

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы работы приемников оптического излучения
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической электроники
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 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 "Основы работы приемников оптического излучения" предусматривает изучение физических основ создания и работы приёмников оптического излучения.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение физических основ создания и работы приёмников оптического излучения.

#### Задачи дисциплины

- ознакомление с принципами регистрации оптического излучения и предельными параметрами;
- изучение физических основ работы фотонных и тепловых приёмников излучения;
- ознакомление с фотоприёмными устройствами (Конструкция, системы термостатирования; и т.д.).

### 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, оценить 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:

- физические основы работы приёмников оптического излучения (ФП), фотоприёмных устройств (ФПУ);
- области применения ФП и ФПУ;
- предельные параметры ФП и ФПУ;
- современное состояние, научно-технические проблемы и перспективы развития ФП.

уметь:

- оценить и аргументировать применение ФП при решении конкретных задач;
- получать информацию с ФП и ФПУ и её анализировать;
- определять предельный и реально достижимый уровень параметров ФП.

владеть:

- знаниями и навыками работы с ФП и ФПУ при решении возникающих задач;
- методами проведения экспериментальных работ при поиске и создании новых типов ФП.

### 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

	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.
--	---

№	Тема (раздел) дисциплины	Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Общие свойства фотоприёмников		14		15
2	Фотонные ФПУ на основе внутреннего фотоэффекта		14		16
3	Методы приёма оптического излучения		16		20
4	Фотоэмиссионные фотоприёмники		16		24
Итого часов			60		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Общие свойства фотоприёмников

Значение и место фотоприёмников (ФП) в современной науке и технике. Особенности инфракрасной (ИК) области спектра. Физические принципы приёма оптического излучения. ФП тепловые и фотонные. Общие свойства их и различия.

##### 2. Фотонные ФПУ на основе внутреннего фотоэффекта

Параметры ФП. Режим ограничения фоновым излучением.

##### 3. Методы приёма оптического излучения

Принципиальные ограничения чувствительности ФП. Флуктуации. Связь флуктуаций с шумами ФП. Модель шумов ФП. Тепловой шум. Дробовой, токовый и избыточные шумы. Генерационно-рекомбинационный шум. Флуктуации температуры и светового потока. Минимальная обнаруживаемая мощность.

##### 4. Фотоэмиссионные фотоприёмники

Фотонные ФП на основе внутреннего фотоэффекта. Неравновесные носители заряда. Квазиуровни Ферми. Феноменологическое описание фотопроводимости. Коэффициент фотоэлектрического усиления фотопроводника. Произведение коэффициента фотоэлектрического усиления на ширину полосы фотопроводника. Режим «вытягивания носителей».

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

Необходимое оборудование для практических занятий: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).  
Обеспечение самостоятельной работы: доступ в сеть Интернет, доступ к рекомендованной литературе.

#### 6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Дирочка А.И., Курбатов Л.Н. Фотоэлектроника. В кн. Базовые лекции по электронике. т. II. Твердотельная электроника. с. 206 - 294. М.: Техносфера, 2009, 608 с.
2. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы.– М.: Физматкнига, 2007. – 384 с.
3. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприёмные устройства.– М.: Физматкнига, 2012. – 368 с.
4. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды.– М.: Физматкнига, 2011. – 448 с.
5. Пономаренко В.П., Филачёв А.М. Инфракрасная техника и электронная оптика.–М.: Физматкнига, 2006 - 336 с.

#### Дополнительная литература

1. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010. – 128 с
2. Сизов Ф.Ф. Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых» участках спектра. Киев: Академперіодика, 2008, 460 с.

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

Не используются

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

На занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физической электроники
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	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, оценить 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 «Основы работы приемников оптического излучения» обучающийся должен:

### знать:

- физические основы работы приёмников оптического излучения (ФП), фотоприёмных устройств (ФПУ);
- области применения ФП и ФПУ;
- предельные параметры ФП и ФПУ;
- современное состояние, научно-технические проблемы и перспективы развития ФП.

### уметь:

- оценить и аргументировать применение ФП при решении конкретных задач;
- получать информацию с ФП и ФПУ и её анализировать;
- определять предельный и реально достижимый уровень параметров ФП.

### владеть:

- знаниями и навыками работы с ФП и ФПУ при решении возникающих задач;
- методами проведения экспериментальных работ при поиске и создании новых типов ФП.

## 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

1. На какие части спектра делиться оптический диапазон излучения?
2. Особенности ИК области спектра оптического диапазона.
3. Свойства равновесного (квазиравновесного) излучения.
4. Закон Кирхгофа для излучения.
5. Тенденции развития приёмников излучения.
6. Чем отличается приемник излучения (радиометр) от приёмника изображения?
7. Найти связь между интегральной и монохроматической чувствительностями. Получить выражение для коэффициента использования ФП..
8. Что такое «белый» шум? Перечислить основные шумы, ограничивающие порог ФП.
9. Отличие минимально обнаружимой мощности от порога ФП.
10. Из каких материалов изготавливают ФП для УФ, видимой и ИК областей спектра?
11. Назовите основные плотности вероятности используемые в фотоэлектронике.

12. Чем отличается усреднение по времени от усреднения по ансамблю? В каком процессе среднее по ансамблю равно среднему по времени?
13. Назовите механизмы возникновения шумов: теплового, дробового, фотонного, генерационно-рекомбинационного.
14. Оцените средний квадрат мощности фотонного шума в предельных случаях высоких и низких частот.
15. Что такое коэффициент шума ФП?
16. Какие бывают режимы регистрации сигнала ФП?
17. Что такое порог (пороговая чувствительность) ФП?
18. Каким образом находят порог ФП.
19. Когда используется приближение электронейтральности при решении задачи о фотоэлектрических явлениях в твёрдых телах?
20. Когда используется приближение электродинамической стационарности при решении задачи о фотоэлектрических явлениях в твёрдых телах?
21. Что такое время жизни неравновесного носителя заряда? Найти сечение захвата свободного носителя заряда на кулоновский центр.
22. Межзонная рекомбинация. Зависимость коэффициента рекомбинации от параметров кристалла.
23. Рекомбинация через локальные состояния. Формула Шокли-Рида.
24. Линейная релаксация электропроводности. Основные свойства.
25. Квадратичная релаксация электропроводности. Основные свойства.
26. Найти стационарную монополярную фотопроводимость без учёта поверхностной рекомбинации.
27. Физический смысл коэффициента фотоэлектрического усиления фоторезистора. Механизм усиления.
28. Фоторезистор с накоплением сигнала. Механизм накопления.
29. Фотоэдс. Природа возникновения. Что необходимо для наблюдения фотоэдс?
30. Фотогальванические ФП. Зависимость темнового тока от параметров полупроводника.
31. Электрическая эквивалентная схема р-п перехода. Удельная ёмкость.
32. ВАХ реального полупроводникового диода.
33. Режимы работы полупроводникового фотоэлемента. Общие свойства и отличия фотовольтаического и фотодиодного режимов.
34. Лавинные фотодиоды (ЛФД). Механизм образования лавины. Структура ПФД.
35. Коэффициент умножения ЛФД. Предельные случаи ( $\alpha = 0$  и  $\alpha = \infty$ ).
36. Шумы умножения ЛФД.
37. Сверхрешётки (СР). Классические и квантовые СР. Чем обусловлены особенности работы приборов на СР.
38. Физические принципы работы ФП на сверхрешётках.
39. Полупроводниковые материалы для ФП.
40. Технология создания фоточувствительных элементов.
41. Привести блок-схему фотоэмиссионного ФП.
42. Влияние примеси на эффективность работы фотокатода.
43. Найти квантовый выход фотоэмиссии полупроводника.
44. Общие свойства и различия классических и ОЭС-фотокатодов.
45. Соотношение между энергетическими и световыми единицами.
46. Принцип работы фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).
47. Найти коэффициент умножения ФЭУ.
48. Канальный ФЭУ.
49. Избыточные шумы ФЭУ.
50. Электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Принцип действия.
51. Использование микроканальных и волоконно-оптические пластин в ЭОП.
52. Какие физические явления используют для создания тепловых приёмников излучения (ТПИ)?
53. Уравнение теплового баланса ТПИ.
54. Температурный шум ТПИ.
55. Тепловое сопротивление при радиационном теплообмене.

56. Болометры полупроводниковые и сверхпроводящие.
57. Радиационный элемент. Динамическое сопротивление.
58. Термоэлектрический охладитель (ТЭО). Добротность ТЭО.
59. Природа пирозлектрического эффекта. Пирозлектрический коэффициент.
60. Особенности работы пирозлектрического приёмника излучения.
61. Сравнение прямого приёма (детектирования) и гетеродинного приёма излучения.
62. Микрокриогенные системы (МКС) охлаждения ФП. Цикл Стирлинга.
63. Тенденции развития приёмников изображения.

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