

УДК 620.3, 53.086

## ИЗМЕНЕНИЕ ДИФфуЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бородин Л.Н. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, старший научный  
сотрудник Вениаминов А. В.  
(Университет ИТМО)

**Введение.** Люминесцирующие наночастицы, такие как квантовые точки, углеродные точки и другие, нашли широкое применение в различных приложениях фотоники. Исследование их химических и фотофизических свойств в настоящее время является важной научно-исследовательской задачей. Для исследования движения и определения размера наночастиц используют ряд оптических методов, такие как прямое наблюдение и анализ траектории движения частиц, динамическое рассеяние света (фотонная корреляционная спектроскопия), голографическая релаксометрия и люминесцентные методы – флуоресцентная корреляционная микроскопия и восстановление флуоресценции после фотообесцвечивания. В настоящей работе для исследования диффузии люминесцирующих наночастиц и определения их гидродинамических размеров развивается модифицированный метод восстановления люминесценции после фотообесцвечивания Stripe FRAP, который позволит не только определять коэффициент диффузии, но и исследовать его фотоиндуцированное изменение под действием лазерного излучения.

**Основная часть.** Используемая техника изучения диффузии наночастиц основана на известном методе восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания (Fluorescence Recovery After Photobleaching, FRAP) [1]. В отличие от базовой реализации метода, мы изучаем изменение не интегральной интенсивности люминесценции в результате экспонирования, а пространственное распределение интенсивности люминесценции с течением времени.

Суть метода Stripe FRAP заключается в создании фотоиндуцированной пространственной неоднородности люминесценции в виде полосы в исследуемом пространстве и последующем анализе постэкспозиционных изменений картины люминесценции. Распределение интенсивности вдоль координаты, перпендикулярной полосе (профиль) аппроксимируется с помощью функции Гаусса, согласно решению одномерного уравнения диффузии. Из наклона зависимости квадрата ширины профиля от времени может быть определён коэффициент диффузии наночастиц, что позволяет определять размеры частиц и судить об их изменении, например, в результате разрушения или образования агрегатов.

В качестве объектов исследования в работе были использованы полупроводниковые квантовые точки CdSe/ZnS (КТ) со средним диаметром около 6 нм и углеродные точки (УТ) в карбоксиэтилакрилате. В отличие от результатов прежних экспериментов, наблюдаемые профили люминесценции описываются не функцией Гаусса, а разностью двух таких функций с общим центром. Такая ситуация, аналогичная эффекту дополнительных решёток в голографической релаксометрии [2], соответствует релаксации распределения двух типов частиц (в исходном и фототрансформированном состояниях) с различными коэффициентами диффузии, которые теперь могут быть определены в одном эксперименте.

Один из коэффициентов диффузии, полученный по результатам измерений с КТ, составил  $2 \pm 0,4 \text{ мкм}^2 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует гидродинамическим размерам  $4 \pm 2 \text{ нм}$ .

При исследовании раствора УТ в воде и карбоксиэтилакрилате обнаружено, что кроме наночастиц в растворе присутствуют люминесцирующие частицы молекулярных размеров, очевидно, подобные обсуждаемым в [3].

Проведённое моделирование выявило основные формы профилей люминесценции при увеличении и уменьшении квантового выхода люминесценции и коэффициента диффузии и

показало, что с помощью техники Stripe FRAP можно исследовать изменение коэффициента диффузии наночастиц даже без изменения их квантового выхода флуоресценции.

**Выводы.** На примерах экспериментов с коллоидными растворами полупроводниковых квантовых и углеродных точек и результатов моделирования показано, что корректное описание восстановления люминесценции после фотообесцвечивания (Stripe FRAP) требует учёта изменения под действием света не только квантового выхода люминесценции, но и коэффициента диффузии наночастиц. Более того, для реализации техники Stripe FRAP само по себе "обесцвечивание", на котором исходно был основан метод, не необходимо. Новый подход к люминесцентному методу исследования движения наночастиц позволит расширить класс доступных объектов для изучения и отслеживать как исходную, так и фототрансформированную формы частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, госзадание № 2019-1080, и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

#### **Список использованных источников:**

1. Lorén N., Hagman J., Jonasson J.K., Deschout H., Bernin D., Cella-Zanacchi F., Diaspro A., McNally J.G., Ameloot M., Smisdom N, Nydén M., Hermansson A.-M., Rudemo M., Braeckmans K. Fluorescence recovery after photobleaching in material and life sciences: putting theory into practice // *Quarterly Reviews of Biophysics*. – 2015. – Т.3. – С. 323–387.
2. Вениаминов А.В., Bartsch E. Форма релаксационной кривой в диффузионных измерениях с помощью фотоиндуцированных решеток // *Оптика и спектроскопия*. – 2006. – Т. 101(2). – С. 305-313.
3. Righetto M., Carraro F., Privitera A., Marafon G., Moretto A., Ferrante C. The Elusive Nature of Carbon Nanodot Fluorescence: An Unconventional Perspective // *J. Phys. Chem. C*. – 2020. – Т. 124. – С. 22314–22320.