

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

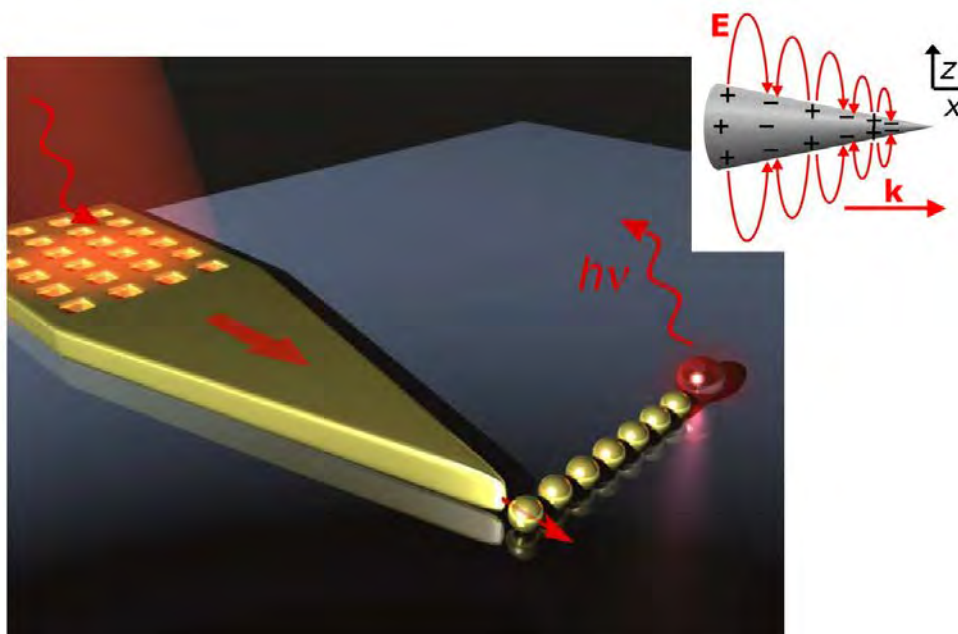
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Возианова А.В., Ходзицкий М.К.

НАНОФОТОНИКА

ЧАСТЬ 1

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2013

Возианова А.В., Ходзицкий М.К., Нанофотника. Часть 1. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – ... с.

Аннотация

В учебно-методическом пособии приводятся современные теоретические сведения и тенденции по лекционному курсу «Нанофотоника», состоящего из следующих разделов нанооптика, метаматериалы, наноплазмоника, трансформационная оптика, спинтроника.

Для студентов направления подготовки магистров 200700 – Фотоника и оптоинформатика.

Рекомендовано к печати кафедрой фотоники и оптоинформатики, 29 ноября 2013, номер протокола 10



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития **на 2009–2018 годы**. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2011

©....., 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Нанооптика.....	2
1.1 Низкоразмерные объекты.....	2
1.2 Квантовые эффекты в полупроводниках.....	3
1.3 Оптические свойства наноматериалов.....	6
1.4 Фотонные кристаллы.....	9
1.4.1 Многократные отражения и преломления в слоистых структурах.....	10
1.4.2 Разрешенные и запрещенные зоны.....	14
1.4.3 Дефекты фотонных кристаллов и разрешенные уровни в запрещенной зоне.....	18
1.4.4 Интерференция в многомерных структурах.....	19
2. Метаматериалы.....	21
2.1 Отрицательное преломление.....	21
2.2 Электромагнитные процессы в “левой” среде.....	23
2.3 Композитные материалы с отрицательным преломлением...31	
2.4 Суперлинза Пендри.....	39
3. Наноплазмоника.....	44
3.1 Поверхностные плазмоны.....	44
3.2 Плазмонный резонанс в наночастицах.....	47
3.3 Теория Ми рассеяния и поглощения излучения.....	49
3.4 Практическое использование рассеяния излучения на наночастицах.....	60
4. Трансформационная оптика.....	63
5. Спинтроника.....	73
5.1 Металлические спин-электронные структуры.....	73
5.2 Магнитные полупроводники и спиновые нанотранзисторы .79	
5.3 Перспективные направления развития спинтроники.....	86
Список литературы.....	88

1. Нанооптика

1.1. Низкоразмерные объекты

В настоящее время во многих областях науки и техники, связанных с инфокоммуникационными технологиями, нанофотоника рассматривается как альтернатива современной электронике. Использование фотонов вместо электронов при передаче и обработке информации позволяет добиться существенных преимуществ благодаря высокому быстродействию и помехоустойчивости фотонных каналов связи. К нанофотонным относят устройства, использующие структуры размером около 100 нм и меньше. Также устройства решают проблемы миниатюризации многих оптических систем, содержащих волноводы, резонаторы, интерферометры и др. Нанофотонные вычислительные устройства не только значительно превосходят электронные аналоги по быстродействию, но и позволяют успешно решать проблемы, связанные с тепловыделением и электропитанием. С другой стороны, слабым местом и источником постоянного беспокойства при использовании любых приборов и устройств на основе фотоники было и остается обеспечение надежности электрооптических переключателей, позволяющих преобразовывать электрические сигналы в оптические и обратно. Решение проблемы быстрого и надежного преобразования таких сигналов имело бы огромное значение для коммерческого приложения и информационных технологий в целом. Кроме того, оно представляет особый интерес для военной сферы, где фотоника открывает большие перспективы в развитии средств связи, датчиков, радаров и других систем, в которых требуется быстрая и надежная обработка больших массивов оптической и иной информации[1].

В течение последних десятилетий основное направление исследований в физике твердого тела смещалось от объемных кристаллов в сторону структур, размеры которых (хотя бы в одном из трех измерений) очень малы. Спектральные характеристики различных физических объектов представлены на рис. 1.1. Вначале, в силу относительной простоты изготовления, внимание исследователей привлекали очень тонкие твердотельные пленки, толщина которых сопоставима с длиной волны де Бройля λ_B для электронов в твердых телах. Эти работы позволили обнаружить целый ряд новых явлений, среди которых квантовый эффект Холла (КЭХ), открытый в 1980 г. фон Клитцингом, удостоенным за это в 1985 г. Нобелевской премии. Твердые тела (обычно полупроводниковые материалы) называются низкоразмерными в тех случаях, когда один из их геометрических параметров имеет порядок

длины волны де Бройля λ_B , хотя в некоторых случаях удобнее пользоваться другими характеристическими длинами.

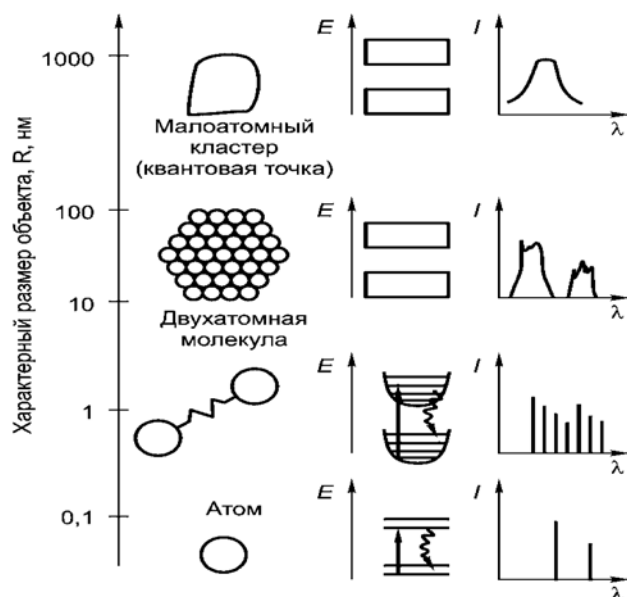


Рис.1.1. Спектральные характеристики различных объектов

В большинстве используемых полупроводников λ_B находится в диапазоне от 10 до 100 нм, т. е. ученые могут наблюдать в них интересные их квантовые эффекты (квантовый эффект Холла, кулоновскую блокаду, квантовую проводимость и т.п.) в нанометровом диапазоне. Низкоразмерные объекты проще всего классифицировать соответственно числу нанометровых пространственных измерений. Например, структуру с одним нанометровым измерением, считают двумерной (2D) и называют квантовой ямой. Одномерными (1D) являются квантовые проволоки — у них два нанометровых геометрических измерения, а нульмерными (0D) — объекты, все три измерения которых имеют порядок λ_B . В современной оптоэлектронике широко применяются структуры с очень тонкими нанометровыми слоями полупроводников (например, слоистая структура из тонкой пластины GaAs, обложенной с двух сторон слоями полупроводника AlGaAs, обладающего более широкой запрещенной зоной). Другие очень интересные структуры могут быть получены образованием переходов (или, более строго, гетеропереходов) между двумя полупроводниками с различными запрещенными зонами. В обоих случаях на границе раздела возникают потенциальные ямы для электронов, похожие на те, что образуются в МДП/структурах. Если ширина таких ям сопоставима с λ_B , то энергетические уровни электронов в ямах начинают квантоваться. Такие

совокупность атомов, наноразмерная по всем трем пространственным измерениям. Движение электронов в такой системе может быть аппроксимировано простейшей квантово-механической моделью, известной под названием «частица в прямоугольном потенциальном поле». Эта модель описывается уравнением Шредингера:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] - U(x, y, z) \right\} \psi = E\psi, \quad (1.1)$$

$U(x, y, z)$ – потенциальная энергия ящика со сторонами a, b, c ;

$$U(x, y, z) = U(x) + U(y) + U(z). \quad (1.2)$$

При этом $U(x) = U(y) = U(z) = U_0$ при всех других значениях x, y, z .

$$E_{n_1, n_2, n_3} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} + \frac{n_3^2}{c^2} \right), \quad (1.3)$$

где $n_1, n_2, n_3 = 1, 2, 3 \dots$

Таким образом, квантовой точке отвечает дискретный спектр, сходный по общему виду со спектром атомной системы. В квантовой точке может находиться от одного электрона до большого количества электронов, распределение которых определяется принципом Паули. Квантовые точки создаются методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Для этого на хорошо подготовленную поверхность напыляется вещество со структурой, близкой к структуре подложки. Напыление должно происходить в высоком вакууме, чтобы избежать включения в формируемый объект посторонних примесей. Скорость напыления строго регулируется, для того чтобы исключить образование дефектов структуры. Спонтанное формирование квантовых точек в так называемом режиме Странского-Крастанова хорошо изучено на примере системы InAs/GaAs. При росте первого мономолекулярного слоя InAs на поверхности GaAs из-за различия постоянных кристаллических решеток возникают упругие напряжения. Если напыление продолжается, различия увеличиваются и на поверхности первого слоя (его называют «смачивающим» слоем) становится выгодным не равномерное распределение вещества, а образование отдельных «капель». Таким образом, возникают пирамидки со свойствами квантовых точек, одна из

