МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

УТВЕРЖДЕНА

Решением научно-технического совета

протокол № 1 от «24» января 2022 г.

Председатель НТС, первый проректор -

проректор по научно-исследовательской

работе _____ А.Б. Прокофьев

Ученый секретарь НТС

_____ Л.В. Родионов

ПРОГРАММА КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА

по научной специальности
1.3.19. Лазерная физика

Самара 2022

Введение

Определение лазера. Особенности лазерного излучения. Взаимодействие электромагнитного излучения с рабочим веществом лазера. Ширина уровней энергии и спектральных линий. Однородное и неоднородное, статистическое уширение. Эффект насыщения. Его проявление при однородном и неоднородном уширении спектральной линии.

1. Спонтанное излучение, вынужденное излучение, поглощение. Усиление излучения. Линия излучения и поглощения.

Элементарные акты резонансного взаимодействия света с двухуровневой квантовой системой (атом, молекула). Вынужденные и спонтанные переходы Вероятность w[1/сек] вынужденного перехода (формула $w=B\rho_{\nu,\nu}$). Коэффициент Эйнштейна B. Вероятность спонтанного излучательного перехода (коэффициент Эйнштейна A[1/сек]). Формула Планка в записи Эйнштейна: распределение по частотам $\rho_{\nu,\nu}$ как функция коэффициентов Эйнштейна A и B и числа фотонов в моде n. Связь между коэффициентами A и B. Связь между вероятностями вынужденного и спонтанного излучения ($w=An$). Поглощение и усиление света. Инверсная населенность как условие для усиления света при резонансных переходах в двухуровневой среде.

Вероятность w[1/сек] вынужденного перехода (вынужденное испускание и поглощение) в терминах рассеяния фотонов на атомах и молекулах. Сечение вынужденного перехода. Коэффициент усиления (или поглощения). Коэффициент усиления бегущей волны. Усиление света с учетом спонтанного излучения. Уравнение для интенсивности света и его решение. Оптические усилители: с внешним входным сигналом и суперлюминесцентные (без внешнего входного сигнала). Чувствительность оптических усилителей. Способы достижения предельной чувствительности. Полоса пропускания усилителя бегущей волны. Шум квантового усилителя. Максимальная выходная мощность. Особенности распространения импульсов электромагнитного излучения в усиливающих и насыщающихся средах. Естественное время жизни, ширина линии спонтанного излучения, время поперечной и продольной релаксации. Времена жизни возбужденных состояний. Естественная ширина спектральных линий, однородное и неоднородное уширение. Лоренцева форма линии. Гауссова форма линии при доплеровском уширении. Изменение энергии поля излучения в активной среде. Скоростные (кинетические сравнения). Эффект выжигания дыр в неоднородной линии.

Принципы работы лазера. Свойства лазерных пучков – монохроматичность, когерентность, расходимость, яркость и эффективная температура. Характеристики лазерного излучения: монохроматичность, направленность, когерентность, мощность. Сравнительные характеристики

"долазерных" и лазерных источников света. Классификация лазеров по состоянию активной среды, способу возбуждения, мощности. Основные характеристики лазеров.

2. Теория частичной когерентности.

Комплексное представление немонохроматических полей. Корреляционная функция световых пучков. Функция взаимной когерентности, автокогерентность, степень когерентности. Спектральное представление взаимной когерентности. Формула Винера-Хинчина. Интерференция квазимонохроматического света. Экспериментальное измерение степени когерентности. Распространение взаимной когерентности. Теорема Ван-Цитерта-Цернике. Формула Гопкинса.

3. Усилители. Оптические квантовые генераторы

Открытый резонатор и его добротность. Регенерация резонатора при усилении. Проходной и отражательный резонаторные усилители. Условие самовозбуждения, условие резонанса. Частота генерации. Максимальная выходная мощность.

4. Открытые резонаторы

Резонаторы в электронике, переход к коротким волнам, падение добротности и сгущение резонансов замкнутого объема. Прореживание спектра в отражательном резонаторе, число Френеля. Моды, время жизни моды пассивного резонатора. Дифракционные потери, метод А.Фокса и Т.Ли. Интегральное уравнение открытого резонатора. Конфокальный резонатор, распределение поля. Размер пятна. Расходимость излучения, радиус кривизны волнового фронта. Преобразование гауссовых пучков линзой. Согласования мод резонаторов. Фокусирование гауссовых пучков. Метод лучевых матриц и его применение в лазерной физике. Устойчивость линзовых световодов, условие и диаграмма устойчивости.

Эквивалентность линзового световода и открытого резонатора. Типы устойчивых резонаторов. Селекция поперечных мод диафрагмой. О преимуществах неустойчивых резонаторов.

5. Неустойчивые резонаторы

Геометро-оптическое рассмотрение, коэффициент увеличения, потери на излучение. Симметричный резонатор. Конфокальный резонатор. Эквивалентное число Френеля. Селекция продольных мод. Дисперсионные резонаторы.

6. Синхронизация мод

Генерация в нескольких продольных модах, нерегулярный характер генерации, затягивание мод. Синхронизация мод, длительность и период следования импульсов Активная и пассивная синхронизация, самосинхронизация. Модуляция добротности. Провал Лэмба.

7. Лазеры

Особенности активной газообразной среды, основные методы возбуждения. Резонансная передача энергии при столкновениях. Гелий-неоновый лазер. Ионные лазеры (аргоновые) лазеры на парах металлов.

CO_2 – лазеры. Требования к рабочему веществу мощных лазеров с высоким КПД. Колебательно-вращательные спектры молекул, P,Q,R - ветви. Полная и частичная инверсия населённостей. Нормальные колебания многоатомных молекул. CO_2- лазер, механизм инверсии. Лазеры с продольной прокачкой, отпаянные лазеры. Импульсный разряд, ТЕА-лазеры. Электроионизаиионные лазеры. Газодинамические лазеры.

Химические лазеры. Неравновесное возбуждение в процессе химической реакции. HF – лазер импульсного действия. КПД инициирования, химический КПД. Кислородно-йодный лазер.

CO-лазеры. Механизм инверсии (ангармоническая накачка). Спектр генерации.

Газовые лазеры на электронных переходах молекул. Азотный лазер, цикл оптической накачки, паразитные процессы, эксимерные лазеры.

Полупроводниковые лазеры. Зоны разрешенных состояний. Уровень Ферми. Квазиуровни Ферми. Условие инверсии. Диодные инжекционные лазеры. Гетероструктуры

Лазеры на свободных переходах. Лазер на свободных электронах. Длина волны излучения ультрарелятивистского электронного пучка.

8. Нелинейные процессы в поле лазерного излучения. Генерация гармоник

Генерация гармоник в приближении заданного поля. Несинхронная генерация второй гармоники. Когерентная длина. Фазовый синхронизм. Влияние дифракции на эффективность процесса генерации гармоники. Генерация второй гармоники в незаданном поле. Нелинейная длина. Генерация высших гармоник. Резонансные эффекты при генерации гармоник.

Параметрические эффекты. Генерация субгармоники. Роль затухания при генерации гармоник и субгармоник. Порог генерации субгармоники. Параматрическая люминесценция. Невырожденная генерация параметрических волн в заданном поле накачки. Параметрические генераторы и усилители света. Параметрическая суперлюминесценция. Насыщение усиления при параметрической генерации.

Вынужденные рассеяния. Вынужденное рассеяние Манделыптамма-Бриллюэна (ВРМБ). Диаграмма направленности ВРМБ. Порог генерации ВРМБ. Борьба с ВРМБ при работе с многокаскадными усилителями. Использование ВРМБ при модуляции добротности. Обращение волнового фронта при ВРМБ. Вынужденное комбинационное

рассеяние (ВКР). Диаграмма направленности ВКР. Порог генерации ВКР. Использование ВКР в лазерной технике. Другие виды вынужденного рассеяния.

Самофокусировка и самовоздействие света. Дифракция и нелинейная рефракция. Волноводное распространение лазерных пучков. Критическая мощность. Механизмы самофокусировки. Уравнение для ширины пучка. Нелинейный фокус. Ограничения поля в фокусе. Пространственная и временная неустойчивость процесса самофокусировки.

9. Нелинейные эффекты в резонансных средах

Взаимодействие двухуровневой квантово-механической системы с излучением. Самоиндуцированная прозрачность. Стационарные 2тг-импульсы. Спиновое и фотонное эхо. Оптическая нутация. Давление газа (идеальный газ, плазма, фотонный газ). Давление однонаправленного пучка одинаковых частиц (фотонов − лазерный пучок, электронов, ионов, атомов, молекул). Давление плазмы при испарении вещества лазерным излучением. Образование плазмы при равновесном стационарном нагреве металлической мишени лазерным излучением. Пороговая интенсивность плазмообразования. Соотношение между давлением света (лазерного излучения) и давлением плазмы, созданной этим излучением вблизи поверхности мишени. Область частот и лазерных интенсивностей (электрических полей), в которой возможен туннельный эффект. Параметр Келдыша. Туннельный эффект и многофотонная ионизация. Условие квазистатичности. Граничное (минимальное) поле, как условие существования туннельного эффекта для заданной частоты -граница раздела между туннельным эффектом и многофотонной ионизацией, зависимость граничного поля от частоты. Туннельный эффект и многофотонная ионизация в поле электромагнитной волны как предельные случаи одного и того же явления. Туннельный эффект как случай относительно низких частот и высоких интенсивностей света, условие квазистатичности. Многофотонная ионизация как случай относительно высоких частот и низких интенсивностей (по отношению к туннельному эффекту). Вероятность туннельной ионизации при лазерном воздействии. Степень ионизации. Зависимость от интенсивности и длительности лазерного импульса. Надбарьерная ионизация.

Многофотонное поглощение, его физическая сущность. Многофотонная ионизация.

10. Лавинная ионизация.

Механизм лавинной ионизации. Развитие электронной лавины. Колебательная энергия свободного электрона, движущегося без столкновений в световом поле. Набор энергии свободным электроном в световом поле в результате столкновений с нейтралами и ионами (обратнотормозное поглощение -ОТП). Ударная ионизация. Развитие

электронной лавины. Число последовательных этапов ионизации, необходимых для достижения заданной степени ионизации вещества при известной начальной степени его ионизации. Пороговая интенсивность света и параметры, от которых она зависит: потенциал ионизации, отношение массы атома к массе электрона, длина световой волны, время между столкновениями (давление газа), длительность лазерного импульса, число последовательных этапов ионизациии. Пороговая энергия лазерного импульса.

11. Лазерный термоядерный синтез (ЛТС)

Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС). Потенциальные энергозапасы и экологические проблемы. Способы удержания высокотемпературной (термоядерной) плазмы: магнитный (токомаки) и инерционный (ЛТС). Термоядерные реакции: D-D и D-T. Физический механизм реакции ядерного синтеза. Кулоновский потенциальный барьер. Роль туннельного эффекта. Коэффициент прозрачности $D_Б < 1$ потенциального барьера. Вероятность реакции ядерного синтеза при столкновении. Сечение столкновения $\sigma_{ст}[м^2]$ и сечение $\sigma^{тя}$ термоядерной реакции: $\sigma^{тя}=D_Б\sigma_{ст}$. Самоподдержнвающаяся термоядерная реакция. Критерий Лоусона. Особенности лазерного термоядерного синтеза (ЛТС): высокая плотность плазмы и малое время ее удержания. Использование коротких (наносекундных) лазерных импульсов для инерционного удержания плотной плазмы. Оценка пороговой энергии лазерного импульса, необходимого для энергетически выгодного ЛТС. Лазерное всестороннее сжатие сферической мишени. Схема процессов, приводящих к сжатию мишени: поглощение лазерного света в той части короны ,где плотность плазмы равна или больше критической − электронная теплопроводность − абляция поверхности мишени − сходящаяся ударная волна сжатия (имплозия). Роль имплозии в получении сверхплотного вещества в центре мишени.

12. Лазерная спектроскопия.

Возможности лазерных источников света для получения уникальной информации о внутримолекулярной динамики и строении молекул. Спектроскопия насыщения. Внутридоплеровская спектроскопия сверхвысокого разрешения, Внутрирезонаторная спектроскопия. Исследование динамики столкновительных процессов и строения образующихся молекул. Лазерная диагностика. Детектирование единичных атомов и молекул. Чувствительность и селективность методов лазерной диагностики. Методы на основе спектров комбинационного рассеяния. Атомно-ионизационный, термооптический, флуоресцентный, оптоакустический методы. Изучение и анализ поверхностей. Лазерный пробоотбор. Микроанализ. Дистанционное методы. Зондирование

атмосферы. Диагностика плазмы. Лазерные методы изучения кинетики химических реакций.

Лазерохимические реакции и их отличие от фотохимических, тепловых и плазмохимических. Процессы диссипации возбуждения. Причины потери селективности возбуждения атомами и молекулами. Состояние неравновестности возбуждаемых систем. Реакции на поверхности твердых тел. Инфракрасная лазерная фотохимия. Многофотонное поглощение молекулами в отсутствии столкновений. Молекулярный квазиконтинуум. Распределение молекул в квазиконтинууме. Эффект "узкого вращательного горла". Роль столкновений в процессах потери селективности. Примеры ИК лазерохимических реакций. Лазерная очистка веществ. Разделение изотопов. Тонкий органический синтез. *ИК* лазерная фотохимия в низкотемпературных матрицах. Особенности воздействия лазеров пикосекундного и фемтосекундного диапазонов. Лазерная фотохимия ультрафиолетового диапазона длин волн. Селективность реакций и методы её повышения.

13. Световоды и их применение в оптических измерительных системах.

Физический принцип действия световодов. Числовая апертура. Волноводные моды. Полоса пропускания световодов. Типы световодов: одномодовые, многомодовые, градиентные, сохраняющие состояние поляризации. Примеры использования световодов для транспортировки излучения, в качестве чувствительного элемента в волоконно-оптических датчиках и для преобразования изображения.

14. Лазерные измерительные системы

Лазерные системы измерения размеров и расстояний на основе сканирования луча, метода точной фокусировки и триангуляционного метода. Принцип построения лазерных локационных систем. Лазерные допплеровские измерители скорости. Лазерные акселерометры.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. А.З.Грасюк. Взаимодействие излучения с веществом (Курс лекций по лазерной физике). Изд-во ФИАН. Москва.2004. 320 с.(20 экз)

2. Е.Г.Абрамочкин, В.Г.Волостников. Современная оптика гауссовых пучков. Физматлит. 2010.184 с.

4. В.Г.Дмитриев Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. М. Физматлит. 2003. 256с.

5. В.В.Ивахник. Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. Самара: Изд-во Самарский университет. 2010. 246 с.

Дополнительная

1. Н.В.Карлов, Лекции по квантовой электронике

2. О.Звелто, Принципы лазеров, Москва, «Мир», 1984

3. А.Ярив, Квантовая электроника, Москва, «Советское радио», 1980

4. Л.В.Тарасов, Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения, Москва, «Радио и связь», 1981

5. Газовые лазеры, под ред. И.Мак-Даниеля и У.Нигэна, Москва, «Мир», 1986

6. Ярив А. Квантовая электроника и нелинейная оптика, М., Советское радио, 1973.

7. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика, М., Мир, 1976.

8. Н.И.Коротеев, И.Л.Шумай. "Физика мощного лазерного излучения". Москва "Наука" 1991г.

9. Н.Б.Делоне "Взаимодействие лазерного излучения с веществом" Курс лекций. "Наука", Москва, 1989 г.

10. А.Г.Смирнов. Квантовая электроника и оптоэлектроника, Минск, 1987

11. О.Звелто Физика лазеров, Москва, Мир, 1979.

12. Под ред. Дж. Стейнфелд Индуцированные лазером химические процессы Москва, Мир, 1984

13. В.Дермтредер Лазерная спектроскопия, Москва, Наука, 1985 14. В.Летохов "Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах" М. Наука, 1983