

На правах рукописи

Аль Алвани Аммар Жабер Кадим

**ФОРМИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ
СТРУКТУР ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ
ТОЧЕК CdSe/CdS/ZnS**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Глуховской Евгений Геннадьевич

Оппоненты: **Юдин Сергей Георгиевич**
доктор технических наук,
федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и Фотоника» Российской академии наук (г. Москва),
ведущий научный сотрудник лаборатории жидких кристаллов

Абдулвахидов Камалудин Гаджиевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук» (г. Ростов-на-Дону),
ведущий научный сотрудник отдела физики, химии и
информатики

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (г. Саратов)

Защита диссертации состоится « 12 » марта 2020 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.105.04 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Юго-Западного государственного университета по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94 и на сайте Юго-Западного государственного университета: <https://swsu.ru/>.

Автореферат разослан « » января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.105.04,
к.ф.-м.н., доцент

Кочура Алексей Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Метод Ленгмюра-Блоджетт предоставляет уникальный и простой способ получения тонких пленок с необходимыми свойствами, которые можно перенести на твердую подложку в виде моно- или многослойной (за несколько циклов переноса) структуры. Исследование свойств Ленгмюровских монослоев важно для расширения областей их применения, в частности, для создания оптических датчиков, активных слоев в оптоэлектронных устройствах (таких как солнечные элементы) и т. д.

При формировании тонких пленок квантовых точек (КТ) методом Ленгмюра-Блоджетт существенной проблемой остается избыток молекул органического стабилизатора в коллоидном растворе КТ, который остается после их синтеза. Этот избыток органических молекул (жирных кислот) может приводить к деформации и даже коллапсу монослоя КТ на границе раздела воздух-вода. В некоторых работах для удаления органического поверхностно-активного вещества использовали методы химической обработки или отжига после нанесения тонкой пленки на твердую подложку. Но, как правило, эти методы оказывают нежелательное влияние на свойства самих КТ и не дают возможности управления расстояниями между частицами. Поэтому до сих пор одной из важных задач, направленных на решение этой проблемы по формированию слоев КТ с управляемой упорядоченностью и плотностью, – является поиск подходящего способа снижения избытка стабилизатора.

Полученный монослой с КТ может быть использован в качестве активного слоя в фотоэлектрических устройствах, в качестве слоя, который способствует усилению фотопоглощения графена. В настоящее время образование монослоев полупроводниковых квантовых точек (CdSe/CdS/ZnS) в различных условиях изучено недостаточно.

Интересным и практически не рассмотренным является также формирование монослоев и тонких пленок КТ в органической матрице, молекулы которой обладают большим дипольным моментом. Типичными представителями таких веществ являются жидкокристаллические вещества, у которых могут наблюдаться фазовые переходы в узком температурном диапазоне, что перспективно для создания новых материалов для различных типов датчиков и планарных компонентов оптических устройств на основе полупроводниковых КТ с управляемыми свойствами.

Цели и задачи исследования.

Целью работы является изучение влияния природы и количества стабилизатора на формирование ленгмюровских слоев квантовых точек CdSe/CdS/ZnS и на электронные свойства пленочных структур Ленгмюра-Блоджетт на их основе.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Исследование ленгмюровских монослоев состава «КТ CdSe/CdS/ZnS – органическая матрица» на поверхности водной субфазы.
2. Исследование модификации поверхности квантовых точек CdSe/CdS/ZnS молекулами жидкого кристалла, и ее влияния на формирование ленгмюровского слоя на основе систем квантовых точек CdSe/CdS/ZnS в органической матрице.
3. Исследование морфологии и электронных свойств пленочных структур Ленгмюра-Блоджетт на основе систем квантовых точек CdSe/CdS/ZnS в органической матрице на твердой подложке
4. Построение компьютерной модели «кластер (CdSe)₁₃ – молекула стабилизатора» и исследование методами квантовой химии влияния геометрии модели, а также

особенности строения и электронных свойств молекулы стабилизатора на электронные свойства кластера (CdSe)₁₃.

Методы исследования:

Для формирования и исследования слоев КТ на поверхности воды и получения пленочных структур Ленгмюра-Блоджетт на твердой подложке использовалась ванна Ленгмюра-Блоджетт KSV Nima LB Trough Medium KN 2002 (в комплекте с Surface Potential Sensor KSV Nima и термостатом LOIP-LT-205a) и методы изотерм сжатия и скачка потенциала. Морфология тонких плёнок на твердой подложке исследовалась методом атомно-силовой микроскопии с помощью зондовой нанолaborатории NTEGRA Spectra и Солвер Нано (NT-MDT, Россия), и методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа SEM Tescan Mira II LMU (Чехия). Измерение величины контактного угла между каплей воды и пленкой на твердой подложке производилось с помощью установки Attension (KSV-NIMA). Оптические свойства тонких пленок исследовались с помощью зондовой нанолaborатории NTEGRA Spectra NT-MDT (спектры флуоресценции) и спектрометра Shimadzu UV-2550 (спектры поглощения). Вольт-амперные характеристики получали с помощью микроскопа "Солвер Нано" и анализатора полупроводниковых приборов Agilent Technologies B1500A. Математическое моделирование выполнялось на вычислительном кластере НИУ СГУ имени Н.Г. Чернышевского.

Научная новизна:

1. Предложен метод управления плотностью упаковки ленгмюровского слоя квантовых точек путем уменьшения избыточного количества стабилизатора, формирования органической матрицы на основе жидких кристаллов (8CB) путем изменения температуры и соотношения компонентов.
2. Определена возможность контроля агрегативной устойчивости раствора квантовых точек путем замены органического стабилизатора квантовых точек, а именно олеиновой кислоты на жидкий кристалл 8CB, а также изменения концентрации квантовых точек и температуры.
3. С помощью методов DFT и NDDO PM3 построена компьютерная модель, позволяющая теоретически исследовать влияние стабилизатора на энергетическую щель между верхним заполненным и нижним свободным уровнем (HOMO – LUMO).

Практическая значимость работы.

Результаты исследований зависимости электронных свойств Ленгмюровских пленок КТ CdSe/CdS/ZnS от типа стабилизатора и внешних условий могут быть использованы для создания моно - и мультислойных структур или композитных фоточувствительных пленок для устройств микро - и наноэлектроники.

Положения, выносимые на защиту:

1. Управление плотностью упаковки квантовых точек состава CdSe/CdS/ZnS, стабилизированных олеиновой кислотой в ленгмюровском слое.
2. Параметры ленгмюровского слоя квантовых точек состава CdSe/CdS/ZnS, стабилизированных олеиновой кислотой, в органической матрице жидкого кристалла 4'-октил-4-цианобифенила.
3. Влияние жидкого кристалла 4'-октил-4-цианобифенила на степень упаковки квантовых точек CdSe/CdS/ZnS в слое и электронные свойства пленочных структур Ленгмюра-Блоджетт.
4. Механизмы переноса заряда в пленочных структурах Ленгмюра-Блоджетт на основе квантовых точек состава CdSe/CdS/ZnS, стабилизированных олеиновой кислотой.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методик и современного оборудования, позволяющего воспроизводить результаты экспериментов в пределах допустимых погрешностей. Достоверность экспериментальных данных по изучению монослоев, электрофизических, оптических свойств, морфологии поверхности, а также обработка результатов согласуются с результатами других исследователей, а также непротиворечат современным физическим представлениям о протекающих процессах в исследуемых полупроводниковых структурах и органических лэнгмюровских слоях. Используемые модели для исследования свойств молекулярных кластеров основаны на известных базисах, которые обеспечивают корректный расчет различных параметров.

Личный вклад автора состоит в самостоятельном выполнении представленных в диссертации экспериментальных исследований (кроме измерений на электронном микроскопе, которые выполнялись при участии автора), обработке экспериментальных данных, их анализе и выполнении оценочных расчетов. Комплексный анализ данных и описание процессов в структуре проведен совместно с научным руководителем. Автор принимал участие в разработке и апробации способа анализа изотерм сжатия лэнгмюровских слоев с разным соотношением и составом квантовых точек. Автор осуществлял подготовку научных статей и материалов для участия в конференциях. При использовании результатов других авторов или полученных в соавторстве результатов даются соответствующие ссылки на источник. Автором были разработаны и созданы модели молекулярных систем, которые затем были исследованы в различных условиях.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных статьях; в их числе – 10 статей в рецензируемых научных журналах (8 – Scopus и Web of Science, 2 – в журналах из Перечня ВАК), 6 материалов и тезисов конференций.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на российских и международных конференциях: «Tech Connect World Innovation 2015, Conference & Expo» (Washington, 2015), «Saratov Fall Meeting 2015» (Саратов, 2015), «Nanotech France 2015 Conference & Exhibition» (Paris, 2015), «21-st Ostwald-Kolloquium Biomolecules, Macromolecules and Particles at Fluid interfaces» (Potsdam-Golm 2015), «6th International "Nanoparticles, nanostructured coatings and microcontainers: technology, properties, applications» (Russia, Saratov, 2016), «Международная конференция SPB OPEN 2016» (Санкт-Петербург, 2016), «16th International Conference on Organized Molecular Films (ICOMF16)» (Helsinki, Finland), «ECIS 2016, the 30th Conference of the European Colloid and Interface Society» (Rome, 2016), «AEM 2016 – 1st international conference on advanced energy materials, 8th international conference on advanced nanomaterials, 2nd international conference on hydrogen energy» (University of Surrey, 2016), «Saratov Fall Meeting 2016» (Саратов, 2016), «7th International "Nanoparticles, nanostructured coatings and microcontainers: technology, properties, applications» (Russia, Tomsk, 2016), «XII Международная конференция «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (БелСЗМ-2016)» (Минск, 2016), «International conference, Physica.SPb» (Санкт-Петербург, 2016), «Международная конференция SPB OPEN 2017» (Санкт-Петербург, 2017), «Saratov Fall Meeting 2017» (Саратов, 2017), «Международная конференция SPB OPEN 2018» (Санкт-Петербург, 2018), «Saratov Fall Meeting 2018» (Саратов, 2018), «SPIE Photonics West, San Francisco» (California, United States, 2019).

Финансовая поддержка работы осуществлялась проектом РНФ № 14-12-00275, а также проектом РФФИ № 16-27-50050.

Соответствие паспорту научной специальности. Направленность диссертационной работы и ее основные научные результаты соответствует пунктам 1, 2 и 3 паспорта заявленной специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления.
2. Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы.
3. Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 217 наименований. Общий объем диссертации составляет 163 страниц, включая 89 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы работы, поставлены цель и задачи работы, а также описаны научная и практическая значимость представляемой работы.

В главе 1 проведен литературный обзор, посвященный формированию монослоев на основе стабилизатора и смесей наночастиц в органической матрице. Проанализировано влияние внешних и внутренних условий в системе на свойства монослоев и многослойных пленок варьированием различных параметров. Отдельно рассмотрены возможности их практического применения. Выделена группа параметров, таких как температура, тип и концентрация стабилизатора, которые могут быть использованы для определения степени влияния условий на свойства монослоев, таких как механические, оптические и электронные свойства монослоев.

Глава 2 посвящена исследованию влияния избытка стабилизатора (молекул олеиновой кислоты, не связанных с поверхностью квантовых точек) в исходном растворе КТ на плотность упаковки и механические параметры ленгмюровских монослоев [5, 8, 9]. Для уменьшения количества стабилизатора в исходном растворе КТ использовали мембрану полиэтилена высокой плотности (HDPE). При этом изотермы сжатия монослоя из раствора КТ (отбираемого внутри полиэтиленового мешка) смещались в сторону меньших площадей (рисунок. 1, б): после 48 ч фильтрации раствора она уменьшилась с 227 до 209 см², после 192 ч – до 146 см². Контрольные изотермы монослоя из проб, отобранных в соответствующие моменты времени вне фильтровального мешка, демонстрировали увеличение количества стабилизатора в хлороформе (рисунок. 1, в). Уменьшение площади занимаемой монослоем КТ составляло около 11, 23 и 35,5 % после 48, 96 и 192 ч.

Однократно перенесенный при поверхностном давлении 15 мН/м (точность контроля 0,1 мН/м) на кремниевую подложку слой КТ исследовали методом АСМ зондом с радиусом закругления острия не более 10 нм. Полученные сканы (рисунок. 2) анализировались с помощью программного пакета Gwyddion 2.47.

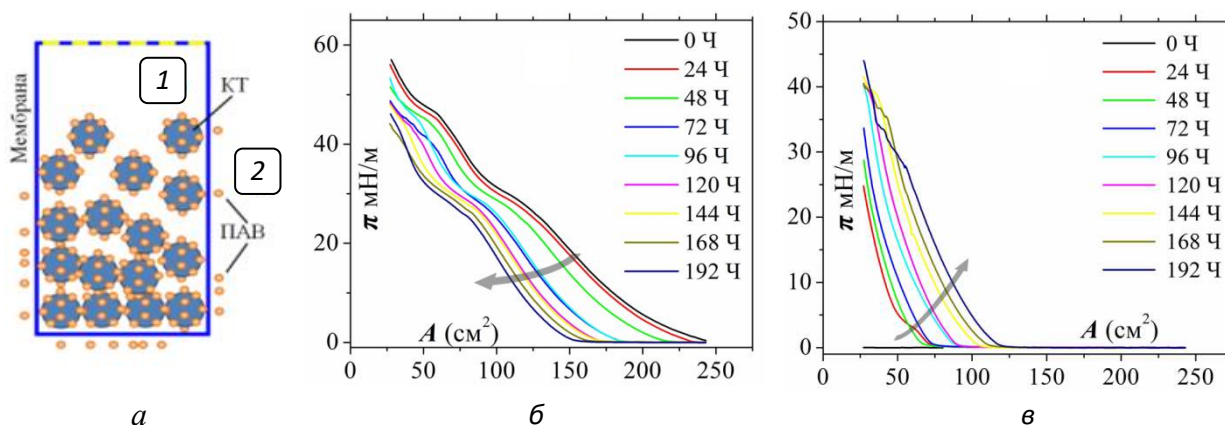


Рисунок 1. Схема процесса фильтрации (а): 1 – внутренний объем мешка из HDPE мембраны с раствором КТ в хлороформе, 2 – внешний объем с хлороформом; изотермы сжатия для проб, отобранных из внутреннего объема – б и внешнего – в

Однако избыток молекул стабилизатора означает, что только несвязанные молекулы будут отделены от объемного раствора. В этом случае процесс агрегации не начнется, так как покинуть раствор смогут только свободные молекулы из основной массы раствора, а молекулы стабилизатора, связанные с поверхностью квантовых точек, остаются в составе раствора. Для исследования взаимодействия на границе раздела воздух-вода был сформирован монослой исходного раствора (смеси КТ, стабилизированные молекулами олеиновой кислоты с молекулами олеиновой кислоты, находящимися в растворе, но не связанными с поверхностью КТ).

Площадь, занимаемая КТ на подложке, была рассчитана на основе АСМ изображений с использованием программы ImageJ. Было установлено, что площадь, занимаемая КТ на подложке, увеличилась с 18 до 60 % после уменьшения количества избыточного стабилизатора в течение 96 ч.

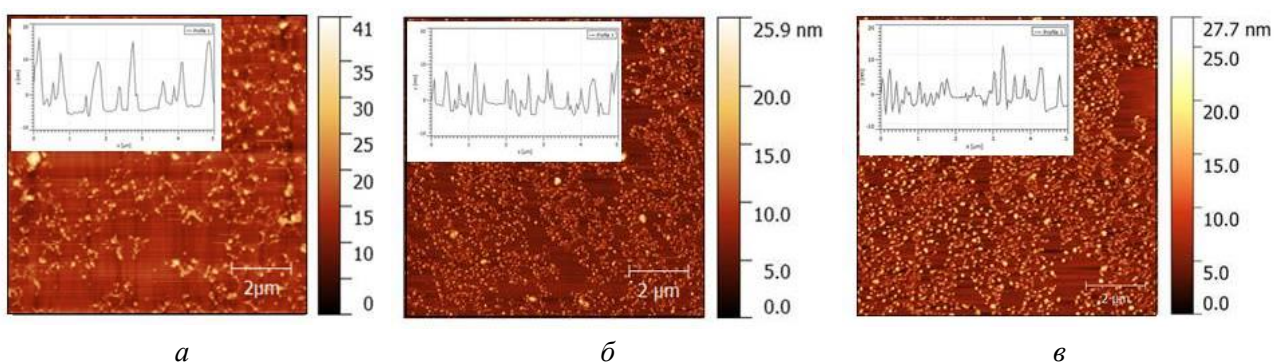


Рисунок 2. АСМ изображение ЛБ пленок, полученных из растворов КТ, прошедших фильтрацию в течение 0 ч – а, 48 ч – б, 96 ч – в

Такие условия приводят к образованию монослоя, состоящего из островов квантовых точек и участков из молекул жирных кислот. Чрезмерное количество олеиновой кислоты, присутствующей в растворе, вызывает неравномерное распределение поверхностного давления. Из-за неравномерного распределения поверхностного давления формируется мультислойная пленка.

Значение средней толщины пленки и шероховатости показано в таблице 1. Уменьшение избыточного количества стабилизатора приводит к увеличению шероховатости

(RMS) и уменьшению толщины пленки КТ.

Таблица 1. Средняя толщина и шероховатость пленки в зависимости от времени очистки КТ

Время, ч	Шероховатость (RMS), нм	Средняя толщина, нм
0	2,2	12
48	2,3	11
96	2,8	9,0

Были проведены исследования зависимости изменения механических характеристик монослоев КТ от избытка поверхностно-активного вещества, рассчитаны модуль сжатия (χ) и сжимаемость монослоев (K) описываемые уравнениями:

$$\chi = \frac{1}{K}, \quad K = -\frac{1}{A_0} \left(\frac{dA}{d\pi} \right), \quad (1)$$

где dA – изменение в области монослоя, $d\pi$ – изменение значения поверхностного давления, A_0 – площадь, занимаемая монослоем в плотноупакованном состоянии. Результаты демонстрируют, что после проведения процесса отделения избытка стабилизатора величина χ уменьшилась на 9 и 12 % после времени сепарации 96 и 192 ч, т.е. жесткость увеличилась (таблица 2). Значение модуля сжатия плёнки монослоя КТ соответствовало жидкой фазе.

Таблица 2. Изменения параметров слоев КТ в зависимости от времени очистки

Время, ч	CP, мН/м	A_0 , см ²	K , м/мН	χ , мН/м
0	28-35	226	0,0109	91,74
96	26-34	175	0,0120	83,33
192	24,7-32,5	148	0,0124	80,96

После переноса КТ на кремниевую подложку было измерено значение контактного угла для капли воды на ней. Гидрофобные свойства тонких пленок КТ возрастают (от 87.6 до 93.6 град) с уменьшением избытка стабилизатора.

Также были проведены исследования зависимости поверхностного потенциала и эффективного дипольного момента от количества избыточного поверхностно-активного вещества в растворе КТ. Показано, что после его удаления увеличение поверхностного потенциала (от 0,304 до 0,390 В) составляло около 28 %, при этом дипольный момент уменьшался (от 3,97 до 2,85) примерно на 39 % (точность контроля $\pm 0,001$ В), это связано с изменением площади, занимаемой монослоем КТ на подложке.

Глава 3 посвящена исследованию методом изотерм сжатия особенностей формирования ленгмюровских монослоев квантовых точек в смеси с жидким кристаллом 4'-октил-4-цианобифенилом (8СВ) в зависимости от соотношения компонент раствора и температуры водной субфазы. При повышении температуры субфазы для монослоя чистого жидкого кристалла характерно следующее: происходит смещение изотерм в сторону больших удельных площадей, а переход из монослойного к мультислойному состоянию становится плавным (не происходит скачкообразный фазовый переход), при этом наблюдается плавное уплотнение монослоя с сохранением его структуры.

Из растворов КТ в хлороформе с концентрацией 5×10^{-6} М и жидкого кристалла в хлороформе с концентрацией 10^{-3} М были приготовлены их смеси с объемным соотношением компонентов 1:1, 1:2, 2:1, 1:4 и 4:1, монослои из которых формировались при температурах 21, 33 и 41 °С.

Практически полное исчезновение характерной точки (в районе значения площади монослоя 125 см² для монослоя КТ:8СВ 1:2 и 1:1, 100 см² для 2:1, 75 см² для 4:1) смены фазовых состояний наблюдается при увеличении объемной доли КТ в растворе и при повышении температуры до 41 °С (рисунок 3). При соотношении КТ:8СВ 4:1 или 2:1, и повышении температуры наблюдается формирование пленки без явно определяемого перехода к трехслойной структуре (рисунок 4).

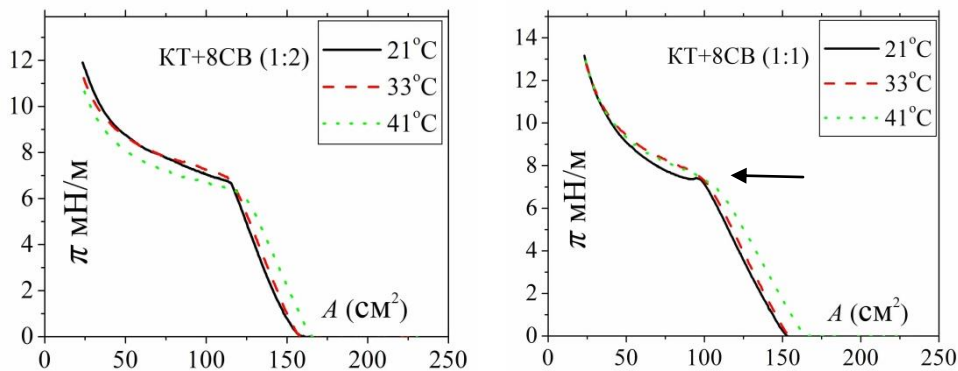


Рисунок 3. Трансформация фазовых состояний для монослоя смеси КТ:8СВ при изменении соотношений и температуры: смещение характерной точки фазового перехода

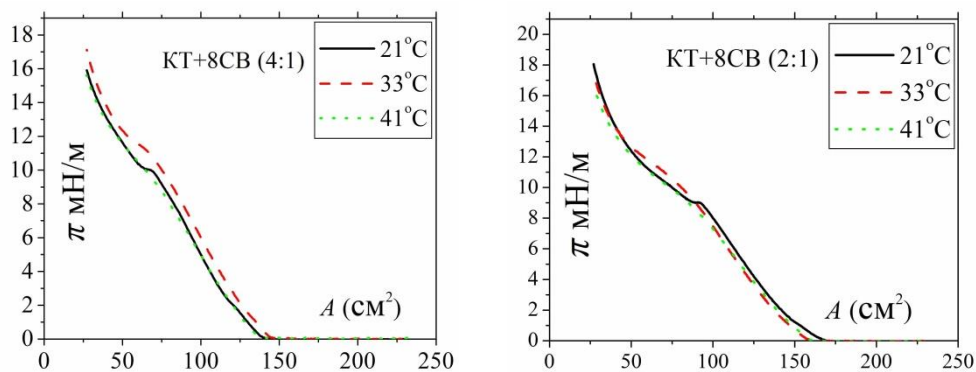


Рисунок 4. Трансформация фазовых состояний для монослоя смеси КТ:8СВ при изменении соотношений и температуры: исчезновение характерной точки фазового перехода

Таким образом, получена монослойная структура системы КТ:8СВ на поверхности воды. На основе анализа изотерм сжатия монослоев были выбраны два соотношения КТ и 8СВ 4:1 и 2:1, для которых удалось избавиться от точки фазового перехода. В дальнейшем исследовали только эти соотношения, так как целью было получение монослойной структуры КТ:8СВ. Для соотношений 4:1 и 2:1 далее исследовалась морфология поверхности пленок на твердых подложках.

При исследовании пленок на твердых подложках было установлено, что пленки покрывают поверхность подложки практически без разрывов, и их толщина соответствует

геометрическим размерам квантовых точек, использованных для формирования монослоя [7, 14]. Увеличение средней толщины и уменьшение шероховатости связано с тем, что при высоком значении поверхностного давления увеличивается количество квантовых точек вследствие наползания частиц друг на друга (таблица 3, рисунок 5).

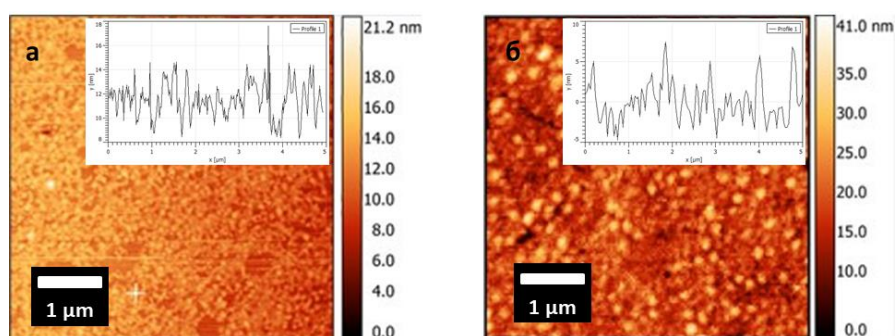


Рисунок 5. АСМ изображения пленок состава КТ:8СВ в соотношении 2:1 (а) и 4:1 (б)

Таблица 3. Шероховатость (RMS) и средняя толщина тонкой пленки КТ:8СВ при соотношении (2:1) и (4:1)

КТ:8СВ	Шероховатость (RMS), нм	Средняя толщина, нм
2:1	1,5	8
4:1	3,1	12

Взаимодействия между молекулами в монослоях смесей оценивались количественно с помощью расчета избыточной площади (A_E). A_E может быть рассчитана количественно путем анализа π -А изотерм отдельных компонентов и их бинарных смесей:

$$A_E = A_{12} - (X_1 A_1 + X_2 A_2), \quad (2)$$

где A_1 и A_2 – средние молекулярные площади компонентов КТ и 8СВ соответственно, A_{12} – средняя молекулярная площадь монослоя смеси, а X_1 и X_2 – мольные доли компонентов смеси.

Отрицательное значение A_E указывает на взаимодействие с притяжением между этими двумя компонентами. Положительное значение A_E предполагает, что взаимодействия между этими двумя компонентами являются отталкивающими. Максимальное значение A_E наблюдалось для соотношения 1:4 при 21 °С, а минимальное – для соотношения 4:1 при 41 °С (рисунок 6).

На рисунке 7 показана зависимость модуля сжатия от температуры и соотношения компонент в слоях, который рассчитывался в соответствии с уравнениями (1) и (2). Максимальное значение модуля сжатия для монослоев КТ:8СВ, которое составляло 56,1 и 58,3 мН/м при 21 и 33 °С (соотношение 1:4), изменилось до 41,6 мН/м при 41 °С и соотношении 1:2. Значение модуля сжатия 41,6 мН/м соответствует жидко-расширенному состоянию пленок (которое в соответствии с литературными данными находится в пределах от 12,5 до 50 мН/м). А значения 56,1 и 58,3 мН/м являются промежуточными между значениями для жидко-расширенной и жидко-конденсированной фаз. Большие величины модуля сжатия соответствуют меньшей эластичности монослоя.

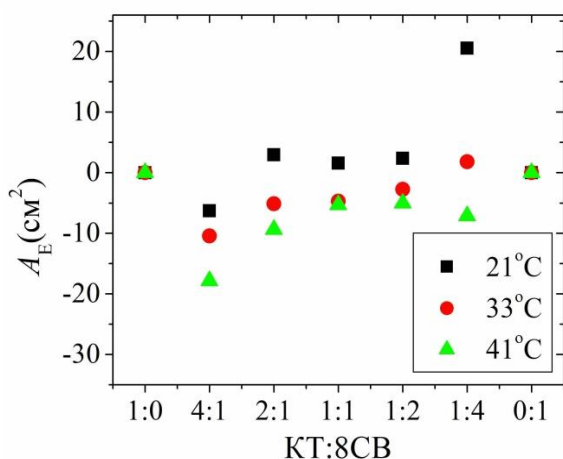


Рисунок 6. Избыточной площади (A_E) для монослоев смеси КТ:8СВ как функция соотношения компонент в зависимости от температуры

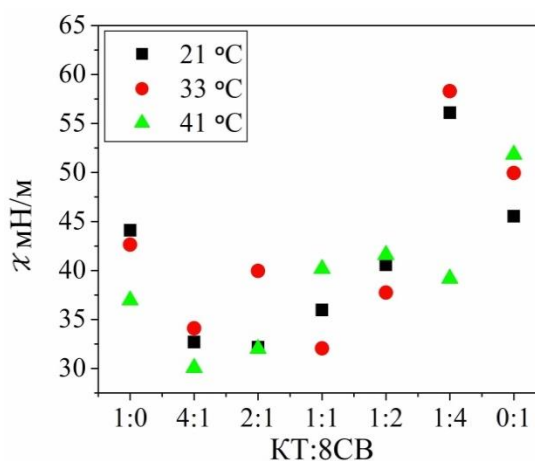


Рисунок 7. Модуль сжатия χ ленгмюровских монослоев при различной температуре

Спектры флуоресценции для растворов КТ демонстрировали сдвиг пика флуоресценции в длинноволновую область (с 618 на 621 нм) после замены олеиновой кислоты на стабилизатор 8СВ.

Показано, что 8СВ оказывают влияние на изменение поверхностного давления (π) и занимаемую монослоем КТ:8СВ площадь (рисунок 8, кривые 3 и 4), причем с увеличением концентрации 8СВ изотермы пропорционально смещаются в сторону большей площади (рисунок 8). Изотермические площади (кривые 2, 3 и 4) перед областью коллапса (участок II) указывают на образование однородного монослойного твердоконденсированного состояния. Форма изотерм (кривые 3 и 4) монослоя КТ:8СВ показывает, что поверхностное давление монотонно возрастает вместо создания области плато и не демонстрирует второго коллапса, аналогичного чистому 8СВ (область IV).

Смесь КТ_8СВ была приготовлена в различных соотношениях (1:1 и 1:2), после чего помещена в ультразвуковую ванну (35 kHz при мощности $0,64 \text{ Вт/см}^2$) при температуре 45°C в течение 4 ч для получения коллоидного раствора КТ в 8СВ фазе в хлороформе. После этого часть смеси охлаждалась до комнатной температуры естественным путём, другая – помещалась в морозильную камеру с температурой -18°C . Тонкие пленки КТ (с олеиновой кислотой) и КТ:8СВ (1:1 и 1:2) переносили на стеклянные подложки при поверхностном давлении 22, 6,9 и 6,9 мН/м соответственно. АСМ-изображения (рисунок 9, таблица 5) показывают различия в размерах агрегатов КТ в мнослоях КТ:8СВ, по сравнению с монослоями КТ, стабилизированными олеиновой кислотой. После охлаждения раствора КТ:8СВ до -18°C (рисунок 9, в, з) монослои показали неоднородность и кластеризацию квантовых точек до микроразмеров.

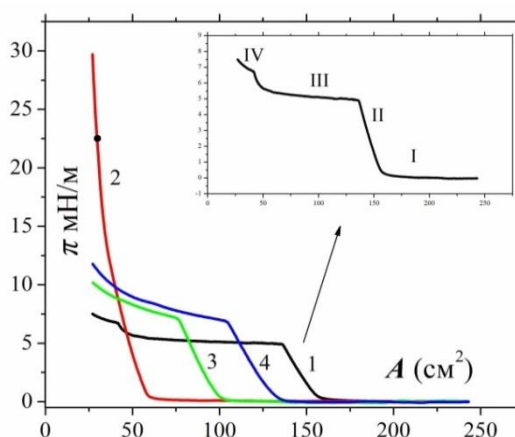


Рисунок 8. – Изотермы сжатия монослоев 8СВ (1), КТ (2), КТ_8СВ 1:1 (3) и КТ:8СВ 1:2 (4) (только для образцов, охлажденных до комнатной температуры естественным путем)

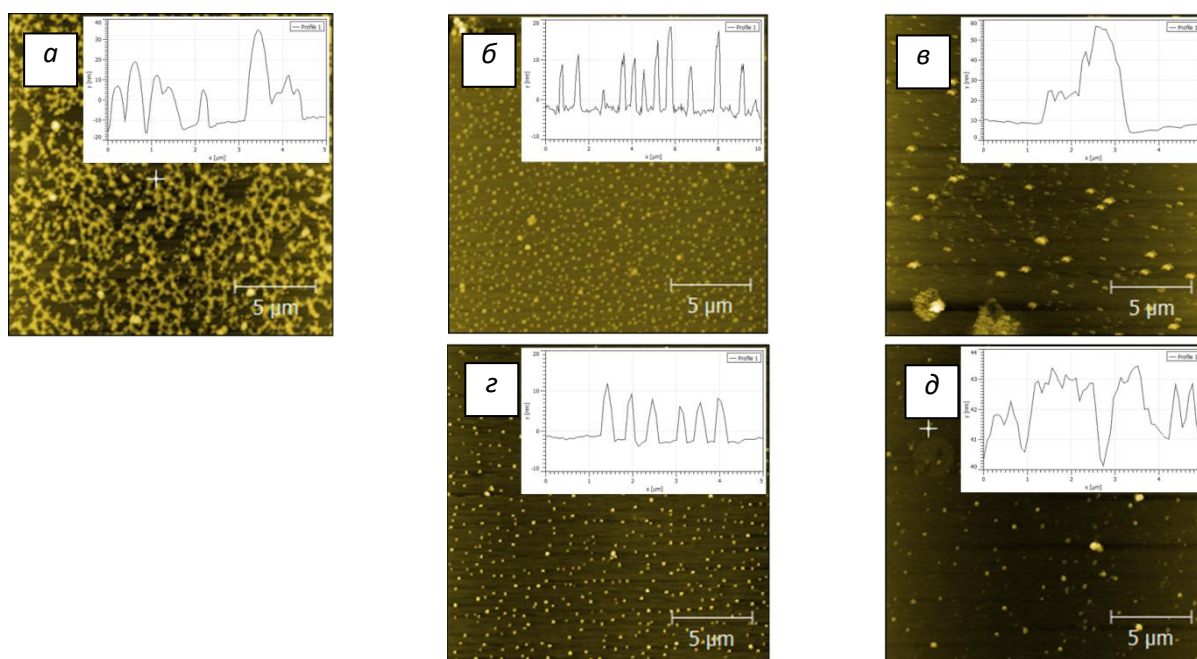


Рисунок 9. АСМ изображения монослоев КТ с олеиновой кислотой (а), КТ_8СВ 1:1, охлажденный при 25 °С (б), КТ:8СВ 1:1 охлажденный при -18 °С 18 минут (в); КТ_8СВ 1:2, охлажденный при 25 °С (г) и КТ:8СВ 1:2, охлажденный при -18 °С 18 минут (д)

Таблица 5. Средняя толщина и шероховатость пленки КТ:8СВ (для образцов, охлажденных при комнатной температуре)

Пропорция смеси	шероховатость (RMS), нм	Средняя толщина, нм
КТ_8СВ (1:1)	6,0	12
КТ_8СВ (1:2)	4,0	9,4

Это объясняется тем, что жидкие кристаллы проявляют разные термодинамические фазы между изотропной и твердой кристаллической фазой в зависимости от температуры. При нагревании до 45 °С 8СВ будет переходить в изотропную фазу, что будет увеличивать дисперсию частиц в растворе. Охлаждение системы после такого нагрева будет контролировать процесс самосборки в растворе квантовых точек. При увеличении скорости охлаждения сборка квантовых точек происходит путем фазового перехода изотропного состояния 8СВ в нематическое. Во время этого процесса квантовые точки, как правило, остаются в изотропной фазе. В этот момент диспергированные в материале наночастицы будут реагировать на локальное упорядочивание и, как было показано, предпочтительно расположатся в уменьшающихся изотропных доменах в результате чего происходит упругая деформация и изменяется плотность свободной энергии материала в целом. Чтобы уменьшить эту деформацию, частицы вынуждены группироваться или локализоваться в областях с низким молекулярным порядком, например, в центре топологических дефектов (в изотропной фазе 8СВ). Эти эффекты играют ключевую роль в механизме формирования агломератов квантовых точек сферической формы. Сочетание увеличения концентрации квантовых точек и воздействия на систему охлаждением в процессе ее подготовки приводит к образованию микроструктуры [1, 2, 13]. Для растворов КТ_8СВ, охлажденных до -18 °С, наблюдалось уменьшение занимаемой монослоем площади на 6 и 8 % и поверхностного потенциала на 6,7 и 3,7 % для соотношений 1:1 и 1:2, соответственно.

В главе 4 рассмотрено влияние избыточного количества стабилизатора на электрические свойства монослоев КТ CdSe/CdS/ZnS, обсуждаются основные механизмы переноса заряда через структуру с учетом ограничений величины тока по механизму Пула-Френкеля.

Было продемонстрировано, что после очистки раствора квантовых точек максимальное значение тока, протекающего через пленку, увеличивается в 2 раза. Это увеличение можно объяснить уменьшением количества молекул стабилизатора в процессе очистки, что привело к увеличению поверхностной концентрации квантовых точек в плотноупакованной лентгюровской пленке, а также электронных состояний в квантовых точках. Наличие избытка олеиновой кислоты увеличивает расстояние между отдельными КТ и уменьшает проводимость.

С помощью зондовой станции и характериографа Agilent B1500A была измерена емкость структур. Емкость была измерена как функция напряжения и частоты при наличии и отсутствии тонкой пленки КТ_ОА. Для измерения емкостных параметров создавались структуры типа «металл-диэлектрик-металл» – Al/КТ_ОА/ITO, где КТ_ОА – многослойная ЛБ-пленка КТ в олеиновой кислоте с общей толщиной около 300 нм. Схематичное строение таких структур показано на рисунке 10. Алюминиевые электроды (Al) наносились магнетронным распылением в вакууме. Площадь электрода составляла $1,6 \times 1,6 \text{ мм}^2$. Все измерения проводились в течение двух дней с момента получения структур.

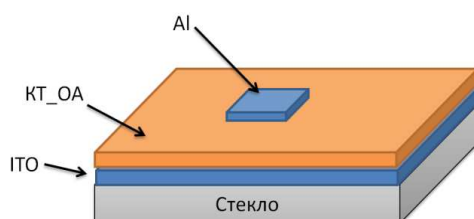


Рисунок 10. Схема структуры для измерения ВАХ

Для полученных структур измерялось несколько зависимостей емкости (C) от частоты (f) при подаче на них напряжения 0 В. Из них выбирались подобные, для структур с минимальными токами утечки.

Измерения зависимости емкости от напряжения (V) проводились при частоте тестирующего сигнала 1 кГц. Напряжения изменялись от -10 до +10 В. Стоит отметить, что вблизи нулевых значений напряжения кривая имела симметричный вид. В этой области значение емкости $C \sim 0,4 \text{ нФ}$ (рисунок 11). Расчет диэлектрической проницаемости проводили по формуле плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d}, \quad (3)$$

где C – емкость, обусловленная наличием диэлектрического материала, d и A толщина и площадь сечения пленки КТ_ОА. По результатам измерений и расчетов было найдено значение диэлектрической константы для монослоя КТ, $\epsilon = 8,4$.

Вольт-амперные характеристики для структур Al/КТ_ОА/ITO измерялись в диапазоне напряжений $\pm 2 \text{ В}$ при комнатной температуре. Токи для исследованных структур не превышали 15 нА при максимальных значениях напряжений (рисунок 11, б).

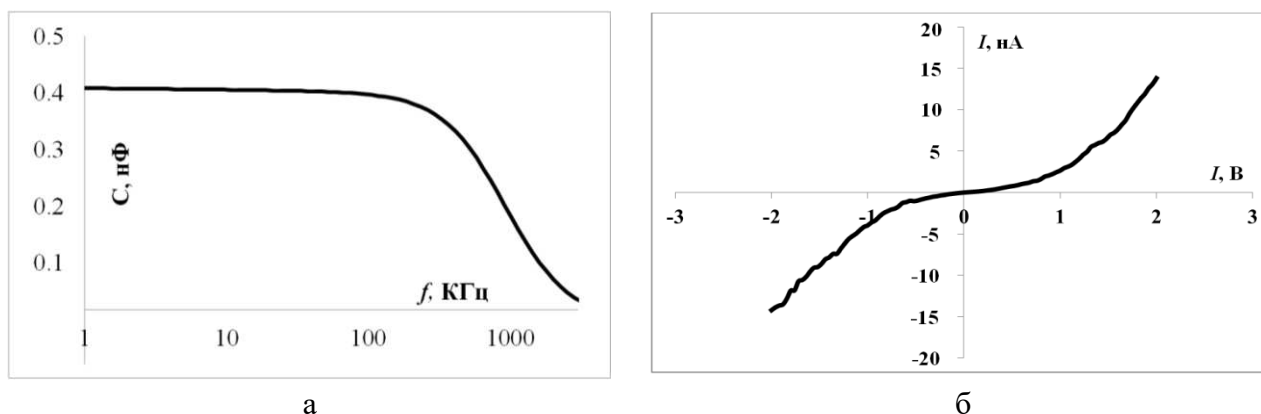


Рисунок 11. Типичная зависимость емкости от частоты (а) и вольт-амперная характеристика (б) для структур Al/KT_OA/ITO

Вольт-амперные характеристики структур с тонкими пленками KT_OA перестраивались в различных координатах для определения механизма токопереноса через диэлектрический слой. Наиболее точно экспериментальные данные описывались механизмом Пула-Френкеля (ПФ).

Параметры зонной структуры Al/KT_OA/ITO определялись согласно методу подбора параметров по экспериментальным характеристикам. Для описания параметров механизма переноса заряда в тонкой пленке KT_OA (Пула-Френкеля), данные, полученные при измерении вольт-амперных характеристик, согласуются с уравнением (4):

$$I = e\mu n'_0 V/d \exp\left(\frac{\beta V^{1/2}}{rkTd^{1/2}}\right); n'_0 = N_c \left(\frac{N_d}{N_t}\right)^{1/r} \exp\left(-\frac{Ed_0}{rkT}\right); r = 1 + \frac{kT}{E_0}; \beta = \left(\frac{e^2}{\pi e \epsilon_0}\right)^{1/2}, \quad (4)$$

e – заряд электрона, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость тонкой пленки, d_0 – толщина пленки, μ – подвижность, N_t – концентрация ловушек, E_0 – их характерное распределение энергии и N_c – эффективная плотность электронных состояний.

Механизм Пула-Френкеля является доминирующим при напряжениях от 0,2 до 2 В (ВАХ спрямляется в соответствующих координатах), что подтверждает адекватность этой модели (рисунок 12).

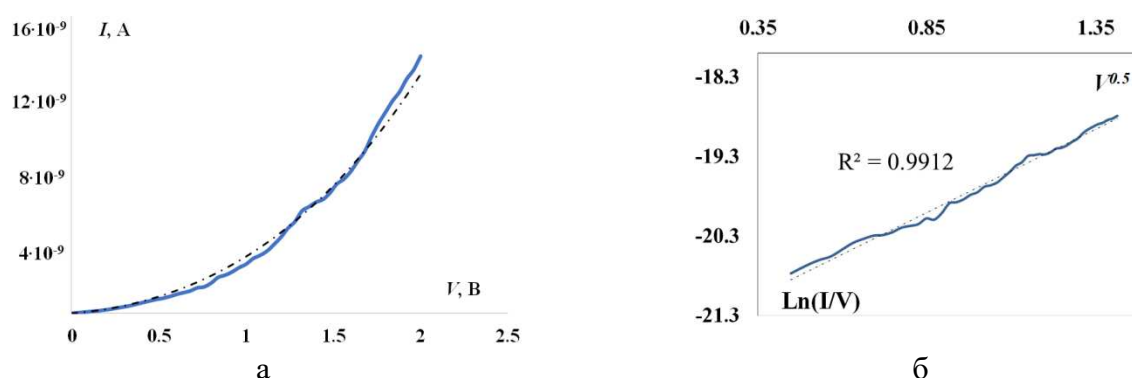


Рисунок 12. – Экспериментальная ВАХ (сплошная линия) и теоретическая кривая (штрихпунктирная линия), рассчитанная согласно механизму Пула-Френкеля (а) и ВАХ в координатах Пула-Френкеля (б)

Используя найденное ранее значение диэлектрической проницаемости для тонкой пленки KT $\epsilon = 8,4$ для расчета параметров тонкой пленки согласно уравнению (4) были

найлены значение уровня доноров $E_{d0} = 1,5$ эВ, концентрации доноров $N_d = 1,17 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а также значение уровня ловушек $E_0 = 0,055$ эВ и концентрация ловушек $N_t = 8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Величина параметра r , определённого методом подбора, составляла $r = 1,41$, что указывает на непрерывное распределение уровней ловушек в запрещенной зоне пленки КТ_ОА (аномальный эффект Пула-Френкеля).

Высота пика спектра флуоресценции после отделения стабилизатора в 4,5 раза больше, чем до отделения (рисунок 13). Небольшой гипсохромный сдвиг максимума спектра

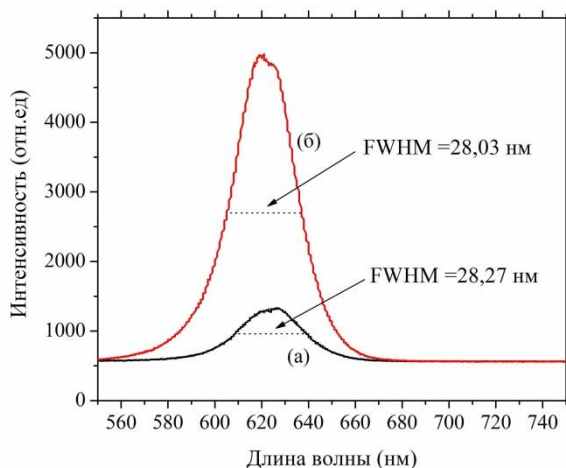


Рисунок 13. Изменения в спектрах флуоресценции слоев до (а) после (б) отделения избыточного стабилизатора

излучения КТ (изменение ширины пика, FWHM) после разделения можно объяснить воздействием нагрева, влияющего на внешнюю оболочку КТ, приводящую к изменению состояния поверхности квантовых точек [3, 5].

Оптические свойства значительно зависят от последующей термической обработки. Образцы, содержащие тонкие пленки КТ CdSe/CdSe/ZnS на поверхности монокристаллического кремния, выдерживали при температурах 35 и 45 °С в течение 5 минут, после чего снимали спектры люминесценции в 15 точках. Изменение интенсивности максимума люминесценции

спектра исследованных тонких пленок показано на рисунке 14, б. Интенсивность пика люминесценции уменьшалась на 54, 18 и 11 % для пленок КТ, КТ+8СВ-монослой и КТ+8СВ-двойной слой при температуре 45 °С. Уменьшение интенсивности пиков люминесценции можно объяснить увеличением вероятности безызлучательных процессов, таких как Ферстеровский перенос энергии между КТ и подложкой, или потери энергии через тепловое рассеяние. После температурной обработки вместе с уменьшением интенсивности также наблюдается небольшой сдвиг пика люминесценции в длинноволновую область. Величина такого сдвига так же зависит от температуры обработки (рисунок 14, а).

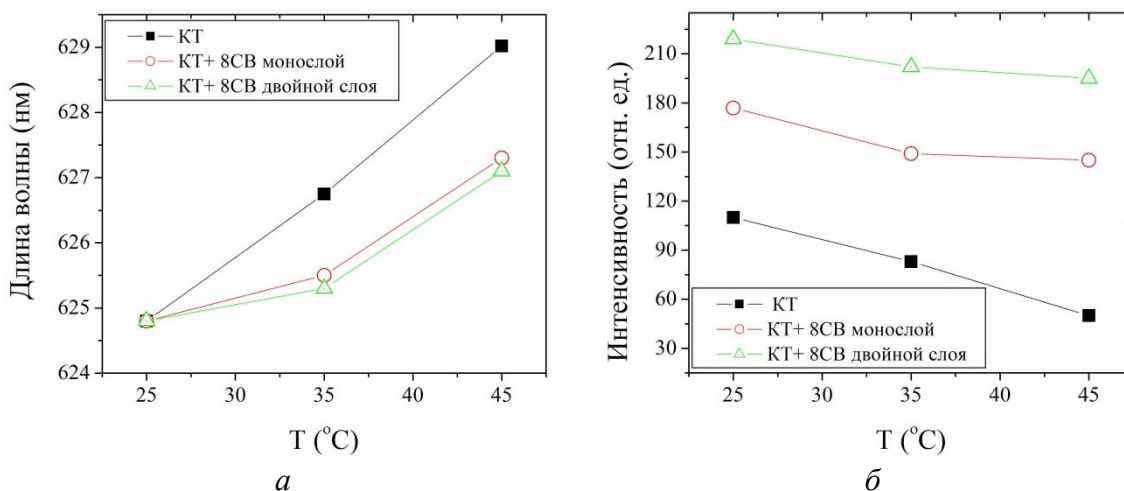


Рисунок 14. Изменение положения пика люминесценции (а) и интенсивность эмиссионного максимума (б) тонких пленок в зависимости от температуры обработки

С помощью метода СТМ были исследованы ленточные монослои КТ CdSe/CdS/ZnS, стабилизированные молекулами 3-*n*-октилфосфин оксида (ТОПО), на чистой кремниевой подложке и подложке, предварительно покрытой разделительным слоем. Они также исследовались методом вольт-амперных характеристик в диапазоне напряжений от -1 до $+1$ В. Было обнаружено, что после нанесения разделительного слоя – моно- и трехслойной пленки 8СВ, значение тока уменьшалось на 32 и на 65%, соответственно.

Спектры люминесценции были получены при различном времени облучения пленки. Облучение производилось лазером с длиной волны 473 нм в импульсном режиме, и оптической мощностью 10 мВт. Диаметр лазерного пятна составлял около 300 нм, время экспозиции – 1 с. Заметно, что с увеличением продолжительности воздействия лазерного излучения на пленку величина максимальной интенсивности люминесценции уменьшается (рисунок 15) [1]. Можно видеть, что в процессе облучения пик люминесценции ($\sim 528,9$ нм) гипсохромно сдвигается в синюю область. Это смещение составляет 6,7, 5,6 и 4,3 нм, и ее интенсивность уменьшается на 85,9, 62,7 и 50% для структур (КТ), (КТ + 8СВ монослой) и (КТ + 8СВ трехслойная пленка), соответственно (рисунок 16) [12, 15].

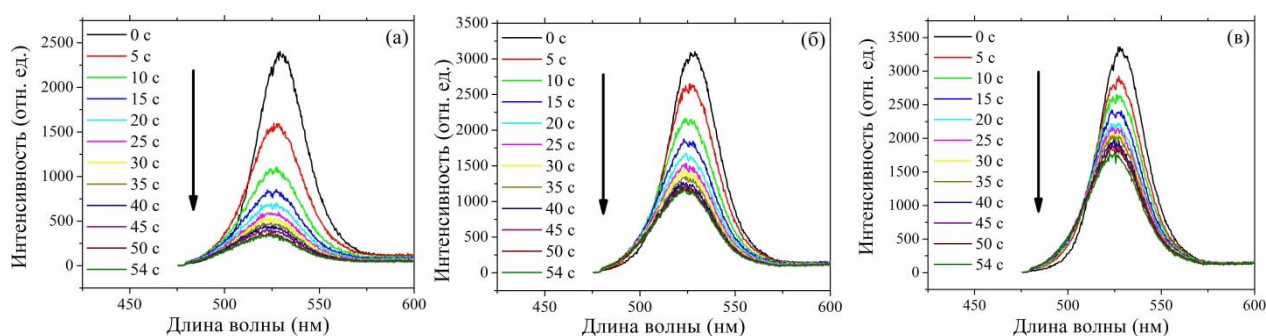


Рисунок 15. Спектры излучения КТ при различной экспозиции (время на кривых указано в секундах): без слоя 8СВ (а), КТ+8СВ монослой (б), и КТ+8СВ трехслойная пленка (в)

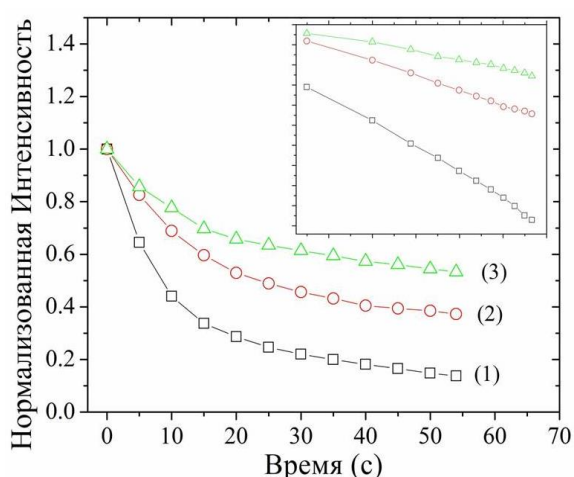


Рисунок 16. Изменение интенсивности максимума эмиссии в зависимости от времени облучения пленки КТ (1), КТ+8СВ монослой (2) и КТ+8СВ трехслойная пленка (3). На вставке показаны измерения в логарифмическом масштабе

Кривая может быть условно разделена на две составляющих спада интенсивности люминесценции – «быструю» и «медленную». Эти отдельные параметры могут быть оценены с помощью уравнения с двумя экспоненциальными слагаемыми:

Таблица 6. Скорость спада (β) и время жизни (T) для пленок КТ (1), КТ+8СВ монослой (2) и КТ+8СВ трехслойная пленка (3)

	T_1	T_2	β_1	β_2
1	6,9	56,3	0,1449	0,01776
2	13,5	73,7	0,07407	0,01356
3	9,8	198,3	0,10204	0,00504

$$I(t) = A_1 \exp\left(-t/T_1\right) + A_2 \exp\left(-t/T_2\right), \quad (5)$$

где $I(t)$ интенсивность люминесценции, A_1 и $A_2 =$ константы (амплитуды), T_1 и T_2 константы, представляющие время жизни в быстром и медленном процессе, t – время экспозиции лазером (секунды). Оценка компонентов T_1 и T_2 методом подбора позволила оценить скорость спада ($\beta = 1/T$) для быстрого и медленного процесса (таблица 6).

Также следует заметить, что при непрерывном облучении ширина пика на полувысоте ($\Delta\lambda_{FWHM}$) люминесценции уменьшается с увеличением расстояния между подложкой и пленкой, что свидетельствует об изменении распределения по размерам КТ (таблица 7).

Наблюдаемое синее смещение излучения обусловлено окислением КТ на воздухе (рисунок 17). КТ при непрерывном облучении склонны образовывать оксидный слой, что приводит к уменьшению люминесценции и уменьшению их размера.

Ввиду этого, наиболее вероятно, что наблюдаемые изменения оптических характеристик вызваны образованием дефектов решетки, и изменением структуры в КТ. Создание зазора (с помощью слоев 8СВ) между пленкой КТ и подложкой позволило значительно увеличить интенсивность люминесценции.

Ширина оптической запрещенной зоны КТ CdSe/CdS/ZnS была оценена по спектрам поглощения с использованием соотношений Тауца, как показано в уравнении:

$$(\sigma h\nu)^2 = A(h\nu - E_g), \quad (6)$$

где σ – коэффициент поглощения, $h\nu$ – энергия фотона, A – константа. Из зависимостей $(\sigma h\nu)^2$ от $(h\nu)$ было найдено $E_g = 2,65$ и $2,54$ эВ для КТ_ОА и КТ_8СВ, соответственно [11].

В главе 5 исследование равновесной конфигурации молекул проводилось методом (теории функционала плотности, DFT) с функциональностью B3LYP и базой SBKJС, реализованной в Gamess Firefly v.8.2.0. Геометрически оптимизированные кластеры CdSe в комплексах с покрывающими молекулами (ОА или 8СВ) демонстрируют качественно незначительные различия, по отношению к таким же кластерам без добавления стабилизатора [1].

Результаты исследований демонстрируют, что пассивация поверхности КТ стабилизатором может заметно влиять на поверхностные состояния в них, приводя к небольшим изменениям значений энергетической щели между НОМО и LUMO КТ, пассивированных различными типами стабилизаторов.

Как можно видеть из анализа состояний орбиталей, наибольшая электронная плотность

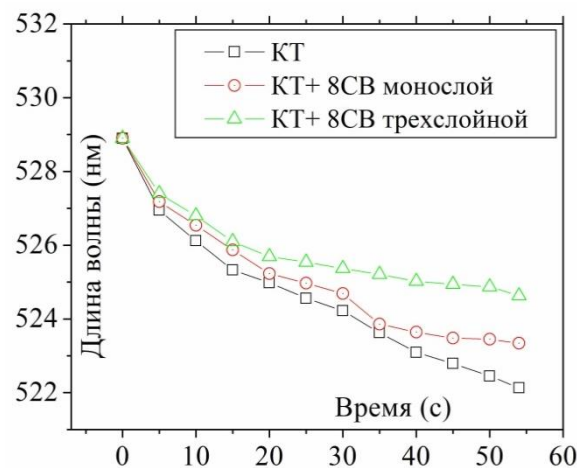


Рисунок 17. Усредненное положение пика люминесценции в зависимости от времени облучения

Таблица 7. Ширина пика на полувысоте ($\Delta\lambda_{FWHM}$) для пленок различного состава (после облучения в течение 54 секунд)

Пропорция смеси	$\Delta\lambda_{FWHM}$, нм
КТ	7,3
КТ + 8СВ монослой	3,8
КТ + 8СВ трехслойной	2,7

НОМО кластера $(\text{CdSe})_{13}$ без стабилизатора локализована на поверхностных атомах Se, а LUMO на поверхностных атомах Cd. Поскольку электронные взаимодействия между стабилизатором и КТ можно рассматривать как донорно-акцепторные, атомы Cd способны принимать электроны из разделенных пар функциональных групп молекул стабилизатора в их LUMO. Индуцированная наличием заряда реорганизация плотности изменяет локализацию пограничных орбиталей, таких как LUMO $(\text{CdSe})_{13}$, расположенного вдоль связи Se-Se, что приводит к ее делокализации на поверхностных атомах Cd в нейтральной системе.

Следует заметить, что для случая рассмотрения заряженного кластера $(\text{CdSe})_{13}$, покрытого молекулами стабилизатора ОА, НОМО и LUMO такие же, как для кластера без стабилизатора, однако, с меньшей амплитудой. Это связано с эффективным перераспределением зарядов в ядре структуры и внутри молекулы стабилизатора с сохранением электронных состояний самого кластера.

Однако плотности LUMO кластера $(\text{CdSe})_{13}$ локализованы на поверхности полярной группы молекулы 8CB, в случае, когда она используется в качестве стабилизатора.

1. Для кластера $(\text{CdSe})_{13}$ без стабилизатора НОМО, НОМО-1 и НОМО-2 возникают в основном из 1p и 2p орбиталей атомов Se, а LUMO, LUMO+1 и LUMO+2 в основном состоят из 3s и 2s орбиталей атомов Cd.

2. Для кластера $(\text{CdSe})_{13_OA}$ НОМО, НОМО-1 и НОМО-2 возникают в основном из 1p и 2p орбиталей атомов Se, а LUMO, LUMO+1 и LUMO+2 в основном состоят из 2s и 3s, Se 2s 1p и 2p орбиталей атомов Cd.

3. Для кластеров $(\text{CdSe})_{13_8CB}$ НОМО, НОМО-1 и НОМО-2 возникают в основном из 1p и 2p орбиталей атомов Se, а LUMO, LUMO+1 и LUMO+2 в основном состоят из (1p и 2p атомов C), (3s 1p и 2s атомов Cd) и (3s атомов Cd, 2s атомов Se) орбиталей, соответственно.

Энергия связи для кластера $(\text{CdSe})_{13}$ (две координатные связи) с олеиновой кислотой и с жидким кристаллом составляет 0,03 и 0,02 а.е., соответственно. Результаты моделирования демонстрируют, что КТ CdSe образуют с олеиновой кислотой несколько более прочную связь, чем с молекулами жидкого кристалла. Атомная структура демонстрирует большую энергетическая щель 2,12, 3,05, 3,11, 3,15, 4,53 и 5,85 эВ для кластеров $(\text{CdSe})_{13_8CB}$ (3 координатные связи), $(\text{CdSe})_{13_8CB}$ (2 координатные связи), $(\text{CdSe})_{13}$, $(\text{CdSe})_{13_OA}$ (2 координатные связи), 8CB и ОА соответственно. Энергетическая щель кластера несколько увеличивается при добавлении олеиновой кислоты (примерно на 0,04 эВ) и уменьшается на 0,06 эВ при добавлении 8CB.

Использованная полуэмпирическая параметризованная модель (NDDO PM3) позволяет резко сократить время вычислений, и может быть использована для получения оптимизированных структур больших систем. Энергия зазора не покрытых кластеров CdSe, ОА и 8CB составляет 4,06, 8,85 и 8,33 эВ, соответственно. Однако энергетическая щель пассивированного CdSe уменьшилась за счет влияния органических и позиционных 8CB. Энергетическая щель CdSe снизилась с 4,06 до 3,68 эВ при добавлении ОА. А при добавлении 8CB с большим дипольным моментом энергия CdSe изменилась до 3,56 эВ (при расположении полярной части молекулы 8CB вблизи кластера). После этого энергетическая щель CdSe стала равной 4,01 эВ, при этом направление полярной части было изменено (от кластера). Когда CdSe находится посередине относительно 8CB, энергия зазора составляет 3,76 эВ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследовано формирование монослоев Ленгмюра квантовых точек CdSe/CdS/ZnS, стабилизированных олеиновой кислотой. Установлено, что присутствие избыточного количества стабилизатора приводит к агрегации квантовых точек на поверхности водной субфазы и увеличению межчастичного расстояния. Контроль количества избытка стабилизатора позволил добиться изменений в структуре монослоев и уменьшить относительную занимаемую КТ площадь на 35,5 %. Значение поверхностного потенциала изменилось примерно на 28 %, а эффективный дипольный момент уменьшился на 39 %. Модуль сжатия χ изменился на 12 %, а структура пленки на твердой подложке стала более однородной, толщина пленок уменьшилась, а шероховатость возросла.
2. Природа жидкого кристалла (связанные с ней температурные переходы) 8CB и его количество в растворе влияет на свойства слоя Ленгмюра: увеличение температуры субфазы и снижение концентрации жидкого кристалла позволяют получить однородные тонкие пленки. Установлено, что величина избыточной площади A_E для монослоя смеси КТ:8CB экспоненциально уменьшается с увеличением концентрации жидкого кристалла 8CB. В этом случае притяжение между молекулами слоя является более интенсивным. Максимальное значение модуля сжатия монослоев КТ:8CB наблюдалось при 21 и 33 °C для соотношения 1:4. Модуль сжатия растет экспоненциально (жесткость монослоя уменьшается) с увеличением концентрации жидкого кристалла.
3. Показано, что изотропно-нематический фазовый переход жидкого кристалла 8CB, покрывающего квантовые точки, можно использовать для формирования в тонкой плёнке кластеров квантовых точек с размерами в несколько микрометров. Под влиянием охлаждения системы до температуры -18 °C, значение относительной площади уменьшилось на 6 и 8 %, а поверхностный потенциал на 6,7 и 3,7 % относительно значений при комнатной температуре для смесей с соотношением компонент 1:1 и 1:2, соответственно.
4. Исследованы проводящие свойства, определены основные механизмы токопереноса в тонких пленках на твердой подложке (Пула-Френкеля) и диэлектрическая проницаемость пленки ($\epsilon = 8,4$ при частоте тестирующего сигнала 1 КГц).
5. Было показано, что свойства люминесценции на твердой подложке можно настраивать с помощью диэлектрической наноразмерной жидкокристаллической пленки (с толщиной порядка 6 нм), расположенной между пленкой КТ и подложкой. Можно видеть, что в процессе облучения пик люминесценции гипсохромно сдвигается в синюю область. Было показано, что синий сдвиг был обусловлен уменьшением пика люминесценции с 6,7 до 4,3 нм и увеличением интенсивности люминесценции на 35 %. Ширина пика на полувысоте [$\Delta\lambda_{FWHM}$] уменьшилась с 7,3 до 2,7 нм.
6. Методами молекулярного моделирования (DFT) показано, что энергетическая щель между НОМО и LUMO кластера (CdSe)₁₃ в контакте с молекулой олеиновой кислоты больше, чем при контакте с молекулой жидкого кристалла, что соответствует результатам, полученным в ходе физических экспериментов (экспериментальным данным вольт-амперных характеристик и спектрам люминесценции квантовых точек). Кроме того, методами NDDO PM3 показано, что энергетическая щель в кластере (CdSe)₁₃ изменяется в зависимости от ориентации молекулы жидкого кристалла относительно КТ: при развороте молекулы жидкого кристалла и приближении полярной группы к кластеру энергетическая щель между НОМО и LUMO уменьшается от 4,0 до минимального значения 3,5 эВ.

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах
В рецензируемых журналах, индексируемых ВАК, Scopus и Web of Science:**

1. Аль-Алвани, А.Ж.К. Исследование свойств полупроводниковых квантовых точек на диэлектрическом монослое Ленгмюра / А.Ж.К. Аль-Алвани, А.С. Чумаков, М.В. Гавриков, Д.Н. Браташов, М.В. Пожаров, А.С. Колесникова, Е.Г. Глуховской // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2019. – Т.9. – №1. – С.56-67.
2. Al-Alwani, A.J. Influence of capping ligands on the assembly of quantum-dots and their properties / A.J. Al-Alwani, O.A. Shinkarenko, A.S. Chumakov, M.V. Pozharov, N.N. Begletsova, Anna. S. Kolesnikova, V.P. Sevostyanova, E.G. Glukhovskoy // Materials Science and Technology. – 2019. – V.35. – P.1053-1060. doi:10.1080/02670836.2019.1612141.
3. Al-Alwani, A.J. Ligands exchange, studying the stability and optical properties of CdSe/CdS/ZnS quantum dots with liquid crystal / A.J. Al-Alwani, A.S. Chumakov, M.S. Albermani, O.A. Shinkarenko, N.N. Begletsova, A.M. Vostrikova, I.A. Gorbachev, S.B. Venig, E.G. Glukhovskoy // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – V.917. Art.ID 032026.
4. Аль-Алвани, А.Ж.К. Механизмы фотоотклика монослойной структуры на основе графена с квантовыми точками / А.Ж.К. Аль-Алвани, А. С. Чумаков, М. В. Пожаров, Е. Г. Глуховской // Квантовая электроника. – 2017. – Т.47. – №.10. – С.977-980.
5. Al-Alwani, A.J. Studying the influence of substrate conductivity on the optoelectronic properties of quantum dots Langmuir monolayer / A.J. Al-Alwani, A.S. Chumakov, N. N. Begletsova, O.A. Shinkarenko, A. V. Markin, I. A. Gorbachev, D. N. Bratashov, M. V. Gavrikov, S. B. Venig, E. G. Glukhovskoy // Mater. Res. Express. – 2018. – V.5. – Art.ID 045050.
6. Al-Alwani, A.J.K. Formation and optoelectronic properties of graphene sheets with CdSe/CdS/ZnS quantum dots monolayer formed by Langmuir-Schaefer hybrid method / A.J.K. Al-Alwani, A.S. Chumakov, O.A. Shinkarenko, I.A. Gorbachev, M.V. Pozharov, S Venig, E.G. Glukhovskoy // Applied Surface Science. – 2017. – V.424. – P.222-227.
7. Al-Alwani, A.J. Influence of thermal separation of oleic acid on the properties of quantum dots solutions and optoelectronic of their Langmuir monolayers / A.J. Al-Alwani, A. S. Chumakov I.A. Gorbachev, N. Kuznetsov, A.A. Kletsov, E.G. Glukhovskoy // BioNanoSci. – 2017. – V.7. – P.496-500.
8. Chumakov, A.S. Temperature and mixing ratio effects in the formation of CdSe/CdS/ZnS quantum dots with 4'-n-octyl-4-p-cyanobiphenyl thin films / A.S. Chumakov, A.J. Al-Alwani, I.A. Gorbachev, A.V. Ermakov, A.A. Kletsov, E.G. Glukhovskoy, A.V. Kazak, N.V. Usol'tseva, S.N. Shtykov // BioNanoSci. – 2017. – V.7. – P.666-671.
9. Al-Alwani, A.J. Studying of surfactant excess separation from non-aqueous quantum dots solution on its monolayer formation process / A.J. Al-Alwani, K. I. Kosolapova, A. S. Chumakov, V. O. Lukyanova, I. A. Gorbachev, A. V. Kazakm A. I. Smirnova, S. N. Shtykov, N. V. Usol'tseva, E. G. Glukhovskoy // BioNanoSci. – 2018. – V.8. – P.1081-1086.

10. Kosolapova, K. Purification non-aqueous solution of quantum dots CdSeCdS-ZnS from excess organic substance-stabilizer by use PEHD membrane / K. Kosolapova, A. Al-Alwani, I. Gorbachev, E. Glukhovskoy // J. Phys.: Conf. Ser. – 2015. – V.643. – Art.ID 012084.

Публикации в других изданиях:

11. Аль-Алвани, А.Ж. Влияние лигандов жидких кристаллов на оптические свойства и свойства монослоя квантовых точек CdSe / А.Ж. Аль-Алвани, А.С. О.А. Чумаков, Шинкаренко, Н.Н. Беглецова, С.Б. Вениг, Е.Г. Глуховской // Физикохимия – 2017: XII Конференция молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН. 5-7 декабря, 2017. Сборник тезисов докладов. – М.: ИФХЭ РАН, 2017. – 252с. : ил. ISBN 978-5-4465-1598-1. – С. 69-71.
12. Аль-Алвани, А.Ж.К. Исследование влияния типа подложки на оптические свойства монослоя квантовых точек CdSe / А.Ж.К. Аль-Алвани, А.С. Чумаков, О.А. Шинкаренко, Н.Н. Беглецова, И.А. Горбачев, Д.Н. Браташов, С.Б. Вениг, Е.Г. Глуховской // Микро - и нанотехнологии в электронике. Материалы X Международной научно-технической конференции — Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2018. – 478 с. ISBN 978-5-93-681-091-6. – С. 189 -190.
13. Al-Alwani, A.J.K. Studying the self-assembly of quantum dots Langmuir monolayer / A.J.K. Al-Alwani, A.S. Chumakov, N.N. Begletsova, O.A. Shinkarenko, S.B. Venig, E.G. Glukhovskoy // Saratov Fall Meeting 2018: VI Симпозиум: Оптика и Биофотоника и XXII; Международная школа для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофотонике 24-29 Сентября 2018, Саратов, Россия. – Интернет-ресурс: URL: <http://sfm.eventyry.org/report/3178>.
14. Chumakov, A.S. Formation of CdSe/CdS/ZnS quantum dots with 4'-n-octyl-4-пcyanobiphenyl Langmuir films at elevated temperatures / A.S. Chumakov, E.M. Soldatenko, A.J.K. Al-Alwani, I.A. Gorbachev, A.V. Ermakov, A.A. Kletsov, E.G. Glukhovskoy // 30th Conference of the European Colloid and Interface Society (ECIS-2016). 4-9 September 2016. Rome, Italy, Sapienza Università di Roma – Book of abstracts. / Volume editor L. Rovigatti, 564 p. – P.142.
15. Al-Alwani, A.J. Investigation the photoluminescence spectra of CdSe quantum dots Langmuir monolayer / A.J. Al-Alwani, A.S. Chumakov, I.A. Gorbachev, N.N. Begletsova, O.A. Shinkarenko, S.B. Venig, E.G. Glukhovskoy // Saint Petersburg OPEN 2018, 5th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. 2-5 April 2018. St. Petersburg, Russia – Book of abstracts. 621 p. – P. 523-524.
16. Al-Alwani, A. Влияние температуры на самосборку квантовых точек в растворе жидких кристаллов / А. AL-ALwani, A.S. Chumakov, O.A. Shinkarenko, N.N. Begletsova, M.M. Qassime, S.B. Venig, E.G. Glukhovskoy // Междунар. молодеж. конф. Физика.СПб/2018, 23-25 октября 2018, Санкт-Петербург, Россия (Int. conf. PhysicA.SPb/ 2018, 23-25.10.2018, Saint Petersburg, Russia): сб. тез. – СПб: ЛИТЕО, 2018. – 366 с.: ил. ISBN: 978-5-00071-172-9 – С. 72-73.

Подписано в печать 10.01.2020. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 7,3

Тираж 100. Заказ № 928.

Типография «Техно-Декор»,
Саратов, Московская, 160, тел.: 77-08-48

sar-print.ru