

ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
Политехнический Университет
Петра Великого

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники

Фотолюминисценция органических нанокомпозитных пленок на основе сопряженного полимера МЕН-PPV и влияние на нее ионизирующего облучения

Соискатель

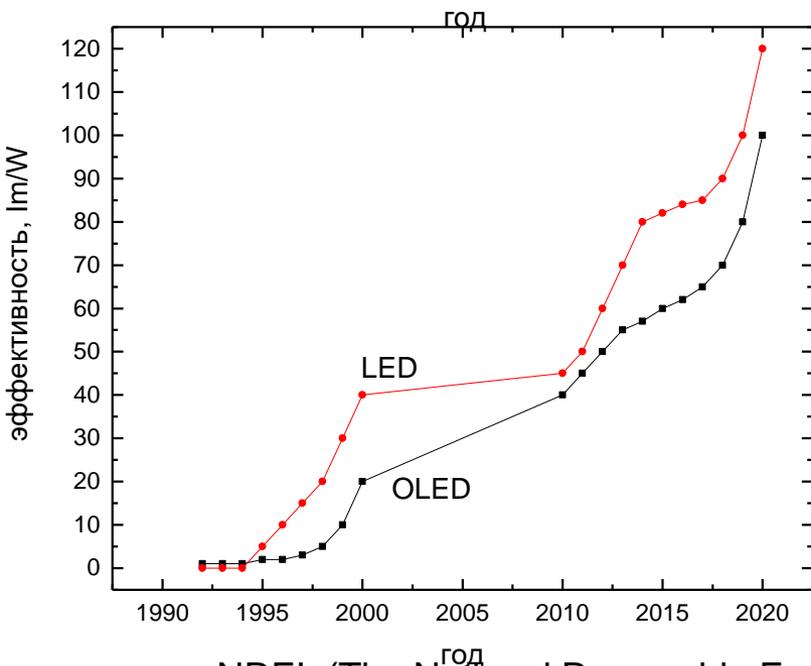
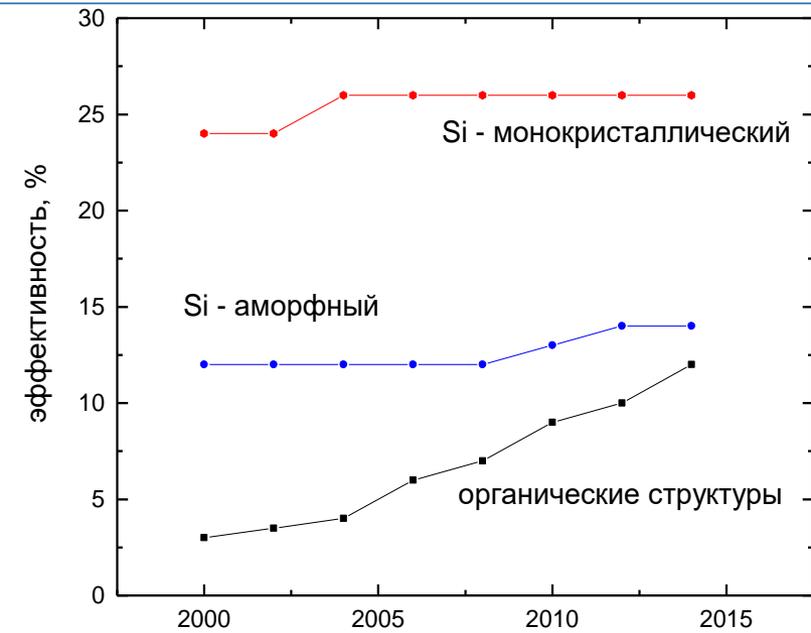
Н.М. Романов

Руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

И.Б. Захарова

04.03.19

Актуальность



Стоимость и технологичность



Органические полупроводниковые солнечные элементы могут снизить цену преобразования энергии Солнца в электрическую энергию



всестороннее изучение



Различные материалы



Органические полупроводниковые светоизлучающие структуры составляют конкуренцию классическим светодиодным структурам

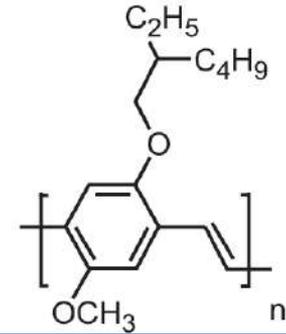
Материалы

Матрица

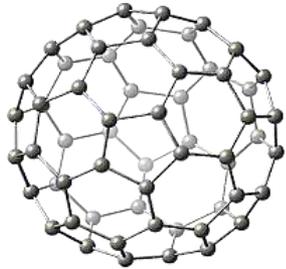


Включения

МЭН-PPV
поли[2-метокси-5-(2`-
этилгексилокси)-1,4-
фениленвинилен]
 $E_g = 2.3$ эВ



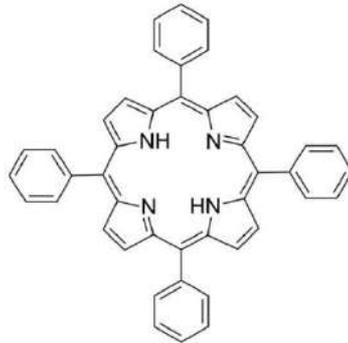
C₆₀



Фуллерен

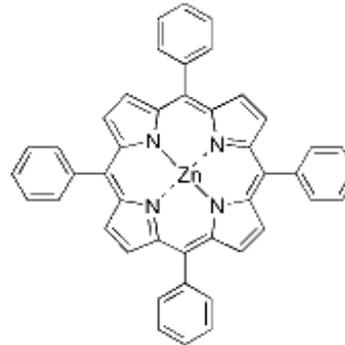
C₆₀
 $E_g = 1,9-2,1$ эВ

H₂TPP

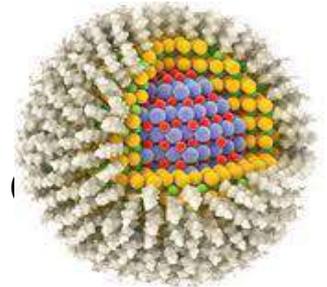


**5,10,15,20-
Тетрафенил
порфирин
(C₄₄H₃₀N₄)
 $E_g = 2,4$ эВ**

ZnTPP



**5,10,15,20-
Тетрафенил
порфирин цинка
(C₄₄H₂₈N₄Zn)
 $E_g = 2,9$ эВ**



**Коллоидные
квантовые
точки
PbS
 $E_g = 0,88$ эВ**

Ионизирующие излучения с высокой проникающей способностью



Период полураспада ^{137}Cs ~ 30,17 лет.
 ^{137}Cs - бета-излучатель (170,8 кэВ).

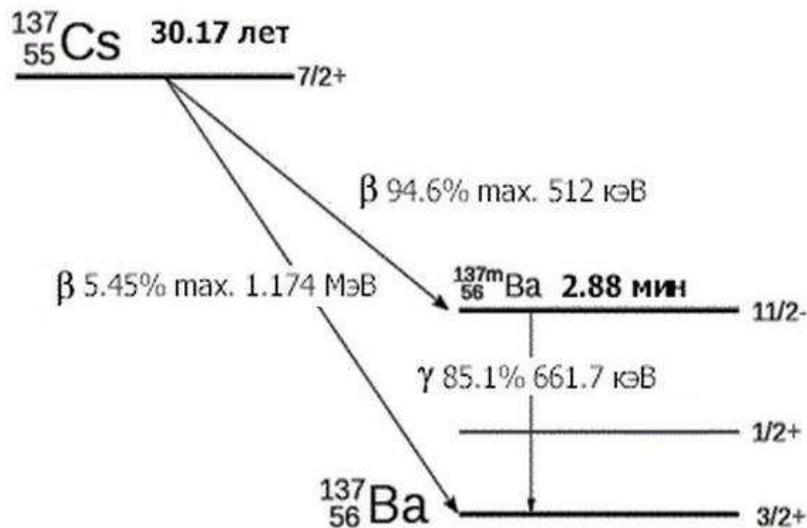
Дочерний радионуклид $^{137\text{m}}\text{Ba}$
(период полураспада 2,55 мин)

Энергия гамма-квантов с **661,6 кэВ**.

Облучение происходило в негерметичной кислородсодержащей квазизакрытой камере с мощностью поглощенной дозы по H_2O ~ **1.7 Грей/сек.**

Используемые дозы (10^3 - 10^5) Гр и 10^7 Гр

Схема распада Цезия-137



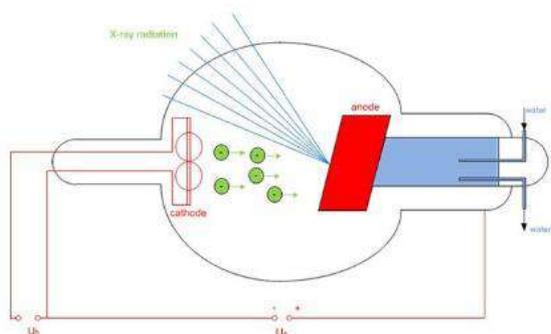
Грей (Гр, Gy) — единица поглощённой дозы ионизирующего излучения в СИ.

$$\text{Гр} = \text{Дж/кг} = \text{м}^2/\text{с}^2$$

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад};$$

рад - внесистемная единица измерения поглощённой дозы ионизирующего излучения

Ионизирующие излучения с высокой проникающей способностью



Вольфрам–рениевая рентгеновская трубка, работающая в режиме 40 кВ, 90 мА.

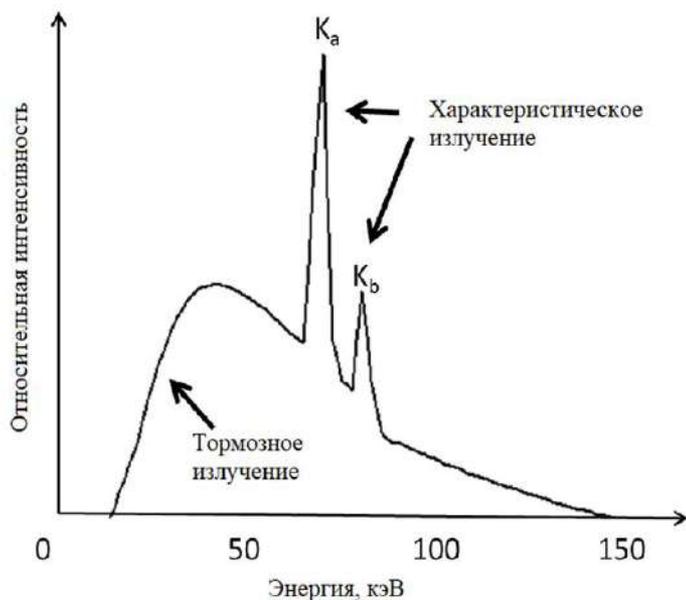
$K_{\alpha 1}$ и $K_{\beta 1}$ линии для вольфрамового анода имеют энергию 59,3 кэВ и 67,2 кэВ

Мощность экспозиционной дозы составляет ~ 1 Рентген/сек

Используемые дозы (10^5 - 10^6) Р

Рентгэн (Р; R) — внесистемная единица экспозиционной дозы облучения рентгеновским или гамма-излучением, определяемая по их ионизирующему действию на сухой атмосферный воздух

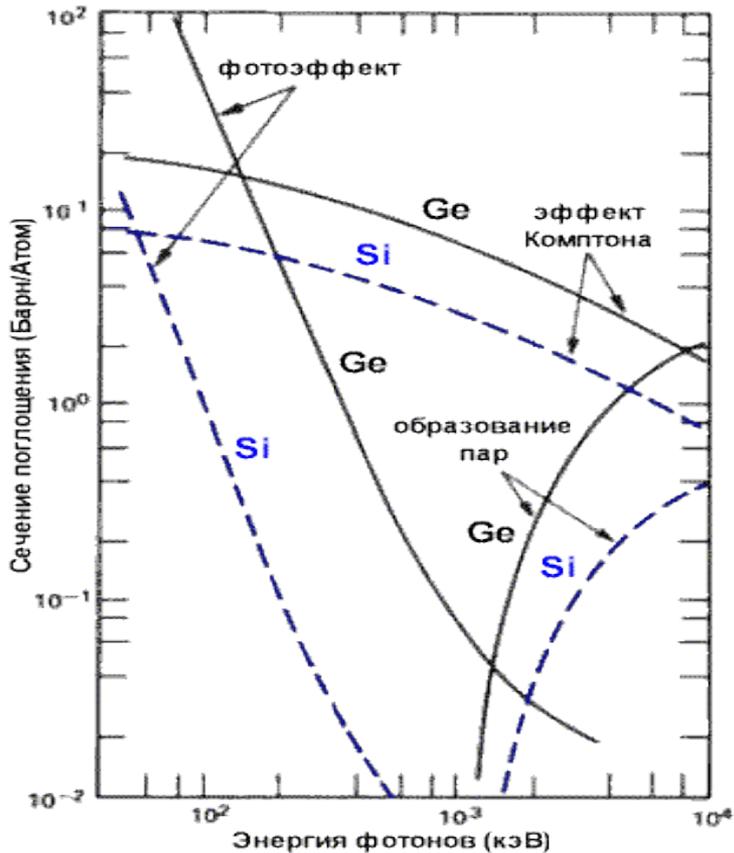
$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}; 1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$



Спектр излучения от рентгеновской трубки, 1 – тормозное (непрерывное) 2 – характеристическое (дискретное)

1 Р соответствует поглощённая доза в воздухе, равная 0,88 рад

Взаимодействие гамма-излучения с веществом



основные физические процессы

- фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект)
- образование позитрон-электрон пар
- рассеяние фотонов на свободных электронах (**комptonовское рассеяние**)

Фотоэффект - процесс взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества.

энергия 661,6 кэВ; легкие элементы → выражен слабо

Процесс образования фотоном *электрон-позитронной пары* в кулоновском поле ядра или электрона. Это пороговый процесс используемая энергия 661,6 кэВ → не свойственен

Комptonовское рассеяние - некогерентное рассеяние фотонов на свободных или слабосвязанных электронах, а также на других заряженных частицах, например, протонах. данный вид взаимодействия является преимущественным для органических материалов*

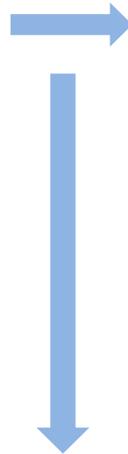
*Органическими называют соединения углерода с другими элементами.

Наибольшее количество соединений углерод образует элементами-органогенами: H, N, O, S, P.

Методика эксперимента

Коммерчески-доступные материалы фирмы Sigma-Aldrich:

- фуллерен C₆₀ (99,5%)
- тетрафенилпорфирин цинка (C₄₄H₂₈N₄Zn или ZnTPP)
- тетрафенилпорфирин C₄₄H₃₀N₄, или TPP (99%)
- сопряженный полимер поли(2-метокси-5-(2'-этил-гексилокси)-1,4-фениленвинилен) (МЕН-PPV)
- коллоидные квантовые точки (КТ) PbS.



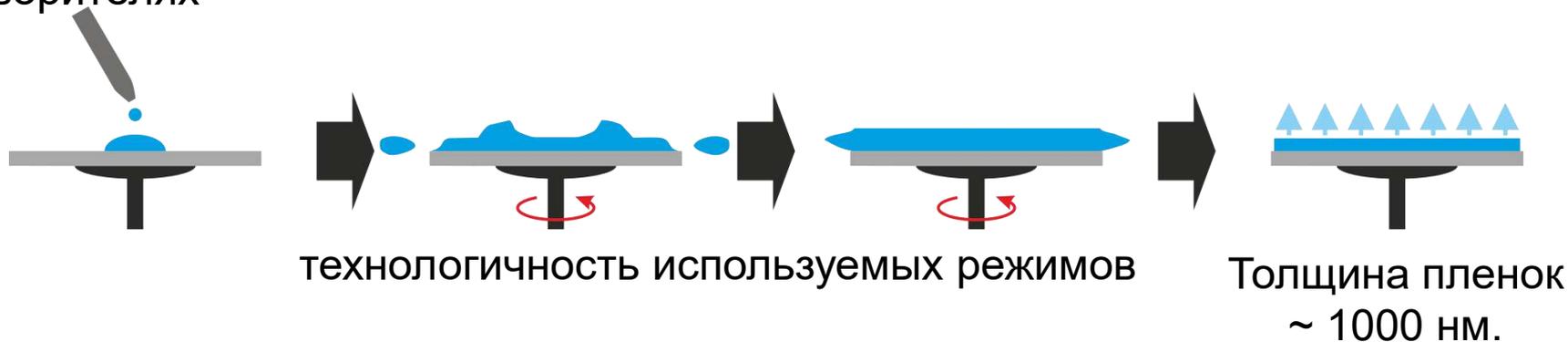
- Метод центрифугирования

- гамма облучатель источник излучения – ¹³⁷Cs, с энергией квантов 661,7 КэВ
- рентгеновский излучатель (вольфрам–рениевая трубка) в режиме 40 кВ, 90 мА, с энергиями 59,3 КэВ и 67,2 КэВ.

- растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEOL JSM-6390
- энергодисперсионная приставка микроанализа Oxford INCA Energy
- дифрактометр Bruker X8 PROTEUM
- фурье-спектрометр ИнфраЛЮМ ФТ–08 с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения PIKE MIRacle
- спектрофотометр Shimadzu UV-1800
- Horiba Jobin Yvon, состоящей из монохроматора FHR 640 с дифракционной решеткой 1200 шт/мм, детектором Symphony II 1024*256 Cryogenic Open-Electrode CCD
- Квантово-химические расчеты методом DFT-B3LYP и TD DFT

Методика получения тонких высокомолекулярных нанокompозитных пленок

Центрифугирование является одним из самых технологично-доступных методов получения тонких пленок органических материалов, растворимых в различных растворителях



Мы использовали данную технологию для получения всех пленок, основанных на полимерной матрице (МЕН-PPV) нанокompозитов МЕН-PPV/низкомолекулярные включения (МЕН-PPV/C₆₀, МЕН-PPV/H₂TPP) и МЕН-PPV/КТ PbS).

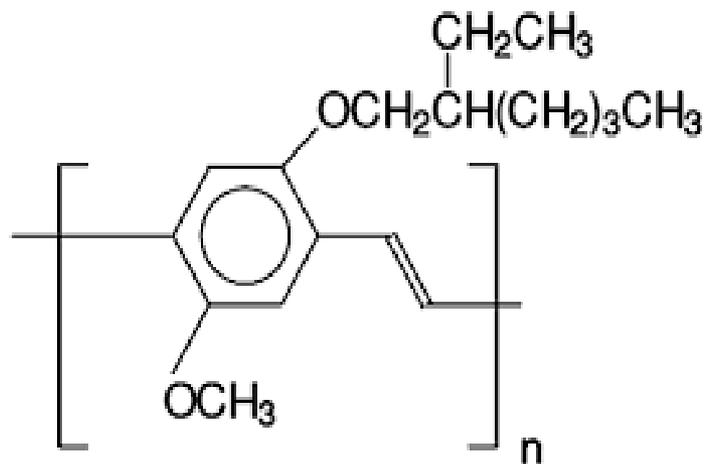
раствор МЕН-PPV/включения ←

термостатирование (50 °С на 60 мин), механическое перемешивание (15 минут) и обработки в ультразвуковой ванне (30 минут)

- раствор МЕН-PPV массой 0,1 г, растворенного в 0,5 мл толуола
- раствор включений массой 0,1 г, растворенного в 0,5 мл толуола

Сопряженный полимер МЕН-PPV

поли[2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилен]



МЕН-PPV является производным полифениленвинилена (PPV)

МЕН-PPV имеет ширину запрещенной зоны $E_g=2,27$ эВ, обладает хорошими электрическими характеристиками, такими как проводимость и подвижность носителей.

Молярная масса коммерчески доступного полимера составляет 40000-250000 г/моль.

Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene]

Сильная ФЛ в видимой области спектра,

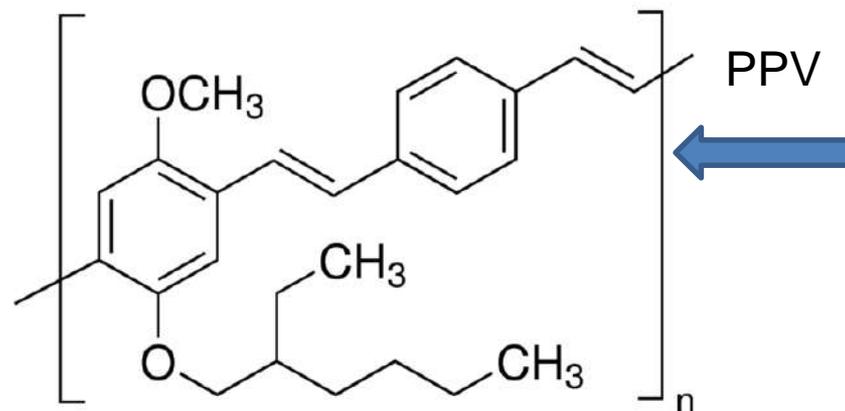
максимумы:

λ_{ex} 493 nm;

λ_{em} 554 nm in toluene

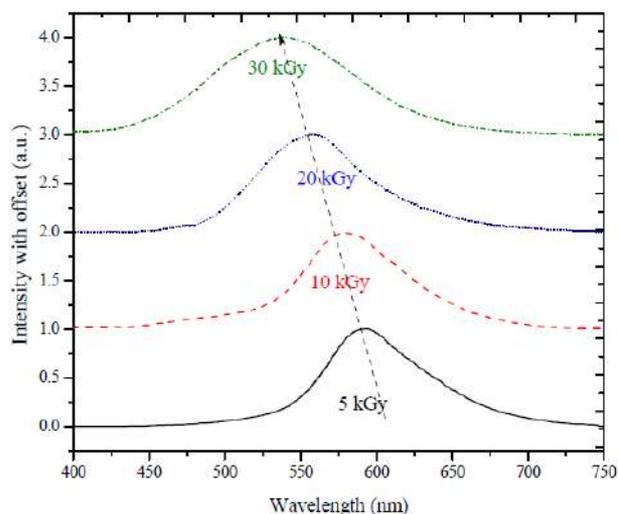
HOMO 5.3 eV

LUMO 3 eV



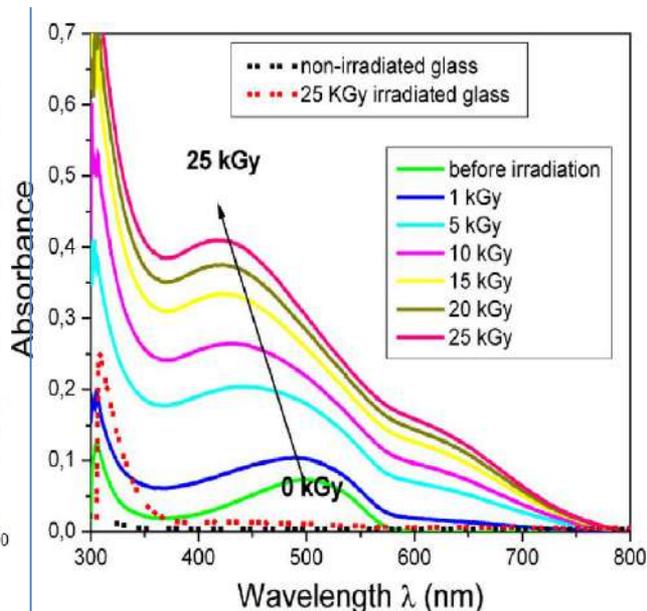
Литературные данные

Ряд работ, в которых наблюдается сдвиг спектра ФЛ МЕН-PPV как функция дозы гамма облучения



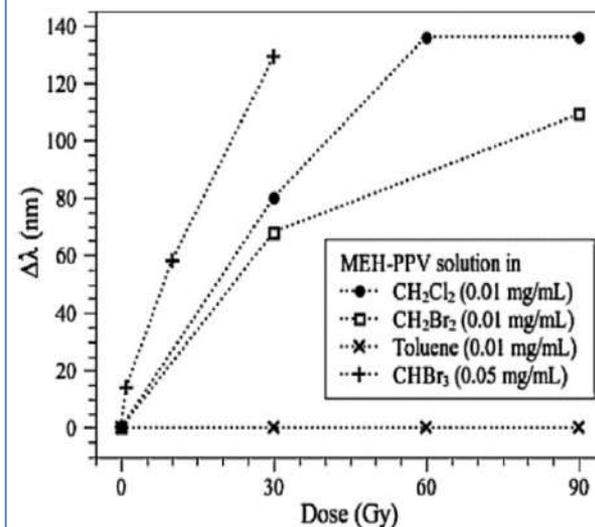
Fluorescence spectra of MEH-PPV at 50 μM concentration, pre- and post-gamma irradiation ranging from 5 to 30 kGy;

AlSalhi, S.M. all Gamma-irradiation effects on the spectral and amplified spontaneous emission (ASE) properties of conjugated polymers in solution // *Polymers* – 2017. – Vol. 9. Issue 1. – Pp. 1-14.



UV-visible average absorbance spectra obtained from two samples of MEH-PPV thin films (30 nm thick) prepared with the same conditions, after being irradiated with increasing doses of gamma radiation, as indicated.

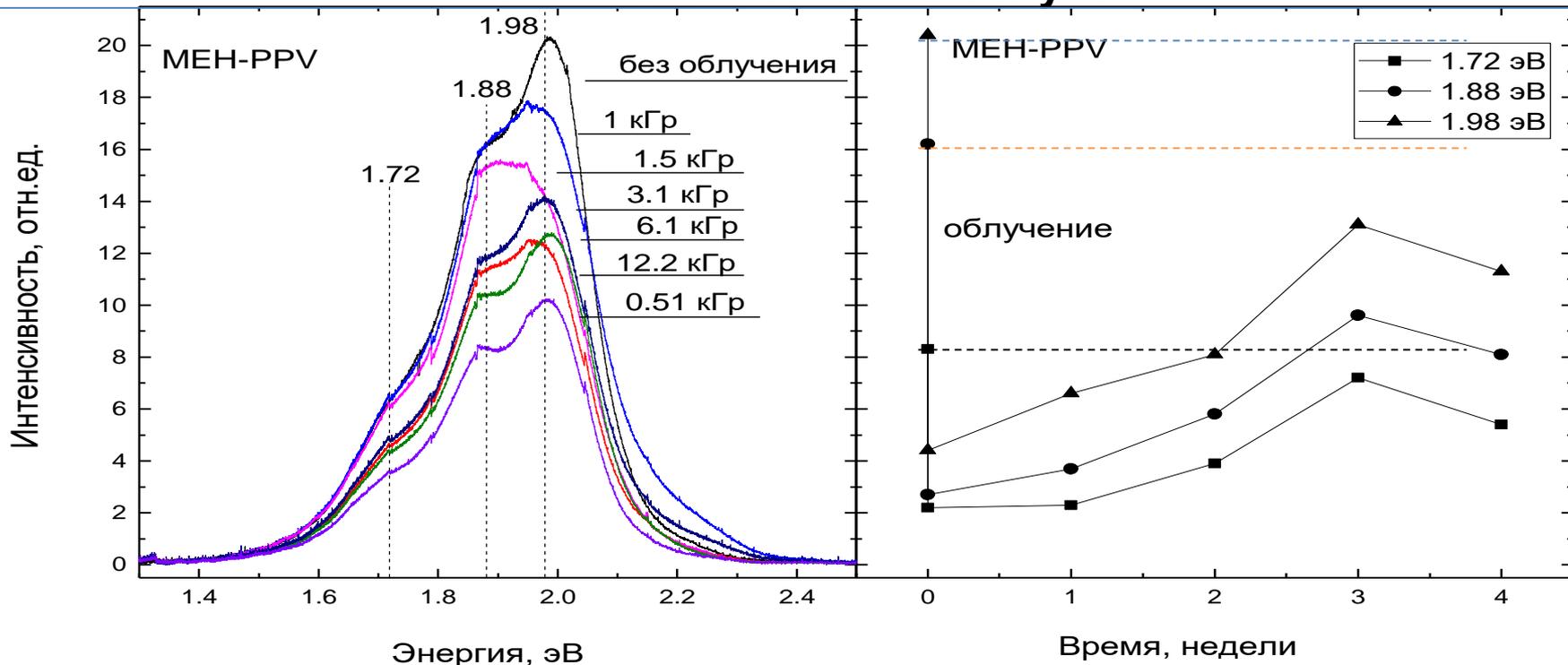
Bazani, D.L.M. all MEH-PPV Thin Films for Radiation Sensor Applications // *EEE SENSORS JOURNAL*. – 2009. – Vol. 9. Issue 7. – Pp. 748-751.



Сдвиг основного пика ФЛ МЕН-PPV в разных растворителях при различных дозах гамма-облучения

Bronze-Uhle, E.S. all MEH-PPV hypsochromic shifts in halogenated solvents induced by γ -rays // *Materials Chemistry and Physics* – 2012. Vol. 132. – Pp. 846-851.

Фотолюминисценция полимера МЕН-PPV и влияние на нее гамма облучения



ФЛ МЕН-PPV под действием различных доз гамма облучения (А) и интенсивности пиков фотолюминесценции от времени после облучения (В)

Не меняется спектральное положение линий, релаксация за 3-4 недели

немонотонный характер тушения ФЛ от дозы облучения (конкурирующие процессы)



сшивка полимерных цепей, (безызлучательный распад возбужденного при активации экситона); снижение интенсивности ФЛ



внесение дефектов и уменьшение эффективной длины сопряжения, (затруднение распада экситона за счет перехода носителей на соседние сопряженные участки) **→** Рост интенсивности люминесценции



Рост числа центров безызлучательной рекомбинации; конформация; снижение интенсивности ФЛ

МЕН-PPV/C₆₀

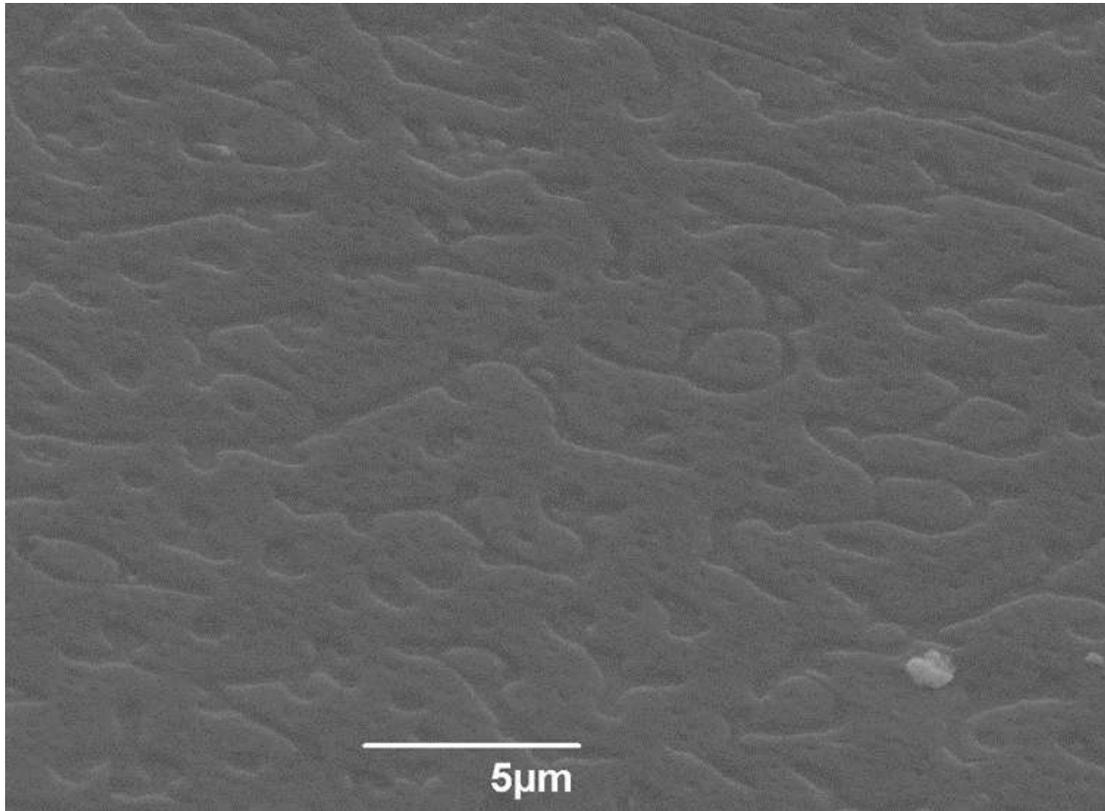
9:1 → 1 молекула C₆₀ ~ на 26 структурных звеньев цепи МЕН-PPV
3:1 → 1 молекула C₆₀ ~ на 9 структурных звеньев цепи МЕН-PPV
(при этом считается что молекулы C₆₀ гомогенно распределены в объёме наноккомпозита и не образуют агрегатов).

МЕН-PPV/H₂TRP

1:1 → 1 молекула H₂TRP ~ на 2-3 звена цепи МЕН-PPV
(при этом считается что молекулы H₂TRP гомогенно распределены в объёме наноккомпозита и не образуют агрегатов).

МЕН-PPV / PbS

1:1 → по массе исходных

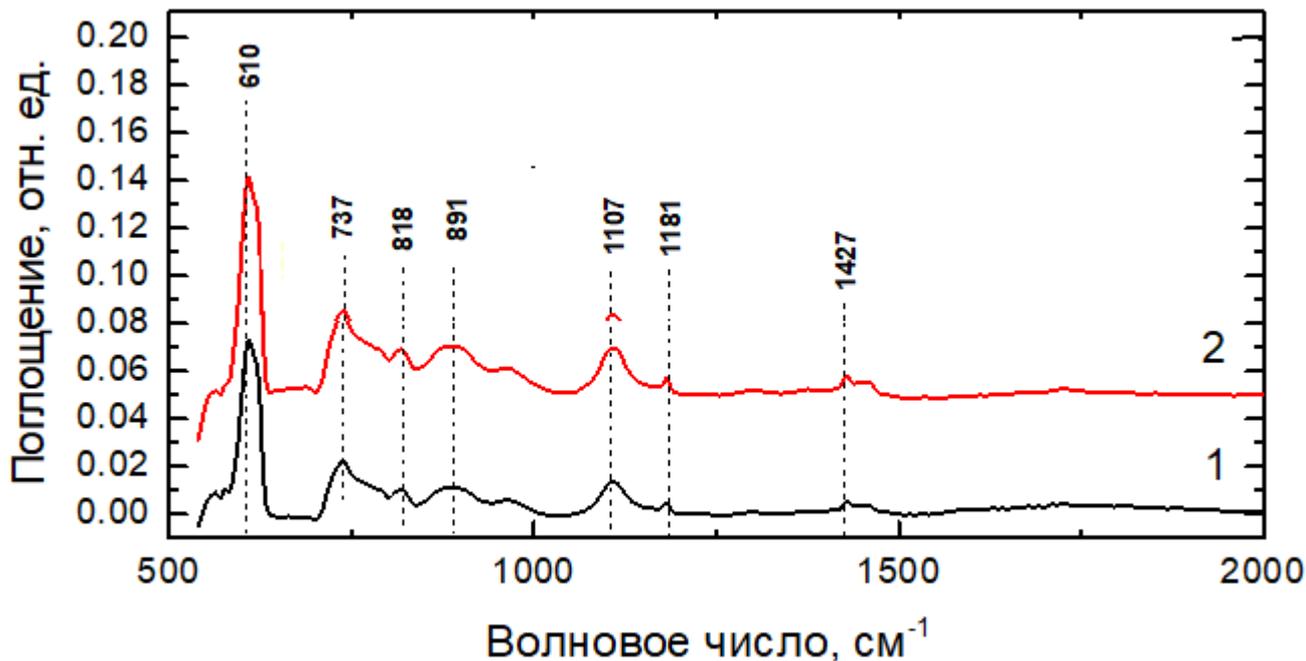


Поверхность НК МЕН-PPV

размер области делокализации фотовозбужденного экситона ~ 14 звеньев МЕН-PPV
Через 0,1 пс ~ 6 звеньев МЕН-PPV
(за счет электрон-фононного взаимодействия)

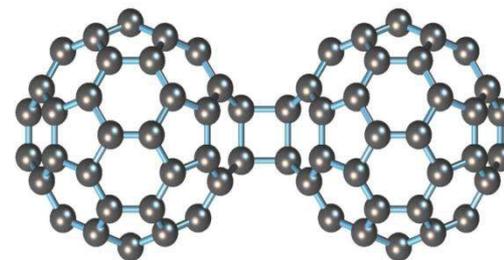
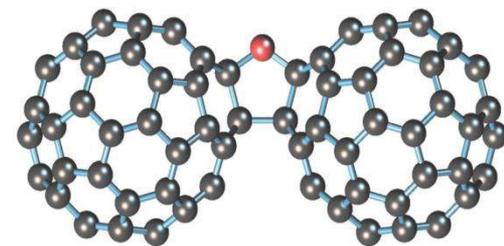
Ruseckas, A., all. Ultrafast depolarization of the fluorescence in a conjugated polymer / Physical Review. B. – 2005. – Vol. 72. – Issue 11. – Pp. 1203–1231.

1) Влияние рентгеновского облучения на C_{60}



1181 cm^{-1} и 1427 cm^{-1} → C_{60}

1107 cm^{-1} , 610 cm^{-1} , 1450 cm^{-1} ,
1273 cm^{-1} , 797–720 cm^{-1} ,
622–607 cm^{-1} → Si, Si–O или
Si–O–Si



Спектры ИК. 1, 2 — C_{60} . Кривая 1, — до облучения, кривая 2 —
после облучения дозой $7,5 \cdot 10^5$ Р

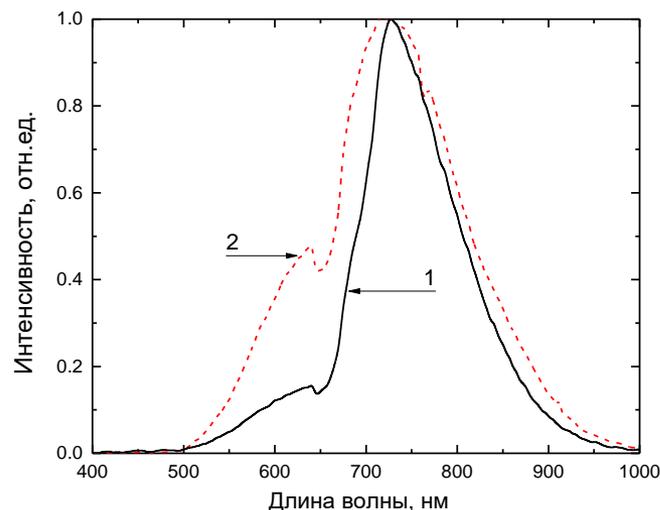
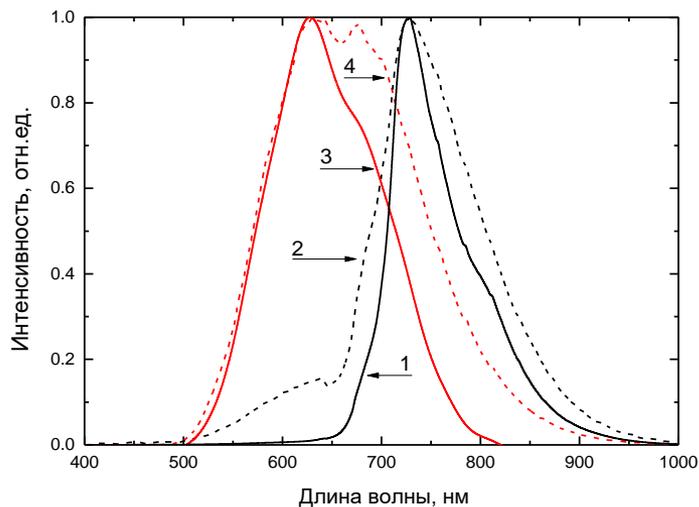
Олигомеризация (димеры $(C_{60})_2$ и оксидимеры $C_{120}O$).

Многочисленные слабоинтенсивные линии в районе
1450 cm^{-1} , 1273 cm^{-1} , 797–720 cm^{-1} , 622–607 cm^{-1} .

Структура димеров $(C_{60})_2$ и
 $(C_{60})_2O$ по данным
квантохимических расчётов

устойчивость C_{60}

Влияние облучения на фотолюминесценцию тонких пленок на основе фуллерена C_{60}



Нормализованные спектры ФЛ. 1, 3 — C_{60} . 2, 4 — $C_{60}/CdTe$. 1, 2 — плёнки до облучения, 3, 4 — после дозы $7,5 \cdot 10^5 R$

Спектры фотолюминесценции пленок $C_{60}/CdTe$. 1 — до облучения, 2 — после гамма-облучения дозой 55 кГр

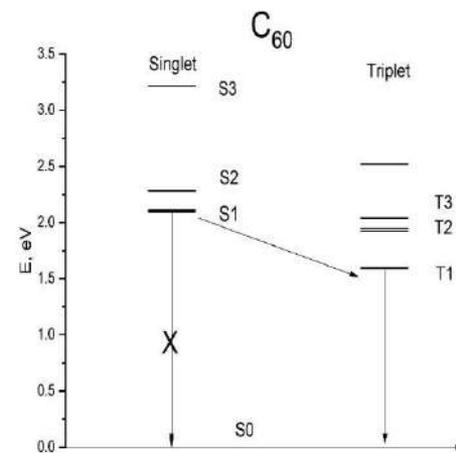
ФЛ изолированной молекулы C_{60} связана с триплетным переходом T1-S0. Излучательный переход S1-S0 запрещен по симметрии.

После облучения

появляется пик в области длин волн **600-650 нм (2.1-1.9 эВ)**:
В электронной структуре димеров $(C_{60})_2$ и $(C_{60})_2O$ появляются разрешенные переходы в этой области энергий (по данным квантово-химических расчетов).

Одиночная молекула стабильна:

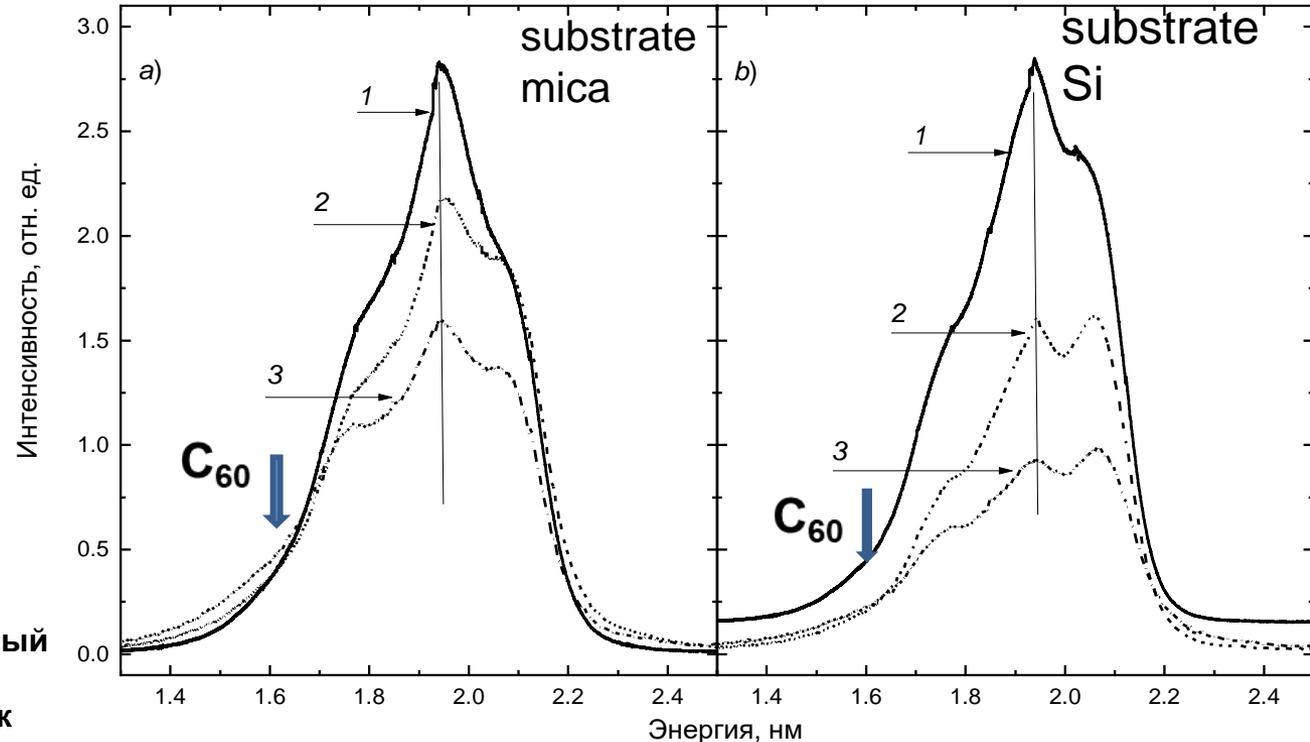
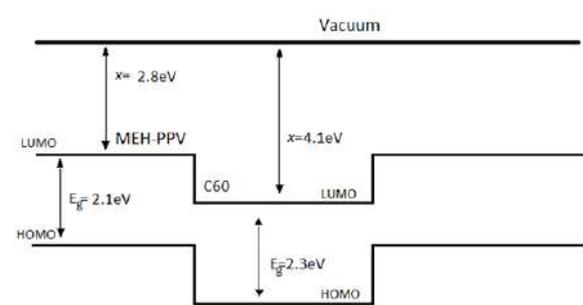
- Малое эффективное сечение σ
- Наличие делокализованных пи-электронов



Оптические переходы в молекуле C_{60}

ФЛ нанокompозитов на основе МЕН-PPV с фуллереном C₆₀ и влияние на нее гамма облучения

а) МЕН-PPV/C₆₀ до облучения



- Эффективный фотоиндуцированный перенос заряда на акцептор
- (тушению ФЛ композитных пленок примерно на порядок)

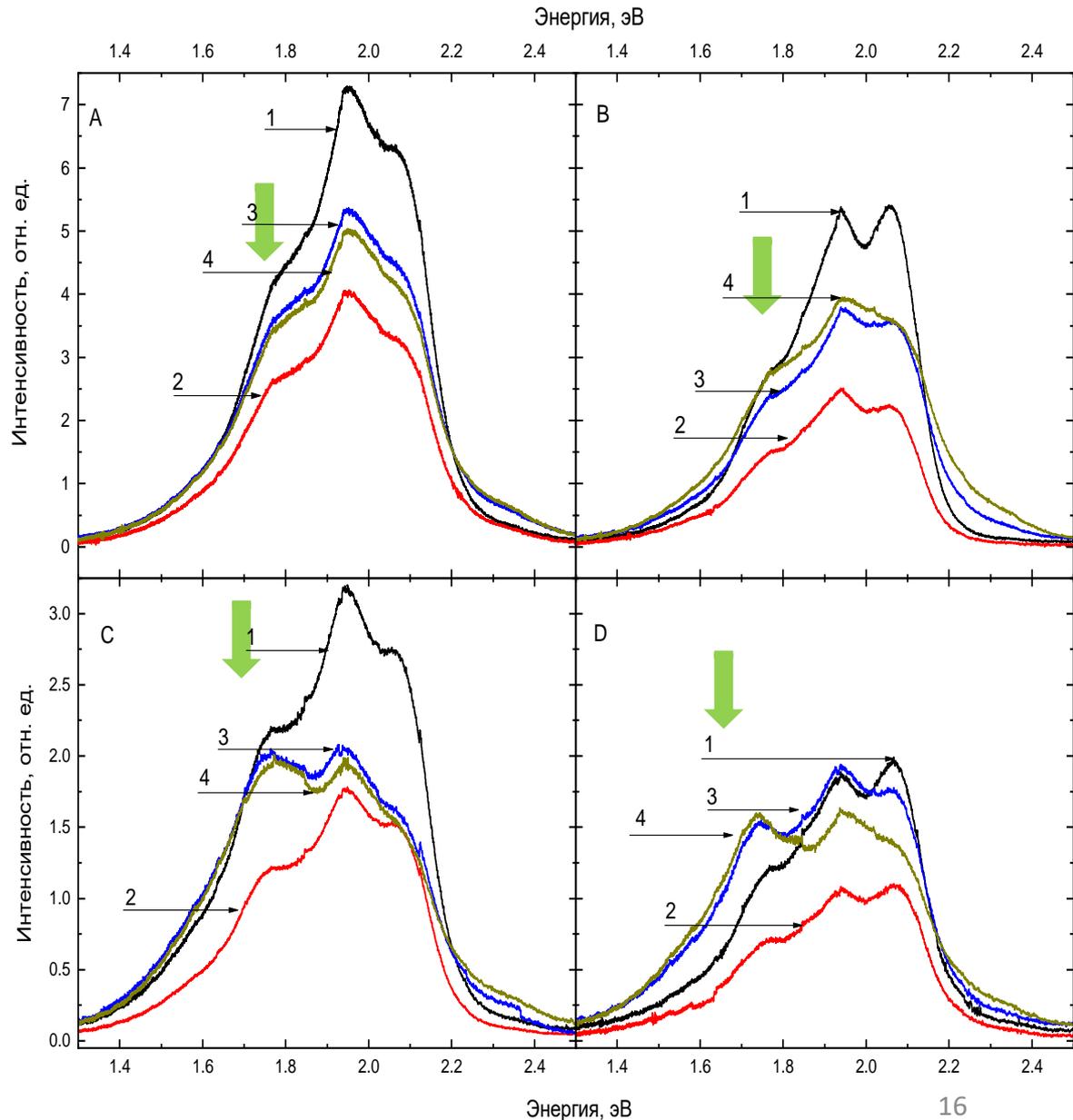
- Влияние подложки на молекулярное диспергирования C₆₀. Поверхность слюды покрыта диполями в соответствии с упорядоченной кристаллической решеткой. Отсутствие на кремниевой поверхности.

Фотолуминесценции необлученных образцов, МЕН-PPV (1), нанокompозит МЕН-PPV/C₆₀ в соотношениях 9:1 (2) и 3:1 (3)

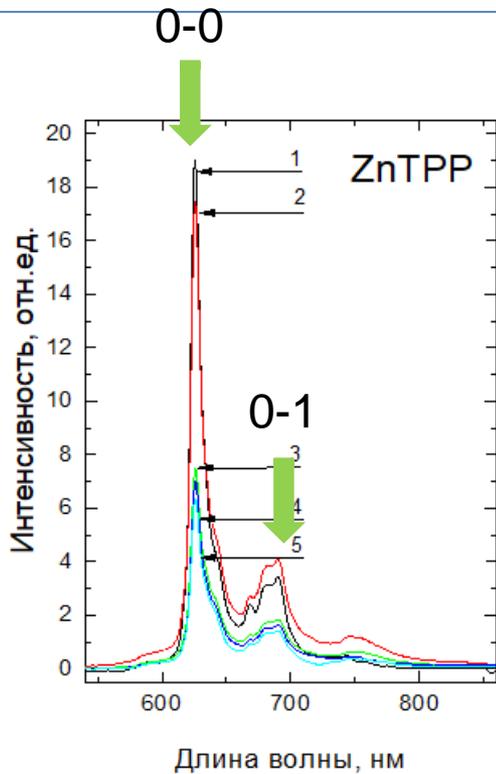
ФЛ нанокompозитов на основе МЕН-PPV с фуллереном C₆₀ и влияние на нее гамма облучения

- под действием гамма облучения происходит уменьшение интенсивности ФЛ
- интенсивность ФЛ в длинноволновой части спектральной зависимости (1,7-1,9 эВ) уменьшается слабее
- Разный механизм тушения электронной и электронно-колебательной составляющих излучательных переходов МЕН-PPV и/или вклад ФЛ C₆₀
- Нанокompозит с большим содержанием и молекулярным диспергированием C₆₀ стабилен к воздействию гамма

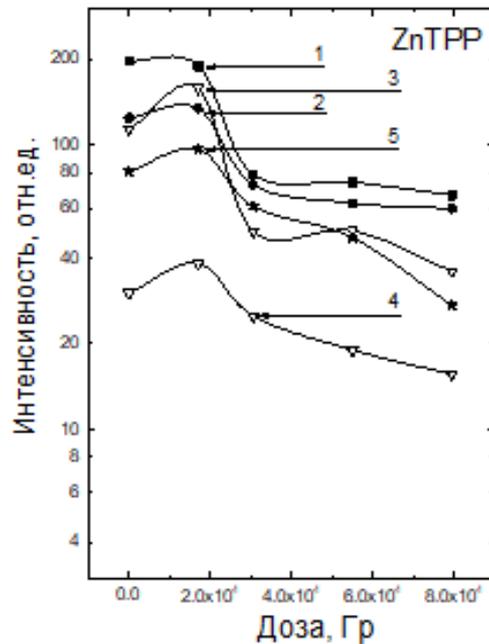
ФЛ нанокompозитов образцов МЕН-PPV-C₆₀ разных составов:
1 – до облучения, 2 – с дозой 18,3 кГр, 3 – с дозой 42,8 кГр, 4 – с дозой 67,3 кГр.



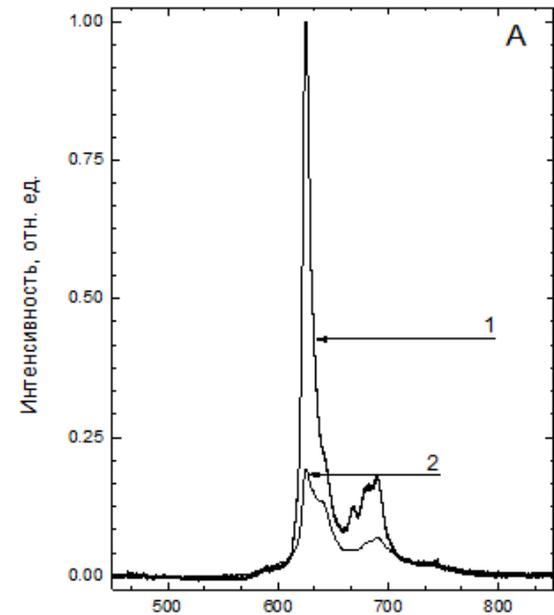
ФЛ порфириновых пленок и влияние на нее облучения



1 - необлученные, 2 - 5
 после воздействия гамма-облучения с дозами
 2- 17 кГр, 3 - 30.5 кГр, 4 - 55 кГр, 5 - 79.5 кГр

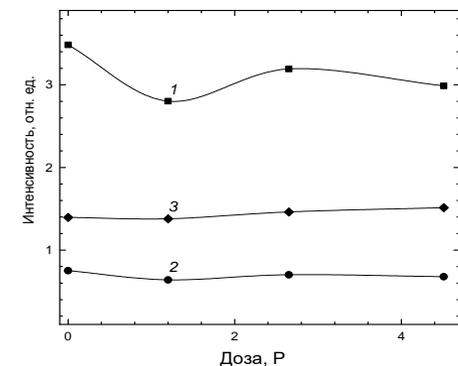


Дозовые зависимости спектральной
 составляющих ФЛ

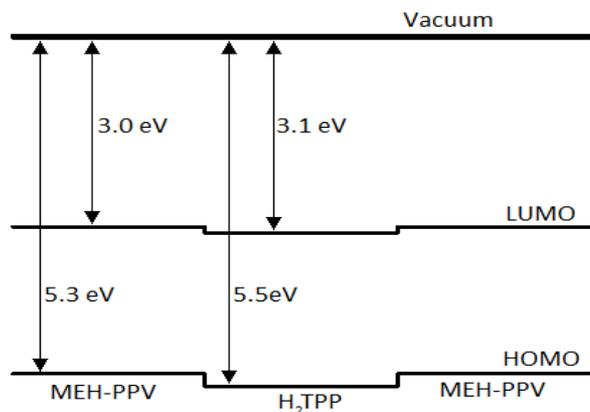


Длина волны, нм
 Нормированная ФЛ ZnTPP 1 —
 необлученные,
 2 — воздействия $1,6 \cdot 10^7$ Гр
 (интенсивность $\times 5$).

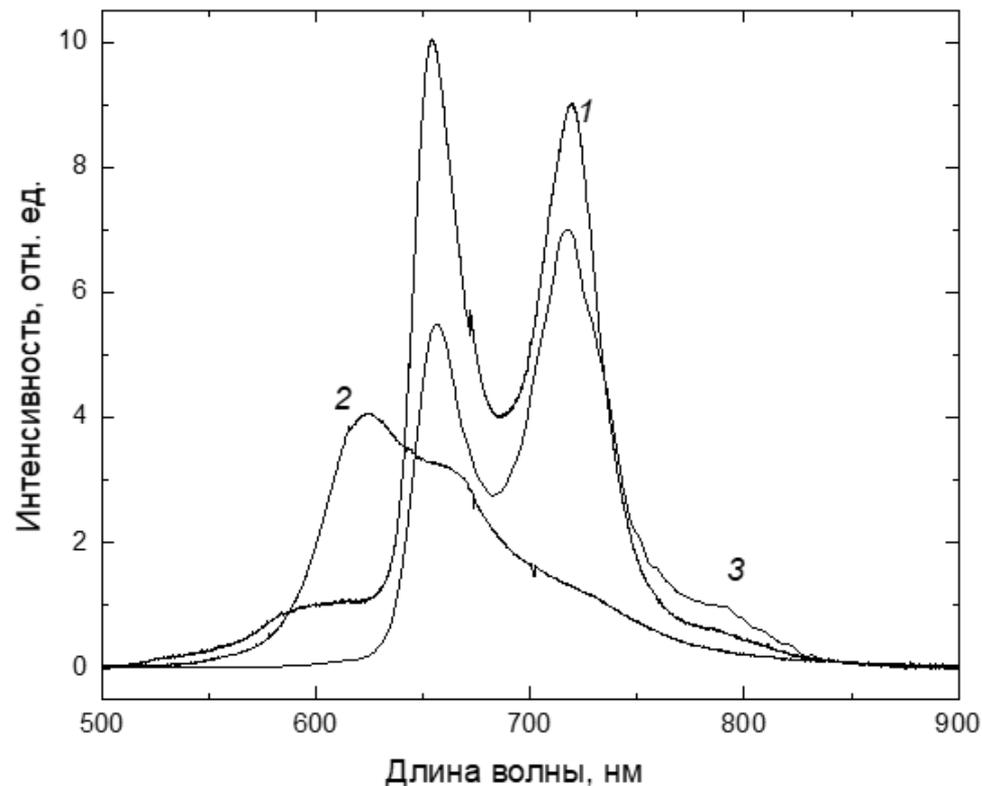
- спектральное положение линий ФЛ после облучения не изменяется, \longrightarrow вывод о стабильности электронной структуры, уширения линий нет.
- интенсивность ФЛ электронного перехода уменьшается; эффект носит пороговый характер
- интенсивность ФЛ электронно-колебательного повторения стабильна или возрастает.



Исследования фотолюминесценции нанокompозитов на основе МЕН-PPV с тетрафенилпорфирином H₂TPP



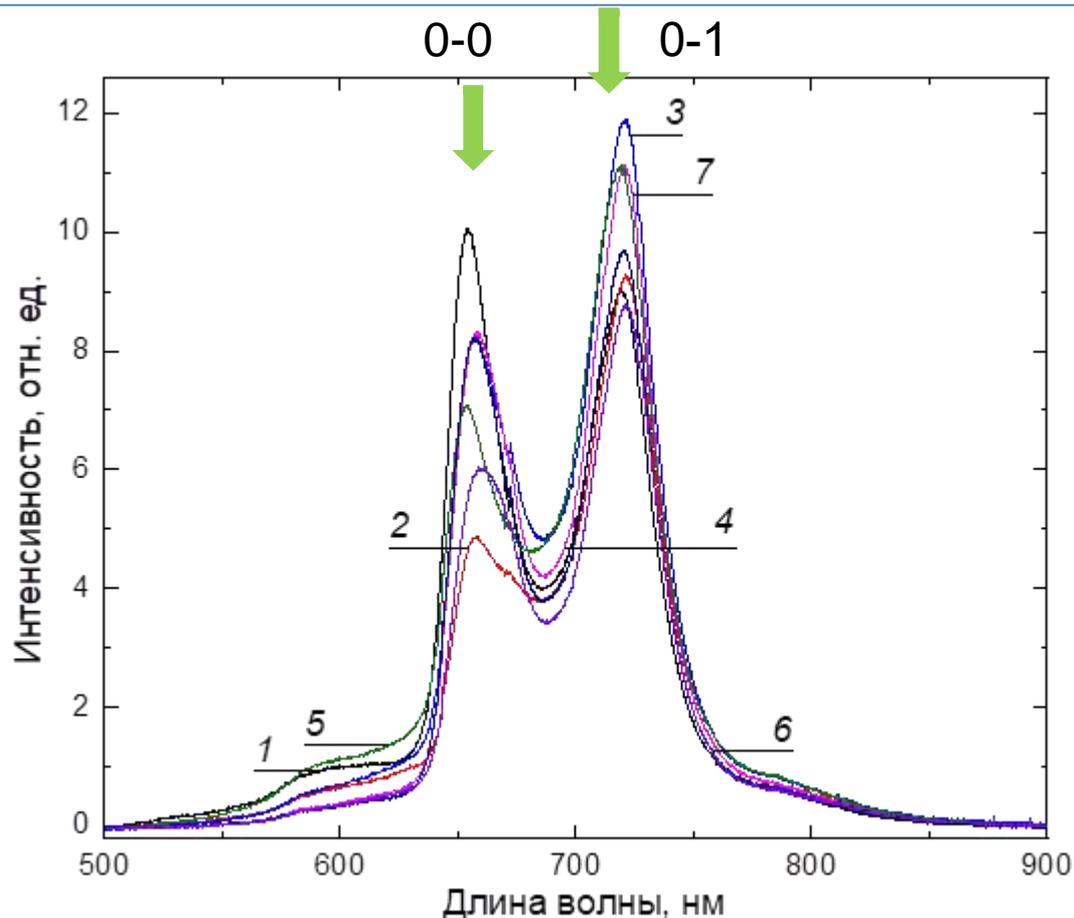
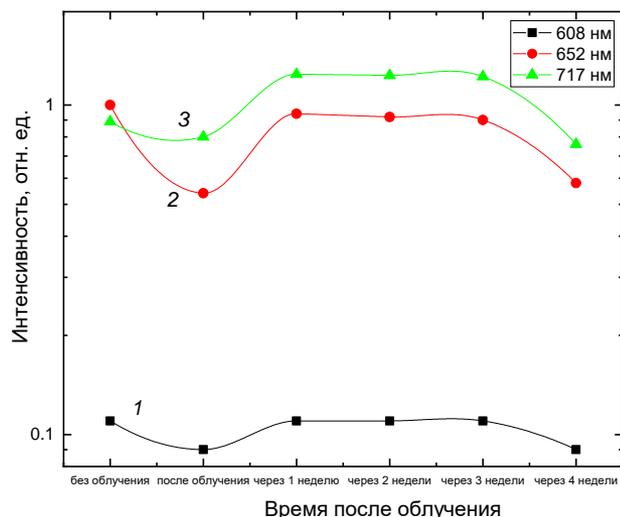
- близкое положения зон HOMO-LUMO
- Тушение ФЛ полимера
перенос энергии по резонансному **механизму Ферстера** на излучающую молекулу порфирина.



Фотолюминесценция 1 - нанокompозита МЕН-PPV/H₂TPP; 2 - полимера МЕН-PPV, 3 - порфирина H₂TPP

Исследования фотолюминесценции нанокompозитов на основе МЕН-PPV с тетрафенилпорфирином H₂TPP и влияние на них гамма излучения

- перенос энергии по резонансному механизму Ферстера на излучающую молекулу порфирина.
- изменение относительной величины пиков (уменьшение) **электронного** и (увеличение) **электронно-колебательного переходов** под действием облучения
- В связи с быстрой релаксацией можно предположить появление долгоживущих свободных радикалов

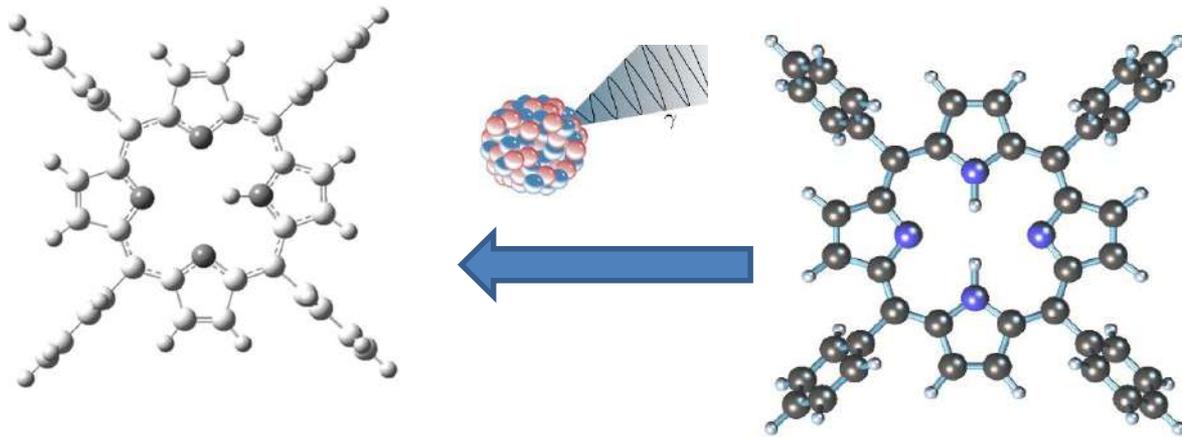


ФЛ пленок МЕН-PPV/TPP после облучения различными дозами: 1 – 0 кГр 2 – 0.51 кГр; 3 – 1.02 кГр; 4 – 1.53 кГр; 5 – 3.06 кГр; 6 – 12.2 кГр;



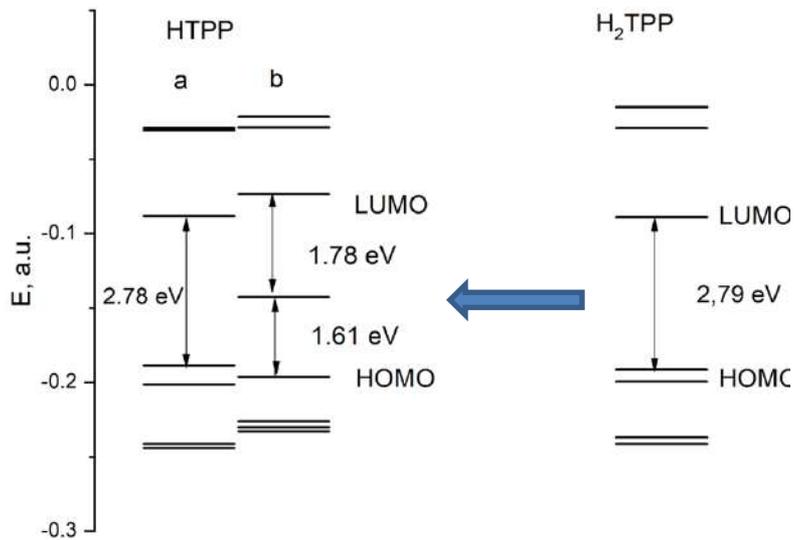
Релаксация спектральных составляющих ФЛ

Моделирование дефектов тетрафенилпорфирина H_2TPP под действием гамма излучения



Тетрапирольный макроцикл

Оптимизированная геометрия свободного радикала НТРР



удаление одного атома водорода → энергетическая диаграмма становится различной для электронов с разными направлениями → (a) – спин вверх и (b) – спин вниз).

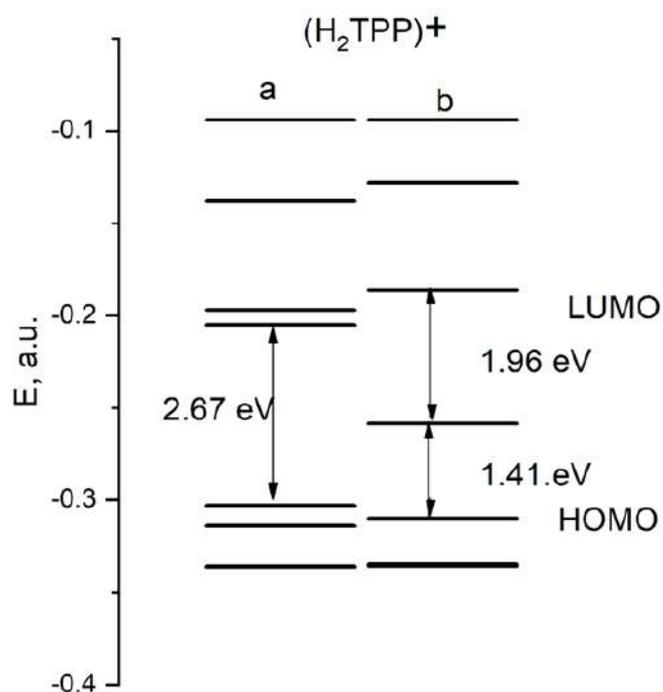
для радикала происходит отщепление вакантной (незаполненной) молекулярной орбитали вниз от LUMO. →

в запрещенной зоне материала образуется глубокий акцепторный уровень, который может играть роль **центра рекомбинации носителей**

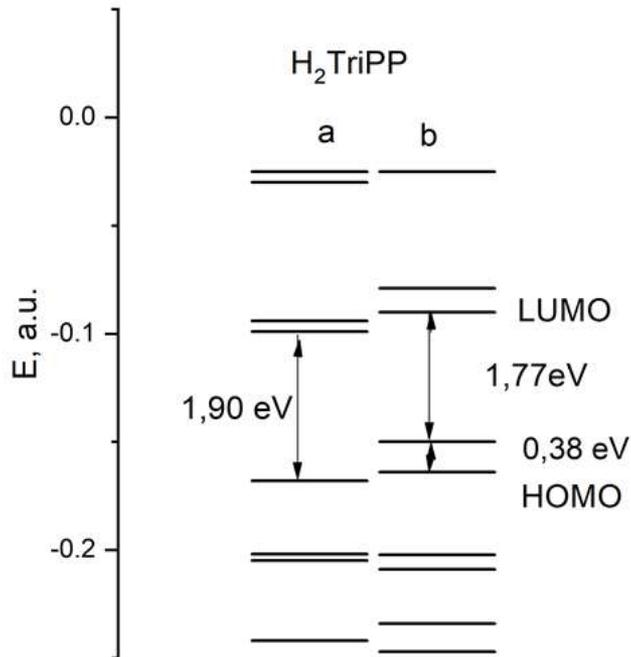
моделирование потери протона в составе тетрапирольного макроцикла

→ радикал

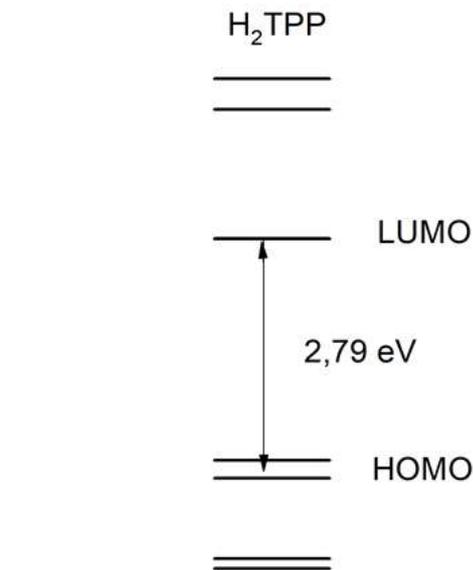
Моделирование дефектов тетрафенилпорфирина H_2TPP под действием гамма излучения



моделирование потери электрона
 → ион-радикал

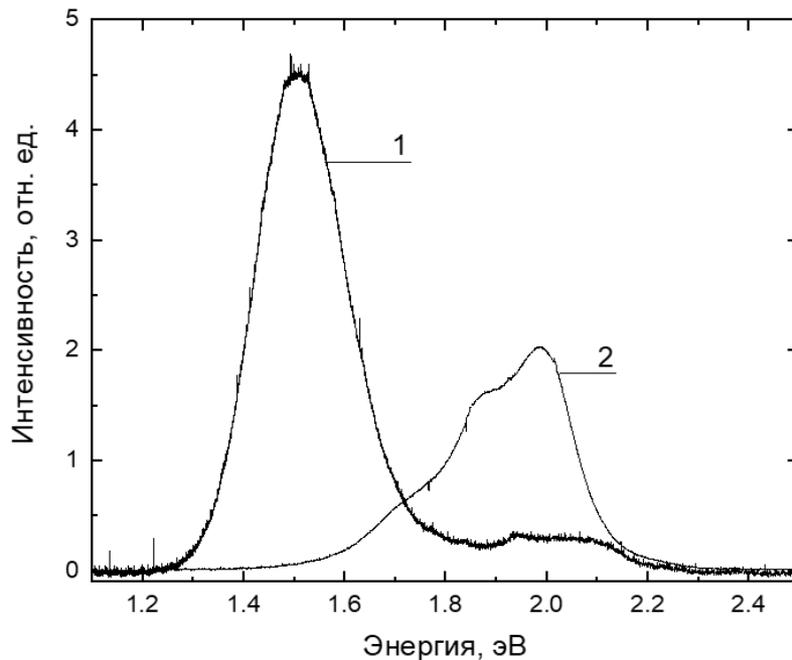
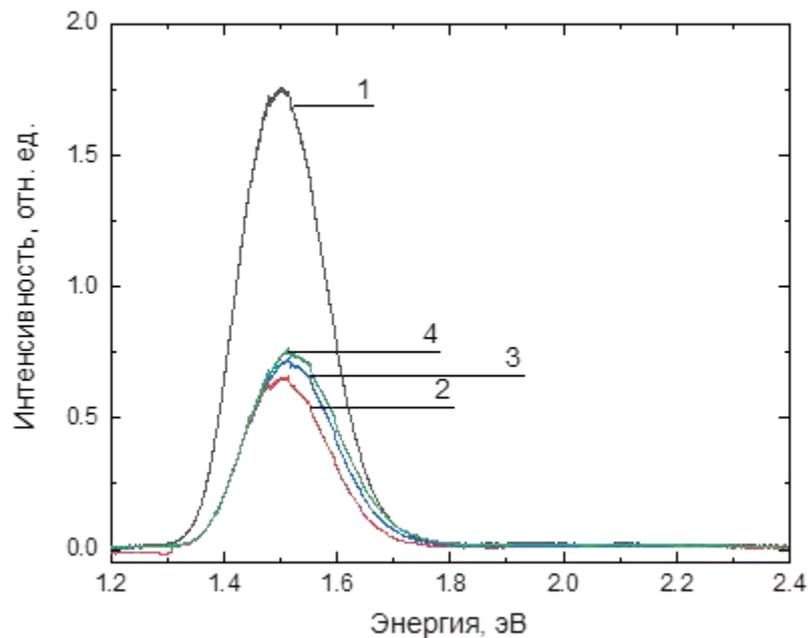


Моделирование потери
 фенильной группы



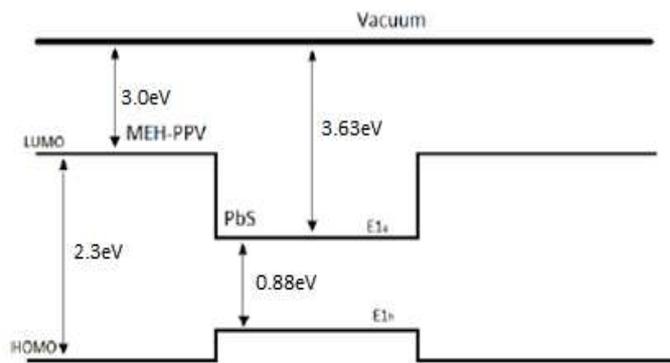
Моделирование потери
 периферийных протонов
 (слабо влияют на
 электронную структуру)

ФЛ нанокompозитов на основе МЕН-PPV с квантовыми точками PbS и влияние на них гамма излучения

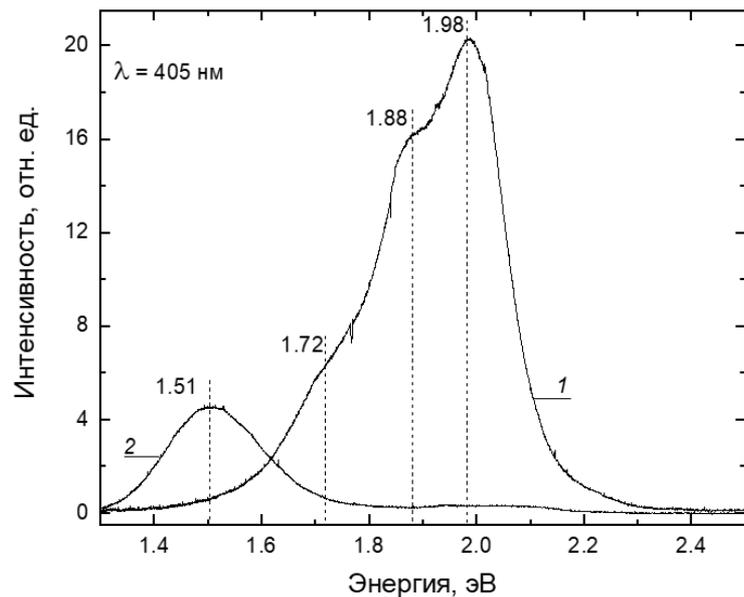


Спектры ФЛ КТ PbS нанесенных на стеклянные подложки после воздействия различных доз гамма-облучения, Гр: 0 (1); $1,84 \cdot 10^4$ (2); $4,18 \cdot 10^4$ (3); $6,73 \cdot 10^4$ (4)

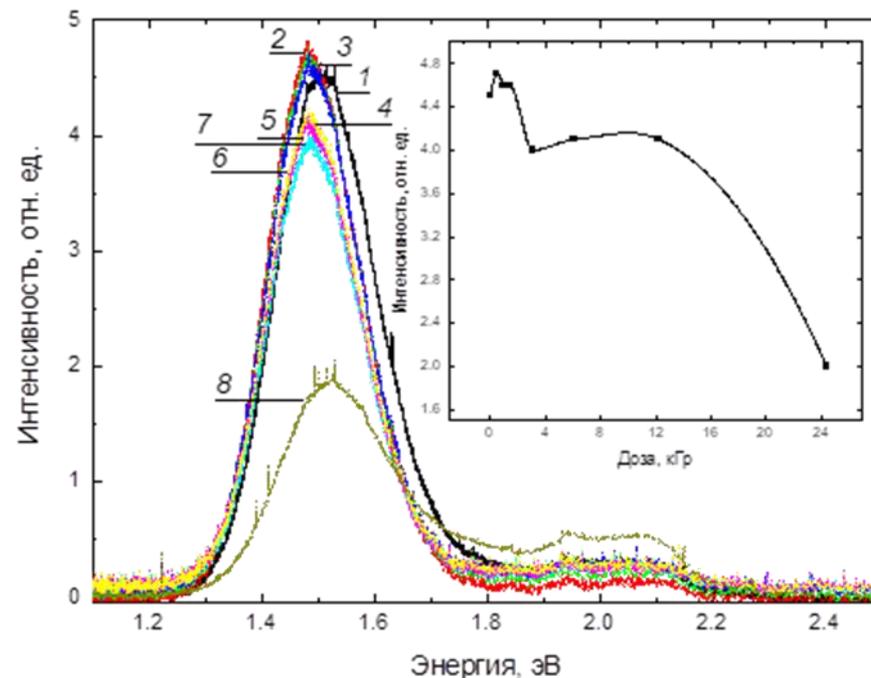
Спектры фотолуминесценции КТ PbS(1) и (MEH-PPV (2) .



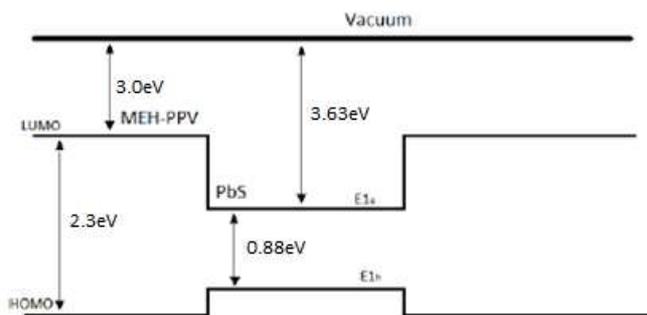
ФЛ нанокompозитов на основе МЕН-PPV с квантовыми точками PbS и влияние на них гамма излучения



Спектры фотолуминесценции 1 – нанокompозита МЕН-PPV-КТ PbS, 2 – полимера МЕН-PPV



Спектры ФЛ необлученного (1) и облученных гамма-квантами (2 – 8) образцов нанокompозита МЕН-PPV/КТ PbS для доз, кГр: 0,51 (2), 1,00 (3), 1,5 (4), 3,1 (5), 6,1 (6), 12,2 (7), 24,4 (8). Врезка - зависимость максимальной интенсивности ФЛ образца от дозы гамма-облучения.



- Тушение ФЛ полимера (практически полное)
- Интенсивность ФЛ в области излучения КТ в интервале доз гамма-облучения от 0 до 12,2-18 кГр меняется незначительно
- Пороговый характер деградации ФЛ PbS

ВЫВОДЫ

1. Колебательный спектр молекулы C_{60} остается стабильным при больших дозах облучения, свидетельствуя о высокой стабильности жесткого каркаса молекулы. Для композитов, в которых молекула C_{60} диспергирована в другой матрице и не может полимеризоваться, следует ожидать ее высокую стойкость к жесткому электромагнитному излучению.
2. Облучение не изменяет спектральное положение линий излучения порфиринов, что свидетельствует о стабильности электронной структуры; интенсивность излучения для электронного перехода (0,0) стабильна, а для вибронного (0,1) возрастает при дозах до 20 кГр.
3. Облучение тонких пленок чистого полимера МЕН-PPV дозами до 12 кГр приводит к падению интенсивности ФЛ примерно в 2 раза без изменения спектрального положения линий излучения, что говорит о незначительном изменении эффективной длины сопряжения по сравнению с длиной миграции фотовозбужденного экситона. Внесенные радиационные дефекты (центры безызлучательной рекомбинации) частично релаксируют в течение 3-4 недель после облучения.
4. Нанокompозиты МЕН-PPV/ C_{60} с 30% содержанием фуллерена показывают большую стабильность свойств под действием гамма-излучения, чем чистый полимер, что связано с быстрым фотоиндуцированным переносом заряда на фуллерен и стабильностью C_{60} под действием гамма-облучения.
5. В композитах из двух светоизлучающих компонент, где в соответствие с энергетической диаграммой происходит фотоиндуцированный перенос заряда (для МЕН-PPV/КТ PbS) или энергии по механизму Ферстера (МЕН-PPV/ H_2 TRP), вид спектральной зависимости ФЛ определяется акцепторной компонентой с соответствующей ей дозовой зависимостью от гамма-облучения.
6. Для композитных пленок МЕН-PPV/ H_2 TRP отмечена высокая стабильность спектральных характеристик ФЛ вплоть до доз порядка 10^4 Гр. Незначительное уменьшение интенсивности ФЛ электронного (0,0) перехода порфирина сопровождается увеличением интенсивности излучения электронно-колебательного (0,1) перехода. Фотолюминесцентные характеристики восстанавливаются за время менее 1 недели после облучения. Предложены модели свободных радикалов и ион-радикалов как центров рекомбинации.
7. Для нанокompозитов МЕН-PPV/КТ PbS отмечена высокая стабильность люминесцентных свойств до доз в интервале порядка 10^4 Гр и пост-радиационный эффект незначительного уменьшения интенсивности ФЛ в течение 4 недель.

Апробация

Основные результаты исследований докладывались на всероссийских и международных научных конференциях:

Всероссийской мол. конф. по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Россия, Санкт-Петербург (2014, 2015, 2016, 2017);

Saint–Petersburg OPEN, Россия, Санкт-Петербург (2014, 2017);

Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика Наноматериалов и Наноструктур», Россия, Рязань (2015);

International Conf. on Nanostructured Materials, Россия, Москва (2014);

Междунар. Конф. «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Россия, Санкт-Петербург (2014, 2016, 2018);

Неделя науки СПбПУ: научно-практ. конф. с межд. участием (2015,2016);

Open Science, Россия, Гатчина (2016);

Всерос. конф. по наноматериалам, Россия, Москва (2016);”

Advanced Carbon NanoStructures”, Россия, Санкт-Петербург (2013, 2015, 2017).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 16 печатных работ, 12 из которых изданы в научных журналах из списка ВАК, 16 входят в базы данных WoS или Scopus.

Публикации

- [A1] Захарова, И.Б. Особенности электронной структуры агрегированных форм ZnTPP по данным оптических измерений и квантово-химических расчетов / И.Б. Захарова, М.А. Елистратова, Н.М. Романов, О.Е. Квятковский // Физика и техника полупроводников – 2018. – Том 52. – Выпуск 13. – С. 1601-1607.
- [A2] Романов, Н.М. Диагностика тонких плёнок фуллерен/теллурид кадмия и их стабильности под действием рентгеновского излучения методом ИК спектроскопии / Н.М. Романов, И.Б. Захарова, Е. Lähderanta // Оптический журнал – 2017. – Том 84. – Выпуск 12. – С. 50-55.
- [A3] Елистратова, М.А. Спектральная зависимость фотолюминесценции тонких пленок молекулярных комплексов ZnTPP–C60 и CuTPP–C60 / М.А. Елистратова, И.Б. Захарова, Н.М. Романов, В.Ю. Паневин, О.Е. Квятковский // Физика и техника полупроводников – 2016. – Том 50. – Выпуск 9. – С. 1213-1219.
- [A4] Романов, Н.М. Состав и структура тонких пленок на основе металлопорфириновых комплексов / Н.М. Романов, И.Б. Захарова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета – 2016. – Выпуск 2 (242). – С. 9-18.
- [A5] Захарова, И.Б. Особенности электронной структуры агрегированных форм ZnTPP по данным оптических измерений и квантово-химических расчетов / И.Б. Захарова, М.А. Елистратова, Н.М. Романов, О.Е. Квятковский // Физика и техника полупроводников – 2018. – Том 52. – Выпуск 13. – С. 1601-1607.
- [A6] Романов Н.М. Деградация фотолюминесценции тонких пленок ZnTPP и ZnTPP–C60 под действием гамма-облучения / Н.М. Романов, М.А. Елистратова, Е. Lahderanta, И.Б. Захарова // Физика и техника полупроводников – 2018. – Том 52. – Выпуск 8. – С. 931-938.
- [A7] Романов Н.М. Структура тонких пленок ZnTPP, ZnTPP–C60 и влияние рентгеновского излучения на их фотолюминесценцию / Н.М. Романов, И.Б. Захарова, М.А. Елистратова, Е. Lahderanta // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2018. – Том 11. – Выпуск 2. – С. 26-40.
- [A8] Романов, Н.М. Воздействие гамма-излучения на люминесценцию нанокompозитов проводящего полимера МЕН-PPV с квантовыми точками сульфида свинца / Н.М. Романов, С.Ф. Мусихин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2018. – Том 11. – Выпуск 2. – С. 41-48.
- [A9] Романов, Н.М. Действие гамма-излучения на люминесценцию и фотопроводимость нанокompозита МЕН-PPV – сульфид свинца / Н.М. Романов, М.М. Малова, Э. Лахдеранта, С.Ф. Мусихин. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2018. – Том 11 – Выпуск 4. – С. 34-46.
- [A10] Романов, Н.М. Влияние гамма-излучения на тонкие нанокompозитные пленки МЕН-PPV/C60 / Романов Н.М., Захарова И.Б., Малова М.М., Елистратова М.А., Мусихин С.Ф. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2018. – Том 11. – Выпуск 4. – С. 24-34.
- [A11] Романов, Н.М. Спектральная зависимость фотолюминесценции нанокompозита МЕН-PPV/H2TPP и её изменения под действием гамма-излучения / Н. М. Романов, С. Ф. Мусихин, И. Б. Захарова, Э. Лахдеранта. – 2019 – Оптический журнал. - Том 86. – Выпуск 2. – С. 18 – 22.
- [A12] Матюшкин, Л.Б. Влияние гамма-облучения на фотолюминесценцию нанокристаллов CsPbBr3 и CdSe/ZnS / Л.Б. Матюшкин, Н.М. Романов // Оптический журнал – 2018 – Том 85 –Выпуск 2 – С. 72-74.

По теме в других журналах

- [B1] Elistratova, M. Optical spectroscopy of organic materials based on C60<A2B6> /M. Elistratova, N. Romanov, I. Zakharova and O. Kvyatkovskii // Journal of Physics: Conference Series – 2014. – Vol. 541. Issue 1. – Pp. 012021(1-6)
- [B2] Elistratova, M.A. Obtaining and investigation of C60 <A2B6> semiconductor compounds with a view to create effective solar cells / M.A. Elistratova, I.B. Zakharova and N.M. Romanov // J. Phys.: Conf. Ser. – 2015. – Vol. 661. Issue 1. – Pp. 012030(1-4).
- [B3] Elistratova, M.A. X-ray radiation influence on photoluminescence spectra of composite thin films based on C60<CdTe> / M.A. Elistratova, I.B. Zakharova and N.M. Romanov // Conference Series – 2015. – Vol. 586. Issue 1. – Pp. 012002(1-4)
- [B4] Elistratova, M.A. Electronic structure, optical and magnetic properties of tetraphenylporphyrins-fullerene molecular complexes / M. A. Elistratova, I. B. Zakharova, N. M. Romanov, O. E. Kvyatkovskii, I. Zakharchuk, E. Lahderanta and T. L. Makarova // Journal of Physics: Conference Series – 2016. – Vol. 690. Issue 1. – Pp. 012012 (1-5)

По смежным тематикам

- 1 О.В. Александров, Е.С. Ковтун, Н.М. Романов Н.М, А.Е. Семенов. Исследования коррозионной устойчивости алюминиевой металлизации ИМС // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 1 – 2014 – 232 – С. 63.
- 2 В.Ю. Осипов, Н.М. Романов. Инфракрасное поглощение алмазных наночастиц с поверхностью, модифицированной комплексами нитрат-ионов // Оптический журнал – Т. 84 – 5 – С. 3.
- 3 Н. М. Романов, В. Ю. Осипов, К. Takai, H. Touhara, Y. Hattori. Исследование терморезистентности функционализированной поверхности детонационного наноалмаза методом инфракрасной спектроскопии // Оптический журнал – 2017 – Т. 84 – 10 – С. 7.
- 4 М.А. Елистратова, Н.М. Романов, Д.Н. Горячев, И.Б. Захарова, О.М. Сресели. Влияние гамма-облучения на фотолюминесценцию пористого кремния // Физика и техника полупроводников – 2017. Т. 51 – 4 – С. 507.
- 5 Н.М. Романов, С.А. Мокрушина. Влияние гамма-облучения на МДП-структуры с тонким окислом Al₂O₃ // Перспективные материалы – 2018 – 2 – С. 17.
- 6 В.Ю. Осипов, Н.М. Романов, К.В. Богданов, F. Treussart, C. Jentgens, A. Rampersaud. Исследование NV- центров и интерфейсов кристаллитов в синтетических моно-и поликристаллических наноалмазах методами оптической флуоресцентной и микроволновой спектроскопии // Оптический журнал – 2018 – Т. 85 – 2 – С. 3.
- 7 В.Ю. Осипов, Н.М. Романов, Ф.М. Шахов, К. Takai. Идентификация квази-свободных и связанных нитрат-ионов на поверхности алмазных наночастиц методами инфракрасной и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Оптический журнал – 2018 – Т. 85 – 3 – С. 3.
- 8 V.Yu. Osipov, S. Abbasi Zargaleh, F. Treussart, K. Takai, N.M. Romanov, F.M. Shakhov, A. Baldycheva. Nitrogen impurities and fluorescent NV- centers in detonation nanodiamonds: identification and distinct features // ОПТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ — 2018 – Т. 86 – 1 – С. 3.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Действие гамма-и рентгеновского облучения на пленки C_{60} - и нанокомпозитов $C_{60}/CdTe$ приводит к появлению интенсивной полосы ФЛ в области 600-650 нм (2,1-1.9 эВ), что связано с появлением разрешенных синглетных излучательных переходов в результате фотополимеризации и фотоокисления C_{60} .
2. Гамма-облучение вплоть до доз 10^5 - 10^7 Гр не приводит к изменению положения полос в спектральной зависимости фотолюминесценции металлопорфирина ZnTPP и нанокомпозита ZnTPP/ C_{60} . Падение интенсивности ФЛ в связи с появлениями центров безызлучательной рекомбинации носит пороговый характер. Пороговая доза для ZnTPP составляет 20 кГр, а для нанокомпозита ZnTPP/ C_{60} увеличивается примерно в 2,5 раза, что связано с фотоиндуцированным переносом заряда на C_{60} .
3. Процессы тушения ФЛ в композитах МЕН-PPV/ C_{60} сильнее проявляются для пленок на Si подложках по сравнению с ориентирующей подложкой слюды из-за молекулярного диспергирования компонент. Нанокомпозиты МЕН-PPV/ C_{60} проявляют повышенную стойкость к гамма-излучению, что связано с быстрым разделением фотовозбужденного экситона.
4. При образовании нанокомпозита МЕН-PPV/ H_2TPP спектральная зависимость ФЛ композита определяется порфириновой компонентой, а эффективное тушение ФЛ полимера связано с переносом энергии по механизму Ферстера в композите. Стабильность фотолюминесцентных характеристик нанокомпозита на основе МЕН-PPV/ H_2TPP после гаммы облучения выше, чем полимерной матрицы, уменьшение интенсивности ФЛ восстанавливается в течении недели.
5. Спектральная зависимость и интенсивность ФЛ нанокомпозита МЕН-PPV/КТ PbS мало изменяется под действием гамма-облучения до доз порядка 10^4 Гр.

Спасибо за внимание !