

# Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе



\_\_\_\_\_ А.Л. Толстик

10.06.2016

Регистрационный № УД-2100/уч.

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности для специальности  
1-31 04 08 Компьютерная физика**

Минск 2016 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 04 08-2013; учебного плана № G31-144/уч.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

**Ю.М. Покотило** — доцент кафедры физической информатики и атомно-молекулярной физики Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

**А.В. Гиро** — старший преподаватель кафедры физической информатики и атомно-молекулярной физики Белорусского государственного университета.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физической информатики и атомно-молекулярной физики физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 13 от 23 мая 2016 г.);

Советом физического факультета (протокол № 9 от 30 мая 2016 г.).

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа дисциплины «Физические основы детектирования излучений и диагностики материалов» разработана для специальности 1-31 04 08 Компьютерная физика. Настоящая программа является оригинальной и разработана с учетом соответствующих требований образовательного стандарта РБ ОСВО 1-31 04 08-2013 к квалификации выпускника-специалиста «Физик. Программист».

*Цель учебной дисциплины* – дать студенту знания о физике процессов взаимодействия оптических фотонов, высокоэнергетических излучений и частиц с твёрдым телом, ознакомить с физическими принципами и средствами исследования структуры, состава и свойств твёрдых тел, а также приборных структур на их основе.

*Задачи учебной дисциплины* – дать студентам физический базис для понимания и объяснения работы фотоэлектрических преобразователей и твердотельных детекторов ионизирующих излучений, твердотельных лазеров, приборов электроники, элементов солнечной энергетики; научить студентов различным методикам измерения физических и химических параметров твёрдых тел и приборных структур на их основе.

*Материал курса основан* на базовых знаниях и представлениях, заложенных в дисциплинах «Оптика», «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра и элементарных частиц» и «Явления переноса в твердофазных материалах, микро- и наноструктурах».

*В результате изучения дисциплины студент должен:*

***знать:***

- теоретические основы взаимодействия разных видов излучений и частиц с твердым телом;
- принципы работы фотоприёмников и детекторов излучений и частиц;
- влияние электрических и магнитных полей на твердое тело;
- физические основы методик измерения электрических, оптических параметров твердых тел, анализа их структуры и элементного состава;

***уметь:***

- измерять оптические и электрические характеристики твердотельных материалов и приборных структур на их основе;
- на основе проведённых измерений рассчитывать параметры носителей заряда в твёрдых телах;
- использовать электромагнитные излучения и потоки частиц для анализа состава и структуры твердотельных материалов;
- применять подходящие типы фотоприёмников и детекторов для анализа различных видов излучений и потоков частиц;

***владеть:***

- методиками измерения и расчёта характеристик твёрдых тел, анализа их элементного состава и структуры;
- методами регистрации и анализа электромагнитного излучения и высокоэнергетических частиц.

В результате изучения дисциплины студент должен сформировать компетенции:

- уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;
- владеть системным и сравнительным анализом;
- владеть исследовательскими навыками;
- уметь работать самостоятельно;
- иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером;
- иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация);
- обладать качествами гражданственности;
- быть способным к социальному взаимодействию;
- обладать способностью к межличностным коммуникациям;
- владеть навыками здорового образа жизни;
- применять знания теоретических и экспериментальных основ физики и математики, методов измерения физических величин, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы, средств автоматизации, правового обеспечения хозяйственной деятельности и налоговой системы, государственного регулирования экономики и экономической политики;
- пользоваться глобальными информационными ресурсами, новой научной, технической и патентной литературой по физике, математике, информатике, экономике и инновационным технологиям, основами психолого-педагогических знаний, навыками самообразования и самосовершенствования;
- применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы;
- использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационно-образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов;
- пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения;
- реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности;
- осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям;
- определять цели инноваций и способы их достижения;
- применять методы анализа и внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины – 160, из них количество аудиторных часов – 70.

Форма получения высшего образования – очная, дневная.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и управляемой самостоятельной работы. На проведение лекционных занятий отводится 54 часов, на управляемую самостоятельную работу – 16 часа.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 8-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен (8 семестр).

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

**1. Задачи диагностики твёрдых тел.** Классификация методов диагностики твердых тел по видам зондирующих воздействий. Роль ЭВМ в постановке физического эксперимента. Твердое тело как среда информационных технологий.

**2. Кинетические эффекты в твердых телах и методы изменения удельного сопротивления.** Электропроводность, эффекты Холла и Гаусса, термоэлектрические эффекты Зеебека, Томсона и Пельтье, термомагнитные эффекты Нернста-Эттингсгаузена и Риги-Ледюка. Одно-, двух- и четырёх-зондовый методы измерений удельного сопротивления. Методы сопротивления растекания и Ван дер Пау. Высокочастотные бесконтактные методы.

**3. Измерений концентрации и подвижности носителей заряда и определения рекомбинационных параметров твёрдых тел.** Техника измерений эффекта Холла и геометрического магнитосопротивления. Определение параметров примесей и дефектов по температурным зависимостям концентрации и подвижности носителей заряда. Электрон-фононное взаимодействие. Центры с отрицательной эффективной корреляционной энергией в полупроводниках. Анализ электрически неоднородных слоёв и структур методами эффекта Холла и вольт-фарадных характеристик. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда из исследований фотопроводимости и модуляции проводимости точечным контактом. Фотомагнитный метод измерения рекомбинационных параметров. Определение коэффициента диффузии и диффузионной длины неосновных носителей заряда методами электрического и светового зонда.

**4. Оптические методы диагностики.** Оптические константы и методы их экспериментального определения. Информация, получаемая при исследовании поглощения и рассеяния света в твёрдом теле. Характеристика твёрдых тел методами люминесценции. Определение толщины эпитаксиальных и диэлектрических слоёв. Методы интерференционной спектроскопии и Фурье-спектроскопии. Эллипсометрический метод анализа поверхности твёрдых тел.

**5. Методы диагностики, основанные на зондирующем воздействии частиц и рентгеновских лучей.** Элементарные процессы взаимодействия рентгеновских лучей с твёрдым телом. Принципы рентгеноструктурного анализа. Рентгенодифрактометрия, рентгенотопографические методы Ланга, Берга-Баррета и Бормана, рентгеновская микроскопия. Методы рентгеноспектрального анализа. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и рентгеновский флюоресцентный анализ. Электронная Оже-спектроскопия и электронно-зондовый рентгеновский микроанализ. Растровая электронная микроскопия (РЭМ). РЭМ в режимах потенциального контраста и наведенного

тока. Вторично-ионная масс-спектрометрия. Спектрометрия обратного рассеяния быстрых и медленных ионов. Активационный анализ твёрдых тел.

**6. Твёрдые тела как среды информационных технологий.** Введение. Детектирование излучений – основа экспериментальной физики. Твёрдые тела как среды информационных технологий.

**7. Взаимодействие оптических фотонов с твёрдым телом.** Феноменологическое описание электромагнитных волн в твёрдом теле. Дисперсионное уравнение. Оптические константы твёрдых тел и физические основы их определения. Механизмы поглощения света в твёрдых телах. Поглощение света свободными носителями заряда. Собственное или фундаментальное поглощение. Экситонное и примесное поглощение твёрдых тел. Поглощение и отражение света оптическими фононами полярных кристаллов. Многофононное решёточное поглощение в гомеополлярных кристаллах. Поглощение колебаниями примесей и дефектов. Рассеяние света оптическими и акустическими фононами. Явления внутреннего фотоэффекта. Фотопроводимость. Эффект Дембера. Фотоэлектромагнитный эффект. Фотогальванический эффект в p-n-переходах и барьерах Шоттки.

**8. Принцип работы и параметры фотоприемников.** Фотоэлектрические полупроводниковые приёмники. Фоторезисторы. Фотодиоды и p-i-n-фотодиоды. Лавинные фотодиоды. Фотодиоды на основе барьеров Шоттки и гетеропереходов. Фототранзисторы. Параметры чувствительности, шумы, обнаружительная способность и инерционность фотоэлектрических полупроводниковых приемников. Фотоэмиссионные приёмники излучения. Фотоэлектронная эмиссия и вторично-электронная эмиссия. Принцип работы фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей. Тепловые приёмники излучений. Основные принципы работы. Термоэлектрические приемники. Болометры. Приёмники Голея. Пирозэлектрические фотоприёмники.

**9. Эффекты взаимодействия высокоэнергетических излучений и частиц с твёрдым телом.** Физические основы взаимодействия высокоэнергетических излучений с веществом. Общая характеристика высокоэнергетических излучений. Фотоэффект, эффект Комптона, образование электрон-позитронных пар, электрон-фотонные ливни. Механизмы торможения заряженных частиц в твёрдых телах. Ионизационные потери заряженных частиц. Радиационные потери электронов. Излучение Вавилова-Черенкова и переходное излучение. Упругое взаимодействие частиц с атомами твёрдых тел. Образование радиационных дефектов в кристаллах. Механизм порогового образования дефектов. Характеристика точечных дефектов, областей скопления и разупорядочения. Механизмы подпорогового дефектообразования кристаллов.

**10. Детекторы излучений и частиц.** Общая характеристика детекторов излучений. Амплитудный спектр, Энергетическое разрешение, Эффективность

регистрации. Ионизационный метод детектирования излучений и частиц. Газонаполненная ионизационная камера. Пропорциональный счётчик. Счётчик Гейгера. Полупроводниковые детекторы излучений. Сцинтилляционный метод детектирования излучений. Механизм сцинтилляций в неорганических и органических материалах. Принцип работы сцинтилляционного детектора. Детекторы излучений Вавилова-Черенкова и переходного излучения. Трековые детекторы заряженных частиц. Принципы регистрации треков. Камера Вильсона. Стримерная, диффузионная и пузырьковая камеры. Ядерные эмульсии. Диэлектрические трековые детекторы.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Формы контроля знаний
		Лекции	практические занятия	семинарские занятия	лабораторные занятия	УСР	
1.	Задачи диагностики твёрдых тел	2					устный опрос
2.	Кинетические эффекты в твёрдых телах и методы изменения удельного сопротивления	4				2	контрольная работа
3.	Измерений концентрации и подвижности носителей заряда и определения рекомбинационных параметров твёрдых тел	8				2	контрольная работа
4.	Оптические методы диагностики	4					устный опрос
5.	Методы диагностики, основанные на зондирующем воздействии частиц и рентгеновских лучей	6				4	защита рефератов
6.	Твёрдые тела как среды информационных технологий	2					устный опрос
7.	Взаимодействие оптических фотонов с твёрдым телом	8				2	контрольная работа
8.	Принцип работы и параметры фотоприемников	8				2	контрольная работа
9.	Эффекты взаимодействия высокоэнергетических излучений и частиц с твёрдым телом	6					устный опрос
10.	Детекторы излучений и частиц	6				4	защита рефератов
	<b>Всего часов</b>	<b>54</b>				<b>16</b>	



## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Рекомендуемая литература

#### *Основная*

1. Легостаев Н.Л., Четвергов К.В. Твердотельная электроника: учебное пособие. - Томск, 2011.-244 с.
2. Афанасьев В.П. и др. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. Санкт-Петербург, 2011.-168 с.
3. Москалюк В.А. и др. Сверхбыстродействующие приборы электроники. Киев, 2012.-480с.
4. Ермолов И.Н., Останин Ю.А. Методы и средства неразрушающего контроля качества.- М.:Высшая школа, 1988. - 368 с.
5. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. - М.:Радио и связь, 1985.-264 с.
6. Воробьёв Ю.В., Добровольский В.Н., Стриха В.И. Методы исследования полупроводников. - К.: Высшая школа, 1988. - 232 с.
7. Павлов А.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов: 2-е изд., перераб. и дополн. - М.: Высшая школа, 1987.- 239 с.
8. Рембеза С.И. Методы измерения основных параметров полупроводников. Учебное пособие. - Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 1989. - 222 с.
9. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич , С.Г. Калашников — М.: Наука, 1990.— 688 с.
10. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники: Учеб. руководство. М.: Наука, 1988. - 192 с.
11. Аут И., Генцов Д., Герман К.. Фотоэлектрические явления. М: Мир, 1980.- 208 с.
12. Фотоприёмники видимого и ИК диапазонов / Под ред. Р.Дж.Киеса: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. -328 с.

#### *Дополнительная*

1. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности.- М.: Мир, 1989.-564 с.
2. Мейер Дж., Эрикссон Л., Дэвис Дж. Ионное внедрение в полупроводники / Пер. с англ. под ред. В.М.Гусева.- М.: Мир, 1971.
3. Васильев А.Н., Михайлин В.В. Введение в спектроскопию твёрдого тела. - М.:Изд-во МГУ, 1987. - 192 с.
4. Физико-химические методы анализа. Практическое руководство: Учебное пособие для вузов./ Под ред чл.-корр.АН СССР В.Б. Алесковского. - Л.:Химия, 1988. - 376 с.
5. Вавилов В.С., Кив А.Е., Ниязова А.П. Механизм образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. - 368 с.
6. Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И. Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989. - 344 с.

7. Емцев В.В., Машовец Т.В. Примеси и дефекты в полупроводниках. М.: Радио и связь, 1981.
8. Ляпидиевский В.К. Методы детектирования излучений: Учеб. пособие для вузов. М: Энергоатомиздат, 1987. - 408 с.
9. Кунце Х.И. Методы физических измерений. М., 1989.

### **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

1. Устный опрос студентов;
2. Письменные контрольные работы;
3. Реферативные работы.

### **Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине**

#### *Рекомендуемые темы реферативных работ*

1. Емкостная спектроскопия глубоких уровней в полупроводниках.
2. Характеристика твёрдых тел методами люминесценции.
3. Оптическая микроскопия в режиме интерференционного контраста.
4. Электронно-зондовый рентгеновский микроанализ.
5. Атомно-силовая и туннельная микроскопия.
6. Просвечивающая электронная микроскопия.
7. Спектрометрия обратного рассеяния ионов в режиме каналирования.
8. Фотоприемники для систем оптической связи
9. Пировидиконы и их применение.
10. Основные характеристики люминесценции твёрдых тел
11. Принцип работы и применение светодиодов.
12. Сегнетоэлектричество: основные свойства и применение.
13. Механизмы отжига радиационных дефектов в кристаллах.
14. Черенковские детекторы и их применение.
15. Мессбауэрская спектрометрия твердых тел.

#### *Рекомендуемые темы контрольных работ*

1. Кинетические эффекты в твердых телах.
2. Нахождение рекомбинационных параметров твёрдых тел.
3. Взаимодействие оптического излучения с твёрдым телом.
4. Фотоприёмники.

### **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Текущий контроль знаний в семестре проводится как управляемая самостоятельная работа (УСР) на лекциях и осуществляется в форме устных

опросов, 4-х письменных контрольных работ по вопросам программы, подготовки и защиты 2-х рефератов. Форма текущей аттестации – экзамен в 8 семестре. Система оценивания – рейтинговая.

Каждая контрольная работа включает 5-15 вопросов и заданий. Для ответов на них отводится 90 мин. За каждый правильный ответ начисляется  $Y$  баллов (ответ верен и точен),  $Y \cdot 3/4$  или  $Y/2$  (ответ неполный или содержит неточности, но в целом он верен). Значение  $Y$  может варьироваться от 0,5 до 3, в зависимости от типа и сложности вопроса. Если ответ отсутствует или не верный, начисляется 0 баллов. Для некоторых вопросов за расширенные ответы, показывающие отличное знание вопроса, могут начисляться дополнительно до 1 балла, которые учитываются при вычислении итоговой отметки. Результаты контрольной работы оцениваются величиной  $K = \sum Y_i$ .

Защита рефератов проводится в форме устного выступления. Оценка реферата по 10-балльной шкале составляет среднее арифметическое из оценки выступления и оценки письменного реферата.

Итоговая оценка текущей успеваемости выставляется по формуле:

$$T = 0,4K + 0,4P + 0,2Y,$$

где  $K$ ,  $P$  и  $Y$  – среднеарифметические оценки контрольных работ, рефератов и устных ответов соответственно.

Студент допускается к экзамену при текущей оценке не менее 4 баллов.

Общая рейтинговая оценка по дисциплине выставляется по формуле:

$$P = 0,4T + 0,6Э,$$

где  $Э$  – экзаменационная оценка.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Явления переноса в твердофазных материалах, микро- и нано-структурах	Кафедра физической информатики и атомно-молекулярной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № 13 от 23.05.2016
Электричество и магнетизм	Кафедра общей физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № 13 от 23.05.2016
Оптика	Кафедра общей физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № 13 от 23.05.2016
Физика атома и атомных явлений	Кафедра физической информатики и атомно-молекулярной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте протокол № 13 от 23.05.2016

