

ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
СДМ.04 – «Лазеры и нелинейная оптика. Часть 2», 5/10
специальности 010700/12 и 010700/02
магистерские программы 12 и 17

Разработчик:

профессор, докт. физ.-мат. наук С.Ф.Бурейко

Рецензент:

профессор, докт. физ.-мат. наук М.О.Буланин

Санкт – Петербург – 2007 г.

1. Организационно-методический раздел

- 1.1. Цель изучения дисциплины (5/10):** Развить полученные студентами в 1-й части курса знания о физических основах работы оптических квантовых генераторов, ознакомить с современными достижениями в получении ультракоротких и сверхмощных лазерных импульсов и природе нелинейных оптических эффектов при их воздействии на вещество, сформировать представления о возможностях применения лазеров в спектроскопии, химии, биологии и других областях науки и техники,
- 1.2. Задача курса (5/10):** Изучение методов селекции мод и стабилизации частоты лазерного излучения, природы ширины линии генерации и путей синхронизации мод. Знание основных нелинейных оптических эффектов, теоретических основ и методов использования в оптической спектроскопии параметрического усиления и преобразования частот, спонтанного и вынужденного комбинационного рассеяния, КАРС-спектроскопии и гиперкомбинационного рассеяния. Освоение теоретических аспектов оптики фемтосекундных лазерных импульсов и их применения для сверхмощных воздействий на материю.
- 1.3. Место курса в профессиональной подготовке выпускника:** дисциплина «Лазеры и нелинейная оптика» является одной из базовых в подготовке магистров-физиков в области молекулярной спектроскопии. Современная оптическая спектроскопия активно использует последние достижения в области лазерной техники, ее развитие связано с активным применением методов нелинейной оптики. Подготовка выпускника-спектроскописта с необходимостью должна включать владение соответствующими знаниями явлений нелинейной оптики и методами лазерной спектроскопии.
- 1.4. Требования к уровню освоения дисциплины СДМ.04 – «Лазеры и нелинейная оптика. Часть 2» 5/10**
- получить теоретические представления о методах селекции и синхронизации мод лазера и стабилизации его частоты, ознакомиться с экспериментальными путями их реализации;
 - знать основные характеристики поведения нелинейных диэлектриков в постоянном и переменном электрическом поле, специфике нелинейной восприимчивости среды и наиболее распространенных нелинейных оптических эффектах;
 - знать основы методов лазерной спектроскопии комбинационного и вынужденного комбинационного рассеяния, гиперкомбинационного рассеяния и КАРС-спектроскопии и оптимальные условия их применения;
 - освоить современное состояние лазерной спектроскопии со сверхвысоким временным разрешением и оптики фемтосекундных лазерных импульсов.

2. Объем дисциплины, виды учебной работы, форма текущего, промежуточного и итогового контроля

Всего аудиторных занятий	32 часа
из них: - лекций	32 часа
- практические занятия	-
Самостоятельная работа студента	8 часов
Итого (трудоемкость дисциплины)	40 часов

3. Содержание дисциплины (десятый семестр)

3.1

1. Вводная лекция. История развития квантовой электроники. Статистика Бозе-Эйнштейна, квантовая теория излучения Дирака. Развитие в радиоспектроскопии монохроматических источников излучения и объемных резонаторов высокой добротности. Создание мазера и – затем – монохроматических генераторов оптических колебаний (лазеров). Развитие лазеров от рубинового до фемтосекундных тераваттных лазеров.

2. Методы селекции мод резонаторов частоты. Пути создания условий увеличения потерь нежелательных мод. Выбор мощности накачки. Выбор длины резонатора. Диафрагмирование сечения пучка для подавления поперечных мод. Внутренняя и внешняя селекция, уменьшение выходной мощности лазера во втором случае. Преимущества внутрирезонаторной селекции мод.

3. Стабилизация частоты излучения. Зависимость флуктуации частоты от флуктуаций длины резонатора и показателя преломления активной среды. Причины долговременного дрейфа частоты и коротковременных её флуктуаций от параметров окружающей среды. Влияние температуры, давления, колебаний зеркал, стабильности газового разряда или струи красителя на частоту излучения. Методы стабилизации частоты лазера.

4. Ширина линии генерации одномодового лазера. Конечный нижний предел ширины лазерной линии. Три источника шумов фундаментальной природы. Спонтанное излучение возбужденных атомов с верхнего лазерного уровня. Флуктуации амплитуды вследствие статистического распределения числа фотонов в генерирующей моде. Флуктуации фазы – основной вклад в величину предельной ширины лазерной линии. Теоретический нижний предел ширины лазерной линии, соотношение Таунса-Шавлова.

5. Синхронизация мод. Получение коротких импульсов. Модовая структура поля в резонаторах. Частота межмодовых биений. Требования к режиму синхронизации мод. Периодическая модуляция параметров лазерного резонатора. Сохранение постоянной разности фаз между синхронизированными колебаниями - условие жесткой синхронизации. Активная и пассивная синхронизация мод.

6. Нелинейные диэлектрики в постоянном и переменном электрическом поле. Понятие нелинейной оптики. Уравнения Максвелла. Зависимость величин χ и ϵ от напряженности в сильном постоянном поле. Нелинейная восприимчивость в случаях изотропных и анизотропных сред. Поляризация в высокочастотном поле. Возникновение гармоник в сильном световом поле вследствие нелинейных свойств среды.

7. Генерация кратных гармоник. Фазовый синхронизм. Эксперимент по генерации второй гармоники. Теоретическое рассмотрение процесса генерации волны на удвоенной частоте. Соотношения фазовых скоростей распространения основной волны и гармоник. Пути ослабления и усиления потока энергии второй гармоники. Понятие когерентной длины. Условия полной передачи энергии падающей волны волне второй гармоники. Условие фазового синхронизма. Использование излучения второй гармоники.

8. Свойства тензора нелинейной восприимчивости. Физическая природа нелинейных коэффициентов. Связь тензора χ с электрооптическим тензором r . Тензоры n -порядка, определение $\chi^{(n)}$ для конкретной среды. Случай

центросимметричных и нецентросимметричных кристаллов. Правило Клейнмана для прозрачных кристаллов с электронным характером нелинейности.

9. Нелинейные оптические эффекты. Оптическое детектирование. Нелинейное изменение показателя преломления. Основные возможные причины нелинейности показателя преломления. Пример: исследование нелинейной рефракции газообразного ксенона в поле излучения эксимерного XeCl лазера. Многофотонное поглощение и многофотонный фотоэффект. Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна. Явление самофокусировки лазерного излучения.

10. Параметрическое усиление и преобразование частот. Параметрическое взаимодействие как процесс, обратный процессу смешения частот. Роль фотонного шума. Схема параметрического генератора света, основные используемые кристаллы источники излучения накачки. Последовательное использование параметрических генераторов для получения коротких импульсов. Трех- и четырехфотонное параметрическое взаимодействие. Генерация «белых» пикосекундных импульсов.

11. Спонтанное комбинационное рассеяние.

Комбинационное рассеяние - один из немногих нелинейных оптических эффектов, наблюдавшихся до появления лазеров. Основные понятия теории комбинационного рассеяния (КР), классическое описание Плачека. Стоксово и антистоксово КР. Квантовомеханический подход для описания интенсивностей линий.

12. Вынужденное КР (классическая модель). Модуляция света молекулярными колебаниями в поле мощного лазера. Демонстрация эффекта в нитробензоле и жидком азоте. Пространственная когерентность рассеянного излучения рост интенсивности рассеянных компонент. Классическое описание явления. Пороговый характер процесса. Стоксово и антистоксово вынужденное КР. Необходимость соблюдения фазового синхронизма. Основные различия между спонтанным и вынужденным КР.

13. КАРС-спектроскопия (Спектроскопия когерентного антистоксова КР). Гиперкомбинационное рассеяние.

Теоретическая модель КАРС-спектроскопии. Типичные схемы экспериментальных установок. Применения КАРС в изучении пространственного распределения температуры в пламенах. Достоинства КАРС-спектроскопии: высокий уровень сигнала, возможность спектрального и пространственного разделения сигнала от флуоресценции или теплового излучения, высокое пространственное разрешение и возможность изучения микрообъемов вещества. Условия наблюдения гиперкомбинационного рассеяния. Основные положения теории ГКР.

14. Экспериментальные методы и приложения лазерной спектроскопии КР. Сложности детектирования слабых сигналов на фоне интенсивного поля излучения. Методы увеличения интенсивности рассеянного сигнала. Использование многоходовых кювет, внутрирезонаторных методов, оптических многоканальных анализаторов, оптических волноводов, дифференциальных схем регистрации. Применение КАРС-спектроскопии в диагностике нестационарной плазмы.

15. Лазерная спектроскопия со сверхвысоким временным разрешением. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. Последние достижения в получении предельно коротких импульсов света (длительностью до 1 периода оптического колебания) и сверхсильных световых полей. Исследования быстрорелаксирующих возбуждений в полупроводниках,

многоатомных молекулах и металлах, оптически индуцируемых фазовых переходов в веществе. Реализация предельных скоростей оптической обработки и передачи информации. Возможность достижения напряженности световых полей, превышающих внутриатомные, и наблюдения эффектов, предсказываемых нелинейной квантовой электродинамикой.

16. Методы получения фемтосекундных лазерных импульсов. Метод фазировки спектральных компонент света для укорочения импульса и увеличения его пиковой мощности. Получение широкополосного излучения при взаимодействиях лазерных импульсов в нелинейной среде. Использование фазового модулятора и компрессора, диспергирующие элементы. Элементарная теория оптического компрессора. Применение титан-сапфирового лазера.

17. Воздействие фемтосекундных импульсов на среду. Пикосекундная и фемтосекундная КАРС-спектроскопия. Получение информации о механизмах и скоростях процессов дефазировки молекулярных колебаний. Восстановление спектра по импульсному отклику. Импульсное вынужденное рассеяние. Управление молекулярными колебаниями с помощью фемтосекундных импульсов: возбуждение колебаний цугом импульсов, эффекты «гашения» и «выпрямления» колебаний.

Перспективные направления исследований: сверхкороткие и рентгеновские импульсы; сильные нелинейности и «управление света светом»; от нелинейной оптики атомов и молекул к нелинейной электронной физике; туннельная ионизация атомов; лавинный оптический пробой;

18. Основные типы современных лазеров (обзор-повторение). Гелий-неоновый лазер. Аргонный лазер. Кадмиевый лазер. Медный лазер. CO₂-лазер. Газодинамический лазер. Химический лазер. Фотодиссоциационный лазер. СО-лазер. Азотный и водородный лазеры. Эксимерные лазеры. Рубиновый лазер. Неодимовый лазер. Лазеры на красителях. Лазеры на F-центрах. Полупроводниковые лазеры.

3.2 Лабораторный практикум

Раздел 3.2 в данной программе отсутствует.

3.3 Перечень примерных контрольных вопросов и заданий

- Дать сравнительную характеристику различных способов внутренней селекции мод.
- Проанализировать причины долговременного дрейфа и коротковременных флуктуаций частоты лазерного излучения.
- Изложить основные экспериментальные пути для достижения фазового синхронизма.
- Различия между спонтанным и вынужденным комбинационным рассеянием.
- Описать физические процессы, приводящие к возникновению нелинейного вклада в показатель преломления.
- Преимущества и недостатки спектроскопии КАРС.
- Дать анализ условий возникновения гашения, выпрямления, расщепления молекулярных колебаний фемтосекундными импульсами.

3.4 Темы курсовых работ

Раздел 3.4 в данной программе отсутствует

3.5 Темы рефератов

1. Действие фемтосекундных импульсов на среду.
2. Поляризация нелинейных диэлектриков в постоянном и переменном электрическом поле.
3. Многомодовость резонатора и режим синхронизации мод.

3.6 Примерный перечень вопросов к экзамену по второй части курса (10 семестр)

1. 1). Селекция мод и методы её реализации.
2). Условие фазового синхронизма.
2. 1). Способы внутренней селекции мод.
2). Самофокусировка лазерного излучения.
3. 1). Стабилизация частоты лазера.
2). Эффекты воздействия на систему последовательности фемтосекундных импульсов
4. 1). Причины долговременного дрейфа и коротковременных флуктуации частоты излучения.
2). Использование анизотропных одноосных кристаллов для достижения фазового синхронизма.
5. 1). Остаточная ширина линии генерации, источники её существования. Соотношение Шавлова-Таунса.
2). Гиперкомбинационное рассеяние.
6. 1). Источники шумов, приводящие к уширению линии генерации. Многомодовость резонатора. Режим синхронизации мод. Условие жесткой синхронизации.
2). Простейшая практическая схема компрессии световых импульсов.
7. 1). Методы активной и пассивной синхронизации мод.
2). Схема параметрического усиления и генерации.
8. 1). Поляризация нелинейных диэлектриков в постоянном электрическом поле. Восприимчивость среды (изотропный случай).
2). Методы повышения интенсивности генерации второй гармоники.
9. 1). Поляризация нелинейных диэлектриков в высокочастотном поле малой напряженности и в сильном световом поле.
2). Явления, дающие вклад в нелинейную рефракцию.
10. 1). Генерация второй гармоники.
2). Различия между спонтанным и вынужденным комбинационным рассеянием.
11. 1). Основные нелинейные оптические эффекты.
2). Пороговое значение интенсивности падающего излучения для ВКР.

12. 1). Нелинейное изменение показателя преломления.
2). Чем различаются случаи изотропной и анизотропной среды для χ и ϵ ?
13. 1). Параметрическое усиление и генерация.
2). Фемтосекундная КАРС-спектроскопия. Импульсный отклик среды – функция Грина.
14. 1). Вынужденное комбинационное рассеяние, его пороговый характер.
2). Различие поляризации в слабом и сильном световом поле.
15. 1). Принципы спектроскопии КАРС, её достоинства и недостатки.
2). Сравнительная интенсивность стоксовых и антистоксовых линий в спонтанном КР.
16. 1). Генерация фемтосекундных импульсов.
2). Когерентная длина.
17. 1). Метод компрессии фазово-модулированного импульса.
2). Принцип КАРС.
18. 1). Импульсное вынужденное рассеяние.
2). Какая характеристика соответствует в импульсной спектроскопии восприимчивости в «частотной» спектроскопии?
19. 1). Действие фемтосекундных импульсов (одиночный, пара импульсов, цуг импульсов) на среду.
2). Остаточная ширина линии генерации, источники её существования.
20. 1). Гашение, «выпрямление», «раскачка» молекулярных колебаний фемтосекундными импульсами.
2). Самофокусировка лазерного излучения.

4. Учебно-методическое обеспечение курса

4.1 Перечень обучающих, контролирующих и расчетных программ, диафильмов, слайд фильмов, кино и видео фильмов

Лектор при изложении части тем применяет проектор для демонстрации слайдов и мультимедийную технику.

4.2 Активные методы обучения

В данном курсе используются классические аудиторные методы. Практикуется самостоятельный вывод студентами некоторых формул, вопросы к аудитории по ранее освоенным курсам и материалу предыдущих лекций. В течение семестра организуются 2-3 экскурсионные посещения лабораторий с различными действующими лазерными установками.

4.3 Материальное обеспечение дисциплины, технические средства обучения и контроля

Стандартная лекционная аудитория, три изданных автором пособия по курсу,

4.4 Литература

4.4.1 Основная

1. С.А.Ахманов, С.Ю.Никитин. Физическая оптика. М.: Изд.МГУ. 1998.
2. О. Звелто. Принципы лазеров. СПб.: Изд. «Лань», 2008.
3. Н.И.Коротеев, И.Л.Шумай. Физика мощного лазерного излучения. М.: Наука. 1991.
4. Г.М.Страховский, А.В.Успенский, Основы квантовой электроники. М.: Высшая школа.1973.
5. Н.В.Карлов, Лекции по квантовой электронике. М.: Наука. 1983.
6. А.Ярив, Квантовая электроника. М.: Сов. Радио. 1980.
7. В.Демтредер, Лазерная спектроскопия.. М.: Наука. 1985.
8. С.А.Ахманов, Н.И.Коротеев. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука 1981.

4.4.2 Дополнительная

1. Е.Б.Александров, В.С.Запасский, Легенда об остановленном свете // УФН. 2004. Т.174. Вып.10. С.1105 -1108.
2. Е.Б.Александров, В.С.Запасский, В погоне за «медленным светом» // УФН. 2006. Т. 176. Вып.10. С.1093 - 1102.
3. Й.Херман, Б.Вильгельми, Лазеры сверхкоротких световых импульсов. М.: Мир. 1986.
4. Е.Б.Александров, В.С.Запасский. О фотонах и спинах. СПб.: Изд. СПбУ, 2008.
5. Ф.Цернике, Дж.Мидвинтер, Прикладная нелинейная оптика. М.: Мир. 1976.
6. С.А.Ахманов, Н.И.Коротеев, Спектроскопия рассеяния света и нелинейная оптика, нелинейнооптические методы активной спектроскопии комбинационного и рэлеевского рассеяния // УФН. 1977. Т. 123. Вып.3. С. 405 – 471.
7. Ф.Бертен, Основы квантовой электроники. М.: Мир. 1971.
8. Н.Бломберген (Ред.), Нелинейная спектроскопия. М.: Мир. 1979.