

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики  
В.В. Иванов**

|                            |  |
|----------------------------|--|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>   |
| <b>по дисциплине:</b>      | Семинар по квантовой электронике   |
| <b>по направлению:</b>     | Электроника и нанoeлектроника  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника<br>Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики<br>кафедра квантовой электроники |
| <b>курс:</b>               | 1  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: Ю.А. Кротов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой электроники 29.05.2020

## Аннотация

Курс "Семинар по квантовой электронике" предусматривает приобретение студентами глубоких и современных знаний по основам квантовой электроники: взаимодействию излучения со средами, принципами работы и построения лазеров различных типов, нелинейным процессами в лазерных средах.

Задачи курса:

- развитие у студента понимания процессов, происходящих во время работы лазера;
- освещение физики работы лазеров различных типов, их особенностей и областей применения;
- развитие у студентов понимания физики нелинейных процессов, происходящих в лазерных средах, описание применимости их в квантовой электронике;
- изложение современных подходов и новых векторов развития в области квантовых оптических систем.

По результатам освоения курса студент должен:

Знать:

- основы теории физики процессов в лазерах, их строения и применения.

Уметь:

- рассчитывать и анализировать квантовые оптические системы для различных применений, оценивать их практическую полезность для применения в области квантовой электроники.

Владеть:

- физико-математическим аппаратом, описывающим основные физические явления, происходящие в материалах и объектах квантовой электроники.

Основное содержание курса изложено в следующих разделах:

1. Основы квантовой теории излучения.
2. Основные принципы работы лазера.
3. Режимы генерации лазеров.
4. Различные типы лазеров.
5. Нелинейные процессы в лазерных средах.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- приобретение студентами глубоких и современных знаний по основам квантовой электроники: взаимодействию излучения со средами, принципами работы и построения лазеров различных типов, нелинейным процессами в лазерных средах.

### Задачи дисциплины

- развитие у студента понимания процессов, происходящих во время работы лазера;
- освещение физики работы лазеров различных типов, их особенностей и областей применения;
- развитие у студентов понимания физики нелинейных процессов, происходящих в лазерных средах, описание применимости их в квантовой электронике;
- изложение современных подходов и новых векторов развития в области квантовых оптических систем.

## 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:

- основы теории физики процессов в лазерах, их строения и применения.

уметь:

- рассчитывать и анализировать квантовые оптические системы для различных применений, оценивать их практическую полезность для применения в области квантовой электроники.

владеть:

- физико-математическим аппаратом, описывающим основные физические явления, происходящие в материалах и объектах квантовой электроники.

### 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                     | Основы квантовой теории излучения.     |   | 6        |                 | 3              |
| 2                     | Основные принципы работы лазера.       |   | 6        |                 | 3              |
| 3                     | Режимы генерации лазеров.              |   | 6        |                 | 3              |
| 4                     | Различные типы лазеров.                |   | 6        |                 | 3              |
| 5                     | Нелинейные процессы в лазерных средах. |   | 6        |                 | 3              |
| Итого часов           |  |   | 30       |                 | 15             |
| Подготовка к экзамену |  | 0 час.  |          |                 |                |
| Общая трудоёмкость    |  | 45 час., 1 зач.ед.  |          |                 |                |

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Основы квантовой теории излучения.

Вещество как система многих частиц. Уравнение Шредингера и зависимость волновой функции от времени. Понятие о квантовом излучении. Формула Планка и коэффициенты Эйнштейна. Общая характеристика и свойства электромагнитного поля в стационарном состоянии. Разложение электромагнитного поля по свободным типам колебаний. Поглощение, переизлучение, рассеяние.

## 2. Основные принципы работы лазера.

Колебательные процессы электромагнитного поля. Работа лазера как генератора. Основные элементы конструкции лазера. Трех- и четырехуровневые системы в лазерах. Скоростные уравнения.

## 3. Режимы генерации лазеров.

Различные режимы работы лазера. Непрерывный режим работы. Генерация импульсов в лазере. Полезные потери в лазере, перенос излучения.

## 4. Различные типы лазеров.

Лазеры различных типов и их применения в современной квантовой электронике. Твердотельные и газовые лазеры. Полупроводниковые и волоконные лазеры.

## 5. Нелинейные процессы в лазерных средах.

Нелинейные процессы в средах. Генерация второй гармоники, фазовый синхронизм. Генерация суммарных и разностных частот, параметрические генераторы.

## 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. Принципы лазеров [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / О. Звелто ; пер. с англ. Д. Н. Козлова [и др.] ; под науч. ред. Т. А. Шмаонова ; рус. пер. перераб. и доп. при участии автора книги .— 4-е изд. — СПб. : Лань, 2008 .— 720 с.
2. А.Н.Пихтин Оптическая и квантовая электроника.М., «Высшая школа»2001г.,573с
3. Тарасов Л. В. Четырнадцать лекций о лазерах. Изд. 2-е, перераб. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. — 176 с.
4. В.Г.Дмитриев, Л.В.Тарасов Прикладная нелинейная оптика. М. Наука 2004г.

### Дополнительная литература

1. Кротов Ю. А. Источники спонтанного и вынужденного мягкого рентгеновского излучения. Бюллетень Лазерной ассоциации, № 167, 2005 г.
2. Панченко В.Я., Голубев В.С., Васильцов В.В., Галушкин М.Г. и др. Под ред. В.Я. Панченко Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок.М. ФИЗМАТЛИТ. 2009.

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

1. <http://www.ru.wikipedia.org>
2. <http://www.qwuquantum-electron.ru>
3. <http://www.exp.window.edu.ru>

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

на семинарских занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

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

Успешное освоение курса требует:

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

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|  |  |
|--|--|
| <b>по направлению:</b>   | Электроника и нанoeлектроника  |
| <b>профиль подготовки:</b>   | Физика перспективных технологий: микро- и нанoeлектроника<br>Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики<br>кафедра квантовой электроники |
| <b>курс:</b>   | <u>1</u>   |
| <b>квалификация:</b>   | магистр  |
| Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет |  |
| <b>Разработчик:</b>  | Ю.А. Кротов, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник   |

## 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 «Семинар по квантовой электронике» обучающийся должен:

### знать:

- основы теории физики процессов в лазерах, их строения и применения.

### уметь:

- рассчитывать и анализировать квантовые оптические системы для различных применений, оценивать их практическую полезность для применения в области квантовой электроники.

### владеть:

- физико-математическим аппаратом, описывающим основные физические явления, происходящие в материалах и объектах квантовой электроники.

## 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.

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

Вопросы для подготовки к дифференцированному зачету:

1. Уравнение Шредингера и зависимость волновой функции от времени.
2. Теория возмущений.
3. Формула Планка, график функции.
4. Коэффициенты Эйнштейна.
5. Квантование свободного электромагнитного поля.
6. Понятие фотона. Свойства фотона.
7. Операторы рождения и уничтожения для фотонов.
8. Матрица плотности в квантовой теории и ее свойства.
9. Когерентность в ансамблях квантовых излучателей.
10. Основные физические механизмы взаимодействия излучения с веществом.
11. Поглощение, переизлучение, рассеяние.
12. Фазовые соотношения в процессах поглощения и испускания.
13. Правила отбора.
14. Лазер как генератор.
15. Закон Бугера.
16. Описание работы лазера с помощью уравнений Ван-дер-Поля.

17. Непрерывный режим работы лазера.
18. Генерация импульсов.
19. Зависимость мощности излучения лазера от накачки.
20. Получение импульсов в лазере.
21. Лазеры различных типов.
22. Применение лазеров различных типов.
23. Различные способы накачки.
24. Скоростные уравнения.
25. Спонтанное излучение в лазерах.
26. Люминисценция в лазерных средах.
27. Релаксационные колебания.
28. Потери в лазере.
29. Резонатор лазера, различные конструкции.
30. Функции резонатора в лазере.
31. Стоксов сдвиг в лазере.
32. Нелинейные процессы в средах.
33. Типы нелинейных кристаллов.
34. Самофокусировка излучения.
35. Условия фазового синхронизма.
36. Обыкновенная и необыкновенная волны в кристаллах.
37. Комбинационное рассеяние.
38. Рассеяние Мандельштама-Бриллюена.
39. Твердотельные лазеры: классификация, применение.
40. Лазер на рубине.
41. Лазер на алюмоиттриевом гранате с неодимом.
42. Лазер на титан-сапфире.
43. Эрбиевый и иттербиевый лазеры.
44. Перестраиваемые лазеры.
45. Трех- и четырех уровневые схемы в твердотельных лазерах.
46. Применение твердотельных лазеров для генерации второй гармоники.
47. Селекция мод в твердотельных лазерах.
48. Конструкция твердотельных лазеров.
49. Оптическая стойкость кристаллов твердотельных лазеров.
50. Газовые лазеры.
52. СО и СО<sub>2</sub> лазеры.
53. Не-Не лазер.
54. Пассивное и активное оптическое волокно.
55. Различные виды волокна.
56. Использование волокна для передачи информации.
57. Лазер на волокне.
58. Особенности волоконных лазеров.
59. Накачка волоконных лазеров.
60. Лазерный гироскоп.
61. Получение больших мощностей в волоконных лазерах.
62. Полупроводниковый лазер: особенности.
63. Конструкция полупроводникового лазера.
64. Полосковая геометрия лазера.
65. Гомо- и гетеролазеры.
66. Лазеры на квантовых ямах.
67. Лазеры на квантовых точках.
68. Квантово-каскадные лазеры.
69. Формирование структуры поля в резонаторе полупроводникового лазера.
70. Расходимость излучения полупроводникового лазера.
71. Использование полупроводникового лазера для накачки.



72. Усилители в лазерной технике.
73. Режим модуляции добротности в лазерах.
74. Синхронизация частот.
75. Получение сверхкоротких импульсов в лазерах.
76. Частотный чирп.
77. Самонасыщающийся поглотитель.
78. Фемто- и аттосекундные импульсы.
79. Сверхмощные импульсы.
80. Красители в лазерах.
81. Способы охлаждения лазеров.
82. Колебательные подуровни в лазерах.
83. Ультрафиолетовые лазеры.
84. Лазеры на свободных электронах.
85. Получение поляризованного излучения.
86. Волновой пакет.

#### 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.