DOI: 10.18721/JPM.11404

УДК 535.37 54-78 539.2 541.65/.654

ДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ И ФОТОПРОВОДИМОСТЬ НАНОКОМПОЗИТА МЕН-РРV- СУЛЬФИД СВИНЦА

Н.М. Романов^{1,2}, М.М. Малова¹, Э. Лахдеранта², С.Ф. Мусихин¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия

Исследованы свойства тонких пленок полимерного нанокомпозита MEH-PPV/PbS (полимер MEH-PPV — квантовые точки (КТ) сульфида свинца PbS) и отдельно КТ PbS, подвергнутых гамма-облучению дозами до 24,4 кГр по $\rm H_2O$. Образцы пленок для изучения их фотолюминесценции ($\rm \Phi J$) были приготовлены из раствора с помощью технологии спин-коатинга, а для изучения фотопроводимости — по технологии «на щели».

Найдены пороговые дозы резкой необратимой деградации ФЛ нанокомпозитного полимера MEH-PPV/PbS, определяемые деградацией КТ PbS. Исследована динамика поведения фотопроводимости нанокомпозита после облучения. Показано, что наблюдаемые процессы релаксации проводимости в нанокомпозите связаны с восстановлением разрывов в сопряженных цепях полимера МЕН-PPV. Обнаружено отсутствие релаксации проводимости и фотопроводимости в коллоидных КТ PbS.

Ключевые слова: гамма-излучение, фотолюминесценция, фотопроводимость, квантовая точка, сульфид свинца, проводящий полимер

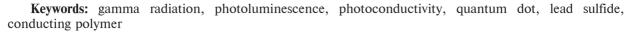
Ссылка при цитировании: Романов Н.М., Малова М.М., Лахдеранта Э, Мусихин С.Ф. Действие гамма-излучения на люминесценцию и фотопроводимость нанокомпозита МЕН-PPV — сульфид свинца // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 35-46. DOI: 10.18721/JPM.11404

EFFECT OF GAMMA RADIATION ON LUMINESCENCE AND PHOTOCONDUCTIVITY OF MEH-PPV – LEAD SULFIDE NANOCOMPOSITE

N.M. Romanov^{1,2}, M.M. Malova¹, E. Lahderanta², S.F. Musikhin¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ² Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

The thin-film properties of polymeric nanocomposite MEH-PPV/PbS (with PbS quantum dots (QD)) and PbS-QD gamma-irradiated by 0.5–24.4 kGy doses have been studied. The film samples for photoluminescence (PL) investigation were prepared from solution using spin-coating technique, and for photoconductivity measuring were made using slot technique. The threshold doses for irreversible sharp PL-degradation of nanocomposite determined by the degradation of PbS-QD were found. The behavior dynamics of MEH-PPV/PbS photoconductivity after irradiation was analyzed. The conduction relaxation observed in the MEH-PPV/PbS was shown to be due to restoration of damages in the conjugate chains of the MEH-PPV polymer. Moreover, the absence of conductivity and photoconductivity relaxations in the colloidal PbS was revealed.



Citation: N.M. Romanov, M.M. Malova, E. Lahderanta, S.F. Musikhin, Effect of gamma radiation on luminescence and photoconductivity of MEH-PPV — lead sulfide nanocomposite, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (4) (2018) 35–46. DOI: 10.18721/JPM.11404

Введение

Оптоэлектронные приборы являются перспективными устройствами широкого применения в самых разных отраслях промышленности; в частности, это приборы, изготовленные на основе тонкопленочных полимерных нанокомпозитов [1]. Возможность модификации полимерной матрицы различными ингредиентами позволяет создавать нанокомпозитные структуры с требуемыми параметрами [2]. Высокомолекулярное соединение в качестве матрицы должно само по себе обладать характеристиками, обеспечивающими требуемые свойства нанокомпозита [3]. Проводящий полимер MEH-PPV обладает хорошими электрическими характеристиками, такими как проводимость и подвижность носителей [4]. На основе данного полимера можно создавать электролюминесцентные светоизлучающие структуры [4]. Применение полупроводниковых квантовых точек (КТ) в качестве неорганических включений позволяет создавать материалы с заранее заданными свойствами [5]. Например, с помощью KT сульфида свинца PbS можно изготавливать материалы, имеющие практическое приложение в ближней инфракрасной (ИК) области спектра электромагнитных волн. Указанная область широко используется для оптической связи и служит для дистанционного зондирования агропромышленных, фармацевтических и биологических объектов [6]. Квантовые точки сульфида свинца можно считать одними из самых перспективных допантов для эффективного поглощения солнечной энергии в различных солнечных элементах, благодаря сочетанию таких качеств, как простота и дешевизна производства, возможность синтезировать нанокомпозиты широкого спектрального диапазона [7].

Деградация свойств КТ является существенной проблемой и все еще препятствует коммерциализации солнечных элементов на основе КТ [1]. Нестабильность подобных материалов объясняется, главным образом, окислительной деградацией КТ под действием кислородо- и влагосодержащей атмосферы. Неблагоприятные условия синтеза КТ и создания фотогальванических устройств на основе этих KT оказывают негативное влияние на качество оптических и электронных свойств готовых изделий [8, 9]. В настоящее время в литературе имеются довольно полные обзоры, посвященные влиянию окисления на KT PbS [10]. Наряду с этим в опубликованных материалах практически отсутствуют исследования, направвыяснение того, как действует гамма-излучение на квантовые точки и нанокомпозитные материалы на их основе. Тем не менее, в настоящее время следует признать актуальным вопрос стабильности данных материалов под действием гаммаоблучения. Указанная проблема важна для нанокристаллов сульфида свинца, которые относятся к наиболее перспективным коллоидным материалам для создания фотоприемников электромагнитного излучения в ближней ИК-области.

Настоящее исследование продолжает работу [13]. В данной статье представлены уточненные значения пороговой дозы резкой деградации оптических характеристик КТ, а также прослежена динамика изменения спектров фотолюминесценции (ФЛ) в течение четырех недель (с недельным интервалом) после облучения. Кроме того, нами впервые рассмотрено влияние различных доз гамма-облучения на электрические свойства нанокомпозита полимер—КТ, проанализированы температурные зависимости проводимости и совокупность изменений оптических и электрических свойств нанокомпозита полимер — КТ.

Экспериментальная часть

Для эксперимента использовался промышленно доступный порошок MEH-PPV производства компании Sigma Aldrich co среднечисловой молекулярной массой около 40 000 — 70 000. Структурной единицей является (поли[2-метокси-5полимера (2-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилен], его химическая формула – $(C_{18}H_{28}O_2)_n$. Квантовые точки (КТ) PbS были синтезированы по методу, идентичному использованному в работе [11]. КТ были синтезированы из металлоорганического раствора, основой которого служил оксид свинца PbO, растворенный в олеиновой кислоте $C_{18}H_{34}O_{2}$. В данный раствор вводился бистриметилсилилсульфид в триоктилфосфине. Данные КТ сульфида свинца позволяют синтезировать нанокомпозиты с возможностью перестройки спектральных параметров в диапазоне от 1000 до 1600 нм [11].

Для исследования фотолюминесцентных свойств нанокомпозита MEH-PPV/PbS были изготовлены образцы, представляющие собой пленки толщиной порядка 1 мкм, нанесенные на стеклянные подложки. Данные образцы были получены из раствора с помощью технологии спин-коатинга.

Для исследования электрических свойств объектов были изготовлены образцы по технологии «на щели». Данная технология предусматривает нанесение на диэлектрическую (мы использовали стеклянную) подложку тонкого (порядка 10 мкм) слоя электропроводящего материала (мы использовали токопроводящий клей на серебре «Контактол»), с последующим высушиванием в течение 24 ч. «Контактол» представляет собой маловязкую композицию, в состав которой входят различные синтетические смолы в качестве связующего элемента, а токопроводящим наполнителем в этой композиции служит мелкодисперсный порошок серебра (проба 999). Клей обладает удельным объемным сопротивлением около 0,01 Ом · см³. В токопроводящем слое формировалась сквозная щель порядка 10 мкм, которую мы заполняли с избытком исследуемым веществом (раствор нанокомпозита). Раствор изготавливался путем последовательного механического перемешивания и 15-минутной обработки в ультразвуковой ванне порошка МЕН-РРV массой 0,1 г и затем добавлением толуола объемом 0,5 мл. Полученный раствор механически перемешивался с готовым коллоидным раствором КТ PbS и подвергался обработке в ультразвуковой ванне в течение 10 мин.

Спектры ФЛ образцов несут информацию об электронной структуре материалов и позволяют анализировать миграцию фотовозбужденного экситона. Применение методики регистрации оптического пропускания образцов ограничено из-за изменения оптических характеристик подложек в результате светового воздействия. Последнее вызывает образование различных дефектов, в том числе ионизацию материала, наличие же в подложках ионов ведет к присоединению или отдаче электронов, а это приводит к изменению и деградации полезных оптических свойств.

Спектры ФЛ образцов регистрировалась с помощью автоматизированной установки Horiba Jobin Yvon, в состав которой входят монохроматор FHR 640 с дифракционной решеткой 1200 шт/мм, детектор Symphony II 1024*256 Cryogenic Open-Electrode CCD и необходимые оптические фильтры. Возбуждение люминесценции образцов производилось полупроводниковым лазером с рабочей длиной волны $\lambda = 405$ нм.

Электрические свойства (вольтамперные характеристики и фотопроводимость) изучались на установке, состоящей из источника-измерителя KEITHLEY 2601A со встроенным процессором TSP (Test Script Processor), совмещенного с лабораторной зондовой станцией. Измерения проводились в интервале температур от 77 К (точка кипения жидкого азота) до 300 К (комнатная температура). При измерении фотопроводимости образцов, их подвергали излучению от кварцевой галогенной лампы мощностью 70 Вт (обладает непрерывным спектром, близким к спектру абсолютно черного тела).

В качества источника гамма-квантов использовалась установка, в состав которой входят 84 ампулы, заполненные порошком

изотопа цезия-137. Данный изотоп непрерывно испускает гамма-кванты с энергией 661 кэВ. Облучение осуществляли в квазизамкнутой камере (в ней не откачивали атмосферные кислород и влагу). Поэтому такая среда подвергалась ионизации и оказывала негативное действие на исследуемые образцы. В результате гамма-облучения исследуемые образцы получили следующие суммарные экспозиционные дозы, кГр: 0; 0,5; 1,0; 1,5; 3,1; 6,1; 12,2 и 24,4 (по Н₂О). Динамику изменения спектров ФЛ после облучения отслеживали в течение четырех недель (с недельным интервалом). После облучения образцы хранились в обычных условиях (без применения спецсредств). Все измерения производились при стандартных условиях.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Изменение свойств нанокомпозитов может происходить под действием ионизирующего излучения. Гамма-излучение, в силу своих физических особенностей, имеет сильную проникающую способность, взаимодействие с веществом выражается

в электронном возбуждении, электронной ионизации, рождении электроннодырочной пары [12].

Влияние радиации на спектры ФЛ. В предыдущей нашей работе [13] было по-казано, что ФЛ изучаемых нанокомпозитов в целом характеризуется фотолюминесценцией квантовых точек (рис. 1). Следовательно, влияние гамма-облучения на ФЛ нанокомпозитов можно рассмотривать исключительно как влияние такового на ФЛ квантовых точек.

Изменение в спектре ФЛ проводящего полимера, в результате его вхождения в состав нанокомпозита, связано с тем, что носители заряда, рожденные в полимерной матрице, захватываются в КТ и рекомбинируют с испусканием квантов инфракрасного излучения. Изменения под действием гамма-излучения в спектре ФЛ проводящего полимера (рис. 2) можно связать со структурными изменениями, происходящими в нем. Подробно причины падения ФЛ и различные конкурирующие процессы, протекающие в проводящем полимере под действием гамма-излучения, рассмотрены нами в работе [13].

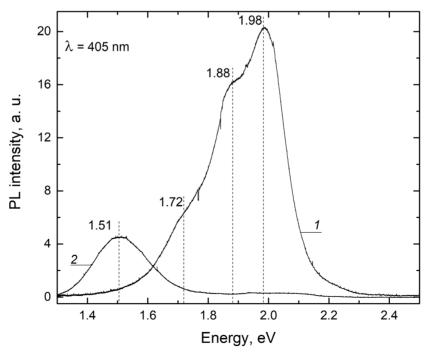


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) МЕН-PPV (*I*) и КТ PdS (*2*). Длина волны возбуждающего лазерного излучения -405 нм

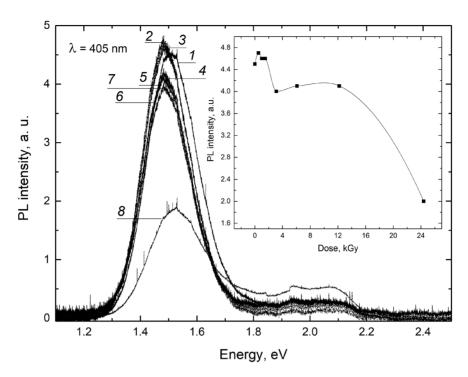


Рис. 2. Спектры ФЛ необлученного (I) и облученных гамма-квантами (2-8) образцов нанокомпозита MEH-PPV/PbS, а также зависимость максимальной интенсивности ФЛ образца от суммарной экспозиционной дозы D гамма-облучения (на вставке); D, кГр: 0,51 (2), 1,00 (3), 1,5 (4), 3,1 (5), 6,1 (6), 12,2 (7), 24,4 (8) (по H_2O). Длина волны возбуждающего лазерного излучения — 405 нм

Анализ полученных экспериментальных данных и результатов работы [13] позволяет заключить, что пороговая экспозиционная доза идентична таковой для KT PbS - лежит в интервале от 12,2 до 18,4 кГр по H_2O . При резком снижении интенсивности ФЛ после критической дозы облучения, почти не происходит сдвига эмиссионного пика ФЛ. Отметим, что в работах [14, 15] наблюдается монотонное снижение интенсивности ФЛ с увеличением дозы облучения, а не пороговая зависимость, как в изученных образцах. В работе [14] утверждается, что облучение гамма-квантами уменьшает размер мицелл КТ и органической «шубы» вокруг них, причем указанное изменение размеров зависит от условий получения конкретных КТ. Установлено уменьшение размера КТ в зависимости от уровня гидратации мицелл. На этом основании авторы работы делают вывод, что с помощью гамма-облучения можно управлять размером KT CdS. Это не согласуется с нашими данными, относящимися к квантовым точкам PbS. В работе

[15] уровень фотолюминесции коллоидных КТ CdSe/ZnS зависит от дозы гаммаоблучения; при этом отмечена радиационная нестойкость данных КТ. Исследование перовскитных КТ CsPbBr₃ также показало наличие зависимости от экспозиционной дозы облучения. Такие КТ проявляют гораздо лучшую радиационную стойкость к воздействию гамма-излучения, чем коммерческие образцы КТ CdSe/ZnS. Квантовые точки CsPbBr₃ показывали большую стабильность к гамма-облучению, чем исследованные КТ PbS (их облучение проводили в растворах).

В спектрах ФЛ, зарегистрированных после облучения дозой 12,2 кГр и в разные моменты времени после выдержки облученных образцов при комнатной температуре (рис. 3), наблюдается процесс слабой деградации со временем. Данный эффект обусловлен пострадиационным влиянием гамма-квантов на «шубу» органических молекул, окружающих КТ. В сочетании с кислородосодержащей атмосферой хранения

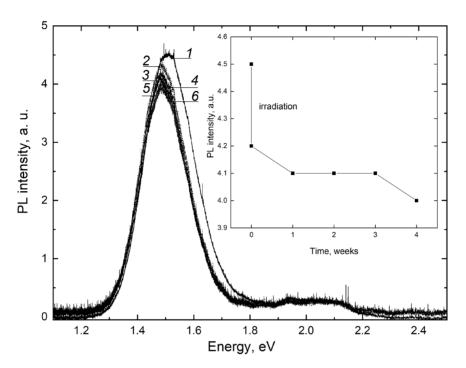


Рис. 3. Спектры ФЛ необлученного (I) и облученного гамма-квантами дозой 12,2 кГр (2-6) образцов нанокомпозита MEH-PPV/PbS, а также зависимость максимальной интенсивности ФЛ образца от времени t после облучения (на вставке); Время t, нед: 0 (2), 1 (3), 2 (4), 3 (5), 4 (6)

образцов, это приводит к образованию в нанокомпозитах центров безызлучательной рекомбинации и центров захвата электрического заряда.

Влияние радиации на фотопроводимость. Данные по фотопроводимости исследуемых пленок в зависимости от дозы облучения (рис. 4) дополняют информацию, полученную из спектров ФЛ.

На начальном участке зависимости фотопроводимости пленки нанокомпозита от дозы облучения наблюдается резкое возрастание фотопроводимости (рис. 4, a), в отличие от соответствующей кривой для пленок чистых KT (рис. 4, b), связанное с процессами, происходящими в полимере, а именно со сшивкой полимерных цепей. Данный результат коррелирует с результатами, полученными при анализе спектров ФЛ. По мере увеличения дозы гамма-облучения, в полимере возникают процессы внесения дефектов и конформации полимерной цепи, что приводит к постепенному падению фотопроводимости. Деградация самих же KT при дозах в интервале 6,1-12,2 кГр

вызывает резкое падение фотопроводимости, что также соотносится с результатами, полученными при изучении спектров ФЛ.

Небольшое снижение фотопроводимости в пленках КТ PbS на начальном участке кривой доза — фотопроводимость может быть обусловлено как появлением центров рекомбинации при облучении гаммаквантами, так и захватом заряда на «шубу» КТ. В первом случае рекомбинация приводит к снижению концентрации возбужденных носителей. Во втором захват заряда вызывает добавочный разброс случайного потенциала и, как следствие, — снижение прыжковой проводимости носителей заряда, а значит, и их частичную андерсоновскую локализацию.

Описанный эффект наблюдается и в нанокомпозите, причем перенос дырок происходит преимущественно по полимерной матрице, а перенос электронов — по цепочкам КТ. Таким образом, фотопроводимость нанокомпозита существенно зависит от процессов, происходящих как в полимере, так и в КТ.

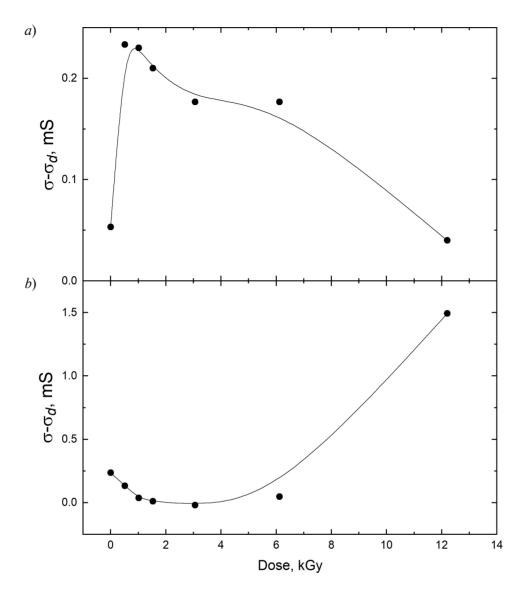


Рис. 4. Графики зависимости фотопроводимости тонких пленок MEH-PPV/PbS (a) и PbS (b) от экспозиционной дозы гамма-облучения. Пленки были изготовлены по технологии «на щели», освещались галогенной лампой мощностью 70 Вт; σ_d — темновая проводимость

Нами были получены графики изменения во времени фотопроводимости пленок, подвергнутых сначала гамма-облучению большой дозой гамма-квантов, а затем вторично гамма-облученных суммарной экспозиционной дозой 12,2 кГр (в данной статье эти графики не представлены). Установлено, что после такой схемы облучения, в пленках коллоидных КТ PbS не происходит релаксации как проводимости, так и фотопроводимости.

Анализ динамики релаксации фотопро-

водимости после облучения гамма-квантами (графики в данной статье не представлены) позволил установить частичное восстановление фотопроводимости в пленках нанокомпозита. Этот эффект обусловлен, на наш взгляд, сшиванием разрывов в сопряженных цепях полимера МЕН-PPV.

На рис. 5 приведены графики температурной зависимости электропроводности и влияния освещения на электропроводность пленок полимера, КТ и нанокомпозита. Видно, что с увеличением температуры

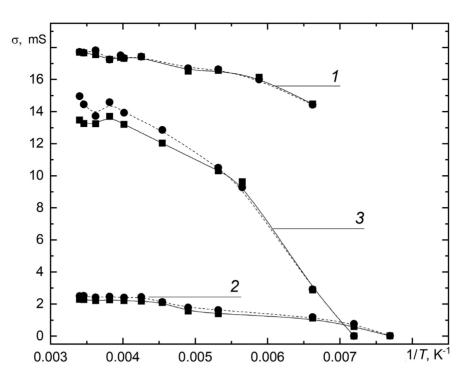


Рис. 5. Графики температурных зависимостей темновой (сплошная линия) и световой (пунктир) проводимостей для пленок MEH-PPV (1), PbS (2) и MEH-PPV /PbS (3)

электропроводность возрастает у всех исследуемых образцов. Это обусловлено как увеличением концентрации носителей заряда, так и ростом их подвижности симбатно с ростом числа фононов. Отличие проводимости пленок КТ и нанокомпозитов от проводимости полимера связано с эффектом насыщения электропроводности последнего при температурах, близких к комнатной. На рис. 5 также видно, что в пленках полимера практически отсутствует различие проводимостей в темноте и при освещении. Это обусловлено преобладанием скорости процесса рекомбинации экситонов с испусканием фотона над скоростью процесса их распада с образованием свободных электронов и дырок. Известно, что подвижность дырок в изучаемом полимере выше, чем подвижность электронов, и что протекание тока в образце обусловлено преимущественно дырочной проводимостью. В то же время в нанокомпозитах проводимость формируется сложнее: она связана как с дырочной проводимостью полимерной матрицы, так и с прыжковой проводимостью по цепочкам квантовых то-

чек PbS. В пленках же КТ сульфида свинца проводимость является исключительно прыжковой по скелету бесконечного кластера КТ. Как видно из спектров ФЛ нанокомпозита (см. рис. 2), КТ эффективно захватывают электроны и дырки из полимера, что способствует распаду возбужденных экситонов; как следствие, прыжковая проводимость по цепочкам КТ может давать значительный вклад в проводимость пленки. Различие проводимостей полимера в темноте и на свету оказывается незначительным и практически не зависит от температуры, а фотопроводимость пленок КТ и нанокомпозита растет с ростом температуры (рис. 6).

Полученный здесь результат существенно отличает фотопроводимость нанокомпозита от фотопроводимости обычного полупроводникового фоторезистора, у которого эта величина обычно падает с увеличением температуры ввиду роста темновой концентрации носителей.

Указанный рост фотопроводимости пленок нанокомпозита и КТ обусловлен увеличением прыжковой подвижности носителей

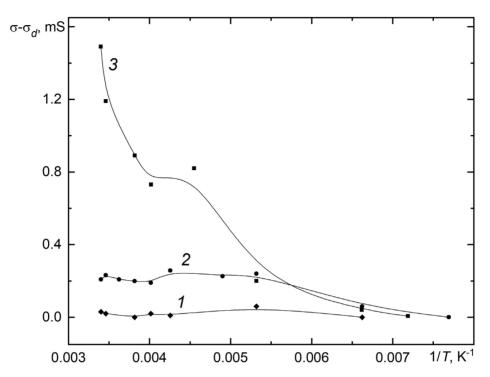


Рис. 6. Графики температурных зависимостей фотопроводимости для тонких пленок MEH-PPV (1), PbS (2), MEH-PPV / PbS (3)

при увеличении температуры. Сходное поведение фотопроводимости пленок КТ и нанокомпозита с температурой свидетельствует об одинаковой природе процесса, а это означает, что фотопроводимость нанокомпозита обусловлена в основном проводимостью по цепочкам КТ при световом воздействии.

Однако фотопроводимость нанокомпозитов превосходит таковую для КТ, благодаря росту вероятности распада экситона (с образованием свободных электронов и дырок) на границе раздела КТ и полимерных цепей. Проведенный нами математический анализ графиков показал, что температурная зависимость электропроводности в целом соответствует закону Мотта:

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-(T_0 / T)^{1/(1+d)}],$$

где T — абсолютная температура; d — размерность пространства проводящей системы; σ_0 , T_0 — константы.

Однако особенность системы состоит в том, что размерность d не является целым числом, поскольку величина 1/(1+d) не равна 1/4, 1/3 или 1/2.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено следующее.

Пороговая экспозиционная доза резкого падения фотолюминесценции (ФЛ) MEH-PPV/PbS нанокомпозита полностью определяется радиационной устойчивостью KT PbS и лежит в интервале от 12,2 до 18,4 кГр (по H_3O). Снижения интенсивности спектров ФЛ образцов непосредственно после их облучения не происходит, однако наблюдается процесс ее слабой деградации со временем. Данные эффекты обусловлены влиянием гаммаоблучения и пострадиационным влиянием гамма-квантов на «шубу» органических молекул, окружающих КТ.

В полимерной матрице протекают, как минимум, два конкурирующих процесса: сшивка полимерных цепей и внесение дефектов в полимерную цепь (конформация полимерной цепи), что выражается нелинейным поведением зависимости фотопроводимости тонких пленок, изготовленных

по технологии «на щели», от экспозиционной дозы облучения.

Частичное восстановление проводимости обусловлено регенерацией разрывов в сопряженных цепях полимера. Кроме того, из анализа графиков температурной зависимости электропроводности было найдено, что закон Мотта выполняется как для пленок нанокомпозита, так и пленок его компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Bockstaller M.R., Thomas E.L.** Optical properties of polymer-based photonic nanocomposite materials // J. Phys. Chem. B. 2003. Vol. 107. No. 37. Pp. 10017–10024.
- 2. **Du Y., Shen S.Z., Cai K., Casey P.S.** Research progress on polymer-inorganic thermoelectric nanocomposite materials // Progress in Polymer Science. 2012. Vol. 37. No. 6. Pp. 820–841.
- 3. Hussain F., Hojjati M., Okamot M., Gorda R.E. Reviewarticle: Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An overview // Journal of Composite Materials. 2006. Vol. 40. No. 17. Pp. 1511–1576.
- 4. **Lee R.-H., Lai H.-H.** Enhancing electroluminescence performance of MEH-PPV based polymer light emitting device via blending with organosoluble polyhedral oligomeric silsesquioxanes // European Polymer Journal. 2007. Vol. 43. No. 3. Pp. 715–724.
- 5. **Kim K., Woo J.Y., Jeong S., Han C.-S.** Photoenhancement of a quantum dot nanocomposite via UV annealing and its application to white LEDs // Advanced Materials. 2011. Vol. 23. No. 7. Pp. 911–914.
- 6. **Lipcsey M., Woinarski N.C., Bellomo R.** Near infrared spectroscopy (NIRS) of the thenar eminence in anesthesia and intensive care // Ann. Intensive Care. 2012. Vol. 2. No. 11. Pp 1–9.
- 7. **Wang X.** Recent progress in colloidal quantum dot photovoltaics // Frontiers of Optoelectronics. 2015. Vol. 8. No. 3. Pp. 241–251.
- 8. **Peterson J.J., Krauss T.D.** Photobrightening and photodarkening in PbS quantum dots // Phys. Chem. Chem. Phys. 2006. Vol. 8. No. 33. Pp. 3851–3856.
- 9. **Ihly R., Tolentino J., Liu Y., Gibbs M., Law M.** The photothermal stability of PbS quantum dot solids // ACS Nano. 2011. Vol. 5. No. 10. Pp. 8175–8186.

- 10. Stadelmann K., Elizabeth A., Sabanés N.M., Domke K.F. The SERS signature of PbS quantum dot oxidation // Vibrational Spectroscopy. 2017. Vol. 91. July. Pp. 157–162.
- 11. Bakueva L., Musikhin S., Hines M.A., Chang T.-W.F., Tzolov M., Scholes G.D., Sargent E.H. Size-tunable infrared (1000–1600) electroluminescence from PbS quantum dot nanocrystals in a semiconducting polymer // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. No. 17. Pp. 2895–2897.
- 12. **El-Mallawany R., Abousehly A., El-Rahamani A.A., Yousef E.S.** Radiation effect on the ultrasonic attenuation and internal friction of tellurite glasses // Mater. Chem. Phys. 1998. Vol. 52. No. 2. Pp. 161–165.
- 13. **Романов Н.М., Мусихин С.Ф.** Воздействие гамма-излучения на люминесценцию нанокомпозитов проводящего полимера МЕН-РРV с квантовыми точками сульфида свинца // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 41—48.
- 14. Bekasova O.D., Revina A.A., Rusanov A.L., Kornienko E.S., Kurganov B.I. Effect of gammaray irradiation on the size and properties of CdS quantum dots in reverse micelles // Rad. Phys. Chem. 2013. Vol. 92. November. Pp. 87–92.
- 15. Withers N.J., Sankar K., Akins B.A., Memon T.A., Gu T., Gu J., Smolyakov G.A., Greenberg M.R., Boyle T.J., Osiński M. Rapid degradation of CdSe/ZnS colloidal quantum dots exposed to gamma irradiation // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. No. 17. Pp. 1731011—1731013.
- 16. Матюшкин Л.Б., Романов Н.М. Влияние гамма-облучения на фотолюминесценцию нанокристаллов CsPbBr₃ и CdSe/ZnS // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 2. С. 72—74.

Статья поступила в редакцию 10.10.2018, принята к публикации 25.10.2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Романов Николай Михайлович — аспирант кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, *Санкт-Петербург*, *Российская Федерация*.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 nikromanov.90@gmail.com

Малова Мария Михайловна — студентка Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 malovamm94@gmail.com

Лахдеранта Эркки — доктор наук, профессор Лаппеенрантского технологического университета, г. Лаппеенранта, Финляндия.

Skinnarilankatu 34, 53850, Lappeenranta, Finland Erkki.Lahderanta@lut.fi

Мусихин Сергей Федорович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 musihin.sf@spbstu.ru

REFERENCES

- [1] **M.R. Bockstaller, E.L. Thomas,** Optical properties of polymer-based photonic nanocomposite materials, J. Phys. Chem. B. 107 (37) (2003) 10017–10024.
- [2] Y. Du, S.Z. Shen, K. Cai, P.S. Casey, Research progress on polymer-inorganic thermoelectric nanocomposite materials, Progress in Polymer Science. 37 (6) (2012) 820–841.
- [3] **F. Hussain, M. Hojjati, M. Okamot, R.E. Gorda,** Review article: Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An overview, Journal of Composite Materials. 40 (17) (2006) 1511–1576.
- [4] **R.-H. Lee, H.-H. Lai,** Enhancing electroluminescence performance of MEH-PPV based polymer light emitting device via blending with organosoluble polyhedral oligomeric silsesquioxanes, European Polymer Journal. 43 (3) (2007) 715–724.
- [5] K. Kim, J.Y. Woo, S. Jeong, C.-S. Han, Photoenhancement of a quantum dot nanocomposite via UV annealing and its application to white LEDs, Advanced Materials. 23 (7) (2011) 911 –914.
- [6] M. Lipcsey, N.C. Woinarski, R. Bellomo, Near infrared spectroscopy (NIRS) of the thenar eminence in anesthesia and intensive care, Ann. Intensive Care. 2 (11) (2012) 1–9.
- [7] **X. Wang,** Recent progress in colloidal quantum dot photovoltaics, Frontiers of Optoelectronics. 8 (3) (2015) 241–251.
- [8] **J.J. Peterson, T.D. Krauss,** Photobrightening and photodarkening in PbS quantum dots, Phys. Chem. Chem. Phys. 8 (33) (2006) 3851–3856.
- [9] R. Ihly, J. Tolentino, Y. Liu, et al., The photothermal stability of PbS quantum dot solids,

- ACS Nano. 5 (10) (2011) 8175-8186.
- [10] **K. Stadelmann, A. Elizabeth, N.M. Sabanés, R.F. Domke,** The SERS signature of PbS quantum dot oxidation, Vibrational Spectroscopy. 91 (July) (2017) 157–162.
- [11] L. Bakueva, S. Musikhin, M.A. Hines, et al., Size-tunable infrared (1000–1600) electroluminescence from PbS quantum dot nanocrystals in a semiconducting polymer, Appl. Phys. Lett. 82 (17) (2003) 2895–2897.
- [12] **R. El-Mallawany, A. Abousehly, A.A. El-Rahamani, E.S. Yousef,** Radiation effect on the ultrasonic attenuation and internal friction of tellurite glasses, Materials Chemistry and Physics. 52 (2) (1998) 161–165.
- [13] N.M. Romanov, S.F. Musikhin, Effect of gamma radiation on the luminescence of nanocomposites of MEH-PPV conductive polymer and PbS quantum dots, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 41–48.
- [14] **O.D. Bekasova, A.A. Revina, A.L. Rusanov, et al.,** Effect of gamma-ray irradiation on the size and properties of CdS quantum dots in reverse micelles, Rad. Phys. Chem. 92 (Nov) (2013) 87–92.
- [15] N.J. Withers, K. Sankar, B.A. Akins, et al., Rapid degradation of CdSe/ZnS colloidal quantum dots exposed to gamma irradiation, Applied Physics Letters. 93 (17) (2008) 1731011–1731013.
- [16] **L.B. Matyushkin, N.M. Romanov,** Effect of gamma irradiation on the photoluminescence of CsPbBr₃ and CdSe/ZnS nanocrystals, Journal of Optical Technology. 2018. Vol. 85 (2) (2018) 119–121.

Received 10.10.2018, accepted 25.10.2018.

THE AUTHORS

ROMANOV Nikolay M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation nikromanov.90@gmail.com

MALOVA Maria M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation malovamm94@gmail.com

LÄHDERANTA Erkki

Lappeenranta University of Technology Skinnarilankatu 34, 53850 Lappeenranta, Finland Erkki.Lahderanta@lut.fi

MUSIKHIN Sergey F.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation musihin.sf@spbstu.ru