



DOI: 10.18721/JPM.11204

УДК 535.37 54-78 539.2 541.65/.654

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ НАНОКОМПОЗИТОВ ПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИМЕРА МЕН-PPV С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ СУЛЬФИДА СВИНЦА

Н.М. Романов^{1,2}, С.Ф. Мусихин¹

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

² Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия

Исследовано воздействие гамма-квантов на фотолюминесценцию тонких пленок проводящего полимера МЕН-PPV, квантовых точек (КТ) PbS и нанокompозитов МЕН-PPV/PbS. Тонкие пленки были получены методом центрифугирования. Образцы подвергались облучению следующими экспозиционными дозами, Гр: 0; $1,84 \cdot 10^4$; $4,18 \cdot 10^4$; $6,73 \cdot 10^4$. Установлено немонотонное снижение интенсивности фотолюминесценции облученного полимера МЕН-PPV с увеличением дозы, что может быть связано с протеканием двух разнонаправленных конкурирующих процессов: деструкция полимерных цепей молекул и их сшивка. В процессе облучения гамма-квантами происходит существенное изменение структуры полимера. Интенсивность фотолюминесценции КТ PbS после облучения указанными дозами падает приблизительно в два раза; при этом происходит сдвиг максимума интенсивности в коротковолновую область, что связано с изменением энергетической структуры КТ.

Ключевые слова: проводящий полимер; квантовая точка; МЕН-PPV; сульфид свинца; фотолюминесценция; гамма-квант

Ссылка при цитировании: Романов Н.М., Мусихин С.Ф. Воздействие гамма-излучения на люминесценцию нанокompозитов проводящего полимера МЕН-PPV с квантовыми точками сульфида свинца // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 41 – 48. DOI: 10.18721/JPM.11204

GAMMA-INDUCED EFFECT ON THE LUMINESCENCE OF NANOCOMPOSITES OF MCH-PPV CONDUCTIVE POLYMER WITH LEAD SULPHIDE QUANTUM DOTS

N.M. Romanov^{1,2}, S.F. Musikhin¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

² Lappeenranta Technological University, Lappeenranta, Finland

Gamma radiation effect on the photoluminescence of thin films of conductive polymer MCH-PPV, PbS quantum dots (QDs) and MCH-PPV–PbS (QDs) nanocomposite have been studied. Thin films were obtained by centrifugation. Samples were irradiated with exposure doses (in Gy): 0; $1.84 \cdot 10^4$; $4.18 \cdot 10^4$; $6.73 \cdot 10^4$. Photoluminescence of the polymer MCH-PPV was established to change nonmonotonically with an increase in doses, which might be due to running the oppositely directed, competing processes under the action of gamma quanta, namely destruction and cross-linking of polymer chains. Significant polymer's restructuring took place under gamma rays. Photoluminescence intensity of PbS QDs fell approximately twofold after irradiation with doses mentioned above, the intensity maximum shifting to the short-wavelength region. This behavior was due to a change in the energy structure of the QDs. The effect of gamma quanta on the QDs photoluminescence was analyzed.

Key words: conductive polymer; quantum dot; MEH-PPV; PbS; photoluminescence; gamma quantum

Citation: N.M. Romanov, S.F. Musikhin, Gamma-induced effect on the luminescence of nanocomposites of MEH-PPV conductive polymer with lead sulphide quantum dots, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 11 (2) (2018) 41 – 48. DOI: 10.18721/JPM.11204

Введение

Наноконпозиты на основе проводящих полимеров и полупроводниковых нанокристаллов являются перспективными материалами для разработки оптоэлектронных приборов с гибкой настройкой их параметров [1].

Различные сочетания проводящих полимеров и полупроводниковых наночастиц (квантовых точек (КТ)) позволяют задать необходимые оптические свойства наноконпозитов [2 – 4]. Вместе с тем варьирование размера КТ разных материалов позволяет обеспечить необходимый оптический спектр наноконпозита и его свойства. Дополнительное управление оптическими свойствами наноконпозитов можно осуществлять посредством воздействия ионизирующим излучением, в частности гамма-излучением. Гамма-кванты могут влиять как на материал полимерной матрицы, так и на полупроводниковые наночастицы. Гамма-излучение, в силу своих физических особенностей, имеет сильную проникающую способность. Взаимодействие гамма-квантов с веществом может выражаться в электронном возбуждении, электронной ионизации, рождении электронно-дырочной пары [5].

В работах [6 – 8] рассмотрено влияние гамма-облучения на квантовые точки CdS, CdSe/ZnS и CsPbBr₃. Проанализированы возможные механизмы их деградации. В работе [6] было показано, что облучение гамма-квантами изменяет размер мицелл КТ и органической «шубы» вокруг них, причем изменения размеров вследствие облучения зависят от условий получения конкретных КТ. Показано уменьшение размера КТ как функции уровня гидратизации мицелл и полученной дозы. Авторы работы делают вывод, что с помощью γ -облучения можно изменять размер квантовых точек CdS и, как следствие, последовательно изменять их параметры и свойства (интенсивность, время жизни и положение полосы флуоресценции).

В работе [7] рассмотрено влияние гамма-излучения от источника ¹³⁷Cs на фотолюминесцентные свойства коллоидных квантовых точек CdSe/ZnS. Оценена их оптическая деградация как функция дозы облучения. Авторы работы связывают уменьшение постоянной времени фотолюминесценции с рекомбинацией экситонных состояний. В то же время падение квантовой эффективности объясняется безызлучательными процессами, которые не связаны с экситонными состояниями, а представляют собой захват возбужденных носителей на дефекты, создаваемые облучением. В целом отмечена радиационная нестойкость данных квантовых точек.

В работе [8] было рассмотрено влияние гамма-излучения от источника ¹³⁷Cs на перспективные перовскитные КТ CsPbBr₃. Было показано, что КТ CsPbBr₃ существенно более стабильны к воздействию γ -излучения, чем коммерческие образцы КТ CdSe/ZnS, традиционно используемые для тех же задач. Для описания наблюдаемых процессов деградации, в работе сделано предположение, что дозовая зависимость спада люминесценции связана не только с изменением распределения частиц по размерам, но и с образованием центров безызлучательной рекомбинации, возникающих в результате высокоэнергетического воздействия на материал. Авторы предлагают возможность использования нанокристаллов CsPbBr₃ в качестве различных биосенсоров *in vivo* в условиях повышенного радиационного фона, возникающего при противоопухолевой терапии.

В ряде работ было рассмотрено влияние гамма-облучения на различные полимеры. В работе [9] показана возможность создания термически стабильного полимера посредством радиационной сшивки, где модифицированный полимер образовывался при сшивании коротких мономерных звеньев исходного полимера. Рассмотрены пороговые дозы начала необратимых изменений и



дозы полного окисления фрагментированных звеньев, а также изменение фундаментальных физических и химических свойств полимеров, таких как величина запрещенной зоны.

Очень противоречивые, но важные результаты были получены в работе [10]. В ней изучены изменения молекулярного веса полимера вследствие гамма-облучения вследствие сшивания (удлинения) и разделения (укорачивания) основной полимерной цепи, в зависимости от экспозиционной дозы облучения. Показано, что оба процесса происходят одновременно, но с разной вероятностью. Это усложняет количественную оценку и прогнозирование конечных свойств материала. Особо отметим, что в настоящее время существует промышленно применяемая технология использования радиационной сшивки полимеров для создания изоляции для глубоководных проводов с требуемыми эксплуатационными свойствами, а также создание материалов для ортопедических целей [11].

В свою очередь, влияние гамма-облучения на нанокompозиты полимер – КТ практически не изучено и требует детального рассмотрения.

В данной работе впервые исследована деградация фотолюминесцентных свойств нанокompозитов полимера МЕН-PPV с квантовыми точками сульфида свинца PbS под действием гамма-облучения, а также впервые исследовано влияние этого облучения на КТ PbS.

Экспериментальная часть

Образцы изготавливались из промышленно доступного порошка полимера МЕН-PPV (поли[2-метокси-5-(2-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилен], $(C_{18}H_{28}O_2)_n$) производства компании **Sigma Aldrich co** средней молекулярной массой порядка 40.000 – 70.000. Квантовые точки PbS были синтезированы по методу, идентичному тому, который использовали в работе [4]. 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 бис-триметилсилилсульфид в

триоктилфосфине.

Следует отметить, что в работе [4] была показана возможность использования данных КТ для создания нанокompозита полимер – КТ, а также рассмотрены возможные области применения нанокompозитов.

В данной работе для получения тонких пленок полимера МЕН-PPV, КТ PbS, а также их смеси был приготовлен их раствор в толуоле. Раствор наносился на стеклянные подложки методом центрифугирования (технология спин-коутинга). Известно, что центрифугирование не должно приводить к заметной деструкции макромолекул [12]. Спинер позволяет изменять параметры (скорость вращения, ускорение и т. п.) с большой точностью, благодаря чему можно получать тонкие пленки заданной толщины.

Исходный промышленный порошок полимера МЕН-PPV (масса около 10 мг) был растворен в толуоле (для полного растворения полимера раствор был помещен в ультразвуковую ванну на 20 мин). КТ PbS и смесь (полимер МЕН-PPV + КТ PbS) были приготовлены в толуоле. Стеклянные подложки были предварительно обработаны в ультразвуковой ванне, наполненной изопропиловым спиртом, в течение 10 мин. Нанесение пленок полимера МЕН-PPV, КТ PbS и их смеси производилось методом центрифугирования на стеклянные подложки.

Возбуждение фотолюминесценции образца проводилось полупроводниковым лазером с рабочей длиной волны $\lambda = 405$ нм и мощностью 50 мВт, работающим в непрерывном режиме. Спектры фотолюминесценции были зарегистрированы с помощью автоматизированной установки **Horiba Jobin Yvon**, в состав которой входят монохроматор **FHR 640** с дифракционной решеткой 1200 штр/мм и детектор **Symphony II 1024*256 Cryogenic Open-Electrode CCD**.

Источником гамма-излучения служил радионуклид цезия-137 с энергией квантов 661 кэВ. Облучение осуществлялось в квазизамкнутой кислородсодержащей камере. Образцы облучались однородным потоком гамма-квантов, что достигалось путем использования 84 источников излучения. В нашем случае применение цезиевого ис-

точника гамма-квантов (^{137}Cs) имеет ряд преимуществ, по сравнению с кобальтовым источником ^{60}Co , главным из которых является меньшая энергия квантов и меньшая проникающая способность; это позволяет обеспечить больше актов единичных взаимодействий. Другими словами, линейный коэффициент воздействия у изотопа цезия больше, чем у изотопа кобальта, при прочих равных условиях.

Исследованные тонкие пленки получили следующие экспозиционные дозы, Гр: 0; $1,84 \cdot 10^4$; $4,18 \cdot 10^4$; $6,73 \cdot 10^4$.

Все облучения и измерения проводились при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вид спектра фотолюминесценции нанокompозита «проводящий полимер – КТ» складывается как из спектра люминесценции проводящего полимера, так и из спектра люминесценции квантовых точек, а также от их совместной зонной энергетической диаграммы. На рис. 1 приведены спектры люминесценции пленок полимера МЕН-PPV, КТ PbS и нанокompозита (МЕН-PPV)-КТ PbS (нанесены на стеклянную подложку), зарегистрированные после воздействия на них различных доз гамма-излучения.

Облучение чистого полимера МЕН-PPV гамма-квантами приводит к различным изменениям полимерных цепей, которые проявляются в изменении спектров люминесценции. Гамма-облучение разрывает случайным образом связи C – C и C – H, а в присутствии кислорода приводит также к окислительной деградации с образованием различных функциональных групп [10].

На рис. 1, *a* представлены спектры фотолюминесценции гамма-облученного полимера МЕН-PPV. Видно, что при дозе облучения $1,84 \cdot 10^4$ Гр интенсивность свечения резко снижается, а при дальнейшем увеличении дозы растет с последующим незначительным снижением интенсивности. Кроме того, наблюдается уширение спектра со смещением максимума интенсивности в сторону коротких длин волн и с незначительным уширением в направлении длин-

ных волн при дозах $4,18 \cdot 10^4$ и $6,73 \cdot 10^4$ Гр.

Такой характер изменения спектра люминесценции можно связать со структурными изменениями, происходящими в полимере. При малых дозах облучения основную роль играет сшивка полимерных цепей [9], которая способствует распаду возбужденного при активации экситона. Сшивка облегчает переход электрона или дырки на соседнюю полимерную цепь с соответствующим распадом экситона и последующей безызлучательной рекомбинацией. Кроме того, возникающие дефекты способствуют образованию центров безызлучательной рекомбинации, достижение которых электронами и дырками осуществляется достаточно быстро по длинным сопряженным участкам цепей. Дальнейшее увеличение дозы облучения приводит к укорочению сопряженных участков цепей, что выражается в смещении максимума интенсивности люминесценции в сторону коротких длин волн. Это приводит также к затруднению распада экситонов за счет перехода электронов или дырок на соседние сопряженные участки или соседние полимерные цепи и к росту интенсивности люминесценции. Поскольку перенос электронов и дырок с одного сопряженного участка на другой или на соседнюю цепь происходит по прыжковому механизму, то этот процесс затрудняется при увеличении разброса по длине сопряженных участков и соответствующего увеличения разброса по энергии [13]. В результате интенсивность люминесценции возрастает. При дальнейшем увеличении дозы растет число дефектов, а, следовательно, и число центров безызлучательной рекомбинации и происходит постепенное снижение интенсивности люминесценции.

На рис. 1, *b* представлены спектры люминесценции КТ PbS при различных дозах облучения. Пик люминесценции с ростом дозы облучения смещается в коротковолновую область спектра, а ширина пика растет. Интенсивность люминесценции существенно падает при дозе облучения $1,84 \cdot 10^4$ Гр, а затем незначительно возрастает с ростом дозы. Причиной подобных явлений может служить целый ряд процессов,

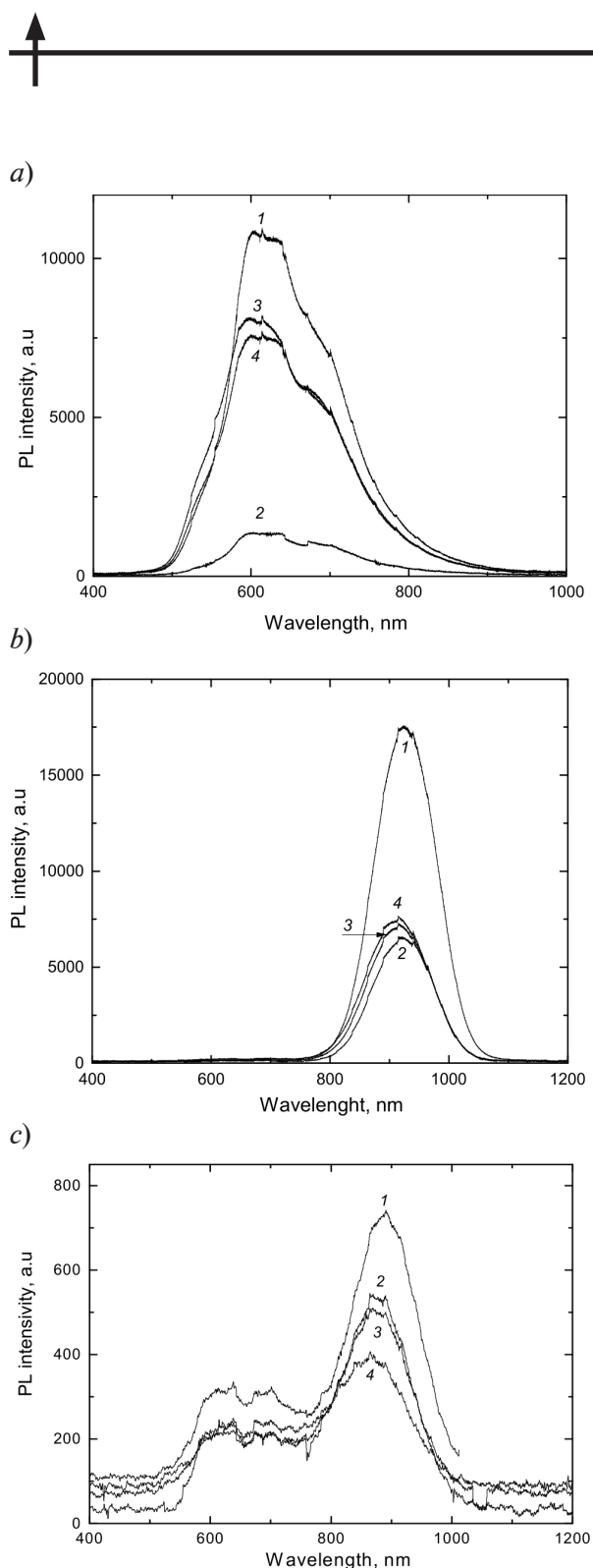


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции чистого полимера МЕН-PPV (a), КТ PbS (b), нанокompозита «полимер МЕН-PPV – КТ PbS» (c), нанесенных на стеклянные подложки; зарегистрированы после воздействия различных доз гамма-облучения, Гр: 0 (1); $1,84 \cdot 10^4$ (2); $4,18 \cdot 10^4$ (3); $6,73 \cdot 10^4$ (4)

происходящих в коллоидных КТ при облучении гамма-квантами. Облучение может влиять на размеры КТ [6]. В самих КТ возможно образование дефектов, приводящих к росту безызлучательной рекомбинации. Дефекты, аналогичные таковым в полимерных цепях, могут возникать и в области «шубы» органических молекул, окружающих КТ. В сочетании с атомами кислорода этот процесс может приводить к образованию центров захвата электрического заряда. В результате вокруг КТ образуется окружающий ее электрический заряд. Независимо от знака заряда, это приводит к смещению уровней размерного квантования КТ и увеличению эффективной ширины запрещенной зоны, а это, в свою очередь, вызывает смещение пика люминесценции в коротковолновую область. Уширение спектра обусловлено либо увеличением разброса по размерам КТ, либо разбросом по величине электрического заряда, окружающего КТ.

На рис. 1, с приведены спектры люминесценции нанокompозита «МЕН-PPV – КТ PbS». Видно, что при образовании этого соединения интенсивность люминесценции полимера существенно снижается, а интенсивность люминесценции КТ при этом остается достаточно высокой.

Этот эффект обусловлен особенностями зонной диаграммы нанокompозита (рис. 2). Электроны и дырки, возбуждаемые в полимерной матрице, захватываются в квантовые точки и рекомбинируют с испусканием квантов инфракрасного излучения. В результате интенсивность люминесценции полимерной матрицы падает, а у КТ возрастает. Облучение гамма-квантами наиболее заметно влияет на интенсивность люминесценции КТ, с ростом дозы облучения интенсивность люминесценции падает. При дозе $6,73 \cdot 10^4$ Гр она падает вдвое, по сравнению с необлученным образцом. С ростом дозы гамма-облучения интенсивность люминесценции полимерной матрицы тоже снижается, но не столь значительно, как у КТ. Значительное падение интенсивности люминесценции КТ обусловлено не только усилением безызлучательной рекомбинации в КТ, но и изменением условий захвата электронов и дырок из полимер-

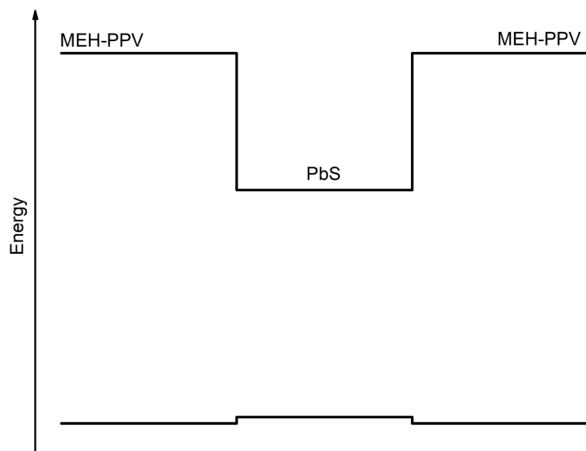


Рис. 2. Зонная диаграмма для нанокompозита «МЕН-PPV – КТ PbS»

ной матрицы. Смещение же пика люминесценции КТ в коротковолновую область спектра свидетельствует о смещении уровня размерного квантования КТ в сторону больших значений энергии и уменьшении глубины квантовой ямы для электронов и дырок. Уменьшение этой глубины для дырок может привести к тому, что эта глубина станет совсем малой либо такая яма вовсе исчезнет.

Проанализируем более подробно зонную диаграмму нанокompозита на рис. 2. В ее центре располагается квантовая яма, соответствующая КТ PbS, а линии справа и слева от нее соответствуют уровням LUMO и НОМО полимера МЕН-PPV. Уменьшение глубины квантовой ямы существенно снижает вероятности захвата и удержания дырок внутри КТ. Вероятность захвата одного из типов носителей в КТ снижается также ввиду наличия электрического заряда, окружающего КТ. Вследствие указанных факторов люминесценция

КТ значительно снижается. Снижение люминесценции полимерной матрицы обусловлено как ростом числа дефектов, так и усилением межсистемного перехода между синглетным и триплетным состояниями экситонов в полимере. Вероятность этого перехода возрастает при наличии тяжелых (с большим номером атомного номера Z) примесных атомов в полимерной матрице [14]. Последние, в частности атомы свинца, могут появиться, если при поглощении квантовой точкой гамма-кванта происходит выброс такого атома из КТ в полимерную матрицу.

Заключение

В работе зарегистрированы и проанализированы спектры фотолюминесценции гамма-облученных объектов – нанокompозита «МЕН-PPV – КТ PbS» и его составных частей. На этой основе можно сделать следующие заключения.

Гамма-облучение приводит к немонотонному уменьшению фотолюминесценции полимера МЕН-PPV, что может быть связано с протеканием в нем разнонаправленных конкурирующих процессов, а именно – деструкция полимерных цепей молекул и их сшивка. При этом в полимере происходят существенные структурные изменения.

Фотолюминесценция квантовой точки PbS после облучения различными дозами в диапазоне $(1,84 - 6,73) \cdot 10^4$ Гр падает приблизительно в два раза, при этом происходит сдвиг максимума ее интенсивности в коротковолновую область; это означает изменение энергетической структуры КТ.

Люминесценция гамма-облученного нанокompозита определяется его энергетической зонной структурой, которая меняется в зависимости от поглощенной им дозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bakueva L., Musikhin S., Sargent E.H., Ruda H.E., Shik A. Luminescence and photovoltaic effects in polymer-based nanocomposites // Handbook of Organic-Inorganic Hybrid Materials and Nanocomposites. Vol. 2. USA: American Scientific Publishers, 2003. Pp. 181–215.
2. McDonald S.A., Cyr P.W., Levina L., Sargent E.H. Photoconductivity from PbS-

- nanocrystal/semiconducting polymer composites for solution-processible, quantum-size tunable infrared photodetectors // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. No. 11. Pp. 2089–2091.
3. Kim J.Y., Voznyy O., Zhitomirsky D., Sargent E.H. 25th Anniversary article: colloidal quantum dot materials and devices: A quarter century of advances // Adv. Mater. 2013. Vol. 25. No. 36.



Pp. 4986–5010.

4. **Bakueva L., Musikhin S., Hines M.A., Chang T.-W.F., Tzolov M., Scholes G.D., Sargent E.H.** Size-tunable infrared 1000 – 1600 nm electroluminescence from PbS quantum-dot nanocrystals in a semiconducting polymer // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 82. No. 17. Pp. 2895–2897.

5. **El-Mallawany R., Abousehly A., El-Rahamani A.A., Yousef E.** Radiation effect on the ultrasonic attenuation and internal friction of tellurite glasses // *Materials Chemistry and Physics.* 1998. Vol. 52. No. 2. Pp. 161–165.

6. **Bekasova O.D., Revina A.A., Rusanov A.L., Kornienko E.S., Kurganov V.I.** Effect of gamma-ray irradiation on the size and properties of CdS quantum dots in reverse micelles // *Radiation Phys. and Chem.* 2013. Vol. 92. November. Pp. 87–92.

7. **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.J.** Rapid degradation of CdSe/ZnS colloidal quantum dots exposed to gamma irradiation // *Applied Physics Letters.* 2008. Vol. 93. No. 17. P. 173101.

8. **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.

9. **Siddhartha S.A., Dev K., Raghuvanshi S.K., Krishna J.B.M., Wahab M.A.** Effect of gamma radiation on the structural and optical properties

of Polyethyleneterephthalate (PET) polymer // *Radiation Phys. and Chem.* 2012. Vol. 81. No. 4. Pp. 458–462.

10. **Tidjani A., Watanabe Y.** The dose-rate effect of irradiation on chemical and physical modifications. Gamma-oxidation of linear low-density polyethylene // *J. Polym. Sci. A: Polym. Chem.* 1995. Vol. 33. No. 3. Pp. 1455–1460.

11. **Oral E., Muratoglu O.K.** Radiation cross-linking in ultra-high molecular weight polyethylene for orthopaedic applications // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B.* 2007. Vol. 265. Pp. 18–22.

12. **Веттегрень В.И., Закревский В.А., Смирнов А.Н., Сударь Н.Т.** Образование проводящего канала в полимерной диэлектрической пленке под влиянием электрического поля // *Физика твердого тела.* 2010. Т. 52. Вып. 8. С. 1650–1655.

13. **Baranovskii S.D., Rubel O., Jansson F., Österbacka R.** Description of charge transport in disordered organic materials // *Grasser T., Meller G., Li L. (eds). Organic Electronics. Advances in Polymer Science.* Vol. 223. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

14. **Bakueva L., Matheson D., Musikhin S., Sargent E.H.** Luminescence of pure and iodine doped PPV: internal energetic structure revealed through spectral signatures // *Synthetic Metals.* 2002. Vol. 126. No. 2–3. Pp. 207–211.

Статья поступила в редакцию 11.02.2018, принята к публикации 01.03.2018.

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

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] **L. Bakueva, S. Musikhin, E.H. Sargent, et al.** Luminescence and photovoltaic effects in polymer-based nanocomposites, *Handbook of Organic-Inorganic Hybrid Materials and Nanocomposites*, Vol. 2, American Scientific Publishers, USA (2003) 181–215.

[2] **S.A. McDonald, P.W. Cyr, L. Levina, E.H. Sargent,** Photoconductivity from PbS-

nanocrystal/semiconducting polymer composites for solution-processible, quantum-size tunable infrared photodetectors, *Appl. Phys. Lett.* 85 (11) (2004) 2089–2091.

[3] **J.Y. Kim, O. Voznyy, D. Zhitomirsky, E.H. Sargent,** 25th Anniversary article: colloidal quantum dot materials and devices: A quarter century of advances, *Adv. Mater.* 25 (3) (2013) 4986–5010.

- [4] **L. Bakueva, S. Musikhin, M.A. Hines, et al.**, Size-tunable infrared 1000–1600 nm electroluminescence from PbS quantum-dot nanocrystals in a semiconducting polymer, *Appl. Phys. Lett.* 82 (17) (2003) 2895–2897.
- [5] **R. El-Mallawany, A. Abousehly, A.A. El-Rahamani, F. Yousef**, Radiation effect on the ultrasonic attenuation and internal friction of tellurite glasses, *Materials Chemistry and Physics.* 52 (2) (1998) 161–165.
- [6] **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, *Radiation Phys. and Chem.* 92 (Nov.) (2013) 87–92.
- [7] **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) 173101.
- [8] **L.B. Matyushkin, N.M. Romanov**, Gamma-irradiation influence on photoluminescence of CsPbBr₃ and CdSe/ZnS nanocrystals, *Journal of Optical Technology.* 85 (2) (2018) 72–74.
- [9] **S.A. Siddhartha, K. Dev, S.K. Raghuvanshi, et al.**, Effect of gamma radiation on the structural and optical properties of Polyethyleneterephthalate (PET) polymer, *Radiation Phys. and Chem.* 81 (4) (2012) 458–462.
- [10] **A. Tidjani, Y. Watanabe**, The dose-rate effect of irradiation on chemical and physical modifications. Gamma-oxidation of linear low-density polyethylene, *J. Polym. Sci. A: Polym. Chem.* 33 (3) (1995) 1455–1460.
- [11] **E. Oral, O.K. Muratoglu**, Radiation cross-linking in ultra-high molecular weight polyethylene for orthopaedic applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B.* 265 (2007) 18–22.
- [12] **V.I. Vettegren, V.A. Zakrevskii, A.N. Smirnov, N.T. Sudar'**, Electric-field-induced formation of a conducting channel in a dielectric polymer film, *Physics of the Solid State.* 52(8) (2010) 1774–1779.
- [13] **S.D. Baranovskii, O. Rubel, F. Jansson, R. Österbacka**, Description of charge transport in disordered organic materials, In: Grasser T., Meller G., Li L. (eds), *Organic Electronics*, 2009, *Advances in Polymer Science*, Vol. 223, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [14] **L. Bakueva, D. Matheson, S. Musikhin, E.H. Sargent**, Luminescence of pure and iodine doped PPV: internal energetic structure revealed through spectral signatures, *Synthetic Metals.* 126 (2–3) (2002) 207–211.

Received 19.01.2018, accepted 24.01.2018.

THE AUTHORS

ROMANOV Nikolay M.

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

MUSIKHIN Sergey F.

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