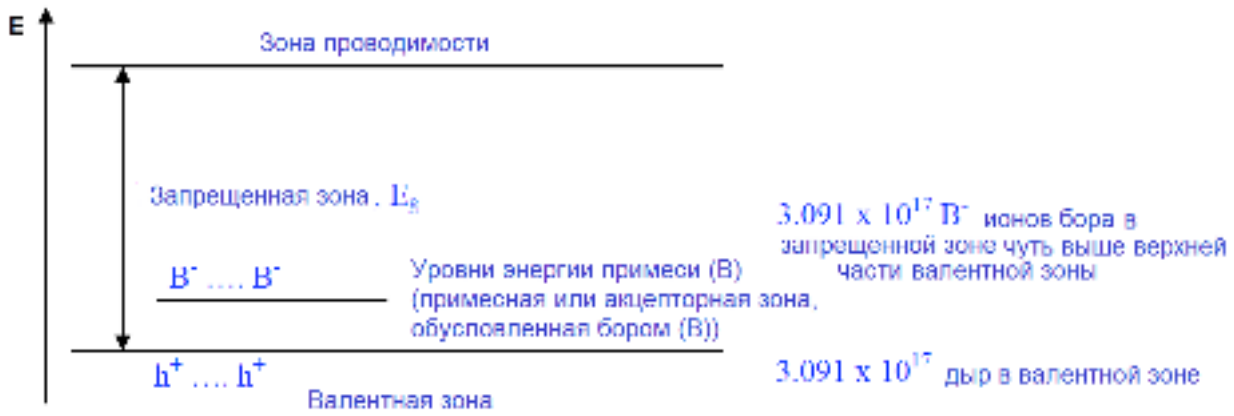
а) Из периодической системы химических элементов Менделеева находим, что для бора (B) молярная масса равна 10,81 а.е.м. или приблизительно M_B=11 г/моль, для германия (Ge) – молярная масса равна M_{Ge}=73 г/моль. С другой стороны, молярный объём германия известен и равен V_{Ge}=13,6 см³/моль. Тогда плотность одного моля германия будет равна M_{Ge}/ V_{Ge}= 5,37 г/cm^3 . Отсюда объем 1 кг=1000 г германия будет равен приблизительно 187,3 cm^3. Добавление бора (B) дает один переносчик носителя заряда (электрон или дырка?) на атом. По условию задачи концентрация бора в германии должна стать равной 3,091 x 10^{17} $см^{-3}$. Зная молярную массу бора M_B, то есть массу одного моля и зная, что в одном моле содержится число Авогадро частиц N_A = 6.02x10^{23}, находим массу частиц бора, по плотности равной плотности носителей заряда 3,091 x 10^{17} $см^{-3}$

$$m_B = \frac{3{,}091 \times 10^{17}}{6{,}02 \times 10^{23}} \times 10{,}81 = 5{,}55 \times 10^{-6}\ г$$

Таким образом, для каждого 1 cm^3 германия (Ge) добавляется 5,55 x10^{-6} г бора (B). Учитывая, что по условию задачи берется 1 кг германия объем которого 187,3 cm^3 , находим, что для этого объёма масса бора будет равна

$$187{,}30 \times 5{,}55 \times 10^{-6} = 1{,}04 \times 10^{-3}\ г$$

б) Примерная схема структуры зон



5 Самостоятельная работа обучающихся

Таблица 3. Содержание самостоятельной работы обучающихся

№ п/п	Вид самостоятельной работы	Разделы или темы рабочей программы	Форма отчетности
1	Внеаудиторная самостоятельная работа	Введение в зонную теорию	Опрос и конспект видеолекции
2	Внеаудиторная самостоятельная работа	Явления в полупроводниках	Коллоквиум
3	Внеаудиторная самостоятельная работа	Полупроводниковые приборы	Защита рефератов

5.1. Типы курсовых работ (проектов)

Не предусмотрено.

5.2. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся

Профессиональные базы данных

Базы данных ИНИОН РАН http://inion.ru/resources/bazy-dannykh-inion-ran/

ЭБС «Университетская библиотека онлайн» www.biblioclub.ru

Ресурс содержит учебники, учебные пособия, монографии, периодические издания, справочники, словари, энциклопедии. В настоящее время включает более 130 тыс. наименований. Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

ЭБС АГУ на платформе аппаратно-программного комплекса ООО КДУ **http://adygnet.bibliotech.ru**

Ресурс содержит электронные аналоги трудов преподавателей АГУ. Обеспечивает доступ к необходимым для образовательного процесса изданиям. Режим доступа: для зарегистрированных пользователей.

ООО «Научная электронная библиотека» (НЭБ) www.elibrary.ru

Российский информационно-аналитический портал в области науки, технологии и образования, в том числе электронные версии более 3900 российских научно-технических журналов, из которых более 2800 журналов в открытом доступе.

Международные базы данных научных изданий

Web of Science https://apps.webofknowledge.com Наукометрическая реферативная база данных журналов и конференций. Режим доступа: IP адреса университета

Scopus https://www.scopus.com/search/ – это наукометрическая реферативная база данных, входящая в базу данных SciVerse компании Elsevier. SciVerse объединяет в себе материалы из

коллекции рецензированной литературы SciVerse Scopus, собрания полнотекстовых статей SciVerse ScienceDirect. Режим доступа: IP адреса университета.

zbMATH https://zbmath.org/ Реферативная база данных по чистой и прикладной математике.

Интернет-ресурсы открытого доступа (Open Access)

(Информационно-поисковые (справочные) системы)

Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» http://window.edu.ru/ Ресурс обеспечивает свободный доступ к интегральному каталогу образовательных интернет-ресурсов, к электронной библиотеке учебно-методических материалов для общего и профессионального образования и к ресурсам системы федеральных образовательных порталов, объединяет в единое информационное пространство электронные ресурсы свободного доступа для всех уровней образования в России.

Университетская информационная система Россия uisrussia.msu.ru

Открытые образовательные курсы

Курсы Основы физики полупроводников и электроники на русском языке:
https://openedu.ru/course/mephi/mephi_bmos
https://www.edx.org/course/osnovy-fiziki-poluprovodnikov-i-elektroniki

Курс Основы физики полупроводников и электроники на английском языке:
https://www.coursera.org/learn/semiconductor-physics#syllabus
Первая НЕДЕЛЯ
Quantum Theory Of Semiconductors
In this module we will introduce the course and the Semiconductor Devices specialization. In addition, we will review the following topics: Type of solids, Bravais lattices, Lattice with basis, Point defects, Dislocation, Bulk crystal growth, Epitaxy, Energy levels of atoms and molecules, Energy bands of solids, Energy bands in real space, Energy bands in reciprocal lattice, Energy band structures of metal and insulator, Definition of semiconductor, Electrons and holes, and Effective mass.
8 видео ((всего 76 мин.)), 2 материалов для самостоятельного изучения, 2 тестов

Вторая НЕДЕЛЯ
Carrier Statistics
In this module, we will cover carrier statistics. Topics include: Currents in semiconductors, Density of states, Fermi-Dirac probability function, Equilibrium carrier concentrations, Non-degenerate semiconductors, Intrinsic carrier concentration, Intrinsic Fermi level, Donor and acceptor impurities, Impurity energy levels, Carrier concentration in extrinsic semiconductor, and Fermi level of extrinsic semiconductors.
5 видео ((всего 71 мин.)), 2 материалов для самостоятельного изучения, 2 тестов

Третья НЕДЕЛЯ
Currents in Semiconductor
This module introduces you to currents in semiconductors. Topics we will cover include: Thermal motion of carriers, Carrier motion under electric field, Drift current, Mobility and conductivity, Velocity saturation, Diffusion of carriers, General expression for currents in semiconductor, Carrier concentration and mobility, and the Van der Pauw technique.

4 видео ((всего 50 мин.)), 2 материалов для самостоятельного изучения, 1 тест

Четвертая НЕДЕЛЯ
Carrier Dynamics
In this module we explore carrier dynamics. Topics include: Electronic transitions in semiconductor, Radiative transition, Direct and indirect bandgap semiconductors, Roosbroeck-Shockley relationship, Radiative transition rate at non-equilibrium, Minority carrier lifetime, Localized states, Recombination center and trap, Shockley-Hall-Reed recombination, Surface recombination, Auger recombination, Derivation of continuity equation, Non-equilibrium carrier concentration, Quasi-Fermi level, Current and quasi-Fermi level, Non-uniform doping, and Non-uniform bandgap.
7 видео ((всего 90 мин.)), 2 материалов для самостоятельного изучения, 2 тестов
7 видео
Radiative Transitions (10 мин)
Radiative Transition Rate (13 мин)
Non-Radiative Transitions (111 мин)
Non-Radiative Transitions (215 мин)
Continuity Equation (14 мин)
Quasi-Fermi Level (8 мин)
Heterogeneous Materials (14 мин)
2 материала для самостоятельного изучения
Module Topics 10мин
Materials and Physical Constants 10мин
1 практическое упражнение
Home work

Индивидуальные домашние задания

Домашнее задание № 1.

1. Найти среди рис. 1... 8 вольтамперную характеристику (ВАХ) заданного типа электронного прибора (ЭП).

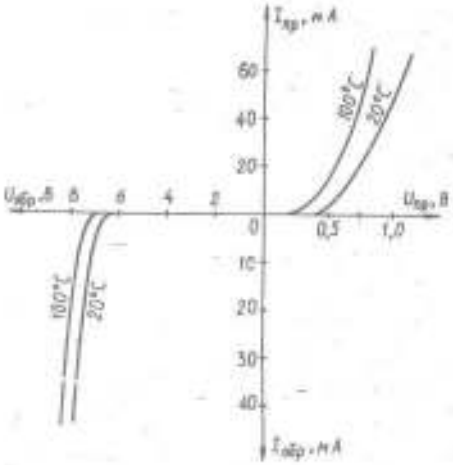


Рис. 1.

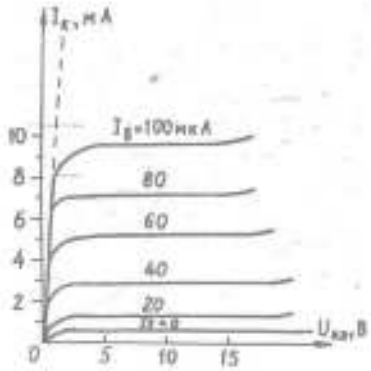


Рис. 2.

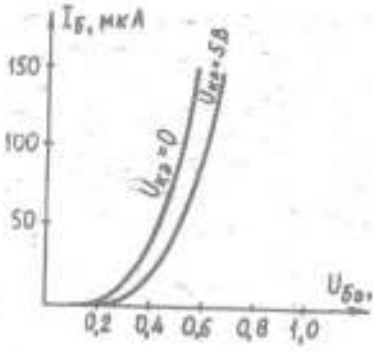


Рис. 3.

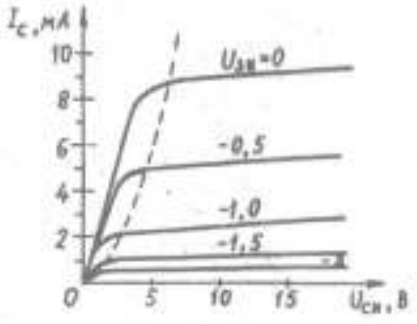


Рис. 4.

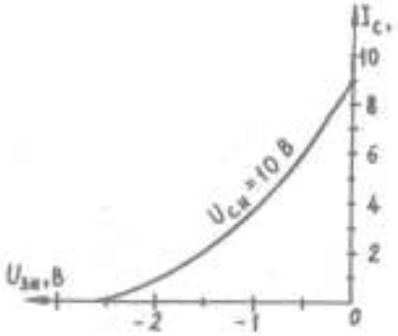


Рис. 5.

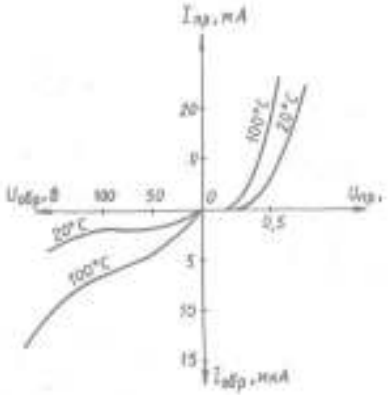


Рис. 6.

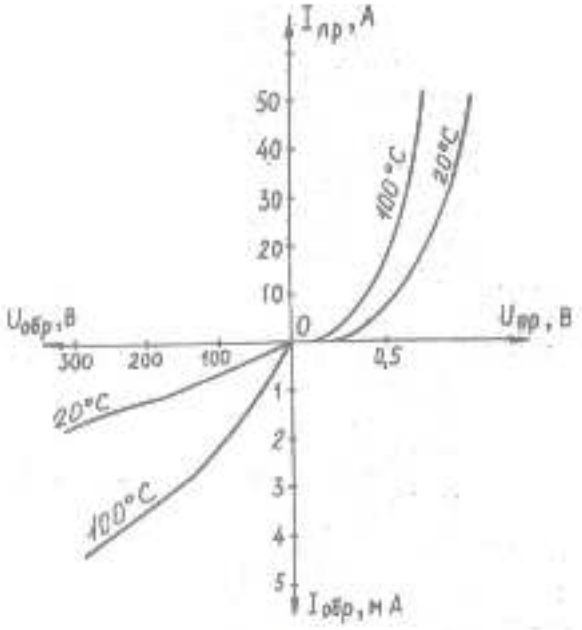


Рис. 7.

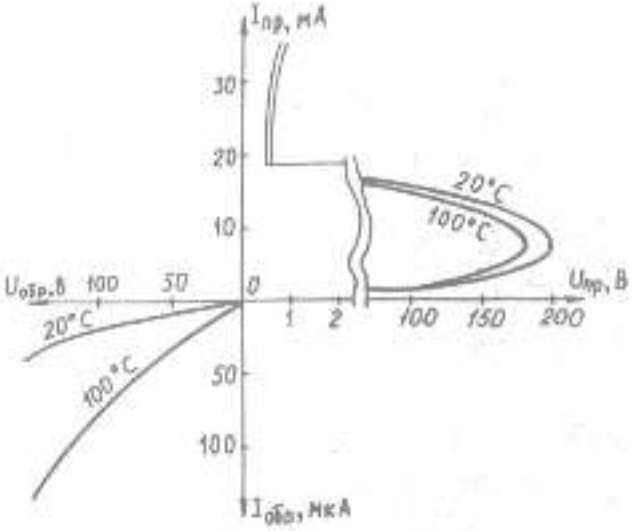


Рис. 8.

2. Определить в обеих заданных точках ВАХ:

а) ток или напряжение на ЭП, если заданы соответственно напряжение или ток;

б) сопротивление ЭП постоянному току - R;

в) дифференциальное сопротивление ЭП -.

Кратко описать типовые применения данного ЭП.

Условия для расчета определяются табл. 1 и табл. 2

Таблица 1

Задание	Последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип электронного прибора	Точечный ДИОД		Мощный выпрямительный диод		Стабилитрон		Динистор			
Окружающая температура	20	100	20	100	20	100	20	100	20	100
Положение на ВАХ расчетных точек	1.Прямая ветвь 2.Обратная ветвь						1. Прямая ветвь, включенное состояние 2.Обратная ветвь		1.Прямая ветвь, включенное состояние 2.Прямая ветвь, включенное состояние	
Заданные электрические величины (см. табл. 2)	Прямое напряжение $U_{пр}$, обратное напряжение $U_{обр}$				Прямое напряжение $U_{пр}$, обратный ток $I_{обр}$		Прям.ток $I_{пр.вкл}$, обр.напр. $U_{обр}$		Прямой ток $I_{пр.вкл}$, прям.напряжение $U_{пр.вкл}$	

Таблица 2

Задание	Последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{пр}$, В	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,4	0,45	0,5	0,55.	0,6
$U_{обр}$, В	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$I_{пр}$, мА	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
$I_{пр.вкл}$, мА	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
$U_{пр.вкл}$, В	100	110	120	130	140	150	160	170	110	120

Домашнее задание №2.

1. Найти среди рис. 1...8 статические характеристики заданного типа транзистора (схема включения - общий эмиттер для биполярного транзистора, общий исток для полевого).

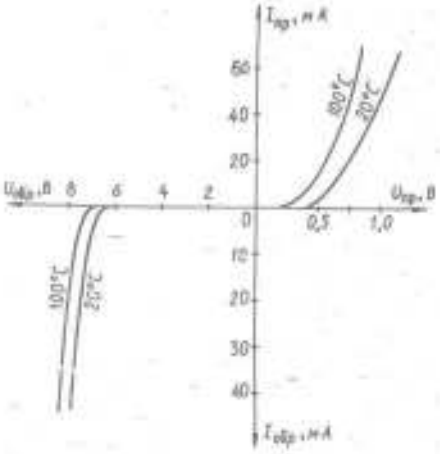


Рис. 1.

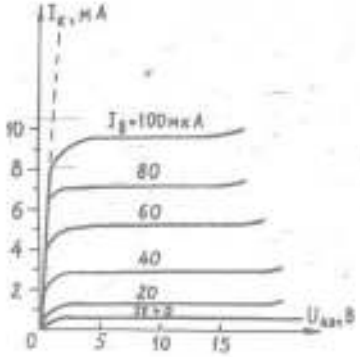


Рис. 2.

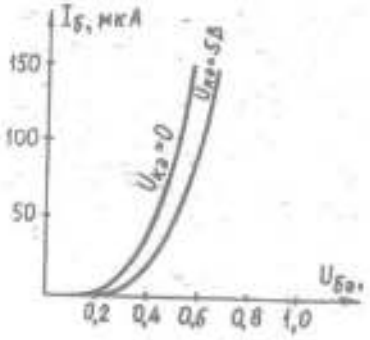


Рис. 3.

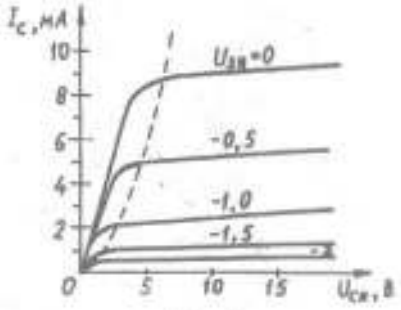


Рис. 4.

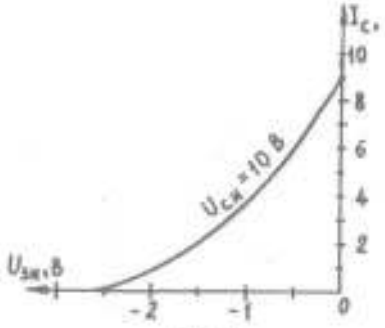


Рис. 5.

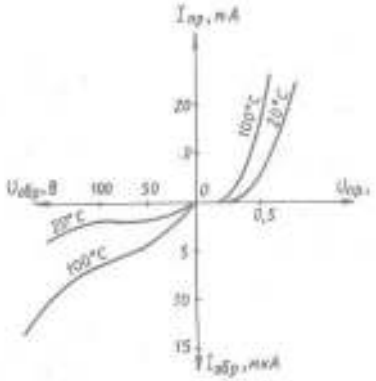


Рис. 6.

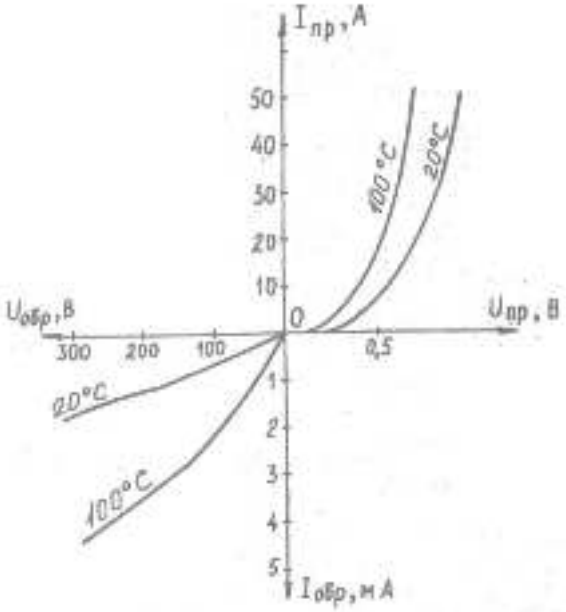


Рис. 7.

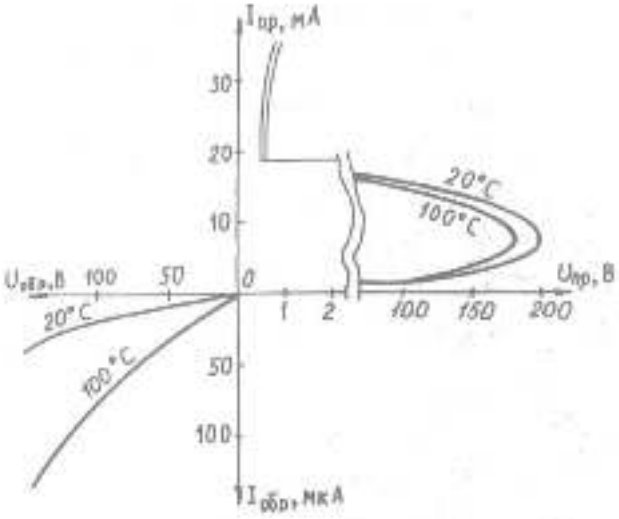


Рис. 8.

2. На выходных характеристиках транзистора построить нагрузочную прямую и при заданном положении рабочей точки определить выходной ток I_0, выходное напряжение U_o и падение напряжения U_R на нагрузочном сопротивлении R.

3. Определить в рабочей точке малосигнальные дифференциальные параметры транзистора. В вариантах с биполярным транзистором рассчитываются , h_{11},h_{21},h_{22},с полевым - S; R_i;.

4. В случае использования транзистора в низкочастотном усилительном каскаде найти его основные малосигнальные параметры в рабочей точке при сопротивлении источника сигнала $R_г$= 10 кОм. В вариантах с биполярным транзистором определяется $R_{вх}$, $R_{вых}$, K_u, с полевым транзистором определяется $R_{вых}$, K_u и характеризуется величина $R_{вх}$.

5. В случае использования транзистора в качестве ключа найти условия получения в нем состояний отсечки и насыщения, выходные напряжение и ток в состоянии отсечки U_{omc}, I_{omc}, выход-

ные напряжение и ток в состоянии насыщения $U_{нас}$, $I_{нас}$ Условия для построений и расчетов определяются данными табл. 3 и табл. 4

Таблица 3

Задание	Предпоследняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип транзистора	биполярный					полевой с управляющим p-n переходом				
Напряжение источника питания E, В	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16
Нагрузочное сопротивление R , кОм	1	1,25	1,5	1,75	2	1	1,25	1,5	1,75	2
Чем определяется рабочая точка (см. табл. 4)	$I_б$					$U_{зи}$				

Таблица 4

Задание	Последняя цифра номера студенческого билета									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток базы $I_б$, мкА	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
Напряжение затвор-исток $U_{зи}$, В	-0,75	-1	-1,25	-1,5	-2	-0,75	-1	-1,25	-1,5	-2

Методические указания к выполнению домашних заданий

Домашнее задание № 1

Для решения задачи I необходимо ознакомиться с основными свойствами и применением двухполюсных полупроводниковых ЭП - разновидностями диодов, стабилитроном, динистором (неуправляемым тиристором).

Необходимая вольт-амперная характеристика (ВАХ) должна быть аккуратно перенесена на кальку или скопирована другим способом. На ВАХ выполняются построения, обозначаются величины токов и напряжений, а также указывается, какой температуре эта ВАХ соответствует. Этапы решения должны быть пояснены.

Пусть ВАХ заданного ЭП при заданной температуре имеет вид рис. 9 (триодный тиристор при постоянном токе управляемого электрода), а остальная часть задания определяется из табл. 1 и 2 по двум последним цифрам номера студенческого билета - 88. В этом случае задано:

$I_{пр.вкл} = 36$ мА

$U_{пр.вкл} = 110$ В

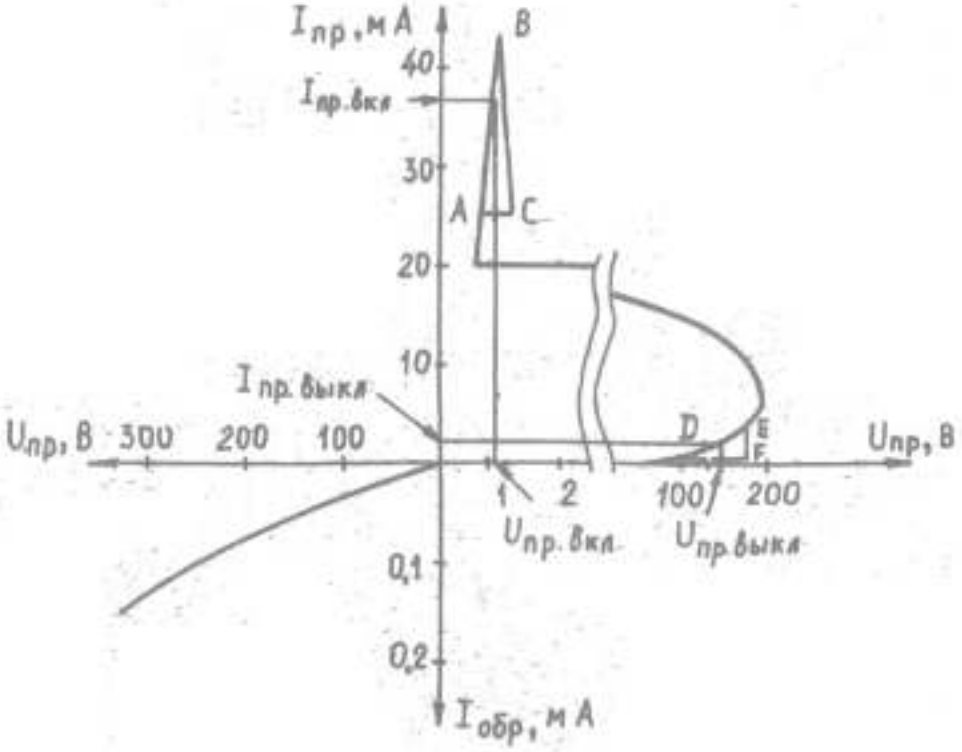


Рис. 9.

Построив эти точки на соответствующих участках прямой ветви ВАХ, найдем:

$$U_{пр.вкл} \approx 1{,}2\ В,$$
$$I_{пр.выкл} \approx 2\ мА.$$

Рассчитаем R_0 во включенном и выключенном состояниях:

$$R_{0\,вкл} = \frac{U_{пр.вкл}}{I_{пр.вкл}} = \frac{1{,}2}{36\cdot 10^{-3}} = 33{,}3\ Ом;$$

$$R_{0\,выкл} = \frac{U_{пр.выкл}}{I_{пр.выкл}} = \frac{110}{2\cdot 10^{-3}} = 55\ кОм.$$

Для расчета дифференциального сопротивления построим около заданных точек прямоугольные треугольники, катеты которых будут равны приращениям напряжения Δ U и тока Δ I

Треугольники должны быть достаточно малыми для того, чтобы их гипотенузы, являющиеся участками ВАХ, можно было считать отрезками прямых линий. Выполнив построения, найдем:

$$R_{д\ пр.вкл} = \frac{\Delta U_{пр.вкл}}{\Delta I_{пр.вкл}} = \frac{AC}{BC} \approx \frac{0{,}4}{20\cdot 10^{-3}} = 20\ Ом;$$

$$R_{д\ пр.выкл} = \frac{\Delta U_{пр.выкл}}{\Delta I_{пр.выкл}} = \frac{DF}{EF} \approx \frac{72}{2\cdot 10^{-3}} = 36\ кОм.$$

В качестве указания на типовые применения тиристора можно назвать выпрямление переменного тока и коммутацию в электрических цепях. Выпрямление возможно благодаря его вентильным свойствам, видным из приведенного расчета. Коммутация возможна благодаря тому, что тиристор при прямом напряжении может находиться как во включенном, так и в выключенном состояниях, при которых его сопротивления также значительно отличаются.

Следует иметь в виду, что в обозначениях токов и напряжении тиристора индексы "вкл", "выкл" в литературе обычно используются в ином значении. Например, $U_{вкл}$ обозначает то прямое напряжение, при котором происходит отпирание тиристора.

Домашнее задание №2.

Для решения задачи № 2 необходимо изучить принцип работы и способы описания электрических, свойств биполярного и полевого транзисторов, ознакомиться с принципами использования биполярных и полевых транзисторов в усилительных каскадах и в качестве ключей.

Указания п.п, 1, 2, 3 задания

Пусть необходимые статические характеристики имеют вид рис. 10 и рис. II (МДП-транзистор с индуцированным каналом р-типа).

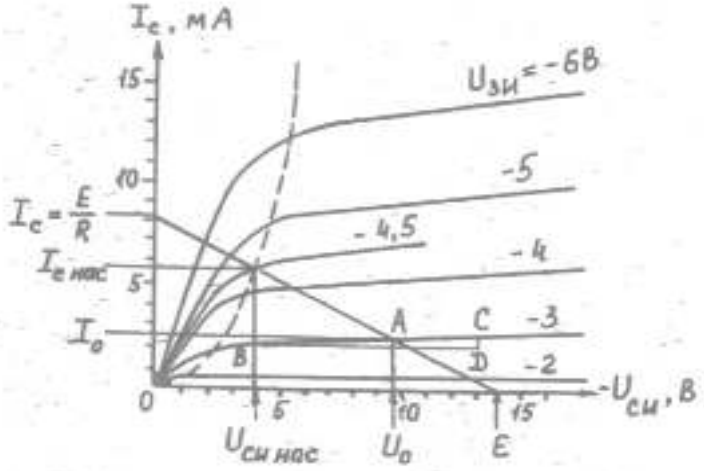


Рис. 10.

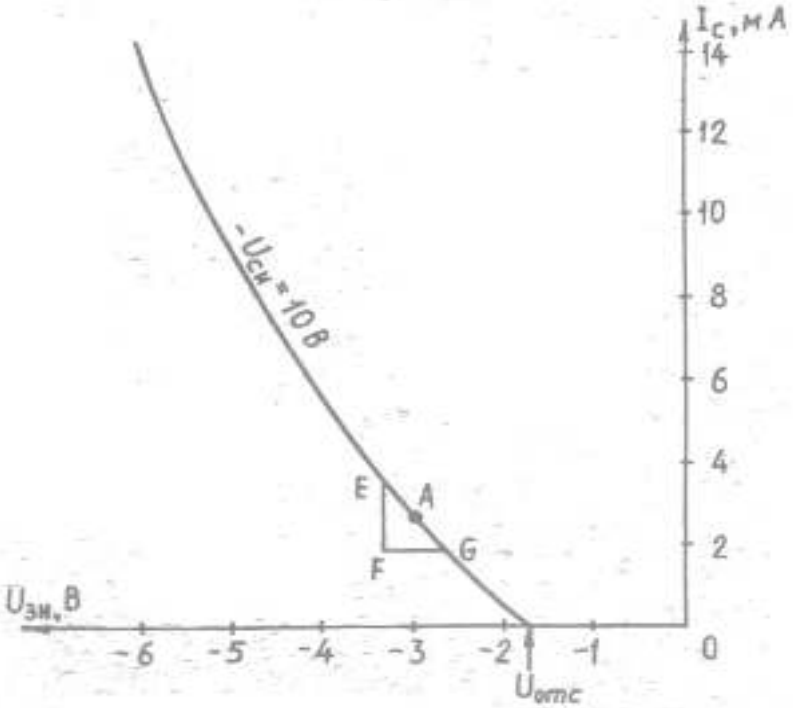


Рис. 11.

На рис. 10 на примере варианта № 88 построены нагрузочная прямая и рабочая точка А, что позволяет графически найти требуемые в п. 2 величины:

$$R_i = \frac{\Delta U_{CИ}}{\Delta I_C}\Bigg|_{U_{ЗИ}=-3\,В} = \frac{BD}{CD} \cong \frac{9}{0{,}8\cdot 10^{-3}} = 11{,}25 \text{ кОм}.$$

Построив в рабочей точке на выходных характеристиках треугольник B C D , можно определить внутреннее сопротивление:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}}\Bigg|_{U_{СИ}=10\,В} = \frac{EF}{FG} \cong \frac{1{,}7\cdot 10^{-3}}{0{,}8} = 2{,}1 \text{ мСм}.$$

Необходимо понимать, что использование имеющейся -стокозатворной (а в случае биполярного транзистора - входной) характеристики вполне допустимо, даже если указанное на ней напряжение $U_{СИ}$ ($U_{КЭ}$) отличается от необходимой величины (U_0).

Возникающая при этом погрешность очень невелика из-за слабого влияния выходного напряжения на величину выходного тока в усилитель ном режиме.

Поскольку дифференциальные параметры полевого транзистора взаимно связаны, коэффициент усиления может быть рассчитан, исходя из величин R_i и S:

$$\mu = R_i \cdot S = 11{,}25\cdot 10^3 \cdot 2{,}1\cdot 10^{-3} = 23{,}6.$$

<u>Указания к п.п. 4.5 задания</u>

Вполне достаточную в большинстве случаев точность дают следующие приближенные выражения.

Для биполярного транзистора

$$R_{вх} = h_{11}, \quad R_{вых} = \frac{R}{1+h_{22}\cdot R}, \quad K_U = \frac{h_{21}}{R_г + h_{11}} R,$$

для полевого транзистора:

$$R_{вых} = \frac{R}{1+\frac{R}{R_i}}, \quad K_U = \frac{1}{1+\frac{R_г}{R_{вх}}}\cdot S\cdot R.$$

В состоянии отсечки транзисторный ключ с биполярным транзистором находится при $I_б$=0. В этом случае:

$$U_{кэ\ отс} = E - I_{ко} \cdot R \cong E,$$
$$I_{к\ отс} = I_{ко},$$

где $I_{ко}$ – тепловой ток коллекторного перехода.

Ключ с полевым транзистором с р-п переходом находится в состоянии отсечки, если

$$|U_{зи}| > |U_{отс}|.$$

При этом

$$U_{си\ отс} = E,$$
$$I_{с\ отс} = 0.$$

Состояние насыщения в биполярном ключе достигается, при увеличении базового тока до величины $I_{б\ нас}$, а в ключе на полевом транзисторе с р-п переходом - при уменьшении абсолютной величины напряжения на затворе до напряжения $U_{зи\ нас}$. В обоих случаях рабочая точка смещается по нагрузочной прямой до линии, разделяющей области активного режима и область включенного состояния ключа (пунктирная линия на выходных характеристиках).

В рассмотренном выше примере полевого МДП транзистора (рис. 10) искомые параметры составляют величины:

$$U_{си\ отс} = E = 14\ В,$$
$$I_{с\ отс} = 0,$$
$$U_{зи\ отс} = U_{отс} = -1{,}6\ В,$$
$$U_{си\ нас} = 3{,}7\ В,$$
$$I_{с\ нас} = 5{,}8\ мА,$$
$$U_{зи\ нас} = -4{,}5\ В.$$

Недостающая выходная характеристика, в данном случае при Uзи = 4,5 В, может быть построена исходя из того, что близлежащие выходные характеристики практически параллельны, а расстояния между ними пропорциональны, выходному току.

Вопросы для самоконтроля по теме «Диоды и тиристоры»

1. Чем отличаются полупроводниковые диоды на основе р-п переходов и на основе переходов металл-полупроводник?

2. Как зависят вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов на основе кремния от температуры окружающей среды?

3. Полупроводниковые стабилитроны. Вольтамперные характеристики стабилитронов.

4. Выпрямители на основе полупроводниковых диодов. Преимущества выпрямителей, построенных на основе диодов с переходами металл-полупроводник.

5. Триодные тиристоры. Устройство и вольтамперные характеристики.

6. Управляемые полупроводниковые выпрямители на основе тиристоров.

Задачи

1. Параметрический стабилизатор напряжения выполнен на полупроводниковом стабилитроне с напряжением лавинного пробоя, равном 6В. Определить какая величина напряжения будет поддерживаться на выходе стабилизатора напряжения.

2. Определить по статическим вольтамперным характеристикам во сколько раз уменьшается величина падения напряжения на полупроводниковом диоде при использовании в выпрямителях кремниевых диодов с переходом металл-полупроводник, вместо диодов с «р-п»-переходами.

Вопросы для самоконтроля по теме «Транзисторы»

0. Что называется транзистором? Какова классификация транзисторов?

1. Каковы принцип работы и устройство биполярного транзистора?

2. Как определить входное сопротивление биполярного транзистора по входным статическим вольтамперным характеристикам?

3. Чем объясняется низкий уровень собственных шумов канальных транзисторов?

4. Как зависит ток стока МДП - транзистора от напряжения затвор-исток?

5. Чем объясняется малая мощность, потребляемая КМПД - транзистором от источника питания?

6. Чем объясняется большая величина входного сопротивления канальных транзисторов?

7. Каковы применения биполярных транзисторов.

8. Какие схемы включения биполярных транзисторов используются в усилителях сигналов?

9. Поясните принцип действия и назначение фильтра нижних частот. Какие типы фильтров нижних частот вы знаете?

10. Как зависит от частоты амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя?

11. Каким методом можно расширить динамический диапазон амплитудной характеристики усилителя?

6 Учебно-методическое обеспечение дисциплины (модуля)

Таблица 4. Основная литература

№ п/п	Наименование, библиографическое описание
1	Филиппов, В.В. Физика полупроводниковых приборов: практикум / В.В. Филиппов, С.В. Мицук. – Липецк : Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, 2016. – 125 с. : ил., табл., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=576863
2	Филяк, М. М. Основные физические процессы в проводниках, полупроводниках и диэлектриках: учебное пособие / М. М. Филяк. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 134 с. **ЭБС:** Режим доступа: http://pda.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438992&sr=1
3	Лебедев, А. И. Физика полупроводниковых приборов / А. И. Лебедев. – М.: Физматлит, 2008. – 488 с. **ЭБС:** Режим доступа: http://pda.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68403&sr=1
4	Игумнов, В. Н. Физические основы микроэлектроники [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Н. Игумнов. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2014. – 358 с. **ЭБС:** Режим доступа: http://pda.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=271708&sr=1

Таблица 5. Дополнительная литература

№ п/п	Наименование, библиографическое описание
1	Стильбанс, Л. С. Физика полупроводников / Л. С. Стильбанс. – М. : Сов. радио, 1967. – 452 с.
2	Шкловский, Б. И. Электронные свойства легированных полупроводников [Электронный ресурс] / Б. И. Шкловский, А. Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с. **ЭБС:** Режим доступа: http://pda.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483402&sr=1
3	Рывкин, С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках / С. М. Рывкин. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 496 с. **ЭБС:** Режим доступа: http://pda.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=483399&sr=1
4	Чеботарев, С. Н. Полупроводниковые наногетероструктуры с промежуточной подзоной / С. Н. Чеботарев, В. В. Калинчук, Л. С. Лунин. – М.: Физматлит, 2016. – 192 с. **ЭБС:** Режим доступа: http://pda.biblioclub.ru/index.php?page=book&id=485236&sr=1

Таблица 6. Ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

№ п/п	Название (адрес) ресурса
1	https://openedu.ru/course/mephi/mephi_bmos/ Курс Основы физики полупроводников и электроники

2	https://www.coursera.org/learn/semiconductor-physics#reviews Курс Semiconductor Physics
3	www.window.edu.ru Единое окно доступа к образовательным ресурсам
4	http://edu.ru Федеральный портал «Российское образование»

7 Методические рекомендации по дисциплине (модулю)

Преподавателю следует сразу обратить внимание студентов на тот факт, что поведение электронов в твердом теле описывается аппаратом квантовой механики. Поэтому следует подробно описать с точки зрения квантовой механики основные положения зонной теории, и объяснить, как можно объяснять происходящие в кристаллах явления с помощью зонных диаграмм.

Методические рекомендации преподавателю

При подготовке лекционного материала преподаватель обязан руководствоваться рабочей программой для данного направления подготовки. При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем, всякий лекционный курс является в определенной мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

1. Проведение занятий с аудиторией обучающихся является публичным видом деятельности, определяющим ряд специфических требований к преподавателю:

- Преподаватель должен иметь опрятный внешний вид;
- Преподаватель обязан владеть культурой речи;
- Поведение преподавателя при любых ситуациях должно быть корректным и достойным.

2. Внимательно ознакомиться с методическими рекомендациями, приведенными в учебной литературе по изучаемому материалу.
3. Тема лекции должна быть ясно и четко сформулирована.
4. Перед началом подробного изложения материала целесообразно кратко обозначить, о чем пойдет речь в целом.
5. План (конспект) лекции должен быть заранее тщательно продуман (проработан) с тем, чтобы изложение материала было системным и строгим.
6. Изложение должно вестись ясным и четким языком, фразы и предложения не должны быть перегружены причастными, деепричастными и другими оборотами, затрудняющими восприятие смысла.
7. Определения и формулировки должны соответствовать современным представлениям о предмете и не должны противоречить представленным определениям в рекомендуемой учебной литературе.
8. Изложение материала должно сопровождаться обратной связью со слушателями. Особо важные места следует выделить или повторить. Некоторые вопросы сопровождать задиктовыванием материала.

9. Рисунки, выполненные от руки мелом или маркером на доске, должны быть ясными и хорошо видимыми с дальних рядов аудитории.
10. По возможности следует сопровождать изложение фундаментального материала примерами, имеющими прикладное значение.
11. Стараться избегать неоднозначной трактовки рассматриваемых величин: следить за тем, чтобы разные по смыслу величины обозначались по-разному.
12. При использовании технических средств обучения (видеопроекторов, средств мультимедиа и т.п.) давать возможность обучающимся делать необходимые записи и рисунки в конспектах или предусматривать возможность предоставления материала в электронном или другом виде.
13. Акцентировать внимание обучающегося на том, какие величины являются векторными, а какие – скалярными.
14. В конце лекции кратко подвести итоги и выводы.

Методическая модель преподавания дисциплины основана на применении активных методов обучения. Принципами организации учебного процесса являются:

- выбор методов преподавания в зависимости от различных факторов, влияющих на организацию учебного процесса;
- объединение нескольких методов в единый преподавательский модуль в целях повышения эффективности процесса обучения;
- активное участие слушателей в учебном процессе;
- проведение практических занятий, определяющих приобретение навыков решения проблемы;
- приведение примеров применения изучаемого теоретического материала к реальным практическим ситуациям.

По учебному плану предусмотрено проведение лекционных и практических занятий. Лекции читаются с использованием наглядных пособий и электронных презентаций, с применением проблемного метода, стимулирующего познавательную активность. В начале каждого практического занятия преподаватель организует повторение изученного на лекции материала по контрольным вопросам к данному практическому занятию, вспоминает со обучающимися понятийный аппарат, основные формулы и законы по теме практического занятия. При возникновении затруднений у обучающихся при решении задач преподаватель подробно разбирает каждый шаг решения с обязательным вовлечением обучающихся из группы в процесс обсуждения алгоритма решения задачи.

В условиях преобладающего теоретического обучения обязательным условием для формирования умений и навыков является усвоение теоретического материала, поэтому вопросы контроля должны проверять тот теоретический материал, содержание которого представлено в конспекте лекции и указанной литературе. Перечень рассматриваемых вопросов по теме преподаватель формирует во время чтения лекции.

По уровню сложности предусматриваются самые различные вопросы, предполагающие воспроизведение и закрепление теоретического материала, проверку его осмысления, вопросы на обобщение, анализ и синтез и др. Обязательно предусматриваются контрольные вопросы на проверку усвоения определений ключевых понятий, знание фактов, теорий, концепций, то есть всего того, что определяет основное содержание темы.

Вопросы и задания для контроля должны позволить обучающимся самостоятельно определить уровень усвоения учебного материала по теме, представленного в лекции, на практическом занятии и указанной учебной литературе.

Вопросы для самоконтроля могут быть заменены многоуровневыми заданиями.

Цель оценочных средств - определить уровень усвоения теоретического материала:

1 уровень – репродуктивный, предполагающий лишь воспроизведение материала и выполнение заданий по образцу;

2 уровень – репродуктивно-практический, предполагающий осмысление знаний и их использования на практике;

3 уровень – творческий, дающий возможность использовать знания не только в стандартных ситуациях и известных видах деятельности, но и в новых, ранее незнакомых.

Методические указания обучающимся по дисциплине

Профессиональная подготовка в современных вузах строится по принципу «от теории к практике», что создает базу для формирования умений и навыков на основе усвоения теоретического материала. Именно поэтому следует особое внимание уделять качеству усвоения теоретического материала.

Материал каждой лекции должен быть проработан: должны быть выделены определения, понятия, законы, теоремы и их доказательства. Должна быть усвоена логическая связь элементов изученного материала. Полезно делать опорный конспект каждой лекции.

При параллельной работе с учебной литературой необходимо конспектировать прорабатываемый материал с обязательным указанием источника информации (автор, название учебника, номер страницы). Все непонятные моменты следует обязательно разобрать с преподавателем на занятии или в рамках КСР.

8 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебная аудитория, оборудованная комплектом мультимедийного оборудования с доступом в сеть Интернет, необходимой мебелью и доской.

Лекции сопровождаются презентациями, представляемыми через медиапроектор и интерактивную доску или телевизор с выходом в сеть Интернет.

Программное обеспечение ПК ауд. 323б, 329 и ноутбука для презентаций:

Лицензионное программное обеспечение

– операционная система Microsoft Windows Professional 7 Russian Upgrade Academic OPEN. Microsoft Open License No 48824880;

– офисный пакет программ Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN. Microsoft Open License No 45084044;

– свободно-распространяемое программное обеспечение:

OpenOffice Impress.

9 Обеспечение образовательного процесса для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

В ходе реализации дисциплины используются следующие дополнительные методы обучения, текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в зависимости от их индивидуальных особенностей:

- для слепых и слабовидящих:

- лекции оформляются в виде электронного документа, доступного с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением;
- письменные задания выполняются на компьютере со специализированным программным обеспечением, или могут быть заменены устным ответом;
- обеспечивается индивидуальное равномерное освещение не менее 300 люкс;
- для выполнения задания при необходимости предоставляется увеличивающее устройство; возможно также использование собственных увеличивающих устройств;
- письменные задания оформляются увеличенным шрифтом;
- экзамен и зачёт проводятся в устной форме или выполняются в письменной форме на компьютере.

- для глухих и слабослышащих:

- лекции оформляются в виде электронного документа, либо предоставляется звукоусиливающая аппаратура индивидуального пользования;
- письменные задания выполняются на компьютере в письменной форме;
- экзамен и зачёт проводятся в письменной форме на компьютере; возможно проведение в форме тестирования.

- для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- лекции оформляются в виде электронного документа, доступного с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением;
- письменные задания выполняются на компьютере со специализированным программным обеспечением;
- экзамен и зачёт проводятся в устной форме или выполняются в письменной форме на компьютере.

При необходимости предусматривается увеличение времени для подготовки ответа.

Процедура проведения промежуточной аттестации для обучающихся устанавливается с учётом их индивидуальных психофизических особенностей. Промежуточная аттестация может проводиться в несколько этапов.

При проведении процедуры оценивания результатов обучения предусматривается использование технических средств, необходимых в связи с индивидуальными особенностями обучающихся. Эти средства могут быть предоставлены университетом, или могут использоваться собственные технические средства.

Проведение процедуры оценивания результатов обучения допускается с использованием дистанционных образовательных технологий.

Обеспечивается доступ к информационным и библиографическим ресурсам в сети Интернет для каждого обучающегося в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

- для слепых и слабовидящих:

- в печатной форме увеличенным шрифтом;

- в форме электронного документа;
- в форме аудиофайла.

- для глухих и слабослышащих:

- в печатной форме;
- в форме электронного документа.

- для обучающихся с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- в печатной форме;
- в форме электронного документа;
- в форме аудиофайла.

Учебные аудитории для всех видов контактной и самостоятельной работы, научная библиотека и иные помещения для обучения оснащены специальным оборудованием и учебными местами с техническими средствами обучения.

10 Лист регистрации изменений

Номер изменения	Номера листов			Основание для внесения изменения	Подпись	Расшифровка подписи	Дата	Дата введения изменения
	заменных	новых	аннулированных					
1.	9, 12			Приведены в соответствие ФГОС		Тлячев В.Б. Тлячев В.Б.	16.03.21	16.03.21