

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Радиофизический факультет



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по Од

Е.В. Луков

15 декабря 2022г.

**ПРОГРАММА**

**кандидатского экзамена по научной специальности**

*1.3.11. «Физика полупроводников»*

Томск 2022

Программа кандидатского экзамена по научной специальности *1.3.11.*  
*«Физика полупроводников»* рассмотрена и рекомендована к утверждению ученым  
советом радиофизического факультета

протокол № 10 от 13.12.2022

**Авторы-разработчики:**

1. Гермогенов Валерий Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор,  
профессор
2. Эрвье Юрий Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, без звания, профессор
3. Коханенко Андрей Павлович, доктор физ.-мат. наук, снс, профессор

Согласовано:

Руководитель ОП



Коханенко Андрей Павлович

## **1. Общие положения**

На основании постановления Правительства Российской Федерации от 23.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» кандидатские экзамены сдаются в соответствии с научной специальностью (научными специальностями) и отраслью науки, предусмотренными номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утверждаемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (далее – Минобрнауки России), по которым осуществляется подготовка (подготовлена) диссертации.

Кандидатский экзамен по специальной дисциплине в соответствии с темой диссертации на соискание ученой степени кандидата наук представляет собой форму оценки степени подготовленности соискателя ученой степени к проведению научных исследований по научной специальности 1.3.11. «Физика полупроводников» и по соответствующей отрасли науки (далее – кандидатский экзамен).

Программа кандидатского экзамена разработана на основе Паспорта научной специальности 1.3.11. «Физика полупроводников» (далее Программа), утвержденного ВАК при Минобрнауки России.

Организация и проведение приема кандидатского экзамена осуществляется в соответствии с установленным в НИ ТГУ порядком.

Подготовка по Программе может осуществляться как самостоятельно, так и в рамках освоения соответствующей программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре НИ ТГУ. Сдача аспирантом кандидатского экзамена является обязательным условием обучения и относится к оценке результатов освоения базовой дисциплины (модуля) образовательного компонента программы, осуществляемой в рамках промежуточной аттестации.

## 2. Структура кандидатского экзамена и шкала оценивания уровня знаний

Кандидатский экзамен проводится в форме устного экзамена по билетам продолжительностью один академический час и состоит из следующих частей:

1. Основные вопросы (не более трёх вопросов по содержанию курса «Физика полупроводников»).
2. Дополнительные вопросы (не более трёх вопросов из 2-го раздела содержания Программы).

Оценка уровня знаний по каждому вопросу осуществляется по пятибалльной шкале со следующим принципом перерасчета:

«отлично» - 5 баллов;

«хорошо» - 4 балла;

«удовлетворительно» - 3 балла;

«неудовлетворительно» - 1-2 балла.

При оценивании ответов на каждый из вопросов экзаменационного билета учитываются следующие критерии:

Ответ на вопрос исчерпывающий, продемонстрировано понимание и знание сути вопроса в полном объеме. Замечаний нет.	5 баллов
Ответ на вопрос неполный, но раскрывающий основную суть вопроса, продемонстрировано понимание и знание вопроса в достаточном объеме. Замечания незначительные.	4 балла
Ответ неполный с существенными замечаниями, знания по вопросу фрагментарные и частичные, в том числе и по тематике диссертационного исследования.	3 балла
Ответ на вопрос отсутствует или дан неправильный	1-2 балла

Итоговая оценка за кандидатский экзамен выставляется решением экзаменационной комиссии:

«отлично» при наличии не менее 80% 5-балльных ответов и отсутствии 3-2-1-балльных ответов;



«хорошо» при наличии не менее 80% 4-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«удовлетворительно» при наличии более 20% 3-балльных ответов и отсутствии 2-1-балльных ответов;

«неудовлетворительно» при наличии 1-2 балльного ответа (или отказа отвечать на вопрос).

### **3. Перечень тем и вопросов для подготовки к сдаче экзамена**

**Раздел 1. Основные вопросы** (по содержанию дисциплины «Физика полупроводников»).

В основу настоящей программы положены основные разделы физики полупроводников, касающиеся основных физических проблем данной области, основ технологии и работы приборов на базе полупроводниковых материалов.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике при участии Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, ИФП СО РАН, ИРЭ РАН, ФИАН им. П.Н.Лебедева, ИФМ РАН (Нижний Новгород) и СПбГТУ.

#### **1. Химическая связь и атомная структура полупроводников**

- Электронная конфигурация внешних оболочек атомов и типы сил связи в твердых телах. Ван-дер-ваальсова, ионная и ковалентная связь.
- Структуры важнейших полупроводников - элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$ .
- Симметрия кристаллов. Трансляционная симметрия кристаллов. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Примитивная ячейка. Ячейка Вигнера-Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.
- Примеси и структурные дефекты в кристаллических и аморфных полупроводниках. Химическая природа и электронные свойства примесей. Точечные, линейные и двумерные дефекты.

## **2. Основы технологии полупроводников и методы определения их параметров**

- Методы выращивания объемных монокристаллов из жидкой и газовой фаз.
- Методы выращивания эпитаксиальных пленок (эпитаксия из жидкой и газовой фазы).
- Молекулярно-лучевая эпитаксия. Металлорганическая эпитаксия.
- Методы легирования полупроводников.
- Основные методы определения параметров полупроводников: ширины запрещенной зоны, подвижности и концентрации свободных носителей, времени жизни неосновных носителей, концентрации и глубины залегания уровней примесей и дефектов.

## **3. Основы зонной теории полупроводников**

- Основные приближения зонной теории. Волновая функция электрона в периодическом поле кристалла. Теорема Блоха. Зона Бриллюэна. Энергетические зоны.
- Законы дисперсии для важнейших полупроводников. Изоэнергетические поверхности. Тензор обратной эффективной массы. Плотность состояний. Особенности Ван-Хова.
- Уравнения движения электронов и дырок во внешних полях. Метод эффективной массы. Искривление энергетических зон в электрическом поле. Движение электронов и дырок в магнитном поле. Определение эффективных масс из циклотронного (диамагнитного) резонанса. Связь зонной структуры с оптическими свойствами полупроводника.
- Уровни энергии, создаваемые примесными центрами в полупроводниках. Доноры и акцепторы. Мелкие и глубокие уровни. Водородоподобные примесные центры.

## **4. Равновесная статистика электронов и дырок в полупроводниках**

- Функция распределения электронов. Концентрация электронов и дырок в зонах, эффективная плотность состояний. невырожденный и вырожденный электронный (дырочный) газ. Концентрации электронов и дырок на локальных уровнях. Факторы вырождения примесных состояний.



- Положение уровня Ферми и равновесная концентрация электронов и дырок в собственных и примесных (некомпенсированных и компенсированных) полупроводниках. Многозарядные примесные центры.

### **5. Кинетические явления в полупроводниках**

- Кинетические коэффициенты - проводимость, постоянная Холла и термо-ЭДС. Дрейфовая скорость, дрейфовая и холловская подвижности, фактор Холла. Дрейфовый и диффузионный ток. Соотношение Эйнштейна.

- Механизмы рассеяния носителей заряда в неидеальной решетке. Взаимодействие носителей заряда с акустическими и оптическими фононами. Рассеяние носителей заряда на заряженных и нейтральных примесях. Горячие электроны. Отрицательная дифференциальная проводимость. Электрические неустойчивости; электрические домены и токовые шнуры.

### **6. Рекомбинация электронов и дырок в полупроводниках**

- Генерация и рекомбинация неравновесных носителей заряда. Квазиравновесие, квазиуровни Ферми. Уравнение кинетики рекомбинации. Времена жизни. Фотопроводимость.

- Механизмы рекомбинации. Излучательная и безызлучательная рекомбинация. Межзонная рекомбинация. Рекомбинация через уровни примесей и дефектов. Центры прилипания. Оже-рекомбинация.

- Пространственно неоднородные неравновесные распределения носителей заряда. Амбиполярная диффузия. Эффект Дембера. Длина диффузии неравновесных носителей заряда.

### **7. Контактные явления в полупроводниках**

- Схема энергетических зон в контакте металл-полупроводник. Обогащенные, обедненные и инверсионные слои пространственного заряда вблизи контакта. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки.

- Энергетическая диаграмма  $p-n$  перехода. Инжекция неосновных носителей заряда в  $p-n$  переходе.

- Гетеропереходы. Энергетические диаграммы гетеропереходов.

- Варизонные полупроводники.

- 8. Свойства поверхности полупроводников

- Поверхностные состояния и поверхностные зоны. Искривление зон, распределение заряда и потенциала вблизи поверхности. Поверхностная рекомбинация.

- Эффект поля.
- Таммовские уровни. Скорость поверхностной рекомбинации.

#### **8. Оптические явления в полупроводниках**

- Комплексная диэлектрическая проницаемость, показатель преломления, коэффициент отражения, коэффициент поглощения. Связь между ними и соотношения Крамерса-Кронига.

- Межзонные переходы. Край собственного поглощения в случае прямых и непрямых, разрешенных и запрещенных переходов. Экситонное поглощение и излучение. Спонтанное и вынужденное излучение.

- Поглощение света на свободных носителях заряда.
- Поглощение света на колебаниях решетки. Рассеяние света колебаниями решетки, комбинационное рассеяние на оптических фононах (Рамана - Ландсберга), рассеяние на акустических фононах (Бриллюэна - Манделъштама).

- Влияние примесей на оптические свойства. Примесная структура оптических спектров вблизи края собственного поглощения в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Межпримесная излучательная рекомбинация. Экситоны, связанные на примесных центрах.

- Оптические явления во внешних полях. Эффект Франца-Келдыша. Эффект Поккельса.

- Эффект Бурштейна-Мосса.
- Эффекты Фарадея и Фойгта.

#### **9. Фотоэлектрические явления**

- Примесная и собственная фотопроводимость. Влияние прилипания неравновесных носителей заряда на фотопроводимость.

- Оптическая перезарядка локальных уровней и связанные с ней эффекты. Термостимулированная проводимость.

- Фоторазогрев носителей заряда.
- Фотоэлектромагнитный эффект.



## 10. Некристаллические полупроводники

- Аморфные и стеклообразные полупроводники. Структура атомной матрицы некристаллических полупроводников. Идеальное стекло. Гидрированные аморфные полупроводники.

- Особенности электронного энергетического спектра неупорядоченных полупроводников. Плотность состояний. Локализация электронных состояний. Щель подвижности.

- Легирование некристаллических полупроводников.

- Механизмы переноса носителей заряда. Прыжковая проводимость. Закон Мотта.

- Спектры оптического поглощения некристаллических материалов. Правило Урбаха.

- Нестационарные процессы. Определение дрейфовой подвижности по измерениям времени пролета. Дисперсионный перенос.

- Влияние внешних воздействий на свойства некристаллических полупроводников. Метастабильные состояния.

## 11. Полупроводниковые структуры пониженной размерности и сверхрешетки

- Размерное квантование. Двумерные и квазидвумерные электронные системы и структуры, в которых они реализуются. Контра- и ковариантные композиционные сверхрешетки, легированные сверхрешетки легирования. Квантовые нити. Квантовые точки. Энергетический спектр электронов и плотность состояний в этих системах.

- Оптические явления в структурах с квантовыми ямами, правила отбора для межзонных и внутризонных (межподзонных) переходов. Межзонное поглощение и излучательная рекомбинация в этих структурах. Экситоны в квантовых ямах, квантово-размерный эффект Штарка.

- Электрические и гальваномагнитные явления в двумерных структурах. Эффект Шубникова-де Гааза. Общее представление о квантовом эффекте Холла.

## 12. Принципы действия полупроводниковых приборов

- Вольтамперная характеристика  $p-n$  перехода. Приборы с использованием  $p-n$  переходов.

- Туннельный диод. Диод Ганна. Биполярный транзистор. Тиристор.
- Энергетическая диаграмма структуры металл-диэлектрик-полупроводник
  - (МДП). Полевые транзисторы на МДП-структурах. Приборы с зарядовой связью.
  - Шумы в полупроводниковых приборах.
  - Фотоэлементы и фотодиоды. Спектральная чувствительность и обнаружительная способность. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Фотоэлектрические преобразователи, КПД преобразования.
  - Светодиоды и полупроводниковые лазеры. Инжекционные лазеры на основе двойной гетероструктуры.
  - Использование наноструктур в полупроводниковых приборах. Гетеротранзистор с двумерным электронным газом (НЕМТ). Гетеролазеры на основе структур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Резонансное туннелирование в двухбарьерной гетероструктуре и резонансно-туннельный диод. Оптический модулятор на основе квантово-размерного эффекта Штарка.

#### **Основная литература**

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
2. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
3. Киреев П.С. Физика полупроводников. М.: Высш. шк., 1975.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
6. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
7. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.

**Раздел 2. Дополнительные вопросы (по области исследования паспорта научной специальности 1.3.11. «Физика полупроводников»).**

#### **1. Детекторы ионизирующих излучений и заряженных частиц**



1.1. Ионизационные потери в твердых телах. Прохождение заряженных частиц высоких энергий через вещество. Поглощение оптического, рентгеновского и  $\gamma$ -излучений. Внутренний фотоэффект. Эффект Комптона. Генерация электрон-позитронных пар.

1.2. Физические основы работы полупроводникового детектора излучений. Электростатическая индукция заряда в твердых телах. Теорема Рамо-Шокли. Дрейфовый механизм сбора заряда из трека. Амплитудный спектр. Распределение Ландау. Эффективность сбора заряда. Эффективность регистрации излучения.

1.3. Материалы и структуры для детекторов ионизирующих излучений и заряженных частиц. Требования к материалам и структурам для детекторов. Основные типы детекторов (спектрометрические детекторы,  $dE-E$ -детекторы, координатные детекторы).

## 2. Полупроводниковые датчики

2.1. Полупроводниковые газовые сенсоры. Основные закономерности адсорбции частиц газа на поверхность полупроводника. Зависимости поверхностной плотности адсорбированных частиц от концентрации газа, температуры полупроводника и от времени. Принципы работы полупроводниковых газовых сенсоров. Зависимости характеристик сенсоров от концентрации детектируемых частиц и уровня влажности газовой смеси.

2.2. Датчики температуры. Физические принципы работы и основные характеристики датчиков на основе терморезисторов и диодов с барьером Шоттки. Возможности использования в качестве датчиков температуры других полупроводниковых приборов (диоды с  $p-n$ -переходом, биполярные транзисторы, тиристоры,  $S$ -диоды).

2.3. Датчики магнитного поля. Датчики на основе эффекта Холла. Принцип действия и основные характеристики магниторезисторов и магнитодиодов. Возможности использования в качестве датчиков магнитного поля биполярных и полевых транзисторов и тиристоров.



### **3. Фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазонов спектра**

3.1. Характеристики фотоприемников. Тепловые детекторы: термобатарей, болометры, пироэлектрические приемники, другие тепловые приемники. Теория фотонных детекторов. Фоторезисторы, фотовольтаические приемники излучения, фотоэлектрические преобразователи энергии, фототранзисторы. Гетеродинное детектирование. Примесные детекторы.

3.2. Фотоприемники на основе кремния и германия. Фотоэмиссионные детекторы на основе барьеров Шоттки. Матрицы фокальной плоскости: монолитные матрицы, гибридные матрицы.

3.3. Фотодетекторы на основе полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$ . Фотодетекторы на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$ . Фотоприемники на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$ . Фотоприемники на основе  $HgCdTe$ . Фотодетекторы на полупроводниковых сверхрешётках, структурах с квантовыми ямами и квантовыми точками.

### **4. Процессы микро- и нанотехнологии**

4.1. Планарная технология изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Групповой метод. Основные операции технологического процесса.

4.2. Литография. Фотолитография. Фотошаблоны. Рентгеновская, электронная и ионно-лучевая литография.

4.3. Легирование. Диффузионное легирование. Ионная имплантация.

4.4. Методы формирования полупроводниковых наноструктур.

### **5. Физические основы получения полупроводниковых материалов**

5.1. Термодинамика фазовой границы кристалл-среда. Условия равновесия фаз. Правило фаз Гиббса. Равновесие на искривленной поверхности раздела фаз.

Уравнение Гиббса - Томсона. Анизотропия поверхностной энергии. Равновесная форма кристалла. Атомная структура поверхности.

5.2. Элементарные процессы роста кристаллов: адсорбция и десорбция, поверхностная диффузия, встраивание в ступень. Источники ступеней и механизмы послойного роста грани. Феноменологические и атомистические модели образования зародышей на поверхности кристалла. Краевая задача поверхностной диффузии. Кинетика перемещения элементарных ступеней.

5.3. Эпитаксия. Образование зародыша на инородной поверхности. Механизмы эпитаксии по Франку-ван-дер-Мерве, Фольмеру-Веберу, Странскому-Крастанову. Псевдоморфный слой. Механизмы релаксации упругих напряжений.

## **6. Перспективные полупроводниковые материалы**

6.1. Углеродные наноматериалы (фуллерены, углеродные нанотрубки, графен). Физические и химические свойства, методы получения, применение.

6.2. Магнитные полупроводники. Классы магнитных материалов. Применение.

6.3. Органические полупроводники. Основные классы, строение, транспортные и оптические свойства. Применение.

## **7. Современное состояние вопросов по тематике, которой посвящена диссертация соискателя (реферат)**

Реферат должен быть написан лично соискателем на основе обзора литературы и отражать современное состояние общей проблемы и тех вопросов, которым посвящена диссертационная работа соискателя.



## ЛИТЕРАТУРА

### К разделу 1:

1. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / [Ю.К. Акимов, О.В. Игнатъев, А.И. Калинин, В.Ф. Кушнирук]; Под ред. Ю.К. Акимова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 343 с.
2. Толбанов О.П. Сбор заряда в полупроводниковых детекторах ионизирующих излучений: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТГУ, 2008. – 31 с.
3. Толбанов О.П. Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений и заряженных частиц: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТГУ, 2006. – 38 с.
4. Толбанов О.П. Полупроводниковые детекторы гамма-излучений на основе GaAs<Cr> для исследования наноструктур: Учебно-методическое пособие. – Томск: ТГУ, 2008. – 34 с.

### К разделу 2:

1. Гаман В.И. Физика полупроводниковых газовых сенсоров / В.И. Гаман; Нац. исслед. Томский гос. ун-т. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – 110 с.

URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000426793>

2. Гаман В.И., Алмаев А.В. Зависимости характеристик сенсоров на основе диоксида олова от концентрации водорода и уровня влажности газовой смеси // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 1. – С. 77–85.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие для студентов вузов. – 9-е изд., стер. – СПб: Лань, 2015. – 480 с.
4. Викулин И.М. Физика полупроводниковых приборов / И.М. Викулин, В.И. Стафеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1990. – 263 с.

### К разделу 3:

1. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники: учебное пособие / А.В. Войцеховский, И.И. Ижнин, В.П. Савчин, Н.М. Вакив; Томский гос. ун-т. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 559 с. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000464340>
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы / А. Рогальский; Пер. с англ. под ред. А.В. Войцеховского; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т физики полупровод., Том. гос. ун-т. – Новосибирск: Наука, 2003. – 636 с.

### К разделу 4:



1. Ефимов И.Е. Основы микроэлектроники: учебник: [для студентов технических вузов и университетов] / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. – Изд. 3-е, стер. – Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2016. – 383 с.
2. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учебное пособие для вузов / Л.А. Коледов. – Изд. 3-е, стер. – Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2016. – 399 с.
3. Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – Томск: В-Спектр, 2011. – 263 с. <http://nashol.com/2014040776708/tehnologiya-kremnievoi-nanoelektroniki-danilina-t-i-kagadei-v-a-anischenko-e-v-2011.html>
4. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 442 с.

К разделу 5:

1. Рашкович Л.Н. Физика кристаллизации / Л.Н. Рашкович. – М.: Научный мир, 2015. – 101 с.
2. Современная кристаллография. Т.3. Образование кристаллов. Под ред. Б.К. Вайнштейна. – М.: Наука, 1980. – 407 с.
3. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. – М: Наука, 2006. – 490 с.
4. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. – М: Физматлит, 2009. – 350 с.
5. Латышев А.В., Асеев А.Л. Моноатомные ступени на поверхности кремния. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 241 с.

К разделу 6:

1. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики Электронный ресурс [Т. 1]: учебник для студентов /В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. – Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2015 1. – онлайн-ресурс (442 с.): рис. [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=67462](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=67462) Электронное издание Доступ к полному тексту документа после регистрации пользователя на сайте <http://e.lanbook.com/> в локальной сети ПГУ.

2. Сорокин В.С., Антипов Б. Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Том 2. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. - Санкт-Петербург : Лань , 2016. – 377 с.
3. Кравченко А.Ф. Магнитная электроника: [учебное пособие] / А.Ф. Кравченко; отв. ред. И.Г. Неизвестный; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т физики полупроводников, М-во образования Рос. Федерации, Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2002. – 398 с.
4. Пул Ч.П. Нанотехнологии : [учебное пособие для студентов по направлению подготовки "Нанотехнологии"] / Ч. Пул - мл., Ф. Оуэнс; пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина. – Изд. 4-е, испр. и доп. – Москва: Техносфера, 2009. – 335 с.
5. Агринская Н.В. Молекулярная электроника: Учебное пособие. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 110 с. ([http://web.edu.ioffe.ru/NOK/edu/molecular\\_el.html](http://web.edu.ioffe.ru/NOK/edu/molecular_el.html)).
6. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. – 1995. – Т.165. – № 9. – С. 977–1009 (<http://ufn.ru/ru/articles/1995/9/a/>).
7. Макарова Т.Л. Магнитные свойства углеродных структур: Обзор // ФТП. – 2004. – Т. 38. – вып. 6. – С. 641–664 (<http://www.ioffe.ru/journals/ftp/2004/06/page-641.html.ru>).
8. Сорокин П.Б., Чернозатонский Л.А. Полупроводниковые наноструктуры на основе графена // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – №2. – С. 113–132. (<http://doi.org/10.3367/UFNr.0183.201302a.0113>).
9. Ферг А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178. – №.12. – С. 1336-1348 (<http://ufn.ru/ru/articles/2008/12/f/>).

### **Пример экзаменационного билета**

1. Структуры важнейших полупроводников: элементов  $A^{IV}$ ,  $A^{VI}$  и соединений типов  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ ,  $A^{IV}B^{VI}$ .
2. Равновесные и неравновесные носители заряда, квазиуровни Ферми. Скорость изменения концентрации носителей заряда в полупроводнике при биполярной генерации и межзонной рекомбинации.
3. Туннельный диод: общее описание ВАХ, расчёт туннельного тока.