

«ОПТИКА НАНОСИСТЕМ»

Программа обязательного курса по специализации «Наносистемы и наноустройства» НОЦ МГУ по нанотехнологиям 9 семестр (36 часов)

Аннотация

Курс предназначен для студентов старших курсов, специализирующихся в области оптики твердого тела, физики наноструктур и наноустройств. Помимо изложения традиционных вопросов оптики объемных фаз металлов, полупроводников и диэлектриков, анализируются особенности оптических явлений в твердотельных системах пониженной размерности, включая наноструктуры и композитные материалы, такие, как пористые полупроводники. Главное внимание уделяется оптическим и фотоэлектрическим свойствам объемных фаз полупроводников и полупроводниковых систем пониженной размерности, таких как поверхности, границы раздела, наноструктуры, пористые материалы. Обсуждаются основные подходы к анализу нелинейно-оптических явлений в твердых телах, а также некоторые применения методов нелинейной оптики для диагностики твердотельных систем.

В начале курса излагаются основные подходы к описанию оптических явлений в конденсированных фазах вещества. Анализируется система уравнений Максвелла в среде с поглощением и решается полученное волновое уравнение. Вводятся понятия комплексных показателей преломления и диэлектрической проницаемости вещества. Отмечается взаимосвязь оптических характеристик среды. Рассмотрены явления отражения света от границы раздела двух сред. Дается представление об эллипсометрии как методе анализа оптических свойств твердых тел. Далее излагаются основные положения классических моделей, описывающих оптические свойства металлов и диэлектриков. Вводится понятие локального поля, с помощью которого выводится выражение для оптической

восприимчивости среды. Рассматриваются оптические явления, связанные с колебаниями атомов твердого тела. Вводятся понятия оптических и акустических фононов, как квантов колебания. Анализируются законы дисперсии для фононов и поляритонов.

Подробно рассматриваются вопросы оптики полупроводников. С позиций квантовой теории твердого тела анализируются функции плотности состояний. Рассматриваются энергетическая зонная структура полупроводниковых кристаллов и закономерности поглощения света в прямозонных и непрямозонных полупроводниках. Затронуты явления поглощения света на примесных состояниях в полупроводниках. Значительное внимание уделяется описанию закономерностей экситонного поглощения света. Решается задача об энергетическом спектре экситона Ванье-Мотта. Рассмотрены многоэкситонные комплексы и эффекты коллективного взаимодействия в экситонном газе. Излагаются основные сведения о закономерностях испускания света в полупроводниках. Дается определение люминесценции. Последовательно рассматриваются межзонная излучательная рекомбинация, примесная и экситонная люминесценция.

Излагаются подходы к описанию оптических свойств неоднородных твердотельных систем. Рассмотрены матричные и статистические гетеросистемы. Вводятся понятия эффективной среды и эффективная диэлектрическая проницаемость гетеросистемы. Рассмотрение ведется в электростатическом приближении, когда масштабы неоднородностей диэлектрической функции полагаются много меньше длины волны света. Получены выражения для формулы Максвелла, соотношения Максвелла-Гарнетта, основного уравнения теории эффективной среды – формулы Бруггемана. Рассматриваются показатель преломления статистической гетеросистемы, двулучепреломление формы и анизотропия поглощения (дихроизм). Анализируется частотная зависимость Друде-поглощения в нанокompозитах. Обсуждается распространение света в периодических средах и фотонных кристаллах. Вводится понятие о фотонной запрещенной

зоне и излагаются методы расчета оптических свойств фотонных кристаллов. Рассматриваются одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы, а также квазипериодические фотонно-кристаллические среды и волноводы. Анализируется закон дисперсии света в фотонно-кристаллических структурах. Обсуждается использование фотонных кристаллов как брэгговских зеркал. Затронуты вопросы замедления света в фотонных кристаллах.

Рассмотрено явление рассеяния света в твердых телах. Анализируется случаи динамических и статических флуктуаций показателя преломления. Вводятся понятия об упругом и неупругом рассеянии света. Рассмотрены случаи рассеяний Рэлея, Ми, Мандельштама-Бриллюэна. Основное внимание уделяется комбинационному (рамановскому) рассеянию. Анализируются интенсивности стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния в зависимости от температуры. Рассмотрены особенности рассеяния света в поглощающих средах.

Последовательно рассматривается влияние размеров тел на их оптические свойства. Вводится классификация низкоразмерных систем. Проведен анализ квантового размерного эффекта в квантовой яме с бесконечными стенками в приближении постоянной эффективной массы. Анализируется квантовый размерный эффект для квантовых нитей и точек. Вводятся функция плотности состояний для электронов в двумерных, одномерных и нульмерных системах. Рассмотрены особенности квантового размерного эффекта в реальных наноструктурах. Вводится понятие о дробной (фрактальной) размерности. Анализируется квантово-размерное изменение спектров поглощения и люминесценции твердотельных наноструктур. Рассмотрены методы формирования и примеры низкоразмерных систем и наноструктур. Приводятся сведения о механизме формирования квантовых точек Странского-Крастанова, а также о закономерностях получения и основных свойствах пористого кремния.

Рассмотрены экситонные процессы в полупроводниковых наноструктурах. Анализируется влияние размерности полупроводника на энергию связи экситонов. Рассмотрены эффекты диэлектрического усиления экситонов, а также экситоны в гетероструктурах и сверхрешетках. Затронуты вопросы пространственной локализации экситонов и описания возбужденных и заряженных состояний экситонов. Далее проводится учет спинового состояния для энергии экситона. Обсуждаются величины энергии обменного взаимодействия, стоков сдвиг и эффекты экситон-фононного взаимодействия для экситонов в нанокристаллах. Рассмотрены вопросы динамики экситонов в ансамблях полупроводниковых нанокристаллов. Излагаются феноменологические модели возбуждения и рекомбинации неравновесных носителей заряда с учетом связи между подсистемами экситонов и неравновесных фотовозбужденных носителей заряда. Анализируется зависимость концентрации экситонов от температуры, а также роль оже-рекомбинации и ударной ионизации в динамике рекомбинации экситонов в нанокристаллах. Затронут эффект мультиплицирования экситонов и его возможные применения. Анализируются времена жизни экситонов в ансамблях нанокристаллов, триплетные и синглетные экситоны, зависимость времени жизни экситонов от температуры, а также оптические свойства нанокомпозитов с учетом экситонных эффектов. Рассмотрены примеры оптоэлектронных устройств на квантовых ямах и сверхрешетках, а также лазеров на квантовых точках.

Излагаются элементы спиновой оптики и спинтроники твердых тел и наноструктур. Рассмотрены явления спин-зависимой рекомбинации носителей заряда в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах, эффекты спин-орбитального взаимодействия и оптической ориентации спинов. Анализируются фотогальванические спин-зависимые явления (циркулярный и линейный фотогальванические эффекты) в низкоразмерных системах.

В курсе вводится понятие нелинейной поляризуемости вещества. Приводится классификация нелинейно-оптических явлений. Подробно рассмотрены случаи генерации второй оптической гармоники при отражении от границы раздела двух сред и при распространении в нелинейной среде. Вводится понятие фазового синхронизма и рассматриваются условия его реализации в средах с аномальной дисперсией и в двулучепреломляющих кристаллах. Рассмотрено явление вынужденного комбинационного рассеяния света. Анализируются особенности нелинейно-оптических явлений в твердотельных наноструктурах, таких как нанокомпозиты с анизотропией формы наноструктур и фотонно-кристаллические среды. Приведены примеры использования методов нелинейной оптики для исследования твердотельных наноструктур и наноматериалов.