

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

**Квантовая электроника**

по направлению подготовки

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2023**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК 2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.
- ПК 1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 – Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования.

ИПК 1.1 - Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

## **2. Задачи освоения дисциплины**

- Освоить понятийный аппарат квантовой электроники.
- Научиться применять понятийный аппарат квантовой электроники для решения практических задач профессиональной деятельности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 7, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: общая физика, электродинамика, обыкновенные дифференциальные уравнения.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

- лекции: 16 ч.;
- практические занятия: 32 ч.;
- в том числе практическая подготовка: 32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. История создания и общие принципы работы лазеров.

Введение. Предмет квантовой электроники. Общие свойства лазерного излучения. Области применения лазеров. Классификация лазеров.

Тема 2. Квантовый характер излучения.

Спектральная объемная плотность энергии. Излучение черного тела. Формула Планка. Коэффициенты Эйнштейна. Стимулированное излучение. Спектральная ширина линии. Однородное и неоднородное уширение спектральной линии.

Тема 3. Физические процессы активной среде.

Спонтанное излучение. Стимулированное поглощение и излучение. Понятие активной среды, инверсная населенность. Начальный коэффициент усиления. Линейный коэффициент потерь. Принцип работы лазера, порог генерации. Схемы накачки, трехуровневая и четырехуровневая.

Тема 4. Усиление света в активной среде.

Зависимость коэффициента усиления от частоты. Ширина спектра усиливаемого сигнала. Эффект насыщения коэффициента усиления. Мощность насыщения.

Тема 5. Генерация когерентного излучения.

Рассмотрение двух потоков лазерного излучения, которые усиливаются в активной среде и имеют противоположное направление движения. Уравнение, отражающее зависимость мощности выходного излучения от параметров активной среды и оптического резонатора.

Тема 6. Оптические резонаторы.

Типы резонаторов. Продольные моды оптического резонатора. Образование спектра излучения. Добротность резонатора, характеристики потерь, дифракционные потери, поперечные моды резонатора.

Тема 7. Различные виды лазеров.

Гелий-неоновый и аргоновый лазеры. Лазер на молекуле азота. Энергетические уровни, механизм создания инверсии. Принцип работы лазера на самоограниченных переходах. Лазер на молекуле азота. Твердотельные лазеры на рубине и неодиме. Экимерные лазеры. CO<sub>2</sub> лазеры.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, решения задач и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

Экзамен в 7 семестре проводится в письменной форме по экзаменационным билетам. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

## **11. Учебно-методическое обеспечение**

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=2425>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (<https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>).

Перечень вопросов, выносимых на экзамен:

1. Предмет квантовой электроники (КЭ). Общие свойства лазерного излучения.
2. Области применения лазеров. Краткая история развития идей создания усилителя света.

3. Основы КЭ: явление вынужденного усиления, открытый оптический резонатор, среда с инверсной населенностью.
4. Типы излучения в квантовых системах.
5. Свойства индуцированного излучения.
6. Коэффициенты Эйнштейна для спонтанного излучения  $A$ , вынужденного излучения  $B_{2-1}$  и поглощения  $B_{1-2}$ .
7. Связь между коэффициентами Эйнштейна: вывод соотношения между ними на основе термодинамического подхода.
8. Связь между временем жизни состояния и коэффициентом  $A$ .
9. Спектральная ширина линии. Естественная ширина линии. Уширение линии столкновительное и доплеровское. Однородное и неоднородное уширение спектра линии.
10. Лоренцевский и Гауссовский контуры линии.
11. Коэффициенты поглощения / усиления в среде. Понятие инверсной населенности активной среды.
12. Связь между коэффициентом поглощения и сечением поглощения малого сигнала.
13. Населенности состояний при высокой плотности энергии излучения ( $\rho \rightarrow \infty$ ) для стационарного состояния.
14. Понятие интенсивности насыщения.
15. Коэффициент усиления усилителя.
16. Полоса пропускания усилителя в случае однородного уширения.
17. Выражение для мощности излучения на выходе усилителя.
18. Понятие телесного угла и доли мощности спонтанного излучения, распространяющегося в пределах некоторого телесного угла.
19. Выражения для мощности излучения на выходе усилителя при низком и высоком уровне мощности оптического сигнала на входе усилителя.
20. Понятие и выражение для добротности резонатора.
21. Условие самовозбуждения  $RK^2 = 1$ .
22. Спектральный между соседними линиями, обеспечивающими условие резонансов.
23. Представление поля в усилителе в виде двух плоских волн, распространяющихся в противоположных направлениях  $\Gamma^+$ ,  $\Gamma^-$  (коэффициент отражения одного из зеркал  $R=1$ ).
24. Выражение максимальной выходной мощности усилителя через интенсивность насыщения:  $I_{\max}^{\text{Вых}} = I_s * \frac{\alpha_0}{\beta}$ .
25. Открытый резонатор в оптическом диапазоне: основные особенности и назначение резонатора.
26. Выражение для плоского угла, в пределах которого сохраняется высокая добротность открытого резонатора. Число резонансных колебаний в единице объема в единичном спектральном интервале.
27. Селекция высокодобротных колебаний в открытом резонаторе.
28. Понятия числа Френеля, моды резонатора.
29. Время жизни фотона в резонаторе (время затухания излучения в резонаторе в  $e$  раз).
30. Связь между добротностью резонатора и временем затухания излучения в резонаторе.
31. Расчет доли энергии, теряемой при дифракции ( $\frac{4}{N_F}$ ).

32. Интегральное уравнение для функции распределения поля на поверхности зеркала (решение Фокса и Ли).
33. Основные свойства решения интегрального уравнения Фокса и Ли.
34. Конфокальный резонатор. Распределение поля световой волны в поперечной плоскости конфокального резонатора. Полиномы Эрмита. Моды  $TEM_{\nu\mu q}$ .
35. Основная мода  $TEM_{00q}$ . Ширина распределения поля в поперечной плоскости  $w$ .
36. Выражение для поперечного распределения поля основной моды при  $z \gg l/2$ . Радиус кривизны волны как функция координаты  $z$ .
37. Понятие устойчивости резонатора. Параметры устойчивости  $g_1, g_2$ . Диаграмма устойчивости. Резонаторы при  $g_1=g_2=0$ ;  $g_1=g_2=1$ ;  $g_1=g_2=-1$ ; полуконфокальный резонатор

Примеры задач, выносимых на экзамен:

1. Во сколько раз отличается вероятность спонтанного и вынужденного излучения некоторого атома, имеющего резонансную частоту  $\omega_0 = 4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$  и помещенного в полость с равновесным излучением при температуре  $T = 5000 \text{ К}$ ?
2. Чему равна средняя длина пробега резонансного фотона с длиной волны  $500 \text{ нм}$  в разреженном межзвездном газе с концентрацией  $n = 10^2 \text{ см}^{-3}$ . Энергетические уровни не вырождены, линия поглощения имеет естественную ширину. Примечание: средняя длина пробега фотона – это обратная величина коэффициента поглощения.
3. Чему равняется полуширина узкой спектральной линии атома ксенона (атомная масса  $M = 131 \text{ аем}$ ) с длиной волны  $\lambda = 600 \text{ нм}$  при температуре газа  $200^\circ\text{C}$ . Ответ дать в МГц.
4. Открытый резонатор состоит из двух вогнутых сферических зеркал с радиусами кривизны  $R_1 = 1,0 \text{ м}$  и  $R_2 = 0,8 \text{ м}$ . Является ли этот резонатор устойчивым, если расстояние между зеркалами  $d = 1,2 \text{ м}$ ? При каком расстоянии  $D$  с этими же зеркалами реализуется переход от устойчивого к неустойчивому резонатору?

в) План практических занятий по дисциплине.

Практические занятия проводятся по окончании изучения некоторой логически завершенной части дисциплины (темы). На практических занятиях проводится опрос студентов материалу, относящемуся к данной теме курса, рассматриваются задачи по данной теме курса.

д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к экзамену.

Учебно-методическое обеспечение включает литературу, рекомендованную преподавателем (см. раздел 12), другие информационные источники и научно-образовательные ресурсы Интернет.

Одной из форм самостоятельной работы по дисциплине является решение задач. Задачи оформляются в виде отчета, где записаны: 1) условие задачи; 2) решение задачи с пояснениями; 3) ответ в требуемых единицах измерения.

При подготовке к экзамену следует использовать рекомендуемую преподавателем литературу и конспекты лекций.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Тарасов Л.В. Физические основы квантовой электроники: Оптический диапазон. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 368 с.
2. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2001. – 573 с.
3. Звелто О. Принципы лазеров, издание третье. М.: Мир, 1990. – 400 с.
4. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. Издание второе М.: Наука, 1988. – 320 с.
5. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. Изд. Мир, М, 1981 г. – 540 с.

б) дополнительная литература:

1. Л. В. Тарасов. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. Изд. Радио и связь, М, 1981 г.– 440 с.

в) ресурсы сети Интернет:

– открытые онлайн-курсы

<https://quantum.msu.ru/ru/education/online/quantum-electronics>

<https://teach-in.ru/course/quantum-electron/about>

[https://mipt.ru/dpqe/for\\_students/materials/kurs4/a\\_1l1dkq.php](https://mipt.ru/dpqe/for_students/materials/kurs4/a_1l1dkq.php)

## 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

## 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещение, оснащенное компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

## **15. Информация о разработчиках**

Ломаев Михаил Иванович, доктор физико-математических наук, кафедра физики плазмы физического факультета ТГУ, профессор.