

АНАЛИЗ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ В НЕЛИНЕЙНОЙ МИКРОСКОПИИ

П. А. Леоник

otaimairon0@gmail.com;

Научный руководитель — А. Б. Михальчев, кандидат физико-математических наук

В работе исследован понятийный аппарат современной микроскопии, рассмотрены основные подходы и методики для реализации сверхразрешения и преодоления классического предела, возможность использования нелинейных свойств ап-конверсионной люминесценции в нанокристаллах. Создан алгоритм для реконструкции с последующим эмпирическим анализом, изучен способ построения матрицы информации Фишера и сделан вывод об эффективности применения данной методики для достижения сверхразрешения. Были смоделированы системы с несколькими точечными источниками и теоретически продемонстрирована эффективность использования ап-конверсионных наночастиц для создания нелинейного отклика.

Ключевые слова: нелинейная микроскопия; сверхразрешение; анализ разрешения; ап-конверсионная люминесценция.

ВВЕДЕНИЕ

Дифракция света ограничивает пространственное разрешение оптических микроскопов и препятствует их применению для анализа элементов, линейные размеры которых меньше длины волны видимого света. В работе предложены сверхразрешающие методики, цель которых – обойти классический предел разрешения в видимом свете. Среди этих методик сверхразрешающая микроскопия на основе флуктуаций [1] и квантовая микроскопия.

Целью данной работы является проведение анализа разрешения в оптической системе, в которой используются ап-конверсионные наночастицы.

РАЗРЕШЕНИЕ В ОПТИКЕ

Пространственное разрешение часто формулируется с помощью критерия Рэля так: две точки считаются разрешенными, когда глубина «провала» между пиками функций рассеяния точки (ФРТ) каждой из них составляет более 80% их высоты.

Функция Гаусса проста и легко реализуема как модель ФРТ для аппроксимации (рис. 1):

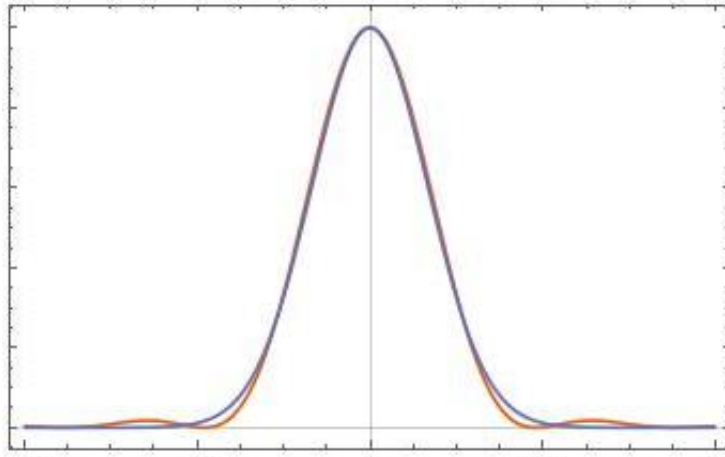


Рис.1. Схематическое изображение аппроксимации ФРТ гауссианом

$$\exp\left(-\frac{x^2}{2\omega_2^2}\right) \approx \left(\frac{2J_1(x/\omega_1)}{(x/\omega_1)}\right)^2,$$

где связь между параметрами ω_1 и ω_2 имеет линейный вид.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРЕЛЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ N-ГО ПОРЯДКА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ШИРИНЫ ФРТ

Известно, что квантовая перепутанность является инструментом для повышения разрешения. В работе [2] было показано, что с использованием n перепутанных фотонов и измерения корреляций n -го порядка, можно уменьшить ширину ФРТ в \sqrt{n} раз и обойти дифракционный предел. Интерес представляют методы, основанные на работе с корреляционной функцией $G(n)$, общая идея применения которых сводится к тому, что в результате измерения отклика порядка n можно ожидать улучшение разрешения в \sqrt{n} за счет эффективного возведения в степень n . Таким свойством обладает модель, исследованная в данной работе.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АП-КОНВЕРСИОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ОТКЛИКА

Редкоземельные ионы имеют подходящую структуру электронных уровней для осуществления многофотонных преобразований. В статье 2013 года [3] было предложено исследовать возможность использования нелинейных свойств ап-конверсионной люминесценции в нанокристаллах, легированных редкоземельными элементами для повышения разрешения. Преобразование происходит за счет сложения

двух и более длинноволновых фотонов с низкой энергией в один, обладающий более высокой энергией.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

В основу модели легла схема оптической системы, представленная на рис.2.

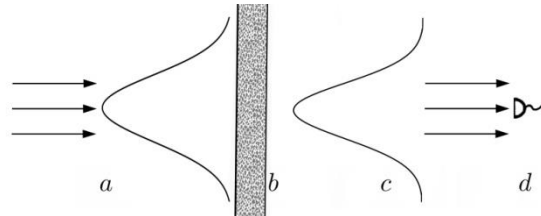


Рис. 2. Схема модельной системы:

a -- первоначальная интенсивность сигнала; *b* - бесконечно тонкий слой содержащий излучатели с нелинейным откликом на возбуждение; *c* - интенсивность сигнала в результате прохождения через слой; *d* - система детектирования

АНАЛИЗ РАЗРЕШЕНИЯ

Наглядно показано на рис. 3, что с повышением степени нелинейности в такой системе предел разрешения по Рэлею падает и опускается значительно ниже классического предела.

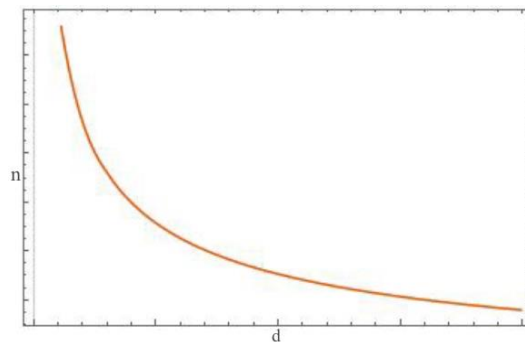


Рис. 3. Зависимость предела разрешения по Рэлею *d* от степени *n*

РЕКОНСТРУКЦИЯ

В рамках работы был разработан программный пакет для реконструкции положений источников излучения: последовательно перебираются квадраты разностей между предполагаемыми (с определенным шагом) положениями источников и картиной, которую необходимо реконструировать, пока не будет найден минимум этой разности.

Ошибку реконструкции определим следующим образом:

$$\Delta^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2.$$

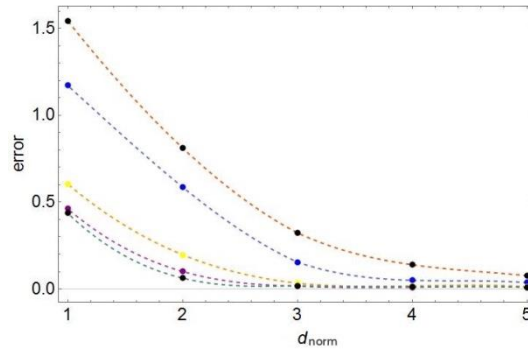


Рис. 4. Увеличение квадрата ошибки реконструкции при уменьшении расстояния между точечными источниками. Показаны случаи со степенями нелинейности от 1 (худший результат) до 5 (лучший)

Эмпирический предел разрешения определялся как точка излома графика при переходе к области, в которой преобладает шум (рис. 4).

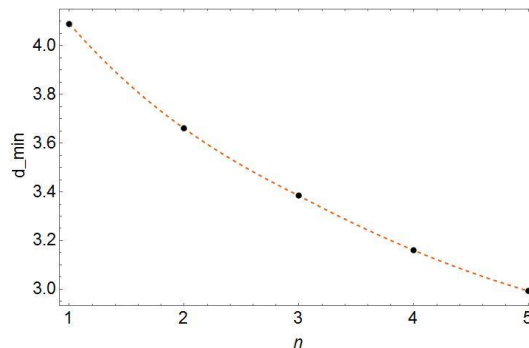


Рис. 5. Зависимость предела разрешения от степени нелинейности

Результаты оценки ошибки путем реконструкции с хорошей точностью совпадают с предсказанием на основе информации Фишера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были смоделированы системы с несколькими точечными источниками и теоретически продемонстрирована эффективность использования ап-конверсионных наночастиц для создания нелинейного отклика.

Библиографические ссылки

1. S. Vlasenko, A. B. Mikhalychev, I. L. Karuseichyk, D. A. Lyakhov, D. L. Michels, and D. Mogilevtsev. "Optimal correlation order in superresolution optical fluctuation microscopy" // Physical Review A. 2020.
2. Shih, Y. An introduction to quantum optics: photon and biphoton physics // Y. Shih. — CRC press, 2018.
3. Caillat, L., Hajj, B., Shynkar, V., Michely, L., Chauvat, D., Zyss, J., & Pellé, F. "Multiphoton upconversion in rare earth doped nanocrystals for sub-diffractive microscopy." // Applied Physics Letters, 2013.