

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
электроники, фотоники и
молекулярной физики
А.С. Батурин**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Фотоэлектронные приборы на основе германия и кремния
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической электроники
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.В. Никонов, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физической электроники 04.02.2023

Аннотация

Курс "Фотоэлектронные приборы на основе германия и кремния" предусматривает изучение основных свойств германия и кремния и физических принципов работы различных фотоэлектронных приборов на их основе.

Задачи курса:

- ознакомление с особенностями кристаллической структуры германия и кремния, их основными квантовомеханическими и электрофизическими характеристиками;
- изучение физических принципов работы различных фотоэлектронных приборов на основе германия и кремния;
- ознакомление с предельными параметрами, достигнутыми у этих приборов.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- особенности кристаллической структуры германия и кремния, их основные квантовомеханические и электрофизические характеристики;
- физические принципы работы различных фотоэлектронных приборов на основе германия и кремния;
- предельные параметры этих приборов.

Владеть:

- знаниями и навыками работы с ИК-приёмниками на германии и кремнии при решении возникающих задач.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Полупроводники IV группы германий и кремний.
2. Основные характеристики полупроводниковых фотоприёмников
3. Фотодиоды, детекторы ионизирующих излучений, солнечные батареи
4. Лавинные фотодиоды.
5. Примесные фоторезисторы длинноволнового ИК-диапазона (6-30 мкм).
6. Примесные фоторезисторы дальнего ИК-диапазона (30-200 мкм).
7. Примесные фоторезисторы субмиллиметрового диапазона (200-1000 мкм).
8. Фотоприёмники с блокированной проводимостью по примесной зоне.
9. Примесные инжекционные фотодиоды.
10. Другие типы фотоприёмников на основе германия и кремния.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- изучение основных свойств германия и кремния и физических принципов работы различных фотоэлектронных приборов на их основе.

Задачи дисциплины

- ознакомление с особенностями кристаллической структуры германия и кремния, их основными квантовомеханическими и электрофизическими характеристиками;
- изучение физических принципов работы различных фотоэлектронных приборов на основе германия и кремния;
- ознакомление с предельными параметрами, достигнутыми у этих приборов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
--------------------------------	-----------------------------------

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- особенности кристаллической структуры германия и кремния, их основные квантовомеханические и электрофизические характеристики;
- физические принципы работы различных фотоэлектронных приборов на основе германия и кремния;
- предельные параметры этих приборов.

уметь:

- применять полученные знания для физического проектирования конкретных приборов;
- применять полученные знания при работе с конкретными приборами;
- определять предельные и реально достижимые параметры приборов.

владеть:

- знаниями и навыками работы с ИК-приёмниками на германии и кремнии при решении возникающих задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Полупроводники IV группы германий и кремний.	2	6		6
2	Основные характеристики полупроводниковых фотоприёмников.	2	6		6
3	Фотодиоды, детекторы ионизирующих излучений, солнечные батареи.	2	6		6
4	Лавинные фотодиоды.	2	6		3
5	Примесные фоторезисторы длинноволнового ИК-диапазона (6-30 мкм).	2	6		4
6	Примесные фоторезисторы дальнего ИК-диапазона (30-200 мкм).	1	3		4
7	Примесные фоторезисторы субмиллиметрового диапазона (200-1000 мкм).	1	3		4
8	Фотоприёмники с блокированной проводимостью по примесной зоне.	1	3		4

9	Примесные инжекционные фотодиоды.	1	3		4
10	Другие типы фотоприёмников на основе германия и кремния.	1	3		4
Итого часов		15	45		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Полупроводники IV группы германий и кремний.

Основные свойства. Одноэлементные полупроводники IV группы германий и кремний. Их основные квантовомеханические и электрофизические характеристики. Кристаллическая и зонная структуры германия и кремния. Зона проводимости и валентная зона. Собственная проводимость. Донорные и акцепторные примеси. Создаваемые ими энергетические уровни.

2. Основные характеристики полупроводниковых фотоприёмников.

Типы фотоэлектронных приборов на основе германия и кремния и физические принципы, на которых основана их работа. Области их применения.

3. Фотодиоды, детекторы ионизирующих излучений, солнечные батареи.

Основные характеристики полупроводниковых фотоэлектронных приборов. Режимы включения в электрическую цепь. Коэффициент сбора заряда и коэффициент усиления фотоприёмников. Токовая и вольтная чувствительность фотоприёмников. Их быстродействие, шумы (тепловой, генерационно-рекомбинационный, дробовой, избыточный), пороговая чувствительность, пороговая облучённость и обнаружительная способность. Их теоретический предел в зависимости от спектрального диапазона и фоновой облучённости.

4. Лавинные фотодиоды.

Фототранзисторы. Приборы с p-n-переходами: фотодиоды, детекторы ионизирующих излучений (альфа, бета, гамма-рентген) и солнечные батареи. P-n-переход при прямом и обратном смещении. Темновой ток и фототок. Квантовая эффективность и коэффициент сбора заряда. Дифференциальное сопротивление. P-i-n-фотодиоды. Режим короткого замыкания и холостого хода. Токовая чувствительность. Шумы (тепловой и дробовой), пороговая чувствительность и обнаружительная способность. Фотодиоды Шоттки. Их спектральный диапазон и квантовая эффективность. Коэффициент полезного действия солнечного фотоэлемента. Особенности конструкции детекторов ионизирующих излучений.

5. Примесные фоторезисторы длинноволнового ИК-диапазона (6-30 мкм).

Примесные фоторезисторы длинноволнового ИК-диапазона (6-30 мкм). Примеси в германии и кремнии, обеспечивающие чувствительность в данном спектральном интервале. Коэффициент усиления, токовая и вольтная чувствительность. Быстродействие и частотная характеристика при сильных и низких уровнях фоновой облучённости. Шумы (генерационно-рекомбинационный и дробовой) и обнаружительная способность при сильных и низких уровнях облучённости, их частотная зависимость. Предельные достигнутые уровни обнаружительной способности для фотоприёмников космического назначения. Особенности их стыковки с предусилителями. Оптический гетеродинный фотоприём. Увеличение токовой чувствительности при дополнительной собственной подсветке. Режим объёмного накопления и аналогового считывания при периодическом импульсном питании.

6. Примесные фоторезисторы дальнего ИК-диапазона (30-200 мкм).

Примесные фоторезисторы дальнего ИК-диапазона (30-200 мкм). Примеси в германии и кремнии, обеспечивающие чувствительность в данном спектральном интервале. Зависимость длинноволновой границы спектрального диапазона в германиевом фоторезисторе от приложенного механического напряжения. Токовая чувствительность и обнаружительная способность. Ограничение по приложенному напряжению.

7. Примесные фоторезисторы субмиллиметрового диапазона (200-1000 мкм).

Примесные фоторезисторы субмиллиметрового диапазона (200-1000 мкм). Водородоподобные центры (H-центры, или A+ и D- центры) в германии и кремнии. Их заполнение в присутствии фоновой подсветки и создаваемая ими длинноволновая фоточувствительность.

8. Фотоприёмники с блокированной проводимостью по примесной зоне.

Лавинное умножение в этих приёмниках. Фотоприёмники с блокированной проводимостью по примесной зоне. Структура и принцип действия фотоприёмника с блокированной проводимостью по примесной зоне. Характеристики реализованных приёмников на германии и кремнии. Токовая и пороговая чувствительность, обнаружительная способность. Лавинное умножение в этих приёмниках. Счёт единичных фотонов. Материалы и спектральные интервалы, для которых реализованы приёмники с блокированной примесной зоной. Области применения.

9. Примесные инжекционные фотодиоды.

Примесные инжекционные фотодиоды. Структура и принцип действия. Коэффициент усиления и токовая чувствительность. Параметры материала и диапазон уровней фоновой облучённости, при которых достигаются высокие значения усиления без ухудшения обнаружительной способности. Быстродействие и частотная характеристика при низких уровнях фоновой облучённости. Шумы (генерационно-рекомбинационный нескольких типов и дробовой, коэффициент шума) и обнаружительная способность. Зависимость обнаружительной способности от напряжения. Сравнение с фоторезистором, имеющим аналогичную базу. Координатная чувствительность в инжекционном фотодиоде. Режим объёмного накопления и аналогового считывания при периодическом импульсном питании. Применения, в которых примесные инжекционные фотодиоды имеют преимущество перед аналогичными фоторезисторами. Материалы и спектральные интервалы, для которых реализованы примесные инжекционные фотодиоды. Проблема создания матриц примесных инжекционных фотодиодов.

10. Другие типы фотоприёмников на основе германия и кремния.

Другие типы ИК-приёмников на основе германия и кремния. Приёмники на основе соединения Ge:Si. Приёмники на фотоэлектромагнитном эффекте.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в полупроводниковую микрофотоэлектронику инфракрасного диапазона [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Стафеев: М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Ин-т проблем передачи информации им. А.А. Харкевича. - М., МФТИ, 2012, 91 с.
2. Альтшуллер Г.С. Маленькие необъятные миры: Стандарты на решение изобретательских задач В сб. "Нить в лабиринте". - Петрозаводск: Карелия, 1988. - С. 165-230.
<http://www.altshuller.ru/triz/standards.asp>
3. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход. Мир, 1981.
4. А. И. Половинкин Основы инженерного творчества. 2-е издание, переработанное и дополненное // Москва, «Машиностроение», 1988.

Дополнительная литература

1. Скрипко Л.П. Формирование обобщенных методов решения типовых профессиональных задач инженера-технолога при изучении курса физики в техническом вузе // Диссертация на соискание степени к.п.н, Астраханский государственный университет, 2006
2. Баршай И. Л. и др. Исследования и изобретательство в машиностроении. – Минск: Технопринт, 2003. – 237 с.
3. Ревенков А.В., Резчикова Е.В. «Теория и практика решения технических задач» Форум. Москва, 2008

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.google.com/patents>
2. <http://www.uspto.gov>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных и семинарских занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, прослушавший курс лекций и семинаров, должен овладеть общим понятийным аппаратом и научиться применять теоретические знания на практике.

Успешное освоение курса требует:

- 1) посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом; ведение конспектов занятий; активное участие в обсуждении занятий;
- 2) важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультацией к преподавателю.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Физика перспективных технологий: электроника и квантовые технологии Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической электроники
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	А.В. Никонов, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Фотоэлектронные приборы на основе германия и кремния» обучающийся должен:

знать:

- особенности кристаллической структуры германия и кремния, их основные квантовомеханические и электрофизические характеристики;
- физические принципы работы различных фотоэлектронных приборов на основе германия и кремния;
- предельные параметры этих приборов.

уметь:

- применять полученные знания для физического проектирования конкретных приборов;
- применять полученные знания при работе с конкретными приборами;
- определять предельные и реально достижимые параметры приборов.

владеть:

- знаниями и навыками работы с ИК-приёмниками на германии и кремнии при решении возникающих задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Вопросы для подготовки к экзамену:

1. Дать определение инженерной задачи
2. Формализованное описание инженерной задачи
3. Онтологическая модель «объект – свойство - значение»
4. Построение матрицы применений
5. Способ как последовательность действий.
6. Применение объектов, описываемое в терминах способа.
7. Повышение и понижение уровня абстракции при решении инженерных задач.
8. Прямая задача. Применение эффектов и инженерных решений для решения инженерных задач.
9. Методы ТРИЗ. Стандарты решения изобретательских задач по Альтшуллеру.
10. Методы проверки решения на предельных случаях.

11. Методы доказательства эффективности решения
12. Применение математических абстракций при решении инженерных задач.
13. Применение теории множеств.
14. Обратная задача. Применение объектов и эффектов для новых инженерных задач.
15. Генерация новых инженерных задач под имеющееся инженерное решение.
16. Описание семантической картины предметной области.
17. Метод мозгового штурма.
18. Синектический метод
19. Метод «встречного» решения проблемы.
20. Патент, как метод описания решения инженерной задачи.
21. Структура заявки.
22. Особенности написания формулы изобретения. Многозвенные формулы.
23. Полезная модель
24. Что такое Know-how и в каких случаях используется эта форма защиты интеллектуальной собственности
25. Особенности патентной защиты алгоритмов.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1.

1. Повышение и понижение уровня абстракции при решении инженерных задач.
2. Особенности написания формулы изобретения. Многозвенные формулы.

Пример 2.

1. Описание семантической картины предметной области.
2. Синектический метод.

Критерии оценивания

10 баллов — (ПРЕВОСХОДНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы, а также по основным вопросам, выходящим за ее пределы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- безупречное владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- выраженная способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации;
- полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, использовать научные достижения других дисциплин;
- творческая самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, активное участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

9 баллов — (ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- точное использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно и творчески решать сложные проблемы в нестандартной ситуации в рамках учебной программы, полное усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, творческое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

8 баллов — (ПОЧТИ ОТЛИЧНО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем поставленным вопросам в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины (методами комплексного анализа, техникой информационных технологий), умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач; способность самостоятельно решать сложные проблемы в рамках учебной программы;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку с позиций государственной идеологии (по дисциплинам социально-гуманитарного цикла);
- активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, систематическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

7 баллов — (ОЧЕНЬ ХОРОШО):

- систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам учебной программы;
- использование научной терминологии (в том числе на иностранном языке), лингвистически и логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач;
- усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

6 баллов — (ХОРОШО):

- достаточно полные и систематизированные знания в объеме учебной программы;
- использование необходимой научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать обоснованные выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач; способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку; активная самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, периодическое участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

5 баллов — (ПОЧТИ ХОРОШО):

- достаточные знания в объеме учебной программы;
- использование научной терминологии, стилистически грамотное, логически правильное изложение ответа на вопросы, умение делать выводы;
- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении учебных и профессиональных задач;
- способность самостоятельно применять типовые решения в рамках учебной программы;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- умение ориентироваться в базовых теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им сравнительную оценку;
- самостоятельная работа на практических, лабораторных занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий.

4 балла — (УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), ЗАЧТЕНО:

- достаточный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- усвоение основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок;

- владение инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении стандартных (типовых) задач;
- умение под руководством преподавателя решать стандартные (типовые) задачи;
- умение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им оценку;
- работа под руководством преподавателя на практических, лабораторных занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий.

3 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО), НЕЗАЧТЕНО:

- недостаточно полный объем знаний в рамках образовательного стандарта;
- знание части основной литературы, рекомендованной учебной программой дисциплины;
- использование научной терминологии, изложение ответа на вопросы с существенными лингвистическими и логическими ошибками;
- слабое владение инструментарием учебной дисциплины, некомпетентность в решении стандартных (типовых) задач;
- неумение ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях изучаемой дисциплины;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

2 балла — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- фрагментарные знания в рамках образовательного стандарта;
- знания отдельных литературных источников, рекомендованных учебной программой дисциплины;
- неумение использовать научную терминологию дисциплины, наличие в ответе грубых стилистических и логических ошибок;
- пассивность на практических и лабораторных занятиях, низкий уровень культуры исполнения заданий.

1 балл — (НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО):

- отсутствие знаний и компетенций в рамках образовательного стандарта или отказ от ответа.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов в устной и (или) письменной форме.