

DOI: 10.18721/JPM.11403

УДК 535.37, 538.958, 54-78

ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИЕ НАНОКОМПОЗИТНЫЕ ПЛЕНКИ МЕН-PPV/C₆₀

**Н.М. Романов^{1,2}, И.Б. Захарова¹, М.М. Малова¹,
М.А. Елистратова¹, С.Ф. Мусихин¹**

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

² Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия

В работе исследовано влияние гамма-излучения на фотолюминесцентные свойства тонких пленок бинарных нанокompозитов МЕН-PPV/C₆₀ (полимер – фуллерен C₆₀). Синтезированы образцы чистых МЕН-PPV, а также нанокompозитов МЕН-PPV/C₆₀ в соотношениях 9:1 и 3:1 на слюдяной и кремниевой подложках. Изучено влияние типа подложки на спектры фотолюминесценции чистых тонких пленок и нанокompозитов. Получены и проанализированы экспериментальные данные по дозовым зависимостям формы и интенсивности спектров фотолюминесценции после воздействия на образцы экспозиционных доз до 67 кГр. Установлен немонотонный характер изменения интенсивности различных спектральных полос фотолюминесценции нанокompозитов при увеличении дозы и отсутствие смещения этих полос. Полученные экспериментальные результаты трактуются с позиций конкуренции процессов сшивки и разрыва цепей полимера под действием гамма-облучения. Практически важным результатом исследования является вывод о высокой устойчивости нанокompозитов МЕН-PPV/C₆₀ к действию гамма-квантов.

Ключевые слова: нанокompозит, МЕН-PPV, фуллерен C₆₀, гамма-облучение, фотолюминесценция

Ссылка при цитировании: Романов Н.М., Захарова И.Б., Малова М.М., Елистратова М.А., Мусихин С.Ф. Влияние гамма-излучения на тонкие нанокompозитные пленки МЕН-PPV/C₆₀ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 24–34. DOI: 10.18721/JPM.11403

EFFECT OF GAMMA RADIATION ON THE THIN NANOCOMPOSITE МЕН-PPV/C₆₀ FILMS

**N.M. Romanov^{1,2}, I.B. Zakharova¹, M.M. Malova¹,
M.A. Elistratova¹, S.F. Musikhin¹**

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

² Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

In this work, the effect of gamma radiation on the photoluminescent properties of thin films of binary nanocomposites МЕН-PPV/C₆₀ (polymer – fullerene C₆₀) has been studied. Samples of pure МЕН-PPV and МЕН-PPV/C₆₀ nanocomposites were synthesized in ratios of 9:1 and 3:1 on the mica and silicon substrates. Effect of type substrate on photoluminescence of pure thin films and nanocomposites were studied. Experimental data on dose dependences of the shape and intensity of the photoluminescence spectra after exposure of samples with doses up to 67 kGy were obtained and analyzed. The nonmonotonic nature of the change in the intensity of various spectral bands of the photoluminescence of nanocomposites with increasing dose and the absence of a shift of these bands was established. The obtained experimental results were interpreted from the standpoint of competition between the processes of crosslinking and breaking of polymer chains under the action of gamma

irradiation. A practically important result of the study is the conclusion that МЕН-PPV/C₆₀ nanocomposites are highly resistant to gamma rays.

Keywords: nanocomposite, МЕН-PPV, C₆₀ fullerene, gamma radiation, photoluminescence

Citation: N.M. Romanov, I.B. Zakharova, M.M. Malova, M.A. Elistratova, S.F. Musikhin, Effect of gamma radiation on the thin nanocomposite МЕН-PPV/C₆₀ films, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (4) (2018) 24–34. DOI: 10.18721/JPM.11403

Введение

Нанокompозиты на основе проводящей полимерной матрицы и различных включений являются перспективными материалами для разработки оптоэлектронных приборов с гибкой настройкой их параметров [1, 2]. Тонкопленочные нанокompозитные донорно-акцепторные структуры, способные к реализации концепции объемного гетероперехода, применяются для создания органических солнечных элементов [3]. В таких структурах, благодаря ярко выраженным акцепторным свойствам, широко используется фуллерен C₆₀ как компонент объемного гетероперехода [4], в том числе и в паре с сопряженным полимером как донорным компонентом [5]. Одним из распространенных в органической электронике сопряженных полимеров является полифениленвинилен (PPV) и его производные, в частности МЕН-PPV [6].

В настоящее время известны основные характеристики данного (коммерчески доступного) полимера, такие как ширина запрещенной зоны (около 2,2 эВ), значение энергии высших занятых молекулярных орбиталей (НОМО) (5,3 эВ), значение энергии низших незанятых молекулярных орбиталей (ЛУМО) (3,1 эВ) и его молярная масса (40 000 – 25 0000 г/моль). Данный полимер технологичен, растворим в стандартных органических растворителях; его тонкие пленки хорошего качества можно получить посредством технологии спин-коатинга (*англ.* spin-coating). Проводящий полимер МЕН-PPV может выступать как донор электронов [7], обладает хорошими электрическими характеристиками, такими как проводимость и подвижность носителей. В работах [8, 9] была представлена технология создания гибких электролюминесцентных светоизлучающих структур и устройств на его основе, рассмотрены ме-

ханизмы деградации и методы ее предотвращения.

Бинарное соединение проводящего полимера МЕН-PPV с фуллереном C₆₀ относится к числу перспективных и недорогих материалов для разработки оптоэлектронных приборов с требуемыми параметрами. В работе [10] исследовалась проводимость нанокompозита в зависимости от состава смеси МЕН-PPV/C₆₀. Показано, что при комнатной температуре незначительное изменение концентрации фуллерена C₆₀ приводит к изменению проводимости композитных пленок на несколько порядков. В работе [11] была показана связь между гашением фотолюминесценции (ФЛ) и усилением фотовольтаического эффекта при увеличении концентрации C₆₀. Данные эффекты связаны с фотоиндуцированным переносом заряда между компонентами смеси, образующей объемный гетеропереход.

В настоящее время идут поиски способа улучшения фотоэлектрических характеристик получаемых пленок [12]. Используются методики отжига пленок, которые приводят к эффектам, связанным с перегруппировкой полимерных цепей, полимерным межцепочечным взаимодействием и образованием различных агрегатов. Например, в работе [13] рассматривалась зависимость оптических свойств нанокompозитов от эволюции их структуры под действием термических отжигов и показано улучшение их рабочих параметров вследствие перекристаллизации пленки.

Однако метод термической модификации пока не привел к желаемым результатам, а модификация различных полимерных композиций возможна другими путями, например облучением. Показана возможность создания термически стабильного полимера посредством радиационной сшивки его цепей. Рассмотрены пороговые дозы начала необратимых изменений, дозы полного

последующего окисления фрагментированных звеньев и фундаментальные физические и химические свойства полимеров под действием облучения [14]. Важные результаты получены в работе [15], где изучалось изменение молекулярного веса полимера под действием гамма-излучения вследствие сшивания (удлинения) и разделения (укорачивания) основной полимерной цепи в зависимости от экспозиционной дозы облучения. Было показано, что оба процесса происходят одновременно, но с разной вероятностью, и, как следствие, становятся конкурирующими, что усложняет количественную оценку и прогнозирование конечных свойств материала.

В работе [16] исследовано влияние различных доз гамма-облучения на спектральные свойства проводящих полимеров МЕН-PPV и ВМР при 5°C и показано, что радиационная обработка растворов данных полимеров вызывает синий сдвиг спектральных полос флуоресценции. Авторы связывают данный эффект со сшиванием цепей проводящих полимеров, однако в работе [17] показано, что сшивание сопряженных полимеров не вызывает сдвига в спектрах ФЛ. В работах, посвященных изучению действия ионизирующего излучения на фуллерены, отмечается стабильность свойств фуллеренов под действием гамма-облучения [18]. Влияние различных ионизирующих излучений на нанокompозитные материалы с добавлением фуллеренов C₆₀ рассмотрены в работах [19, 20]. Показано, что присутствие фуллерена способствует улучшению абсолютной стабильности исследуемых нанокompозитов.

В данной работе впервые исследовано воздействие гамма-излучения на бинарные системы нанокompозита МЕН-PPV/C₆₀ (полимер – фуллерен C₆₀), обладающие свойством фотолюминесценции при возбуждении лазерным излучением.

Методика эксперимента

Для изготовления образцов применялись промышленно доступные материалы, произведенные компанией Sigma Aldrich, – порошок проводящего полимера МЕН-PPV со средней молекулярной массой по-

рядка 40000 – 70000 и порошок фуллерена C₆₀ с массовой долей 99,95 %. Для получения тонких нанокompозитных пленок МЕН-PPV/C₆₀ был приготовлен раствор компонентов в толуоле. Для получения композита использовались исходные растворы полимера МЕН-PPV и фуллерена C₆₀ в одинаковой массовой концентрации. Для полного растворения и однородного перемешивания растворы помещались сначала в ультразвуковую ванну на 20 мин, а затем в термостат при температуре 50 °C на 60 мин. После этого растворы смешивали в разных процентных соотношениях между МЕН-PPV и фуллереном C₆₀ (3:1 и 9:1). Готовые растворы наносились на кремниевые и слюдяные подложки с помощью технологии спин-коатинга, что позволяло получать толщину пленки порядка 1 мкм.

Спектры ФЛ образцов регистрировались с помощью автоматизированной установки Horiba Jobin Yvon, в состав которой входят монохроматор FHR 640 с дифракционной решеткой 1200 шт/мм и детектор Symphony II 1024*256 Cryogenic Open-Electrode CCD со светофильтром ЖС-12. ФЛ возбуждалась в образцах путем воздействия излучения полупроводникового лазера с рабочей длиной волны $\lambda = 405$ нм, работающего в непрерывном режиме.

Облучение образцов гамма-квантами проводилось от радионуклидов цезия-137 (энергия квантов составляла 661 кэВ) в кислородосодержащей квазизакрытой камере. На образцы подавался однородный поток гамма-квантов, который достигался благодаря одновременному использованию 84 указанных радионуклидов. Исследованные тонкие пленки получили следующие экспозиционные дозы (по H₂O), кГр: 0; 18,3; 42,8; 67,3.

Облучение образцов и измерения их характеристик производились при стандартных условиях.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

При поглощении света (лазерное излучение), в сопряженном полупроводниковом полимере происходит образование связанной электронно-дырочной пары (эксито-

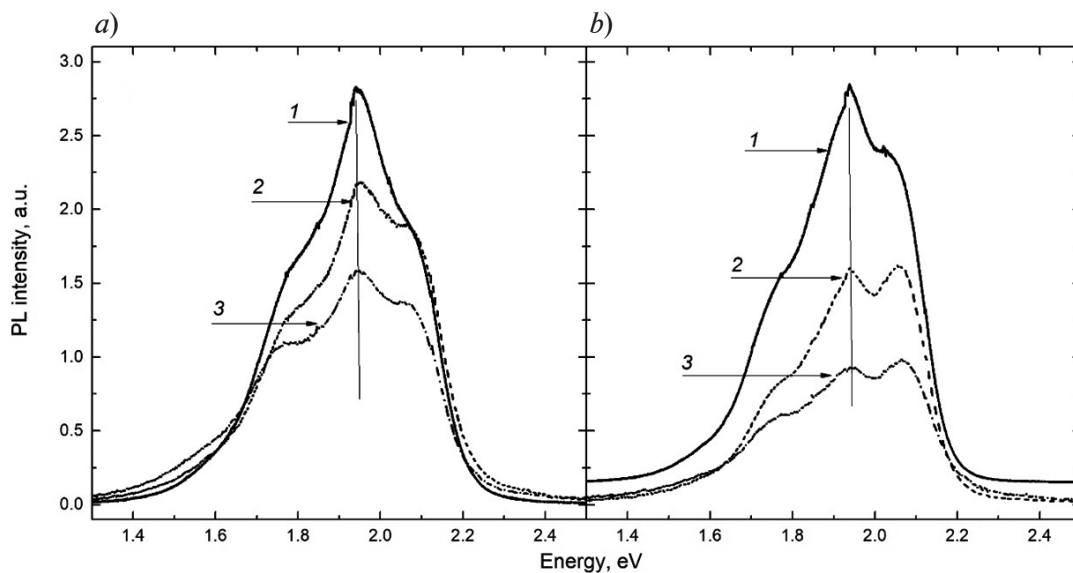


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) необлученных образцов, изготовленных на кремниевых (*a*) и слюдяных (*b*) подложках; представлены данные для чистых MEH-PPV (1), а также нанокомпозитов MEH-PPV/C₆₀ в соотношениях 9:1 (2) и 3:1 (3)

на); для последней величина энергии связи в MEH-PPV составляет около 0,3 эВ [21], что значительно выше энергии температурных флуктуаций при комнатной температуре. На рис. 1 показаны изменения спектра ФЛ нанокомпозита в зависимости от состава смеси и типа подложки. Составляющие спектров фотоэмиссии полимера с энергиями 1,94, 1,84 и 1,77 эВ связаны соответственно с электронным переходом и двумя электронно-колебательными повторениями.

В работе [22] была установлена зависимость морфологии поверхности полимерных пленок от типа подложки. Эта морфология характеризуется наличием разделенных фаз, что влияет на оптические свойства пленок. Данное влияние подложки на ФЛ можно проследить по спектрам (см. рис. 1). Подложка слюды является ориентирующей, а кремния (он покрыт естественным окислом диоксида кремния) – неориентирующей [23]. Скорее всего, различие в форме спектров образцов на разных подложках обусловлено наличием диполей на скеле слюды. Диполи образуют упорядоченную кристаллическую решетку, в то время как на кремниевой поверхности они отсутствуют. В процессе испарения растворителя и осаждения молекул полимера на подложку слюды проис-

ходит ориентация этих молекул, задаваемая подложкой ввиду воздействия поля диполей, тогда как на кремниевой поверхности молекулы полимера располагаются хаотически. Тип подложки также влияет на соотношение интенсивностей электронного и электронно-колебательного переходов (сравните спектры ФЛ на рис. 1, *a* и *b*). Видно, что в пленке нанокомпозита на слюде интенсивность электронно-колебательного перехода с участием первого колебательного уровня выше, чем электронного, а в пленке на кремнии их интенсивности до облучения примерно равны.

Добавление фуллерена к полимеру приводит к падению интенсивности эмиссионных пиков полимера (аналогичный эффект наблюдали в работе [13]) вследствие сильной электроотрицательности фуллерена (рис. 2). Тушение ФЛ указывает на фотоиндуцированный перенос заряда с цепи полимера на фуллерен при фотовозбуждении нанокомпозита.

Для полупроводниковых полимеров эффективность тушения ФЛ значительно выше, чем для низкомолекулярных смесей, ввиду возможности миграции экситона по цепи в течение своего излучательного времени жизни [24]. В молекуле C₆₀ синглет-

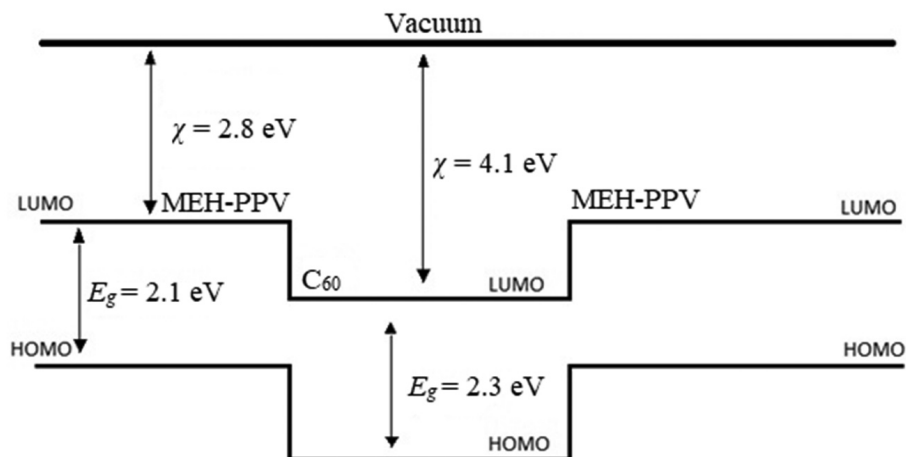


Рис. 2. Зонная диаграмма композита MEH-PPV/C₆₀:
 НОМО, LUMO – уровни энергий высших занятых и низших незанятых молекулярных орбиталей, соответственно; E_g – ширина запрещенной зоны; χ – энергия сродства к электрону

ные излучательные переходы запрещены по симметрии; область его слабой фосфоресценции (переходы $T_1 \rightarrow S_0$) находится в диапазоне 1,55 – 1,60 эВ и частично перекрывается с «хвостами» излучательных переходов в MEH-PPV.

Расчеты показывают, что для использованных нами концентраций компонентов композитной пленки одна молекула фуллерена приходится примерно на 26 звеньев цепи сопряженного полимера при составе 9:1 и на 9 звеньев при составе 3:1 (при условии равномерного распределения молекул C₆₀ в композите). Размер области дelokализации фотовозбужденного экситона составляет около 14 звеньев MEH-PPV после возбуждения [25], но за время порядка 0,1 пс уменьшается до 5 – 7 звеньев в результате электрон-фононного взаимодействия [26]. Если принять, что каждая молекула C₆₀ образует центр тушения, то при данных концентрациях интенсивность ФЛ композита должна уменьшаться пропорционально содержанию фуллерена. Анализ данных на рис. 1 показывает, что эффект тушения гораздо сильнее для пленок на кремниевой подложке, чем для пленок на подложке слюды. Этот результат можно связать с различным влиянием природы подложки на структуру как чистого полимера, так и нанокompозита, а также на распределение в них фаз. ФЛ сопряжен-

ного полимера будет зависеть не только от концентрации тушителей, но и от их расположения. Если тушители равномерно распределены по цепи, то можно ожидать, что тушение ФЛ будет эффективнее, чем в случае, если они собраны в кластеры или агрегаты, так как молекулы C₆₀ в середине кластера не будут вносить вклад в тушение. Предположение, что в пленках нанокompозита на слюде (в отличие от его пленок на кремнии) молекулы фуллерена агрегированы, подтверждается и тем, что в этих образцах с ростом его концентрации наблюдается увеличение интенсивности ФЛ в области 1,50 – 1,55 эВ, отвечающей фосфоресценции фазы C₆₀. Увеличение концентрации фуллерена в пленках на кремнии приводит к росту относительной вероятности электронных переходов, по сравнению с электронно-колебательными повторениями, что может быть связано с кинетикой процесса тушения.

Влияние гамма-облучения на спектральные зависимости ФЛ пленок MEH-PPV на разных подложках показаны на рис. 3. Облучение гамма-квантами снижает интенсивность ФЛ, однако, в противоположность данным работ [16, 27], при этом не наблюдается синего смещения спектральных полос. На дозовой зависимости спектров ФЛ положение линий электронного и вибронных излучательных переходов сохраняется

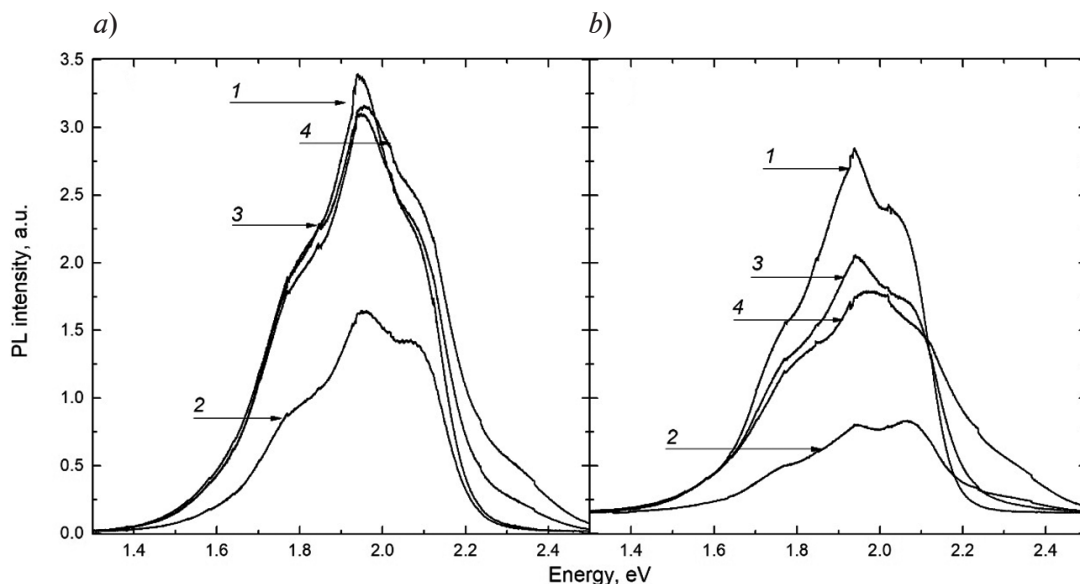


Рис. 3. Спектры ФЛ необлученных (1) и гамма-облученных разными дозами (2 – 4) образцов МЕН-РРV, изготовленных на слюдяной (а) и кремниевой (b) подложках. Дозы облучения, кГр: 18,3 (2), 42,8 (3), 67,3 (4)

неизменным даже при больших дозах облучения. При этом наблюдается немонотонная зависимость интенсивности ФЛ для обоих типов подложки. Падение интенсивности ФЛ при воздействии наименьшей дозой и ее последующее возрастание при увеличении дозы может определяться конкурирующими процессами, протекающими в проводящем полимере под действием гамма-излучения.

Снижение интенсивности ФЛ говорит о том, что не все фотовозбужденные экситоны дают вклад в люминесценцию. Чтобы связанные электрон и дырка рекомбинировали с эмиссией кванта света, они должны находиться на одном и том же участке полимерной цепи. Причиной падения интенсивности ФЛ могут быть рекомбинационные центры, которые всегда возникают при нарушении структуры. Электрон захватывается на уровень с центрами рекомбинации, а затем возможна безызлучательная диссоциация экситона. После первой дозы облучения (18,3 кГр) амплитуда ФЛ полимера резко падает (см. рис. 3); это можно объяснить тем, что происходит преимущественно сшивка полимерных цепей, а процесса конформации и разрыва цепи еще не

происходит, сопряженные участки цепи еще длинные [28]. Длина миграции экситона по полимерным цепям достаточно большая, и при относительно небольшой концентрации рекомбинационных центров происходит эффективное тушение ФЛ. При больших дозах гамма-излучения преобладает процесс распада полимерных цепей на короткие согласованные сопряженные участки, длина которых все же должна быть больше размера делокализации фотовозбужденного экситона. Миграция фотоэкситонов к центрам рекомбинации затруднена, и это приводит к росту амплитуды ФЛ (см. рис. 3).

На рис. 4 представлены спектры ФЛ тонких пленок нанокомпозитов с фуллереном после воздействия гамма-излучения. Видно, что облучение по-разному влияет на интенсивность электронного перехода и его электронно-колебательных повторений. Особенно это заметно на составах с большим содержанием фуллерена, где одна молекула C_{60} приходится в среднем на 9 звеньев цепи полимера. Для таких нанокомпозитов, изготовленных на кремниевой подложке, мы предполагаем молекулярное равномерное диспергирование тушителей по цепи сопряженного полимера. Видно,

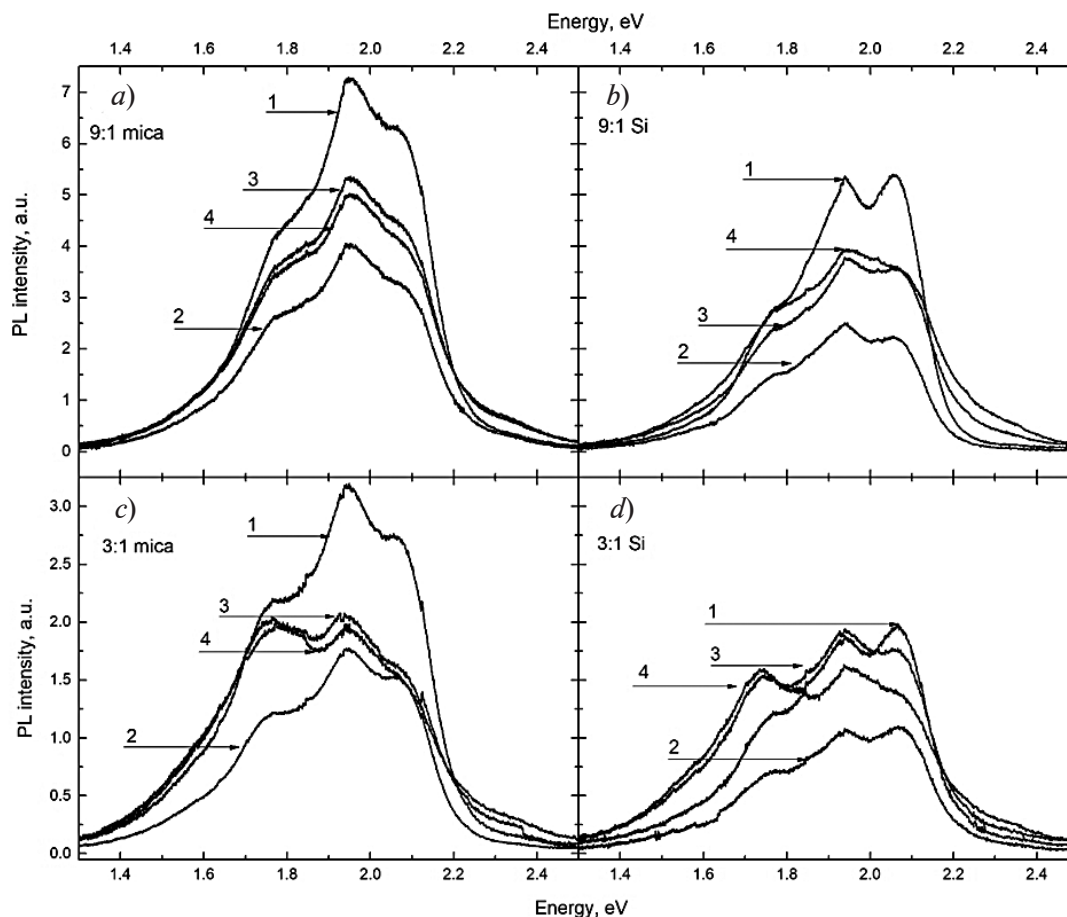


Рис. 4. Спектры ФЛ необлученных (1) и гамма-облученных разными дозами (2 – 4) образцов, изготовленных на слюдяной (a, c) и кремниевой (b, d) подложках. Представлены данные для тонких пленок МЕН-PPV/C₆₀ в соотношениях 9:1 (a, b) и 3:1 (c, d). Дозы облучения, кГр: 18,3 (2), 42,8 (3), 67,3 (4)

что на такой композит гамма-облучение влияет слабо, однако вероятность электронных переходов несколько падает, а электронно-колебательных (при больших дозах облучения) – даже увеличивается. В рамках нашей модели, предполагающей разрыв цепей под действием гамма-облучения большими дозами, указанное слабое влияние можно объяснить тем, что длина укороченных сопряженных участков все же остается существенно большей, чем среднее расстояние между центрами тушения. В этом случае разрыв полимерных цепей на короткие участки будет слабо влиять на интенсивность ФЛ нанокompозита (при условии большой интенсивности возбуждающего лазерного излучения), у которого она исходно уже была потушена.

Для пленок нанокompозита, изготовленных на подложке из слюды, где мы предполагаем агрегацию молекул C₆₀ в кластеры, и, соответственно, меньшую концентрацию центров тушения, эффект выражен слабее, что говорит в пользу предложенного объяснения. Однако для обоих типов нанокompозитов отмечено, что гамма-облучение уменьшает интенсивность электронного перехода существенно, чем электронно-колебательного. Условием такого поведения люминесценции композитов является высокая стабильность фуллерена как тушителя ФЛ к действию гамма-облучения.

Заключение

В результате проведенных исследований получены данные по влиянию гамма-

облучения дозами до 67,7 кГр на спектры фотолюминесценции (ФЛ) тонких пленок сопряженного полимера МЕН-PPV и его нанокompозитов с фуллереном (в соотношениях 9:1 и 3:1).

Выявлено влияние ориентирующей подложки на распределение тушителя ФЛ в нанокompозите.

Установлено, что гамма-облучение образцов не приводит к смещению положения излучательных переходов в спектрах ФЛ полимера, однако наблюдается немотонное снижение интенсивности ФЛ по

мере увеличения дозы.

Для нанокompозитов с большим содержанием фуллерена (соотношение 9:1) не найдено изменения интенсивности ФЛ под действием больших доз гамма-облучения (начиная с дозы 42,8 кГр). Данный результат объясняется наличием исходного эффективного тушения фотовозбужденных экситонов.

Таким образом, получен практически важный результат, а именно – нанокompозиты МЕН-PPV/C₆₀ имеют высокую устойчивость к действию гамма-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fang-Chung Chen, Chih-Wei Chu, Jun He, Yang Yang, Jen-Lien Lin. Organic thin-film transistors with nanocomposite dielectric gate insulator // *Applied Physics Letters*. 2004. Vol. 85. No. 15. Pp. 3295–3297.
2. Nimith K.M., Satyanarayan M.N., Umesh G. Enhancement in fluorescence quantum yield of МЕН-PPV:BT blends for polymer light emitting diode applications // *Optical Materials*. 2018. Vol. 80. June. Pp. 143–148.
3. Dennler G., Scharber M.C., Brabec C.J. Polymer-fullerene bulk-heterojunction solar cells // *Advanced Materials*. 2009. Vol. 21. No. 13. Pp. 1323–1338.
4. Захарова И.Б., Зиминов В.М., Романов Н.М., Квятковский О.Е., Макарова Т.Л. Оптические и структурные свойства пленок фуллерена с добавлением теллурида кадмия // *Физика твердого тела*. 2014. № 5. С. 1024–1029.
5. Savenije T.J., Kroeze J.E., Wienk M.M., Kroon J.M., Warman J.M. Mobility and decay kinetics of charge carriers in photoexcited PCBM/PPV blends // *Physical Review*. B. 2004. Vol. 69. No. 15. Pp. 155205–155216.
6. Sariciftci N.S., Braun D., Zhang C., Srdanov V.I., Heeger A.J., Stucky G., Wudl F. Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells // *Applied Physics Letters*. 1993. Vol. 62. No. 6. Pp. 585–587.
7. Facchetti A. Polymer donor – polymer acceptor (all-polymer) solar cells // *Materials Today*. 2013. Vol. 16. No. 4. Pp. 123–132.
8. Lee R.-H., Lai H.-H. Enhancing electroluminescence performance of МЕН-PPV based polymer light emitting device via blending with organosoluble polyhedral oligomeric silsesquioxanes // *European Polymer Journal*. 2007. Vol. 43. No. 3. Pp. 715–724.
9. Seung Ho Kwon, Sang Yoon Paik, Jae Soo Yoo. Electroluminescent properties of МЕН-PPV light-emitting diodes fabricated on the flexible substrate // *Synthetic Metals*. 2002. Vol. 130. No. 1. Pp. 55–60.
10. Ltaief A., Bouazizi A., Davenas J., Ben Chavbane R., Ben Ouada H. Electrical and optical properties of thin films based on МЕН-PPV/fullerene blends // *Synthetic Metals*. 2004. Vol. 147. No. 1-3. Pp. 261–266.
11. Kim H., Kim J.Y., Lee K., Shin J., Cha M., Lee S.E., Sun H., Ha C.-S. Conjugated polymer/fullerene composites as a new class of optoelectronic material: Application to organic photovoltaic cells // *Journal of the Korean Physical Society*. 2000. Vol. 36. No. 6. Pp. 342–345.
12. Li Y., Hou Y., Wang Y., Feng Z., Feng B., Qin L., Teng F. Thermal treatment under reverse bias: Effective tool for polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells // *Synthetic Metals*. 2008. Vol. 158. No. 5. Pp. 190–193.
13. Dhibi O., Ltaief A., Bouazizi A. Optical and structural properties of МЕН-PPV:C₆₀-based structures // *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*. 2013. Vol. 21. No. 10. Pp. 894–900.
14. Ortiz-Morales A., Ortiz-Lopez J., Cruz-Zaragoza E., Gomez-Aguilar R. Thermoluminescence and photoluminescence analyses of МЕН-PPV, MDMO-PPV and RU(bpy)₃ gamma-irradiated polymer thin films // *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2015. Vol. 102. May. Pp. 55–62.
15. Siddhartha, Aarya S., 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 Physics and Chemistry*. 2012. Vol. 81. No. 4. Pp. 458–462.
16. AlSalhi S.M., Prasad S., Devaraj D., Abo Mustafa Z.S. Gamma-irradiation effects on the spectral and amplified spontaneous emission (ASE)

properties of conjugated polymers in solution // *Polymers*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 1–14.

17. **Choi D.H., Cho M.J., Han K.I., et al.** Luminescence properties of MEH-PPV and its crosslinked polymer: Effect of crosslink on photoluminescence and electroluminescence // *Synthetic Metals*. 2006. Vol. 156. No. 9–10. Pp. 685–689.

18. **Basiuk V.A., Albarrarn G., Basiuk E.V., Saniger J.-M.** Stability of interstellar fullerenes under high-dose γ -irradiation: new data // *Advances in Space Research*. 2005. Vol. 36. November. Pp. 173–177.

19. **Романов Н.М., Елистратова М.А., Lahderanta E., Захарова И.Б.** Деградация фотолуминесценции тонких пленок ZnTPP и ZnTPP-C₆₀ под действием гамма-облучения // *Физика и техника полупроводников*. 2018. Т. 52. № 8. С. 931–938.

20. **Романов Н.М., Захарова И.Б., Елистратова М.А., Лахдеранта Э.** Структура тонких пленок ZnTPP и ZnTPP-C₆₀ и влияние рентгеновского излучения на их фотолуминесценцию // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11. № 2. С. 26–40.

21. **Scheblykin I.G., Yartsev A., Pullerits T., Gulbinas V., Sundstrom V.** Excited state and charge photogeneration dynamics in conjugated polymers // *Journal of Physical Chemistry. B*. 2007. Vol. 111. No. 23. Pp. 6303–6321.

22. **Han X., Luo C., Dai Y., Liu H.** Effect of polymer-substrate interactions on the surface morphology of polymer blend thin films // *Journal*

of *Macromolecular Science. Part B: Physics*. 2008. Vol. 47. No. 6. Pp. 1050–1061.

23. **Liang G.-D., Xu J.-T., Fan Z.-Q.** Effect of substrate surface on dewetting behavior and chain orientation of semicrystalline block copolymer thin films // *Journal of Physical Chemistry. B*. 2006. Vol. 110. No. 48. Pp. 24384–24389.

24. **Laquai F., Park Y.-S., Kim J.-J., Basche T.** Transfer in organic materials: From fundamentals to optoelectronic devices // *Macromolecular Rapid Communications*. 2009. Vol. 30. June. Pp. 1203–1231.

25. **Ruseckas A., Wood P., Samuel I.D.W., Webster G.R., Mitchell W.J., Burn P.L., Sundstrom V.** Ultrafast depolarization of the fluorescence in a conjugated polymer // *Physical Review. B*. 2005. Vol. 72. No. 11. Pp. 115214–115300.

26. **Grage M.M.L., Wood P.W., Ruseckas A., Pullerits T., Mitchell W., Burn P.L., Samuel I.D.W., Sundstrom V.** Conformational disorder and energy migration in MEH-PPV with partially broken conjugation // *Journal of Chemical Physics*. 2003. Vol. 118. No. 16. Pp. 7644–7650.

27. **Bazani D.L.M., Lima J.P.H., Andrade A.M.** MEH-PPV thin films for radiation sensor applications // *IEEE Sensors Journal*. 2009. Vol. 9. No. 7. Pp. 748–751.

28. **Романов Н.М., Мусихин С.Ф.** Воздействие гамма-излучения на люминесценцию нанокompозитов проводящего полимера MEH-PPV с квантовыми точками сульфида свинца // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2018. Т. 11. № 2. С. 41–48.

Статья поступила в редакцию 30.09.2018, принята к публикации 03.10.2018.

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

ЗАХАРОВА Ирина Борисовна – 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
zakharova@rphf.spbstu.ru

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

ЕЛИСТРАТОВА Марина Анатольевна – младший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
marina.elistratova@mail.ioffe.ru

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] F.-C. Chen, C.-W. Chu, J. He, et al., Organic thin-film transistors with nanocomposite dielectric gate insulator, *Applied Physics Letters*. 85 (15) (2004) 3295–3297.
- [2] K.M. Nimith, M.N. Satyanarayan, G. Umesh, Enhancement in fluorescence quantum yield of MEH-PPV:BT blends for polymer light emitting diode applications, *Optical Materials*. 80 (June) (2018) 143–148.
- [3] G. Dennler, M.C. Scharber, C.J. Brabec, Polymer-fullerene bulk-heterojunction solar cells, *Advanced Materials*. 21 (13) (2009) 1323–1338.
- [4] I.B. Zakharova, V.M. Ziminov, N.M. Romanov, et al., Optical and structural properties of fullerene films doped with cadmium telluride, *Physics of the Solid State*. 56 (5) (2014) 1064–1070.
- [5] T.J. Savenije, J.E. Kroeze, M.M. Wienk, et al., Mobility and decay kinetics of charge carriers in photoexcited PCBM/PPV blends, *Physical Review B*. 69 (15) (2004) 155205–155216.
- [6] N.S. Sarciftci, D. Braun, C. Zhang, et al., Semiconducting polymer-buckminsterfullerene heterojunctions: Diodes, photodiodes, and photovoltaic cells, *Applied Physics Letters*. 62 (6) (1993) 585–587.
- [7] A. Facchetti, Polymer donor – polymer acceptor (all-polymer) solar cells, *Materials Today*. 16 (4) (2013) 123–132.
- [8] H.-H. Lee 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.
- [9] Seung Ho Kwon, Sang Yoon Paik, Jae Soo Yoo, Electroluminescent properties of MEH-PPV light-emitting diodes fabricated on the flexible substrate, *Synthetic Metals*. 130 (1) (2002) 55–60.
- [10] A. Ltaief, A. Bouazizi, J. Davenas, et al., Electrical and optical properties of thin films based on MEH-PPV/fullerene blends, *Synthetic Metals*. 147 (1-3) (2004) 261–266.
- [11] H. Kim, J.Y. Kim, K. Lee, et al., Conjugated polymer/fullerene composites as a new class of optoelectronic material: Application to organic photovoltaic cells, *Journal of the Korean Physical Society*. 36 (6) (2000) 342–345.
- [12] Y. Li, Y. Hou, Y. Wang, et al., Thermal treatment under reverse bias: Effective tool for polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells, *Synthetic Metals*. 158 (5) (2008) 190–193.
- [13] O. Dhibi, A. Ltaief, A. Bouazizi, Optical and structural properties of MEH-PPV:C₆₀-based structures, Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 21 (10) (2013) 894–900.
- [14] A. Ortiz-Morales, J. Ortiz-Lopez, E. Cruz-Zaragoza, R. Gomez-Aguilar, Thermoluminescence and photoluminescence analyses of MEH-PPV, MDMO-PPV and RU(bpy)₃ gamma-irradiated polymer thin films, *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 102 (May) (2015) 55–62.
- [15] Siddhartha, S. Aarya, K. Dev, et al., Effect of gamma radiation on the structural and optical properties of Polyethyleneterephthalate (PET) polymer, *Radiation Physics and Chemistry*. 81 (4) (2012) 458–462.
- [16] S.M. AlSalhi, S. Prasad, D. Devaraj, Z.S. Abo Mustafa, Gamma-irradiation effects on the spectral and amplified spontaneous emission (ASE) properties of conjugated polymers in solution, *Polymers*. 9 (1) (2017) 1–14.
- [17] D.H. Choi, M.J. Cho, K.I. Han, et al., Luminescence properties of MEH-PPV and its crosslinked polymer: Effect of crosslink on photoluminescence and electroluminescence, *Synthetic Metals*. 156 (9-10) (2006) 685–689.
- [18] V.A. Basiuk, G. Albarrarn, E.V. Basiuk, J.-M. Saniger, Stability of interstellar fullerenes under high-dose γ -irradiation: New data, *Advances in Space Research*. 36 (November) (2005) 173–177.
- [19] N.M. Romanov, M.A. Elistratova, E. Lahderanta, I.B. Zakharova, Degradation of the photoluminescence of ZnTPP and ZnTPP-C₆₀ thin films under gamma-irradiation, *Semiconductors*. 52 (8) (2018) 1061–1067.
- [20] N.M. Romanov, I.B. Zakharova, M.A.

Elistratova, E. Lahderanta, The structure of ZnTPP, ZnTPP-C₆₀ thin films and X-ray effect on their photoluminescence, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 11 (2) (2018) 26–40.

[21] **I.G. Scheblykin, A. Yartsev, T. Pullerits, et al.**, Excited state and charge photogeneration dynamics in conjugated polymers, *Journal of Physical Chemistry. B*. 111 (23) (2007) 6303–6321.

[22] **X. Han, C. Luo, Y. Dai, H. Liu**, Effect of polymer-substrate interactions on the surface morphology of polymer blend thin films, *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*. 47 (6) (2008) 1050–1061.

[23] **G.-D. Liang, J.-T. Xu, Z.-Q. Fan**, Effect of substrate surface on dewetting behavior and chain orientation of semicrystalline block copolymer thin films, *Journal of Physical Chemistry. B*. 110 (48) (2006) 24384–24389.

[24] **F. Laquai, Y.-S. Park, J.-J. Kim, T. Basche**, Transfer in organic materials: From fundamentals

to optoelectronic devices, *Macromolecular Rapid Communications*. 30 (June) (2009) 1203–1231.

[25] **A. Ruseckas, P. Wood, I.D.W. Samuel, et al.**, Ultrafast depolarization of the fluorescence in a conjugated polymer, *Physical Review. B*. 72 (11) (2005) 115214–115300.

[26] **M.M.L. Grage, P.W. Wood, A. Ruseckas, et al.**, Conformational disorder and energy migration in MEH-PPV with partially broken conjugation, *Journal of Chemistry Physics*. 118 (16) (2003) 7644–7650.

[27] **D.L.M. Bazani, J.P.H. Lima, A.M. Andrade**, MEH-PPV thin films for radiation sensor applications, *IEEE Sensors Journal*. 9 (7) (2009) 748–751.

[28] **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.

Received 30.09.2018, accepted 03.10.2018.

THE AUTHORS

ROMANOV Nikolay M.

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

ZAKHAROVA Irina B.

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

MALOVA Maria M.

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

ELISTRATOVA Marina A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
marina.elistratova@mail.ioffe.ru

MUSIKHIN Sergey F.

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