

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:

Декан

А. Г. Коротаев

Оценочные материалы по дисциплине

Физика полупроводников

по направлению подготовки / специальности

**03.03.03 Радиофизика**

Направленность (профиль) подготовки/ специализация:  
**Киберфизические системы, прикладная электроника и квантовые технологии**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Радиофизик-кибернетик, преподаватель. Разработчик киберфизических и квантовых систем**

Год приема

**2024**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОПОП

О.А. Доценко

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

## **1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности

ПК-1 Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

РООПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

РОПК 1.3 Владеет приемами сравнительного анализа вариантов решения задачи, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов

РОПК 3.1 Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

РОПК 3.2 Умеет проводить радиофизические измерения с использованием современных средств измерения и контроля

## **2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания**

Элементы текущего контроля:

- тесты;
- лабораторные работы.
- контрольные работы.

Текущий контроль проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий, проверки отчетов по лабораторным работам и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Студент является аттестованным на контрольной точке, если посещаемость составляет не ниже 50 % лекционных занятий.

Тестирование проводится в режиме онлайн во второй половине семестра в системе Moodle (<https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=13813>). В ходе тестирования студентам предлагается ответить на три теоретических вопроса, время на тестирование – 3 минуты. Тестирование считается успешно пройденным, если дано 2 верных ответа (зачтено). В случае, если студент не проходит тестирование, ему предлагается пройти его во время экзамена.

Контрольные работы и домашние задания выполняются в рамках практических занятий. Результаты контрольной работы определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Отчеты по лабораторным работам готовятся обучающимися самостоятельно. Результаты лабораторной работы определяются оценками «зачтено», «не зачтено», При успешном выполнении контрольных и домашних заданий, а также сдаче отчетов по лабораторным работам, практические задания на экзамене не даются. В противном случае, обучающемуся предлагается выполнить ряд практических задач.

### **Примерный перечень теоретических вопросов для тестирования:**

1. Что собой представляет энергетический спектр электронов в изолированном атоме? Каков его характер, от чего зависит энергия электронов в изолированном атоме?
2. Записать в общем виде оператор  $H$  в уравнении Шредингера для электронов в кристалле.
3. Физический смысл эффективной массы. Зависимость эффективной массы носителей заряда от номера зоны.
4. Функция Ферми–Дирака для электронов и дырок, её зависимость от энергии и температуры.
5. Записать и прокомментировать уравнение электронейтральности для полупроводника, содержащего один тип донорной и один тип акцепторной примеси.
6. Записать функцию распределения электронов по донорным состояниям и функцию распределения дырок по акцепторным состояниям.
7. Нарисовать график температурной зависимости уровня Ферми в собственном полупроводнике.
8. Записать формулу для концентрации носителей заряда в собственном невырожденном полупроводнике.
9. Написать выражение для закона действующих масс.
10. Нарисовать графики температурной зависимости уровня Ферми и концентрации электронов в полупроводнике  $n$ -типа, дать комментарии.
11. Какая связь существует между концентрацией электронов в области низких температур и энергией ионизации донорной примеси для полупроводника  $n$ -типа?
12. Понятие эффекта Холла.
13. Суть эффектов Зеебека и Пельтье.
14. Удельная электропроводность полупроводников. Понятие дрейфовой подвижности.
15. Дать определение времени релаксации Максвелла.
16. Нарисовать график зависимости времени жизни носителей заряда от положения уровня Ферми в запрещенной зоне. Прокомментировать его.
17. Нарисовать график температурной зависимости времени жизни носителей заряда. Прокомментировать его.
18. Записать уравнение непрерывности для электронов и дырок.
19. Дать определение длины экранирования, или длины Дебая.
20. Как и почему изменится напряженность электрического поля в конденсаторе при переходе от вакуума к диэлектрику?
21. Что такое поляризованность?
22. В чем принципиальное отличие упругой поляризации от релаксационной?
23. Чем обусловлены диэлектрические потери? Виды диэлектрических потерь.
24. Тангенс угла диэлектрических потерь, его зависимость от частоты и температуры.
25. Назвать основные оптические константы.
26. Суть законов сохранения энергии и квазиимпульса при оптических переходах.
27. Дать определение прямым и непрямым оптическим переходам.
28. Определение показателя поглощения и коэффициента поглощения.
29. Понятие края поглощения.

### **Примеры задач для практических занятий:**

1. Определить положения уровней Ферми и концентрации носителей заряда в собственном арсениде индия (InAs) при температурах 300 К и 500 К. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны описывается формулой  $E_g(T) = 0,46 - 4,0 \cdot 10^{-4} T$  [эВ]. Эффективные массы для плотностей состояний составляют для электронов  $m_{nd}^* = 0,023 m_0$ , для дырок  $m_{pd}^* = 0,41 m_0$ .

2. Дрейфовые подвижности электронов и дырок в кремнии  $n$ -типа проводимости с концентрацией электронов  $n_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при температуре  $T = 200 \text{ К}$  соответственно равны  $\mu_n = 2200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  и  $\mu_p = 1200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Определить удельные сопротивления кремния без освещения и при освещении светом с энергией фотонов, обеспечивающей биполярную оптическую генерацию. Концентрация неравновесных носителей заряда –  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

3. В арсениде галлия, легированном донорной примесью с концентрацией  $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , время жизни носителей заряда  $\tau = 6 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Вычислить коэффициент диффузии и диффузионную длину неосновных носителей заряда при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . Уровень биполярной генерации мал.

### **Примерный перечень вопросов для самостоятельной подготовки и темы лабораторных работ.**

#### **«Металлографическое исследование полупроводников»**

1. Что такое монокристалл?
2. Что такое поликристалл?
3. Что такое структурная ячейка?
4. Как записываются символы узла, направления и плоскости в кристаллографической системе координат?
5. Что такое индексы Миллера?

#### **«Определение времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводнике методом модуляции его проводимости»**

1. Какая физическая величина называется временем жизни избыточных носителей заряда?
2. Какими носителями заряда в области примесной проводимости определяется время жизни?
3. Записать уравнение непрерывности для электронов и дырок.
4. Как зависит от времени избыточная концентрация носителей заряда в случае малого уровня биполярной генерации после прекращения возбуждения?
5. Почему при протекании постоянного тока по проводнику через точечный контакт напряжение на проводнике уменьшается?
6. Анализ каких измерений проводится с помощью установки по определению времени жизни неосновных носителей заряда?
7. Написать выражение для закона действующих масс.
8. Нарисовать график зависимости времени жизни носителей заряда от положения уровня Ферми в запрещённой зоне. Прокомментировать его.
9. Нарисовать график температурной зависимости времени жизни носителей заряда. Прокомментировать его.

#### **«Определение концентрации и подвижности основных носителей заряда в полупроводниках»**

1. Понятие эффекта Холла.
2. В чем заключается физическая природа эффекта Холла?
3. Что называется коэффициентом Холла?
4. Запишите коэффициент Холла в области примесной и собственной проводимости?
5. Как зависит ЭДС Холла от силы и направления тока, от величины и направления магнитной индукции? Каково исходное соотношение для получения данного выражения?
6. При каких условиях данное соотношение выполняется?
7. Как оценивается в данной ситуации сила/слабость магнитного поля?

8. Какие измерения требуются для определения удельной проводимости полупроводника правильной формы?

9. Какие измерения требуются для определения холловской подвижности носителей заряда?

10. Зачем при измерении ЭДС Холла измерение напряжения между гранями образца, перпендикулярными полю Холла, проводится при противоположных направлениях поперечного магнитного поля?

11. Записать и прокомментировать уравнение электронейтральности для полупроводника, содержащего один тип донорной и один тип акцепторной примеси.

#### **«Определение ширины запрещённой зоны полупроводника»**

1. От каких параметров полупроводника зависит удельная проводимость при наличии электронов и дырок?

2. Как измерить удельную проводимость проводника правильной формы?

3. Какую зависимость от температуры имеет удельная проводимость в собственных полупроводниках? Чем она определяется?

4. Какую зависимость от температуры имеет удельная проводимость в примесных полупроводниках в области ионизации примеси? Чем она определяется?

5. Какую зависимость от температуры имеет удельная проводимость в примесных полупроводниках в области истощения примеси? Чем она определяется?

6. Как зависит от температуры подвижность носителей заряда при рассеянии их на колебаниях кристаллической решетки?

7. Как зависит от температуры подвижность носителей заряда при рассеянии их на ионах примеси?

8. В какой области температурная зависимость удельной проводимости определяется температурной зависимостью подвижности? Почему?

9. В какой области анализ температурной зависимости удельной проводимости дает возможность определить ширину запрещенной зоны полупроводника? Почему?

10. В какой области анализ температурной зависимости удельной проводимости дает возможность определить энергию ионизации легирующей примеси? Почему?

11. Зачем при измерении температурной зависимости удельной проводимости измерение напряжения на образце производится при противоположных направлениях тока?

#### **«Измерение удельного сопротивления полупроводника четырехзондовым методом»**

1. Удельная электропроводность полупроводников. Понятие дрейфовой подвижности.

2. Какие измерения требуются для определения удельного сопротивления полупроводника правильной формы 2-х зондовым методом?

3. Какие условия накладываются на образцы полупроводников для определения в них удельного сопротивления 4-х зондовым методом?

4. При каких условиях получена формула, связывающая удельное сопротивление образца с силой тока и падением напряжения между зондами?

5. Почему падение напряжения между зондами необходимо измерять компенсационным методом?

6. В чем заключается компенсационный метод измерения напряжения?

7. В полупроводниках с каким по величине удельным сопротивлением 4-х зондовый метод будет давать меньшую погрешность?

8. Как зависит удельное сопротивление полупроводника от концентрации и подвижности носителей заряда в области смешанной проводимости?

9. Написать выражение для закона действующих масс.

10. Записать и прокомментировать уравнение электронейтральности для полупроводника, содержащего один тип донорной и один тип акцепторной примеси.

**«Определение удельного сопротивления полупроводника бесконтактным методом»**

1. Удельная электропроводность полупроводников. Понятие дрейфовой подвижности.

2. Какое явление используется для определения удельного сопротивления полупроводников бесконтактным методом?

3. Как зависит добротность колебательного контура от удельного сопротивления вносимого в него полупроводника?

4. Зачем при измерении удельного сопротивления полупроводников бесконтактным методом необходимо иметь эталонные образцы?

5. Написать выражение для закона действующих масс.

6. Записать и прокомментировать уравнение электронейтральности для полупроводника, содержащего один тип донорной и один тип акцепторной примеси.

**«Изучение температурной зависимости абсолютной дифференциальной термоэлектродвижущей силы полупроводника»**

1. Суть эффектов Зеебека и Пельтье.

2. Какая физическая величина называется коэффициентом абсолютной дифференциальной термоэдс?

3. Какая физическая величина называется коэффициентом относительной дифференциальной термоэдс?

4. От чего зависит знак коэффициента абсолютной дифференциальной термоэдс в области примесной проводимости.

5. Какой формулой описывается коэффициент абсолютной дифференциальной термоэдс полупроводника в области смешанной проводимости?

6. В какой области примесной проводимости полупроводника коэффициент абсолютной дифференциальной термоэдс с ростом температуры по модулю убывает?

7. В какой области примесной проводимости полупроводника коэффициент абсолютной дифференциальной термоэдс с ростом температуры по модулю растет?

8. Как изменяется коэффициент абсолютной дифференциальной термоэдс полупроводника с ростом температуры в области собственной проводимости?

9. Почему в полупроводниках р-типа в области смешанной проводимости с ростом температуры меняется знак абсолютной дифференциальной термоэдс?

10. Нарисовать график температурной зависимости уровня Ферми в собственном полупроводнике.

11. Записать формулу для концентрации носителей заряда в собственном невырожденном полупроводнике.

12. Какая связь существует между концентрацией электронов в области низких температур и энергией ионизации донорной примеси для полупроводника n-типа?

13. Нарисовать графики температурной зависимости уровня Ферми и концентрации электронов в полупроводнике n-типа, дать комментарии.

**«Определение диффузионной длины неосновных носителей заряда в полупроводнике методом подвижного светового зонда»**

1. Какие носители заряда называются равновесными? С чем в равновесии они находятся?

2. Какие носители заряда называются неравновесными - избыточными?

3. Что называется диффузионной длиной неравновесных носителей заряда?

4. Как зависит диффузионная длина от времени жизни и коэффициента диффузии неосновных носителей заряда?
5. Какой физический смысл имеет диффузионная длина?
6. Записать уравнение непрерывности для электронов и дырок.
7. Какой вид имеет стационарное одномерное уравнение непрерывности для избыточной концентрации в темновой области полупроводника?
8. Какой вид имеет распределение концентрации избыточных носителей заряда в приближении слабой генерации при их одномерной диффузии в темновую область?
9. Какую энергию фотонов должен иметь свет при биполярной генерации носителей заряда?
10. Зачем в установке по определению диффузионной длины генерация избыточных носителей заряда производится переменным светом?
11. Анализ каких измерений проводится с помощью установки по определению диффузионной длины неосновных носителей заряда?
12. Написать выражение для закона действующих масс.

### **3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания**

Экзамен в шестом семестре проводится в устной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Первая часть представляет собой тест из 3 вопросов, проверяющих РООПК 1.3 (Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности). Ответы на вопросы первой части даются путем выбора из списка предложенных (п. 2, вопросы для тестирования).

Вторая часть содержит один вопрос и одну практическую задачу, проверяющие РОПК 1.3 (Владеет приемами сравнительного анализа вариантов решения задачи, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов). Ответ на вопросы второй части предполагает решение задачи и краткую интерпретацию полученных результатов.

Третья часть содержит 2 вопроса, проверяющих РОПК 3.1 (Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач). Ответы на вопросы третьей части даются в письменном виде с устными пояснениями.

#### **Примерный перечень вопросов по третьей части**

1. Используя уравнение  $\cos \alpha a + \frac{P \sin \alpha a}{\alpha a} = \cos k_x a$ , получить выражение для  $E(k)$  в случае абсолютно связанных электронов; провести анализ полученного выражения.
2. Используя уравнение  $\cos \alpha a + \frac{P \sin \alpha a}{\alpha a} = \cos k_x a$ , получить выражение для  $E(k)$  в случае абсолютно свободных электронов; провести анализ полученного выражения.
3. Используя уравнение  $E(k) = A_n + (-1)^n B_n \cos k_x a$ , дать понятие эффективной массы носителей заряда.
4. Элементарная теория примесных состояний (донорная примесь).
5. Элементарная теория примесных состояний (акцепторная примесь).
6. Функция распределения Ферми-Дирака; ее зависимость от энергии и температуры.
7. Концентрация равновесных носителей заряда в разрешенной зоне (электроны в зоне проводимости).
8. Концентрация равновесных носителей заряда в разрешенной зоне (дырки в валентной зоне).

9. Функции распределения Ферми-Дирака для электронов и дырок на примесных уровнях. Концентрация носителей заряда на примесных уровнях.
10. Уравнение электронейтральности. Положение и концентрация носителей заряда в невырожденном собственном полупроводнике.
11. Элементарная теория электропроводности; дрейфовая скорость и дрейфовая подвижность носителей заряда в полупроводниках. Выражение для удельной электропроводности в кристаллах со смешанным типом проводимости.
12. Эффект Холла в ограниченном полупроводнике в области примесной, смешанной и собственной проводимостей в слабых магнитных полях.
13. Магниторезистивный эффект.
14. Термоэлектрические эффекты (эффект Зеебека, Пельтье, Томсона).
15. Время жизни носителей заряда при биполярной генерации и межзонной рекомбинации; высокий и низкий уровни возбуждения.
16. Время жизни носителей заряда при монополярной генерации, время релаксации Максвелла.
17. Понятие рекомбинации, виды рекомбинации в полупроводниках; межзонная рекомбинация.
18. Рекомбинация носителей заряда через локальные уровни в запрещенной зоне. Записать выражение для  $-dn/dt$ .
19. Рекомбинация носителей заряда через локальные уровни в запрещенной зоне. Записать выражение для  $-dp/dt$ .
20. Зависимость времени жизни носителей заряда от положения уровня Ферми в полупроводнике в случае рекомбинации Шокли-Рида.
21. Вывод уравнения непрерывности.
22. Диффузионный и дрейфовый токи. Соотношение Эйнштейна.
23. Диффузия и дрейф основных носителей заряда. Зависимость избыточной концентрации носителей заряда от координаты.
24. Зависимость избыточной концентрации носителей заряда от координаты при биполярной генерации и межзонной рекомбинации. Длина диффузии.
25. Основные свойства диэлектриков, отличающие их от других материалов. Активные и пассивные диэлектрики.
26. Количественная характеристика поляризации, дипольный момент молекулы.
27. Относительная диэлектрическая проницаемость. Вектор электрической индукции.
28. Электронная упругая поляризация, электронная поляризуемость. Частотный диапазон, в котором наблюдается электронная упругая поляризация.
29. Ионная упругая поляризация, коэффициент ионной поляризуемости.
30. Ориентационная поляризация и ее зависимость от времени действия электрического поля.
31. Виды релаксационной поляризации. Ионно-релаксационная поляризация.
32. Виды диэлектрических потерь. Тангенс угла диэлектрических потерь.
33. Комплексная диэлектрическая проницаемость.
34. Частотные зависимости относительной диэлектрической проницаемости и коэффициента диэлектрических потерь.
35. Оптические коэффициенты вещества. Физический смысл коэффициента поглощения. Связь оптических коэффициентов с электрическими.
36. Прямые и не прямые оптические переходы. Закон сохранения энергии и квазиимпульса при прямых и не прямых переходах.
37. Дать определение показателя поглощения; связь показателя поглощения с коэффициентом поглощения. Закон Ламперта-Бугера.
38. Зависимость линейного коэффициента поглощения от частоты при прямых разрешенных и запрещенных переходах.



39. Виды оптического поглощения в полупроводниках. Край собственного поглощения при прямых переходах.

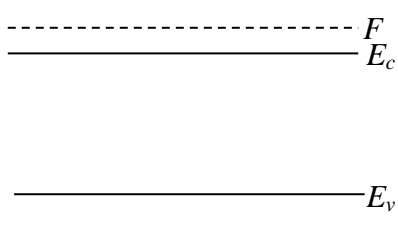
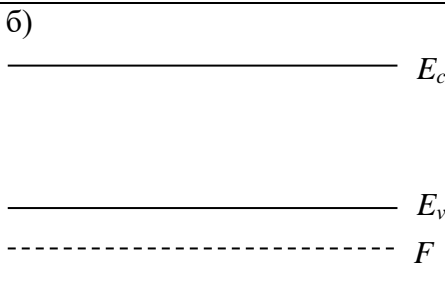
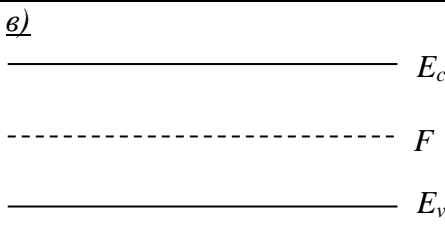
40. Коэффициент отражения и коэффициент пропускания. Взаимосвязь оптических постоянных.

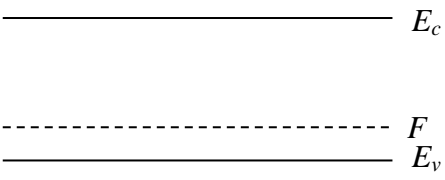
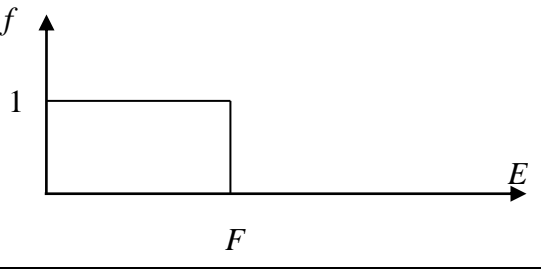
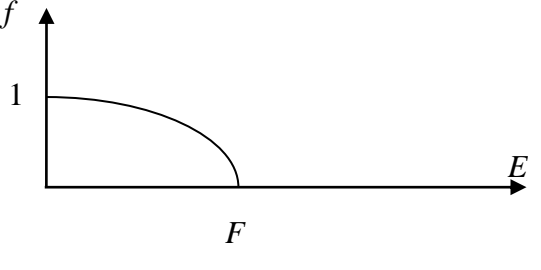
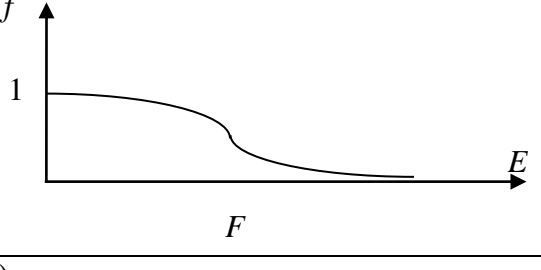
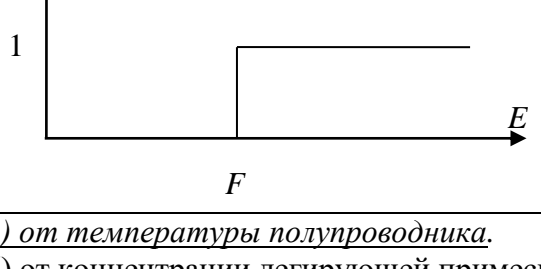
Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно» в соответствии с таблицей.

Компетенция	Индикатор компетенции	Критерии оценивания результатов обучения			
		Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
<b>ОПК-1</b> Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности.	<b>РООПК 1.3</b> Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.	Не имеет базовых знаний в области физики и радиофизики.	Имеет общее представление из физики и радиофизики.	Допускает отдельные неточности в описании базовых понятий в области физики и радиофизики.	Уверенно применяет базовые знания в области физики и радиофизики.
<b>ПК-1</b> Способен проанализировать поставленную задачу в области радиофизики и электроники, осуществлять поиск, обобщение и использование научно-технической информации, необходимой для эффективного выполнения профессиональной задачи	<b>РОПК 1.3</b> Владеет приемами сравнительного анализа вариантов решения задачи, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов	Полное непонимание сути поставленных задач.	Испытывает затруднения при решении задачи, определении рисков, связанных с реализацией различных вариантов	Допускает незначительные ошибки при анализе вариантов решения задач, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов	Уверенно владеет различными приемами сравнительного анализа вариантов решения задачи, определения рисков, связанных с реализацией различных вариантов
<b>ПК-3</b> Способен использовать современное оборудование для решения задач в области радиофизики и электроники	<b>РОПК 3.1</b> Знает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.	Не имеет представления о физических принципах действия приборов и устройств.	Имеет общие представления о приборах и устройствах, предназначенных для решения профессиональных задач.	Допускает незначительные ошибки при описании физических принципов действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.	Уверенно описывает физические принципы действия приборов и устройств, предназначенных для решения профессиональных задач.

#### 4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Вопросы теста для оценки остаточных знаний по дисциплине

№	Вопрос	Варианты ответа
1	В чем заключается одноэлектронное приближение (самосогласованный потенциал) при решении уравнения Шредингера для кристалла?	<p>а) В том, что рассматриваются только по одному (валентному) электрону для каждого атома в кристалле.</p> <p>б) В том, что задача решения уравнения для множества электронов в кристалле сводится к задаче решения множества одинаковых уравнений для одного электрона.</p> <p><u>в) В том, что оператор попарного кулоновского взаимодействия электронов упрощается и сводится к оператору взаимодействия одного электрона со всеми остальными электронами кристалла.</u></p> <p>г) В том, что рассмотрение одного электрона упрощает решение уравнения Шредингера.</p>
2	Какое из представленных выражений описывает общий вид волновой функции Блоха?	<p>а) <math>\Psi = \exp(i\vec{k}\vec{r})</math>.</p> <p>б) <math>\Psi = U(\vec{r}) = U(\vec{r} + \vec{a})</math>.</p> <p><u>в) <math>\Psi = U(\vec{r}) \cdot \exp(i\vec{k}\vec{r})</math>.</u></p>
3	Энергетическая диаграмма (зависимость энергии электронов от координаты) для невырожденного полупроводника представлена на рисунке(ах):	<p>а)</p>  <p>б)</p>  <p>в)</p> 

		<p>з)</p> 
4	<p>Какой из графиков описывает функцию Ферми-Дирака для электронов при температуре <math>T &gt; 0</math> ?</p>	<p>а)</p>  <p>б)</p>  <p>в)</p>  <p>г)</p> 
5	<p>Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике зависит от (два ответа):</p>	<p>а) от температуры полупроводника.  б) от концентрации легирующей примеси в полупроводнике.  в) от времени жизни носителей заряда в полупроводнике.  г) от ширины запрещенной зоны.  д) от подвижности электронов и дырок в полупроводнике.</p>

6	Какое из выражений представляет уравнение электронейтральности в полупроводнике?	<p>а) <math>p \cdot n = n_i^2</math>.</p> <p><u>б) <math>p + N_d^+ = n + N_a^-</math>.</u></p> <p>в) <math>N_d^0 \equiv n_d = \frac{N_d}{1 + \frac{1}{g_d} \exp\left(\frac{E_d - F}{kT}\right)}</math>.</p> <p>г) <math>-\frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} = g - \frac{\Delta n}{\tau_n} = g - \frac{n - n_0}{\tau_n}</math>.</p>
7	Какое(ие) из представленных выражений описывает дрейфовую подвижность носителей заряда?	<p><u>а) <math>\mu = \frac{v}{\mathcal{E}}</math>.</u></p> <p>б) <math>\mu = \frac{v}{\epsilon \epsilon_0}</math>.</p> <p><u>в) <math>\mu = \frac{e \cdot \tau}{m^*}</math>.</u></p> <p>г) <math>\mu = \mu_r \cdot \mu_0</math>.</p>
8	Какое из представленных выражений описывает удельную проводимость полупроводника, близкого к собственному?	<p>а) <math>\sigma = e \cdot \mu \cdot n</math>.</p> <p>б) <math>\sigma_n = e \cdot \mu_n \cdot n</math>.</p> <p>в) <math>\sigma_n = e \cdot \mu_p \cdot p</math>.</p> <p><u>г) <math>\sigma = e \cdot (\mu_p \cdot p + \mu_n \cdot n)</math>.</u></p> <p>д) <math>\sigma = \frac{e \cdot n_i \cdot (\mu_p + \mu_n)}{(\mu_p \cdot p + \mu_n \cdot n)}</math>.</p>
9	При монополярной генерации изменение концентрации основных носителей заряда по координате определяется:	<p>а) временем жизни.</p> <p>б) диффузионной длиной.</p> <p><u>в) временем релаксации Максвелла.</u></p> <p><u>г) длиной экранирования.</u></p>
10	В чем заключается магниторезистивный эффект?	<p>а) В возникновении поперечного электрического поля при воздействии на полупроводник скрещенных магнитного и электрического полей.</p> <p>б) В возникновении силы Лоренца, действующей на носители заряда, движущиеся в скрещенных электрическом и магнитном полях.</p> <p><u>в) В изменении электрического сопротивления полупроводника при помещении его в магнитное поле.</u></p> <p>г) В пространственном разделении положительных и отрицательных носителей заряда при помещении полупроводника в скрещенные электрическое и магнитное поля.</p> <p>д) В возникновении электродвижущей силы при создании градиента температуры в полупроводнике.</p>

11	Какое из представленных выражений описывает плотность диффузионного тока электронов?	<p><u>а)</u> <math>J = eD_n \frac{dn}{dx}</math></p> <p>б) <math>J = -eD_p \frac{dp}{dx}</math></p> <p>в) <math>J = D_n \frac{dn}{dx}</math></p> <p>г) <math>J = e(D_n \frac{dn}{dx} + \mu_n n E)</math></p> <p><u>д)</u> <math>J = e\mu_n n E</math></p>
12	Какое из представленных выражений описывает соотношение Эйнштейна?	<p>а) <math>E = mc</math></p> <p><u>б)</u> <math>\mu_n = D_n \frac{e}{kT}</math></p> <p>в) <math>\mu_n = D_n \frac{kT}{e}</math></p> <p>г) <math>\mu_n = D_n e k T</math></p>
13	Время жизни носителей заряда это:	<p><u>а) время, за которое концентрация избыточных носителей заряда уменьшается в e раз за счет рекомбинации.</u></p> <p>б) время, за которое концентрация избыточных носителей заряда уменьшается в 2 раза за счет рекомбинации.</p> <p>в) время, за которое свободные носители проходят расстояние, равное длине свободного пробега.</p> <p>г) время, в течение которого полупроводник подвергается внешнему воздействию (например, облучению фотонами).</p> <p>в) время восстановления диффузионно-дрейфового равновесия.</p>
14	Прямые оптические переходы это:	<p>а) переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости без изменения их координат в кристалле.</p> <p>б) переходы электронов из валентной зоны на примесный уровень без изменения их координат в кристалле.</p> <p><u>в) переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости без изменения волнового вектора.</u></p> <p>г) переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости с изменением волнового вектора.</p> <p>д) любые переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости, происходящие в прямозонном полупроводнике.</p>

15	Какое из представленных выражений описывает спектральную зависимость коэффициента поглощения света с энергией квантов ( $h\nu$ ) на свободных носителях заряда?	а) $\alpha(h\nu) \sim [h\nu - E_g]^{1/2}$ б) $\alpha^\pm(h\nu) \sim (h\nu - E_g \mp h\nu_\phi)^2$ <u>в)</u> $\alpha(h\nu) \simeq (h\nu)^{-2}$ г) $\alpha(h\nu) \sim \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)$
----	---	--

### Информация о разработчиках

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н., НИ ТГУ, радиофизический факультет, кафедра полупроводниковой электроники, доцент.