

Субдифракционное определение координат одиночной квантовой точки

М.Ю. Еремчев^{1,2,4}, И.Ю. Еремчев², А.В. Наумов^{2,3}

¹Сколковский институт науки и технологий,
143026, Москва, ул. Нобеля, д. 3

²Институт спектроскопии РАН,
142190, Москва, Троицк, ул. Физическая, д. 5

³Московский педагогический государственный университет
119991, Москва, улица Малая Пироговская, 1/1

⁴Московский физико-технический институт (государственный университет),
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

Одним из потенциально востребованных направлений использования люминесцирующих квантовых точек является использование их в качестве меток (маркеров) во флуоресцентной микроскопии сверхвысокого пространственного разрешения и смежных областях. Поскольку размеры КТ существенно меньше длины волны регистрируемого излучения, координаты КТ могут быть восстановлены с точностью, существенно превышающей дифракционный предел. Это обстоятельство может быть также использовано в технике комбинированной люминесцентной и атомно-силовой микроскопии одиночных полупроводниковых квантовых точек. Во всех указанных случаях существенным моментом является разработка методик восстановления координат и исследование точности определения этих координат в зависимости от различных условий. Одним из определяющих факторов в этом случае является количество полезных фотонов, зарегистрированных при визуализации одиночной КТ.

В данной работе визуализация одиночных КТ проводилась путем регистрации люминесценции КТ, возбуждаемых непрерывным лазером, с помощью широкопольного эпилюминесцентного микроскопа и охлаждаемой ПЗС камеры с внутренним электронным размножением [1]. Для извлечения информации об интенсивностях люминесценции КТ и их латеральных координатах проводилась обработка массива полученных данных (кадров ПЗС камеры) с помощью аппроксимации изображений КТ (пятен Эйри) симметричными двумерными функциями Гаусса. Найденные значения центров Гауссианов соответствуют положениям КТ, а интеграл под функцией Гаусса – интенсивности люминесценции.

В измерениях использовались коллоидные нанокристаллы, представляющие из себя гетероструктуру CdSe/CdS/ZnS с нанесенными на поверхность органическими лигандами. Образец приготавливался на стеклянной подложке методом центрифугирования.

Последовательное детектирование большого количества люминесцентных изображений КТ позволяет определить координаты КТ с высокой статистической достоверностью, определить статистический разброс этих значений и, таким образом, получить среднее значение и ошибку (дисперсию) определения координаты для каждого времени накопления.

Как известно, люминесцентный трек КТ представляет собой картину меняющейся во времени интенсивности люминесценции – чередование светлых, темных и серых состояний (т.н. мерцающая люминесценция). В моменты времени, когда КТ находится в темном состоянии, ее координаты по понятным причинам не могут быть восстановлены. Кроме того, из статистических соображений следует, что чем выше интенсивность люминесценции, тем больше количество детектируемых фотонов в данном измерении, тем выше должна быть и точность, с которой можно определить положение КТ. Поэтому в данной работе обработка результатов проводилась для «изоинтенсивных» уровней, соответствующих различным значениям интенсивности люминесценции при одинаковой экспозиции. Ширина таких уровней (диапазон интенсивностей) выбиралась достаточно малой, но при этом каждая выборка содержала достаточное количество точек (порядка 350 точек). Для каждого уровня определялись средние координаты КТ и соответствующие значения дисперсии координат, а по полученным данным строился график зависимости величины ошибки определения координаты КТ от интенсивности. Полученная зависимость хорошо согласуется с полуэмпирической формулой $\sigma \propto \sqrt{\frac{1}{N}}$ [2], где N – количество собранных фотонов.

Важный результат данного исследования заключается в том, что в пределе больших значений полного числа зарегистрированных полезных фотонов, точность определения координаты одиночной КТ стремится к предельному значению 4,4 нм, которое определяется размером (диаметром) ядра КТ, ответственного за люминесценцию КТ. Из этого следует, во-первых, что механическая стабильность использованной в работе установки достаточна для достижения предельных значений точности координаты КТ, а, во-вторых, наличие оболочки из широкозонного полупроводника ZnS и оболочки из органических лигандов не меняет существенно функцию рассеяния точки и не препятствует достижению предельной точности восстановления координат точечных излучателей.

Литература

1. A.V. Naumov, I.Yu. Eremchev, A.A.Gorshelev, Eur. Phys. J. D., 68, 348 (2014).
2. K.I. Mortensen, L.S. Churchman, J.A. Spudich, H. Flyvbjerg, Nat. Methods. 7, 377 (2010).