

НАНОМАТЕРИАЛЫ, НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 544.032.4

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭКСИТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ CuCl КВАНТОВЫХ ТОЧЕК, РАСПРЕДЕЛЕННЫХ В НЕОРГАНИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ

А.Н. Бабкина, П.С. Ширшнев

Научный руководитель – д.х.н., профессор В.А. Цехомский

Стекла с нанокристаллами CuCl обладают крутой границей поглощения в ближней УФ-области, обусловленной высокоинтенсивной полосой экситонного поглощения (вплоть до $150\text{--}200\text{ см}^{-1}$) в области длин волн $370\text{--}380\text{ нм}$. Из ранних работ [1, 2] известны стекла боросиликатной матрицы, содержащие кристаллическую фазу с хлоридом меди, привлекательные своими фотохромными свойствами. На данных стеклах были проведены температурные исследования, заключающиеся в измерении зависимости интенсивности рассеяния рентгеновских лучей образцом стекла от его непосредственной температуры. Исследование проводилось как при нагревании, так и при охлаждении. Полученная в итоге зависимость имела форму кривой гистерезиса с ярко выраженными температурами плавления, кристаллизации и областью переохлаждения. Средний радиус кристаллов был определен как $1,8\text{ нм}$. Температуры плавления и кристаллизации были определены: 370°C и 220°C соответственно. Учитывая тот факт, что рассеяние рентгеновских лучей зависит от электронной плотности материала, а размер и плотность расположения кристаллов в матрице стекла исключительно малы, то аморфная структура матрицы могла привести к неточности результатов. Проанализировав эти данные, мы пришли к выводу, что такого вида исследования необходимо провести в оптическом диапазоне, уделяя внимание области экситонного поглощения, которая характеризует непосредственно кристаллическую фазу CuCl . Фотохромизм стекол боро-силикатной матрицы затруднил задачу снятия спектров поглощения при нагревании, которое предполагает собой длительное облучение образца стекла излучением широкого диапазона (от 300 до 800 нм). Поэтому в качестве объекта исследования были выбраны стекла калиево-алюмо-боратной матрицы, синтезированные на нашей кафедре, также содержащие нанокристаллы CuCl , однако не обладающие фотохромизмом.

Были получены зависимости уровня оптической плотности на длине волны пика экситонного поглощения нанокристалла CuCl в зависимости от температуры образца при нагревании и при охлаждении. Зависимости также имели форму кривых гистерезиса. Температуры плавления и кристаллизации варьировались в зависимости от температуры первичной термообработки в пределах $150\text{--}180^\circ\text{C}$ и $20\text{--}40^\circ\text{C}$ соответственно. При этом в ходе охлаждения до 10°C уровень оптической плотности на длине волны пика экситонного поглощения не вернулся на исходный уровень, как это произошло в случае боро-силикатных стекол. Также в отличие от боро-силикатных стекол в стеклах калиево-алюмо-боратной матрицы уменьшение оптической плотности детектировалось уже при температуре порядка 60°C и имело более плавный характер изменения.

В эксперименте была использована серия образцов с разными режимами термообработки: длительность была одинаковой и равнялась 10 часам, а температура возрастала от 390°C до 450°C . Как было показано ранее [3] при увеличении температуры термообработки радиус выделяющейся кристаллической фазы увеличивается. В ходе эксперимента мы установили, что характеристические температуры увеличиваются вместе с размерами кристаллов, что можно объяснить проявлением квантово-размерного эффекта.

По результатам малоуглового рентгеновского рассеяния [3] выделяющаяся в калиево-

алюмо-боратной системе кристаллическая фаза содержит в своем составе не только соединение хлорида меди, но и хлорида калия. По аналогии, в боро-силикатных стеклах, которые содержат в своем составе достаточно большое количество Na_2O , кристаллическая фаза может содержать помимо хлорида меди еще и хлорид натрия. Так как температура плавления эвтектического соединения KCl-CuCl составляет 150°C , а NaCl-CuCl – 330°C , то такое предположение вполне приемлемо.

В ходе эксперимента были сварены стекла еще одного состава: также калиево-алюмо-боратной системы, но с нанокристаллами CuBr . Была получена серия образцов с разными режимами термообработок: длительность была одинаковой и равнялась 10 часам, а температура варьировалась от 390°C до 450°C . При увеличении температуры термообработки характеристические температуры также увеличивались, их значения варьировались в пределах $180\text{--}230^\circ\text{C}$ и $70\text{--}100^\circ\text{C}$ для температуры плавления и кристаллизации соответственно. Рассеяние рентгеновских лучей под малыми углами показало, что кристаллическая фаза содержит в себе соединение KBr-CuBr [3]. Температура плавления эвтектического соединения KBr-CuBr составляет 171°C .

Результаты эксперимента показали, что на температуру плавления и кристаллизации выделяющейся в калиево-алюмо-боратной матрице в процессе термообработки кристаллической фазы влияют вводимые в шихту галогениды и щелочные металлы. Температуры плавления кристаллической фазы, полученные нами в ходе эксперимента, соотносятся с данными ранее известных фазовых диаграмм соединений RHal-CuHal .

Литература

1. Dotsenko A.V., Glebov L.B. and Tsekhomsky V.A. Physics and Chemistry of Photochromic Glasses // CRC Press. – 1998. – P. 187.
2. Валов П.Н., Лейман В.И. Распределение по размерам наночастиц CuCl в стекле на различных стадиях нуклеации // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – В. 81. – С. 1607–1612.
3. Golubkov V.V., Kim A.A., Nikonorov N.V., Tsekhomskii V.A., Shirshnev P.S. Precipitation of nanosized crystals CuBr and CuCl in potassium aluminoborate glasses // Glass Physics and Chemistry. – 2012. – V. 38. – Issue 3. – P. 259–268.

УДК 535.372

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК С МОЛЕКУЛАМИ СУЛЬФОФТАЛОЦИАНИНА С ЭФФЕКТИВНЫМ ВНУТРИКОМПЛЕКСНЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭНЕРГИИ

А.Г. Баканов

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.О. Орлова

Введение. В настоящее время большой интерес представляет создание гибридных структур с уникальными характеристиками, возникающими в результате комбинирования свойств полупроводниковых наночастиц и органических молекул. В частности, в последнее десятилетие интенсивно ведутся работы по созданию и исследованию свойств комплексов коллоидных полупроводниковых нанокристаллов, или, квантовых точек (КТ) с органическими соединениями [1]. Квантовые точки обладают рядом уникальных фотофизических свойств: высоким коэффициентом молярной экстинкции ($\sim 10^5\text{--}10^6 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) в широком спектральном диапазоне, высоким квантовым выходом люминесценции (\sim до 80%), а также имеют достаточно большое время жизни люминесценции (~ 20 нс). Из-за малых размеров нанокристаллов ($\sim 2\text{--}10$ нм) в полупроводниковых квантовых точках возникает ограничение движения носителей заряда, что приводит к возникновению квантово-размерного эффекта: дискретности электронных уровней. Вследствие эффекта

размерного квантования спектры поглощения и люминесценции нанокристаллов зависят не только от химического состава, но также и от размера частиц. Оптические свойства квантовых точек позволили найти им применение в диагностике и фотодинамической терапии онкологических заболеваний [2], визуализации биологических объектов, в сенсорных системах и в различного рода оптоэлектронных устройствах [3, 4].

Целью работы является формирование комплексов полупроводниковых квантовых точек с молекулами тетрапиррольного ряда, способных эффективно генерировать синглетный кислород. Для достижения поставленной цели в работе предполагалось определить условия формирования и стехиометрию комплексов полупроводниковых квантовых точек с молекулами фталоцианина при которых возможен эффективный внутрикомплексный перенос энергии фотовозбуждения КТ и сохранение люминесцентных свойств сульфофталоцианина.

В работе были исследованы зависимости фотофизических свойств комплексов квантовых точек с молекулами фталоцианина, входящими в состав препарата «Фотосенс», и оценена эффективность внутрикомплексного переноса энергии фотовозбуждения КТ от условий формирования и состава комплексов КТ/ФЦ.

Результаты. В работе в водной среде при нейтральном pH были исследованы смешанные растворы CdSe/ZnS квантовых точек со средним диаметром ядра 5,0 нм и молекул сульфофталоцианина (ФЦ). Присутствие на поверхности КТ молекул солубилизатора (диметилэантиола) обеспечивает их растворимость в водных средах и наличие положительного заряда на их поверхности. Это позволяет формировать комплексы КТ/ФЦ за счет электростатического взаимодействия положительно заряженных молекул солубилизатора КТ с отрицательно заряженными сульфогруппами ФЦ. Выбранный в работе размер КТ (5,0 нм) обеспечивает условие перекрытия спектров компонентов комплекса, которое является необходимым для осуществления внутрикомплексного переноса энергии по механизму безызлучательного резонансного переноса энергии (FRET).

Анализ спектров люминесценции смешанных растворов CdSe/ZnS квантовых точек и молекул фталоцианина показал, что в присутствии в растворе относительно низкой концентрации молекул ФЦ происходит заметное уменьшение интенсивности люминесценции КТ. При этом интенсивность люминесценции ФЦ оказывается существенно выше, чем в растворе свободного фталоцианина такой же концентрации. Это свидетельствует о связывании в комплекс КТ с молекулами фталоцианина и, при условии неизменности спектра поглощения ФЦ, об эффективном внутрикомплексном переносе энергии фотовозбуждения от КТ к молекулам фталоцианина. В то же время было обнаружено, что увеличение относительной концентрации молекул сульфофталоцианина в смеси с КТ приводит к заметному снижению эффективности переноса энергии, которое также сопровождается существенным уменьшением квантового выхода люминесценции фталоцианина, связанного в комплекс с КТ. Падение эффективности переноса энергии и интенсивности люминесценции ФЦ сопровождалось изменениями в спектре поглощения комплексов. Анализ спектров поглощения позволил выявить в исследуемом образце наличие фталоцианина, который имеет отличный от исходного спектр поглощения. Характерное уширение первой полосы поглощения данной спектральной формы, и отсутствие ее вклада в спектр люминесценции фталоцианина свидетельствуют о том, что данная форма, скорее всего, относится к нелюминесцирующим агрегатам фталоцианина, адсорбированным на поверхности КТ. Следует отметить, что спектр поглощения агрегатов фталоцианина хорошо перекрывается со спектрами люминесценции КТ и ФЦ, и, соответственно, данная форма фталоцианина может участвовать в качестве акцептора в переносе энергии от КТ и молекулярной формы ФЦ. Поэтому, присутствие агрегированной формы фталоцианина на поверхности КТ неизбежно должно приводить к одновременному снижению эффективности переноса энергии от КТ к молекулярной форме ФЦ и к уменьшению интенсивности люминесценции данной формы фталоцианина.

Наиболее благоприятным условием для образования агрегированной формы ФЦ является полная или частичная нейтрализация поверхностного заряда молекул фталоцианина, которая может происходить при связывании с положительно заряженными молекулами солибилизатора ФЦ. В данной работе при создании комплексов КТ нами использовался лекарственный препарат «Фотосенс», который представляет собой смесь молекул фталоцианина с различным числом заряженных сульфогрупп (от 1 до 4). В этой ситуации нелюминесцирующие агрегаты, адсорбированные на поверхности КТ, будут в первую очередь образовывать молекулы фталоцианина с минимальным числом заряженных групп (1 и 2). Для проверки этого предположения нами была предпринята попытка разделения с использованием техники бумажной хроматографии смеси сульфотфалоцианина на фракции, содержащие преимущественно молекулы с определенным числом сульфогрупп.

Анализ спектрально-люминесцентных свойств комплексов КТ/ФЦ, полученных с участием молекул фталоцианина после его хроматографического фракционирования показал, что увеличение процентного содержания молекул тетрасульфотфалоцианина позволяет существенно снизить вероятность образования нелюминесцирующих агрегатов ФЦ на поверхности КТ. Это в свою очередь приводит к сохранению высокой эффективности внутрикомплексного переноса энергии и люминесцентных свойств молекул ФЦ, связанных в комплекс с квантовыми точками.

Литература

1. Федоров А.В., Баранов А.В. Оптика квантовых точек. В кн. Оптика наноструктур / Под ред. А.В. Федорова. – СПб: Недра, 2005. – 181 с.
2. Schroder G.F., Grubmuller H. FRETsg. Biomolecular structure model building from multiple FRET experiments // Comput. Phys. Commun – 2004. – V. 158. – № 3. – P. 150–157.
3. Robert E. Bailey, Andrew M. Smith and Shuming Nie. Quantum dots in biology and medicine, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2004. – V. 25.– Is. 1. – P. 1–12.
4. Halpert J.E., Tischler J.R., Nair G., Walker B.J., Liu W., Bulovic V., Bawendi M.G. Electrostatic Formation of Quantum Dot/J-aggregate FRET Pairs in Solution // J. Phys. C. – 2009. – V. 113(23). – P. 9986–9992.

УДК 539.264; 535.372

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ОКСИФТОРИДНЫХ НАНОСТЕКЛОКЕРАМИКАХ, АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

А.Ю. Бибик, А.О. Трофимов, Р.К. Нурьев

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров

В настоящее время прозрачные оксифторидные наностеклокерамики представляют большой интерес в качестве активных сред для лазеров, усилителей и конверторов света. При разработке таких материалов необходимо контролировать состав и размер кристаллической фазы. Такой контроль необходим для управления степени вхождения активатора в кристаллическую фазу и уменьшения уровня светорассеяния на границе раздела фаз

Целью работы было исследование физико-химических и люминесцентных свойств иттриевых свинцово-фторидных стекол, активированных редкоземельными ионами, и наностеклокерамик на их основе. В ходе исследования было изучено выделение кристаллических фаз после термообработки стекол и рассчитаны размеры кристаллов. А также, определены параметры элементарной ячейки.

В работе исследовались стекла состава $30\text{SiO}_2-15\text{AlO}_{3/2}-29\text{CdF}_2-18\text{PbF}_2-5\text{ZnF}_2-x\text{NdF}_3-(3-x)\text{YF}_3$, где $x=3,0; 2,9; 2,5; 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0$ и стекла состава $30\text{SiO}_2-15\text{AlO}_{3/2}-29\text{CdF}_2-$

$18\text{PbF}_2-5\text{ZnF}_2-x\text{ErF}_3-(3-x)\text{YbF}_3$, где $x=0, 0,05; 0,1; 0,2; 0,5$, а также наностеклокерамики на их основе. Синтез проводился в течение 30 мин, при температуре 1050°C в открытых корундовых тиглях в атмосфере воздуха. Далее стекла подвергали термической обработке в течение 30, 60, 120 мин при температуре начала кристаллизации 500°C , для получения наностеклокерамик. Температура начала кристаллизации определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

В ходе исследования, был проведен рентгенофазовый анализ стекол и наностеклокерамик на их основе. Было показано, что при замещении иттрия на ионы редких земель образуется кристаллическая фаза в кристаллографическом отношении соответствующая иттриевому оксифториду свинца PbYOF_3 . При полном замещении иттрия на неодим формируется гексагональная кристаллическая фаза, в кристаллографическом отношении структура выделяющейся фазы соответствует кристаллу NdF_3 .

Кроме того, в данной работе были исследованы люминесцентные свойства оксифторидных наностеклокерамик, активированных редкоземельными ионами. В результате вторичной термообработки, выделяются кристаллические фазы, зависящие от концентрации фторида неодима и иттрия, а также эрбия и иттербия. Размеры элементарной ячейки выделяющихся кристаллов составили от $5,74 \text{ \AA}$ до $5,84 \text{ \AA}$ в зависимости от концентрации редкоземельных ионов в исходном стекле.

УДК 535.34+535.37

ПОЛУЧЕНИЕ МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В СФЕРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРАХ, ПОКРЫТЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ a-Si:C:H

К.В. Богданов (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики), **С.А. Грудинкин** (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор А.В. Баранов
(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Объектом настоящего исследования являлись микрорезонаторы, состоящие из сферических частиц аморфного диоксида кремния диаметром $2,0$ и $3,5 \mu\text{m}$, покрытых люминесцирующей оболочкой аморфного гидрогенизированного карбида кремния (a-Si:C:H) толщиной 60 nm . Приготовление микрорезонаторов из аморфного диоксида с оболочкой a-Si:C:H является перспективным для разработки и создания чувствительных оптических биосенсоров и других биомедицинских приложений. Данные возможности реализуются за счет использования аморфного гидрогенизированного карбида кремния (a-Si:C:H), обладающего большой шириной запрещенной зоны и люминесценцией при комнатной температуре. Используя при изготовлении пленок метод плазмохимического газофазного осаждения (ПХГФО) возможно контролировать оптические свойства и положение максимума линии фотолюминесценции a-Si:C:H в спектральной области $600-900 \text{ nm}$.

В ходе синтеза образцов микрорезонаторов из аморфного диоксида с оболочкой a-Si:C:H с размером $2-3,5 \mu\text{m}$, полученных при помощи поэтапного выращивания шаров диоксида кремния и напыления a-Si:C:H методом плазмохимического газофазного осаждения, контролировался размер микросфер, а также толщина наносимой пленки фотолюминесцентной оболочки. Целью данного исследования являлась возможность продемонстрировать зависимость характеристик полученного линейчатого спектра фотолюминесценции от размера сферической частицы, а также подбор оптимальных параметров пленки a-Si:C:H для получения интенсивной фотолюминесценции a-Si:C:H в

видимой – ближней инфракрасной области (600–800 nm), прозрачной для биологических тканей.

Для получения спектров фотолюминесценции и детектирования мод шепчущей галереи применялся микро-спектрограф InVia фирмы Renishaw, оборудованный 50^x и 100^x объективами и возбуждающим аргоновым лазером, обладающим линейно поляризованным излучением с длиной волны 514,5 nm, фокусируемым на образец в пятно с диаметром ~1 μm. Мощность возбуждения была подобрана таким образом, чтобы не произвести в образце каких-либо структурных изменений, и составила 0,01mW. А фокусировка в пятно с диаметром ~1 μm позволила записывать спектры с различных точек микрорезонатора.

В результате работы были произведены и изучены микрорезонаторы из аморфного диоксида кремния с оболочкой из аморфного гидrogenизированного карбида кремния a-Si:C:H с размером 2–3,5 μm. Показана возможность изменять люминесцентные параметры микрорезонаторов, формирующие моды шепчущей галереи, с изменения размеров микрорезонатора и толщины напыляемого фотолюминесцентного покрытия. Было показано, что отношение спектральных (межмодовых) расстояний между ближайшими линиями МШГ МР с размером 3,5 и 2 μm составляет 0,6, что приблизительно соответствует обратной величине отношения их диаметров ~0,58. По формуле $Q=\lambda/\Delta\lambda$ (где λ – положение линии МШГ; $\Delta\lambda$ – ширина линии МШГ на половине высоты) была определена добротность микрорезонаторов с различными параметрами размера шаров аморфного диоксида и толщины фотолюминесцентной оболочки из аморфного гидrogenизированного карбида кремния a-Si:C:H. Максимальная достигнутая добротность МР составляла $Q\sim 100$ для МР диаметром 3,5 μm.

УДК: 535.14

МНОГОФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ, КОНТРОЛИРУЕМОЕ РЕЗОНАНСНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ ШТАРКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

М.А. Бондарев

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Е.Ю. Перлин

Исследуется многофотонное (МФ) поглощения света с энергией кванта $\hbar\omega$, большой по сравнению с энергиями колебательных возбуждений, но малой по сравнению с шириной запрещенной зоны кристалла E_g . Рассматривается трехзонная модель, включающая валентную зону v , нижнюю s и верхнюю $s1$ зоны проводимости. Пусть в точке $k0$ зоны Бриллюэна имеет место n -фотонный резонанс между зонами v и s (например, $n = 3$). При этом в точке $k1$ в окрестности точки $k0$ может иметь место l -фотонный резонанс между зонами s и $s1$ ($l < n$, например, $l = 1, 2$ или 3). Случай $n = 2, l = 1$ рассматривался в работах [1–5]. Было показано, что при однофотонном резонансе между зонами s и $s1$ каждая из них расщепляется на две ветви, между которыми возникает щель с шириной, определяемой частотой Раби для перехода $s \rightarrow s1$. На обеих ветвях появляются дополнительные критические точки (сингулярности Ван Хова) плотности состояний. Положение этих точек в k -пространстве зависит от j . Если какая-либо из критических точек приближается к $k0$, то происходит резкое (практически, скачкообразное) увеличение вероятности n -фотонного перехода между зонами v и s .

Двойной двухфотонно-однофотонный резонанс на смежных межзонных переходах может реализоваться во многих материалах, в т.ч. в AgBr для света с $\lambda=560$ нм 5, причем проявления такого резонанса можно наблюдать при интенсивностях света j , на 2–3 порядка ниже порога оптической прочности материала. В настоящей работе исследуется случай многофотонно-однофотонного (МФ-ОФ) резонанса, представляющий интерес в случае предпробойных интенсивностей света $j \sim 10^{10} - 10^{12}$ Вт/см². Вычисление скорости генерации

неравновесных ЭДП в случае МФ-ОФ резонанса на смежных переходах основано на методе \hat{S} -преобразования гамильтониана электрон-фотонной системы \hat{H} . Использование данного метода позволило:

- получить вероятности $W(n)$ n -фотонной генерации ЭДП при произвольных n в первом порядке модифицированной теории возмущений;
- получить в «ОФ приближении вращающегося поля» эффекты перестройки энергетического зонного спектра в условиях ДФ межзонного резонанса для случая анизотропного энергетического спектра кристалла или наноструктуры;
- учесть процессы переизлучения фотонов, в т.ч. при вычислении «ДФ частоты Раби».

В работе подробно рассмотрен случай анизотропных кристаллов и проанализированы зависимости скорости генерации неравновесных электрон-дырочных пар от интенсивности света j при различных типах сингулярностей Ван Хова. Были исследованы случаи как разрешенных, так и запрещенных межзонных переходов. В случае разрешенных переходов сингулярности проявляются несколько более четко. Показано, что характер сингулярностей перестроенного зонного спектра соответствует размерности, на единицу меньшей, чем размерность исходного материала. Так, в частности, в случае объемного кристалла (размерность $D=3$) на зависимости $W(n)(j)$ появляются логарифмические пики, характерные для системы с $D=2$. Показано, что в условиях двойного МФ-ОФ резонанса на смежных межзонных переходах имеется область интенсивностей света, при которых небольшое возрастание j приводит к скачкообразному увеличению скорости генерации ЭДП, и как следствие, к пробоем материала.

Литература

1. Перлин Е.Ю., Коварский В.А. Влияние резонансного лазерного излучения на собственное поглощение света в кристаллах // Физика твердого тела. – 1970. – Т. 12. – Вып. 11. – С. 3105–3112.
2. Перлин Е.Ю. Оптический штарк-эффект при переходном двойном резонансе в полупроводниках // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1994. – Т. 105. – Вып. 1. – С. 186–197.
3. Перлин Е.Ю., Федоров А.В. Критические точки электронного зонного спектра в поле сильной электромагнитной волны // Физика твердого тела. – 1995. – Т. 37. – Вып. 5. – С. 1463–1472.
4. Перлин Е.Ю., Федоров А.В. Двухфотонное поглощение, контролируемое резонансным оптическим штарк-эффектом в кристаллах и квантовых наноструктурах // Оптика и спектроскопия. – 1995. – № 78. – Вып. 3. – С. 445–456.
5. Перлин Е.Ю., Стаселько Д.И. Многофотонные переходы и резонансный оптический эффект Штарка в нанокристаллах AgBr // Оптика и спектроскопия. – 2005. – № 98. – Вып. 6. – С. 944–950.
6. Иванов А.В., Перлин Е.Ю. Предпробойное возбуждение кристаллов при двойном многофотонном резонансе. I. Вероятности межзонных переходов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – № 106. – Вып. 5. – С. 756–764.
7. Бондарев М.А., Иванов А.В., Перлин Е.Ю. Предпробойное возбуждение кристаллов при двойном многофотонном резонансе // Оптика и спектроскопия. – 2012. – № 112(1). – С. 115–122.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНКИ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.С. Брунов

Научный руководитель – д.ф.-м.н., ст.н.с. А.И. Сидоров

Металлические наночастицы (Ag, Au, Cu) или металлические плазмонные наноструктуры используются во многих приложениях оптики и фотоники, таких как оптоволоконные покрытия, биосенсоры, плазмонные волноводы, наноантенны, концентраторы электромагнитного поля и др. Поэтому исследование процессов, происходящих при электронном облучении стекла с ионами металлов, при котором происходит образование и рост наночастиц металлов и их пленок на поверхности стекла является важной задачей.

Целью работы являлось получение пленок серебра на поверхности серебряносодержащих стекол при облучении их электронным пучком, а также моделирование распределения удельных потерь энергии и температуры нагревания образца под действием потока электронов.

Как известно, термообработка после электронного облучения способствует образованию металлических наночастиц, но первые наночастицы в стекле начинают образовываться уже на стадии облучения [1]. При этом вблизи поверхности стекла возникает отрицательный объемный заряд, вследствие чего положительные ионы диффундируют из объема стекла в зону облучения. Электронный пучок восстанавливает положительные ионы металлов до нейтральных атомов, которые образуют наночастицы.

Чем больше энергия электронного пучка, тем глубже проникает пространственный отрицательный заряд. В случае малых энергий (5–15 кэВ) отрицательный заряд образуется вблизи поверхности, и ионы серебра агрегируются в наночастицы близко к поверхности и иногда даже вытягиваются на поверхность, создавая сплошную металлическую пленку.

После облучения стекол с ионами серебра малыми (5–15 кэВ) энергиями электронного пучка с различными дозами в сканирующем электронном микроскопе JEVD-2 были получены пленки серебра, диаметр которых соответствует диаметру пучка. Установлено, что пленки находятся на поверхности образца. Спектры поглощения пленок, измеренные на спектрофотометре, показывают равномерное увеличение поглощения образца в интервале длин волн 300–1000 нм, а также наличие плазмонного резонанса (пика поглощения в области 410 нм), что свидетельствует о присутствии серебряных наночастиц на поверхности или в приповерхностном слое образца.

Был произведен расчет энергетических потерь электронов в пленке серебра и в самом образце при различных параметрах облучения. Рассчитано распределение температуры образца в зависимости от радиуса электронного пучка, глубины и времени облучения. Определено, что при энергии электронного пучка 20 кэВ в течение 1000 с образец нагревается до 150°C.

Литература

1. Игнатъев А.И., Нащекин А.В., Неведомский В.М., Подсвиров О.А., Сидоров А.И., Соловьев А.П., Усов О.А. Особенности формирования наночастиц серебра в фототерморелактивных стеклах при электронном облучении // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – Вып. 5. – С. 75–80.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

Д.А. Вакулин

Научный руководитель – д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.А. Коншина

Для определения основных параметров жидкокристаллических ячеек существует множество оптических и электрических методов исследования. Эти методы отличаются различной областью применения и ограничениями для их использования.

Объектом исследования были плоскопараллельные ячейки, заполненные нематическим жидким кристаллом (ЖК) с положительной диэлектрической анизотропией.

Основной **целью работы** была автоматизация проведения исследований параметров жидкокристаллических ячеек путем измерения пропускания ЖК ячейки по методу вращения [1] и в зависимости от приложенного напряжения [2], а также измерением емкости ячеек [3].

Были разработаны специальные программы для ЭВМ, позволяющие производить исследования параметров ЖК ячеек в автоматическом режиме [4, 5].

Экспериментально были получены зависимости пропускания от угла падения поляризованного излучения на плоскость ЖК ячейки путем ее вращения для определения начального угла наклона директора, а также зависимости пропускания ЖК ячеек от напряжения, с помощью которых определялась фазовая задержка, пороговое напряжение эффекта Фредерикса и начальный угол наклона директора. В результате проведенных исследований установлено, что для малых углов наклона директора предпочтительнее использовать метод вращения ЖК ячейки, а в случае углов более 10–15° более точные данные позволяет можно получить используя зависимость фазовой задержки от напряжения.

Литература

1. Jin Gwag, Seo Lee, Kyoung Ho-Park, Won Park, Kwan-Young Han, Tae-Hoon Yoon, Jae Kim, Kwan-Young Han, Tae-Hoon Yoon, Jae Kim. High Pretilt Angle Measurement by Extended Crystal Rotation Method // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2004. – V. 412. – P. 331–337.
2. Konshina E.A., Fedorov M.A. and Amosova L.P. Determining the director tilt and phase lag of liquid-crystal cells by optical methods // *J. Opt. Technol.* – 2006. – V. 73. – Iss. 12. – P. 830–833.
3. Iwaya K., Naito H., Ichinose H., Klasen-Memmer M. and Tarumi K. Simultaneous measurement of elastic constants and anchoring energy of homeotropic and homogeneous nematic liquid crystal cells by a capacitance method // *IDW'10 – Proceedings of the 17th International Display Workshops.* – P. 119–122.
4. Вакулин Д.А. Свидетельство о Государственной регистрации программы «Программа для тестирования оптических жидкокристаллических компонентов» №2012613712 19.04.2012.
5. Вакулин Д.А. Свидетельство о Государственной регистрации программы «Программа для управления параметрами электрического поля в ЖК устройствах» № 2011615197 09.09.2011.

ГИСТЕРЕЗИС ПРОВОДИМОСТИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ПЛЕНОК СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ САПФИРА

И.А. Гладских, Е.В. Ващенко

Научный руководитель – д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартамян

Исследования электронных процессов в гранулированных металлических пленках имеют долгую историю и продолжают развиваться в настоящее время. Активность в этой области исследований связана с надеждами на создание сверхминиатюрных устройств на основе наноструктур, образующихся при самоорганизации металлических пленок на различных подложках. Интерес для приложений представляют как оптические, так и электрические свойства гранулированных металлических пленок на диэлектрических подложках, а также, связь между ними. В частности, уникальные электрические свойства гранулированных металлических пленок могут применяться для записи информации.

Целью работы было исследование электрических свойств гранулированных пленок серебра на поверхности сапфира в процессе напыления пленок и во время их термического отжига. Гранулированные пленки серебра были получены термическим распылением металла в высоковакуумной ($\sim 10^{-7}$ торр) напылительной установке Kurt J. Lesker Company PVD 75 на поверхность сапфировой подложки с заранее подготовленными серебрянными электродами. Расстояние между электродами – 3 мм, а их ширина – 20 мм. Электрические свойства пленок измерялись с помощью пикоамперметра Keithley 6487 Picoammeter Voltage Source.

В процессе напыления сопротивление пленки уменьшается экспоненциально в зависимости от количества напыленного материала и, кроме того, зависит от скорости напыления. После напыления сопротивление пленки продолжает изменяться. Можно выделить два характерных случая:

1. до образования «бесконечного кластера». При этом сопротивление пленки растет из-за диффузии атомов и небольших частиц серебра, тем самым увеличивая расстояния между частицами;
2. «бесконечный кластер». При образовании проводящих каналов между электродами сопротивление уменьшается после напыления, что может быть вызвано утолщением тонких каналов проводимости так же за счет диффузии.

После напыления пленки подвергались термическому отжигу при температуре примерно 100°C в течение 40–60 минут. Морфология пленок, о которой можно судить из спектров оптической плотности и микрофотографий, полученных на сканирующем электронном микроскопе, практически не изменяется за это время, а сопротивление пленок увеличивается на 10–12 порядков. Вольт-амперная характеристика после прогрева имеет не омический вид, т.е., при увеличении напряжения, наблюдается резкое увеличение тока на 5–8 порядков. При уменьшении напряжения вольт-амперная характеристика имеет омический характер, но при снятии напряжения пленка возвращается в высокоомное состояние.

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ
НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА
В СТЕКЛАХ ПОСЛЕ ИОННОГО ОБМЕНА**

И.А. Дёмичев

Научный руководитель – д.ф.-м.н., ст.н.с. А.И. Сидоров

Стекла с молекулярными кластерами серебра являются интересным объектом для исследования. Благодаря существованию люминесценции, на основе таких стекол могут быть изготовлены высокоэффективные преобразователи излучения для солнечных батарей, использующие ультрафиолетовый и видимый диапазоны излучения Солнца. Стекла с серебром также применяют в изготовлении белых светодиодов. Поэтому проведение исследований оптических свойств стекол с кластерами серебра – важная задача.

Целью работы являлось исследование люминесценции стекол с серебром, введенным ионным обменом, подвергнутых УФ-облучению и термообработке.

В СПб НИУ ИТМО, на кафедре ОТиМ были изготовлены образцы силикатных мультихромных стекол состава $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF}$ с добавками церия CeO_2 (фотосенсибилизатор). Ионный обмен (ИО) проводился в течение 15 минут, в 5%-ом расплаве AgNO_3 , при температуре 315°C . Измерения спектров люминесценции и поглощения проводились на волоконном спектрометре StellarNet и спектрофотометре Carry-500.

УФ-облучение проводилось с использованием ртутной лампы ДРШ-240, имеющей в спектре излучения полосу поглощения ионов церия (310 нм), в течение 20 мин. Термообработка (ТО) осуществлялась в муфельной печи Nabertherm с автоматическим управлением при температуре 350°C в течение 2 часов.

В ходе экспериментов проведен ионный обмен, УФ-облучение и ТО.

Исследования показали, что яркая люминесценция возникает в стеклах непосредственно после ионного обмена. Предполагаемым источником люминесценции, согласно анализу экспериментальных данных, являются молекулярные кластеры серебра. Облучение ультрафиолетовым излучением ведет к уменьшению интенсивности люминесценции образцов. Вероятной причиной этого может являться фотоионизация молекулярных кластеров и превращение их в ионы серебра с появлением свободных электронов, осаждающихся на дефектах решетки. Далее при термообработке происходит высвобождение электронов из «ловушек» и восстановление молекулярных кластеров серебра. Таким образом, после термообработки интенсивность люминесценции значительно усилилась.

Наблюдался рост поглощения образцов после каждой из стадий обработки: ИО, УФ-облучение, ТО. Облучение ртутной лампой способствует образованию плазмонного пика поглощения после ТО.

Работа проводилась при поддержке РФФИ, грант № 12-02-31455.

ВЛИЯНИЕ ХЛОРИДОВ И БРОМИДОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ СЕРЕБРЯНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНЫХ СТЕКЛАХ

В.Д. Дубровин

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров

Фототерморефрактивные стекла представляют интерес для формирования плазмонных структур, которые применяются в интегральной оптике в виде плазмонных волноводов, резонаторов и т.д. [1]. Обработка этих стекол ультрафиолетовым (УФ) излучением с последующей термообработкой позволяют выделить в объеме стекла металлическую фазу в виде наночастиц серебра, а также вырастить на этих коллоидных центрах кристаллическую фазу. При этом в данных стеклах под действием УФ излучения происходит образование серебряных молекулярных комплексов, имеющих широкую полосу излучения в видимой области спектра [2].

В работе исследовались стекла натриевоалюмоцинксилкатной системы, содержащие в своем составе хлориды и бромиды. $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{NaF}$, активированной 0,01% CeO_2 , 0,04% Sb_2O_3 мол.%. С переменным содержанием Ag_2O – 0,07 и 0,13 мол.% и NaBr/NaCl от 0 до 2 мол.% по синтезу. Стекла синтезировались в воздушной атмосфере при температуре 1450 с. Температура стеклования составляет около 495 с. Все образцы облучались УФ и некоторые из них термообрабатывались в градиентной печи при температурах ниже температуры стеклования.

В результате работы были получены следующие выводы:

1. облучение УФ приводит к формированию серебряных молекулярных комплексов, поглощающих в диапазоне 250–450 нм и излучающих в диапазоне 400–850 нм;
2. увеличение концентрации серебра приводит к резкому увеличению интенсивности люминесценции серебряных молекулярных комплексов;
3. в УФ облученных стеклах при увеличении концентрации бромидов, так же как и хлоридов, происходит значительное увеличение интенсивности люминесценции серебряных молекулярных комплексов;
4. при одинаковых концентрациях галогенидов люминесценция серебряных молекулярных комплексов в ФТР:В выше чем в ФТР:С1;
5. облучением УФ и последующая термообработка приводят к значительному увеличению интенсивности люминесценции.

Литература

1. Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Туниманова И.В., Харченко М.В. Особенности окрашивания мультихромных стекол под действием лазерного излучения // Физика и химия стекла. – 1993. – Т. 19. – № 3. – С. 442–448.
2. Kuznetsov A.S., Tikhomirov V.K. and Moshchalkov V.V. Polarization memory of white luminescence of Ag nanoclusters dispersed in glass host // Optics Express. – 2012. – V. 20. – № 19. – P. 21576–21852.

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ИСПАРЕНИИ И АБЛЯЦИИ

В.И. Егоров, И.В. Звягин

Научный руководитель – д.ф.-м.н., ст.н.с. А.И. Сидоров

Наночастицы благородных металлов (Au, Ag, Pt) и меди, обладающие плазмонными резонансами, находят применение при создании химических и биосенсоров на основе усиления люминесценции, рамановского рассеяния, а также на основе спектрального сдвига плазмонных резонансов при изменении показателя преломления среды. Основным эффектом, который при этом используется, является локальное усиление амплитуды поля электромагнитной волны в условиях плазмонного резонанса. Для синтеза металлических наночастиц могут быть использованы химические реакции в жидких и полимерных средах, электрохимические методы, вакуумное напыление или лазерная абляция на подложку, ионная имплантация и ряд других методов.

Целью работы было исследование возможностей создания на поверхности стекла наночастиц серебра путем испарения или абляции тонкого слоя стекла, содержащего ионы серебра импульсным лазерным излучением.

В работе использовались пластины из стекла состава $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{NaF}-\text{NaCl}$ с добавками CeO_2 (0,02 вес.%) и Sb_2O_3 (0,2 вес.%), изготовленные в НИУ ИТМО, а также из оптического стекла К8. Ионы серебра вводились в приповерхностные слои стекла методом ионного обмена из расплава смеси AgNO_3 и NaNO_3 . Облучение стекол проводилось сфокусированным импульсным излучением CO_2 -лазера ($\lambda=10,6$ мкм, $\tau=10-100$ мкс) и неодимового лазера ($\lambda=1,06$ и $0,53$ мкм, $\tau = 10$ нс).

Эксперименты показали, что при энергии лазерного импульса, превышающей порог испарения стекла, внутри и вокруг области воздействия лазерного луча формируется область, содержащая наночастицы серебра. Формирование наночастиц серебра подтверждается появлением плазмонной полосы поглощения на спектре поглощения облученного участка стекла. При увеличении энергии лазерного импульса вокруг области воздействия формируется сплошная пленка из металлического серебра.

Наблюдаемые эффекты объясняются тем, что при испарении стекла лазерным импульсом возникает эрозионный факел, состоящий из плотной плазмы, содержащей компоненты стекла и электроны. На границах этого факела происходит рекомбинация свободных электронов с ионами, в том числе, с ионами серебра. Высокие плотность и температура в факеле обеспечивают высокую подвижность атомов серебра и формирование наночастиц серебра в процессе лазерного воздействия и непосредственно после его окончания. Сформировавшиеся наночастицы серебра осаждаются внутри и вокруг зоны облучения и фиксируются прозрачным слоем, возникающим при осаждении остальных компонентов стекла.

МНОГОФОТОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХКОРОТКИХ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

К.А. Елисеев

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Е.Ю. Перлин

Рассмотрено многофотонное поглощение фемтосекундных световых импульсов с длительностями, меньшими времен релаксации импульса электрона или дырки в объемных материалах и квантоворазмерных структурах. Получены формулы для зависимости поглощенной световой энергии от длительности импульса и от отстройки основной частоты от резонанса.

При исследовании взаимодействия лазерного излучения интенсивностью $j \sim 10^{10} - 10^{14}$ Вт/см² широко используются световые импульсы фемтосекундной длительности. При продолжительности импульсов $\tau_i < 100$ фс величина τ_i оказывается малой по сравнению с временем релаксации импульса электронов или дырок τ_p , которое определяется процессами рассеяния электронов или дырок заряда на продольных оптических колебаниях решетки и обычно составляет в объемных кристаллах сотни фемтосекунд. При $\tau_i < \tau_p$ для последовательной интерпретации экспериментальных данных по нелинейному отклику материалов различной размерности на фемтосекундные световые импульсы нельзя использовать формулы для случая квазистационарных электромагнитных полей, иначе можно прийти к неточной интерпретации наблюдающихся фотоиндуцированных процессов.

Особый интерес представляет изучение индуцированного мощным излучением оптического пробоя в прозрачных материалах [1, 2]. Считается, что оптический пробой инициируется, прежде всего, генерацией критического количества электрон-дырочных пар в объеме твердого тела под действием мощного света. На данный момент известно два основных механизма генерации электрон-дырочных пар, приводящих к оптическому пробую – это лавинная ионизация [3, 4] и ионизация за счет многофотонных межзонных переходов [5, 6].

В работе был проведен теоретический анализ многофотонного поглощения фемтосекундных световых импульсов с длительностями, меньшими времен внутризонной (внутриподзонной) релаксации импульса электрона или дырки в объемных материалах и гетероструктурах с квантовыми ямами, проводами и точками. Получены аналитические формулы для динамических нелинейных поляризуемостей, которыми определяется энергия, поглощенная из сверхкороткого светового импульса структурами различной размерности в условиях многофотонного резонанса на переходах между дискретными состояниями либо между подуровнями (подзонами) размерного квантования. Получены аналитические формулы для зависимости поглощенной световой энергии от длительности импульса и от отстройки основной частоты от резонанса для наноструктур различной размерности. Показано, что для систем с дискретными уровнями, таких как экситоны в структурах различной размерности, квантовые точки, примесные центры и т.д., нелинейный отклик на сверхкороткие и более длинные лазерные импульсы в условиях многофотонного резонанса демонстрирует принципиальные различия.

Литература

1. Du D., Liu X., Korn G., Squier J., Mourou G. Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO₂ with pulse widths from 7 ns to 150 fs // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V. 64. – P. 3071.
2. Stuart B.C., Feit D., Herman S., Rubenchik A.M., Shore B.W., Perry M.D. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics // Phys. Rev. B. – 1996. – V. 53. – P. 1749.
3. Молчанов А.Г. Развитие лавинной ионизации в прозрачных диэлектриках под действием импульса света // ФТТ. – 1970. – Т. 12. – С. 954.

4. Епифанов А.С. Процесс развития лавинной ионизации в твердых прозрачных диэлектриках под действием импульсов мощного лазерного излучения // ЖЭТФ. – 1974. – Т. 67. – С. 1805.
5. Sharma B.S., Riekhof K.E. Laser-induced photoconductivity in silicate glasses by multiphoton excitation, a precursor of dielectric breakdown and mechanical damage // Canadian J. of Phys. – 1967. – V. 45. – P. 3781.
6. Schmid A., Kelly P., Braunlich P. Optical breakdown in alkali halides // Phys. Rev. B. – 1977. – V. 16. – № 10. – P. 4569.

УДК 53.086, 53.088, 57.081

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

М.В. Жуков, И.В. Кухтевич

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент В.В. Левичев

Введение. В настоящее время возрастает интерес к детальному, высокоточному изучению различных биологических объектов на наноразмерном уровне. К одному из наиболее привлекательных неразрушающих методов анализа можно отнести атомно-силовую микроскопию (АСМ), позволяющую получать высокое пространственное разрешение поверхности изучаемых объектов, например, минуя дифракционный предел при изучении методами традиционной оптической микроскопии [1], которые на сегодняшний день получили широкое распространение в биологии и медицине.

При изучении биологических объектов в нативном состоянии необходимо использовать различные буферные растворы, что в свою очередь влияет на процесс сканирования и точность получаемых изображений поверхностей. В результате сканирования образцов в буферных растворах нередко наблюдаются артефакты и шумы, связанные с применением подобных веществ. На текущий момент данная область еще мало изучена и требует детального рассмотрения в связи с возможными несоответствиями размеров и формы изучаемых объектов, получаемых в процессе сканирования.

Целью работы являлось проведение измерений эталонной тестовой решетки в различных буферных растворах в контактном и полуконтактном режимах сканирования для выявления отклонений в размерах и особенностей сканирования объектов в жидких средах методом атомно-силовой микроскопии.

Базовые положения исследования. В ходе экспериментов исследовалась калибровочная решетка TGQ01 (НТ-МДТ, Россия), представляющая собой набор периодически расположенных ячеек квадратной формы и постоянной высоты [2]. Параметры калибровочной решетки приведены в таблице.

Таблица. Параметры калибровочной решетки TGQ01

Высота калибровочной площадки, нм	Период между калибровочными площадками по X, мкм	Период между калибровочными площадками по Y, мкм	Размер калибровочной площадки по X, мкм	Размер калибровочной площадки по Y, мкм
20±1,5	3±0,05	3±0,05	1,5±0,35	1,5±0,35

В качестве тестовых жидкостных сред были выбраны: дистиллированная вода, натрий-фосфатный буфер *PBS*, боратный буфер (рН 9,18), NaOH 0,1 М и NaOH 0,5 М. Исследования проводились в контактном и полуконтактном режимах АСМ зондами фирмы Veeco (США) с

кантилеверами треугольной формы на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) Ntegra Aura фирмы НТ-МДТ.

Результаты и обсуждение. Проведены исследования калибровочной решетки TGQ1 в различных средах с использованием как длинного, так и короткого кантилевера АСМ зонда в контактном и полуконтактном режимах сканирования.

Выяснено, что при сканировании тестовой решетки в буферных растворах наблюдается уменьшение линейных размеров периодичности по осям X и Y на $\sim 8,3\%$ (с 3 мкм до $\sim 2,75$ мкм). Погрешности по высоте (ось Z) варьируются в достаточно широких пределах относительно эталона и составляют для полуконтактного режима значения 5,59–12,25% на длинном кантилевере и 1,33–39,14% на коротком кантилевере, а для контактного режима соответственно 1,97–25,89% на длинном и 13,93–34,25% на коротком кантилеверах.

Лучшее соответствие линейным размерам при работе в буферных растворах было получено с использованием длинного кантилевера в полуконтактном режиме. Отклонения от эталона по осям X и Y составили 3–12,25% в дистиллированной воде, 3–14,22% в PBS, 1,33–13,44% в боратном буфере, 3,22–20,22% в NaOH 0,1М и 5,73–16,18% в NaOH 0,5М растворе. Однако наилучшие по качеству изображения получены при работе с длинными кантилеверами в контактном режиме, при работе в полуконтактном режиме выявлено смазывание изображения (за исключением буфера PBS и NaOH 0,1М). При работе на короткой балке в контактном режиме выявлен дрейф и смазывание изображения (за исключением буфера NaOH 0,5М), при работе в полуконтактном режиме четкие изображения выявлены в буферах PBS и NaOH 0,1М.

Заключение. Проведены измерения эталонной тестовой решетки в различных буферных растворах и при различных режимах сканирования (контактный, полуконтактный), выполнен анализ полученных данных и выявлены особенности, возникающие при сканировании объектов в буферных растворах методом атомно-силовой микроскопии.

Таким образом, лучшими при работе в жидкости следует признать зонды на длинных балках. Для получения наилучшего соответствия размерам по осям X , Y , Z стоит использовать полуконтактные режимы сканирования, для получения наилучшего качества изображения - контактную методику измерения. Лучшими при работе в жидкости оказались буферы PBS и гидроксиды натрия.

Работа проведена при поддержке: Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.132.21.1777); Программы У.М.Н.И.К.

Литература

1. Kailas L., Ratcliffe E.C., Hayhurst E.J., Walker M.G., Foster S.J., Hobbs J.K. Immobilizing live bacteria for AFM imaging of cellular processes // *Ultramicroscop.* – 2009. – V. 109. – № 7. – P. 775–780.
2. Сайт фирмы НТ-МДТ [Электронный ресурс]. /TGQ1. – Режим доступа: <http://www.ntmdt-tips.com/products/view/tgq1>, свободный. – Загл. с экрана.

**ИЗУЧЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР РАЗНЫХ ТИПОВ С ПОМОЩЬЮ
ЛАЗЕРНОГО СКАНИРУЮЩЕГО ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МИКРОСКОПА****В.В. Захаров, С.В. Варжель****Научный руководитель – к.ф.-м.н., в.н.с. А.В. Вениаминов**

Устройства на основе периодических структур – решеток – широко используются в качестве дифракционных оптических элементов, носителей информации, элементов защиты в метрологии, оптоэлектронике, телекоммуникациях. Актуальной задачей является изучение процессов формирования и локализация решеток в различных средах.

Одним из способов решения этой задачи является визуализация периодических структур посредством сканирующей оптической микроскопии, позволяющей строить объемные изображения объектов и измерять локальные характеристики процессов, происходящих при их формировании. Наблюдение периодических структур в когерентном свете осложнено интерференционными эффектами, такими как эффект Талбота, состоящий в самовоспроизведении изображения периодической решетки.

В работе сравниваются результаты визуализации объемных решеток, записанных в оптических волокнах, полимерном и кристаллическом материале, с помощью конфокального лазерного сканирующего люминесцентного микроскопа Zeiss LSM 710.

Брэгговские решетки типа II были записаны в оптическом волокне, содержащем сердцевину, круговую изолирующую, эллиптическую напрягающую и круговую внешнюю оболочки. Волоконные брэгговские решетки наблюдались в проходящем свете лазерного и лампового источников с использованием методов дифференциального интерференционного контраста и темного поля, позволивших выявить составляющие решетку фазовые неоднородности, образованные рассеивающими свет фазовыми неоднородностями. Период наблюдаемой структуры соответствует периоду фазовой маски, с помощью которой была записана решетка.

В работе также рассмотрены изготовленные в НИУ ИТМО объемные голограммы, записанные в аддитивно окрашенных кристаллах фторида кальция и в полимерных пленках с фенантренхином. Механизмы формирования голограммных решеток в обоих материалах включают фотоиндуцированные трансформации центров светочувствительности (центров окраски и органических молекул) и их диффузионное перемещение, но результирующие профили пространственного распределения концентрации люминесцирующих центров в решетках сильно различаются, только в случае полимерного материала повторяя синусоидальное распределение интенсивности записываемого интерференционного поля.

УДК 535.343.2

**ФОТООБЕСЦВЧИВАНИЕ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ
КЛАСТЕРОВ И НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА
В ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНЫХ СТЕКЛАХ****Д.А. Игнатъев****Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров**

Фототерморефрактивные (ФТР) стекла [1] представляют собой перспективный класс фоточувствительных материалов, разработанных для записи высокоэффективных объемных фазовых голограмм. ФТР стекла – это сложные гетерофазные структуры, в которых под действием света и последующей термической обработки выделяются наночастицы серебра, на которых вырастают нанокристаллы $\text{NaF-AgBr}(\text{NaF-AgCl})$ [2]. Металлические коллоиды,

распределенные в стекле, вносят оптическую нелинейность третьего порядка на длине волны, близкой к длине волны поверхностного резонанса металлического кластера. Процесс разрушения молекулярных комплексов серебра, образующихся в ФТР стекле после УФ облучения путем воздействия лазерным излучением различных длин волн, был описан в работе [3].

Целью работы было проведение фотообесцвечивания полос поглощения наночастиц и молекулярных кластеров серебра в ФТР стеклах импульсным лазерным излучением.

В данной работе исследовались образцы фототерморефрактивных стекол натриевоалюмоцинкасиликатной системы, активированной CeO_2 , Sb_2O_3 , и Ag_2O и содержащей разные типы галогенидов (фтор, бром, хлор).

Стекла синтезировались при температуре 1450°C в воздушной атмосфере. Температура стеклования составляла $475\text{--}495^\circ\text{C}$ в зависимости от содержания фторидов. Образцы стекол облучались УФ излучением ртутной лампы высокого давления и проходили температурную обработку при $T=530^\circ\text{C}$. Облучение производилось излучением импульсного YAG:Nd^{3+} лазера (Solar LQ-129) с длиной волны 532 нм. Энергия импульса составляла 68 мДж, длительность импульса – 13 нс и частота следования импульсов 10 Гц.

Показано, что:

1. максимум полосы поглощения плазмонного резонанса серебряных частиц варьируется в диапазоне 410–450 нм в зависимости от размера и окружения частицы, а также состава стекла;
2. при облучении стекол, содержащих наночастицы серебра, происходит существенное изменение спектров поглощения. Полоса поглощения плазмонного резонанса серебряных частиц уменьшается в зависимости от дозы излучения, вплоть до полного ее исчезновения;
3. фотодеструкции подвержены наночастицы серебра, как находящиеся в окружении стеклообразующей матрицы, так и частицы находящиеся внутри оболочки из кристаллических фаз (NaF-AgBr и NaF-AgCl);
4. на кинетику процесса фотообесцвечивания существенное влияние оказывает состав исходного стекла и тип вводимых галогенидов. Так, при равных условиях УФ-облучения и термообработки, стекла, содержащие бромиды, обесцвечиваются значительно легче, чем стекла, содержащие хлориды.

На основании спектров поглощения сделан вывод, что под действием импульсного лазерного излучения происходит фотофрагментация наночастиц серебра с фотоионизацией атомов и переходом их в ионное состояние.

Литература

1. Stookey S.D., Beall G.H., Pierson J.S. Full-color photosensitive glass // J. Appl. Phys. – 1978. – V. 49. – № 10. – P. 5114–5123.
2. Никоноров Н.В., Паньшева Е.И., Туниманова И.В., Харченко М.В. Особенности окрашивания мультихромных стекол под действием лазерного излучения // Физика и химия стекла. – 1993. – Т.19. – № 3. – С. 442–448.
3. Ignatiev A.I., Ignatiev D.A., Nikonorov N.V. Photodestruction of silver nano particles in nanoglassceramics, 10th International Symposium on Crystallization in Glasses and Liquids: Programme and Abstracts. – 2012. – Goslar, Germany. – P. 82.

ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Ю.А. Игнатьева (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики),

К.Н. Касанов, Р.А. Евсеев, В.А. Попов (Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова)

Научный руководитель – д.т.н., доцент М.В. Успенская

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

В настоящее время акриловые сополимеры используются в различных областях, таких как, промышленности, медицине, сельском хозяйстве и так далее. Одним из основных характеристик акриловых сополимеров является их сорбирующая способность. В медицине акриловые сополимеры широко используются благодаря их способности к поглощению и удержанию различных жидкостей. Существенным недостатком акриловых гидрогелей являются низкие деформационно-прочностные свойства. Одним из способов решения указанной задачи является создание нанокomпозиционных материалов.

Целью работы являлся синтез акриловых сополимеров и нанокomпозитов, где в качестве наполнителя полимерной матрицы была использована нативная и модифицированная серебром белгородская монтмориллонитовая глина.

В ходе работы были получены полимерные композиции на основе акриловой кислоты и акриламида в массовом соотношении 70:30. Композиции были синтезированы путем радикальной полимеризации в водной среде, при температуре 45°C. В качестве инициатора была использована система: персульфат аммония – тетраметилэтилендиамин, а N,N' – метиленбисакриламид в качестве сшивающего агента. Концентрация модификатора полимерной матрицы – монтмориллонитовая глина варьировалась в пределах от 0 до 5 массовых процентов. Время синтеза композиций составило 1–2 ч.

В ходе экспериментов также была изучена зависимость времени начала гелеобразования от концентрации наполнителя – монтмориллонитовой глины. Показано, что с увеличением доли монтмориллонитовой глины в составе композиции время начала гелеобразования уменьшается в 1,5–2 раза, что свидетельствует об ингибиторных свойствах наполнителя.

На основании экспериментальных данных представленных ВМА доказана бактерицидная эффективность новых полимерных нанокomпозиционных материалов в отношении референтных госпитальных штаммов основных возбудителей раневой инфекции, в частности метецилин-резистентного штамма золотистого стафилококка.

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ CDSE/ZNS И МОЛЕКУЛАМИ ПОРФИРИНА В ЖЕСТКОМ РАСТВОРЕ

М.А. Курочкина

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.О. Орлова

Изучение порфиринов и родственных молекул, представляющих класс тетрапиррольных соединений, является одним из наиболее развивающихся направлений современной науки [1]. В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию гибридных структур на основе полупроводниковых квантовых точек (КТ) и тетрапиррольных соединений, имеющих высокий квантовый выход генерации синглетного кислорода. В таких структурах, возможно, создать условия, при которых перенос энергии от КТ к молекуле

органического фотосенсибилизатора будет приводить к улучшению функциональных свойств молекулы, в частности, к заметному увеличению эффективности генерации синглетного кислорода тетрапиррольной молекулой в результате эффективного переноса энергии по механизму FRET (Förster Resonant Energy Transfer) от КТ к молекулам [2–4].

В представленной работе в образцах полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) мембран сформированы структуры на основе гидрофобных полупроводниковых квантовых точек CdSe/ZnS и положительно заряженных гидрофильных молекул Тетра(*p*-триметиламино)фенилпорфина (ТАФП). Анализ спектрально-люминесцентных свойств образцов показал, что последовательное увеличение концентрации молекул порфирина в мембранах с внедренными КТ приводит к значительному уменьшению интенсивности люминесценции и сокращению времени затухания люминесценции нанокристаллов. При этом происходит последовательное увеличение сенсibilизированной люминесценции ТАФП в рассматриваемых образцах. Совокупность этих данных свидетельствует о том, что в трековых мембранах наблюдается эффективный дальнедействующий резонансный перенос энергии фотовозбуждения (FRET, Förster Resonant Energy Transfer) от квантовых точек к молекулам ТАФП. Отсутствие известных механизмов связывания данных компонентов в комплекс, а также неизменность спектра поглощения порфирина в присутствии в мембранах КТ позволяет говорить о том, что в данной матрице реализованы условия «жесткого» раствора, в котором за время передачи энергии фотовозбуждения не происходит изменения расстояния и взаимной ориентации донора (КТ) и молекул акцептора (ТАФП).

Анализ экспериментальных данных показал, что с увеличением концентрации акцептора (ТАФП) интенсивность люминесценции донора (КТ) уменьшается вдвое быстрее, чем его время затухания люминесценции. Также было установлено, что изменение диаметра ядра КТ от 2,5 нм до 5,0 нм, которое сопровождается изменением условий FRET, приводит к заметному изменению экспериментальной эффективности переноса энергии от КТ к молекулам порфирина. Так, максимальная эффективность переноса энергии для структур с КТ с диаметром ядра 2.5 нм составила 50%, в то время как для КТ 3,5 нм и 5,0 нм она составила 41% и 31% соответственно. Полученные результаты хорошо согласуются с условиями FRET для выбранных донорно-акцепторных пар в жестких растворах [5].

Наличие эффективного переноса энергии от КТ к молекулам порфирина приводит к 40% увеличению интенсивности люминесценции молекул порфирина. Следует отметить, что в результате внедрения молекул ТАФП в трековую мембрану их квантовый выход люминесценции не меняется. Совокупность этих данных позволяет говорить о действительном увеличении интенсивности люминесценции молекул порфирина по сравнению с их свободной формой в водном растворе.

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что на основе структур с участием полупроводниковых CdSe/ZnS КТ и тетрапиррольных молекул, внедренных в полимерные трековые мембраны, могут быть созданы микрофлюидные устройства с эффективной генерацией синглетного кислорода за счет переноса энергии по механизму FRET.

Литература

1. Chan W.M., Li K.K., Liu D.T., Lai T.Y., Chong K.K., Lam D.S. / Photodynamic therapy with verteporfin in laser-induced choroidal neovascularization // *Am. J. Ophthalmol.* – 2003. – V. 136. – № 3. – P. 565–567.
2. Bera D., Qian L., Tseng T.-K. and Holloway P.H. Quantum Dots and Their Multimodal Applications: A Review // *Materials.* – 2010. – V. 3. – P. 2260–2345.
3. Ingrosso Ch., Panniello A.M., Comparelli R., Curri M. L. and M. Striccoli M. Colloidal Inorganic Nanocrystal Based Nanocomposites: Functional Materials for Micro and Nanofabrication // *Materials.* – 2010. – V. 3. – P. 1316–1352.

4. Mazumder S., Dey R., Mitra M. K., Mukherjee S., and Das G.C. Review: Biofunctionalized Quantum Dots in Biology and Medicine // J. of Nanomaterials. – V. 2009. – Article ID 815734. – 17 p.
5. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. – М.: Наука, 1978. – С. 37.

УДК 57.086.2+57.086.164 + 53.086

ИЗУЧЕНИЕ БАКТЕРИЙ E.COLI В ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

И.В. Кухтевич, М.В. Жуков

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Научный руководитель – к.т.н., ст.н.с. А.А. Евстапов

(Институт аналитического приборостроения РАН; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Введение. На текущий момент интерес к изучению биологических объектов (клеток, бактерий, ДНК и т.д.) методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) существенно возрастает из-за возможности получения более высокого пространственного разрешения, чем методами традиционной оптической микроскопии [1]. Однако существует ряд особенностей метода АСМ, которые препятствуют его широкому распространению при исследовании биологических объектов: необходимость фиксации объекта исследования на время измерений; длительное время сканирования образца. Для неживых объектов или структур, обработанных специальным способом, фиксацию на подложке легко реализовать, однако биологические объекты при этом подвергаются дегидратации, что вносит существенные искажения в получаемые методом АСМ изображения. Устранить данную проблему можно, используя специальные методы пробоподготовки, которые позволяют проводить измерения не только на воздухе, но и в жидкости. К ним следует отнести методы химической обработки пробы, методы с применением гелей, методы функциональной обработки поверхности и методы с использованием специальных материалов и структур [2–4].

Основываясь на вышесказанном, целью данной работы являлось изучение возможности применения гелеобразующих веществ (желатина и агар-агара) для фиксации бактерий E.Coli в нативном состоянии в жидкости для исследований методом АСМ.

Экспериментальная часть. Желатин/агар-агар массовой долей 0,5% и 1,8% разводился в дистиллированной воде в термоустойчивой стеклянной посуде. Полученный раствор доводился до кипения, а затем разливался в заранее подготовленные стерильные чашки Петри, после чего при комнатной температуре проводилось отверждение.

Перед проведением исследований по подбору наилучшей концентрации желатина/агар-агара в исходном растворе для фиксации бактерии E.Coli в жидкости проводилось их окрашивание флуоресцеин – изотиоцианатом (fluorescein isothiocyanate – FITC). Регистрация результатов фиксации бактерий E.Coli на геле осуществлялась при помощи конфокального лазерного сканирующего микроскопа Leica TCS SL (Германия). Возбуждение флуоресценции производилось на длине волны 488 нм, а детектирование в диапазоне 510–530 нм.

Было замечено, что при 3-х кратной промывке дистиллированной водой пленки желатина с распределенными на поверхности бактериями E.Coli, (как для 0,5%, так и для 1,8%) наблюдается фиксация как минимум половины бактерий E.Coli. На пленке агар-агара массовой долей 0,5% наблюдалась худшая фиксация по сравнению с желатином, в то время

как на пленке агар-агара массовой долей 1,8% наблюдается лучшая фиксация, чем для желатина.

При 5-ти кратной промывке в случае пленок желатина (0,5%, 1,8% в исходном растворе) наблюдалось меньшее число зафиксированных бактерий *E.Coli*, чем в случае 3-х кратной промывки. Для пленок агар-агара массовой долей 0,5% наблюдались осцилляции большинства бактерий *E.Coli*, свидетельствующие о локальном (точечном) связывании с агар-агаром, в то время как для агар-агара массовой долей 1,8% наблюдалась лучшая фиксация бактерий *E.Coli*, чем для желатина.

На основании результатов вышеописанных экспериментов было решено использовать агар-агар массовой долей 1,8% в исходном растворе для проведения исследований бактерий *E.Coli* методом АСМ.

Измерения проводились на сканирующем зондовом микроскопе ИНТЕГРА Аура (НТ-МДТ, Россия) в контактном режиме.

В ходе измерений методом АСМ удалось визуализировать отдельную бактерию *E.Coli* в жидкости, зафиксированную на пленке агар-агара [5]. Однако оказалось, что из-за наличия микротечений в жидкости, где находился образец, высокой эластичности пленки агар-агара, в ряде случаев, при попадании жидкости под пленку, наблюдалось ее набухание и деформация. Это приводило к тому, что не удавалось измерить относительно протяженные участки поверхности с высоким пространственным разрешением и, следовательно, визуализировать группы бактерий *E.Coli*.

Для устранения данного эффекта было решено нанести агар-агар на пластинку слюды, чтобы на ее поверхности образовалась тонкая пленка. Таким образом, удалось визуализировать не только одиночные бактерии, но и группы бактерий *E.Coli* [5]. В результате исследований были получены оценки размеров бактерий *E.Coli*, которые соответствуют литературным данным (диаметр ~0,5 мкм, длина ~2–3 мкм) [6].

Заключение. В рамках проделанной работы было показано, что использование такого гелеобразующего вещества, как агар-агара, нанесенного на поверхность слюды, позволяет проводить измерения бактерий *E.Coli* методом АСМ в жидкости в нативном состоянии и с высоким пространственным разрешением.

Работа проведена при поддержке: Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.132.21.1777); Программы У.М.Н.И.К.

Литература

1. Kailas L., Ratcliffe E.C., Hayhurst E.J., Walker M.G., Foster S.J., Hobbs J.K. Immobilizing live bacteria for AFM imaging of cellular processes // *Ultramicroscopy*. – 2009. – V. 109. – № 7. – P. 775–780.
2. Yuanqing Chao, Tong Zhang. Optimization of fixation methods for observation of bacterial cell morphology and surface ultrastructures by atomic force microscopy // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2011. – V. 92. – № 2. – P. 381–392.
3. Rikke Louise Meyer, Xingfei Zhou, Lone Tang, Ayyoob Arpanaei, Peter Kingshott, Flemming Besenbacher. Immobilisation of living bacteria for AFM imaging under physiological conditions // *Ultramicroscopy*. – 2010. – V. 110. – № 11. – P. 1349–1357.
4. Yves F. Dufrene. Atomic Force Microscopy, a Powerful Tool in Microbiology // *Jurnal of bacteriology*. – 2002. – V. 184. – № 19. – P. 5205–5213.
5. Кухтевич И.В., Жуков М.В., Чубинский-Надеждин В.И., Букатин А.С., Евстапов А.А. Фиксация бактерий *E.Coli* на подложке для измерений в жидкости методом атомно-силовой микроскопии // *Научное приборостроение*. – 2012. – Т. 22. – № 4. – С. 56–61.
6. Prescott LM, Harley JP, Klein D. *Microbiology (7th Ed)*. McGraw-Hill companies. – New York. – 2008.

**КИНЕТИКА РОСТА PbSe КВАНТОВЫХ ТОЧЕК
ВО ФТОРОФOSФАТНЫХ СТЕКЛАХ****Р.В. Лебедев, А.Н. Абдршин, А.В. Полякова, А.О. Трофимов
Научный руководитель – д.х.н., профессор Е.В. Колобкова**

Стекла, содержащие полупроводниковые квантовые точки являются материалом, привлекательным для пассивной модуляции добротности и синхронизации мод, поскольку положение системы пиков поглощения определяется размером квантовой точки, что дает возможность «подстройки» спектральной области оптической нелинейности, наблюдающейся в области первого экситонного пика поглощения. Эффект размерного квантования положен в основу создания насыщающегося поглотителя. Для решения этой задачи необходимо установить влияние условий синтеза квантовых точек (состава, концентрации вводимых полупроводниковых кристаллов и режимов термообработки) на спектральные и нелинейные свойства нанокompозита стекло – полупроводниковый нанокристалл.

В результате проведенного исследования были получены материалы, содержащие квантовые точки, чьи технологические и эксплуатационные характеристики намного превышают аналогичные характеристики аналогов. Способ получения материала для насыщающегося поглотителя и вариация его оптических параметров осуществляется значительно легче, чем для ранее разработанных силикатных стекол и органических нанокompозитов. Диапазон длин волн для использования в качестве насыщающихся поглотителей расширен до 2950 нм.

Изучена кинетика роста PbSe-квантовых точек для оптимизации технологического процесса получения стеклокерамики с заданными характеристиками с целью использования полученного материала для создания и насыщающихся поглотителей в диапазоне длин волн 1000–2850 нм. Было обнаружено, что для оптимизации распределения по размерам и приближении этого распределения к монодисперсному, необходим двух стадийный режим термообработки. Первая низкотемпературная стадия (T_1) должна обеспечить рост определенного числа зародышей. Вторая стадия (T_2) должна приводить к росту нанокристаллов определенного размера в зависимости от времени термообработки. Для ряда T_1 и T_2 были изучены кинетические зависимости роста.

Показано: что определяющей стадией для получения квантовых точек с узким распределением по размерам является первая стадия, причем T_1 должна быть значительно (на 50–60°C) ниже температуры стеклования эта стадия должна совпадать со стадией отжига стекол; температура T_2 является определяющей для максимального размера квантовой точки, так как для каждой T_2 существует свой определенный размер нанокристалла, при достижении которого рост прекращается. Чем выше T_2 , тем большие размеры нанокристаллов достижимы; определена независимость размера нанокристаллов от концентрации, растворенной в стекле полупроводниковой составляющей. Таким образом, в случае неоднородности распределения полупроводника в исходном стекле термообработка не приводит к разбросу нанокристаллов по размерам, а ведет только к локальному изменению коэффициента поглощения; изменение T_2 позволяет получить квантовые точки одинакового размера, с меньшей оптической плотностью без изменения размерного распределения, близкого к монодисперсному ($\Delta R/R=7\%$).

НЕСТАЦИОНАРНОЕ МЕЖЗОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ НАНОСТЕРЖНЯМИ

М.Ю. Леонов

Использование анизотропных наночастиц открывает новые возможности для создания сложных гетеросистем нанометрового масштаба. Несмотря на важность анизотропных частиц, таких как наностержни, для практических применений, их физические свойства, включая динамику электронной подсистемы, остаются недостаточно изученными. Этот пробел в понимании может быть заполнен путем анализа оптических откликов, измеренных с помощью нестационарной оптической спектроскопии накачка-зондирование. Поэтому развитие теоретического описания спектроскопии накачка-зондирование с учетом анизотропии наночастиц является очень важной задачей. Применение такой теории для анализа экспериментальных данных может положить конец долгим дискуссиям о доминирующих релаксационных механизмах электронной подсистемы наночастиц.

Целью работы является развитие теоретического описания нестационарного метода накачка-зондирование, а также анализ применимости предлагаемых физических моделей для изучения релаксационных параметров электронных состояний нанокристаллов.

В данной работе предложено теоретическое описание одной из схем оптического метода накачка-зондирование, а именно нестационарного межзонного поглощения энергии пробного импульса, индуцированного импульсом накачки. Предполагается, что несущие частоты обоих импульсов близки к резонансу с одним и тем же межзонным переходом электронной подсистемы квантовой точки. Определены условия, при которых зависимость поглощенной энергии пробного импульса от времени его задержки относительно импульса накачки является моноэкспоненциальной, а показатель экспоненты обратно пропорционален времени жизни исследуемого состояния электронной подсистемы наностержней.

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПЛОТНОУПАКОВАННЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА СВИНЦА В ПОРИСТОЙ МАТРИЦЕ

А.П. Литвин, П.С. Парфенов, Е.В. Ушакова

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор А.В. Баранов

Системы плотноупакованных квантовых точек (КТ) халькогенидов свинца представляют большой интерес с точки зрения использования их в устройствах оптоэлектроники и солнечной энергетики. Актуальной является разработка методик создания таких систем. В работе продемонстрирован эффективный метод создания систем плотноупакованных КТ в пористой матрице с заданными оптическими параметрами. Образцы пористой матрицы с внедренными КТ демонстрируют линейную зависимость оптической плотности и интенсивности люминесценции от концентрации исходных коллоидных растворов.

Исследованы параметры люминесценции КТ сульфида свинца диаметром 3–8,5 нм, внедренных в пористую матрицу по данной технологии. Наблюдаемые времена жизни люминесценции зависят от размера КТ и меняются в диапазоне 435–58 нс для КТ диаметром 3 и 7,4 нм соответственно. Красный сдвиг полосы люминесценции, возрастающий при увеличении концентрации КТ в матрице, свидетельствует о процессах переноса энергии фотовозбуждения между КТ вследствие дисперсии по размерам. Рассмотрены процессы старения систем плотноупакованных КТ сульфида свинца, продемонстрировано

превалирующее влияние процессов окисления на оптические свойства данных структур.

УДК 535-243

ФОТОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И МОЛЕКУЛ ХЛОРИНА E6 В ВОДНЫХ СРЕДАХ

И.В. Мартыненко

Научный руководитель – к.т.н., доцент А.О. Орлова

Фотофизические свойства тетрапиррольных соединений и комплексов с их участием представляют значительный интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Это связано с тем, что тетрапиррольные соединения обладают важнейшими качествами, позволяющими использовать их в качестве молекул-фотосенсибилизаторов (ФС) в фотодинамической терапии (ФДТ) – способностью эффективно генерировать синглетный кислород [1] ионотропностью (способностью концентрироваться в зараженных участках ткани), что совместно с высоким коэффициентом молярной экстинкции является основанием их широкого применения в качестве фотосенсибилизаторов.

В последнее десятилетие активно исследуются комплексы тетрапирролов с коллоидными полупроводниковыми квантовыми точками (КТ) [2]. Полупроводниковые квантовые точки обладают рядом уникальных свойств, которые позволяют использовать их в качестве донора энергии в комплексах с органическими молекулами [3]. В частности, в комплексах с тетрапиррольными соединениями эффективная передача энергии фотовозбуждения по ферстеровскому индуктивно-резонансному механизму (FRET) от КТ к молекулам может значительно увеличить эффективность генерации синглетного кислорода по сравнению со свободными тетрапирролами.

Сдругой стороны, принципиально важным моментом при создании таких комплексов является сохранение фотофизических свойств тетрапиррольного компонента, в частности, квантового выхода люминесценции тетрапиррольных молекул, так как он коррелирует с квантовым выходом генерации синглетного кислорода. Несмотря на большое количество работ, ведущихся в данном направлении, нет систематических данных о механизмах образования комплексов, изменения фотофизических свойств тетрапиррольных молекул, зависимости эффективности внутри комплексного переноса энергии фотовозбуждения от КТ к тетрапиррольным компонентам от типа связывания частиц в комплекс и от стехиометрии данных комплексов.

Целью работы являлось создание комплексов КТ-тетрапиррольная молекула с эффективным внутрикомплексным переносом энергии, определение зависимости фотофизических свойств комплексов от типа связывания компонентов в комплекс, стехиометрии данных комплексов и ближайшего окружения молекул.

В представленной работе исследованы фотофизические свойства комплексов, полученных в результате ковалентного связывания и электростатического взаимодействия, водорастворимых квантовых точек CdSe/ZnS с молекулами хлорина е6 в водном растворе, и комплексов, полученных в результате электростатического взаимодействия водорастворимых квантовых точек CdTe в плазме крови. Хлорин е6 относится к тетрапиррольным соединениям и сегодня используется в качестве основного компонента препарата для фотодинамической терапии «Фотодитазин» [4].

Ковалентное связывание в комплекс квантовых точек с молекулами хлорина е6 осуществлялось с использованием молекул линковщиков – 1-этил-3(3-диметиламинопропил) карбодиимид гидрохлорида (EDAC). Перед этим гидрофобные CdSe/ZnS/ТОПО КТ по стандартной процедуре солибилизировали цистеином, после этого проводили замещение цистеина на полиэтиленгликоль (PEG). Создание комплексов квантовых точек с молекулами

хлорина также возможно в результате электростатического взаимодействия периферических отрицательнозаряженных карбоксильных групп хлорина с положительными группами молекул солюбилизатора КТ.

Анализ фотофизических свойств комплексов показал, что спектральная форма хлорина еб, связанного в комплекс с КТ, соответствует форме хлорина еб, связанного с элементами плазмы крови [5], встроенного в полимеры [6], а также растворенного в апротонных растворителях [7], и зависит не от типа связывания в комплекс, а от гидрофобных свойств окружения молекулы. В комплексах КТ-хлорин еб наблюдалась сенсibilизированная люминесценция хлорина еб, свидетельствующая об эффективном переносе энергии. Было установлено, что экспериментальная эффективность переноса энергии в комплексах CdSe/ZnS-хлорин еб составляет 5 и 30% от теоретически возможного значения в случае электростатического взаимодействия и ковалентного связывания, а в комплексах с CdTe квантовыми точками составляет 15%. При этом наблюдалось падение квантового выхода люминесценции хлорина еб на 70% в комплексе с CdSe/ZnS КТ, и 40% при использовании CdTe КТ. Это свидетельствует об образовании каналов безызлучательной релаксации фотовозбужденного состояния КТ, которые конкурируют с процессом внутрикомплексного переноса энергии. Величина потенциала ионизации связанной формы хлорина еб [8] позволяет говорить о том, что одним из основных каналов дезактивации возбужденного состояния КТ в данных комплексах является фотоиндуцированный перенос электрона от хлорина еб к КТ.

Литература

1. Maria C. DeRosa, Robert J. Crutchley. Photosensitized singlet oxygen and its applications // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2002. – V. 233–234. – P. 351–371.
2. Maslov V., Orlova A., Baranov A., Combination Therapy: Complexing of QDs with tetrapyrroles and other dyes. In: «Photosensitisers in medicine, Environment, and Security». Т. Nyokong, V. Ahsen, Eds. Part II, Chapter 3 // Springer-Verlag. 1st Edition. – 2011. – 699 p.
3. Федоров А.В., Баранов А.В. Оптика квантовых точек. В кн. Оптика наноструктур / Под ред. А.В. Федорова. – СПб: Недра, 2005. – 181 с.
4. А61Р35/00 RU. Способ получения водорастворимых хлоринов / Пономарев Г.В.; Решетников А.В.; Гусева-Донская Т.Н.; Швец В.И.; Баум Р.Ф.; Ашмаров В.В. (Закрытое акционерное общество «Вета»). – № 98100545/04; Заявл. 22.01.1998// Изобретения (Заявки и патенты).
5. Mojzisoва H., Bonneau S. et al. The pH-dependent distribution of the photosensitizer chlorin еб among plasma proteins and membranes: a physico-chemical approach // *J. Biochimica et Biophysica Acta*. – 2007. – V. 1768. – P. 366–374.
6. Isakau H.A., Parkhats M.V. et al. Toward understanding the high PDT efficacy of chlorin еб–polyvinylpyrrolidone formulations: Photophysical and molecular aspects of photosensitizer–polymer interaction in vitro // *Photochem. Photobiol. B*. – 2008. – V. 92. – P. 165–174.
7. Пархоц М.В., Галиевский В.А., Сташевский А.С., Трухачева Т.В., Джагаров Б.М. Динамика и эффективность фотосенсibilизированного образования синглетного кислорода хлорином еб: влияние pH раствора и поливинилпирролидона // *Оптика и спектроскопия*. – 2009. – Т. 107. – № 6. – С. 1026–1032.
8. Xiao-Feng Wang, Osamu Kitao. Natural Chlorophyll-Related Porphyrins and Chlorins for Dye-Sensitized Solar Cells // *Molecules*. – 2012. – V. 17. – P. 4484–4497.

ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ МЕЖДУ КРАСИТЕЛЯМИ В НАНОЧАСТИЦАХ ИЗ КОМПЛЕКСОВ ТРЕХВАЛЕНТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Л.Ю. Миронов

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.Л. Ермолаев

Интерес к исследованию люминесцирующих наночастиц вызван их применением в области иммуно-флуоресцентного анализа и в исследовании строения биологических объектов. Актуальной является задача детектирования малых концентраций люминесцентных меток в растворе и получение набора ярко люминесцирующих маркеров в различных областях спектра. Внедрение красителей в наночастицы из комплексов ионов трехвалентных металлов и β -дикетонов позволяет увеличить интенсивность люминесценции красителей с помощью переноса энергии от комплексов. Изучение процесса переноса энергии позволяет определить условия наилучшей сенсibilизации красителей. В ряде работ было показано, что возможно получать 10–20 кратные усиления для красителей в концентрации менее 50 нМ. Вместе с тем было замечено, что часть энергии, поглощенной наночастицами, претерпевает тушение на примесях. Целью работы является изучение взаимовлияния двух красителей на их сенсibilизованную флуоресценцию в наночастицах. Также предполагается определить возможность усиления сенсibilизованной флуоресценции одного красителя в присутствии другого и возможность одновременного контроля двух флуоресцентных маркеров.

В работе была исследована сенсibilизованная флуоресценция для пар красителей в наночастицах из комплексов Lu, La, Sc с *n*-фенилбензоилтрифторацетоном (PhBTA) либо нафтоилтрифторацетоном (NTA) и 1,10-фенантролином (phen). Показано, что при формировании наночастиц в растворе с суммарной концентрацией двух красителей, меньшей или соизмеримой с концентрацией наночастиц, не наблюдается влияние красителей на сенсibilизованную флуоресценцию друг друга. Была исследована зависимость флуоресценции красителей родамина 6G и нильского синего в концентрациях (10–200 нМ) от присутствия кумарина 30 в концентрации в десять раз меньшей концентрации комплексов (1 мкМ). Обнаружено усиление нильского синего или родамина 6G при внедрении в наночастицы кумарина 30. Такой же эффект наблюдается для нильского синего при введении 1 мкМ родамина 6G. При сенсibilизации отдельных красителей, наблюдаемое усиление меньше того, что можно ожидать исходя из соотношений концентраций комплексов и красителя. Полученный эффект усиления свидетельствует о том, что введение большого количества красителя, способного собирать большую часть возбуждения комплексов и эффективно передавать энергию на краситель с нижележащим синглетным уровнем, позволяет в некотором количестве подавить перенос энергии на тушащую примесь.

В процессе работы было исследовано усиление сенсibilизованной флуоресценции красителей нильского синего и родамина 6G за счет введения второго красителя в наночастицу. Была продемонстрирована возможность контроля малых концентраций двух красителей в растворе.

АНИЗОТРОПИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА АНСАМБЛЕМ КОЛЛОИДНЫХ НАНОСТЕРЖНЕЙ CdSe/ZnS

М.В. Мухина

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.Г. Маслов

Существенное развитие технологий синтеза полупроводниковых коллоидных нанокристаллов позволило контролировать форму, размеры и структуру таких объектов и управлять их оптическими свойствами [1]. Анизотропия формы нанокристалла при переходе от сферических нанокристаллов (квантовых точек) к вытянутым нанокристаллам (квантовым стержням), тетраподам и более сложным гетероструктурам приводит к возникновению существенной анизотропии оптических свойств [2].

Исследование поглощения электромагнитного излучения полупроводниковыми наностержнями позволяет обнаружить фундаментальные особенности проявления квантово-механических эффектов в анизотропных наноструктурах. Вместе с тем, с практической точки зрения анизотропия поглощения и люминесценции существенно расширяет потенциальные области применения наностержней по сравнению со сферическими нанокристаллами. Эти наноструктуры могут применяться в электрохромных устройствах, нанотранзисторах, в качестве активных элементов фотовольтаических и оптоэлектронных устройств [3–5]. Для реализации управления анизотропией оптических свойств наностержней на практике требуется создать ансамбль нанокристаллов, ориентированных в выделенном направлении.

Цель работы заключается в создании условий, обеспечивающих преимущественную ориентацию ансамбля полупроводниковых наностержней в полимерной пленке и исследование особенностей проявления анизотропии оптических свойств нанокристаллов при поглощении электромагнитного излучения.

На первом этапе были получены образцы полимерной пленки из поливинилбутирала с добавлением 3,6% пластификатора (дибутилфталата), содержащей наностержни CdSe/ZnS (диаметр ~ 3,5 нм и длина стержней ~ 25 нм), синтезированные по методике, описанной в работе [6]. Толщина пленки составила 100 мкм, концентрация нанокристаллов в пленке составляла $C \sim 2 \cdot 10^{-5}$ моль/литр. На полученных с пятидесятикратным увеличением микроизображениях пленки агрегаты отсутствуют, что указывает на однородное распределение нанокристаллов в полимерной структуре.

Подготовленные образцы пленки были растянуты в четыре раза вдоль одного из направлений для создания ориентации всего ансамбля нанокристаллов в образце. Исследование анизотропии поглощения образцов проводилось при облучении образцов неполяризованным светом, а также светом с двумя взаимно перпендикулярными направлениями поляризации (параллельным и перпендикулярным направлению ориентации нанокристаллов в пленке). Спектры поглощения регистрировались для двух взаимно перпендикулярных положений образца. Это позволило исключить влияние аппаратных эффектов.

Анизотропия поглощения оценивалась по степени наблюдаемого дихроизма $\Delta D = (D_{\parallel} - D_{\perp})/D$, где D – оптическая плотность образца, зарегистрированная при облучении неполяризованным светом, а D_{\parallel} и D_{\perp} – оптические плотности, зарегистрированные при облучении светом, поляризованным параллельно и перпендикулярно направлению ориентации нанокристаллов в образце, соответственно. Полученные данные указывают на различную степень анизотропии поглощения в области для трех первых электронных переходов. Рассчитанная на основе экспериментальных данных степень дихроизма в области первого электронного перехода максимальна и составляет, в среднем, 27–29%. В области второго электронного перехода зарегистрированная степень дихроизма меньше в 1,4 раза, в области третьего перехода – в 1,5 раза.

Результатом проведенной работы стало получение полимерной пленки с высоким содержанием наностержней. В полученной пленке отсутствовали агрегаты нанокристаллов, что позволило получить высокие значения степени дихроизма для образцов пленки, растянутых в четыре раза вдоль одного из направлений. Важным результатом также стала зафиксированное уменьшение значения степени анизотропии при увеличении энергии перехода.

Литература

1. Peng X., Manna L., Yang W., Wickham J., Scher E., Kadavanich A. and Alivisatos A. Shape control of CdSe nanocrystals // *Nature*. – 2000. – V. 404. – P. 59–61.
2. Hu J., Li L.-S., Weidong Y., Manna L., Wang L.-W. and Alivisatos A.P. Linearly polarized emission from colloidal semiconductor quantum rods // *Science*. – 2001. – V. 292. – P. 2060–2063.
3. Baker J., Widmer-Cooper A., Toney M., Geissler P., Alivisatos A. Device-Scale Perpendicular Alignment of Colloidal Nanorods // *Nano Lett.* – 2010. – V. 10. – P. 195–201.
4. Wu K.-J., Chu K.-C., Chao C.-Y., Chen Y.-F., Lai C.-W., Kang C.-C., Chen C.-Y. and Chou P.-T. CdS nanorods imbedded in liquid crystal cells for smart optoelectronic devices // *Nano Lett.* – 2007. – V. 7. – P. 1908–1913.
5. Reiss P., Couderc E., De Girolamo J., Pron A. Conjugated polymers/semiconductor nanocrystals hybrid materials-preparation, electrical transport properties and applications // *Nanoscale*. – 2011. – V. 3. – P. 446–489.
6. Artemyev M., Moller B. and Woggon U. Unidirectional Alignment of CdSe Nanorods // *Nano Lett.* – 2003. – V. 3(4). – P. 509–512.

УДК 535.33; 628.9.037

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРАСНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ ДЛЯ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

Я.А. Некрасова

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров

Белые светоизлучающие диоды (СИД) в настоящее время вызывают большой интерес с практической точки зрения, так как обладают низким потреблением энергии, длительным сроком службы, малым размером, высокой скоростью переключения, отсутствием в своем составе элементов, загрязняющих окружающую среду. Поэтому, несмотря на сравнительно высокую стоимость источники света на основе СИДов широко используются не только при разработке приборов (мониторы, сигнальные и коммуникационные приборы), но и активно вытесняют традиционные источники в средствах наружного и внутреннего освещения в быту, промышленности и транспорте.

Одним из наиболее используемых типов белых СИДов являются люминофорные светодиоды, излучение синего диода смешивается с желто-зеленой люминесценцией от люминофора. Соотношение спектральных компонент от диода и люминофора определяет хроматические характеристики белого СИДа. Однако такие источники белого света обладают низкими индексами цветопередачи ($CRI < 75$). Увеличение CRI возможно за счет введения красной компоненты спектра. Поэтому особое внимание уделяется разработке эффективных люминофоров красного спектрального диапазона, возбуждаемых синим (405 и 465 нм) или ультрафиолетовым (355 нм) излучением.

В данной работе рассматриваются стеклокристаллические красные люминофоры на основе оксифторидных стекол системы 5 мол.% $Ba(PO_3)_2$ – 95 мол.% $MgPbCa(Ba)SrAl_2F_{14}$, в качестве активатора вводили MnF_2 с концентрацией 2–20 мол.% при одновременном

введении EuF_3 в количестве 0,2 и 0,4 мол.%. Также были синтезированы свинцовофторосиликатные стекла $40\text{SiO}_2\text{--}30\text{PbO--}30\text{PbF}$, активированные EuF_3 в концентрации 0,5–3 мол.%.

В ходе работы проводились исследования спектров люминесценции красных люминофоров, определение их оптических характеристик. Было исследовано влияние состава и технологии синтеза таких материалов на хроматические характеристики: цветовые координаты, цветовую температуру и индекс цветопередачи.

Исследуемые стекла и стеклокерамики, активированные ионами Eu^{3+} и Mn^{2+} обладают интенсивными полосами люминесценции в красной области спектра: полосы трехвалентного европия на 618 ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$) и 701 нм ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$), а также широкая полоса люминесценции марганца с максимумом на 620 нм ($^4\text{T}_1 \rightarrow ^6\text{A}_1$).

Были рассчитаны значения и координаты цветности для некоторых образцов: EuF_3 $T_{\text{ц}}=2830$ К ($x = 0,43$; $y = 0,37$), MnF_2 $T_{\text{ц}} = 3450$ К ($x = 0,39$; $y = 0,35$).

Полученные данные позволяют говорить о возможности создания на их основе стабильных энергоэффективных источников белого света с улучшенным значением цветопередачи.

УДК 621.565.83

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННОМ СПЕКАНИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И.А. Нефедова

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Л.П. Булат

Перспективным направлением развития современных термоэлектрических материалов является их наноструктурирование, так как термоэлектрическая добротность в этом случае может превышать добротность исходных кристаллических материалов. Одним из способов синтеза наноструктурированных образцов является искровое плазменное спекание. Изучая физические процессы, протекающие в образце при спекании, можно разработать рекомендации к оптимальному проведению процесса синтеза материалов данным методом.

В работе с помощью метода конечных элементов были рассчитаны и визуализированы распределения температурного поля и градиента температур в образце на основе теллурида висмута в условиях, подобных условиям реального эксперимента. В компьютерной модели образец разогревался теплом Джоуля путем пропускания через него электрического тока. Таким образом, были получены: тепловые поля в образце, распределение поля градиента температур в образце, значение характерной длины изменения температуры при различном приложенном напряжении. Эти значения сравнивались с экспериментальными данными с целью оптимизации процесса спекания.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КОЛЛОИДНОГО ЗОЛОТА И ЦВЕТОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ НЕМ ПРОИСХОДЯЩИХ

А.В. Пантелеев

Научный руководитель – к.ф.-м.н., с.н.с., доцент С.А.Чивилихин

Нанотехнология – это качественный скачок от работы с веществом к манипуляции отдельными атомами: в наноразмерном состоянии изменяются многие механические, термодинамические, магнитные и электрические характеристики. Наночастицы золота, в отличие от объемного золота, обладают каталитическими, ферромагнитными, настраиваемыми оптическими свойствами, способностью к самосборке. Они хорошо поглощают и рассеивают свет, нетоксичны, химически стабильны, биосовместимы.

В работе для синтеза наночастиц золота используется цитратный метод.

Во время синтеза цвет реакционной смеси изменяется. Первоначально слабо желтая окраска иона $AuCl_4^-$ – исчезает, раствор становится темно синим, далее фиолетовым и окончательно рубиново-красным (наночастицы Au). Изменение цвета раствора указывает на структурные превращения, происходящие в системе. Методом пропускающей электронной микроскопии установлено, что бесцветный раствор, образующийся сразу после добавления цитрата, содержит золотые нанокластеры диаметром 3–5 нм [1]. В темно синем растворе формируется сложная структура, которую можно описать как разветвленная сеть из нанопроволок с диаметром 5 нм. В стадии темно фиолетового цвета возникают небольшие сегменты, которые образуются в результате разрыва основной разветвленной сети нанопроволок. Сферические наночастицы с диаметром 10–13 нм начинают откалываться от нанопроволок, когда раствор становится фиолетовым. Окончательно золотые наносферы формируются, когда раствор становится рубиново-красным.

В результате синтеза у нас получилось 50 мл раствора коллоидного золота. Данный раствор мы подвергли ряду экспериментальных исследований на спектрофотометре, наносайзере и сканирующем электронном микроскопе. В ходе работы был исследован химический синтез коллоидного золота и процессы, его сопровождающие. Получившийся раствор исследован на спектрофотометре – получены спектры поглощения и пропускания, наносайзере – получен график зависимости объема наночастиц от концентрации.

В ходе исследований было доказано, что полученный раствор стабилен, так как спектры пропускания и поглощения за время существенно не изменились. Вследствие измерений на наносайзере доказано, что при уменьшении концентрации уменьшается и средний объем частиц. Данная модель может найти свое применение во многих областях человеческой деятельности.

Литература

1. Пантелеев А.В., Вавулин Д.Н., Альфимов А.В., Арысланова Е.М., Чивилихин С.А. Исследование химического синтеза коллоидного золота цитратным методом // Доклады конференции «Фундаментальные основы МЭМС- и Нанотехнологий». – Новосибирск, 2012. – 281 с.
2. Дыкман Л.А., Богатырев В.А., Щеголев С.Ю., Хлебцов Н.Г. Золотые наночастицы: Синтез, свойства и биомедицинские применения. – М.: Наука, 2008. – 318 с.
3. Евдокимов Ю.М., Сычов В.В. Принципы создания наноконструкций с использованием нуклеиновых кислот в качестве строительных блоков // Успехи химии. – 2008. – № 2. – С. 194–206.

**БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ
СУБВОЛНОВОГО ОТВЕРСТИЯ В ТОНКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКЕ****Д.В. Пермяков¹, И.С. Мухин^{1,2}, И.И. Шишкин¹****Научный руководитель – к.ф.-м.н., м.л.н.с. А.К. Самусев¹**

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; ² Санкт-Петербургский академический университет научно-образовательный центр нанотехнологий РАН)

Создание оптических компонентов для управления светом на субволновых масштабах является одной из важнейших прикладных задач нанофотоники. Возможным путем решения этой задачи является создание наноструктур, позволяющих осуществлять возбуждение и управление поверхностными плазмон-поляритонами (ППП), локализованными на границе металл-диэлектрик. В связи с этим в последнее время повышенный интерес вызывает взаимодействие электромагнитных волн со структурами, допускающими рождение и распространение ППП. Одним из простейших таких объектов является одиночное отверстие в тонкой металлической пленке, которое при падении на него плоской электромагнитной волны служит источником ППП [1, 2]. С другой стороны, неотъемлемой частью современной нанооптики являются сканирующие ближнепольные оптические микроскопы (СБОМ), позволяющие получать информацию о структуре электромагнитного поля вблизи объекта исследования с существенно субволновым разрешением [3]. Ключевую роль в таких приборах играют металлизированные зонды с отверстием, размеры которого составляют величины порядка ста нанометров. Таким образом, задача о взаимодействии света с субволновыми отверстиями в металле представляется крайне важной. Следует отметить, что этой задаче посвящено достаточно большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований [4], однако измерение трехмерного распределения поля вблизи субволновой апертуры, насколько нам известно, в этой работе было произведено впервые.

Целью работы была реконструкция структуры ближнего электромагнитного поля субволнового отверстия в тонкой металлической пленке, проведение численных расчетов и сопоставление полученных экспериментальных результатов с данными моделирования.

Объект исследования — отверстие диаметром порядка 200 нм, вытравленное при помощи фокусированного ионного пучка в пленке серебра толщиной 75 нм, нанесенной на стеклянную подложку. В экспериментах использовался сканирующий ближнепольный оптический микроскоп, работающий в режиме сбора. Образец облучался снизу монохроматическим лазерным лучом, сфокусированным на отверстии. Излучение собиралось при помощи металлизированного волоконного зонда, закрепленного на кварцевом резонаторе, и детектировалось при помощи фотоэлектронного умножителя. Контроль расстояния между зондом и поверхностью образца при сканировании в контактном режиме осуществлялся за счет поддержания постоянной амплитуды колебаний кварцевого резонатора на его резонансной частоте.

В рамках данной работы была проведена серия экспериментов, в ходе которых производилось сканирование зондом в плоскости, параллельной поверхности образца на различных высотах – от 0 до 5 мкм. Была получена серия карт распределения интенсивности поля в зависимости от высоты с шагом в несколько десятков нанометров. В результате обработки экспериментальных данных была произведена трехмерная реконструкция распределения интенсивности электромагнитного поля вблизи одиночного субволнового отверстия.

В пакете CST Microwave Studio было проведено численное моделирование, которое позволило интерпретировать все особенности, наблюдаемые в эксперименте. Во-первых,

благодаря малой толщине пленки металла, часть зондирующего излучения проходила сквозь нее. Интерференция падающего пучка с рассеянными волнами вызывала пространственные модуляции интенсивности оптического сигнала и позволяла получать информацию о фазах рассеянных волн из эксперимента. Во-вторых, наблюдалась дифракция падающей электромагнитной волны на отверстии. В-третьих, при помощи отверстия возбуждался поверхностный плазмон-поляритон, локализованный вблизи поверхности металла и распространяющийся преимущественно в направлении поляризации падающего луча.

Таким образом, в данной работе впервые была проведена реконструкция распределения электромагнитного поля вблизи одиночного отверстия в тонкой металлической пленке при облучении его сфокусированным лазерным лучом. Проведенное численное моделирование позволило интерпретировать все особенности структуры поля, наблюдаемые в эксперименте.

Литература

1. Yin L., Vlasko-Vlasov V.K., Rydh A., Pearson J., Welp U., Chang S.-H., Gray S.K., Schatz G.C., Brown D.B. and Kimball C.W. Surface plasmons at single nanoholes in au films // Applied Physics Letters. – 2004. – V. 85. – № 3. – P. 467–469.
2. Chang S.-H., Gray S. and Schatz G. Surface plasmon generation and light transmission by isolated nanoholes and arrays of nanoholes in thin metal films // Opt. Express. – 2005. – V. 13. – P. 3150–3165.
3. Pohl D.W. Some remarks on the history of near-field optics // Near-field Optics, Pohl D.W. and Courjon D. eds. // NATO ASI Ser. E. – Dordrecht: Kluwer. – 1993. – V. 242. – P. 1–5.
4. Климов В.В. Наноплазмоника. – М.: Физматлит, 2009. – 480 с.

УДК 532.783 539.22

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ФЕРРОНЕМАТИКЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИАМАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТЬЮ

Д.А. Петров

(Пермский государственный национальный исследовательский университет)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор А.Н. Захлевных

(Пермский государственный национальный исследовательский университет)

В рамках континуальной теории исследованы ориентационные переходы, возникающие под влиянием магнитного поля в ферронематике (ФН) – высокодисперсной наносuspензии однодоменных феррочастиц в нематическом жидком кристалле (ЖК).

Рассмотрен слой ферронематика между двумя параллельными пластинами. На границах выполнялось условие жесткого планарного сцепления, а сцепление ЖК-матрицы с феррочастицами считалось планарным и мягким. Рассматриваемый ФН изначально намагничен вдоль директора, а постоянное магнитное поле прикладывалось поперек слоя, перпендикулярно оси легкого ориентирования, лежащей в плоскости слоя. В этом случае возникающая под действием внешнего поля деформация ориентационной и магнитной структуры отвечает комбинациям поперечного и продольного изгиба.

Для описания ориентационных и магнитных переходов ФН учитывались следующие вклады в плотность свободной энергии: потенциал Озеена-Франка (энергия ориентационно-упругих деформаций поля директора); взаимодействие диамагнитного нематика с магнитным полем (мы предполагали, что анизотропия диамагнитной восприимчивости отрицательна, поэтому директор стремится повернуться ортогонально полю); взаимодействие магнитных моментов частиц с внешним магнитным полем; энергия сцепления ЖК-матрицы с поверхностью феррочастиц и вклад энтропии смешения идеального раствора частиц суспензии.

Варьированием функционала свободной энергии относительно директора, намагниченности и концентрации магнитной примеси была получена система интегральных уравнений для углов отклонения директора и намагниченности от оси легкого ориентирования и пространственного распределения феррочастиц. Система решалась численно, а в предельных случаях аналитически.

Установлено, что под действием магнитного поля в системе беспороговым образом появляются пространственные искажения директора и намагниченности. Наличие магнитного поля приводит к тому, что магнитные моменты частиц ориентируются вдоль поля, а из-за сцепления частиц и директора происходит искажение ориентации ЖК-матрицы. С дальнейшим ростом поля происходит отрыв намагниченности от директора и ФН пороговым образом намагничивается вдоль поля, в то время как ориентация ЖК-матрицы становится вновь однородной и планарной. Выяснено, что такой переход может быть фазовым переходом первого или второго рода в зависимости от интенсивности сегрегации примеси (эффект сегрегации заключается в том, что магнитные частицы накапливаются в тех областях слоя, где минимальна сумма их магнитной энергии в поле и ориентационной энергии в ЖК-матрице). Аналитически найдено значение параметра сегрегации, отвечающее трикритической точке. Аналитически найдена зависимость порогового поля от материальных параметров системы. Исследованы пространственные искажения ориентационной структуры директора и намагниченности, распределение магнитной примеси как функции приложенного магнитного поля и материальных параметров.

Показано, что полученные результаты согласуются с экспериментальными данными по электрической емкости ячейки ФН в магнитном поле.

УДК 535.343.2,539.213.27

ВЛИЯНИЕ СЕРЕБРА НА РОСТ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК PbSe ВО ФТОРОФОСФАТНОЙ МАТРИЦЕ

А.В. Полякова, А.Н. Абдршин

Научный руководитель – д.х.н., профессор Е.В. Колобкова

Для создания насыщающихся поглотителей большой интерес представляют стекла, активированные полупроводниковыми квантовыми точками PbSe. Это связано с тем, что спектрами поглощения можно управлять, изменяя размер квантовых точек. А также при уменьшении нанокристалла до размера, при котором радиус меньше экситона Бора, возникает дискретный спектр поглощения. Следует отметить, что матрица, окружающая квантовые точки является важным элементом разработки практических применений таких материалов, так например во фторофосфатных стеклах время термообработки снижается в десятки раз по сравнению с силикатными. Таким образом исследование процесса роста квантовых точек PbSe во фторофосфатной матрице является актуальной задачей.

В работе исследовались образцы фторофосфатного стекла системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{AlF}_3-\text{ZnO}$ с равной концентрацией полупроводниковой фазы PbSe, без серебра и содержащие серебро, вводимое двумя способами: добавлением в шихту при синтезе и методом ионного обмена.

Для синтеза квантовых точек образцы были подвергнуты двухстадийной термообработке, температурные режимы которой были выбраны в соответствии с данными ДСК ($T_1=380-400^\circ\text{C}$ с интервалом в 10°C , $T_2=415^\circ\text{C}$). Время термообработки составило 0–300 мин с интервалом 30 мин. Были измерены спектры поглощения на спектрофотометре Varian Cary 500 в диапазоне 300–3300 нм.

На основании экспериментальных данных по положению первого экситонного пика на спектре поглощения с использованием градуировочной кривой были определены размеры

синтезированных квантовых точек. И построена зависимость размеров квантовых точек от времени термообработки во всем исследуемом температурном диапазоне для первой стадии термообработки. Также была измерена люминесценция образцов, которая возбуждалась излучением полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda_{\text{pump}} = 980$ нм и мощностью накачки $P_{\text{pump}} = 80$ мВт.

Было выявлено, что рост квантовых точек изменяется в присутствии серебра. Также обнаружена зависимость спектрально-люминесцентных свойств и характера роста квантовых точек от различных способов введения серебра в матрицу. При увеличении размеров квантовых точек происходит уменьшение величины «голубого сдвига» по отношению к собственному краю поглощения кристалла PbSe, а также величина стоксовского сдвига люминесценции уменьшается, так как основной вклад в люминесценцию вносит переход «зона-зона».

УДК 541.135

ФТОРФОСФАТНЫЕ СТЕКЛА И СТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ИХ ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННЫЕ ИОНАМИ ТЕРБИЯ И ЕВРОПИЯ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ БЕЛОГО СВЕТА

Р.О. Пышьев

Научный руководитель – д.х.н., профессор Е.В. Колобкова

Работа посвящена разработке и синтезу фторфосфатных стекол, содержащих EuF_3 или TbF_3 в концентрациях 5–12 мол.%. Исследована зависимость показателя преломления спектрально-люминесцентных свойств стекол от концентрации ионов-активаторов и при модификации стекла-матрицы введением в ее состав фторида свинца (0–20 мол.%). Обсуждаются перспективы применения такой среды в качестве красного или зеленого люминофора в диодах белого света.

На сегодняшний день, с внедрением светодиодов связаны перспективы развития целого ряда направлений – от сигнальных световых приборов и оборудования для световой индикации и рекламы до специальных приложений в производстве мобильных устройств и дисплеев. Важнейшим из привлекательных черт светодиодной технологии является радикальное сокращение затрат электроэнергии на освещение, составляющих по различным оценкам до 18–20% всех затрат произведенной электроэнергии.

Выбор для создания красных и зеленых люминофоров фторфосфатной матрицы обусловлен ее высокой химической и термической стабильностью, а также возможностью введения высоких концентраций ионов-активаторов.

В представленной работе были синтезированы стекла в системе 5 мол.% $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ – 95 мол.% $\text{MgYCa}(\text{Ba,Pb})\text{SrAl}_2\text{F}_{14}$, в качестве активатора вводили EuF_3 до 10 мол.%, или TbF_3 5–12 мол.% при одновременном введении EuF_3 в количестве 0,2–0,4 мол.%. Поглощение Tb^{3+} в области 450–465 нм отсутствует, поэтому в систему вводили ионы Eu^{3+} , имеющие полосу поглощения 465 нм. Синтез стекол проводился в электрической лабораторной печи с силитовыми нагревателями при температуре 950°C в стеклоглеродном варочном комплекте по схеме «тигель в тигель». Проведен анализ положения полос поглощения и люминесценции Tb^{3+} с малыми добавками EuF_3 и Eu^{3+} во фторофосфатном стекле состава 5 мол.% $\text{Ba}(\text{PO}_3)_2$ – 95 мол.% $\text{MgYCa}(\text{Ba,Pb})\text{SrAl}_2\text{F}_{14}$ и изменения показателя преломления при введении различных концентраций фторида свинца и фторидов-активаторов, а также в стеклокерамических материалах аналогичного состава. Сделан вывод, что увеличение концентрации ионов-активаторов и фторида свинца приводит к увеличению показателя преломления. Положение полос поглощения и люминесценции остается неизменным. Оценена перспективность применения исследованных стекол для их использования в качестве зеленого и красного люминофоров.

ВЛИЯНИЕ ЦЕРИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В ПРОЦЕССЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИОННОГО ОБМЕНА

Е.М. Сгибнев

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Н.В. Никоноров

На сегодняшний день изучение оптических свойств серебряных комплексов в стекле (как наночастиц, так и молекулярных и ионных кластеров) представляет огромный практический интерес. К настоящему времени предложено множество приборов и устройств на основе поверхностного плазмонного резонанса, включая лазер на поверхностных плазмонах (спасер) [1], микроскоп [2], однофотонные источники света [3] и многое другое. Оптические материалы с серебряными молекулярными и ионными кластерами могут использоваться при создании люминофоров, ап- и даун-конвертеров, а также солнечных батарей, так как обладают интенсивной люминесценцией практически во всем видимом диапазоне [4].

Фототерморелаксационные (ФТР) стекла являются перспективным материалом для интегральной оптики, так как могут сочетать в себе одновременно лазерные и волноводные свойства, а также позволяют формировать в объеме наночастицы серебра, обладающие плазмонным резонансом [5–7]. Описанные свойства ФТР стекол открывают возможность создания на их основе полифункциональных устройств. Однако известно, что серебро трудно входит в силикатные матрицы. Введение в шихту более 1% вес. Ag_2O приводит к окрашиванию стекла. Логичным решением данной проблемы может служить использование технологии низкотемпературного ионного обмена. Данный метод позволяет обеспечить значительное увеличение (в десятки раз) концентрации ионов серебра в приповерхностном слое, при условии наличия в составе стекла катионов щелочных металлов, способных к ионному обмену.

Целью данной работы было исследование влияния церия на формирование кластеров серебра в процессе ионного обмена. В работе также решались задачи по изучению влияния времени ионного обмена и последующей термообработки (при температурах ниже температуры стеклования) на спектрально-люминесцентные свойства кластеров серебра.

В работе были изучены ФТР стекла на основе системы $\text{SiO}_2\text{--ZnO--Al}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O--NaF}$, с добавками CeO_2 , а также оптические стекла К8 и К208, представляющие собой систему $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--BaO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$ и отличающиеся наличием CeO_2 в стекле К208. Ионный обмен проводился в расплаве $\text{AgNO}_3/\text{NaNO}_3$, содержащем 5% мол AgNO_3 при температуре 320°C . В дальнейшем сравнивались спектры поглощения образцов до и после ионного обмена, и изучались спектры люминесценции. Кроме того, изучались модовые спектры волноводов для изучения влияния церия на ионообменные характеристики стекла.

По данным наших исследований можно сделать вывод, что церий оказывает значительное влияние на формирование серебряных кластеров непосредственно в процессе ионного обмена. В стеклах, содержащих церий, наблюдается более яркая люминесценция при низких временах ионного обмена (1 ч), длительный ионный обмен ведет к образованию большого количества кластеров, активно поглощающих в видимой области спектра, и интенсивность люминесценции падает. В стеклах без церия интенсивность люминесценции растет с увеличением времени ионного обмена.

Литература

1. Noginov M.A., Zhu G., Belgrave A.M., Bakker R., Shalaev V.M., Narimanov E.E., Stout S., Herz E., Suteewong T. & Wiesner U. Demonstration of a spaser-based nanolaser // Nature. – 2009. – V. 460. – P. 1110–1113.

2. Rothenhäusler B., Knoll W. Surface-Plasmon Microscopy // Nature. – 1988. – V. 332. – P. 615–617.
3. Lounis B., Moerner W.E. Single photons on demand from a single molecule at room temperature // Nature. – 2000. – V. 407. – P. 491–493.
4. Kuznetsov A.S., Tikhomirov V.K. and Moshchalkov V.V. Polarization memory of white luminescence of Ag nanoclusters dispersed in glass host // Optics Express. – 2012. – V. 20. – № 19. – P. 21576–21852.
5. Киселев С.С., Никоноров Н.В., Игнатъев А.И. Создание градиентных волноводов на фототерморепрафрактивном стекле // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – Т. 61. – № 3. – С. 21–24.
6. А.И. Сидоров. Двойной плазмонный резонанс в сферических наноструктурах металл-диэлектрик-металл // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – № 4. – С. 86–90.
7. Никоноров Н.В., Сидоров Ф.И., Цехомский В.А., Лазарева К.Е. Влияние диэлектрической оболочки на спектральное положение плазмонного резонанса наночастиц серебра в фотохромном стекле // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107. – № 5. – С. 745–747.

УДК 666.225

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ФТР СТЕКОЛ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

Ю.В. Бочарова, М.Г. Сорокина

Научный руководитель – А.И. Игнатъев

Краткое вступление, постановка проблемы. На сегодняшний день фото-терморепрафрактивные (ФТР) стекла представляют собой перспективный класс фоточувствительных материалов, предложенный для записи объемных фазовых голограмм, который представляет собой натриево-силикатную систему, активированную фоточувствительными добавками серебра и церия. Для структурно-фазовых изменений в этом материале используется фото-термо-индуцированная кристаллизация стекла. Т.е. под действием УФ излучения и последующей термической обработки в матрице стекла вырастают наночастицы серебра и наноразмерная кристаллическая фаза в виде нанокристаллов фторидов натрия и бромидов серебра.

В предыдущих работах мы применяли к ФТР-стеклам технологию химического травления и показали, что при различных температурах травления и концентрациях растворов плавиковой кислоты наблюдается различие в скоростях травления стекла и наностеклокерамики.

Цель работы. В задачу этой работы входило исследование кинетики травления ФТР стекол различных составов и сравнение скоростей травления ФТР стекла и наностеклокерамики на его основе. Цели исследования: выяснить, чем вызвано различие в скоростях травления стекла и наностеклокерамики на его основе.

Базовые положения. Для эксперимента использовались исходные стекла различных составов и наностеклокерамики на их основе. Травление образцов проводилось в растворах плавиковой кислоты с концентрацией 3N, при постоянной температуре и постоянстве гидродинамических условий. Все образцы имели одинаковую геометрическую форму, прошли полировку и шлифовку, облучение УФ-лампой и термообработку.

Практические результаты. Исследованы кинетики травления ФТР стекол различных

составов. Установлено, что в стеклах, в которых минимизировано выделение кристаллической фазы NaF, существенного различия в скоростях травления стекла и наностеклокерамики на их основе не наблюдалось. В связи с этим можно предположить, что разница в скоростях травления связана непосредственно с фотоиндуцированным выделением кристаллической фазы NaF.

УДК 539.2

ЛИНЕЙНЫЙ ДИХРОИЗМ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТА, АКТИВИРОВАННОГО ПОЛИМЕТИНОВЫМ КРАСИТЕЛЕМ

А.А. Старовойтов

Научный руководитель – д.ф.-м. н., с.н.с. Т.К. Разумова

В настоящее время большое внимание уделяется фундаментальным исследованиям в области нанофотоники и разработке новых наноструктурированных оптических материалов. Многообещающими средами среди этих материалов являются гибридные структуры на основе органических красителей, внедренных в слоистые или пористые материалы.

Работа была нацелена на разработку методики получения ориентированных органических молекул в объеме пористого материала. В качестве молекул были использованы хорошо поглощающий полиметиновый краситель. Матрицей для внедрения служил естественный минерал хризотил-асбест, структура которого представляет собой гексагональную плотноупакованную структур из одинаковых нанофибрилл, которые имеют длину до 1 см.

Была разработана технологий импрегнации, которая позволила внедрить полиметиновые молекулы в объем пористого материала. Методами абсорбционной спектроскопии были определены структурные изомерные и агрегированные формы внедряемых полиметиновых молекул, а также их ориентация внутри нанофибрилл хризотил-асбеста. Обнаружена возможность создания линейного дихроизма в получаемом образце.

Интерес к таким гибридным материалам объясняется тем, что красители, внедренные в пористые матрицы могут быть использованы при создании лазеров, фотоиндуцированных переключателей, оптических сенсоров. С другой стороны оптические свойства хромофоров красителей в матрице хризотил асбеста могут оказаться поляризационно зависимыми, что может расширить области применения красителей, например создавать поляризаторы и дихроичные светофильтры. Способность молекул к изомеризации дает принципиальную возможность создавать управляемые аттенуаторы, а также информационные приемно-преобразующие системы.

УДК 541+535

МАЛАХИТОВЫЙ ЗЕЛЕНый КАК СЕНСОР ЖЕСТКОСТИ ЕГО НАНООКРУЖЕНИЯ

О.И. Табишева, А.П. Смирнов

Научный руководитель – д.ф.-м. н., профессор Е.Б. Свешникова

Интенсивность флуоресценции трифенилметановых красителей меняется на 6 порядков в зависимости от вязкости среды.

В 70–80 годы была выведена формула описывающая прямую связь вязкости среды и люминесценции на основании формул Фёрстера и Хофмана. Было показано что логарифм вязкости среды и люминесценции связаны линейно.

Далее с развитием лазерной техники происходило исследование кинетики затухания

малахитового зеленого в клетках живых организмов и в полимерах, и было обнаружено, что малахитовый зеленый реагирует на свое нанокружение.

Чуть позже стали исследовать малахитовый зеленый на поверхности стекол в воде. Позднее исследовали связь ДНК и РНК с ним. Было обнаружено, что он являлся индикатором для отдельных нуклеиновых кислот.

Было обнаружено, что интенсивность люминесценции малахитового зеленого определяется константами устойчивости.

Целью работы было изучить возможность использовать малахитовый зеленый как зонд для исследования строения и состава наночастиц из комплексов ионов трехвалентных металлов с различными органическими лигандами. Для этого была исследована сенсibilизованная флуоресценция малахитового зеленого внедренного в наночастицы и высаженного на их поверхность

Нами проводилось синтез наночастиц из комплексов $\text{Lu}(\text{PhBTA})_3\text{phen}$, $\text{Sc}(\text{PhBTA})_3\text{phen}$, $\text{Sc}(\text{PhBTA})_3$ (PhBTA –*n*-фенилбензоилтрифторацетон, phen–1,10-фенантролин) с внедренными и высаженными на их поверхность молекулами малахитового зеленого. Исследовалась стабильность наночастиц в зависимости от способа приготовления и иона металла. Исследовалась зависимость флуоресценции комплексов металлов, формирующих наночастицы, и сенсibilизованной флуоресценции малахитового зеленого от его концентрации в растворе. Было показано, что интенсивность флуоресценции комплексов $\text{Sc}(\text{PhBTA})_3$ на порядок выше, чем интенсивность комплексов $\text{Sc}(\text{PhBTA})_3\text{phen}$ при той же концентрации ионов и лигандов. Было обнаружено, что интенсивность кофлуоресценции малахитового зеленого высаженного на поверхности и встроенного в наночастицы отличается только вдвое. Такое различие может быть объяснено различием в эффективности в переносе энергии на краситель, внедренный в наночастицы, и высаженный на их поверхности. Методом сравнения интенсивности кофлуоресценции малахитового зеленого с интенсивностью кофлуоресценции нильского синего в этих же наночастицах был оценен квантовый выход малахитового зеленого в наночастице и на ее поверхности. Было показано, что малахитовый зеленый в структуре наночастицы увеличивает свой выход на 3 порядка величины. Было обнаружено, что величина квантового выхода флуоресценции малахитового зеленого зависит от состава наночастиц.

Было показано, что не жесткость внутреннего окружения, а именно связывание красителя с наночастицами определяет квантовый выход наночастиц в данных условиях.

Показано что усиление практически не зависит от того находится ли краситель внутри или на поверхности наночастицы.

УДК 543.421/.422+535.137

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР НА КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ПСЕВДОИЗОЦИАНИНОВ

Н.А. Торопов

Научный руководитель – д.ф.-м. н., с.н.с. Т.А. Варганян

Оптические свойства тонких пленок органических молекул вызывают интерес в связи с возможным образованием в них молекулярных агрегатов. По сравнению с растворами твердотельные слои органических молекул в ряде случаев являются более удобными для приложений, в частности, для создания нелинейных оптических переключателей. Известно, что поглощение ряда органических красителей возрастает в присутствии наночастиц серебра, обладающих плазмонными резонансами в видимой области. При этом процессы формирования компонентного состава молекулярных слоев с металлическими наноструктурами исследованы довольно слабо.

В работе изучены твердотельные пленки псевдоизоцианинового красителя 1,1'-диэтилхино-2,2'-монометинцианин йодид (ПИЦ) на кварцевой подложке с приготовленными на ней наночастицами Ag. **Целью работы** являлось исследование абсорбционных свойств и особенностей формирования компонентного состава слоев красителя ПИЦ на поверхности с серебряными наночастицами.

В первой части работы исследовались молекулярные слои ПИЦ на подложке без наночастиц серебра. Тонкие пленки были приготовлены из спиртового раствора на кварцевой подложке методом центрифугирования. Исследование спектров оптической плотности показало, что формы спектральных линий тонкой пленки и спиртового раствора ПИЦ значительно отличаются. В растворе поглощение обусловлено оптическими переходами all-trans-изомеров в различные возбужденные состояния (максимум на длине волны 527 нм). В то время как в слое ПИЦ на кварцевой подложке максимум поглощения расположен на длине волны 425 нм. По нашему предположению, появление нового максимума обусловлено формированием H-агрегатов молекул. При импульсном лазерном облучении тонкой пленки молекул ПИЦ на длине волны 420 нм происходит уменьшение оптической плотности в области коротковолнового края поглощения. Динамика ее изменения указывает на быстрое уменьшение концентрации H-агрегатов.

Во второй части работы исследовались слои ПИЦ на поверхности в присутствии наночастиц Ag. Приготовление образцов происходило в два этапа. На первом – были получены серебряные наночастицы при распылении небольшого количества металла в вакуумной камере на подложку, разогретую до 200°C. На втором – после дополнительной обработки в растворителе наночастицы Ag покрывались молекулами ПИЦ. Спектры оптической плотности приготовленных гибридных образцов демонстрировали появление новой полосы поглощения с максимумом на длине волны 585 нм, характерной для J-агрегатов. Для идентификации полученной полосы был приготовлен пересыщенный водный раствор ПИЦ, спектр которого имел ярко выраженный максимум поглощения J-агрегатов молекул ПИЦ. Величина интегрального поглощения агрегатов молекул в слое с наночастицами серебра без учета их плазмонного поглощения превосходит величину поглощения тонкого слоя ПИЦ почти в 20 раз. При этом исследование концентрации растворов молекул красителя, снятых с поверхности кварца с наночастицами и без них, показывает различие лишь около 10%. Таким образом, увеличение поглощения обусловлено действием ближних полей серебряных наночастиц. Помимо формирования J-агрегатов спектры наночастиц серебра, покрытых ПИЦ, демонстрировали уменьшение оптической плотности в области коротковолнового края поглощения, связанное с аномальной дисперсией показателя преломления слоя ПИЦ.

В работе исследованы спектры оптической плотности псевдоизоцианинового красителя в растворах и тонких пленках. Получена полоса поглощения тонких пленок ПИЦ на поверхности с наночастицами серебра, не наблюдавшаяся в спектрах слоев без наночастиц. Ее появление связано с образованием упорядоченных агрегатов. За счет влияния ближних полей серебряных наночастиц интегральное поглощение слоев молекул на подложке с частицами значительно превосходит поглощение слоев молекул без них.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНОФОРОВ ZnS ПРИ АКТИВАЦИИ МАРГАНЦЕМ И МЕДЬЮ

**А.О. Трофимов, А.Ю. Бибик, Р.К. Нурыев
Научный руководитель – д.х.н., профессор Е.В. Колобкова**

Электролюминофоры (ЭЛФ) на основе сульфида цинка, легированные медью и марганцем, используются в источниках света, возбуждаемых постоянным или переменным током. Особенностью электролюминофоров состава ZnS:Cu,Mn является возможность изменять цвет свечения в области от синего до оранжевого. Это возможно осуществить как на стадии синтеза люминофора, путем изменения концентрации активаторов, так и в изготовленном источнике света путем изменения частоты возбуждающего напряжения.

Для увеличения яркости свечения следует повысить концентрацию активаторов в частицах ЭЛФ, однако максимальная их концентрация ограничена пределом растворимости меди и марганца в сульфиде цинка. Поэтому простым увеличением концентрации активаторов в исходной шихте повысить количество центров свечения выше определенного предела невозможно – необходимо увеличить растворимость меди и марганца в сульфиде цинка. Этого можно достигнуть, создав в его структуре дополнительные дефекты (вакансии цинка и серы), которые облегчили бы диффузию активаторов и их встраивание в решетку во время высокотемпературного синтеза люминофора. Для этого следует модифицировать исходный сульфид цинка путем ударно-волнового воздействия (УВВ).

Для выяснения влияния концентрации меди и ударно-волнового воздействия на структуру ЭЛФ использовался метод рентгеновской дифракции (РФА). Были синтезированы образцы сульфида цинка, легированные медью с концентрацией 0; 0,15 и 1% и марганцем.

На основе исследования электролюминофоров методами РФА и анализа разложения спектров фотолюминесценции на составляющие полосы можно сказать, что УВО приводит к увеличению концентрации ионов меди, смещению спектра в длинноволновом направлении, изменению окружения ионов Mn^{2+} в кристаллической решетке ZnS и увеличению концентрации вакансий цинка.

При сравнении спектров фотолюминесценции синтезированных люминофоров из разных серий было установлено, что максимум спектра у образца, синтезированного из необработанного ZnS и без введения меди, имеет длину волны 575 нм. Введение меди в шихту приводит к смещению максимума люминесценции люминофора в длинноволновую область 581 нм, что вероятно связано с внедрением меди в узлы решетки сульфида цинка и как следствие, вытеснением ионов марганца из узлов решетки в междоузлия. В то же время, у образца без меди, синтезированного из обработанного УВВ ZnS, наблюдается аналогичный сдвиг спектра, что может объясняться введением меди из ампулы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ CdSe/ZnS

**Д.А. Френкель
Научный руководитель – д.ф.-м. н., с.н.с. Е.А. Коншина**

Добавление наночастиц в жидкий кристалл позволяет варьировать его свойства и расширяет возможности фотонных устройства на их основе. Полупроводниковые квантовые точки (КТ) являются одним из хорошо изученных типов наночастиц [1]. При

реализации любого электрооптического эффекта слой жидкого кристалла подвергается воздействию электрического поля, поэтому чрезвычайно важными его параметрами являются диэлектрическая проницаемость и электропроводность.

Объектом исследования были плоскопараллельные ячейки, заполненные нематическим жидким кристаллом (ЖК) с положительной диэлектрической анизотропией, гомогенно ориентированным полиимидным слоем. КТ CdSe/ZnS типа ядро оболочка размером 3,5 нм добавлялись в объем жидкого кристалла или в ориентирующий слой в концентрации 0,1%.

Основной целью работы было получение зависимостей емкости ЖК ячеек от напряжения и частоты переменного электрического поля и исследование влияния полупроводниковых наночастиц на изменение диэлектрической проницаемости ЖК ячеек.

Для проведения этих исследований была разработана специальная программа для ЭВМ, позволяющая получать зависимости емкости от приложенного напряжения [2]. Измерения проводили в интервале напряжений 0,3–10 В и частот от 10 до 1000 Гц. Толщина слоя ЖК была около 14 мкм. Диэлектрическую проницаемость определяли как отношение емкости ячейки, заполненной ЖК, к емкости пустой ячейки.

Экспериментально были получены зависимости емкости ЖК ячеек от приложенного напряжения для ряда частот. Полученные данные были использованы для получения частотных зависимостей диэлектрической проницаемости исследуемых ЖК ячеек. В результате проведенных исследований установлено, что добавление полупроводниковых КТ CdSe/ZnS как в объем ЖК, так и в ориентирующий слой приводит к понижению диэлектрической проницаемости ЖК ячеек по сравнению с ячейкам без КТ. В первом случае это связано с изменением диэлектрической анизотропии жидкого кристалла, а во втором – с изменением диэлектрической проницаемости ориентирующего слоя, содержащего КТ.

Литература

1. Mirzaei J., Reznikov M., Hegmann T. Quantum dots as liquid crystal dopants // J. Mater. Chem. – 2012. – V. 22. – P. 22350–22365.
2. Френкель Д.А. Св-во о гос. регистрации программы ЭВМ. №2013610722 от 9.01.2013 г.

УДК 621.745.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИНТИКОМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ

Ю.В. Харитонова

(Тульский государственный университет)

Научный руководитель – к.т.н., доцент Г.А. Дорофеев

(ООО «НПП Интермет-Сервис»)

В современном мире происходит непрерывное совершенствование всех сфер жизнедеятельности человека. Создаются новые технологии, материалы, оборудование, необходимые как для повышения уровня жизни людей, так и для дальнейшего совершенствования.

Необходимость дальнейшего совершенствования затронула и черную металлургию, ведь для производства ответственных изделий таких как, ракетно-космическая техника, изделия атомного и энергетического машиностроения, детали буровых платформ и т.д., требуются высококачественные стали. При этом качество самих сталей зависит от исходных материалов – чистой металлошихты. Пониженное качество стального лома требует проведения его тщательной предварительной подготовки и, в ряде случаев, исключает или сильно ограничивает возможность его использования при выплавке сталей ответственного назначения. В свою очередь снижение качества производимой металлопродукции и

увеличение стоимости металла за счет дополнительных технологических операций ухудшает позиции стали и снижает ее конкурентоспособность по сравнению с другими конструкционными материалами. Одним из вариантов решения проблемы выплавки высококачественных сталей является увеличение объемов производства и использования новых видов чистой первородной металлошихты [1].

В России ведущими научно-исследовательскими и проектными организациями и крупнейшими металлургическими предприятиями в сотрудничестве с фирмой «Интермет-Сервис» был разработан принципиально новый синтетический композиционный материал оксид-металл, получивший общее название синтиком. Этот материал состоит из металлической основы – железоуглеродистого сплава (передельный чугун) и недорогого наполнителя (оксид железа, углеродсодержащие материалы, элементы-восстановители, шлакообразующие компоненты), вводимого в определенном соотношении в жидкий чугун и равномерно распределяемого по объему во время его разливки в литейные формы.

Синтиком с легкостью можно отнести к материалам нового поколения, так как это единственный вид металлошихты, состав, свойства и будущее поведение которой задаются на стадии изготовления. При этом учитывается сортament стали, тип сталеплавильного агрегата, его индивидуальные особенности. Благодаря этому синтиком обладает возможностями удовлетворить самым разнообразным требованиям, предъявляемым к металлошихте современным сталеплавильным производством.

При использовании первичных исходных компонентов синтиком является первородной шихтой, имеющей высокую чистоту по содержанию вредных и нежелательных элементов, известный состав, свойства, происхождение и наследственность. По своим физическим свойствам синтиком относится к чистой тяжеловесной шихте, отличаясь от нее в лучшую сторону более низкой температурой плавления (1150–1250°С), постоянством формы, массы, размеров и свойств, а также повышенной удельной поверхностью и относительно небольшой массой слитков (менее 35 кг).

По сравнению с другими видами металлошихты синтиком содержит наибольшее количество углерода и кислорода – соответственно до 6 и 7,5%, тесно смешанных между собой и обладающих высокоразвитой контактной поверхностью. Благодаря этому в синтиком в процессе его приготовления заранее заложены возможности для быстрого реагирования углерода с собственным кислородом при нагреве и расплавлении. Эти свойства синтикома обеспечивают сдвиг окисления углерода в начало плавления металлошихты, вследствие чего достигается непрерывное обезуглероживание ванны на протяжении всей плавки – от начала проплавления и до выпуска металла. При этом происходит одновременное окисление примесей металлической основы синтикома – кремния, марганца, фосфора, титана, ванадия, хрома и превращение чугуна в низкоуглеродистый полупродукт – первичную сталь.

Наряду с ролью металлошихты синтиком способен выполнять и другие не менее важные технологические задачи. Среди них – интенсификация процесса окисления углерода на заключительной стадии продувки при пониженном содержании углерода в металле, перемешивание ванны после окончания продувки продуктом реакции окисления углерода в синтикоме – монооксидом углерода, ускорение шлакообразования и рафинирования, снижение энергоемкости сталеплавильных процессов, а также охлаждение оставленного конечного шлака и его вспенивание для нанесения слоя шлака на футеровку конвертера – создания гарнисажа.

В настоящее время черная металлургия столкнулась с проблемой дефицита металлолома, ухудшением его качества и резким возрастанием цен на него. В связи с этим работы по созданию новых видов металлошихты приобретают особую актуальность. Синтиком является универсальным материалом с весьма широким спектром применения и большими технологическими возможностями. Его использование открывает новые дополнительные возможности для совершенствования технологии выплавки стали, повышения ее качества, расширения сортамента выплавляемых сталей и дальнейшего улучшения технико-

экономических показателей сталеплавильного производства. Тем самым синтиком способствует повышению конкурентоспособности стали и укрепляет ее позиции как основного конструкционного материала современной техники.

Литература

1. Шахпазов Е.Х., Дорофеев Г.А. Новые синтетические композиционные материалы и технология выплавки стали с их использованием. – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 272 с.

УДК 004.045

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЭМ И АСМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.В. Шиманова, О.С. Петенко, Е.Н. Мурагова

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»)

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор В.А. Мошников

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»)

Краткое введение, постановка проблемы. Наноструктурированные материалы представляют практический интерес, так как обеспечивают существенное повышение функциональных характеристик электронных и оптических приборов, созданных на их основе. В настоящее время активно развиваются методы создания наноструктурированных материалов, основанные на использовании самоорганизации и самоформирования – нелитографические методы. Данные методы создания наноструктур основаны на применении нанопористых материалов в качестве технологических масок для травления, легирования и т.д.

Для создания пористых материалов, структурированных на микро- или наноуровнях, применяют как современные нанотехнологии (например, золь-гель синтез), так и традиционные методы (электрохимическое травление).

Уникальная пористая структура, параметры (диаметр, длина и расстояние между соседними порами) которыми возможно варьировать в процессе синтеза играют определяющую роль при создании различных устройств. В связи с этим очень важно уметь быстро и качественно определять характеристики формируемых пористых слоев [1].

Целью работы являлось написание программы для обработки АСМ и РЭМ изображений пористой поверхности.

Базовые положения исследования. Работа выполнялась при помощи пакетов National Instruments LabVIEW 2010 и National Instruments Vision Assistant 2010, в частности при использовании ряда функций IMAQVision, которые позволяют обрабатывать любые изображения. В качестве исследуемого материала был выбран пористый оксид алюминия, так как его топологическими параметрами легко управлять, варьируя условия анодирования.

Созданная программа позволяет проводить предварительную обработку, количественный и морфологический анализ пористой структуры пленок с помощью цифровых методов обработки изображений. Так же по полученным результатам можно провести количественную оценку пористой структуры: количество пор, их размеры, пористость образца.

Основной результат. По данным программы были получены следующие результаты:

средний диаметр пор образца (пористого анодного оксида алюминия) в электролите на основе серной кислоты составил 20–30 нм, пористость образца 21%, диаметр пор при использовании электролита на основе ортофосфорной кислоты составил 130–150 нм, пористость образца 42%, что согласуется с теоретическими данными.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2010–2013 гг.

Литература

1. Спивак Ю.М., Соколова Е.Н., Петенко О.С., Травкин П.Г. Определение параметров пористой структуры в por-Si и $\text{por-Al}_2\text{O}_3$ путем компьютерной обработки данных растровой и атомно-силовой микроскопии // Молодой ученый. – 2012. – № 5. – С. 1–4.

УДК 531/534

РЕАЛИЗАЦИЯ PEAKFORCE TAPPING С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЭФФЕКТА ПЛУГА ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Б.О. Щербин

(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Научный руководитель: к.ф.-м.н., ст.н.с. А.В. Анкудинов

(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе)

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) успешно применяется для исследования нано- и микрообъектов как в жидкой среде, так и на воздухе [1, 2]. В последнее время особенный интерес привлекают исследования живых биологических клеток [3]. В таких исследованиях требуется минимизировать уровень воздействия АСМ, без нанесения ущерба оперативности и информативности измерений. Наиболее передовым, с этой точки зрения, представляется АСМ метод PeakForce Tapping, активно продвигаемый на рынок компанией Bruker [4]. Он позволяет одновременно детектировать распределения таких локальных свойств поверхности как рельеф, адгезия, модуль Юнга и др., при этом за счет контроля прилагаемых к объекту сил позволяет не разрушать при сканировании даже мягкие объекты. На отечественном АСМ оборудовании частично реализован близкий аналог, режим Jumping Mode [5, 6], несколько уступающий методу PeakForce Tapping по оперативности. Важно, однако, отметить, что оба метода пренебрегают ролью эффекта плуга, который не только вносит погрешность в количественные измерения локальных параметров объекта, но и является одной из главных причин разрушений мягких объектов в АСМ. Целью данной работы является реализация на оборудовании отечественной компании НТ-МДТ режима PeakForce Tapping с компенсацией эффекта плуга.

Получение количественной информации о локальных свойствах объектов основано на методиках силовой спектроскопии. При этом снимается зависимость изгиба зонда от смещения образца, который по закону Гука пропорционален силе взаимодействия. На мягком образце зонд продавит поверхность и изогнется меньше, чем на твердом образце. Из таких измерений можно извлечь контактную жесткость образца [7]. При удалении от образца, контакт зонда с поверхностью прекращается тогда, когда сила упругого изгиба зонда превышает адгезионные силы. По максимальной величине изгиба зонда в сторону поверхности можно определить эти силы [8]. Модуль Юнга может быть оценен по нагрузочно-разгрузочным кривым на основе теории упругого контакта сфера – плоскость (теории Герца, Дерягина-Мюллера-Топорова) [9].

Для исключения касания образца чипом с АСМ зондом, чип размещают под углом к поверхности образца (у большинства приборов компании НТ-МДТ этот угол составляет 20°).

При изгибе зонда, расположенного под углом к поверхности, острие смещается также и в плоскости поверхности, это и есть эффект плуга. Например, при вертикальном перемещении на 20 нм, кончик зонда также сдвигается на 7 нм по горизонтали. Это искажает идентификационную кривую и вносит погрешность во все последующие расчеты. Для исключения данного эффекта необходимо компенсировать продольное смещение образца во время идентификации.

В настоящей работе методика PeakForce Tapping реализуется на микроскопе Интегра «Аура» компании НТ-МДТ на языке программирования VBScript, используя библиотеку функций NovaPowerScript. Скорость работы программы определяет время срабатывания АЦП электронного блока микроскопа. Для использованного микроскопа оно лимитируется 62,5 микросекундами. Если учесть, что амплитуда колебаний образца при измерении силовой кривой может составлять 1500 нм, примерно только 150 нм которой являются информативными, то, при шаге измерения 5 нм и 5 усреднениях в каждой точке, на одну кривую будет потрачено около 100 миллисекунд. В таких условиях суммарное время сканирования области размером 128×128 точек составит около 27 мин.

На данный момент создан прототип программы, позволяющий проводить измерения по методике PeakForce Tapping с учетом эффекта плуга. Проводится оптимизация, направленная на ускорение работы скрипта и повышение автоматизации его работы.

Литература

1. Doktycz M. Atomic force microscopy of biological samples // Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology. – 2010. – V. 2. – Is. 6. – P. 618–634.
2. Munz M. Advances in Polymer Science // Adv. Polym. – 2003. – № 164. – P. 87–210.
3. Няпшаев И., Анкудинов А. и др. Диагностика живых клеток в атомно-силовом микроскопе, используя субмикронный сферический зонд калиброванного радиуса кривизны // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82. – Вып. 10. – С. 109–116.
4. Foster B. New atomic force microscopy (AFM) approaches life sciences gently, quantitatively, and correlatively // American laboratory. – 2012. – № 4. – P. 24–28.
5. Быков И. Поточечные измерения рельефа, сил взаимодействия и локальных свойств в атомно-силовой микроскопии // Сборник тезисов докладов Международного форума по нанотехнологиям «Роснанотех». – М., 2008. – С. 88, 89.
6. Pablo P. de, Colchero J., Gomez-Herrero J., Baro A. Jumping mode scanning force microscopy // Appl. Phys. Lett. – 1998. – № 73(22). – С. 3300.
7. Няпшаев И., Щербин Б, Анкудинов А. и др. Механические свойства наносвитков на основе $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2011. – № 2. – Т. 2. – С. 48–57.
8. Van der Werf K., Putman C., Grooth B., Greve J. Adhesion force imaging in air and liquid by adhesion mode atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. – 1994. – № 65. – С. 1195.
9. Bhushan B. Handbook of Micro / Nanotribology. 2nd ed. Boca Raton, 1999. – 859 p.