

**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>	Лабораторный практикум по квантовой электронике
<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра квантовой электроники
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 105 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 105 час.

Самостоятельная работа: 120 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Программу составили:

А.А. Фомичев, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ю.Ю. Брославец, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой электроники 29.05.2020

## **Аннотация**

Курс "Лабораторный практикум по квантовой электронике" предусматривает овладение теоретическими и практическими принципами работы и построения различных типов лазеров, применяемых для решения различных физических и технологических задач в современном мире.

Задачи дисциплины:

- освещение роли различных типов лазеров в современном мире;
- теоретическое изучение основ физики лазеров и принципов их построения;
- выполнение практических работ, направленных на закрепление полученных теоретических знаний;
- овладение базовыми знаниями в области работы с лазерами различных типов.

По результатам освоения студент должен:

Знать:

теоретические основы работы различных типов лазеров и области их применения;  
основные понятия лазерной физики на русском и английском языках, что позволяет понимать профессиональную литературу.

Уметь:

применять физические и математические методы для описания работы лазеров различного типа;  
эксплуатировать различную исследовательскую и испытательную аппаратуру, в т.ч. специализированную;  
работать и решать поставленные задачи в небольшом исследовательском коллективе;  
представлять результаты проделанной работы.

Владеть:

методами работы со специализированным оборудованием;  
способами настройки и эксплуатации лазерной техники.

Темы и разделы курса:

1. Предмет квантовой электроники и история ее становления.
2. Физические основы квантовой электроники. Ширина и форма спектральных линий.
3. Квантовые усилители и генераторы. Методы создания инверсной населенности.
4. Типы лазеров (твердотельные, газовые, волоконные, полупроводниковые).
5. Резонаторы. Пространственные и угловые характеристики излучения лазеров.
6. Динамика излучения лазеров. Кинетические уравнения. Одномодовый и многомодовый режим.
7. Методы управления излучением лазера. Модуляция добротности.
8. Основные нелинейно-оптические эффекты и их применение. Генерация гармоник.
9. Метод синхронизации мод. Генерация сверхкоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов.

## **1. Цели и задачи**

### **Цель дисциплины**

- овладение теоретическими и практическими принципами работы и построения различных типов лазеров, применяемых для решения различных физических и технологических задач в современном мире.

### **Задачи дисциплины**

- освещение роли различных типов лазеров в современном мире;
- теоретическое изучение основ физики лазеров и принципов их построения;
- выполнение практических работ, направленных на закрепление полученных теоретических знаний;
- овладение базовыми знаниями в области работы с лазерами различных типов.

## **2. Перечень формируемых компетенций**

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- теоретические основы работы различных типов лазеров и области их применения;
- основные понятия лазерной физики на русском и английском языках, что позволяет понимать профессиональную литературу.

уметь:

- применять физические и математические методы для описания работы лазеров различного типа;
- эксплуатировать различную исследовательскую и испытательную аппаратуру, в т.ч. специализированную;
- работать и решать поставленные задачи в небольшом исследовательском коллективе;
- представлять результаты проделанной работы.

владеть:

- методами работы со специализированным оборудованием;
- способами настройки и эксплуатации лазерной техники.

### 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	Предмет квантовой электроники и история ее становления.			9	12
2	Физические основы квантовой электроники. Ширина и форма спектральных линий.			9	11
3	Квантовые усилители и генераторы. Методы создания инверсной населенности.			12	11
4	Типы лазеров (твердотельные, газовые, волоконные, полупроводниковые).			15	11

5	Резонаторы. Пространственные и угловые характеристики излучения лазеров.			12	15
6	Динамика излучения лазеров. Кинетические уравнения. Одномодовый и многомодовый режим.			12	15
7	Методы управления излучения лазера. Модуляция добротности.			12	15
8	Основные нелинейно-оптические эффекты и их применение. Генерация гармоник.			12	14
9	Метод синхронизации мод. Генерация сверхкоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов.			12	16
Итого часов				105	120
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

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

Семестр: 7 (Осенний)

##### 1. Предмет квантовой электроники и история ее становления.

Изложение истории становления квантовой электроники как современной отрасли науки, техники и технологии. Развитие предмета квантовой электроники на различных этапах становления. Освещение современного положения предмета, областей его применения и связи с другими отраслями науки и техники. Самостоятельное изучение дополнительной литературы.

##### 2. Физические основы квантовой электроники. Ширина и форма спектральных линий.

Изложение физических принципов формирования излучения в различных средах. Формирование представлений об основных свойствах колебательной природы излучения, его спектральных свойствах. Описание физических основ процесса излучения. Изучение различных активных сред, коэффициента усиления достигаемого с их помощью. Закрепление пройденного материала с помощью решения задач самостоятельно и на занятиях с преподавателем.

##### 3. Квантовые усилители и генераторы. Методы создания инверсной населенности.

Изучение лазеров и мазеров как квантовых генераторов. Формирование представлений о квантовых усилителях. Описание различных методов создания инверсной населенности. Ознакомление с лазерами в лабораторных условиях. Самостоятельное закрепление материала.

##### 4. Типы лазеров (твердотельные, газовые, волоконные, полупроводниковые).

Освещение основных типов лазеров (твердотельных, газовых, волоконных, полупроводниковых), областей их применения, преимуществ и недостатков. Выполнение лабораторных работ, направленных на ознакомление с различными типами лазеров и методов работы с ними. Выполнение работы на закрепление материала самостоятельно и с преподавателем.

Семестр: 8 (Весенний)

##### 5. Резонаторы. Пространственные и угловые характеристики излучения лазеров.

Изучение резонатора как основной составляющей лазера, его функций и влияния на формирование излучения лазера. Методы селекции продольных и поперечных типов колебаний. Проведение лабораторных работ, включающих в себя расчет резонатора для различных типов лазеров. Самостоятельное решение расчетных задач.

6. Динамика излучения лазеров. Кинетические уравнения. Одномодовый и многомодовый режим.

Подробное изучение физических процессов, происходящих в лазере во время его работы. Применение кинетических уравнений для описания этих процессов. Изучение работы лазера в одномодовом и многомодовом режимах генерации. Выполнение самостоятельных и лабораторных работ, направленных на закрепление изложенного материала.

7. Методы управления излучения лазера. Модуляция добротности.

Формирование понятий о методах управления лазерным излучением. Изучение модуляторов и метода модуляции добротности. Выполнение различных лабораторных работ, направленных на ознакомление с различными методами (в т.ч. акустооптическими модуляторами и методом модуляции добротности). Самостоятельное решение задач.

8. Основные нелинейно-оптические эффекты и их применение. Генерация гармоник.

Изучение нелинейно-оптических эффектов, таких как вынужденные рассеяния: комбинационное, Мандельштам-Бриллюэновское, самофокусировка. Их применения в различных областях. Генерация гармоник в лазерах на основе нелинейных эффектов.

9. Метод синхронизации мод. Генерация сверхкоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов.

Теоретическое изложение метода синхронизации мод и его применения. Изучение методов получения сверхкоротких импульсов, их применения и актуальности в современной физике. Выполнение под руководством преподавателя лабораторной работы по получению сверхкоротких импульсов.

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

Мультимедийное оборудование (проектор), проекционный экран, учебная меловая доска, компьютер (ноутбук).

Лабораторные установки «Оптика лазерных пучков».

Лабораторные установки «Наблюдение эффекта Доплера в оптике методом гетеродинной регистрации излучения гелийнеонового лазера». Лабораторные установки «Синхронизация мод в твердотельном  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  лазере с акустооптическим модулятором», Лабораторная установка «Твердотельный лазер  $\text{YAG:Nd}^{3+}$ ».

Лабораторная установка

Акустооптическая модуляция света.

Лазерный гироскоп.

Лабораторная установка «Измерение времени жизни ионов на метастабильном уровне».

Лабораторная установка «Перестраиваемый твердотельный лазер на  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$ ».

Установка «Изучение пространственной структуры излучения полупроводникового лазера».

Установка «Изучение спектральных характеристик полупроводникового лазера».

Установка «Волоконный иттербиевый лазер».

Установка «Изучение процессов гравировки лазером на алюмоиттриевом гранате».

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Звелто О. Принципы лазеров. - М.: Мир, 2008. - 720 с.
2. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 320 с.
3. Тарасов Л. В. Четырнадцать лекций о лазерах. - изд. 2-е, перераб. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. — 176 с.
4. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. - М.: Наука, 1988 – 336 с.

#### Дополнительная литература

1. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. — 264 с.
2. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. - М.: Физматгиз, 1963. - 640 с.
3. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г.М. Зверев, Ю.Д. Голяев, Е.А. Шалаев, А.А. Шокин. - М.: Радио и связь, 1985. - 144 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)**

не предусмотрены.

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

Успешное освоение курса требует посещения занятий и напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к лабораторным занятиям, дифференцированному зачёту.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

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

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Электроника и нанoeлектроника
<b>профиль подготовки:</b>	Микро- и нанoeлектроника Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра квантовой электроники
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчики:**

А.А. Фомичев, д-р физ.-мат. наук, профессор

Ю.Ю. Брославец, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Лабораторный практикум по квантовой электронике» обучающийся должен:

### знать:

- теоретические основы работы различных типов лазеров и области их применения;
- основные понятия лазерной физики на русском и английском языках, что позволяет понимать профессиональную литературу.

### уметь:

- применять физические и математические методы для описания работы лазеров различного типа;
- эксплуатировать различную исследовательскую и испытательную аппаратуру, в т.ч. специализированную;
- работать и решать поставленные задачи в небольшом исследовательском коллективе;
- представлять результаты проделанной работы.

### владеть:

- методами работы со специализированным оборудованием;
- способами настройки и эксплуатации лазерной техники.

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

Текущий контроль предусматривает сдачу коллоквиумов по теме каждой лабораторной работы. Темы коллоквиумов:

1. История развития предмета квантовой электроники.
2. Спектральные характеристики лазерного излучения.
3. Отличия однородного и неоднородного уширения спектральных линий.
4. Расчет коэффициента усиления активной среды.
5. Методы создания инверсной населенности.
6. Способы накачки лазера.
7. Твердотельные лазеры: работа, применение, достоинства и недостатки.
8. Перестраиваемые лазеры и лазеры на красителях.
9. Газовые лазеры, He-Ne и CO<sub>2</sub> лазеры.
10. Активное волокно, волоконные лазеры.
11. Полупроводниковые инжекционные лазеры.
12. Полупроводниковые лазеры на гомо- и гетеропереходах.



13. Физика гауссовых пучков.
14. Различные конструкции резонаторов лазеров.
15. Пространственные и угловые характеристики излучения лазеров.
16. Кинетические уравнения, описывающие работу лазера.
17. Различия в одномодовом и многомодовом режимах генерации.
18. Методы селекции продольных и поперечных типов колебаний.
19. Методы управления излучением лазера.
20. Различные виды модуляторов, их достоинства и недостатки.
21. Режим модуляции добротности лазера.
22. Пикеты в лазерах.
23. Эффект самофокусировки.
24. Комбинационное рассеяние и рассеяние Мандельштам-Бриллюэновское.
25. Генерация гармоник в лазерах.
26. Метод синхронизации мод.
27. Получение сверхкоротких импульсов.
28. Лазерный гироскоп.
29. Крутильный и магнитооптический магнитометры.

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

Промежуточная аттестация проводится на основании оценок, полученных при сдаче коллоквиумов по всем лабораторным работам.

##### **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**

Для получения оценки по дифференцированному зачету студенту необходимо выполнить все лабораторные работы и сдать все коллоквиумы.