

Оптика волноводов и резонаторов

Лектор: А.А. Богданов

Ассистенты: Н.А. Устименко, И.А. Дерий



А.А. Богданов



И.А. Дерий



Н.А. Устименко

Программа бакалавриата: [Прикладная и теоретическая физика, 6^{ой} семестр](#)
Предварительно пройденные курсы, необходимые для изучения предмета:
[Электродинамика](#)

Образовательные кредиты: 4 ECTS

Язык курса: Русский

Важные даты:

Промежуточная аттестация~5-10 апреля 2021

Итоговый экзамен ~июнь 2021

2 Русский

Аннотация

Курс направлен на то, чтобы дать студентам азы современной фотоники и рассмотреть основные практические задачи из этой области. Курс начинается с изучения теории металлических и диэлектрических волноводов и оптических резонаторов. Подробно рассмотрены физические эффекты, лежащие в основе управления электромагнитным излучением. Мы изучим методы, позволяющие анализировать захват света в резонаторах и его распространение в простейших волноводных системах. Кроме того, в курсе рассказываются основы теории фотонных кристаллов, теории связанных мод и теории рассеяния, включая задачу Ми.

2.1 Детальное описание курса с разбиением по лекциям/семинарам

| № | Тема | Лекция | Практика |
|---|---|--------|----------|
| Часть I. Теория волноводов | | | |
| 1 | Волновод как квантовая яма для фотона. Геометрическая теория волноводов. Плоскопараллельный полый волновод с металлическими обкладками | | |
| 2 | Плоскопараллельный диэлектрический волновод. Частота отсечки. Асимметричный волновод | | |
| 3 | Цилиндрические волноводы и оптическое волокно | | |
| 4 | Сдвиг Гуса-Хенхена. Потери в волноводах. Длина распространения | | |
| Часть II. Теория оптических резонаторов | | | |
| 5 | S-матрица и её свойства. Взаимность | | |
| 6 | Резонатор Фабри-Перо. Собственные моды. Квазинормальные моды. Добротность и резкость. Резонансное пропускание. Согласование импедансов и поглощение | | |
| 7 | Резонаторы на модах шепчущей галереи | | |
| Часть III. Фотонные кристаллы | | | |
| 8 | Брэгговский отражатель. T-матрица | | |
| 9 | Зонная структура одно-, дву- и трёхмерных фотонных кристаллов. Запрещённая зона и условие $\lambda/4$ | | |
| 10 | Ширина запрещённой зоны. Приближение слабого контраста. Теория связанных мод | | |
| 11 | Приближение эффективной среды для многослойных структур. Гиперболические метаматериалы | | |
| 12 | Полость в фотонном кристалле | | |

| № | Тема | Лекция | Практика |
|--------------------------------|---|--------|----------|
| Часть IV. Теория связанных мод | | | |
| 13 | Теорема взаимности. Ортогональность волноводных мод | | |
| 14 | Связь между двумя параллельными волноводами. Обмен энергией. Собственные моды | | |
| Часть V. Теория рассеяния | | | |
| 13 | Уравнение Липпмана-Швингера. Диадная функция Грина. Оптические сечения. Рассеяние в дипольном приближении | | |
| 14 | Векторные сферические гармоники. Теория Ми. Мультипольное разложение. Эффект Керкера | | |
| 15 | Оптическая теорема | | |

2.2 Рекомендованная литература

1. L. D. Landau, et al. Electrodynamics of continuous media. Vol. 8. Elsevier (2013). [ENG]
2. L. D. Landau, and E.M. Lifshitz. The classical theory of fields. (1971). [RUS]
3. L. Novotny and B. Hecht. Principles of nano-optics. Cambridge university press (2012). [ENG]
4. M. Born and E. Wolf. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Elsevier (2013). [ENG]
5. J. D. Joannopoulos, et al. Photonic crystals: molding the flow of light. Princeton university press (2011). [ENG]
6. K. Sakoda. Optical properties of photonic crystals. Vol. 80. Springer Science & Business Media (2004). [ENG]
7. A. W. Snyder and J. Love. Optical waveguide theory. Springer Science Business Media (2012) [ENG]
8. M.J. Adams. An introduction to optical waveguides. Vol. 14. New York: Wiley, 1981. [ENG]
9. M. L. Gorodetsky, Optical Microresonators with Giant Quality factor (Fizmatlit, Moscow, 2011). [RUS]
10. J. D. Jackson, John D. Classical Electrodynamics (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons (1999). [ENG]
11. Bohren C. F., Huffman D. R. Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley Sons, 2008. [ENG]
12. [«Matthew Schwartz - Lecture 19: Diffraction and resolution»](#) [ENG]

13. <http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/joardar/lecHtmlPages/lectures/03-Polarimetry.pdf> [ENG]
14. «Физика. Теоретический минимум» Online course [RUS]
15. «Оптика» Online course [RUS]

2.3 Задания

- В курсе предусмотрены домашние задания, которые помогут студенту в освоении курса (30-40 задач разного уровня).
- В течение семинарских занятий студенты решают задачи в классе.

2.3.1 Пример: Домашнее задание 1

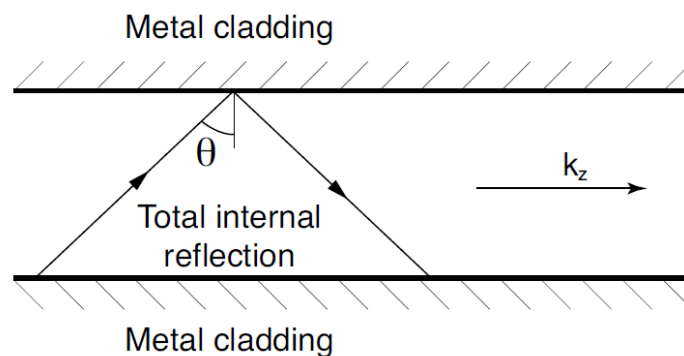
Срок сдачи: 16.09.

Срок сдачи исправлений: 26.09.

Пороговое количество баллов, позволяющее вносить исправления: 2.

Пороговое количество баллов для успешной сдачи задания: 7.

Figure 2: Плоскопараллельный металлический волновод.



1. Найдите дисперсионное уравнение ТМ-поляризованных нечётных и чётных мод (**1 балл**).
2. Постройте дисперсионные кривые ТЕ и ТМ мод (**1 балл**).
3. Чем отличаются фундаментальные ТЕ и ТМ моды (**2 балла**)?
4. Постройте распределение различных компонент поля в плоскости xz для ТЕ и ТМ мод вблизи частоты отсечки и вдали от неё. (**4 балла**).
5. Постройте электрические и магнитные силовые линии для ТЕ и ТМ мод в плоскости xz . (**4 балла**).

6. Геометрическая теория волноводов утверждает, что волноводная мода представляет собой плоскую волну, распространяющуюся внутри сердцевины волновода и отражающуюся от его оболочек. Согласно строгой электромагнитной теории мода определяется её номером n , поляризацией, частотой ω и волновым числом k_z . Найдите соотношение между n , ω , k_z и углом θ (см. Рис. 2). Проанализируйте полученную зависимость (**3 балла**).

2.3.2 Коллоквиум во время промежуточной аттестации

1. Основные теоремы векторного анализа. Дифференциальные операторы в криволинейных системах координат.
2. Уравнения Максвелла в среде и в вакууме. Граничные условия.
3. Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей.
4. Вектор Пойнтинга и плотность электромагнитной энергии.
5. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Уравнение дисперсии в однородной диэлектрической среде.
6. Поляризация электромагнитных волн. Параметры Стокса. Эллипс поляризации. Сфера Пуанкаре.
7. Формулы Френеля. Угол Брюстера.
8. Дипольное излучение.
9. Дифракционная решётка. Теорема Блоха.
10. Распространение электромагнитных волн в анизотропной среде. Обыкновенная и необыкновенная волны. Двухлучепреломление. Полуволновые и четвертьволновые пластинки.

2.3.3 Вопросы к экзамену

Теория волноводов

1. Волновод как квантовая яма для фотона.
2. Геометрическая теория волноводов.
3. Вывод дисперсионного уравнения (из уравнений Максвелла) для собственных мод симметричного плоскопараллельного полого волновода с металлическими обкладками.
4. Собственные моды симметричного плоскопараллельного полого волновода с металлическими обкладками.
5. Вывод дисперсионного уравнения (из уравнений Максвелла) для собственных мод плоскопараллельного полого волновода с металлическими обкладками.

6. Дисперсия собственных мод плоскопараллельного диэлектрического волновода. Графическое решение дисперсионного уравнения.
7. Фазовая и групповая скорости.
8. Распределение поля в сердцевине волновода и обкладках диэлектрического плоскопараллельного волновода.
9. Частота отсечки и утекающие моды.
10. Вывод дисперсионного уравнения (из уравнения Френеля) для асимметричного плоскопараллельного диэлектрического волновода.
11. Цилиндрические полые металлические волноводы: дисперсия и частота отсечки.
12. Цилиндрические полые металлические волноводы: классификация мод и распределение полей.
13. Цилиндрические диэлектрические волноводы: дисперсионное уравнение и классификация мод.
14. Цилиндрические диэлектрические волноводы со слабым контрастом (оптические волокна).
15. Сдвиг Гуса-Хенхена.
16. Эффективная толщина волновода.
17. Потери в волноводах. Длина распространения. Классификация реальных волноводов.

Теория оптических резонаторов

1. Классификация оптических резонаторов и их применение.
2. Добротность (определение, характерные значения для оптических резонаторов).
3. Матрица рассеяния двухканальной системы. Определение и основные свойства.
4. S-матрица для систем без диссипативных потерь.
5. S-матрица для взаимных систем. Теорема взаимности Лоренца.
6. S-матрица для систем с симметрией по отношению к обращению времени.
7. S-матрица свободного пространства.
8. S-матрица плоской границы, разделяющей две диэлектрические среды.
9. S-матрица полупрозрачного зеркала.
10. S-матрица резонатора Фабри-Перо.
11. Спектр пропускания резонатора Фабри-Перо.

12. Основные характеристики резонатора Фабри-Перо.
13. Резонансное пропускание и туннелирование электронов.
14. Резонатор Фабри-Перо с потерями. Условие идеального поглощения.
15. Уравнение резонансных частот мод шепчущей галереи в диэлектрическом цилиндре.
16. Распределение полей мод шепчущей галереи в диэлектрическом цилиндре.
17. Радиационные потери мод шепчущей галереи в диэлектрическом цилиндре.
18. Радиационные потери как туннелирование фотонов.

Фотонные кристаллы

1. Фотонные кристаллы (определение, основные свойства, примеры).
2. Т-матрица для многослойной структуры (ТЕ- и ТМ-поляризации).
3. Вывод дисперсионного уравнения для одномерного фотонного кристалла с элементарной ячейкой, состоящей из двух изотропных слоев.
4. Зонная структура одномерного фотонного кристалла с элементарной ячейкой, состоящей из двух изотропных слоев. Запрещённая зона.
5. Запрещённая зона. Условие $\lambda/4$.
6. Отражение от одномерного фотонного кристалла с элементарной ячейкой, состоящей из двух изотропных слоев.
7. Ширина запрещённой зоны. (приближение слабого контраста).
8. Ширина запрещённой зоны. (теория связанных мод).
9. Приближение эффективной среды для многослойных структур. Пространственная дисперсия.
10. Гиперболические метаматериалы. Определение и основные свойства.

Теория связанных мод

1. Теорема взаимности (сопряжённая форма).
2. Теорема взаимности (несопряжённая форма).
3. Ортогональность волноводных мод.
4. Уравнение связанных мод и коэффициенты связи.
5. Константа связи между двумя параллельными волноводами.
6. Собственные моды связанных параллельных волноводов.

7. Обмен энергией между двумя связанными параллельными волноводами.

Теория рассеяния

1. Уравнение Липпмана-Швингера. Диадная функция Грина.
2. Сечение рассеяния. Сечение поглощения. Сечение экстинкции. Определение, геометрический смысл, физический смысл.
3. Амплитуда рассеяния и дифференциальное сечение.
4. Сечения рассеяния и экстинкции в дипольном приближении.
5. Векторные гармоники. Определение и основные свойства.
6. Скалярные и векторные сферические гармоники.
7. Разложение плоской волны по сферическим гармоникам.
8. Коэффициенты Ми. Магнитные и электрические резонансы диэлектрической сферы.
9. Режимы рассеяния: геометрическая оптика, теория Ми и рэлеевское рассеяние.
10. Квазистатическое приближение. Радиационная поправка.
11. Эффект Керкера.
12. Оптическая теорема.

2.4 Оценка успеваемости по курсу

2.4.1 Домашние задания

- После каждой лекции студент получает домашнее задание (см. пример 2.3.1).
- Каждое домашнее задание имеет минимальное количество баллов, необходимое для его успешной сдачи.
- Решённое домашнее задание отправляется ассистенту лектора до дедлайна.
- У каждого домашнего задания есть дедлайн (крайний срок сдачи). Если студент не отправил домашнее задание ассистенту лектора до дедлайна без уважительной причины, домашнее задание считается невыполненным.
- У каждого домашнего задания есть дедлайн исправлений. Если студент не набрал достаточное количество баллов, то он может сделать работу над ошибками и отправить её ассистенту лектора до *дедлайна исправлений*. Он установлен для каждого домашнего задания.
- Исправления могут быть отправлены ассистенту лектора только в том случае, если студент наберёт минимальное количество баллов, указанное в каждом домашнем задании.

2.4.2 Промежуточная аттестация

- Промежуточная аттестация состоит из ответов на вопросы из списка (см. [2.3.2](#)) и беседы с лектором или ассистентом.
- У каждого студента есть две попытки пройти промежуточную аттестацию.
- Предусмотрены дополнительные лекции и методические материалы для подготовки к промежуточной аттестации.

2.4.3 Допуск к экзамену

Для допуска к экзамену необходимо успешно сдать более 70% домашних заданий.

2.4.4 Экзамен

Итоговая оценка по курсу полностью определяется экзаменом, который состоит из ответа на два вопроса из списка (см. [2.3.3](#)) и беседы с лектором или ассистентом.