

# Introduction to Photonics

Lecturer: Prof. A.A. Bogdanov

Lecturer Assistants: K.L. Koshelev, I.A. Deriy



Andrey Bogdanov



Kirill Koshelev



Ilya Deriy

Master programs:

1. [Nanophotonics and metamaterials](#), 1<sup>st</sup> semester.
2. [Quantum materials](#), 1<sup>st</sup> semester.

Course prerequisites: [Electrodynamics](#)

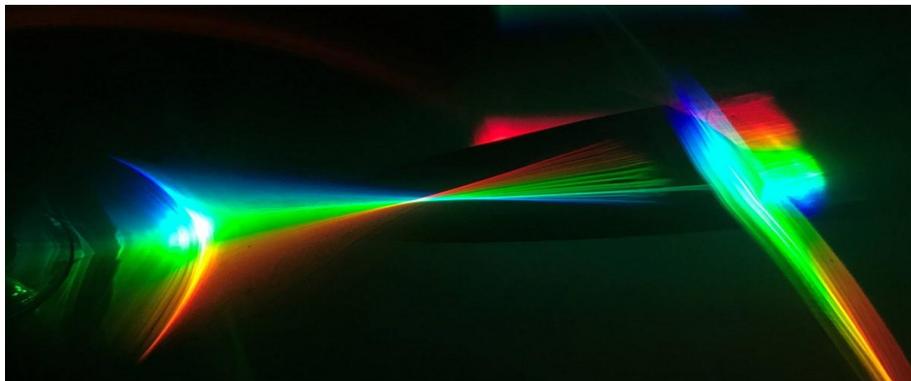
Course credits: 5 ECTS

**Course language: English**

**Important Dates:**

Midterm exam ..... ~November 2, 2020

Final Exam ..... ~January 15, 2021



# Contents

<b>1 English</b>	<b>3</b>
1.1 Detailed content and structure with sectioning of lectures/seminars . . . . .	3
1.2 Recommended resources . . . . .	4
1.3 Assignments . . . . .	5
1.3.1 Tasks examples: Home Task 1 . . . . .	5
1.3.2 Colloquium questions on Midterm attestation . . . . .	6
1.3.3 Exam questions . . . . .	6
1.4 Grading policy . . . . .	9
1.4.1 Home tasks . . . . .	9
1.4.2 Midterm attestation . . . . .	9
1.4.3 Admission to final exam . . . . .	9
1.4.4 Final exam . . . . .	10
<b>2 Русский</b>	<b>12</b>
2.1 Детальное описание курса с разбиением по лекциям/семинарам . . . . .	12
2.2 Рекомендованная литература . . . . .	13
2.3 Задания . . . . .	14
2.3.1 Пример: Домашнее задание 1 . . . . .	14
2.3.2 Коллоквиум во время промежуточной аттестации . . . . .	15
2.3.3 Вопросы к экзамену . . . . .	15
2.4 Оценка успеваемости по курсу . . . . .	18
2.4.1 Домашние задания . . . . .	18
2.4.2 Промежуточная аттестация . . . . .	19
2.4.3 Допуск к экзамену . . . . .	19
2.4.4 Экзамен . . . . .	19

# 1 English

## Abstract

The course aims at giving the students the basics of modern photonics and consider the basic practical tasks in this area. The course begins with a study of the theory of metallic and dielectric waveguides and optical resonators. The physical effects underlying the control of electromagnetic radiation are examined in detail. We will study methods that allow us to analyze the capture of light in resonators and its propagation in the simplest waveguide systems. Moreover, the course presents the basics of the theory of photonic crystals, coupled modes approach and scattering theory including Mie-task.

### 1.1 Detailed content and structure with sectioning of lectures/seminars

№	Topic	Lecture	Seminar
Part I. Theory of waveguides			
1	Waveguide as a quantum well for photon. Geometrical theory of waveguides. Parallel plate hollow waveguide with metal claddings		
2	Parallel plate dielectric waveguide. Frequency cut-off. Asymmetric waveguides		
3	Cylindrical waveguides and optical fibers		
4	Goos-Hanchen shift. Losses in waveguides. Propagation length		
Part II. Theory of optical resonators			
5	S-matrix and its properties. Reciprocity		
6	Fabry-Perot resonator. Eigenmodes. Quasi-normal modes. Quality factor and finesse. Resonant transmission. Impedance matching and absorption		
7	Whispering gallery mode resonators		
Part III. Photonic Crystals			
8	Bragg reflector. T-matrix		
9	Band structure of 1D, 2D and 3D photonic crystals. Photonic band gap and quarter-wave condition		
10	Width of photonic gap. Weak contrast approximation. Coupled mode theory		
11	Effective medium approximation for multilayer structures. Hyperbolic metamaterials		
12	Photonic crystal cavity		
Part IV. Coupled mode theory			
13	Reciprocity theorem. Orthogonality of waveguide modes		
14	Coupling between two parallel waveguides. Power exchange. Eigenmodes		

№	Topic	Lecture	Seminar
Part V. Scattering theory			
13	Lippmann-Schwinger equation. Dyadic Green's function. Optical cross sections. Scattering in the dipole approximation		
14	Vector spherical harmonics. Mie theory. Multipole expansion. Kerker effect		
15	Optical theorem		

## 1.2 Recommended resources

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]

### 1.3 Assignments

- There is a block of home problems, which aim to help student in mastering the course (30-40 problems of various levels).
- During seminar classes the students are supposed to solve problems in class.

#### 1.3.1 Tasks examples: Home Task 1

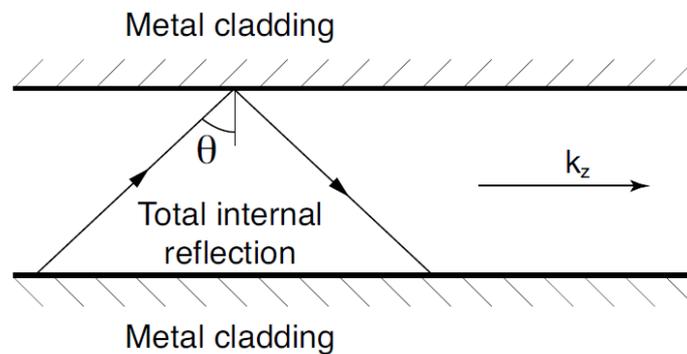
Submission deadline: 16.09

Correction submission deadline: 26.09

Threshold number of points allowing to make corrections is 2

The minimal number of points for successful passing the home task is 7

Figure 1: Metal-cladding parallel plate waveguide.



1. Find the dispersion equation of TM-polarized odd and even modes (**1 points**).
2. Plot the dispersion of TE and TM modes (**1 points**).
3. What are the differences between fundamental TE and TM modes (**2 points**)?
4. Plot distribution of different field components in  $xz$ -plane for TE and TM modes in the vicinity of cut-off frequency and far from it (**4 points**).
5. Plot electric and magnetic lines for TE and TM modes in  $xz$ -plane (**4 points**).
6. The geometrical theory of waveguides states that the waveguide mode represents the plane wave propagating inside the waveguide core reflecting from its claddings. According to the rigorous electromagnetic theory the mode is determined by the mode number  $n$ , polarization, frequency  $\omega$ , and wavenumber  $k_z$ . Find the relation between  $n$ ,  $\omega$ ,  $k_z$  and angle  $\theta$  (see Fig. 1). Analyze this dependence (**3 points**).

### 1.3.2 Colloquium questions on Midterm attestation

1. The fundamental theorems of vector calculus. Vector differential operators in curvilinear orthogonal coordinates.
2. Maxwell's equation in vacuum and in the media. Boundary conditions at plane interface.
3. Complex amplitudes of electric and magnetic fields.
4. Pointing vector and density of electromagnetic energy.
5. Electromagnetic waves. Wave equation. Dispersion equation in homogeneous dielectric media.
6. Polarization of electromagnetic waves. Stokes parameters. Polarization ellipse. Poincare sphere.
7. Fresnel equations. TE- and TM-polarization. Brewster angle.
8. Dipole radiation.
9. Diffraction grating. Bloch theorem.
10. Waves in anisotropic media. Ordinary and extraordinary waves. Birefringence. Half- and quarter-wave plates.

### 1.3.3 Exam questions

#### Theory of waveguides

1. Waveguide as a quantum well for photon.
2. Geometrical theory of waveguides.
3. Derivation of the dispersion equation (from Maxwell's equations) for eigenmodes of symmetric parallel plate hollow waveguide with metal claddings.
4. Mode structure of parallel plate hollow waveguide with metal claddings.
5. Derivation of the dispersion equation (from Maxwell's equations) for eigenmodes of parallel plate dielectric waveguide.
6. Dispersion of eigenmodes structure of parallel plate dielectric waveguide. Graphical solution of the dispersion equation.
7. Phase and group velocity.
8. Field distribution in waveguide core and cladding layers of a dielectric slab waveguide.
9. Frequency cutoff and leaky modes.

10. Derivation of the dispersion equation (from Fresnel equation) for asymmetric parallel slab dielectric waveguide.
11. Circular hollow metal waveguides: dispersion and frequency cut-off.
12. Circular hollow metal waveguides: mode classification and profiles.
13. Circular dielectric waveguides: dispersion equation and mode classification.
14. Low contrast circular dielectric waveguides (optical fibers).
15. Goos-Hanchen shift.
16. Effective thickness of waveguide.
17. Losses in waveguides. Propagation length. Classification of real waveguides.

### **Theory of optical resonators**

1. Classification of optical resonators and their application.
2. Quality factor (definition, characteristic values for optical resonators).
3. Scattering matrix of two port network. Definition and main properties.
4. S-matrix for dissipation free systems.
5. S-matrix for reciprocal systems. Lorentz reciprocity theorem.
6. S-matrix for systems with time reversal symmetry.
7. S-matrix of free space.
8. S-matrix of the interface separating two transparent media.
9. S-matrix of semi-transparent mirror.
10. S-matrix of Fabry-Perot resonator.
11. Transmission spectrum of Fabry-Perot resonator.
12. Main characteristics of Fabry-Perot resonator.
13. Resonant transmission and electron tunneling.
14. Fabry-Perot resonator with losses. The condition of perfect absorption.
15. Equation on resonant frequencies of whispering gallery modes in dielectric cylinder.
16. Field distribution of whispering gallery modes in dielectric cylinder.
17. Radiation losses of whispering gallery modes in dielectric cylinder.
18. Radiation losses as photon tunnelling.

## **Photonic crystals**

1. Photonic crystals (definition, main properties, examples).
2. T-matrix for multilayer structure (TE and TM polarizations).
3. Derivation of the dispersion equation for 1D photonic crystal with unit cell consisting of two isotropic layers.
4. Band structure of 1D photonic crystal with unit cell consisting of two isotropic layers. Photonic band gap.
5. Photonic band gap. Quarter-wave condition.
6. Reflection from 1D photonic crystal with unit cell consisting of two isotropic layers.
7. Width of photonic gap (weak contrast approximation).
8. Width of photonic gap (coupled mode theory).
9. Effective medium approximation for multilayer structures. Spatial dispersion.
10. Hyperbolic metamaterials. Definition and main properties.

## **Coupled mode theory**

1. Reciprocity theorem (conjugated form).
2. Reciprocity theorem (non-conjugated form).
3. Orthogonality of waveguide modes.
4. Coupled mode equation and coupling coefficients.
5. Coupling constant between two parallel waveguide.
6. Eigenmodes of coupled parallel waveguides.
7. Power exchange between two coupled parallel waveguides.

## **Scattering theory**

1. Lippmann-Schwinger equation. Dyadic Green's function.
2. Scattering cross section. Absorption cross section. Extinction cross section. Definition, geometrical meaning, physical meaning.
3. Scattering amplitude and differential cross section.
4. Scattering and extinction cross sections in the dipole approximation.
5. Vector harmonics. Definition and main properties.

6. Scalar and vector spherical harmonics.
7. Plane wave expansion in terms of spherical harmonics.
8. Mie coefficients. Magnetic and electric resonances of a dielectric sphere.
9. Scattering regimes: geometric optics, Mie theory, and Rayleigh scattering.
10. Quasi-static limit. Radiation correction.
11. Kerker effect.
12. Optical theorem.

## 1.4 Grading policy

### 1.4.1 Home tasks

- After each lecture you get a home task (see example [2.3.1](#)).
- Each home task has a minimal number of points you need to get to pass the home task successfully.
- The solved home task should be sent to the lecturer assistant by the deadline.
- Each home task has a deadline. If you didn't send your home tasks to the lecturer assistant by the deadline without reasonable excuse, the home task is accounted as failed.
- Each home task has a correction deadline. If you don't get enough points you can send the corrections to the lecturer assistant by the *correction deadline* set for each home task.
- Corrections can be sent to the lecturer assistant only if you get the minimal number of points mentioned in each home task.

### 1.4.2 Midterm attestation

- Midterm attestation consists of discussion with lecturer or lecturer assistant and answering the questions of the question list (see [2.3.2](#)).
- Each student has two attempts to pass the midterm attestation.
- There are additional lectures and materials on preparation for the midterm exam.

### 1.4.3 Admission to final exam

In order to be admitted to the final exam you should have 70% of successfully passed home tasks.

#### **1.4.4 Final exam**

The final grade is completely determined by the final exam. The final exam consists of answering two questions of the question list (see [2.3.3](#)) and discussion with lecturer or lecturer assistant.

# Введение в фотонику

Лектор: А.А. Богданов  
Ассистенты: К.Л. Кошелев, И.А. Дерий



А.А. Богданов



К.Л. Кошелев



И.А. Дерий

Программа магистратуры:

1. [Нанопотоника и метаматериалы, 1<sup>ый</sup> семестр](#)
2. [Квантовые материалы, 1<sup>ый</sup> семестр](#)

Предварительно пройденные курсы, необходимые для изучения предмета:  
[Электродинамика](#)

Образовательные кредиты: 5 ECTS

**Язык курса: Английский**

**Важные даты:**

Промежуточная аттестация ..... ~2 ноября 2020

Итоговый экзамен ..... ~15 января 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

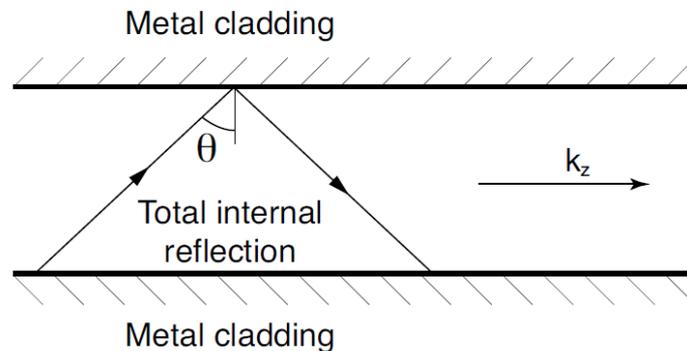
Срок сдачи: 16.09.

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  $\omega$  и волновым числом  $k_z$ . Найдите соотношение между  $n$ ,  $\omega$ ,  $k_z$  и углом  $\theta$  (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.