

Ближнепольная спектроскопия излучающих нанообъектов

А. А. Торопов

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

В современной науке и технике встречаются ситуации, когда необходимо исследовать оптические взаимодействия и получать изображения на шкале размеров порядка 100 нм и меньше с использованием света оптического диапазона. Такие задачи возникают, когда нельзя использовать методы электронной или атомно-силовой микроскопии, например, при исследовании живых биологических объектов: вирусов, бактерий, молекул ДНК и т.д. Другая важная область, о которой в основном пойдет речь в лекции — исследование свойств одиночных квантовых излучателей, в качестве которых можно, например, рассматривать одиночные атомы и молекулы, полупроводниковые квантовые точки, а также одиночные экситоны, локализованные в полупроводниковых гетероструктурах. Ожидаемым практическим выходом этих исследований является разработка источников света с неклассической статистикой: однофотонных источников и источников «запутанных» фотонов, необходимых для работы схем квантовой криптографии. Решать такие задачи с помощью обычного оптического микроскопа нельзя, т.к. разрешение «классического» оптического прибора определяется дифракционным пределом, составляющим около половины длины волны света, а минимальные длины волн, с которыми оптический микроскоп еще может как-то работать, превышают 200 нм. Поэтому необходимо использовать специфические оптические эффекты, позволяющие ограничивать свет на шкале размеров существенно меньших длины волны света в «ближнем» оптическом поле источника излучения. Науку, занимающуюся такими эффектами, называют ближнепольной оптикой, а в последние годы — нано-оптикой или нано-фотоникой [1].

Наиболее известным устройством, использующим ближнепольные эффекты, является «апертурный» ближнепольный сканирующий оптический микроскоп, допускающий пространственное разрешение < 100 нм, что существенно меньше дифракционного предела, ограничивающего возможности обычной «дальнепольной» микроскопии. В таком приборе электромагнитное излучение пропускается через отверстие (апертуру) с поддифракционными размерами. Этот свет содержит большую долю спадающих «запредельных» электромагнитных мод, которые экспоненциально быстро затухают в пространстве, формируя оптическое «ближнее поле», размер которого, как правило, много меньше длины волны света. Образец, находящийся на расстоянии нескольких

нанометров от источника излучения, ощущает ближнепольное распределение света, что позволяет регистрировать свойства, определяемые оптическим откликом образца, с разрешением, существенно превышающим классический дифракционный предел. Так, например, инфра-красный свет с длиной волны 800 нм может быть сконцентрирован в ближнем поле с характерным размером 50–100 нм. В качестве апертуры обычно используется отверстие, сформированное на конце оптического волокна, покрытого металлом. Возможны различные вариации техники апертурной ближнепольной оптической микроскопии. Можно, например, освещать образец посредством ближнепольного источника света, а оптический отклик детектировать в дальнем поле. Или, наоборот, освещать образец обычным «дальнепольным» источником света, а детектирование производить в ближнем поле посредством сбора света через малую апертуру. Можно, наконец, и возбуждение и детектирование производить посредством ближнего оптического поля. Изображение обычно собирается от точки к точке посредством сканирования образца по отношению к источнику ближнепольного распределения.

При исследовании и использовании свойств квантовых излучателей, как правило, возникают две взаимосвязанные задачи. Во-первых, надо выделить излучение одного источника из ансамбля близко расположенных излучателей. Затем, необходимо собрать этот свет с максимальной эффективностью. Для решения первой задачи вполне подходит техника апертурной ближнепольной оптической микроскопии, позволяющей, например, регистрировать спектрально узкие линии излучения одиночных молекул [2] и полупроводниковых квантовых точек [3]. Существенным недостатком апертурных схем ближнепольного оптического микроскопа является крайне малая эффективность: пропускание света маленькими апертурами исключительно слабо. Этот же фактор, как правило, определяет и предел пространственного разрешения. Более эффективными оказываются «безапертурные» схемы. В принципе, источником ближнепольного излучения может являться любая достаточно маленькая освещенная структура. Важно использовать структуры (зонды), которые позволяют достичь максимальной концентрации и усиления электромагнитного поля. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются зонды, представляющие собой маленькие металлические частицы, электронная система которых поддерживает выделенные резонансные частоты коллективных осцилляций — поверхностных плазмонов. Освещение (дальнепольное) светом с резонансной частотой приводит к эффективной концентрации электромагнитной энергии в ближнем оптическом поле частицы, что позволяет использовать такие зонды в схеме «безапертурного» ближнепольного оптического микроскопа.

«Плазмонные» зонды могут играть роль концентраторов энергии в малом объеме ближнего оптического поля, позволяя селективно возбуждать излучатели, находящиеся в этой области. Но этим их роль не ограничивается, поскольку другой стороной эффекта концентрации является увеличение в пределах ближнего поля плотности фотонных состояний, т.е. увеличение способности среды принимать фотоны. Попавший в такую среду излучатель демонстрирует эффект Пурселла [4] — рост скорости спонтанного излучения за счет увеличения плотности конечных состояний (фотонов) в процессе излучения. Таким образом, правильно рассчитанный и изготовленный «безапертурный» зонд такого типа позволяет достичь существенно большей эффективности как возбуждения, так и регистрации излучения одиночных нанобъектов, чем волоконные «апертурные» зонды. В последние годы подобная схема успешно использовалась для исследования излучательных свойств отдельных молекул [5], квантовых точек, изготовленных методами коллоидной химии [6], а также локализованных экситонов в полупроводниковых гетероструктурах [7,8].

Существенной проблемой при использовании безапертурной ближнепольной микроскопии с металлическими «плазмонными» зондами является наличие в металлах существенного поглощения на частотах вблизи резонансов поверхностного плазмона. Приближение излучателя к такому зонду приводит не только к росту вероятности излучательной рекомбинации за счет действия эффекта Пурселла, но и к росту безизлучательных потерь за счет диссипации энергии в металле. Достижение положительного баланса между усилением и гашением требует учета многих факторов и аккуратного теоретического описания. В принципе, ближнепольное распределение света вблизи металлической частицы полностью описывается классической электродинамикой (уравнениями Максвелла). На практике, точные аналитические решения получены лишь для нескольких наиболее простых геометрий, и даже численный компьютерный анализ часто представляет серьезное затруднение. Одной из модельных конструкций, допускающих аналитическое описание, является система взаимодействующих друг с другом излучающего дипольного осциллятора и металлического шара. Точные решения этой задачи были получены двумя выдающимися учеными: Бальтазаром Ван дер Полем [9] и Владимиром Александровичем Фоком [10]. Наличие аналитического описания существенно упрощает постановку эксперимента и анализ результатов исследований с применением зондов, представляющих собой металлический (как правило, золотой) шар, прикрепленный к острию зонда ближнепольного сканирующего микроскопа.

Резюмируя, в лекции я сначала остановлюсь на описании основных прин-

ципов действия ближнепольных оптических приборов разного типа, а затем уделяю основное внимание обсуждению экспериментальных и теоретических исследований свойств одиночных квантовых излучателей методами безапертурной ближнепольной оптической микроскопии с «плазмонными» зондами.

Литература

- [1] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 2006.
- [2] W. E. Moerner, T. Plakhotnik, T. Imgartinger, *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2764 (1994).
- [3] T. Saiki, K. Nishi, and M. Ohtsu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 1638 (1998).
- [4] E. M. Purcell, *Phys. Rev.* **69**, 681 (1946).
- [5] P. Anger, P. Bharadwaj, and L. Novotny, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 113002 (2006).
- [6] J. N. Farahani, D. W. Pohl, H.-J. Eisler, and B. Hecht, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 017402 (2005).
- [7] A. A. Toropov, T. V. Shubina, V. N. Jmerik, *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **103**, 037403 (2009).
Phys. Rev. B **84**, 085323 (2011).
- [8] B. van der Pol and H. Bremmer, *Philos. Mag. Ser. 7* **24**, 141 (1937).
- [9] V. A. Fock, *Electromagnetic Diffraction and Propagation Problems*, Pergamon, New York, 1965.