

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИИ**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН**

**«УТВЕРЖДАЮ»**

**И.О. Директора**

\_\_\_\_\_ **С.А. Никитов**

«    » \_\_\_\_\_ **2014 г.**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

\_\_\_\_\_ **« Электронные свойства твердых тел»**

*(наименование дисциплины)*

**Направление подготовки:**

\_\_\_\_\_ **03.06.01 «Физика и астрономия»**

*(наименование направления подготовки)*

**Направленность подготовки:**

\_\_\_\_\_ **01.04.04 «Физическая электроника»**

*(наименование направленности)*

Квалификация: **Исследователь. Преподаватель-исследователь.**

Форма обучения: **очная**

Москва, 2014 г.

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью курса является формирование у аспирантов базы знаний по физике электронной системы твердых тел и полупроводниковых приборов.

Задачами данного курса являются:

- Формирование у аспирантов знаний по фундаментальным электронным свойствам твердых тел;
- Ознакомление аспирантов с наиболее важными электронными и фотоэлектронными эффектами в твердых телах и полупроводниковых структурах;
- Развитие у аспирантов навыков к выбору адекватных подходов при решении физических задач.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина относится к *обязательным* дисциплинам программы аспирантуры.

Актуальность курса обусловлена большой практической значимостью физических явлений в твердых телах и необходимостью создания различного рода устройств и приборов, основанных на использовании явлений в твердых телах, электронных системах и полупроводниковых структурах

Для эффективного изучения дисциплины требуется использование дополнительной литературы, а также непосредственное участие при подготовке и проведении экспериментов.

## 3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

1. способностью к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
2. способностью проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);
3. готовностью участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
4. готовностью использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-4);
5. способностью планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5);
6. способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);
7. готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

Дисциплина вносит вклад в формирование следующих профессиональных компетенций:

Способность проводить исследования физических явлений, составляющих основу для разработок и создания новых электронных приборов и устройств (ПК-3).

## Карты профессиональных компетенций

КОМПЕТЕНЦИЯ: ПК-3 (01.04.04) Способность проводить исследования физических явлений, составляющих основу для разработок и создания новых электронных приборов и устройств (ПК-3).

(шифр и название)

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЕТЕНЦИИ

*Профессиональная компетенция выпускника программы аспирантуры по направлению подготовки «Физика и астрономия» осваивается в течение всего периода обучения в рамках дисциплин (модулей) вариативной части и педагогической практики независимо от формирования других компетенций, и обеспечивает реализацию обобщенной трудовой функции «Проводить научные исследования и реализовывать проекты»*

### ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ

Для того чтобы формирование данной компетенции было возможно, обучающийся, приступивший к освоению программы аспирантуры должен:

**ЗНАТЬ:** физическую, естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, основные тенденции развития физической электроники.

**УМЕТЬ:** осуществлять отбор материала, характеризующего область физической электроники, с учетом конкретной научной или технической задачи.

**ВЛАДЕТЬ:** навыками работы в научном коллективе; приемами целеполагания, планирования, реализации необходимых видов деятельности, оценки и самооценки результатов деятельности по решению задач физической электроники.

### ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ (ПК-4)

#### И КРИТЕРИИ ИХ ОЦЕНИВАНИЯ

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
ЗНАТЬ: методики анализа современных физико-технических проблем, способы и методы решения экспериментальных и	Не имеет базовых знаний о методиках анализа современных физико-технических проблем физической	Допускает существенные ошибки при раскрытии содержания методик анализа современных физико-технических проблем	Демонстрирует частичные знания содержания методик анализа современных физико-технических проблем физической	Демонстрирует знания сущности методик анализа современных физико-технических проблем физической электроники	Раскрывает полное содержание методик анализа современных физико-технических проблем физической

теоретических задач физической электроники	электроники, способах и методах решения экспериментальных и теоретических задач	физической электроники, способов и методов решения экспериментальных и теоретических задач.	электроники, способов и методов решения экспериментальных и теоретических задач, указывает способы реализации, но не может обосновать возможность их использования в конкретных ситуациях.	методов экспериментальной физики, способов и методов решения экспериментальных и теоретических задач, отдельных особенностей методик и способов их реализации, но не выделяет критерии выбора конкретных методов и способов при решении научных задач.	электроники, способов и методов решения экспериментальных и теоретических задач, всех их особенностей, аргументированно обосновывает критерии выбора методик анализа современных физико-технических проблем физической электроники, способов и методов решения экспериментальных и теоретических задач при решении профессиональных задач.
УМЕТЬ:критически анализировать современные физико-технические проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты, исходя из тенденций развития физической электроники	Не умеет и не готов критически анализировать современные физико-технические проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты, исходя из тенденций развития области	Имея базовые представления о современных физико-технических проблемах физической электроники, и способах их решения, не способен определить границы их применимости в конкретных ситуациях.	При анализе конкретной научной задачи не учитывает тенденции развития физической электроники	Умеет критически анализировать современные физико-технические проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты, но не полностью учитывает тенденции развития физической электроники.	Готов и умеет критически анализировать проблемы физической электроники, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты, исходя из тенденций развития области физической электроники

	профессиональной деятельности.				
ВЛАДЕТЬ: приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению научных задач развития физической электроники	Не владеет приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению задач развития физической электроники	Владеет отдельными приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>стандартных</b> научных задач развития физической электроники, допуская ошибки при выборе приемов и технологий их реализации	Владеет отдельными приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>стандартных</b> задач развития физической электроники, давая не полностью аргументированное обоснование предлагаемого варианта решения.	Владеет приемами и технологиями целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>стандартных</b> профессиональных задач развития физической электроники, полностью аргументируя предлагаемые варианты решения.	Демонстрирует владение системой приемов и технологий целеполагания, целереализации и оценки результатов деятельности по решению <b>нестандартных</b> профессиональных задач развития физической электроники, полностью аргументируя выбор предлагаемого варианта решения

#### ПРОЦЕДУРЫ И ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ У ОБУЧАЮЩИХСЯ

Предусмотрены **следующие виды контроля и аттестации обучающихся** при освоении основных образовательных программ:

- текущий контроль успеваемости;
- промежуточная аттестация по завершению периода обучения (учебного года (курса), семестра);
- итоговая (государственная итоговая) аттестация по завершению основной образовательной программы в целом.

Под **образовательным модулем** понимается структурный элемент образовательной программы, имеющий определённую логическую завершённость по отношению к требуемым результатам освоения образовательной программы в целом (компетенциям). Образовательный модуль имеет «входные требования» в виде набора необходимых для его освоения компетенций (или ВУЗов) и четко сформулированные планируемые результаты обучения, которые в совокупности должны обеспечить обучающемуся освоение одной компетенции или группы компетенций. Если модуль столь велик, что не может быть реализован в течение одного учебного года, его можно разделить на учебные элементы (дисциплины, части дисциплин, междисциплинарные виды учебной деятельности), каждый из которых реализуются в рамках одного семестра или учебного года. Для таких учебных элементов должны быть определены свои результаты обучения (имеющие промежуточный характер по отношению к результатам обучения по модулю в целом), создано соответствующее учебно-методическое обеспечение (согласованное с рабочей программой и учебно-методическим обеспечением модуля в целом). Учебные элементы модуля, которые реализуются в рамках одного учебного года, должны заканчиваться промежуточной аттестацией. По результатам освоения всего модуля должен быть проведен рубежный контроль уровня сформированности запланированной компетенции (компетенций). Модуль может осваиваться параллельно или последовательно с другими структурными элементами образовательной программы, дискретно или непрерывно.

**Текущий контроль успеваемости** обеспечивает оценивание хода освоения дисциплин (модулей) и прохождения практик, он может проводиться в виде оценки участия обучающихся в научных и научно-методических мероприятиях, в т.ч. семинарах, дискуссиях, конференциях, исследовательской и публикационной активности, результативности исследовательской и преподавательской деятельности и т.д.

По ПК-3 проводится в основном в виде оценки подготовленных по промежуточным результатам проведенных исследований материалов для участия в научных семинарах и конференциях, собственно участия в научных семинарах и конференциях, а также в виде оценки публикационной активности и результативности исследовательской деятельности.

**Промежуточная аттестация** имеет целью определить степень достижения запланированных результатов обучения по каждой дисциплине (модулю) и практике за определенный период обучения (семестр) и может проводиться в форме экзаменов, зачетов, защиты промежуточных результатов исследовательской работы, в т.ч. подготовленных в виде публикаций в соответствии с предъявляемыми требованиями и др.

По ПК-3 проводится в форме защиты перед аттестационной комиссией промежуточных результатов исследовательской работы, как правило, за годовой период обучения с предоставлением рабочих материалов и публикаций.

**Итоговая (государственная итоговая) аттестация** имеет целью определить степень сформированности всех компетенций обучающихся (или всех ключевых компетенций, определенных образовательной организацией совместно с работодателями – заказчиками кадров). ГИА проводится в форме государственного экзамена по обязательным дисциплинам учебного плана по направлению подготовки и выбранной научной специальности (профиля).

## **Типы контроля для оценивания результатов обучения.**

Для оценивания результатов обучения в виде **знаний** используются следующие типы контроля:

- тестирование;
- индивидуальное собеседование,
- письменные ответы на вопросы.

Тестовые задания должны охватывать содержание всего пройденного материала. Индивидуальное собеседование, письменная работа проводятся по разработанным вопросам по отдельному учебному элементу программы (дисциплине).

Для оценивания результатов обучения в виде **умений и владений** используются следующие типы контроля:

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающих одну или несколько задач (вопросов) в виде краткой формулировки действий (комплекса действий), которые следует выполнить, или описание результата, который нужно получить.

По сложности ПКЗ разделяются на простые и комплексные задания.

Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия. К ним можно отнести: простые ситуационные задачи с коротким ответом или простым действием; несложные задания по выполнению конкретных действий. Простые задания применяются для оценки умений. Комплексные задания требуют многоходовых решений как в типичной, так и в нестандартной ситуациях. Это задания в открытой

форме, требующие поэтапного решения и развернутого ответа, в т.ч. задания на индивидуальное или коллективное выполнение проектов, на выполнение практических действий или лабораторных работ. Комплексные практические задания применяются для оценки владений.

Типы практических контрольных заданий:

- задания на установление последовательности разработки программы исследования при решении профессиональной задачи в области физической электроники;
- задания на аргументированное обоснование критериев выбора методики исследования при решении профессиональной задачи в области физической электроники;
- задания на разработку плана реализации экспериментальных исследований, учитывающего ресурсные и временные ограничения участников проекта;
- задания на понимание специфики особенностей различных типов представления результатов экспериментальных исследований перед разными аудиториями;
- задания на умение интерпретировать, представлять и применять полученные результаты экспериментальных исследований, исходя из тенденций развития физической электроники.

#### 4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц.  
в том числе 2 ЗЕ аудиторных занятий и 5 ЗЕ самостоятельной работы.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
1	Введение.	Основополагающие понятия физики твердого тела. Уравнение Шредингера. Элементарные возбуждения и квазичастицы. Основные электронные эффекты в твердом теле. Общие сведения о физической электронике и полупроводниковых приборах
2	Систематика электронных состояний в кристаллах.	Адиабатическое приближение решения уравнение Шредингера для твердого тела. Приближение самосогласованного поля для системы взаимодействующих электронов. Метод Хартри-Фока. Волновая функция электронов в периодическом потенциале, теорема Блоха. Квазиимпульс электрона $\vec{p}$ . Прямая и обратная решетки. Зоны Бриллюэна. Ячейка Вигнера-Зейтца. Физически дозволённые значения квазиимпульса электрона. Условие Кармана-Борна. Уравнение для квазиамплитуды функции Блоха (КАФБ). Ортонормированность функции Блоха. Четность функциональной зависимости энергии квазиэлектрона от квазиимпульса. Инвариантность энергии квазиэлектрона и КАФБ относительно сдвига квазиволнового вектора на вектор обратной решетки.
3	Электронная зонная структура.	Дисперсионные зависимости энергии квазиэлектрона $E_n(\vec{p})$ от квазиимпульса $\vec{p}$ . Индекс ветви $n$ . Разрешенная и запрещенная энергетические зоны. Зонный индекс $l$ . Две возможные ситуации для соседних ветвей $E_n(\vec{p})$ и $E_{n+1}(\vec{p})$ в $(E, x)$ пространстве. Возможные ситуации в $(E, \vec{p})$ пространстве. Металлы, полуметаллы, полупроводники, диэлектрики (электронный энергетический спектр). Прямозонные и непрямозонные полупроводники. Физическая интерпретация образования разрешенных и запрещенных энергетических зон. Число состояний электронов в пространстве квазиимпульсов $\vec{p}$ . Плотность состояний в энергетическом пространстве. Квантовомеханически усредненная скорость электрона с заданным значением квазиволнового вектора $\vec{k}$ . Приближение почти свободных электронов. Приближение сильно связанных электронов. Эффективная масса и $(\vec{k} - \hat{p})$ приближение расчета электронного энергетического спектра.
4	Динамика электронов.	Отклик электронов на внешнюю силу. Полные

		квантовомеханически усредненные ток и поток энергии электронов заданной дисперсионной кривой $E_n(\vec{p})$ . Представление о положительно заряженных дырках. Характер зависимостей эффективности межзонного поглощения оптического излучения и межзонного туннелирования от степени непрямоzonности полупроводника.
5	Приближение эффективной массы.	Теорема Ванье. Уравнение Шредингера для электронов в приближении эффективной массы. Электронная структура примесных уровней. Экситоны Ванье-Мотта. Уравнение движения электрона в кристалле.
6	Статистическое распределение электронов и дырок в твердых телах.	Вырожденный и невырожденный электронный газ. Полупроводники и металлы. Собственные и примесные полупроводники. Компенсированные полупроводники. Температурная зависимость концентрации электронов и дырок и уровня Ферми в полупроводниках. Зависимость концентрации электронов и дырок от концентрации глубокой примеси. Функция распределения электронов по энергиям в разрешенных зонах. Вероятности донорному и акцепторному атомов примеси находиться в одном из двух возможных состояний – нейтральном и заряженном.
7	Генерационно-рекомбинационные процессы в полупроводниках.	<i>Генерационные процессы.</i> Межзонное (собственное) поглощение оптического излучения электронной системой в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Примесное поглощение света. Поглощение свободными носителями. Внутризонное поглощение. Коэффициент и длина поглощения света. Фотогенерация носителей тока. Характер зависимости плотности скорости фотогенерации от координаты. Тепловая (термическая) и ударная (Оже) генерации носителей. <i>Рекомбинационные процессы.</i> Межзонная рекомбинация неравновесных носителей: излучательная, фононная и ударная (Оже) рекомбинации. Примесная рекомбинация (Холла-Шокли-Рида). Время жизни неравновесных носителей. Характер зависимости времени жизни неравновесных носителей при рекомбинации Холла-Шокли-Рида от концентрации центров рекомбинации при слабом отклонении от равновесного состояния. Оценка сечений захвата неравновесных носителей на примесные центры.
8	Основы теории переноса носителей тока в металлах и полупроводниках.	Общий вид кинетического уравнения Больцмана в квазиклассическом приближении, условие применимости. Слабо неравновесное решение кинетического уравнения Больцмана в $\tau$ -приближении при изотропном квадратичном законе дисперсии. Электрохимический потенциал. Закон Ома как решение кинетического уравнения Больцмана в $\tau$ -приближении при изотропном квадратичном законе дисперсии. Удельная проводимость и подвижности электронов $\mu_n$ и дырок $\mu_p$ . Ток при неоднородном распределении концентрации

		носителей как решение кинетического уравнения Больцмана. Диффузионный и дрейфовый токи электронов и дырок. Коэффициенты диффузии электронов $D_n$ и дырок $D_p$ . Соотношение Эйнштейна между $n_{0,p}$ и $D_{n,p}$ . Уравнение Пуассона. Уравнения непрерывности полного, электронного и дырочного токов. Вывод уравнений непрерывности электронного и дырочного токов с учетом ударной генерации носителей. Пространственная и временная локальные квазинейтральности. Время Максвелла и длина Дебая. Амбиполярные подвижность и коэффициент диффузии носителей. Амбиполярные дрейфовые и диффузионные длины. Термоэлектрические эффекты и теплопроводность. Эффект Холла. Поперечное и продольное магнитосопротивления. Классически слабые и сильные магнитные поля.
9	Основные эффекты в полупроводниках в сильных электрических полях.	Разогрев электронного газа в электрическом поле. Насыщение дрейфовой скорости. Лавинное размножение носителей и его основные характеристики. Межзонное туннелирование.
10	Контактные явления. Неоднородные электронные системы..	Условия равновесия контактирующих проводников. Электронное сродство, работа выхода и контактная разность потенциалов. Распределение концентрации электронов и электрического поля вблизи контактов металл-полупроводник и полупроводник-полупроводник. Длина экранирования электрического поля. Вольтамперная характеристика p-n перехода и ее физическая интерпретация. Физические механизмы работы основных полупроводниковых фотоприемников (ФП) оптического диапазона – собственных и примесных фоторезисторов, фотодиодов, лавинных фотодиодов. Эффект гигантского всплеска фотопроводимости полупроводников при увеличении концентрации рекомбинационных центров. Основы варизонной инженерии. Принципы работы ФП на основе полупроводниковых сверх-решеток.
11	Диэлектрическая проницаемость твердого тела.	Вычисление линейного отклика по теории возмущений. Пространственная и временная дисперсия. Формула Линдхарда для диэлектрической проницаемости. Предельные случаи: экранирование статического поля, плазменные колебания. Коновская аномалия, фриделевские осцилляции.
12	Сверхпроводимость.	Экранирование межэлектронного взаимодействия электронами и ионами и эффективное притяжение между электронами. Спектр элементарных возбуждений в сверхпроводнике. Незатухающий ток.

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

№ п/п	Вид занятия	Форма проведения занятий	Цель
1	лекция	Изложение теоретического	Получение теоретических

		материала	знаний по дисциплине
2	семинар	Рассмотрение вопросов применения теоретического материала к решению физических задач	Получение практических знаний по дисциплине
3	самостоятельная работа студента	самостоятельное изучение рекомендованной литературы, в том числе научно-периодических изданий, подготовка к экзамену	Повышение степени понимания материала

## 7. РЕСУРСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

### *Основная литература*

- [1] А.И. Ансельм. Введение в теорию полупроводников. М., Наука, 1978; Лань, 2008. 624 с.  
 [2] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников. М., Наука, 1990.  
 [3] *Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. В 2-х томах. Мир, 1979*  
 [4] Ф.Блатт Термоэлектродвижущая сила металлов. М., Мир, 1980.  
 [5] О. Моделунг. Теория твердого тела. М., Наука, 1980.  
 [6] А.С. Давыдов. Теория твердого тела. М., Наука, 1976.  
 [7] Ф. Зейтц. Современная теория твердого тела. М.-Л., Госиздат технико-теоретической литературы, 1949.  
 [8] Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. М., Мир, 1966.  
 [9] *Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 455 с.; Кн. 2, 455 с.*  
 [10] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. Твердотельная фотоэлектроника (физические основы). М.: Физматкнига, 2005. 384 с.  
 [11] Ф.Блатт Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: МИР, 1971

### *Адиабатическое приближение и приближение самосогласованного поля:*

- [11] Дж. Слэтер. Методы самосогласованного поля для молекул и твердых тел. М., Мир, 1978.  
 [12] А.С. Давыдов. Квантовая механика. М., Наука, 1973.  
 [13] Р. Мак-Вини, Б. Сатклиф. Квантовая механика молекул. М., Мир, 1972.  
 [14] В.А. Фок. Начала квантовой механики. М., Наука, 1976.  
 [15] А. Мессиа. Квантовая механика. том 2, М., Наука, 1979.  
 [16] В. И. Смирнов. Курс высшей математики. Том III, часть 1., Изд. 8, М., Физматгиз, 1958

### *Теорема Блоха, квазиимпульс, обратная решетка, зона Бриллюэна, общие характеристики энергетических зон:*

- [17] Дж. Каллуэй. Теория энергетической зонной структуры. М., Мир, 1969.  
 [18] Джонс Г. Теория зон Бриллюэна и электронные состояния в кристаллах. М., Мир, 1968.  
 [19] В. И. Смирнов. Курс высшей математики. Том II, Изд. 18, М., Физматгиз, 1961

### *Лавинное размножение носителей:*

- [20] Техника оптической связи. Фотоприемники. Под ред. У. Тсанга. М.: Мир, 1988.  
 [21] Грехов И.В., Сережкин Ю.Н. Лавинный пробой  $p-n$  в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980.  
 [22] В. А. Холоднов. Коэффициенты размножения носителей в  $p-n$  структурах // ФТП, т. 30, № 6, с. 1051-1063, 1996.  
 [23] *Kholodnov V., Nikitin M.* In book: Photodiodes - From Fundamentals to Applications / Edited by Ilgu Yun. Rijeka, Croatia: InTech, 2012. section 1, chapter 2, p. 27 – 101, 368 p. (www.intechopen.com).  
 [24] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко. *Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды.* М., Физматкнига, 2011. 448 с.  
 [25] *Levinshstein M., Kostamovaara J., Vainshtein S.* Breakdown Phenomena in Semiconductors and Semiconductor Devices. World Scientific Publishing, 2005. Ch. 1. 208 p.

### **Межзонное туннелирование:**

- [26] Туннельные явления в твердых телах. Под ред. Э. Бурштейна и С. Лундквиста. М., Мир, 1973.

### *Рекомбинация неравновесных носителей в полупроводниках:*

- [27] Дж. Блекмор. Статистика электронов и дырок в полупроводниках. М., Мир, 1964.  
 [28] Р. Смит. Полупроводники. М., Мир, 1982.  
 [29] В. А. Холоднов. К теории рекомбинации Холла-Шокли-Рида // ФТП, т. 30, № 6, с. 1011-1025, 1996.

[30] V.A. Kholodnov, M.S. Nikitin, In book: Optoelectronics – Materials and Devices / chapter "The Theory of Giant Splash of Photoresponse in Semiconductors at Low-Level Illumination with Increasing Concentration of Deep Recombination Impurity": InTech, 2015. ([www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)).

#### **Фотоэлектрические явления и приборы**

[31] Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.:Физматгиз,1963. 496 с.

[32] Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. М.: Мир, 1980. 208 с.

[33] А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Тришенков.

*Твердотельная фотоэлектроника.*

[34] В. А. Холоднов, "Физические основы пороговых фотоприемников (чувствительность и быстродействие собственного фоторезистора)", учебное пособие, 23 с., Москва, МИРЭА, 2011.

[35] Холоднов В.А. К теории фотоэлектрического эффекта в поверхностно варизонных полупроводниках. ФТП. 2013. Том 47. № 1. С. 68-74.

#### **Контактные явления. Неоднородные электронные системы.**

[36] Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи, М.: Советское радио, 1971. 246с

[37] Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. М.: Мир, 1975. 432 с.

[38] Ильин В.И., Мусихин С.Ф., Шик А.Я. Варизонные полупроводники и гетероструктуры. Санкт-Петербург: Наука, 2000. 100 с.

[39] Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989.

## **ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ»**

Ссылки на ресурсы приведены в ООП.

### **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Библиотека с читальным залом, книжный фонд которой составляет специализированная методическая и учебная литература, журналы. Залы, оснащенные компьютером с проектором, обычной доской – для проведения семинаров, лекционных и практических занятий.

Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

Курс проводится на базе следующих лабораторий ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН:

лаборатория фотоэлектронных явлений (лаб. 183),

лаборатория теоретических проблем физической электроники (лаб. 185),

лаборатория математических методов радиофизики (лаб. 201).

В процессе освоения знаний используется следующее оборудование:

Система автоматизированного управления интегральным спектрометром

Система регистрации процесса микротравления SMI3050 в компл.

Установка спектрального анализа СВЧ сигналов R&S FSP7 до 7 ГГц

Инфракрасный Фурье спектрометр "VERTEX 80v"

Электронный микроскоп Zeiss 1540 EsB

Профилометр ALPHA-STEP IQ электронный

Высоковакуумная высокопрецизионная универсальная установка для магнетронного напыления многослойных тонкопленочных микроструктур

Установка для анализа спектра SpectraPro 2500i

Комплекс вычислительных средств

### **9. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Обучение по дисциплине ведется с применением как традиционных методов, так и с использованием инновационных подходов: активное участие аспирантов в научных семинарах, представление докладов на научные конференции, подготовка научных статей, подготовка

презентаций по литературе и по теме диссертации, освоение новых средств автоматизации и компьютеризации выполняемых научных исследований.

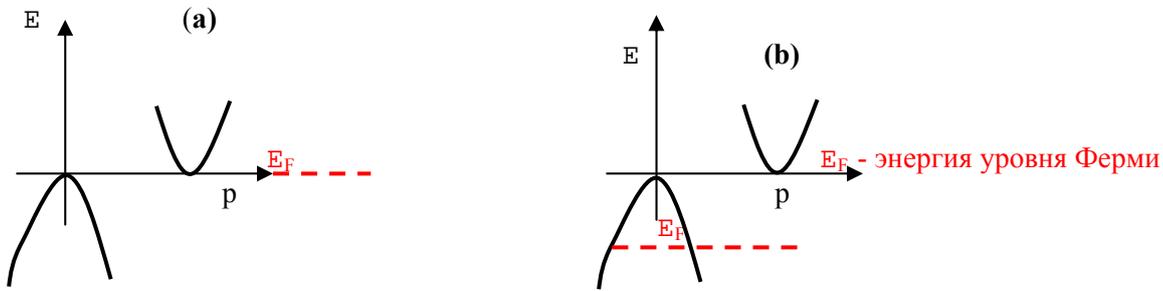
Виды самостоятельной работы: в домашних условиях, в читальном зале библиотеки, на компьютерах с доступом к базам данных и ресурсам Интернет, в лабораториях с доступом к лабораторному оборудованию и приборам.

Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим учебники, учебно-методические пособия, конспекты лекций, учебное и научное программное обеспечение, ресурсы Интернет.

## 10. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ.

### Контрольные вопросы по обязательной и вариативной частям дисциплины для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

1. Для чего мы решаем уравнение Шредингера для твердого тела ?
2. Как по другому можно назвать волновую функцию и энергию электронной системы в твердом теле?
3. Как по другому можно назвать метод Хартри-Фока ? Что он дает хорошего?
4. Какой математический смысл имеет энергия электронов в методе Хартри-Фока ?
5. При каких условиях справедлива теорема Блоха?
6. Что такое **квазиволновой вектор** и **квазиимпульс** электрона? В чем причина введения этих понятий? В чем повод введения этих названий ?
7. Какое энергетическое состояние называется вырожденным?
8. Что побудило ввести понятие обратной решетки и первой зоны Бриллюэна?
9. Как по другому можно назвать ячейку Вигнера-Зейтца (ЯВЗ)?
10. В чем состоит основное достоинство ячейки Вигнера-Зейтца?
11. Почему ЯВЗ можно выбрать как первую зону Бриллюэна?
12. Из какого условия следует квазинепрерывность спектра квазиволнового вектора электронов  $\vec{k}$  и чем обусловлено слово 'квазинепрерывность'?
13. Какой параллелепипед и объем в решетке твердого тела называются основными?
14. Как можно изобразить графически разные состояния квазиэлектрона с одинаковыми значениями квазиимпульса?
15. Может ли выполняться соотношение  $E_n(\vec{p}) = E_{n'}(\vec{p})$  при  $n \neq n'$  и когда?
16. Сколько квазиэлектронов можно разместить **(а)** на заданной дисперсионной кривой  $E_n(\vec{p})$  и **(б)** в заданной разрешенной зоне 1 ( $E_n$  - энергия квазиэлектрона,  $\vec{p}$  - квазиимпульс)?
17. Может ли число квазиэлектронов на заданной дисперсионной кривой  $E_n(\vec{p})$  с заданной энергией  $E_{зад}$  равно четырем и более и почему?
18. Назовите максимально возможное количество квазиэлектронов на заданной дисперсионной кривой  $E_n(\vec{p})$  с заданной энергией  $E_{зад}$ .
19. Назовите максимально возможное количество квазиэлектронов с заданной энергией  $E$ .
20. Какие зазоры (полупроводники) называются **(а)** прямозонными и **(б)** непрямозонными?
21. В каком полупроводнике, **(а)** прямозонном или **(б)** не прямозонном лучше поглощается оптическое излучение и почему?
22. В каком полупроводнике, **(а)** прямозонном или **(б)** не прямозонном больше межзонный туннельный ток и почему?
23. Можно ли по электронному энергетическому спектру в  $(E, x)$  пространстве судить к какому классу веществ (металлы, полуметаллы, полупроводники, диэлектрики) относится данное вещество?
24. В каком случае **((а)** или **(б))** выше электропроводность и почему?



25. Физическая причина образования разрешенных и запрещенных энергетических зон.

26. Поясните образование полностью (a) и частично (b) заполненных разрешенных энергетических зон при  $T=0$  К.

27. Какое из соотношений справедливо при интегрировании по замкнутому объему  $\Omega$

$$(a) - \int_{\Omega} U_{n,\vec{p}}^*(\vec{r}) \cdot U_{n',\vec{p}'}(\vec{r}) \cdot d^3\vec{r} = \delta_{nn'} \quad \text{или} \quad (b) - \int_{\Omega} U_{n,\vec{p}}^*(\vec{r}) \cdot U_{n',\vec{p}'}(\vec{r}) \cdot d^3\vec{r} = \delta_{nn'},$$

где  $U_{n,\vec{p}}(\vec{r})$  - амплитуда функции Блоха,  $\delta_{nn'}$  - символ Кронейкера,  $\vec{p}' \neq \vec{p}$  ?

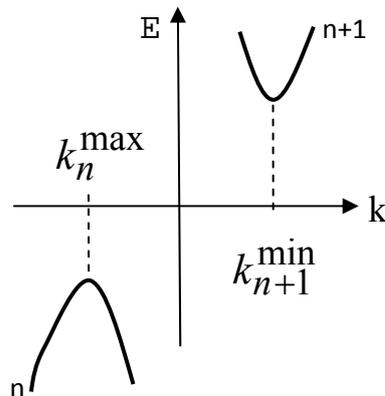
28. Какая теорема используется при доказательстве ортонормированности функции Блоха ?

29. Что за объем используется при доказательстве ортонормированности функции Блоха ?

30. Определить максимальное значение разности  $|\Delta k| = |k_n^{\max} - k_{n+1}^{\min}|$  положений максимума  $k_n^{\max}$

$n$ -ой ветви и минимума  $k_{n+1}^{\min}$   $n+1$ -ой ветви дисперсионных кривых  $E_n(k)$  и  $E_{n+1}(k)$  для видимого и инфракрасного диапазонов электромагнитного излучения, при котором с точки зрения поглощения света полупроводник можно считать прямозонным. Принять, что ширина запрещенной зоны  $E_g$  лежит в интервале  $0,1 \text{ эВ} \leq E_g \leq 2 \text{ эВ}$ .

**Энергетическая диаграмма:**



31. Что такое  $E_n(-i \cdot \nabla)$ , где  $E_n$  - энергия электронов  $n$ -ой ветви?

32. Чему равно воздействие оператора  $E_n(-i \cdot \hbar \cdot \nabla)$  на  $\Psi_{n,\vec{p}}(\vec{r})$ , где  $E_n$  - энергии электронов  $n$ -ой ветви,  $\Psi_{n,\vec{p}}(\vec{r})$  - функция Блоха?

33. При каком условии справедлива теорема Ванье?

34. В методе эффективной массы фигурируют две величины:  $\frac{1}{m_{\alpha\beta}}$  и  $m_{\alpha\beta}$ . Какая из них есть тензор?

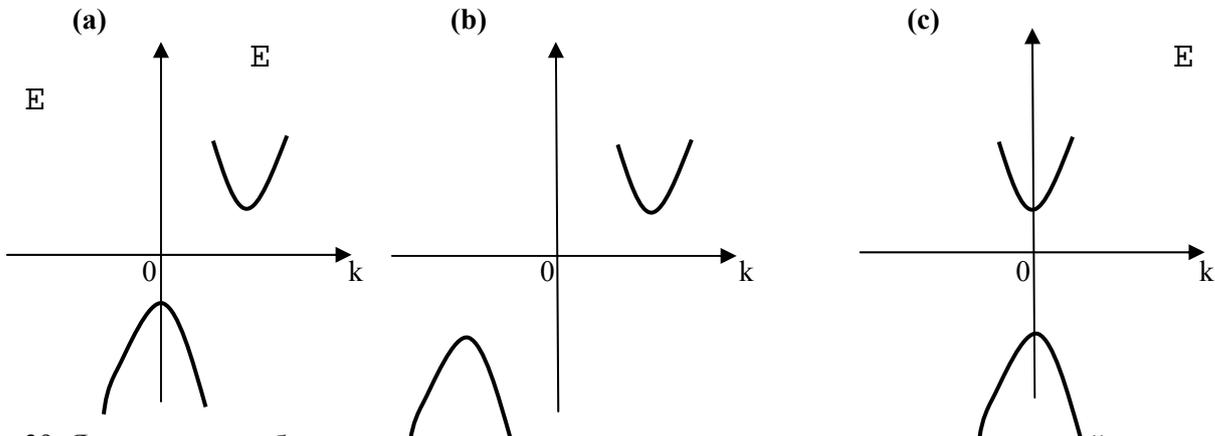
35. Почему эффективная масса электрона даже в изотропном случае отличается от массы свободного электрона?

36. В чем состоит главное достоинство метода эффективной массы?

37. Какая теорема используется в методе эффективной массы?

38. Какие рисунки правильные? Как нужно исправить неправильные рисунки?

**Энергетическая диаграмма:**



39. Является ли необходимым условием трансляционная симметрия кристаллической решетки для возникновения разрешенных и запрещенных электронных энергетических зон?

40. Чему равны плотности состояний  $g_{\vec{k}}$  и  $g_{\vec{p}}$  в пространстве квазиволновых векторов  $\{\vec{k}\}$  и пространстве квазиимпульсов  $\{\vec{p}\}$ ? Пояснить ответ.

41. Дать определение плотности состояний  $g(E)$  в энергетическом пространстве  $\{E\}$ .

42. Как найти число состояний электронов  $G_e(E_{\min}, E_{\max})$  в интервале энергий  $E_{\min} \leq E \leq E_{\max}$ , если известна плотность состояний  $g(E)$ ?

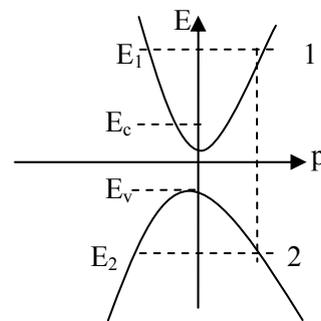
43. Дать определение квантовомеханически усредненной  $\langle \dots \rangle$  скорости блоховского электрона в заданном квантовом состоянии.

44. Дать определения полного  $\langle J_n^{(t)} \rangle$  и средне арифметического  $\langle \bar{J}_n \rangle$  квантовомеханически усредненных  $\langle \dots \rangle$  токов электронов заданной дисперсионной кривой  $E_n(\vec{p})$ , где  $E_n$  – энергия ллектрона.

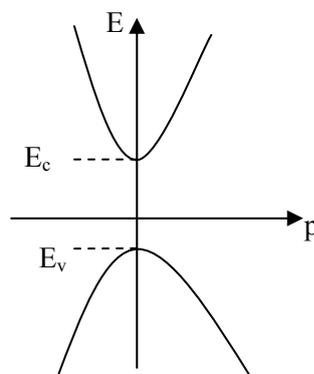
45. Запишите полный  $\langle J_n^{(t)} \rangle$  квантовомеханически усредненный  $\langle \dots \rangle$  ток электронов заданной дисперсионной кривой  $E_n(\vec{p})$  через электроны и дырки.

46. Почему при увеличении энергии фотона  $h \cdot \nu > E_g$  вероятность поглощения фотона в полупроводнике растет, где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны?

47. Чему равны энергии электрона  $E_c$  и дырки  $E_h$  (а) в точке 1 относительно дна зоны проводимости и (б) в точке 2 относительно потолка валентной зоны?



48. Какой знак эффективных масс электрона  $m_n$  и дырки  $m_p$  (а) при энергии  $E = E_c$  и (б) при энергии  $E = E_v$ ?



49. Физический смысл приближения почти свободных электронов.

50. Физический смысл приближения сильно связанных электронов.

51. В чем заключается основной результат приближения почти свободных электронов?

52. В чем заключается основной результат приближения сильно связанных электронов?

53. Чему равна  $\sum_{\vec{k}} \langle v_n(\vec{k}) \rangle$ , где  $\langle v_n(\vec{k}) \rangle$  - квантово-механическая средняя скорость электрона  $n$ -ой

ветви с волновым вектором  $\vec{k}$  и суммирование ведется по всей зоне Бриллюэна? Обосновать ответ.

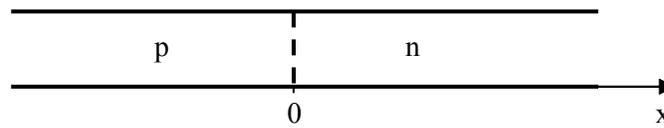
54. Какие соотношения: (а)  $\sum_{\substack{\vec{k}_x > 0 \\ \text{в зоне} \\ \text{Бриллюэна}}} \langle v_n(\vec{k}) \rangle = 0$ , (б)  $\sum_{\vec{k}, \text{полная зона Бриллюэна}} \langle v_n(\vec{k}) \rangle = 0$ , (с)  $\sum_n \langle v_n(\vec{k}) \rangle = 0$  правильные, где

$\langle v_n(\vec{k}) \rangle$  - квантово-механическая средняя скорость электрона  $n$ -ой ветви с волновым вектором  $\vec{k}$ ,  $\vec{k}_x$  - проекция  $\vec{k}$  на ось  $x$ ? Обосновать ответ.

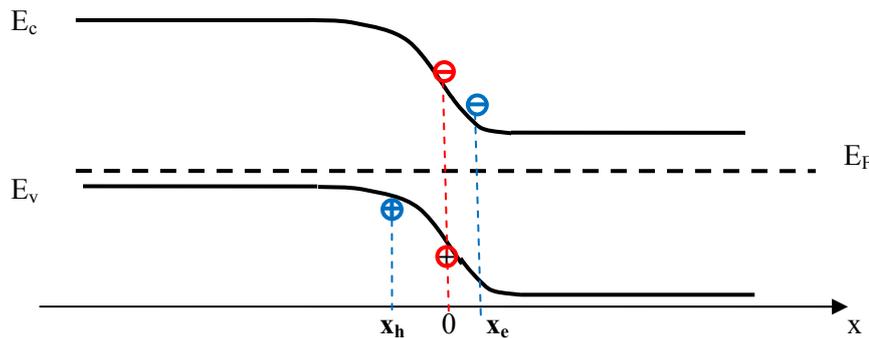
55. Как Вы сформулируете основной физический результат  $(\vec{k} - \hat{p})$  приближения расчета электронного энергетического спектра?

56. Что означают вектора  $\vec{k}$  и  $\hat{p}$  в  $(\vec{k} - \hat{p})$  приближении расчета электронного энергетического спектра?

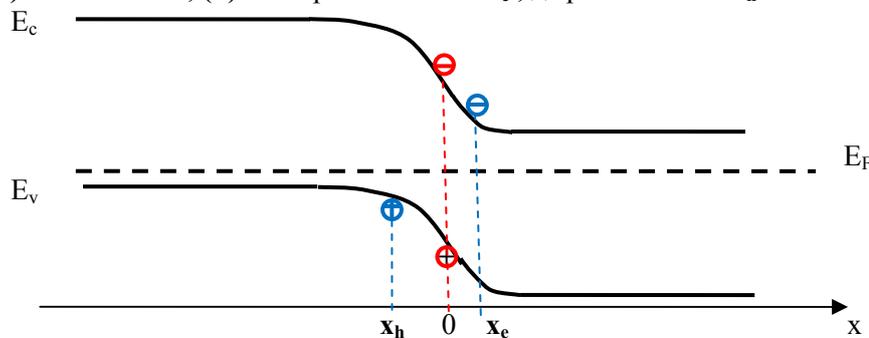
57. Нарисовать энергетическую диаграмму p-n перехода.



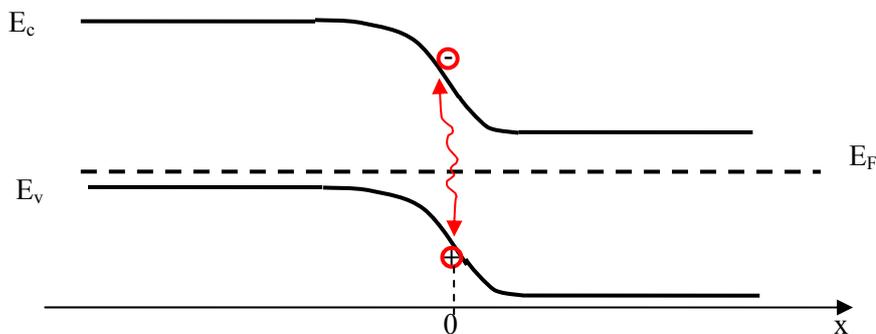
58. Куда направлено электрическое поле в области пространственного заряда (ОПЗ)  $\vec{E}_{ОПЗ}$  p-n перехода, в которой возникают электрон и дырка (а) в точке  $x = 0$ , (б) электрон - в точке  $x_e$ , дырка - в точке  $x_h$ ? Показать графически.



59. Куда направлено электрическое поле электронно-дырочного взаимодействия  $\vec{E}_{e-h}$ , когда электрон и дырка возникают (а) в точке  $x = 0$ , (б) электрон - в точке  $x_e$ , дырка - в точке  $x_h$ ? Показать графически.



60. Что происходит с электронно-дырочной парой, которая генерируется в области пространственного заряда (ОПЗ) p-n перехода в точке  $x = 0$ ?



61. Уровень Ферми лежит (a) выше (b) ниже донорного уровня. В каком случае донорный атом заряжен?
62. Уровень Ферми лежит (a) выше (b) ниже акцепторного уровня. В каком случае акцепторный атом заряжен?
63. Имеются только доноры, причем, при комнатной температуре  $T$  уровень Ферми лежит ниже донорного уровня. Куда будет смещаться уровень Ферми при понижении  $T$ ?
64. Имеются только акцепторы, причем, при комнатной температуре  $T$  уровень Ферми лежит выше акцепторного уровня. Куда будет смещаться уровень Ферми при понижении  $T$ ?
65. Имеются доноры и акцепторы, причем акцепторный уровень лежит ниже донорного. Что будет происходить с концентрациями электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне при увеличении концентрации акцепторной примеси?
66. Имеются только доноры. Нарисуйте схематически характер зависимости концентраций электронов и дырок от температуры.
67. Часто равновесные концентрации электронов  $n_e$  и дырок  $p_e$  записывают в виде  $n_e = N_c \cdot \exp(\mu/kT)$ ,  $p_e = N_v \cdot \exp[-(E_g + \mu)/kT]$ . Что такое здесь  $E_g$  и  $\mu$ ? Для какого полупроводника (вырожденного или невырожденного) относится эта запись? Каков знак энергии  $\mu$  и от чего эта энергия отсчитывается?
68. В области пространственного заряда (ОПЗ) p-n перехода есть электрическое поле и носители. Почему тогда в равновесном случае тока в p-n переходе нет?
69. При какой полярности напряжения вольтамперная характеристика p-n перехода на основе невырожденных полупроводников резко (экспоненциально) зависит от напряжения даже при слабых его значениях?
70. Почему как фототок, так и быстродействие p-n фотодиода наибольшие, когда излучение поглощается лишь в ОПЗ перехода?
71. Физический смысл кинетического уравнения Больцмана.
72. Основная причина того, что в металлах термо-ЭДС много меньше, чем в полупроводниках?
73. Что такое скорость рекомбинации неравновесных носителей?
74. Назвать три основных типа рекомбинации неравновесных носителей.
75. Может ли время жизни неравновесных носителей при их примесной рекомбинации расти с увеличением концентрации центров рекомбинации?
76. Изобразить в пространстве энергия-импульс ( $E, p$ ) схему Оже рекомбинации.
77. Почему пороговая энергия межзонной ударной ионизации при парных столкновениях больше ширины запрещенной зоны?
78. Физический смысл подвижностей электронов  $\mu_n$  и дырок  $\mu_p$ .
79. Физический смысл диффузионного потока частиц  $j_{dif}$ .
80. Чему равны коэффициенты диффузии электронов  $D_n$  и дырок  $D_p$  при температуре  $T=0$ ?
81. Пояснить соотношение Эйнштейна между  $\mu_{n,p}$  и  $D_{n,p}$ .
82. Пояснить физический смысл амбиполярного коэффициента диффузии носителей тока (электронов и дырок)  $D_a$ .
83. Пояснить физический смысл амбиполярной подвижности носителей тока (электронов и дырок)  $\mu_a$ .
84. Чему равен  $D_a$  в ярко выраженном полупроводнике  $n$ - типа и почему?
85. Чему равен  $D_a$  в ярко выраженном полупроводнике  $p$ - типа и почему?
86. Чему равна  $\mu_a$  в ярко выраженном полупроводнике  $n$ - типа и почему?
87. Чему равна амбиполярная подвижность носителей тока в ярко выраженном полупроводнике  $p$ - типа и почему?

88. Почему, чем больше отношение  $b = \mu_n / \mu_p$ , тем требуется большая концентрация дырок, чтобы  $D_a$  и  $\mu_a$  были равны  $D_n$  и  $\mu_n$ , соответственно?
89. Почему  $D_a$  не меняет знак при переходе полупроводника от  $n$  к  $p$  типу, а  $\mu_a$  меняет?
90. Существует ли между  $\mu_a$  и  $D_a$  соотношение, подобное соотношению Эйнштейна?

## 11. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ: русский

### Разработчик:

Доктор физико-математических наук, профессор

В.А. Холоднов

Ученый секретарь ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН

И.И.Чусов

Рабочая программа утверждена на заседании Ученого Совета

ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН

«03» октября 2014 г.