

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Методические указания к практическим занятиям
и по самостоятельной работе

2018

Буримов, Николай Иванович

Шандаров, Станислав Михайлович

Приборы и методы управления оптическим излучением: методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе / Н.И. Буримов, С.М. Шандаров; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2018. – 45 с.

Целью преподавания дисциплин «Методы управления оптическим излучением» и «Приборы управления оптическим излучением» является подготовка обучающихся к исследованию и разработке новых методов, приборов и систем управления оптическим излучением, предназначенных как для физических исследований и проведения высокоточных измерений, так и для создания перспективных систем и комплексов на основе изучения базовых физических принципов функционирования основных элементов лазерных систем, а также формирование у обучающихся необходимых универсальных (УК), общепрофессиональных (ОПК) и профессиональных (ПК) компетенций, согласно требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования, для соответствующих направлений подготовки, в рамках которых требуется изучение данных дисциплин.

Предназначено для аспирантов и магистрантов очной и заочной форм обучения.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2018 г.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Методические указания к практическим занятиям
и по самостоятельной работе

Разработчики

докт. физ.-мат. наук, проф.
каф. ЭП
_____ Н.И. Буримов
«__» _____ 2018 г.

докт. физ.-мат. наук, зав.
каф. ЭП
_____ С.М. Шандаров
«__» _____ 2018 г.

Содержание

Введение.....	6
Раздел 1 Введение	7
1.1 Содержание раздела.....	7
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
Раздел 2 Классификация и общие характеристики приборов и методов управления оптическим излучением.....	7
2.1 Содержание раздела.....	7
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
2.3 Вопросы для самопроверки.....	8
Раздел 3 Распространение оптического излучения в анизотропных средах	8
3.1 Содержание раздела.....	8
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	9
3.3 Вопросы для самопроверки.....	9
Раздел 4 Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением.....	10
4.1 Содержание раздела.....	10
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	10
4.3 Вопросы для самопроверки.....	10
Раздел 5 Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением.....	11
5.1 Содержание раздела.....	11
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	11
5.3 Вопросы для самопроверки.....	11
Раздел 6 Магнитооптические методы и приборы управления оптическим излучением.....	12
6.1 Содержание раздела.....	12
6.2 Методические указания по изучению раздела.....	12
6.3 Вопросы для самопроверки.....	12
7 Темы практических занятий.....	13
7.1 Распространение световых волн в анизотропных и неоднородных средах.....	14
7.1.1 Примеры решения задач по теме «Распространение световых волн в анизотропных и неоднородных средах».....	14

7.1.2	Варианты задач для самоподготовки	16
7.2	Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением.....	18
7.2.1	Примеры решения задач по теме «Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением».....	18
7.2.2	Варианты задач для самоподготовки	20
7.3	Дифракция света на упругих волнах	21
7.3.1	Примеры решения задач по теме «Дифракция света на упругих волнах»	21
7.3.2	Варианты задач для самоподготовки	23
7.4	Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением.....	25
7.4.1	Примеры решения задач по теме «Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением».....	25
7.4.2	Варианты задач для самоподготовки	26
8	Подготовка к контрольной работе.....	27
8.1	Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по теме «Электромагнитные колебания и волны»	28
9	Лабораторные работы.....	28
10	Темы для самостоятельного изучения	29
11	Перечень вопросов к итоговой аттестации по дисциплинам	30
11.1	Приборы управления оптическим излучением (программа подготовки магистров)	30
11.2	Методы управления оптическим излучением (программа подготовки магистров)	33
11.3	Методы управления оптическим излучением (программа подготовки аспирантов)	35
12	Тестовые вопросы	39
	Рекомендуемая литература	43

Введение

Целью преподавания дисциплин «Методы управления оптическим излучением» и «Приборы управления оптическим излучением» является подготовка обучающихся к исследованию и разработке новых методов, приборов и систем управления оптическим излучением, предназначенных как для физических исследований и проведения высокоточных измерений, так и для создания перспективных систем и комплексов на основе изучения базовых физических принципов функционирования основных элементов лазерных систем, а также формирование у обучающихся необходимых универсальных (УК), общепрофессиональных (ОПК) и профессиональных (ПК) компетенций, согласно требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования, для соответствующих направлений подготовки, в рамках которых требуется изучение данных дисциплин.

Задачами дисциплин «Методы управления оптическим излучением» и «Приборы управления оптическим излучением» являются:

1. Приобретение знаний о методах и приемах разработки, проектирования и использовании перспективных приборов управления оптическим излучением;
2. Приобретение навыков разработки и проектирования устройств управления оптическим излучением.

В результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

знать:

- основные принципы и физические эффекты, обеспечивающие эффективное управление оптическим излучением;
- основные принципы и методы исследования, разработки и производства приборов управления оптическим излучением;

уметь:

- применять полученные знания при теоретическом анализе и экспериментальном исследовании физических процессов и оптических явлений, лежащих в основе методов управления оптическим излучением;
- анализировать информацию о новых методах управления оптическим излучением и типах оптических приборов;
- рассчитывать, исследовать и эксплуатировать приборы управления оптическим излучением

владеть:

- методами и приемами разработки, проектирования и использования приборов управления оптическим излучением.

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами по дисциплинам:

1. «Физика» (термодинамика и молекулярная физика, электричество и магнетизм, колебаний и волны, оптика, квантовая физика).

2. «Оптическая физика» (уравнения Максвелла, дифракция света, оптика неоднородных сред, оптика анизотропных сред, нелинейная оптика, основы квантовой оптики).

3. «Основы фотоники» (источники сплошного и линейчатого спектра, приемники излучения).

4. «Физика конденсированного состояния» (симметрия структуры и свойств твердых тел, колебания решеток и неупорядоченных структур, электронные возбуждения в твердых телах и их оптические свойства, дефекты в кристаллах).

5. «Акустооптические методы обработки информации» (качественный анализ дифракции света на акустических волнах. условия синхронизма, угол Брэгга, возможные применения, коэффициент акустооптического качества среды M_2 , частотная зависимость акустооптического взаимодействия).

Раздел 1 Введение

1.1 Содержание раздела

Предмет дисциплин «Методы управления оптическим излучением» и «Приборы управления оптическим излучением» и их задачи. Связь дисциплин с другими разделами физики, квантовой электроники и фотоники. Содержание курсов. История развития методов управления оптическим излучением и приборов, реализующих указанные методы.

1.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на основные принципы и подходы оптической физики, квантовой электроники, фотоники, акустооптики, электрооптики и интегральной оптики, используемые при теоретическом анализе и экспериментальном исследовании физических процессов и оптических явлений, лежащих в основе методов управления оптическим излучением, а также при проектировании перспективных приборов управления оптическим излучением.

Раздел 2 Классификация и общие характеристики приборов и методов управления оптическим излучением

2.1 Содержание раздела

Свойства оптического излучения. Распространение оптического излучения в однородных и неоднородных средах. Классификация методов управления оптическим излучением и приборов, реализующих указанные методы. Особенности и характеристики методов управления оптическим излучением. Общие параметры и характеристики устройств управления оптическим излучением их связь со свойствами оптического излучения.

2.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Классификация и общие характеристики приборов и методов управления оптическим излучением» следует обратить на особенности распространения оптического излучения в однородных и неоднородных средах, на виды и основные характеристики методов управления оптическим излучением, а также на оценки параметров и характеристик устройств управления оптическим излучением.

2.3 Вопросы для самопроверки

1. Дайте определения основных параметров оптического излучения.
2. Какое световое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?
3. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?
4. Дайте определение понятию «когерентное излучение». Чем отличается «пространственная» когерентность от «временной»?
5. Дайте определение понятиям «однородная среда» и «неоднородная среда». Приведите примеры неоднородных сред.
6. Дайте определение показателя преломления среды.
7. Какие среды являются наиболее перспективными для приборов управления оптическим излучением?
8. Какие признаки лежат в основе классификации методов управления оптическим излучением?
9. Перечислите типы и основные характеристики методов управления оптическим излучением.
10. Перечислите основные параметры приборов управления оптическим излучением.
11. Какие устройства называются «дефлекторами», почему?
12. Что такое разрешающая способность дефлектора?
13. Какими параметрами определяется полоса пропускания дефлектора?
14. Чем определяется быстродействие дефлектора?
15. Какова связь полосы пропускания дефлектора и его быстродействия?
16. Дайте определение амплитудной и частотной характеристик дефлектора.

Раздел 3 Распространение оптического излучения в анизотропных средах

3.1 Содержание раздела

Диэлектрический тензор анизотропной среды. Распространение и свойства плоских волн в анизотропных средах. Фазовая и групповая

скорость. Классификация анизотропных сред. Распространение света в одноосных и двуосных кристаллах. Оптическая активность. Искусственная анизотропия: эффекты Поккельса и Фарадея, квадратичный электрооптический эффект и фотоупругость.

3.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Распространение оптического излучения в анизотропных средах» следует обратить внимание на подходы к описанию распространения световых волн в таких средах с использованием тензорных моделей их физических свойств и на широкое применение эффектов искусственной анизотропии в приборах и устройствах управления оптическим излучением

3.3 Вопросы для самопроверки

1. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
2. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
3. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?
4. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
5. С чем связано явление пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
6. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?
7. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
8. Что такое *циркулярное двулучепреломление*?
9. Каковы свойства *собственных (нормальных) волн среды*?
10. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные и необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
11. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
12. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
13. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
14. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
15. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?

Раздел 4 Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением

4.1 Содержание раздела

Приборы и методы управления оптическим излучением на основе электрооптического эффекта. Непрерывные электрооптические дефлекторы. Методы и приборы дискретного отклонения оптического излучения на основе электрооптического эффекта. Поляризационные переключатели. Планарные электрооптические дефлекторы.

4.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением» следует обратить внимание на характеристики анизотропных сред, используемых в электрооптических дефлекторах; на механизм взаимодействия световых полей с внешними электрическими полями в анизотропных средах; на характеристики электрооптических приборов, реализующих методы управления оптическим излучением.

4.3 Вопросы для самопроверки

1. Какое явление лежит в основе электрооптических методов управления оптическим излучением?
2. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
3. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $3m$.
4. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $mm2$.
5. Запишите уравнение для световых волн в среде с линейным двулучепреломлением при однородном внешнем поле.
6. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
7. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
8. Как проявляется совместный вклад линейного электрооптического и фотоупругого эффектов на электрооптические параметры кристаллов.
9. Опишите типы непрерывных электрооптических дефлекторов. В чем их особенности?
10. Перечислите методы дискретного отклонения оптического луча и виды поляризационных переключателей.
11. Дайте определение термину «полуволновое напряжение»
12. Опишите принцип работы амплитудного и фазового электрооптических модуляторов.

13. Перечислите характеристики монокристалла титанил-фосфата калия (KTiOPO_4), необходимые для расчета электрооптических переключателей.

14. Перечислите характеристики монокристалла ниобата лития (LiNbO_3), необходимые для расчета электрооптических переключателей.

Раздел 5 Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением

5.1 Содержание раздела

Объемные акустические волны в твердых телах. Дифракция света на упругих волнах. Брэгговские дефлекторы. Ультразвуковые рефракционные дефлекторы. Дифракция волноводных оптических волн на поверхностных акустических волнах. Планарные акустооптические дефлекторы.

5.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением» следует обратить внимание на подход к анализу взаимодействия оптического излучения с объемными и поверхностными акустическими волнами; на особенности дифракции Брэгга в анизотропных средах; на характеристики и параметры акустооптических приборов управления оптическим излучением.

5.3 Вопросы для самопроверки

1. На каких физических явлениях основано применение акустооптических модуляторов в качестве дефлекторов?

2. Запишите условия синхронизма при акустооптическом взаимодействии и поясните их физический смысл.

3. В чем особенности дифракции Рамана-Ната и Брэгга?

4. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для дифракции Брэгга в изотропной среде; выведите на её основе соотношение для угла Брэгга.

5. Что такое аномальная (анизотропная) дифракция? В каких средах она наблюдается?

6. Что такое коллинеарная дифракция, для чего она может быть использована?

7. Запишите уравнения связанных волн, описывающие дифракцию света на монохроматической акустической волне; поясните их физический смысл.

8. Что характеризует коэффициент акустооптического качества среды M_2 ?

9. Перечислите типы преобразователей, используемых для генерации акустических волн.

10. В чем заключается способ автоподстройки угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн? Как его можно реализовать?

11. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для анизотропной дифракции Брэгга с широкополосной геометрией в одноосном кристалле.

12. Запишите уравнения связанных волн, описывающих изотропную брэгговскую дифракцию света на акустических волнах. Поясните все обозначения.

13. Перечислите виды акустооптических дефлекторов.

14. Нарисуйте примерную схему одноканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

15. Нарисуйте примерную схему многоканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

16. Нарисуйте примерную схему одноканального планарного акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

Раздел 6 Магнитооптические методы и приборы управления оптическим излучением

6.1 Содержание раздела

Теория магнитооптических эффектов. Эффект Фарадея. Эффект Коттона-Мутона. Магнитооптические свойства ферромагнетиков. Магнитооптические приборы управления оптическим излучением.

6.2 Методические указания по изучению раздела

При изучении раздела «Магнитооптические методы и приборы управления оптическим излучением» следует обратить внимание на феноменологическую теорию магнитооптических эффектов; на свойства ферромагнитных сред; на характеристики и параметры магнитооптических приборов управления оптическим излучением.

6.3 Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются магнитооптические эффекты первого и второго порядка?

2. В чем суть явления «эффект Фарадея»?

3. Перечислите магнитооптические эффекты Керра, поясните их физическую сущность.

4. Какой вид имеет тензор диэлектрической проницаемости изотропной неферромагнитной среды, помещенной в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

5. Дайте определение вектора гирации.

6. Какой вид имеют тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, помещенных в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

7. Перечислите материалы, перспективные для использования в магнитооптических приборах управления оптическим излучением.

8. Нарисуйте схему фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

9. Нарисуйте схему СВЧ-фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

10. Нарисуйте схему фарадеевского модулятора добротности рубинового лазера, поясните принцип его работы.

7 Темы практических занятий

На практических занятиях обучающиеся рассматривают варианты задач. Целью занятий является закрепление знаний и углубление понимания процессов и методов, определяющих принципы построения приборов управления оптическим излучением. Уделяется внимание таким вопросам, как распространения световых волн в таких средах с использованием тензорных моделей их физических свойств и на широкое применение эффектов искусственной анизотропии, характеристики методов управления оптическим излучением и типов приборов управления оптическим излучением, выходные характеристики приборов управления оптическим излучением.

Перед практическими занятиями обучающийся должен повторить лекционный материал, ответив на вопросы для самоконтроля по необходимой теме, а также просмотреть рекомендации по решению типичных задач этой темы. Темы практических занятий приведены ниже:

1. Распространение световых волн в анизотропных и неоднородных средах.

2. Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением.

3. Дифракция света на упругих волнах.

4. Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением.

7.1 Распространение световых волн в анизотропных и неоднородных средах

7.1.1 Примеры решения задач по теме «Распространение световых волн в анизотропных и неоднородных средах»

Задача 1. Для световой волны, распространяющейся вдоль оси y в кубическом кристалле симметрии 23 , найдите все компоненты тензора диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$, в отсутствие оптического поглощения.

Примите во внимание, что в кристалле данной симметрии:

- 1) $\varepsilon_{ik}(\omega, 0) = \varepsilon_0 n_0^2 \delta_{ik}$, где $n_0(\omega)$ - его показатель преломления;
- 2) псевдотензор, характеризующий пространственную дисперсию, определяется выражением $g_{ml} = g_0 \delta_{ml}$ ($g_0 = 2n_0 \rho / k_0$, ρ - удельное оптическое вращение).

Решение. Для нахождения тензора $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$ с учетом пространственной дисперсии воспользуемся соотношением

$$\varepsilon_{ij}^r = \frac{\varepsilon_{ij}^{(0)}}{\varepsilon_0} - i \frac{\sigma_{ij}}{\varepsilon_0 \omega} - i \delta_{ijk} g_{kl} m_l,$$

где в соответствии с условиями задачи полагаем: $\sigma_{ij} = 0$, $m_1 = 0$, $m_2 = 1$ и $m_3 = 0$. Придавая индексам i и j значения от 1 до 3, в результате получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11}^r &= n_0^2 \delta_{11} - i \delta_{11k} g_{k2} m_2 = n_0^2, \quad \varepsilon_{22}^r = n_0^2, \quad \varepsilon_{33}^r = n_0^2, \\ \varepsilon_{12}^r &= n_0^2 \delta_{12} - i \delta_{123} g_{32} m_2 = -i \delta_{123} g_0 \delta_{32} m_2 = 0, \quad \varepsilon_{21}^r = 0, \\ \varepsilon_{13}^r &= n_0^2 \delta_{13} - i \delta_{132} g_{22} m_2 = -i \delta_{132} g_0 \delta_{22} m_2 = i g_0 = i \frac{2n_0 \rho}{k_0}, \quad \varepsilon_{31}^r = -i g_0 = -i \frac{2n_0 \rho}{k_0}, \\ \varepsilon_{23}^r &= n_0^2 \delta_{23} - i \delta_{231} g_{12} m_2 = 0, \quad \varepsilon_{32}^r = 0. \end{aligned}$$

Ответ:

$$\varepsilon(\omega, \vec{k}) = \begin{vmatrix} n_0^2 & 0 & -i g_0 \\ 0 & n_0^2 & 0 \\ i g_0 & 0 & n_0^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_0^2 & 0 & -i 2n_0 \rho / k_0 \\ 0 & n_0^2 & 0 \\ i 2n_0 \rho / k_0 & 0 & n_0^2 \end{vmatrix}.$$

Задача 2. Используя полученный в предыдущей задаче тензор диэлектрической проницаемости, найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации e_j плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси y .

Решение. Для решения воспользуемся общим уравнением в следующем виде:

$$\left[n^2 (\delta_{ij} - m_i m_j) - \varepsilon_{ij}^r \right] e_j = 0.$$

Из него для $i = 1$ получаем первое уравнение: учитывая, что $m_1 = 0$, $m_2 = 1$ и $m_3 = 0$:

$$\left[n^2 (\delta_{11} - m_1 m_1) - \varepsilon_{11}^r \right] e_1 + \left[n^2 (\delta_{12} - m_1 m_2) - \varepsilon_{12}^r \right] e_2 + \left[n^2 (\delta_{13} - m_1 m_3) - \varepsilon_{13}^r \right] e_3 = 0.$$

Учитывая, что $m_1 = 0$, $m_2 = 1$ и $m_3 = 0$, а также используя значения компонент найденного в предыдущей задаче тензора, отсюда находим первое уравнение из системы:

$$(n^2 - n_0^2) e_1 + i g_0 e_3 = 0.$$

Для $i = 2$ получаем второе уравнение:

$$(n^2 - n_0^2) e_2 = 0,$$

и для $i = 3$ – третье:

$$-i g_0 e_1 + (n^2 - n_0^2) e_3 = 0.$$

Ответ: Система алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации e_j плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси y :

$$\begin{cases} (n^2 - n_0^2) e_1 + i g_0 e_3 = 0, \\ (n^2 - n_0^2) e_2 = 0, \\ -i g_0 e_1 + (n^2 - n_0^2) e_3 = 0. \end{cases}$$

Задача 3. Для пленочного планарного волновода из Ta_2O_5 с показателем преломления $n_0 = 2,08$, нанесенного на стеклянную подложку с показателем преломления $n_1 = 1,51$, определите минимально необходимую толщину волноводного слоя для моды TE_2 , возбуждаемой излучением с длиной волны 633 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

Решение. Воспользуемся общим соотношением для минимальной толщины:

$$\left(\frac{h}{\lambda} \right)_{\min} = \frac{1}{2\pi \sqrt{n_0^2 - n_1^2}} \left\{ \pi p + \arctg \left[\left(\frac{n_0}{n_1} \right)^\chi \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2 - n_1^2}} \right] \right\}.$$

Для моды TE_2 имеем $\chi = 0$ и $p = 2$. Принимая показатель преломления покровной среды (воздух) $n_2 = 1$, получаем $h_{\min} = 490$ нм.

Ответ: Минимальная толщина, необходимая для возбуждения моды TE_2 , составляет 490 нм.

7.1.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Вектор напряженности электрического поля в одноосном кристалле задан в виде
$$\vec{E} = 10 \left(\frac{\vec{i}}{\sqrt{2}} + \frac{\vec{k}^0}{\sqrt{2}} \right) \text{ В/м,}$$
 а компоненты тензора диэлектрической проницаемости равны $\varepsilon_{\perp} = 4\varepsilon_0$ и $\varepsilon_{\parallel} = 2\varepsilon_0$.

Определите: 1) Вектор электрической индукции $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ данного поля; 2) вектор электрической поляризации среды $\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \cdot \vec{E}$, наводимой данным полем; 3) тензор диэлектрической восприимчивости χ ; 4) угол между векторами электрической напряженности и электрической индукции.

2. Из уравнений Максвелла и материальных уравнений для проводящей немагнитной анизотропной среды, в которой отсутствуют свободные заряды и сторонние токи, получить волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля.

3. Используя полученное в предыдущей задаче 2 волновое уравнение и решение в виде плоской электромагнитной волны

$$\vec{E}(z, t) = \vec{i} E^m \exp[i(\omega t - kz)],$$

распространяющейся в одноосном кристалле, найдите аналитическое выражение для волнового числа k .

4. Для световой волны, распространяющейся вдоль оси x в кубическом кристалле симметрии 23, найдите все компоненты тензора диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{ik}(\omega, \vec{k})$, в отсутствие оптического поглощения.

Примите во внимание, что в кристалле данной симметрии:

- 1) $\varepsilon_{ik}(\omega, 0) = \varepsilon_0 n_0^2 \delta_{ik}$, где $n_0(\omega)$ - его показатель преломления;
- 2) псевдотензор, характеризующий пространственную дисперсию, определяется выражением $g_{ml} = g_0 \delta_{ml}$ ($g_0 = 2n_0 \rho / k_0$, ρ - удельное оптическое вращение).

5. Используя полученный в предыдущей задаче тензор диэлектрической проницаемости, найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации e_j плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси x .

6. Найдите систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации e_j плоской световой волны, распространяющейся в одноосном кристалле вдоль оси y , не обладающем пространственной дисперсией и в отсутствие оптического поглощения. Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости примите равными $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_0 n_0^2$ и $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0 n_e^2$, где

n_o и n_e - обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла, соответственно.

7. Используя полученную при решении задачи 5 систему алгебраических уравнений для компонент вектора поляризации e_j плоской световой волны, распространяющейся в кубическом кристалле симметрии 23 вдоль оси x , найдите соответствующие данному направлению распространения собственные волны.

8. Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 633 нм, распространяющаяся в кристалле симметрии 23 с показателем преломления $n_o = 2,58$ и удельным оптическим вращением $\rho = 6,0^0/\text{мм}$ вдоль оси x , на входной грани, при $x = 0$, имеет векторную амплитуду $\vec{E}^{(m0)} = E^{(m0)}(\vec{y}^0 + \vec{z}^0)/\sqrt{2}$.

Найдите векторную амплитуду волны при $x = 7,5$ мм, на выходной грани кристалла.

9. Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 633 нм в одноосном кристалле, имеющем компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости, равные $\varepsilon_{\perp} = n_o^2$ и $\varepsilon_{\parallel} = n_e^2$, где $n_e = 2,202$ и $n_o = 2,2868$ - обыкновенный и необыкновенный показатели преломления, соответственно, имеет единичный вектор волновой нормали, ориентированный в плоскости yz под углом 45^0 к оптической оси z .

Найдите показатели преломления и единичные векторы поляризации собственных волн, лучевой вектор и угол между данным вектором и вектором волновой нормали.

10. Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 628 нм падает нормально на пластинку из кристаллического кварца ($n_o = 1,54282$; $n_e = 1,55188$), имеющую толщину $d = 17,3$ мкм и вырезанную перпендикулярно оси x . Найдите поляризацию излучения на выходе пластинки, если на входной грани она является линейной, с ориентацией вектора поляризации под углом 45^0 к оптической оси z .

11. К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью 50 кВ/см вдоль оси y . Используя значения показателей преломления $n_o = 2,2868$, $n_e = 2,202$ и электрооптических коэффициентов $r_{22} = 3,4 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{51} = 28 \cdot 10^{-12}$ м/В на длине волны 633 нм, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости.

12. Для пленочного планарного волновода из Si_3N_4 с показателем преломления $n_o = 1,90$, нанесенного на подслой SiO_2 с показателем преломления $n_1 = 1,46$, определите минимально необходимую толщину волноводного слоя для мод TE_0 и TM_0 , возбуждаемых излучением с длиной волны 633 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

13. Световое поле в непроводящей немагнитной среде с показателем преломления n_0 имеет следующее распределение магнитного поля:

$$\vec{H}(x, z, t) = \vec{j}H_{my}(x)\exp[i(\omega t - \beta z)].$$

1. Считая сторонние токи и свободные заряды отсутствующими, найдите выражение для компонент вектора электрической напряженности этого поля, при условии их независимости от y .

2. Получите общее уравнение, которому удовлетворяет функция, описывающая поперечное распределение поля $H_{my}(x)$.

14. Используя соотношения, полученные в предыдущей задаче **2**, найдите распределение поля $H_{my}(x)$ в ТМ-моду для пленочного планарного волновода. Нормалью к поверхности волновода является ось x , а свет распространяется вдоль оси z . Волновод состоит из диэлектрической пленки с толщиной h и показателем преломления n_0 , нанесенной напылением на подложку с показателем преломления $n_1 < n_0$. Покровная среда имеет показатель преломления $n_2 < n_0$.

Выведите дисперсионное уравнение, запишите выражения для $H_{my}(x)$ в волноводном слое, подложке и покровной среде.

15. Для пленочного планарного волновода из Ta_2O_5 с показателем преломления $n_0 = 2,08$, нанесенного на стеклянную подложку с показателем преломления $n_1 = 1,51$, определите минимально необходимую толщину волноводного слоя, поддерживающего распространение мод $TE_0 - TE_4$, возбуждаемых излучением с длиной волны 532 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

16. Для пленочного планарного волновода из Ta_2O_5 с показателем преломления $n_0 = 2,08$, нанесенного на подложку из кварцевого стекла с показателем преломления $n_1 = 1,51$, определите минимально необходимую толщину волноводного слоя, поддерживающего распространение мод $TM_0 - TM_2$, возбуждаемых излучением с длиной волны 1064 нм. Покровной средой в данной структуре является воздух.

7.2 Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением

7.2.1 Примеры решения задач по теме «Электрооптические методы и приборы управления оптическим излучением»

Задача 1. Электрооптический дефлектор предназначен для сканирования коллимированного светового пучка с апертурой $D_{вх} = 1$ см. Ширина дефлектора $b = 2$ см. Длина волны управляемого излучения $\lambda = 0,63$ мкм. Световой пучок имеет круглое сечение, для которого коэффициент формы $\xi = 1,2$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1,5$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$. Определить максимальную длину пути луча в дефлекторе L_{max} и максимальный угол отклонения светового луча $\Delta \alpha_{max}$.

Решение:

1. Находим значение коэффициента, характеризующего приращение угла отклонения на единицу длины пути луча в активной среде (принимая $D_{вх} = D_{вых}$):

$$k_L = \frac{4\Delta n}{2nD_{вых}} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,5 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} = 2,67 \cdot 10^{-2} \frac{рад}{м}.$$

2. Определяем максимальный угол отклонения светового луча:

$$\Delta\alpha_{max} = 2 \left[k_L (b - D_{вых}) \right]^{\frac{1}{2}} = 2 \cdot \left[2,67 \cdot 10^{-2} (2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}) \right]^{\frac{1}{2}} = 3,26 \cdot 10^{-2} \text{ рад}.$$

3. Находим максимальную длину пути луча в дефлекторе

$$L_{max} = \left[\frac{(b - D_{вых})}{k_L} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{(2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2})}{2,67 \cdot 10^{-2}} = 0,61 \text{ м}.$$

Ответ: $L_{max} = 0,61 \text{ м}$; $\Delta\alpha_{max} = 3,26 \text{ рад}$.

Задача 2. Электрооптический дефлектор предназначен для сканирования коллимированного светового пучка с апертурой $D_{вх} = 1 \text{ см}$. Ширина дефлектора $b = 2 \text{ см}$. Длина волны управляемого излучения $\lambda = 0,532 \text{ мкм}$. Световой пучок имеет круглое сечение, для которого коэффициент формы $\xi = 1,2$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1,6$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 2,2 \cdot 10^{-4}$. Определить максимальный угол отклонения светового луча $\Delta\alpha_{max}$, и разрешающую способность N .

Решение:

1. Находим значение коэффициента, характеризующего приращение угла отклонения на единицу длины пути луча в активной среде (принимая $D_{вх} = D_{вых}$):

$$k_L = \frac{4\Delta n}{2nD_{вых}} = \frac{4 \cdot 2,2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 1,6 \cdot 1 \cdot 10^{-2}} = 2,75 \cdot 10^{-2} \frac{рад}{м}.$$

2. Определяем максимальный угол отклонения светового луча:

$$\Delta\alpha_{max} = 2 \left[k_L (b - D_{вых}) \right]^{\frac{1}{2}} = 2 \cdot \left[2,75 \cdot 10^{-2} (2 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}) \right]^{\frac{1}{2}} = 3,32 \cdot 10^{-2} \text{ рад}.$$

3. Определяем разрешающую способность:

$$N = \frac{\Delta\alpha_{\max} D_{\text{вых}}}{\xi\lambda} = \frac{3,32 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{1,2 \cdot 0,532 \cdot 10^{-6}} = 520 \text{ эл.}$$

Ответ: $\Delta\alpha_{\max} = 3,26$ рад.; $N = 520$ эл.

7.2.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Кристалл титаната висмута (класс симметрии 23), имеющий показатель преломления $n_0 = 2,58$ и электрооптический коэффициент $r_{41} = 5$ пм/В на длине волны 633 нм, толщиной 3 мм вдоль кристаллографического направления [110], помещен в плоский конденсатор.

Найдите компоненты тензора диэлектрической непроницаемости данного образца в отсутствие приложенного напряжения и для напряжения на конденсаторе $U = 3$ кВ, принимая во внимание только электрооптический эффект.

2. Используя условия предыдущей задачи **5**, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости кристалла титаната висмута, наведенные приложенным электрическим полем.

3. К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью 10 кВ/см вдоль оси y . Используя значения показателей преломления $n_o = 2,2407$, $n_e = 2,1441$ и электрооптических коэффициентов $r_{22} = 3,4 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{51} = 28 \cdot 10^{-12}$ м/В на длине волны 1350 нм, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости.

4. К кристаллу ниобата лития приложено электрическое поле с напряженностью 20 кВ/см вдоль оси z . Используя значения показателей преломления $n_o = 2,2405$, $n_e = 2,1379$ и электрооптических коэффициентов $r_{22} = 3,4 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{51} = 28 \cdot 10^{-12}$ м/В на длине волны 1550 нм, найдите возмущения компонент тензора относительной диэлектрической проницаемости.

5. В волноводном фазовом электрооптическом модуляторе на полосковом волноводе Ti:LiNbO_3 электрическое поле приложено вдоль оси z кристалла. Найдите полуволновое напряжение для моды с эффективным показателем преломления $n_{\text{eff}} = 2,2401$ на рабочей длине волны 1550 нм, имеющей максимальную компоненту электрической напряженности светового поля также вдоль оси z , для длины электродов модулятора 5 мм. При расчетах используйте значения электрооптических коэффициентов $r_{22} = 3,4 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{13} = 8,6 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$ м/В, $r_{51} = 28 \cdot 10^{-12}$ м/В.

6. Для интерферометрического волноводного модулятора Маха-Цендера с полуволновым напряжением $U_{\lambda/2} = 5$ В в каждом плече постройте зависимость пропускания по интенсивности от приложенного напряжения.

7. Электрооптический дефлектор предназначен для сканирования сходящегося светового пучка с входной апертурой $D_{ex} = 1$ см. Ширина дефлектора $b = 1$ см, фокусное расстояние оптической системы $F = 4/3L$. Длина волны управляемого излучения $\lambda = 0,63$ мкм. Световой пучок имеет круглое сечение, для которого коэффициент формы $\xi = 1,2$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1,5$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 2 \cdot 10^{-4}$. Определить максимальную длину пути луча в дефлекторе L_{max} , расстояние от дефлектора до точки фокусирования L^1 , фокусное расстояние F , максимальный угол отклонения светового луча $\Delta\alpha_{max}$.

8. Используя условия и результаты решения предыдущей задачи 7 определите: диаметр сфокусированного пятна D_{fl} и число элементов разрешения N .

9. Используя условия и результаты решения предыдущих задач 7 и 8, определите линейный диапазон l перемещения пятна в фокальной плоскости.

10. Электрооптический дефлектор предназначен для сканирования сходящегося светового пучка с входной апертурой $D_{ex} = 1$ см. Ширина дефлектора $b = 1$ см, фокусное расстояние оптической системы $F = 4/3L$. Длина волны управляемого излучения $\lambda = 0,63$ мкм. Световой пучок имеет круглое сечение, для которого коэффициент формы $\xi = 1,2$. Показатель преломления материала дефлектора $n = 1,5$, максимальное изменение показателя преломления $\Delta n = 0,81 \cdot 10^{-4}$. Определить оптимальную длину пути луча в дефлекторе L_{opt} , расстояние от дефлектора до точки фокусирования L^1 , фокусное расстояние F , максимальный угол отклонения светового луча $\Delta\alpha_{max}$, диаметр сфокусированного пятна D_{fl} , максимальную разрешающую способность N .

7.3 Дифракция света на упругих волнах

7.3.1 Примеры решения задач по теме «Дифракция света на упругих волнах»

Задача 1. Используя уравнения движения упругой среды, уравнения состояния пьезокристалла, и уравнения Максвелла получите систему связанных волновых уравнений для электрического потенциала и составляющих упругого смещения в свободном от зарядов кристаллическом пьезоэлектрике.

Решение:

В общем случае система уравнений, описывающая упругие и электромагнитные поля в фоторефрактивных пьезокристаллах, должна включать уравнения движения упругой среды

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x_i} T_{ij}, \quad (1)$$

и уравнения Максвелла, которые могут быть представлены в форме:

$$\xi_{jik} \frac{\partial E_k}{\partial x_j} = -\mu_0 \frac{\partial H_i}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\xi_{ijk} \frac{\partial H_k}{\partial x_j} = \frac{\partial D_i}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial D_j}{\partial x_j} = \rho. \quad (4)$$

Здесь ρ_0 - плотность кристалла, T_{ij} - компоненты тензора упругих напряжений; ξ_{jik} - тензор Леви-Чивита; E_k , H_k - компоненты векторов напряженности электрического и магнитного полей; D_j - компоненты вектора электрической индукции; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; ρ - плотность объемного заряда; U_i - компонента вектора упругого смещения, связанная в линейном приближении с компонентами тензора упругих деформаций:

$$u_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_k} \right). \quad (5)$$

Уравнения состояния фоторефрактивного пьезокристалла, связывающие величины T_{ij} , u_{kl} , E_k и D_j , без учета пространственной дисперсии и изменений спонтанной поляризации могут быть записаны в виде:

$$T_{ij} = C_{ijkl}^E u_{kl} - e_{mij} E_m, \quad (6)$$

$$D_m = e_{mkl} u_{kl} + \varepsilon_{mn}^u E_n. \quad (7)$$

Здесь C_{ijkl}^E - компоненты материальных тензоров модулей упругости, измеренные при постоянном электрическом поле; ε_{mn}^u , - компоненты тензора диэлектрической проницаемости в механически зажатом кристалле; e_{mij} - пьезоэлектрические константы.

Для квазистатических акустических и электрических полей акустических волн ($v_a \ll c$) компоненты вектора напряженности электрического поля можно выразить через электрический потенциал:

$$E_i = -\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}. \quad (8)$$

Объединяя уравнения движения (1) и уравнения Максвелла (2) – (4), с учетом (5)-(7) и (8), получим систему связанных волновых уравнений для электрического потенциала и составляющих упругого смещения в свободном от зарядов кристаллическом пьезоэлектрике:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - C_{ijkl}^E \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_i} - e_{mij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_m} = 0,$$

$$e_{mkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_m \partial x_l} - \varepsilon_{mnn}^U \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_m \partial x_n} = 0.$$

Ответ: Система связанных волновых уравнений для электрического потенциала и составляющих упругого смещения в свободном от зарядов кристаллическом пьезоэлектрике имеет вид:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - C_{ijkl}^E \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_i} - e_{mij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_m} = 0,$$

$$e_{mkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_m \partial x_l} - \varepsilon_{mnn}^U \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_m \partial x_n} = 0.$$

Задача 2. Падающий под углом Брэгга световой пучок с длиной волны $\lambda = 633$ нм дифрагирует на акустической волне, распространяющейся в кристалле с показателем преломления $n = 2,66$, со скоростью $v = 3488$ м/с. Учитывая, что частота f акустических колебаний составляет 1,7 ГГц определите угол, на который в кристалле дифрагированный пучок отклоняется от падающего.

Решение

Угол Брэгга θ_B в среде с показателем преломления n связан с пространственным периодом решетки Λ и длиной волны света в вакууме λ соотношением:

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\Lambda}.$$

Учитывая, что угол дифракции θ равен удвоенному углу Брэгга, а пространственный период определяется, как $\Lambda = v/f$, получаем:

$$\theta = 2\theta_B = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda \cdot f}{2 \cdot n \cdot v} \right).$$

Подставляя сюда значения, заданные в условиях задачи, находим, что $\theta = 0,116$ рад = $6,65^\circ$.

Ответ: Угол, на который в кристалле дифрагированный пучок отклоняется от падающего, равен 0,116 рад = $6,65^\circ$.

7.3.2 Варианты задач для самоподготовки

1. Используя полученную в задаче 1 из примеров решения задач систему связанных волновых уравнений для электрического потенциала и составляющих упругого смещения запишите уравнение Грина-Кристоффеля, описывающее однородные плоские волны в свободном от зарядов кристаллическом пьезоэлектрике.

2. Используя полученное в задаче 1 уравнение Грина-Кристоффеля, найдите фазовую скорость продольной акустической волны, распространяющейся вдоль оси [111] кристалла класса симметрии 23.

3. Используя полученное в задаче 1 уравнение Грина-Кристоффеля, найдите фазовые скорости акустических волн, распространяющихся вдоль оси [110] кристалла класса симметрии 23.

4. Используя полученное в задаче 1 уравнение Грина-Кристоффеля, найдите фазовые скорости акустических волн, распространяющихся в плоскости XY кристалла класса симметрии $mm2$.

5. Падающий под углом Брэгга световой пучок с длиной волны 1.56 мкм дифрагирует на акустической волне с частотой 0.5 ГГц, распространяющейся со скоростью $4,8 \cdot 10^3$ м/с в светозвукопроводе, изготовленном из изотропного материала с показателем преломления $n = 2,2$. Определите угол, на который отклоняется дифрагированный пучок от падающего, в светозвукопроводе и вне его.

6. В акустооптическом модуляторе используется коллинеарная дифракция света на сдвиговой акустической волне, распространяющейся вдоль оси Y одноосного кристалла со скоростью $4 \cdot 10^3$ м/с. Определите диапазон частот акустической волны, при котором максимум пропускания модулятора можно перестраивать от 400 до 750 нм, если обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла равны 2,2868 и 2,202, соответственно.

7. В акустооптическом модуляторе на основе оптически отрицательного одноосного кристалла с обыкновенным и необыкновенным показателями преломления, равными соответственно 2,2868 и 2,202 на используемой длине волны 633 нм, аномальная дифракция света с широкополосной геометрией происходит на сдвиговой акустической волне, распространяющейся вдоль оптической оси Z со скоростью $3,58 \cdot 10^3$ м/с. Найдите центральную частоту для данного типа дифракции; нарисуйте диаграмму волновых векторов взаимодействующих волн, соответствующую этой частоте.

8. Рассчитайте значение коэффициента качества M_2 для акустооптического материала с показателем преломления $n=2,28$ и плотностью $\rho=9,64$ г/см³ для взаимодействия с акустической волной, имеющей скорость распространения $v_a = 4,48 \cdot 10^3$ м/с, при значении эффективной фотоупругой постоянной $p_{eff}=0,35$.

9. Рассчитайте частотную зависимость эффективности дифракции для акустооптического модулятора с размером пьезопреобразователя $d=3$ мм вдоль направления распространения света, с центральной частотой $f_0 = 250$ МГц, скоростью распространения продольной акустической волны $v_a = 6,4 \cdot 10^3$ м/с и показателем преломления $n_0=2,2$ на рабочей длине волны $\lambda = 650$ нм.

10. Рассчитайте максимальную эффективность дифракции Брэгга в акустооптическом модуляторе с параметрами $M_2=10^{-17}$ с³/кг, $d = 2$ мм, $h=0,8$ мм, $P_a = 1$ Вт, на длине волны $\lambda = 532$ нм.

7.4 Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением

7.4.1 Примеры решения задач по теме «Акустооптические методы и приборы управления оптическим излучением»

Задача 1. Схема брэгговского дефлектора представлена на рисунке 1. В качестве звукопровода дефлектора используется сульфид ртути со следующими характеристиками: размеры активной области дефлектора $L=h=0,5$ мм; скорость звука $v_{ак}=2450$ м/с; акустическое сопротивление $Z=\rho_0 \cdot v_{ак}=20 \cdot 10^6$ кг/м²·с; показатель преломления $n_0=2,89$; коэффициент оптического качества среды $M_2=954 \cdot 10^{-15}$ с³/кг. Определить рабочую полосу частот $\Delta f_{ак}$ и максимальную скорость переключения при следующих условиях: центральная частота акустических колебаний $f_{ак0}=440$ МГц; входное излучение в поперечном сечении имеет вид эллипса, имеющего в направлении распространения звука размер $b=D_{ex}=2,5$ мм; длина световой волны $\lambda = 633$ нм.

Решение

1. Из условий обеспечения выполнения дифракции Брэгга при взаимодействии световой и акустической волн определяем рабочую полосу частот:

$$\Delta f_{ак} = \frac{2 \cdot v_{ак}^2 \cdot n_0}{f_{ак0} \cdot \lambda \cdot L} = \frac{2 \cdot 2450^2 \cdot 2,89}{440 \cdot 10^6 \cdot 633 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 250 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 250 \text{ МГц}.$$

2. Максимальная скорость (частота) переключения оптического луча может быть определена как:

$$f = \frac{1}{t_D} = \frac{v_{ак}}{D_{ex}} = \frac{2450}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^6 \text{ Гц} = 1 \text{ МГц}.$$

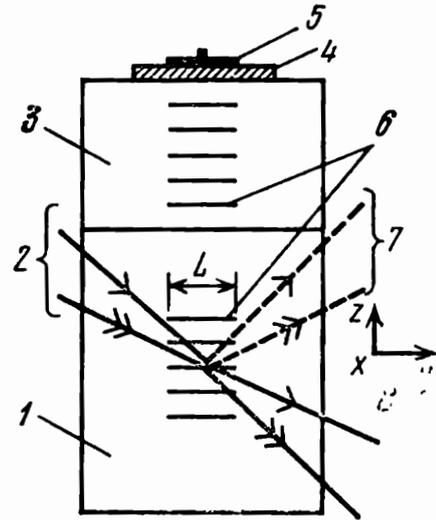


Рисунок 1 - Схема брэгговского дефлектора:

1 – кристалл сульфида ртути; 2 – входной световой пучок; 3 – плавящийся кварц; 4 – преобразователь; 5 – электрод; 6 – акустические волны; 7 – дифрагированный световой пучок; 8 – ориентация кристалла.

Ответ: Рабочая полоса частот дефлектора $\Delta f_{ак} = 250$ МГц, а максимальная скорость (частота) переключения оптического луча дефлектором составляет 1 МГц.

Задача 2. Используя условия предыдущей задачи 1 и полученные в ней результаты, определите разрешающую способность дефлектора и мощность акустической волны (без учета потерь на распространение), необходимую для отклонения всего светового потока.

Решение:

1. Определяем время прохождения акустической волной светового пучка:

$$t_D = \frac{D_{вх}}{v_{ак}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{2450} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 1 \text{ мкс.}$$

2. Определяем разрешающую способность дефлектора:

$$N = \Delta f_{ак} \cdot t_D = 250 \cdot 10^6 \cdot (1 \cdot 10^{-6}) = 250 \text{ эл.}$$

3. Находим мощность акустической волны в звукопроводе из сульфида ртути, при котором отклоняется весь световой поток:

$$P_{ак} = \frac{\Delta \Phi^2 \cdot \lambda^2 \left[\frac{h}{L} \right]}{2\pi^2 \cdot M_2} = \frac{3,14^2 \cdot (633 \cdot 10^{-9})^2 \left[\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3}} \right]}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 954 \cdot 10^{-15}} = 0,207 \text{ Вт.}$$

Ответ:

1. Количество разрешимых элементов дефлектора $N=250$.
2. Для отклонения всего светового потока необходимо, чтобы мощность акустической волны (без учета потерь на распространение) была не менее 207 мВт

7.4.2 Варианты задач для самоподготовки

1. В акустооптическом дефлекторе с линейной апертурой $D = 5$ мм, работающем в режиме изотропной дифракции Брэгга, плоская световая волна ($\lambda = 532$ нм) взаимодействует с акустической волной, распространяющейся со скоростью 4,4 км/с. Определите разрешающую способность дефлектора, если отклонение светового пучка происходит в диапазоне частот от 100 МГц до 200 МГц.

2. Используя условия задачи 1, определите диапазон угловой перестройки дефлектора.

3. В акустооптическом двулучепреломляющем Брэгговском дефлекторе на основе кристалла сапфира ($n_o = 1,765$ и $n_e = 1,757$) акустическая волна распространяется вдоль оси x со скоростью $5,85 \cdot 10^3$ м/с. Определите центральную частоту акустической волны, необходимую для дифракции линейно поляризованного светового пучка ($\lambda = 632,8$ нм) с изменением плоскости поляризации.

4. Используя условия задачи 3 покажите, что при длине акустооптического взаимодействия $L = 2,5$ мм ширина полосы пропускания дефлектора составляет 350 МГц а диапазон угловой перестройки – 2° .

5. Используя условия задачи 3, определите число элементов разрешения дефлектора и быстродействие при диаметре оптического пучка 3 мм.

6. В акустооптическом дефлекторе на основе оптически отрицательного одноосного кристалла с обыкновенным и необыкновенным показателями преломления, равными соответственно 2,2868 и 2,202 на используемой длине волны 633 нм, аномальная дифракция света с широкополосной геометрией происходит на сдвиговой акустической волне, распространяющейся вдоль оптической оси Z со скоростью $3,58 \cdot 10^3$ м/с. Найдите центральную частоту для данного дефлектора.

7. Акустооптический дефлектор должен обеспечивать разрешающую способность $N = 200$ эл. с частотой сканирования $f_c = 400$ Гц. Входное излучение имеет следующие параметры: диаметр светового пучка гелий-неонового лазера ($\lambda = 633$ нм) $D = 2$ мм; расходимость светового пучка $\gamma = 1'$; фокусное расстояние оптической системы 30 см. Определить входную апертуру дефлектора и требуемое быстродействие.

8. Используя условия и результаты решения задачи 7, определите требуемую скорость звука активной среды дефлектора и обоснуйте выбор материала активной среды.

9. Используя условия и результаты решения задач 7 и 8, определите вид акустического преобразователя, рассчитайте его параметры, определите требуемый диапазон изменения акустической частоты и геометрические размеры объема взаимодействия акустических и световых волн дефлектора.

10. Определите разрешающую способность планарного акустооптического дефлектора с коллинеарным взаимодействием акустических и световых волн с полосой сканирования $\Delta f = 10$ МГц. При расчетах учтите, что скорость акустической волны составляет $v_{ак} = 3696$ м/с, а длина коллинеарного взаимодействия $l = 17$ мм.

8 Подготовка к контрольной работе

Студенты выполняют письменную контрольную работу. Контрольная работа проводится по теме:

Распространение оптического излучения в анизотропных средах.

При выполнении контрольной работы каждому студенту выдается билет с вопросом по теоретической части и с одной задачей, выбранной из предложенных задач для самостоятельного решения (задачи представлены выше в разделе 7).

8.1 Теоретические вопросы для письменной контрольной работы по теме «Электромагнитные колебания и волны»

1. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
2. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
3. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?
4. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
5. С чем связано явление пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
6. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?
7. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
8. Что такое *циркулярное двулучепреломление*?
9. Каковы свойства *собственных (нормальных) волн среды*?
10. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные и необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
11. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
12. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
13. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
14. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
15. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?

9 Лабораторные работы

В процессе выполнения лабораторных занятий студенты, магистранты и аспиранты не только закрепляют теоретические знания, но и пополняют их. Вся работа при выполнении лабораторной работы разбивается на следующие этапы: вступительный; проведение эксперимента и (или) численных расчетов; обработка результатов.

В процессе домашней подготовки студенты, магистранты и аспиранты проверяют качество усвоения проработанного материала по вопросам для самоконтроля, относящимся к изучаемой теме. Без проведения такой предварительной подготовки к лабораторной работе обучающиеся не допускаются к выполнению эксперимента.

Помимо домашней работы, обучающиеся готовятся к выполнению эксперимента также на рабочем месте: они знакомятся с установкой, уточняют порядок выполнения работы, распределяют рабочие функции между членами бригады. В ходе аудиторной подготовки преподаватель путем собеседования выявляет и оценивает степень готовности каждого обучающегося к проведению эксперимента и (или) численных расчетов, и знание им теоретического материала. Студенты и магистранты не подготовленные к выполнению работы или не представившие отчеты по предыдущей работе, к выполнению новой работы могут быть не допущены и все отведенное время для лабораторной работы должны находиться в лаборатории, изучать по рекомендованной литературе тот материал, с которым они не познакомились дома. К выполнению работы они могут быть допущены только после собеседования и в часы сверх расписания, по договоренности с преподавателем. Все пропущенные лабораторные работы по уважительным или неуважительным причинам могут быть выполнены в конце семестра на дополнительных занятиях.

Второй этап работы – проведение эксперимента и (или) численных расчетов в лаборатории. На этом этапе очень важно, чтобы обучающийся выполнил самостоятельно и грамотно необходимые измерения и наблюдения, а также, если это определено заданием, численные расчеты, укладываясь в отведенное для этого время. При организации своей работы для проведения эксперимента и (или) численных расчетов целесообразно исходить из рекомендаций, изложенных в руководствах для выполняемой лабораторной работы.

На последнем этапе работы обучающийся производит обработку данных измерений и расчетов и анализ полученных результатов.

Отчет обучающегося по работе должен быть индивидуальным. Анализ результатов является важной частью отчета.

Ниже приведены названия лабораторных работ.

1. Электрооптический модулятор лазерного излучения.
2. Акустооптический модулятор лазерного излучения.
3. Исследование характеристик кремниевого полупроводникового фотодиода.
4. Отражение световых пучков от плоской границы раздела «воздух – диэлектрическая среда».
5. Измерение эффективных показателей преломления планарного волновода.
6. Исследование планарного акустооптического модулятора.

10 Темы для самостоятельного изучения

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют обучающемуся самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение ниже предложенных тем.

1. Пространственная дисперсия оптического излучения в анизотропных средах
 2. Электрооптические методы управления оптическим излучением в волноводных структурах.
 3. Поверхностные акустические объемные волны в твердых телах.
 4. Ультразвуковые рефракционные дефлекторы.
 5. Магнитооптические эффекты Керра
 6. Приборы и методы управления оптическим излучением на основе магнитооптических эффектов Керра.
- Студент защищает реферат по одной выбранной им теме.

11 Перечень вопросов к итоговой аттестации по дисциплинам

11.1 Приборы управления оптическим излучением (программа подготовки магистров)

1. Дайте определения основных параметров оптического излучения.
2. Какое световое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?
3. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?
4. Дайте определение понятию «когерентное излучение». Чем отличается «пространственная» когерентность от «временной»?
5. Дайте определение понятиям «однородная среда» и «неоднородная среда». Приведите примеры неоднородных сред.
6. Дайте определение показателя преломления среды.
7. Какие среды являются наиболее перспективными для приборов управления оптическим излучением?
8. Какие признаки лежат в основе классификации приборов управления оптическим излучением
9. Перечислите основные параметры приборов управления оптическим излучением.
10. Какие устройства называются «дефлекторами», почему?
11. Что такое разрешающая способность дефлектора?
12. Какими параметрами определяется полоса пропускания дефлектора?
13. Чем определяется быстродействие дефлектора?
14. Какова связь полосы пропускания дефлектора и его быстродействия?
15. Дайте определение амплитудной и частотной характеристик дефлектора.
16. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
17. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?

18. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
19. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?
20. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
21. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные* и *необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
22. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
23. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
24. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
25. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
26. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?
27. Какое явление лежит в основе работы электрооптических приборов управления оптическим излучением?
28. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $3m$.
29. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $mm2$.
30. Запишите уравнение для световых волн в среде с линейным двулучепреломлением при однородном внешнем поле.
31. Опишите типы непрерывных электрооптических дефлекторов. В чем их особенности?
32. Опишите виды электрооптических поляризационных переключателей.
33. Дайте определение термину «полуволновое напряжение»
34. Опишите принцип работы амплитудного и фазового электрооптических модуляторов.
35. Перечислите характеристики монокристалла титанил-фосфата калия ($KTiOPO_4$), необходимые для расчета электрооптических переключателей.
36. Перечислите характеристики монокристалла ниобата лития ($LiNbO_3$), необходимые для расчета электрооптических переключателей.
37. На каких физических явлениях основано применение акустооптических модуляторов в качестве дефлекторов?
38. Запишите условия синхронизма при акустооптическом взаимодействии и поясните их физический смысл.
39. В чем особенности дифракции Рамана-Ната и Брэгга?

40. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для дифракции Брэгга в изотропной среде; выведите на её основе соотношение для угла Брэгга.

41. Что такое аномальная (анизотропная) дифракция? В каких средах она наблюдается?

42. Что такое коллинеарная дифракция, для чего она может быть использована?

43. Запишите уравнения связанных волн, описывающие дифракцию света на монохроматической акустической волне; поясните их физический смысл.

44. Что характеризует коэффициент акустооптического качества среды M_2 ?

45. Перечислите типы преобразователей, используемых для генерации акустических волн.

46. В чем заключается способ автоподстройки угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн? Как его можно реализовать?

47. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для анизотропной дифракции Брэгга с широкополосной геометрией в одноосном кристалле.

48. Запишите уравнения связанных волн, описывающих изотропную брэгговскую дифракцию света на акустических волнах. Поясните все обозначения.

49. Перечислите виды акустооптических дефлекторов.

50. Нарисуйте примерную схему одноканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

51. Нарисуйте примерную схему многоканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

52. Нарисуйте примерную схему одноканального планарного акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

53. Чем отличаются магнитооптические эффекты первого и второго порядка?

54. В чем суть явления «эффект Фарадея»?

55. Перечислите магнитооптические эффекты Керра, поясните их физическую сущность.

56. Какой вид имеет тензор диэлектрической проницаемости изотропной неферромагнитной среды, помещенной в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

57. Дайте определение вектора гирации.

58. Какой вид имеют тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, помещенных в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

59. Перечислите материалы, перспективные для использования в магнитооптических приборах управления оптическим излучением.

60. Нарисуйте схему фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

61. Нарисуйте схему СВЧ-фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

62. Нарисуйте схему фарадеевского модулятора добротности рубинового лазера, поясните принцип его работы.

11.2 Методы управления оптическим излучением (программа подготовки магистров)

1. Дайте определения основных параметров оптического излучения.
2. Какое световое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?
3. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?
4. Дайте определение понятию «когерентное излучение». Чем отличается «пространственная» когерентность от «временной»?
5. Дайте определение понятиям «однородная среда» и «неоднородная среда». Приведите примеры неоднородных сред.
6. Дайте определение показателя преломления среды.
7. Какие среды являются наиболее перспективными для приборов управления оптическим излучением?
8. Какие признаки лежат в основе классификации методов управления оптическим излучением?
9. Перечислите типы и основные характеристики методов управления оптическим излучением.
10. Какие устройства называются «дефлекторами», почему?
11. Что такое разрешающая способность дефлектора?
12. Какова связь полосы пропускания дефлектора и его быстродействия?
13. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
14. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
15. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?
16. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
17. С чем связано явление пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
18. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?
19. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
20. Что такое *циркулярное двулучепреломление*?
21. Каковы свойства *собственных (нормальных) волн среды*?

22. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные* и *необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
23. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
24. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
25. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
26. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
27. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?
28. Какое явление лежит в основе электрооптических методов управления оптическим излучением?
29. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
30. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $3m$.
31. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $mm2$.
32. Запишите уравнение для световых волн в среде с линейным двулучепреломлением при однородном внешнем поле.
33. Как проявляется совместный вклад линейного электрооптического и фотоупругого эффектов на электрооптические параметры кристаллов.
34. Перечислите электрооптические методы непрерывного отклонения оптического луча?
35. Перечислите методы дискретного отклонения оптического луча и виды поляризационных переключателей.
36. Дайте определение термину «полуволновое напряжение»
37. Опишите принцип работы амплитудного и фазового электрооптических модуляторов.
38. Перечислите характеристики монокристалла титанил-фосфата калия ($KTiOPO_4$), необходимые для расчета электрооптических переключателей.
39. Перечислите характеристики монокристалла ниобата лития ($LiNbO_3$), необходимые для расчета электрооптических переключателей.
40. На каких физических явлениях основано применение акустооптических модуляторов в качестве дефлекторов?
41. Запишите условия синхронизма при акустооптическом взаимодействии и поясните их физический смысл.
42. В чем особенности дифракции Рамана-Ната и Брэгга?
43. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для дифракции Брэгга в изотропной среде; выведите на её основе соотношение для угла Брэгга.
44. Что такое аномальная (анизотропная) дифракция? В каких средах она наблюдается?

45. Что такое коллинеарная дифракция, для чего она может быть использована?

46. Запишите уравнения связанных волн, описывающие дифракцию света на монохроматической акустической волне; поясните их физический смысл.

47. Что характеризует коэффициент акустооптического качества среды M_2 ?

48. В чем заключается способ автоподстройки угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн? Как его можно реализовать?

49. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для анизотропной дифракции Брэгга с широкополосной геометрией в одноосном кристалле.

50. Запишите уравнения связанных волн, описывающих изотропную брэгговскую дифракцию света на акустических волнах. Поясните все обозначения.

51. Нарисуйте примерную схему одноканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

52. Чем отличаются магнитооптические эффекты первого и второго порядка?

53. В чем суть явления «эффект Фарадея»?

54. Перечислите магнитооптические эффекты Керра, поясните их физическую сущность.

55. Какой вид имеет тензор диэлектрической проницаемости изотропной неферромагнитной среды, помещенной в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

56. Дайте определение вектора гирации.

57. Какой вид имеют тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, помещенных в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

58. Перечислите материалы, перспективные для использования в магнитооптических приборах управления оптическим излучением.

59. Нарисуйте схему фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

60. Нарисуйте схему СВЧ-фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

11.3 Методы управления оптическим излучением (программа подготовки аспирантов)

1. Дайте определения основных параметров оптического излучения.

2. Какое световое поле называют поляризованным, а какое неполяризованным?

3. Чем отличаются волны с линейной, эллиптической и круговой (левой и правой) поляризациями?

4. Дайте определение понятию «когерентное излучение». Чем отличается «пространственная» когерентность от «временной»?
5. Дайте определение понятиям «однородная среда» и «неоднородная среда». Приведите примеры неоднородных сред.
6. Дайте определение показателя преломления среды.
7. Какие среды являются наиболее перспективными для приборов управления оптическим излучением?
8. Какие признаки лежат в основе классификации методов управления оптическим излучением
9. Перечислите типы и основные характеристики методов управления оптическим излучением.
10. Перечислите основные параметры приборов управления оптическим излучением.
11. Какие устройства называются «дефлекторами», почему?
12. Что такое разрешающая способность дефлектора?
13. Какими параметрами определяется полоса пропускания дефлектора?
14. Чем определяется быстродействие дефлектора?
15. Какова связь полосы пропускания дефлектора и его быстродействия?
16. Дайте определение амплитудной и частотной характеристик дефлектора.
17. Тензорами какого ранга описываются диэлектрическая и магнитная проницаемости и проводимость среды?
18. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
19. Какой вид имеет тензор второго ранга в одноосных кристаллах?
20. С каким явлением связана дисперсия диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
21. С чем связано явление пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости прозрачных сред на оптических частотах?
22. Каковы характерные особенности распространения плоских световых волн в оптически неактивных изотропных средах?
23. В чем заключается явление естественной оптической активности при распространении световых волн в гиротропных оптически изотропных средах?
24. Что такое *циркулярное двулучепреломление*?
25. Каковы свойства *собственных (нормальных) волн среды*?
26. Чем отличаются друг от друга *обыкновенные* и *необыкновенные световые волны* в одноосных кристаллах?
27. Как ориентирован вектор поляризации обыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
28. Как ориентирован вектор поляризации необыкновенной световой волны в одноосном кристалле?
29. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?

30. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
31. В чем суть явления «фотоупругий эффект»? Тензором какого ранга он описывается?
32. Какое явление лежит в основе электрооптических методов управления оптическим излучением?
33. Как можно записать тензор второго ранга для кубических кристаллов?
34. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $3m$.
35. Запишите тензор диэлектрической проницаемости для кристаллов класса симметрии $mm2$.
36. Запишите уравнение для световых волн в среде с линейным двулучепреломлением при однородном внешнем поле.
37. В чем суть явления «линейный электрооптический эффект Поккельса»? В каких кристаллах он наблюдается?
38. В чем суть явления «квадратичный электрооптический эффект Керра»?
39. Как проявляется совместный вклад линейного электрооптического и фотоупругого эффектов на электрооптические параметры кристаллов.
40. Опишите типы непрерывных электрооптических дефлекторов. В чем их особенности?
41. Перечислите методы дискретного отклонения оптического луча и виды поляризационных переключателей.
42. Дайте определение термину «полуволновое напряжение»
43. Опишите принцип работы амплитудного и фазового электрооптических модуляторов.
44. Перечислите характеристики монокристалла титанил-фосфата калия (KTiOPO_4), необходимые для расчета электрооптических переключателей.
45. Перечислите характеристики монокристалла ниобата лития (LiNbO_3), необходимые для расчета электрооптических переключателей.
46. На каких физических явлениях основано применение акустооптических модуляторов в качестве дефлекторов?
47. Запишите условия синхронизма при акустооптическом взаимодействии и поясните их физический смысл.
48. В чем особенности дифракции Рамана-Ната и Брэгга?
49. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для дифракции Брэгга в изотропной среде; выведите на её основе соотношение для угла Брэгга.
50. Что такое аномальная (анизотропная) дифракция? В каких средах она наблюдается?
51. Что такое коллинеарная дифракция, для чего она может быть использована?

52. Запишите уравнения связанных волн, описывающие дифракцию света на монохроматической акустической волне; поясните их физический смысл.

53. Что характеризует коэффициент акустооптического качества среды M_2 ?

54. Перечислите типы преобразователей, используемых для генерации акустических волн.

55. В чем заключается способ автоподстройки угла Брэгга фазированными преобразователями акустических волн? Как его можно реализовать?

56. Нарисуйте диаграмму волновых векторов для анизотропной дифракции Брэгга с широкополосной геометрией в одноосном кристалле.

57. Запишите уравнения связанных волн, описывающих изотропную брэгговскую дифракцию света на акустических волнах. Поясните все обозначения.

58. Перечислите виды акустооптических дефлекторов.

59. Нарисуйте примерную схему одноканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

60. Нарисуйте примерную схему многоканального акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

61. Нарисуйте примерную схему одноканального планарного акустооптического дефлектора. Поясните назначение его элементов и основные принципы функционирования.

62. Чем отличаются магнитооптические эффекты первого и второго порядка?

63. В чем суть явления «эффект Фарадея»?

64. Перечислите магнитооптические эффекты Керра, поясните их физическую сущность.

65. Какой вид имеет тензор диэлектрической проницаемости изотропной неферромагнитной среды, помещенной в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

66. Дайте определение вектора гирации.

67. Какой вид имеют тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости ферромагнитных материалов, помещенных в магнитное поле, направленное вдоль оси OZ ?

68. Перечислите материалы, перспективные для использования в магнитооптических приборах управления оптическим излучением.

69. Нарисуйте схему фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

70. Нарисуйте схему СВЧ-фарадеевского магнитооптического модулятора света, поясните принцип его работы.

71. Нарисуйте схему фарадеевского модулятора добротности рубинового лазера, поясните принцип его работы.

12 Тестовые вопросы

1. К *оптическому* диапазону относят излучение с длинами волн от:

- а) 1 мм до 1 нм ($3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{17}$ Гц);
- б) 10 м до 0,3 мм (30 МГц – 1 ТГц);
- в) 100 км до 0,1 мм (3 кГц – 3 ТГц);
- г) 1 мм до 0,1 мм (300 ГГц – 3 ТГц);
- д) 10 см до 1 см (3 ГГц – 30 ГГц).

2. **Когерентностью** называют:

- а) способность световых волн распространяться в прозрачных средах;
- б) зависимость фазовой скорости световых волн в среде от длины волны;
- в) способность световых волн распространяться в вакууме;
- г) зависимость фазовой скорости световых волн в кристаллах от их поляризации;
- д) согласованное протекание во времени нескольких волновых процессов или свойство, отражающее стабильность фазы одной или нескольких электромагнитных волн.

3. Волновое уравнение для напряженности электрического поля в непроводящей однородной изотропной безграничной среде, в которой отсутствуют объемные заряды и сторонние токи, имеет вид:

- а) $\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{\mu\epsilon} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0;$
- б) $\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0;$
- в) $\nabla^2 \vec{E} - \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0;$
- г) $\nabla^2 \vec{E} - \frac{\epsilon}{\mu} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0;$
- д) $\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0.$

4. Среднее значение вектора Пойнтинга $\langle \vec{\Pi} \rangle$ в гармоническом электромагнитном поле равно:

- а) мнимой части комплексного вектора $\dot{\vec{\Pi}} = \frac{1}{2} [\dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^*];$
- б) вещественной части комплексного вектора $\dot{\vec{\Pi}} = \frac{1}{2} [\dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^*];$

в) вещественной части комплексного вектора $\dot{\Pi} = \frac{1}{2}(\dot{\vec{E}} \cdot \dot{\vec{H}}^*)$;

г) мнимой части комплексного вектора $\dot{\Pi} = \frac{1}{2}(\dot{\vec{E}} \cdot \dot{\vec{H}}^*)$;

д) модулю комплексного вектора $\dot{\Pi} = \frac{1}{2}[\dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^*]$.

5. Какова основная функция дефлектора:

- а) управление направлением распространения оптического излучения;
- б) усиление оптического излучения;
- в) фокусировка оптического излучения;
- г) генерация оптического излучения;
- д) поглощение оптического излучения.

6. Разрешающая способность дефлектора это:

- а) число периодов колебаний светового луча при его пространственном перемещении за 1 секунду;
- б) скорость изменения пространственного положения луча при его переходе с одного элемента разрешения на другой;
- в) диапазон длин волн оптического излучения в котором работает дефлектор;
- г) число разрешимых направлений луча, укладываемых в пределах угла отклонения.

7. Какая среда является анизотропной:

- а) свойства среды в различных направлениях внутри этой среды различны;
- б) свойства среды в различных направлениях внутри этой среды одинаковы;
- в) свойства среды изменяются вдоль выделенного направления внутри этой среды;
- г) свойства среды изменяются во времени вдоль выделенного направления внутри этой среды.

8. Геометрическое место точек, в которых фаза волны остается постоянной называют:

- а) фазовой скоростью волны;
- б) фазовым или волновым фронтом;
- в) эквипотенциальной поверхностью волны;
- г) плоскостью поляризации волны;
- д) поверхностью волновой нормали.

9. Частотная дисперсия света это:

- а) зависимость фазовой скорости световых волн в кристаллах от их поляризации;

- б) вращение плоскости поляризации световой волны;
- в) перераспределение интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких световых волн;
- г) совокупность явлений, обусловленных зависимостью абсолютного показателя преломления вещества от длины волны света.

10. Линейный электрооптический эффект Поккельса наблюдается в:

- а) кристаллах, не обладающих центром симметрии;
- б) центросимметричных кристаллах;
- в) изотропных телах;
- г) проводниках.

11. Фотоупругий эффект описывается:

- а) вектором;
- б) тензором второго ранга;
- в) тензором третьего ранга;
- г) тензором четвертого ранга.

12. Электрооптические методы управления оптическим излучением основаны на:

- а) использовании дифракции света на бегущих акустических волнах;
- б) использовании дифракции света на бегущих акустических волнах в планарных волноводах;
- в) использовании эффектов, связанных с изменениями оптических индикатрис кристаллов, обладающих электрооптическим эффектом под воздействием электрического поля;
- г) использовании эффектов, связанных с перераспределением интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких световых волн.

13. Диэлектрическая проницаемость оптически анизотропной среды описывается:

- а) скалярной величиной;
- б) тензором первого ранга;
- в) тензором второго ранга;
- г) тензором третьего ранга.

14. Частота сканирования электрооптического дефлектора

- а) число периодов колебаний светового луча при его пространственном перемещении за 1 секунду;
- б) скорость изменения пространственного положения луча при его переходе с одного элемента разрешения на другой;
- в) диапазон длин волн оптического излучения, в котором работает дефлектор;

г) число разрешимых направлений луча, укладываемых в пределах угла отклонения.

15. В планарном волноводе показатель преломления волноводного слоя:

- а) не должен превышать показатели преломления как для подложки, так и для покровной среды;
- б) должен быть равным показателю преломления покровной среды и превышать показатель преломления подложки;
- в) должен быть равным показателю преломления подложки и превышать показатель преломления покровной среды;
- г) должен превышать показатели преломления подложки и покровной среды.

16. В основе акустооптических методов методы управления оптическим излучением лежит

- а) явление изменения показателя преломления оптически прозрачных фотоупругих сред под воздействием возбуждаемых в них акустических волн;
- б) явление изменения показателя преломления от температуры;
- в) явление изменения оптических индикатрис кристаллов, обладающих электрооптическим эффектом под воздействием электрического поля;
- г) использование эффектов, связанных с перераспределением интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких световых волн.

17. Вектор поляризации продольной объемной акустической волны:

- а) ортогонален направлению распространения продольной акустической волны;
- б) совпадает с вектором поляризации поперечной акустической волны;
- в) имеет направление, противоположное направлению распространения продольной акустической волны;
- г) совпадает с направлением распространения продольной акустической волны.

18. При аномальной дифракции Брэгга векторы поляризации падающей и дифрагированной световых волн:

- а) ортогональны;
- б) коллинеарны;
- в) имеют противоположное направление;
- г) совпадают с направлением распространения акустической волны.

19. Амплитуда поверхностной акустической волны:

- а) не изменяется при удалении точки наблюдения от поверхности в глубину кристалла;

- б) возрастает при удалении точки наблюдения от поверхности в глубину кристалла;
- в) убывает при удалении точки наблюдения от поверхности в глубину кристалла;
- г) изменяется по синусоидальному закону при удалении точки наблюдения от поверхности в глубину кристалла.

20. Магнитооптический эффект Керра заключается в том, что:

- а) при прохождении линейно поляризованной световой волны через намагниченный материал наблюдается вращение плоскости поляризации световой волны, и световая волна становится эллиптически поляризованной;
- б) при отражении линейно поляризованной световой волны от поверхности намагниченного материала наблюдается вращение плоскости поляризации световой волны, и световая волна становится эллиптически поляризованной;
- в) при прохождении линейно поляризованной световой волны через немагнитный материал наблюдается вращение плоскости поляризации световой волны, и световая волна становится эллиптически поляризованной;
- г) при отражении неполяризованной световой волны от поверхности намагниченного материала наблюдается вращение плоскости поляризации световой волны, и световая волна становится эллиптически поляризованной.

Рекомендуемая литература

1. Розеншер Э. Оптоэлектроника : Пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; ред. пер. О. Н. Ермаков. - М. : Техносфера, 2006. - 588 с. (40 экз.)
2. А.Н. Пихтин. Квантовая и оптическая электроника [Текст] : учебник для вузов / А. Н. Пихтин. - М. : Абрис, 2012. - 656 с. (41 экз.)
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. / М.М. Мирошников. – 3-е изд., испр. - СПб: Издательство «Лань», 2010. –704с. ISBN 978-5-8114-1036-1.
http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=597
4. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем: Учебное пособие. 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 448 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=147
5. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
6. Звелто О. Принципы лазеров / О. Звелто. – СПб-б. : Лань, 2008. – 720 с.
7. Хакен Г. Лазерная светодинамика / Г. Хакен ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 350 с.

8. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника: Учебное пособие. – СПб.: Издательство СПбГУ ИТМО, 2008 – 142 с.
9. Введение в интегральную оптику / Под ред. М. Барноски; пер. с англ. под ред. Т.А. Шмаонова. – М.: Мир, 1977. – 367 с.
10. Прикладная физическая оптика: Учебник для вузов/И.М. Нагибина, В.А. Москалев, Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. - М.: Высш. шк., 2002.
11. Введение в квантовую и оптическую электронику: учеб. пособие. - 2-е изд., испр. / С.М. Шандаров, А.И. Башкиров. – Томск: ТУСУР, 2012. – 98 с., <http://edu.tusur.ru/training/publications/1578>.
12. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие / В.М. Шандаров; Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 197 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/750>.
13. Айхлер Ю., Айхлер Г.Н. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: Техносфера, 2012. – 496 с. ISBN 978-5-94836-309-7.
14. Ребрин Ю. К. Управление оптическим лучом в пространстве. – М.: Сов. радио, 1977.
15. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Под ред. В. В. Леманова. Пер. с франц. – М.: Наука, 1982.
16. Акустические кристаллы. Справочник под ред. М. П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982.
17. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. – М.: Сов. радио, 1978.
18. Интегральная оптоэлектроника: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. И. Башкиров [и др.]. – Томск: ТУСУР: 2013. – 39 с. – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/297>
- 19.Мандель, А. Е. Электрооптический модулятор лазерного излучения: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. Е. Мандель, С. М. Шандаров, Н. И. Буримов. — Томск: ТУСУР, 2018. — 14 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8056>
- 20.Мандель, А. Е. Акустооптический модулятор лазерного излучения: Методические указания к лабораторной работе [Электронный ресурс] / А. Е. Мандель, С. М. Шандаров, Н. И. Буримов. — Томск: ТУСУР, 2018. — 11 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/8053>
- 21.Шандаров, С. М. Отражение световых пучков от плоской границы раздела «воздух – диэлектрическая среда»: Методические указания к лабораторной работе для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика» и «Электроника и наноэлектроника» [Электронный ресурс] / С. М. Шандаров, Н. И. Буримов. — Томск: ТУСУР, 2013. — 19 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/3494>

Учебно-методическое пособие

Буримов Н.И.

Шандаров С.М.

Приборы и методы управления оптическим излучением

Методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной
работе

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40