

Секция 1

Компьютерные науки и информатика

1.1 Теоретическая информатика

Научная статья

УДК 004.77

ББК 22.18

ГРНТИ 20.53.23

ВАК 1.2.3.

RACS 01.40.Di

OCIS 000.2060

MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по квантовым точкам

Е. С. Павлова  ¹

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071,
Ульяновск, Россия*

Поступила в редакцию 17 ноября 2025 года

После переработки 18 ноября 2025 года

Опубликована 31 декабря 2025 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса по квантовым точкам в системе управления обучением MOODLE. Описаны результаты разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса «Квантовые точки: синтез, свойства, применение» в системе управления обучением MOODLE. Разработка дистанционного курса направлена на расширение представлений о квантовых точках.

Ключевые слова: дистанционный курс, квантовые точки, фотоника, нанооптика, система управления обучением

¹E-mail: kat.pavlova2003@icloud.com

Введение

В последние годы полупроводниковые квантовые точки приобрели значительный интерес благодаря их уникальным оптическим и электронным свойствам, что открывает широкие возможности для применения в нанооптике, фотонике, солнечной энергетике и других высокотехнологичных отраслях. Однако доступность качественного образования в этой области остаётся ограниченной. Разработка дистанционного курса направлена на устранение этого пробела и предоставление обучающимся современных знаний о квантовых точках. Квантовые точки являются перспективным направлением в физике наноструктур, но их сложная природа требует глубокого понимания. Дистанционные образовательные технологии позволяют охватить широкую аудиторию, включая студентов, аспирантов и исследователей. Существующие сейчас курсы часто охватывают только отдельные аспекты физики квантовых точек, тогда как данный проект предлагает комплексный подход. Развитие онлайн-образования в России делает этот курс востребованным для университетов и научных центров.

Целью работы является всестороннее исследование процесса создания дистанционного курса «Квантовые точки: синтез, свойства, применение», обеспечивающего комплексное изучение темы с учётом современных научных достижений.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. проанализировать научную литературу по физическим свойствам полупроводниковых квантовых точек,
2. разработать модульную структуру и избранные элементы дистанционного курса «Квантовые точки: синтез, свойства, применение» в системе управления обучением MOODLE,
3. разработать модули по синтезу и анализу квантовых точек.

Объектом исследования является курс по квантовым точкам. Предметом исследования является описание особенностей разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по квантовым точкам в системе управления обучением MOODLE.

Методами исследования являются компьютерные методы разработки дистанционных курсов в системе управления обучением MOODLE, анализ научной литературы, методы педагогического дизайна для создания тематических модулей дистанционного курса по квантовым точкам. Материалами исследования являются литературные источники по исследованиям квантовых точек, программные платформы для дистанционного обучения.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые выполнена разработка программы курса, объединяющей синтез, свойства и прикладные аспекты квантовых точек.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если использовать теоретические модели физических процессов в квантовых точках и результаты численных расчётов физических характеристик квантовых точек в дистанционном курсе «Квантовые точки: синтез, свойства, применение», то можно создать специализированный дистанционный курс, опирающийся на современные представления о физических свойствах квантовых точек, который повысит уровень компетенций обучающихся в области физики квантовых точек и упростит доступ к актуальным знаниям.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации знаний о квантовых точках и их свойствах, структуризации образовательных материалов для дистанционного обучения. Практическая значимость исследования заключается в создании доступного дистанционного курса для подготовки специалистов в области нанотехнологий изготовления квантовых точек.

Обзор свойств полупроводниковых квантовых точек

Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют зависящие от размера физические свойства, в частности, в их энергии или запрещённой зоне, которые можно настраивать с помощью размера частиц. Это приводит к контролируемым длинам волн поглощения и испускания, что позволяет значительно сдвигать значения объёмного полупроводника на сотни нанометров. Полупроводниковые квантовые точки являются кристаллами нанометрового масштаба, которые демонстрируют уникальные физические свойства из-за эффектов квантового ограничения, которые существенно отличаются от свойств объёмных материалов. Эти свойства включают в себя зависящие от размера оптические характеристики, такие как интенсивное поглощение света и сильное узкополосное излучение в видимом и инфракрасном спектрах, что делает их пригодными для применения в дисплеях, лазерах и преобразованиях солнечной энергии [1]. Полупроводниковые квантовые точки проявляют уникальные физические свойства благодаря квантовому ограничению, включая настраиваемые по размеру уровни энергии, интенсивное поглощение света и сильное узкополосное излучение в видимой и инфракрасной областях [1]. Эти свойства возникают из-за дискретных электронных состояний в нульмерных структурах, что приводит к улучшенным возможностям оптического усиления и лазерной генерации. Настраиваемость их физико-химических характеристик позволяет использовать их в различных приложениях в дисплеях, лазерах, сенсорных технологиях и преобразовании солнечной энергии, что делает квантовые точки весьма универсальными в различных технологических областях. Коллоидные квантовые точки проявляют уникальные свойства поглощения и излучения света и используются в различных приложениях, включая дисплеи, лазеры, сенсоры и преобразование солнечной энергии [1]. Оптические свойства квантовых точек, включая поглощение, излучение и время жизни флуоресценции, сильно зависят от их размера, что позволяет настраивать спектры излучения и время жизни флуоресценции, что имеет решающее значение для различных приложений [2]. В работе [2] рассматриваются оптические свойства полупроводниковых квантовых точек, в частности квантовых точек CdTe. В работе [2] подчёркивается, как их характеристики поглощения и испускания зависят от размера частиц, демонстрируя значительные изменения в спектрах испускания и времени жизни флуоресценции. Эти свойства возникают из-за эффектов квантового ограничения, которые позволяют манипулировать спектральными свойствами для различных приложений. В работе [2] подчёркивается связь между размером частиц и результирующим оптическим поведением, демонстрируя уникальные особенности полупроводниковых квантовых точек. В работе [2] изучаются оптические свойства полупроводниковых квантовых точек CdTe, изучается, как размер частиц влияет на время жизни поглощения, испускания и флуоресценции, и связываются экспериментальные результаты с теоретическими концепциями квантового ограничения и его применениями. Кроме того, квантовые точки обладают высоким квантовым выходом флуоресценции и превосходной устойчивостью к фотообесцвечиванию, что выгодно для их использования в качестве оптических меток в биомедицинских приложениях, таких как визуализация и диагностика [3]. Полупроводниковые квантовые точки обладают уникальными фотофизическими свойствами, включая зависящие от размера оптические характеристики, высокие квантовые выходы флуоресценции и исключительную устойчивость к фотообесцвечиванию. Эти свойства делают квантовые точки подходящими для различных биологических приложений, таких как мультиплексный анализ иммунокомплексов, гибридизация ДНК, сортировка клеток и визуализация. Их способность служить оптическими метками и для электрохимического обнаружения биомолекул ещё больше подчёркивает их значимость в биомедицине, особенно в исследованиях рака и фотодинамической терапии. В работе [3] рассматриваются синтез и токсичность квантовых

точек и их оптические и электрохимические биоаналитические приложения, особенно кратко обсуждается применение квантовых точек в биомедицине, например, доставка, нацеливание на клетки и визуализация для исследований рака, а также фотодинамическая терапия рака [3]. Электронные и оптические свойства квантовых точек можно настраивать, изменяя их размер и форму, поскольку они ограничивают электроны во всех трёх пространственных измерениях, что приводит к дискретным уровням энергии, аналогичным тем, которые обнаруживаются в атомах [4]. Полупроводниковые квантовые точки проявляют уникальные электронные и оптические свойства из-за их малого размера, который сопоставим с радиусом экситона Бора. Они ограничивают электроны во всех трёх пространственных направлениях, что приводит к дискретным уровням энергии, подобным таковым в атомах. В работе [4] показано, что электронные и оптические характеристики квантовых точек можно настраивать, изменяя такие параметры, как размер и форма. Эта настраиваемость обеспечивает широкий спектр приложений в оптоэлектронике и квантовых вычислениях. Квантовые точки представляют собой трёхмерные квантовые ямы, которые проявляют уникальные электронные и оптические свойства из-за своего малого размера и квантованных уровней энергии [4]. Кроме того, квантовые точки используются в фотоэлектрохимических датчиках благодаря своим уникальным электронным и фотофизическим свойствам, предлагая преимущества в чувствительности, миниатюризации и экономической эффективности для биомедицинских приложений [5]. Полупроводниковые квантовые точки обладают уникальными электронными и фотофизическими свойствами, включая регулируемые по размеру запрещенные зоны, высокий квантовый выход и сильные характеристики поглощения и испускания света. Эти свойства позволяют квантовым точкам эффективно функционировать в качестве оптических нанозондов в различных приложениях, таких как биосенсорика и оптоэлектроника. Их простые поверхностные свойства повышают чувствительность, миниатюризацию и экономическую эффективность, что делает их пригодными для разработки современных фотоэлектрохимических датчиков. В целом, квантовые точки являются перспективными материалами для инновационных технологий в области хранения и передачи энергии и биомедицинской диагностики. Полупроводниковые квантовые точки являются перспективным классом наноматериалов для разработки новых фотоэлектродов и фотоэлектрохимических систем для приложений хранения и передачи энергии и биосенсорики, как упоминалось в статье [5]. Полупроводниковые квантовые точки проявляют уникальные физические свойства благодаря квантовому ограничению, включая настраиваемые по размеру уровни энергии, которые приводят к различным оптическим характеристикам, таким как сильное поглощение света и яркое узкополосное излучение в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн [6]. Эти свойства позволяют разрабатывать квантовые точки для приложений, требующих оптического усиления и лазерной генерации. Их настраиваемые физические характеристики делают их пригодными для различных технологий, включая дисплеи, освещение и преобразование солнечной энергии, что повышает их функциональность в различных приложениях. В квантово-ограниченных полупроводниковых наноструктурах электроны демонстрируют отличное поведение по сравнению с поведением в объёмных твёрдых телах, как упоминалось в статье [6], что позволяет разрабатывать материалы с настраиваемыми химическими, физическими, электрическими и оптическими свойствами. Полупроводниковые квантовые точки обладают уникальными фотофизическими свойствами, включая контролируемую по размеру флуоресценцию, высокие квантовые выходы флуоресценции и устойчивость к фотообесцвечиванию [7]. Эти характеристики позволяют использовать их в качестве оптических меток в биоанализе, что позволяет проводить мультиплексный анализ иммунокомплексов и процессов гибридизации ДНК. Кроме того, квантовые точки могут исследовать биокаталитиче-

ские превращения с помощью таких механизмов, как перенос энергии резонанса флуоресценции и фотоиндуцированный перенос электронов, что делает их универсальными инструментами в различных биоаналитических приложениях. Полупроводниковые наночастицы, или квантовые точки, обладают уникальными фотофизическими свойствами, такими как контролируемая по размеру флуоресценция, имеют высокие квантовые выходы флуоресценции и устойчивость к фотообесцвечиванию, что позволяет использовать квантовые точки в качестве оптических меток для мультиплексного анализа иммунокомплексов или процессов гибридизации ДНК [7]. Краткий обзор последних достижений в области квантовых точек для вычислений и коммуникаций, твердотельного освещения, фотоэлектричества и биомедицинских приложений можно найти в статье [8]. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют уникальные физические свойства благодаря своему трёхмерному ограничению, включая зависящие от размера спектральные свойства излучения, превосходную работу, не зависящую от температуры, и повышенную внутреннюю квантовую эффективность. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют превосходное ограничение носителей, уменьшенную плотность дислокаций и поля поляризации по сравнению с квантовыми ямами. Кроме того, оптические, магнитные и каталитические свойства полупроводниковых квантовых точек можно легко настраивать с помощью изменений в материалах, размерах доменов и морфологии, что делает их универсальными для приложений в вычислительной технике, коммуникациях, твердотельном освещении, фотоэлектричестве и биомедицинских областях [8]. В работе [9] простой подход, основанный на пиролизе отдельных молекул-предшественников, был использован для синтеза высоколюминесцентных полупроводниковых нанокристаллов и их инкапсуляции носителем. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют оптические свойства, настраиваемые по размеру, высокую эффективность фотолюминесценции, узкую ширину излучения и значительную устойчивость к фотохимическим реакциям. Уникальные свойства полупроводниковых квантовых точек делают их идеальными для применения в солнечных батареях, световых излучающих устройствах, лазерах и биомедицинской визуализации.

В работе [10] подход плавления-зародышеобразования рассматривается как подходящий метод синтеза, поскольку он позволяет выращивать разбавленные магнитные полупроводниковые нанокристаллы, встроенные в различные стеклянные матрицы, что позволяет избежать нежелательных эффектов на наноструктуры, таких как коррозия и влажность.

В статье [11] обсуждаются основные параметры управления физическими свойствами полупроводниковых наночастиц, а также на основе результатов их исследований излагается недавний прогресс в получении многокомпонентных наночастиц без высококотоксичных элементов, таких как полупроводники I-III-VI₂ и их твёрдые растворы.

В работе [12] основное преимущество использования квантовых точек в качестве носителя для доставки различных типов лекарственных препаратов заключается в их высоком соотношении поверхности к объёму, биосовместимости и проницаемости клеточной мембраны, что обеспечивает множественные места для присоединения молекул лекарственных препаратов.

В статье [13] представлен обзор последних важных достижений в изучении и применении полупроводниковых квантовых точек, где для получения детального понимания электронной структуры и динамических процессов носителей используется широкий спектр методов оптической спектроскопии.

Полупроводниковые нанокристаллы являются наноструктурными материалами с уникальными размерно-зависимыми свойствами. В работе [14] показано, что полупроводниковые нанокристаллы имеют узкие полосы возбуждения, высокий квантовый выход и широкие профили поглощения.

В работе [15] описывается физическая основа эффекта квантового ограничения, которая затем используется для объяснения уникальных оптических свойств, проявляемых этими материалами, а также подробно описываются области применения квантовых точек. Одним из наиболее интересных классов наноматериалов являются полупроводниковые квантовые точки. Благодаря эффектам квантового ограничения, связанным с их наноразмерами и структурой, можно получить удивительные оптические свойства для материалов, поглощающих и излучающих свет от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазонов. В работе [15] обсуждаются квантовые точки. В работе [15] описывается физическая основа эффекта квантового ограничения, которая затем используется для объяснения уникальных оптических свойств, которые демонстрируют эти материалы. Также подробно описываются применения квантовых точек.

В статье [16] влияние формы нанокристалла и приложенного магнитного поля на спектры энергии электронов коллоидных квантовых точек ZnO было исследовано в рамках метода конечных элементов с использованием неоднородных треугольных элементов. Влияние формы нанокристалла и приложенного магнитного поля на спектры энергии электронов коллоидных квантовых точек ZnO было исследовано в рамках метода конечных элементов с использованием неоднородных треугольных элементов. Были изучены четыре формы квантовых точек (сферическая, эллипсоидальная, стержневая и линзообразная). В статье [16] было обнаружено, что физические свойства полупроводниковых квантовых точек можно изменять, изменяя их размер и/или форму. Энергия электрона увеличивается по мере уменьшения симметрии формы квантовой точки от сферической к линзообразной. Эффект магнитного поля тесно взаимодействует с размером нанокристалла и эффектами формы нанокристалла. Такое взаимодействие было приписано конкуренции эффекта квантового ограничения, вносимого барьерным потенциалом, и эффекта квантового ограничения, вносимого приложенным магнитным полем [16].

В работе [17] широкозонный полупроводник, обладающий интересными люминесцентными свойствами, был использован в качестве целевых флуоресцентных меток для биомедицинских приложений, а также были реализованы различные виды синтетических подходов для изготовления таких малых квантовых точек ZnO. Квантовая точка, также называемая искусственным атомом, представляет собой полупроводниковый нанокристалл размером порядка нескольких нанометров. Изменяя его состав, размер и форму, можно спроектировать его плотность электронных состояний, и, таким образом, можно легко и широко регулировать многие физические свойства. Сильное квантовое ограничение электронных носителей в нанометровом масштабе делает ширину запрещённой зоны и энергию люминесценции зависимыми от размера и формы. Эти точки в настоящее время широко используются в качестве целевых флуоресцентных меток для биомедицинских приложений. Оксид цинка (ZnO) представляет собой широкозонный полупроводник, обладающий интересными люминесцентными свойствами, которые были видны в недавней демонстрации ультрафиолетовой генерации из нанопроводов. Эти свойства стимулировали поиск новых синтетических методологий для хорошо контролируемых наноструктур ZnO. Однако для многих приложений требуется организация наночастиц в двумерные или трёхмерные сверхрешётки. Эта очень эффективная организация была получена физическими методами, тогда как химические подходы к таким организациям также представляли бы интерес, поскольку они просты в исполнении и допускают легкую процедуру масштабирования. Для интересов зависящих от размера физических свойств интенсивные исследования были сосредоточены на изготовлении квантовых точек ZnO с ультрамалым размером, который обеспечивает сильное квантовое ограничение. До сих пор были реализованы различные виды синтетических подходов для изготовления таких малых квантовых точек ZnO, которые можно условно

разделить на две категории: химические и физические. Химические методы включают золь-гель метод, гидротермальный рост, термическое разложение, электрохимический метод, в то время как физические методы включают импульсную лазерную абляцию, химическое осаждение из паров металлоорганических соединений, радиочастотное распыление, метод пиролиза пламенного распыления, осаждение с переносом паровой фазы. Химический процесс использует преимущество очень экзотермической реакции органометаллического предшественника бис(циклогексил)цинка с водой для получения кристаллического оксида цинка, с одной стороны, и, с другой стороны, кинетический контроль разложения с использованием лигандов амина с длинной алкильной цепью [17].

В статье [18] исследованы электронные свойства гидрогенизированных сферических квантовых точек из SiC с составами, богатыми углеродом и кремнием. В статье [18] показано, что электронные свойства квантовых точек из SiC сильно зависят от состава и диаметра квантовых точек. Квантовые точки имеют множество потенциальных применений в оптоэлектронике, хранении энергии, катализе и медицинской диагностике, квантовые точки карбида кремния могут быть очень привлекательны для многих биологических и технологических приложений из-за их химической инертности и биосовместимости, однако, редко встречаются теоретические исследования, которые могли бы стимулировать разработку этих приложений. В статье [18] электронные свойства гидрогенизированных сферических квантовых точек SiC с составами, богатыми углеродом и кремнием, исследуются с использованием расчетов теории функционала плотности. Квантовые точки моделируются путём удаления атомов за пределами сферы из в остальном идеального кристалла SiC, поверхностные оборванные связи пассивируются атомами H. В статье [18] показано, что электронные свойства квантовых точек SiC сильно зависят от их состава и размера диаметра. Энергетическая щель всегда выше, чем у кристаллического SiC, что делает эти квантовые точки SiC подходящими для приложений при суровых температурах. Плотность состояний и уровни энергии показывают, что квантовые точки, богатые кремнием, имели более высокую плотность состояний вблизи минимума зоны проводимости, что указывает на лучшую проводимость. Результаты, полученные в статье [18], могут быть использованы для настройки электронных свойств квантовых точек SiC для оптоэлектронных приложений.

В статье [19] показано, что полупроводниковые квантовые точки проявляют зависящие от размера физико-химические свойства из-за квантового ограничения, возникающие из-за размеров, меньших диаметров экситона Бора, что позволяет использовать их в различных областях. В статье [19] показано, что полупроводниковые квантовые точки проявляют зависящие от размера физико-химические свойства из-за квантового ограничения, включая изменённые оптические характеристики, улучшенную фотолюминесценцию и настраиваемые электронные свойства. Эти уникальные особенности делают их ценными в таких приложениях, как фотовольтаика, биологическая визуализация и квантовые вычисления [19]. Квантовые точки являются полупроводниковыми наночастицами, которые меньше диаметра экситона Бора. Это ограничение размера имеет решающее значение, поскольку оно приводит к уникальным физическим и химическим свойствам из-за эффектов квантового ограничения. Термин «квантовое ограничение» относится к явлению, при котором электронные свойства материалов изменяются при их уменьшении до наномасштабных размеров, что является определяющей характеристикой квантовых точек. Одним из наиболее важных аспектов квантовых точек является то, что их свойства изменяются в зависимости от размера. Это означает, что по мере изменения размера квантовой точки изменяются и её оптические и электронные характеристики. Это зависящее от размера поведение имеет важное значение для различных приложений, поскольку позволяет настраивать такие свойства, как поглощение

и излучение света. В статье [19] подразумевается, что уникальные свойства квантовых точек делают их пригодными для широкого спектра применений. Они могут включать приложения в таких областях, как оптоэлектроника, медицинская визуализация и преобразование солнечной энергии, где возможность манипулировать свойствами квантовых точек весьма полезна.

В статье [20] показано, что полупроводниковые квантовые точки демонстрируют уникальные физические свойства, такие как сильные эффекты квантового ограничения, настраиваемые энергетические запрещенные зоны, высокая оптическая стабильность и дискретная плотность состояний, что делает их пригодными для оптоэлектронных приложений, таких как светоизлучающие устройства и солнечные элементы.

В статье [21] использована управляемая субмикронная двухбарьерная резонансная туннельная структура для изучения транспортных свойств полупроводниковой квантовой точки, содержащей настраиваемое число электронов, начиная с нуля. В статье [21] обсуждаются дополнительные максимумы энергии в полупроводниковых квантовых точках, отражающие оболочечную структуру электронных состояний, и то, как магнитные поля влияют на пики тока и заполнение спиновых состояний, демонстрируя атомно-подобные свойства в этих квантовых системах.

В статье [22] представлен обзор электронных и оптических свойств полупроводниковых и графеновых квантовых точек, причём одночастичные состояния используются в качестве входных данных для расчёта оптических свойств, а электрон-электронные взаимодействия включаются с помощью метода конфигурационного взаимодействия. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют уникальные электронные и оптические свойства, на которые влияют деформация, эффективная масса и ограничение. Их энергетический спектр является квадратичным, и они позволяют манипулировать квантовыми состояниями, что позволяет применять их в лазерах и управлять спином с помощью внешних электрических полей.

В статье [23] спектры оптического поглощения квантовых точек CdS и CdSe были рассчитаны квантово-механически с использованием теории функции плотности, основанной на независимом от времени уравнении Шрёдингера функционала энергии основного состояния. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют уникальные физические свойства по сравнению с их объёмными аналогами, включая зависящее от размера оптическое поглощение, настраиваемую запрещенную зону и многочастичные эффекты. Эти характеристики позволяют применять их в нелинейной оптике, фотоэлектрохимии, фотокатализе и одноэлектронных транзисторах.

В статье [24] описаны форма и потенциальный профиль полупроводниковых квантовых точек, которые были определены с помощью сканирующего оптического микроскопа ближнего поля для предоставления важной информации о пространственном распределении деформации, флуктуациях компонентов сплава и шероховатости интерфейса. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют трёхмерное ограничение, что приводит к дискретной плотности состояний, сверхузким спектрам поглощения и испускания и длительной квантовой фазовой когерентности. Оптические и электронные свойства полупроводниковых квантовых точек могут быть спроектированы путём управления размером, формой и выбором материала.

В работе [25] оптические и электронные свойства нульмерных полупроводниковых гетероструктур интенсивно изучались в последние несколько лет, в основном из-за их применения в оптоэлектронных устройствах и квантовых компьютерах. В работе [25] показано, что полупроводниковые квантовые точки демонстрируют квантованные уровни энергии из-за трёхмерного ограничения носителей, напоминающие атомные структуры. Их оптические и электронные свойства зависят от геометрии, состава и деформации, которые влияют на волновые функции и потенциал ограничения, что имеет

решающее значение для оптоэлектронных приложений.

В работе [26] описан ряд связанных физических эффектов в полупроводниковых квантовых точках с многозонными моделями, включая магнитоэлектромеханическую связь, проанализированных как с помощью аналитических методов, так и методов конечных элементов. В работе [26] обсуждаются электронные свойства анизотропных полупроводниковых квантовых точек, подчёркивая такие эффекты, как магнитоэлектромеханическая связь, спин-орбитальная связь и манипуляция фонон-индуцированными скоростями переворота спина через анизотропные затворные потенциалы, которые влияют на g -фактор и радиусы квантовых точек.

В статье [27] рассматриваются свойства квантовых точек, и их способность объединять точки в сложные сборки создает много возможностей для научных открытий, таких как способность объединять точки в сложные сборки. Квантовые точки демонстрируют сильно зависящие от размера оптические и электрические свойства, на которые влияет их атомная структура. Уникальные характеристики квантовых точек возникают из-за ограничения носителей заряда, что приводит к различным поведениям по сравнению с объёмными материалами, что позволяет использовать их в различных областях науки и техники.

В статье [28] показано, что полупроводниковые квантовые точки демонстрируют уникальные физические свойства, зависящие от их размера и формы, включая сильные электронно-дырочные взаимодействия, быструю релаксацию энергии и значительную заряд-фононную связь. Их атомная структура и поверхностные эффекты также играют решающую роль в определении этих свойств. Атомистическое описание квантовых точек дополняет феноменологические модели, предоставляет важные детали и создает новые научные парадигмы, а зависимость релаксации от энергии возбуждения и плотности состояний проясняет противоречия относительно узкого места фонона в фотовозбуждённой электронной релаксации.

В статье [29] предложены энергетические и шкалы длины для полупроводниковых квантовых точек на основе теоретических расчётов, которые помогают прояснить физику этой мезоскопической системы. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют зависящие от размера физические свойства, включая режимы ограничения, повышенную интенсивность люминесценции и модифицированные оптические матричные элементы. Их поведение переходит от материалов с непрямой к прямой щели по мере уменьшения размера полупроводниковых квантовых точек.

В работе [30] кратко напоминаются основные концепции квантовой оптики и физики полупроводниковых квантовых точек, которые необходимы для понимания физики генерации одиночных фотонов с помощью одиночных квантовых точек. В работе [30] обсуждается классификация состояний света и статистика фотонов, а также электронные и оптические свойства квантовых точек. В работе [30] рассмотрен недавний прогресс в расширении диапазона длин волн и покажем, как были реализованы управление поляризацией и высокие частоты повторения. Новые поколения электрически управляемых однофотонных светодиодов приводят к сверхнизким токам накачки, высоким частотам повторения, высокой эффективности сбора и работе при повышенной температуре. Кроме того, рассматриваются новые разработки в области подготовки когерентного состояния и излучения одиночных фотонов в режиме сильной связи. В работе [30] также обсуждаются генерация неразличимых фотонов и остающиеся проблемы для практических источников одиночных фотонов.

В работе [31] представлено всестороннее понимание физических явлений в квантово-ограниченной квазиуменьшенной электронной структуре с её зоной проводимости и валентной энергией и с различными собственными энергетическими состояниями. Полупроводниковые квантовые точки демонстрируют уникальные свойства, такие как кван-

тованные уровни энергии, большие энергии ограничения, широкополосные спектры усиления, низкую температурную чувствительность и узкую однородную ширину линий, что делает их подходящими для оптоэлектронных устройств и приложений обработки квантовой информации.

В работе [32] обсуждаются достижения в понимании полупроводниковых квантовых точек, подчеркивая их эффекты квантового ограничения, настраиваемые оптические свойства и одночастичную характеристику. Эти свойства позволяют использовать специализированные приложения в квантовых вычислениях, хранении энергии и биологическом зондировании, демонстрируя их замечательную универсальность и потенциал. В работе [32] продвигается понимание коллоидных квантовых точек, улучшая синтез, характеризацию и свойства адаптации для приложений в квантовых вычислениях, хранении энергии и биологическом зондировании, способствуя конвергенции нанонауки, химии материалов и спектроскопии.

Эти разнообразные и настраиваемые свойства подчёркивают универсальность и потенциал полупроводниковых квантовых точек в различных технологических и научных областях.

Результаты разработки структуры и элементов дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек в системе управления обучением MOODLE

Опишем этапы проектирования дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек в системе управления обучением MOODLE. На первом этапе формируется концепция курса, определяются его цель и целевая аудитория — будут ли это студенты физических специальностей, аспиранты или специалисты, повышающие квалификацию. На втором этапе проводится детальный анализ научных и учебных материалов по квантовым точкам, включая последние исследования в области синтеза, оптических свойств и применения в устройствах. Третий этап включает проектирование структуры курса: модули (например, «Размерное квантование», «Методы синтеза квантовых точек», «Применение квантовых точек в фотонике») и последовательность их изучения. Далее, на четвёртом этапе, осуществляется разработка учебного контента в виде лекций в текстовом и мультимедийном форматах, включая видеолекции, анимации энергетических уровней и модели кристаллических структур. Пятый этап посвящён созданию интерактивных элементов: тестов с автоматической проверкой, задач на расчёт размерно-зависимых свойств и форумов для обсуждения. Шестой этап предполагает интеграцию виртуальных лабораторных работ, например, с использованием симуляторов спектроскопии квантовых точек или моделей роста квантовых точек. Седьмой этап включает адаптацию курса под технические требования MOODLE: настройку системы оценивания, интеграцию SCORM-пакетов и проверку совместимости с мобильными устройствами. На восьмом этапе проводится внутреннее тестирование курса для проверки корректности заданий, скорости загрузки материалов и удобства навигации. Девятый этап предполагает пилотный запуск среди фокус-группы учащихся с последующим сбором обратной связи и доработкой. Наконец, на десятом этапе курс публикуется в открытом или корпоративном доступе, после чего начинается его методическое сопровождение: обновление контента, модерация обсуждений и анализ успеваемости для дальнейшего улучшения. Такой поэтапный подход обеспечивает создание качественного, интерактивного и научно актуального дистанционного курса, способного эффективно передавать сложные концепции квантовой физики в удобном для обучающихся формате.

Базой исследования для создания дистанционного курса по дисциплине «Кванто-

вые точки: синтез, свойства, применение» в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Объём дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек составляет 5 зачетных единиц или 180 часов.

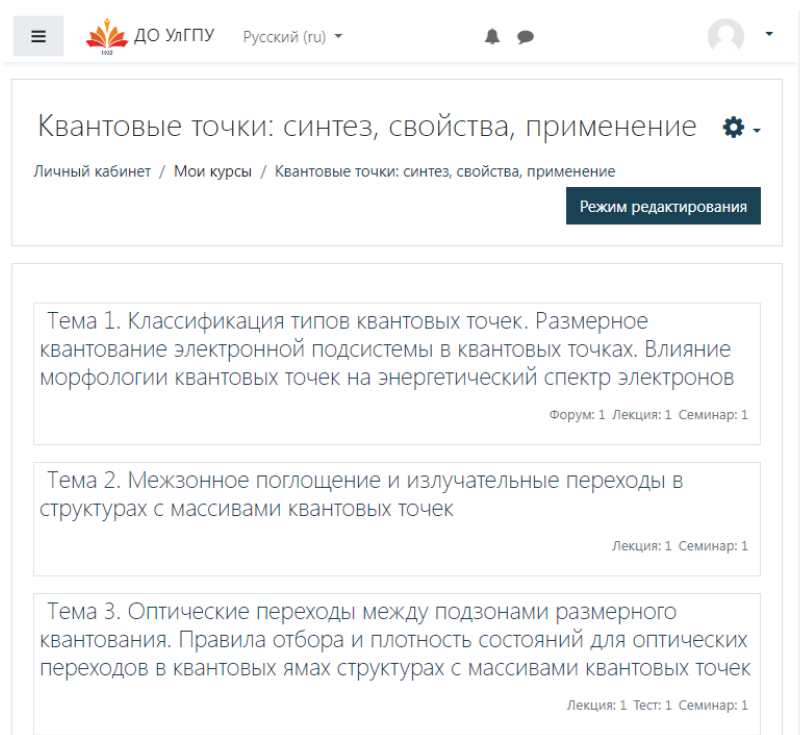


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

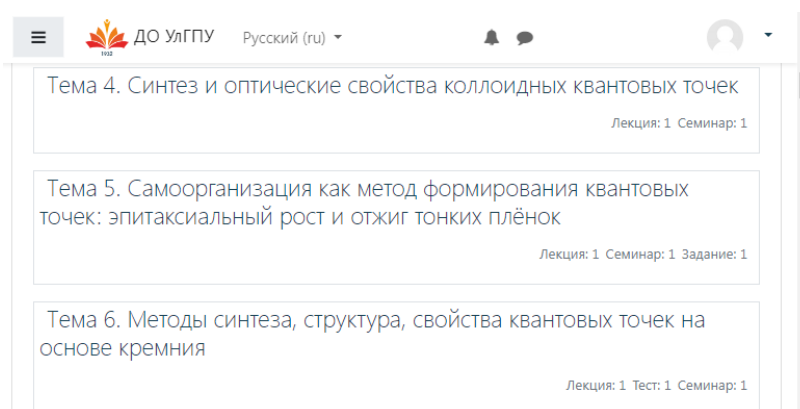


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

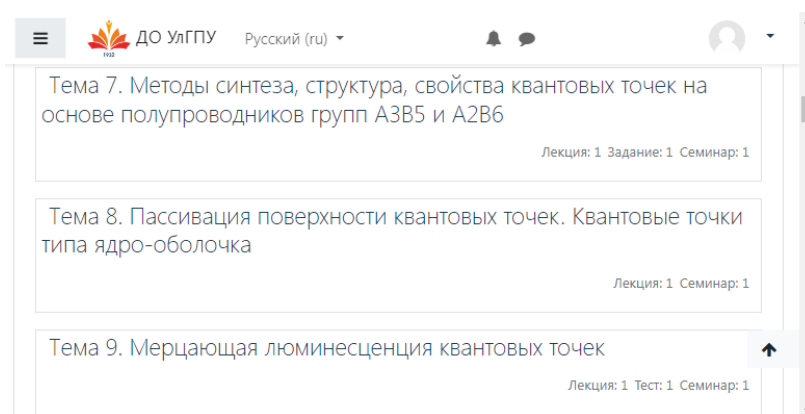


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

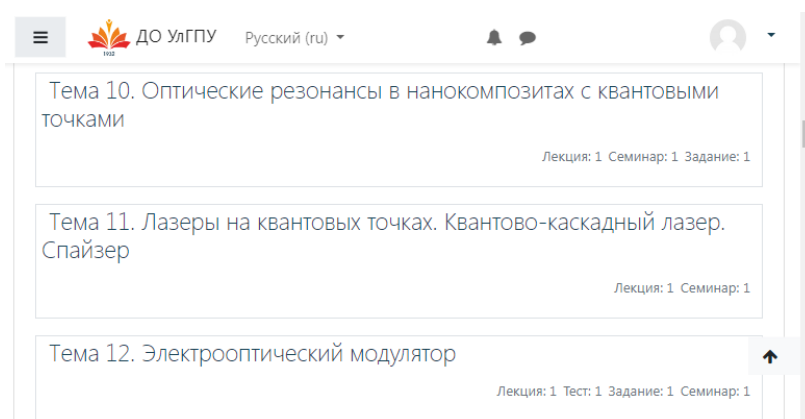


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы избранных элементов первой темы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 7 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных

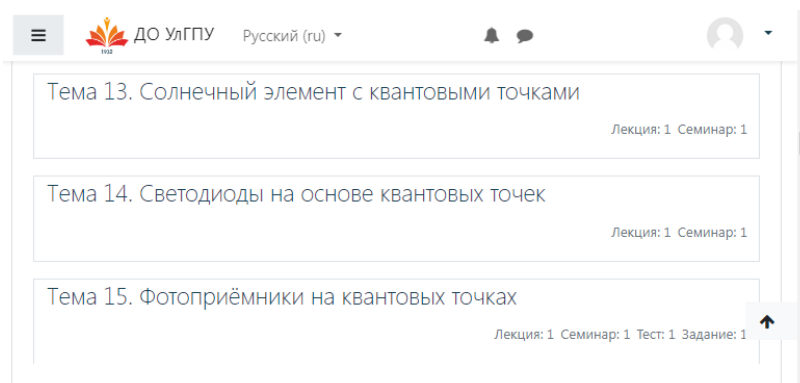


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

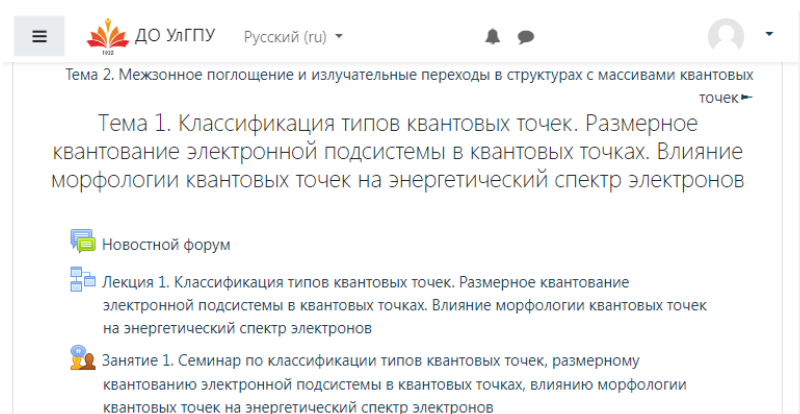


Рис. 6. Страница элементов первой темы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

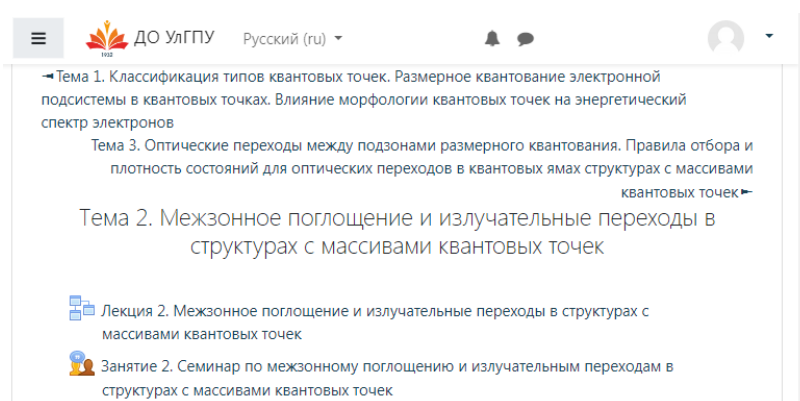


Рис. 7. Страница элементов второй темы дистанционного курса по физике и технологии квантовых точек, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

образовательных технологий с учётом возможностей Интернета и видеоконференцсвязи. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении физики и технологии квантовых точек.

Дистанционный курс по квантовым точкам построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу по квантовым точкам и применять смешанную технологию в преподавании физики и технологии квантовых точек. Теоретические материалы курса систематизировали и актуализировали знания о квантовых точках. Курс по квантовым точкам интегрирован в образовательный сайт на платформе системы управления обучением MOODLE педагогического университета и планируется к использованию в образовательных программах бакалавриата и специалитета педагогического университета.

Заключение

Описан процесс разработки дистанционного курса, охватывающего ключевые аспекты физики и технологии квантовых точек. Дистанционный курс по физике и технологии квантовых точек разработан с помощью инструментария системы управления обучением MOODLE.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. выполненный всесторонний анализ научной литературы показал актуальность исследования физических свойств квантовых точек для наполнения курса по физике и технологии квантовых точек,
2. показано, что при помощи модульной технологии разработан специализированный дистанционный курс, охватывающий ключевые аспекты физики и технологии квантовых точек,
3. разработанный дистанционный курс «Квантовые точки: синтез, свойства, применение» готов к использованию в образовательном процессе педагогического университета на педагогическом направлении подготовки с профилями по физике и математике, или физике и информатике.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что если использовать теоретические модели физических процессов в квантовых точках и результаты численных расчётов физических характеристик квантовых точек в дистанционном курсе «Квантовые точки: синтез, свойства, применение», то можно создать специализированный дистанционный курс, опирающийся на современные представления о физических свойствах квантовых точек, который повысит уровень компетенций обучающихся в области физики квантовых точек и упростит доступ к актуальным знаниям, подтверждена полностью.

Дистанционный курс по квантовым точкам построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу по квантовым точкам и применять смешанную технологию в преподавании физики и технологии квантовых точек. Теоретические материалы курса систематизировали и актуализировали знания о квантовых точках. Курс по квантовым точкам интегрирован в образовательные платформы педагогического университета и планируется к использованию в образовательных программах бакалавриата и специалитета.

Список использованных источников

1. Mo Jieqing. Recent advances of colloidal quantum dots in a physical perspective // Journal of physics: conference series. — 2023. — nov. — Vol. 2634, no. 1. — P. 012017. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2634/1/012017>.

2. Compton Robert N., Duncan Michael A. Semiconductor quantum dots // Laser experiments for chemistry and physics, second edition. — Oxford University Press, Oxford, 2024. — nov. — P. 402–409. — ISBN: 9780198900856. — URL: <http://dx.doi.org/10.1093/oso/9780198900825.003.0029>.
3. Shao Lijia, Gao Yanfang, Yan Feng. Semiconductor quantum dots for biomedical applications // Sensors. — 2011. — dec. — Vol. 11, no. 12. — P. 11736–11751. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/S111211736>.
4. Hunagund Shivakumar. Quantum engineering: quantum dots // Principles and applications of quantum computing using essential math. — IGI Global, 2023. — sep. — P. 77–106. — ISBN: 9781668475379. — URL: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7535-5.ch005>.
5. Qureshi Anjum, Shaikh Tayyaba, Niazi Javed H. Semiconductor quantum dots in photoelectrochemical sensors from fabrication to biosensing applications // The Analyst. — 2023. — Vol. 148, no. 8. — P. 1633–1652. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d2an01690g>.
6. Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges / F. Pelayo Garcia de Arquer [et al.] // Science. — 2021. — aug. — Vol. 373, no. 6555. — URL: <http://dx.doi.org/10.1126/SCIENCE.AAZ8541>.
7. Gill Ron, Zayats Maya, Willner Itamar. Semiconductor quantum dots for nioanalysis // Angewandte chemie international edition. — 2008. — sep. — Vol. 47, no. 40. — P. 7602–7625. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ANIE.200800169>.
8. Zhou Weidong, Coleman James J. Semiconductor quantum dots // Current opinion in solid state and materials science. — 2016. — dec. — Vol. 20, no. 6. — P. 352–360. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.COSSMS.2016.06.006>.
9. Mumin Md Abdul, Akhter Kazi Farida, Charpentier Paul A. Photo-physical properties enhancement of bare and core-shell quantum dots // AIP conference proceedings. — AIP Publishing LLC, 2014. — P. 259–265. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4870227>.
10. Optical properties of semiconductor nanocrystals into the glass and colloidal environments for new technological applications / Sidney Alves Lourenco [et al.] // Recent advances in complex functional materials. — Springer International Publishing, 2017. — P. 155–175. — ISBN: 9783319538983. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53898-3_6.
11. Torimoto Tsukasa. Nanostructure engineering of size-quantized semiconductor particles for photoelectrochemical applications // Electrochemistry. — 2017. — Vol. 85, no. 9. — P. 534–542. — URL: <http://dx.doi.org/10.5796/ELECTROCHEMISTRY.85.534>.
12. Mondal Somrita, Pan Animesh. Quantum dots in biosensing, bioimaging, and drug delivery // Application of quantum dots in biology and medicine. — Springer Nature Singapore, 2022. — P. 165–190. — ISBN: 9789811931444. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-3144-4_9.
13. Mowbray D. J., Skolnick M. S. New physics and devices based on self-assembled semiconductor quantum dots // Journal of physics D: applied physics. — 2005. — jun. — Vol. 38, no. 13. — P. 2059–2076. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/13/002>.


14. Elemental semiconductor nanocrystals / Vismitha S. Patil [et al.] // Handbook of emerging materials for sustainable energy. — Elsevier, 2024. — P. 825–851. — ISBN: 9780323961257. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-96125-7.00025-3>.
15. Shi Donglu, Guo Zizheng, Bedford Nicholas. Semiconductor quantum dots // Nanomaterials and devices. — Elsevier, 2015. — P. 83–104. — ISBN: 9781455777549. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4557-7754-9.00004-4>.
16. Effects of nanocrystal shape on the physical properties of colloidal ZnO quantum dots / Fanyao Qu [et al.] // Physica E: low-dimensional systems and nanostructures. — 2004. — jul. — Vol. 23, no. 3–4. — P. 410–415. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSE.2003.12.137>.
17. Mei Ting, Hu Yong. Synthesis, self-assembly and optoelectronic properties of monodisperse ZnO quantum dots // Optoelectronic devices and properties. — InTech, 2011. — apr. — ISBN: 9789533072043. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/14389>.
18. A theoretical study of the electronic properties of hydrogenated spherical-like SiC quantum dots with C-rich and Si-rich compositions / Miguel Ojeda-Martinez [et al.] // International journal of quantum chemistry. — 2024. — mar. — Vol. 124, no. 6. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qua.27361>.
19. Feng Donghai, Zhang Guofeng, Li Yang. Semiconductor quantum dots: synthesis, properties and applications // Nanomaterials. — 2024. — nov. — Vol. 14, no. 22. — P. 1825. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano14221825>.
20. Ahamed M. Irshad, Ahamed Mansoor, Muthaiyan R. Modelling of density of states and energy level of chalcogenide quantum dots // International review of applied sciences and engineering. — 2021. — oct. — Vol. 13, no. 1. — P. 42–46. — URL: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2021.00288>.
21. Atomic-like properties of semiconductor quantum dots / Seigo Tarucha [et al.] // Japanese journal of applied physics. — 1997. — jun. — Vol. 36, no. 6S. — P. 3917. — URL: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.36.3917>.
22. Electronic and optical properties of semiconductor and graphene quantum dots / Weidong Sheng [et al.] // Frontiers of physics. — 2011. — oct. — Vol. 7, no. 3. — P. 328–352. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S11467-011-0200-5>.
23. Gharibshahi E., Saion E. Quantum mechanical calculations of optical absorption of CdS and CdSe quantum dots // Materials research innovations. — 2011. — aug. — Vol. 15, no. sup2. — P. s67–s70. — URL: <http://dx.doi.org/10.1179/143307511X13031890747859>.
24. Saiki Toshiharu. Visualizing exciton wavefunctions confined in a quantum dot // SPIE newsroom. — 2011. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/2.1201106.003678>.
25. Engineering the electronic structure and the optical properties of semiconductor quantum dots / M. De Giorgi [et al.] // Advanced semiconductor and organic nanotechniques. — Elsevier, 2003. — P. 1–50. — ISBN: 9780125070607. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012507060-7/50015-5>.

26. Prabhakar Sanjay, Melnik Roderick. Multiphysics effects and electronic properties of anisotropic semiconductor quantum dots // 2013 IEEE XXXIII International scientific conference electronics and nanotechnology (ELNANO). — IEEE, 2013. — apr. — P. 217–219. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ELNANO.2013.6552020>.
27. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots // Science. — 1996. — feb. — Vol. 271, no. 5251. — P. 933–937. — URL: <http://dx.doi.org/10.1126/SCIENCE.271.5251.933>.
28. Prezhdo Oleg V. Photoinduced dynamics in semiconductor quantum dots: insights from time-domain ab initio studies // Accounts of chemical research. — 2009. — nov. — Vol. 42, no. 12. — P. 2005–2016. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/AR900157S>.
29. Singh Vijay A., Ranjan V., Kapoor Manish. Semiconductor quantum dots: theory and phenomenology // Bulletin of materials science. — 1999. — may. — Vol. 22, no. 3. — P. 563–569. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02749969>.
30. Michler Peter. Single semiconductor quantum dots // Nanoscience and technology. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — P. 185–225. — ISBN: 9783540874461. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-87446-1>.
31. Mary Nusrat Irin Chowdhury, Islam Md. Ariful. Property analysis of colloidal quantum dot in semiconductor nanostructure // AIP conference proceedings. — Vol. 1919. — Author(s), 2017. — P. 020034. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5018552>.
32. Chiang Wesley, Morshed Ovishek, Krauss Todd D. Quantum confined semiconductor nanocrystals. — American Chemical Society, 2023. — aug. — ISBN: 9780841299856. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsinfocus.7e7022>.

Сведения об авторах:

Екатерина Сергеевна Павлова — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kat.pavlova2003@iclod.com

ORCID iD  0009-0009-1344-1431

Web of Science ResearcherID  ISA-2133-2023

Original article
 PACS 01.40.Di
 OCIS 000.2060
 MSC 00A79

Development of a distance learning course on quantum dots

E. S. Pavlova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted November 17, 2025

Resubmitted November 18, 2025

Published December 31, 2025

Abstract. The results of developing a distance learning course on quantum dots in the learning management system MOODLE are presented. The modular structure and selected elements of the distance learning course “Quantum dots: synthesis, properties, applications” in the learning management system MOODLE are described. The development of the distance learning course aims to expand understanding of quantum dots.

Keywords: distance learning course, quantum dots, photonics, nanooptics, learning management system

References

1. Mo Jieqing. Recent advances of colloidal quantum dots in a physical perspective // Journal of physics: conference series. — 2023. — nov. — Vol. 2634, no. 1. — P. 012017. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2634/1/012017>.
2. Compton Robert N., Duncan Michael A. Semiconductor quantum dots // Laser experiments for chemistry and physics, second edition. — Oxford University Press, Oxford, 2024. — nov. — P. 402–409. — ISBN: 9780198900856. — URL: <http://dx.doi.org/10.1093/oso/9780198900825.003.0029>.
3. Shao Lijia, Gao Yanfang, Yan Feng. Semiconductor quantum dots for biomedical applications // Sensors. — 2011. — dec. — Vol. 11, no. 12. — P. 11736–11751. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/S111211736>.
4. Hunagund Shivakumar. Quantum engineering: quantum dots // Principles and applications of quantum computing using essential math. — IGI Global, 2023. — sep. — P. 77–106. — ISBN: 9781668475379. — URL: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7535-5.ch005>.
5. Qureshi Anjum, Shaikh Tayyaba, Niazi Javed H. Semiconductor quantum dots in photoelectrochemical sensors from fabrication to biosensing applications // The Analyst. — 2023. — Vol. 148, no. 8. — P. 1633–1652. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d2an01690g>.
6. Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges / F. Pelayo Garcia de Arquer [et al.] // Science. — 2021. — aug. — Vol. 373, no. 6555. — URL: <http://dx.doi.org/10.1126/SCIENCE.AAZ8541>.

7. Gill Ron, Zayats Maya, Willner Itamar. Semiconductor quantum dots for nioanalysis // *Angewandte chemie international edition*. — 2008. — sep. — Vol. 47, no. 40. — P. 7602–7625. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ANIE.200800169>.
8. Zhou Weidong, Coleman James J. Semiconductor quantum dots // *Current opinion in solid state and materials science*. — 2016. — dec. — Vol. 20, no. 6. — P. 352–360. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.COSSMS.2016.06.006>.
9. Mumin Md Abdul, Akhter Kazi Farida, Charpentier Paul A. Photo-physical properties enhancement of bare and core-shell quantum dots // *AIP conference proceedings*. — AIP Publishing LLC, 2014. — P. 259–265. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4870227>.
10. Optical properties of semiconductor nanocrystals into the glass and colloidal environments for new technological applications / Sidney Alves Lourenco [et al.] // *Recent advances in complex functional materials*. — Springer International Publishing, 2017. — P. 155–175. — ISBN: 9783319538983. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-53898-3_6.
11. Torimoto Tsukasa. Nanostructure engineering of size-quantized semiconductor particles for photoelectrochemical applications // *Electrochemistry*. — 2017. — Vol. 85, no. 9. — P. 534–542. — URL: <http://dx.doi.org/10.5796/ELECTROCHEMISTRY.85.534>.
12. Mondal Somrita, Pan Animesh. Quantum dots in biosensing, bioimaging, and drug delivery // *Application of quantum dots in biology and medicine*. — Springer Nature Singapore, 2022. — P. 165–190. — ISBN: 9789811931444. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-3144-4_9.
13. Mowbray D. J., Skolnick M. S. New physics and devices based on self-assembled semiconductor quantum dots // *Journal of physics D: applied physics*. — 2005. — jun. — Vol. 38, no. 13. — P. 2059–2076. — URL: <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/38/13/002>.
14. Elemental semiconductor nanocrystals / Vismitha S. Patil [et al.] // *Handbook of emerging materials for sustainable energy*. — Elsevier, 2024. — P. 825–851. — ISBN: 9780323961257. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-96125-7.00025-3>.
15. Shi Donglu, Guo Zizheng, Bedford Nicholas. Semiconductor quantum dots // *Nanomaterials and devices*. — Elsevier, 2015. — P. 83–104. — ISBN: 9781455777549. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4557-7754-9.00004-4>.
16. Effects of nanocrystal shape on the physical properties of colloidal ZnO quantum dots / Fanyao Qu [et al.] // *Physica E: low-dimensional systems and nanostructures*. — 2004. — jul. — Vol. 23, no. 3–4. — P. 410–415. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.PHYSE.2003.12.137>.
17. Mei Ting, Hu Yong. Synthesis, self-assembly and optoelectronic properties of monodisperse ZnO quantum dots // *Optoelectronic devices and properties*. — InTech, 2011. — apr. — ISBN: 9789533072043. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/14389>.
18. A theoretical study of the electronic properties of hydrogenated spherical-like SiC quantum dots with C-rich and Si-rich compositions / Miguel Ojeda-Martinez [et al.] // *International journal of quantum chemistry*. — 2024. — mar. — Vol. 124, no. 6. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qua.27361>.


19. Feng Donghai, Zhang Guofeng, Li Yang. Semiconductor quantum dots: synthesis, properties and applications // *Nanomaterials*. — 2024. — nov. — Vol. 14, no. 22. — P. 1825. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano14221825>.
20. Ahamed M. Irshad, Ahamed Mansoor, Muthaiyan R. Modelling of density of states and energy level of chalcogenide quantum dots // *International review of applied sciences and engineering*. — 2021. — oct. — Vol. 13, no. 1. — P. 42–46. — URL: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2021.00288>.
21. Atomic-like properties of semiconductor quantum dots / Seigo Tarucha [et al.] // *Japanese journal of applied physics*. — 1997. — jun. — Vol. 36, no. 6S. — P. 3917. — URL: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.36.3917>.
22. Electronic and optical properties of semiconductor and graphene quantum dots / Weidong Sheng [et al.] // *Frontiers of physics*. — 2011. — oct. — Vol. 7, no. 3. — P. 328–352. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S11467-011-0200-5>.
23. Gharibshahi E., Saion E. Quantum mechanical calculations of optical absorption of CdS and CdSe quantum dots // *Materials research innovations*. — 2011. — aug. — Vol. 15, no. sup2. — P. s67–s70. — URL: <http://dx.doi.org/10.1179/143307511X13031890747859>.
24. Saiki Toshiharu. Visualizing exciton wavefunctions confined in a quantum dot // *SPIE newsroom*. — 2011. — jun. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/2.1201106.003678>.
25. Engineering the electronic structure and the optical properties of semiconductor quantum dots / M. De Giorgi [et al.] // *Advanced semiconductor and organic nanotechniques*. — Elsevier, 2003. — P. 1–50. — ISBN: 9780125070607. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012507060-7/50015-5>.
26. Prabhakar Sanjay, Melnik Roderick. Multiphysics effects and electronic properties of anisotropic semiconductor quantum dots // 2013 IEEE XXXIII International scientific conference electronics and nanotechnology (ELNANO). — IEEE, 2013. — apr. — P. 217–219. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ELNANO.2013.6552020>.
27. Alivisatos A. P. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots // *Science*. — 1996. — feb. — Vol. 271, no. 5251. — P. 933–937. — URL: <http://dx.doi.org/10.1126/SCIENCE.271.5251.933>.
28. Prezhdov Oleg V. Photoinduced dynamics in semiconductor quantum dots: insights from time-domain ab initio studies // *Accounts of chemical research*. — 2009. — nov. — Vol. 42, no. 12. — P. 2005–2016. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/AR900157S>.
29. Singh Vijay A., Ranjan V., Kapoor Manish. Semiconductor quantum dots: theory and phenomenology // *Bulletin of materials science*. — 1999. — may. — Vol. 22, no. 3. — P. 563–569. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02749969>.
30. Michler Peter. Single semiconductor quantum dots // *Nanoscience and technology*. — Springer Berlin Heidelberg, 2009. — P. 185–225. — ISBN: 9783540874461. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-87446-1>.
31. Mary Nusrat Irin Chowdhury, Islam Md. Ariful. Property analysis of colloidal quantum dot in semiconductor nanostructure // *AIP conference proceedings*. — Vol. 1919. — Author(s), 2017. — P. 020034. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5018552>.


32. Chiang Wesley, Morshed Ovishek, Krauss Todd D. Quantum confined semiconductor nanocrystals. — American Chemical Society, 2023. — aug. — ISBN: 9780841299856. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/acsinfocus.7e7022>.

Information about authors:

Ekaterina Sergeevna Pavlova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kat.pavlova2003@iclod.com

ORCID iD  0009-0009-1344-1431

Web of Science ResearcherID  ISA-2133-2023