

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЕЩЕСТВО

Симметричное нанотекстурирование и плазмонное возбуждение наноструктур золота пучками Лагерра–Гаусса фемтосекундного лазерного излучения

Н.И.Буслеев, С.И.Кудряшов, П.А.Данилов, А.П.Порфирьев, И.Н.Сараева,
А.А.Руденко, С.Ф.Уманская, Д.А.Заярный, А.А.Ионин, С.Н.Хонина

Фемтосекундные импульсы Лагерра–Гаусса сильнофокусированного лазерного излучения видимого диапазона с малой энергией использованы для одноимпульсного абляционного наноструктурирования золотой пленки толщиной 50 нм, а такие же импульсы с меньшей энергией – для эффективного плазмонного возбуждения фотолюминесценции монослоя красителя родамин 6Ж в изготовленных наноструктурах. Согласованность между симметриями формы и поляризации низкоэнергетического лазерного пучка, с одной стороны, и золотых наноструктур, созданных тем же пучком при высоких энергиях излучения, с другой, открывает путь к согласованному наноструктурированию и поверхностно-усиленной аналитической спектроскопии с использованием наноструктур.

Ключевые слова: нанотекстурирование тонких пленок, фемтосекундные лазерные импульсы, пучки Лагерра–Гаусса, поляризационные состояния, фотолюминесценция красителя, поверхностные электромагнитные волны.

1. Введение

Пучки лазерного излучения с пространственно-модулированными («структурированными») фазовыми и амплитудными волновыми фронтами, а также с различными поляризациями являются новым универсальным оптическим инструментом для современной нанопотоники [1–12]. Основанные на нем методы преобразования лазерного пучка можно использовать не только для сложного структурирования материи с характерными микронными и наномикронными линейными размерами посредством субтрактивного (абляционное удаление излучением лазера) [5] или трансляционного (поверхностный капиллярный перенос) процессов [6], но и для исследования предварительно структурированного вещества [7–9]. Эти новые возможности обозначили новый этап в исследова-

ниях взаимодействия структурированного света и структурированного вещества [4].

За последние годы было продемонстрировано нано- и микротекстурирование гладких поверхностей с помощью лазерных пучков с пространственно модулированными профилями интенсивности [3–5, 10, 11]; создание хиральных поверхностных нано- и микрообъектов вихревыми лазерными пучками [1–3, 6]; многоимпульсная самоорганизация радиальных или азимутальных поверхностных волнообразных структур в лазерных полях с соответствующими поляризациями [3, 12]; современная поверхностно-усиленная аналитическая спектроскопия (например, усиленное за счет структуры поверхности комбинационное рассеяние) органических соединений с использованием наноструктур и генерация высоких гармоник с помощью структурированных лазерных пучков (например, путем выделения различных типов многополосных резонансов Ми в структурах [7], в том числе экзотического возбуждения моды анаполя [8]). Выявленные возможности высокоэффективного взаимодействия света и вещества были обеспечены согласованием: 1) длины волны излучения лазера и зависящими от размера спектральными положениями плазмонных или диэлектрических резонансов Ми; 2) профиля интенсивности пучка излучения и его поперечных размеров с топологией и масштабом структурированного вещества; 3) симметрии структуры лазерного поля и взаимодействующей материи. Все возможности структурирования света и материи для их высокоэффективной и управляемой связи во время усовершенствованной лазерной обработки и поверхностно-усиленной аналитической спектроскопии с использованием наноструктур только начинают изучаться.

В настоящей статье мы рассматриваем абляционное текстурирование тонкой пленки золота одиночными низкоэнергетическими фемтосекундными импульсами сильнофокусированного структурированного лазерного излучения и последующее эффективное возбуждение фотолюминесценции красителя на полученных нанострукту-

Н.И.Буслеев, И.Н.Сараева, Д.А.Заярный. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; e-mail: busleevni@lebedev.ru

С.И.Кудряшов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

П.А.Данилов, А.А.Руденко, А.А.Ионин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53
А.П.Порфирьев, С.Н.Хонина. Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34; Институт систем обработки изображений РАН – Филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Россия, 443001 Самара, Молодогвардейская ул., 151

С.Ф.Уманская. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31 Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева, Россия, 443086 Самара, Московское ш., 34

Поступила в редакцию 25 октября 2018 г., после доработки – 27 ноября 2018 г.

рах такими же импульсами при более низких субабляционных энергиях.

2. Экспериментальная установка и методы исследования

Одноимпульсная поверхностная абляция золотых пленок толщиной 50 нм, полученных магнетронным распылением мишени из золота (99.99%) в атмосфере аргона (давление 4–5 мбар) на пластинки из стекла ВК-7, осуществлялась второй гармоникой импульсного излучения волоконного лазера Satsuma (Amplitude Systemes) с длиной волны 515 нм, шириной линии на полувысоте 1.7 нм и длительностью импульсов 200 фс. Импульсы излучения (мода TEM_{00} , $M^2 \approx 1.07$) с энергиями $\mathcal{E} < 2$ мкДж и частотами следования 0–2 МГц поступали в оптическую систему (рис.1), расположенную на виброизолированном оптическом столе (Standa, Литва). Преобразование начального гауссова пучка излучения с линейной поляризацией в пучки Лагерра–Гаусса с азимутальной или радиальной поляризацией осуществлялось с помощью коммерческой волновой S-пластинки (Altechna R&D, Литва) (рис. 1 и 2), а линейная поляризация излучения в пучке Лагерра–Гаусса восстанавливалась с помощью пластинок $\lambda/4$, расположенных до S-пластинки и сразу после нее.

Далее лазерные импульсы попадали в верхний тринокулярный вход оптического микроскопа, проходили через 50%-ный делитель пучка к карусели объективов с $NA = 0.25$ ($20\times$) и 0.65 ($40\times$), а затем фокусировались в кольца с характерными радиусами (по уровню интенсивности $1/e$) 4.2–4.5 и 1.1–1.4 мкм (см. (1) и (2)) на золотой пленке, расположенной на моторизованной подложке для 3D нанопозиционирования. В режиме нанотекстурирования ($\mathcal{E} = 0.08$ –2 мкДж) эта подложка перемещалась после

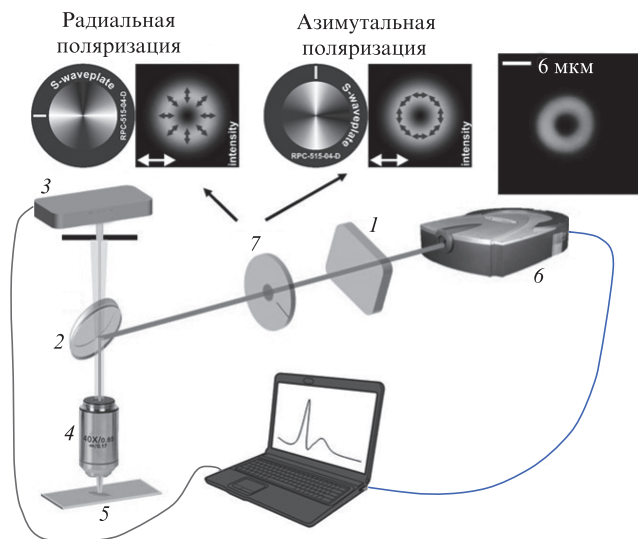


Рис.1. Схема расположения оптических элементов для преобразования с помощью волновой S-пластинки профиля и поляризации пучка лазерного излучения, абляционного нанотекстурирования и возбуждения фотолюминесценции в микроскопе-спектрофотометре: 1 – отражающий аттенюатор; 2 – делитель пучка; 3 – фотоэлектронный умножитель; 4 – объектив микроскопа; 5 – золотая пленка; 6 – лазер; 7 – S-пластина; на вставках сверху приведены соответствующие преобразования исходной линейной поляризации (обозначена белыми стрелками) излучения лазера для разных положений волновой S-пластинки, а также окончательный профиль пучка Лагерра–Гаусса в фокальной плоскости.

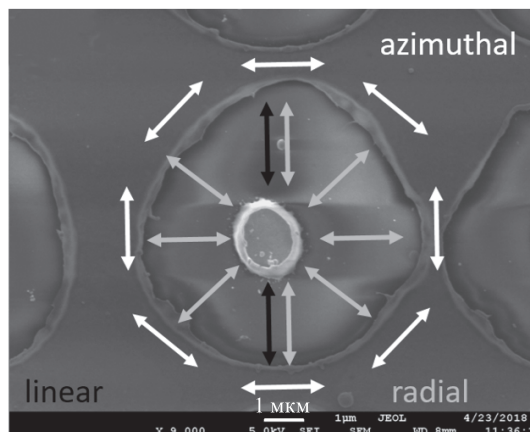


Рис.2. Схема пространственного взаимодействия пучков Лагерра–Гаусса лазерного излучения с линейной (черные стрелки), радиальной (серые стрелки) и азимутальной (белые стрелки) поляризациями со структурированным микроотверстием при возбуждении фотолюминесценции при $NA = 0.25$.

каждого импульса для получения линейных структур из микроотверстий или их квадратных массивов при разных энергиях импульса (рис.3). Поверхности нанотекстурированных пленок исследовались с помощью оптического (Altami-6) и сканирующего электронного (СЭМ; JEOL 7001F) микроскопов.

На рис.3 представлены две серии отдельных структурированных кольцеобразных микроотверстий с золотыми нанодисками, оставшимися в их центрах; микроотверстия созданы одиночными импульсами лазерного излучения в виде пучков Лагерра–Гаусса при $NA = 0.25, 0.65$ и различных энергиях. Так же как и при воздействии гауссовых пучков, рост энергии лазерного импульса приводил к постепенному увеличению внешнего радиуса R_h этих отверстий, в то время как их внутренний радиус (радиус диска) r_h ожидаемо уменьшался с увеличением \mathcal{E} . При этом значение w_0 (радиус окружности, на которой плотность энергии F максимальна) может быть рассчитано из уравнения (1) [3]. Асимптотические значения w_0 , соответствующие приближению к w_0 со стороны внешнего (w_1) и внутреннего (w_2) радиусов, были выражены с учетом только экспоненциального члена для внешнего радиуса R_h и предэкспоненциального члена для внутреннего радиуса r_h (см. (2)):

$$F(r) = \mathcal{E} \frac{r^2}{\pi w_0^4} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right), \tag{1}$$

$$F(R_h) \propto \exp\left(-\frac{R_h^2}{w_1^2}\right), \quad F(r_h) \approx \mathcal{E} \frac{r_h^2}{\pi w_2^4}. \tag{2}$$

В наших экспериментах $w_1 = 4.5 \pm 0.3$ мкм ($w_2 = 4.2 \pm 0.4$ мкм) для порога нанотекстурирования $F \approx 0.7$ Дж/см² при $NA = 0.25$ и $w_1 = 1.4 \pm 0.1$ мкм ($w_2 = 1.1 \pm 0.1$ мкм) для порога $F \approx 2$ Дж/см² при $NA = 0.65$ (рис.3). Известно, что при использовании разных числовых апертур пороги нанотекстурирования различаются из-за различной динамики электронов в золоте на субпикосекундных временных масштабах [13], которая зависит от плотности лазерной энергии. Важно отметить, что в случае более слабой фокусировки ($NA = 0.25$) с $w_{1,2} \geq 4$ мкм при поверхностно-усиленной аналитической спектроскопии отсутствует взаимодействие излучения с центральными нанодисками

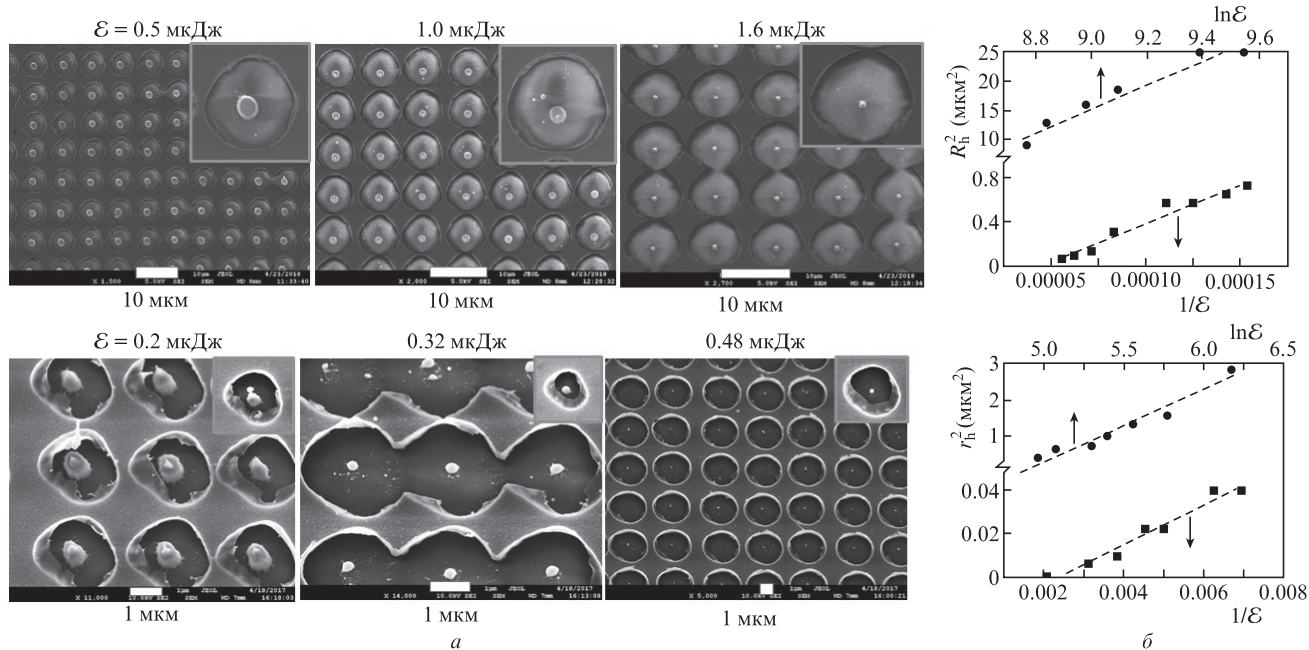


Рис.3. СЭМ-изображения массивов структурированных микроотверстий (на вставках – отдельные микроотверстия), полученных при различных ϵ и $NA = 0.25$ (верхний ряд) и 0.65 (нижний ряд) (а), а также зависимости квадратов внешнего (R_h^2) и внутреннего (r_h^2) радиусов отверстий от $\ln \epsilon$ и $1/\epsilon$ (ϵ в нДж), позволяющие получить параметры фокального пучка с помощью приведенных выше уравнений (1), (2) (б).

с диаметрами ~ 1 мкм, тогда как в случае более сильной фокусировки ($NA = 0.65$) обеспечивается довольно хорошее взаимодействие – перекрытие максимума кольцеобразного распределения плотности энергии с краями диска и отверстия.

Полученные зависимости размеров микроотверстий от энергий лазерных импульсов были использованы для изготовления нескольких массивов микроотверстий, внешние и внутренние диаметры которых варьировались (рис.3), для сравнительного спектрального анализа их плазмонных характеристик, зависящих от размера микроотверстий, и характеристик обычных микроотверстий аналогичных размеров, создаваемых гауссовыми пучками.

В режиме субабляционной поверхностно-усиленной аналитической спектроскопии с использованием наноструктур те же, но сильно ослабленные ($\epsilon \leq 0.05$ мкДж) лазерные пучки Лагерра–Гаусса проходят в верхний канал освещения микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К (ЛОМО) через 50%-ный делитель пучка и фокусируются на текстурированную золотую пленку, расположенную на предметном стекле микроскопа, объективами с $NA = 0.25$ и 0.65 (рис.1 и 2). Спектры фотолюминесценции (ФЛ) монослоя родамина 6Ж, осажденного путем помещения микрокапли его раствора в этаноле на структурированную поверхность, регистрировались в диапазоне 470–700 нм с использованием диафрагмы диаметром 0.5 мм для объективов микроскопа с $NA = 0.25$ ($20\times$) и 0.65 ($40\times$) из областей монослоя с диаметрами ~ 25 и 13 мкм. Кроме того, были получены спектры отражения и пропускания белого света для структурированных и обычных микроотверстий с использованием их массивов шириной 50 мкм (5×5 элементов и 15×15 элементов для массивов, записанных при $NA = 0.25$ и 0.65 соответственно) в диапазоне 400–900 нм с помощью микроскопа-спектрофотометра, чтобы выявить их плазмонные резонансы. При этом источник белого света (галогенная лампа, на рис.1 не показана) был расположен под образцом. По сравнению с

объективом с $NA = 0.25$ объектив с $NA = 0.65$ обеспечивает большие угол и эффективность сбора, а также четырехкратный выход фотолюминесценции (рис.4) в разумном согласии с коэффициентом масштабирования для эффективности сбора, пропорциональным NA^2 . Это указывает на разумное соответствие размеров микроотверстия и диаметра падающих структурированных возбуждающих лазерных пучков при NA как 0.25 , так и 0.65 .

Чтобы охарактеризовать плазмонные особенности и соответствующие распределения электрического поля, было проведено также вспомогательное численное моделирование на основе FIT-расчетов (Finite Integration Technique). В нашей модели линейно поляризованная электромагнитная плоская волна в воздухе падала по нормали на кольцеобразное отверстие ($R_h = 1.5$ мкм, $r_h = 0.5$ мкм) в золотой пленке толщиной 50 нм на подложке бесконечной толщины из стекла. В модели были исполь-

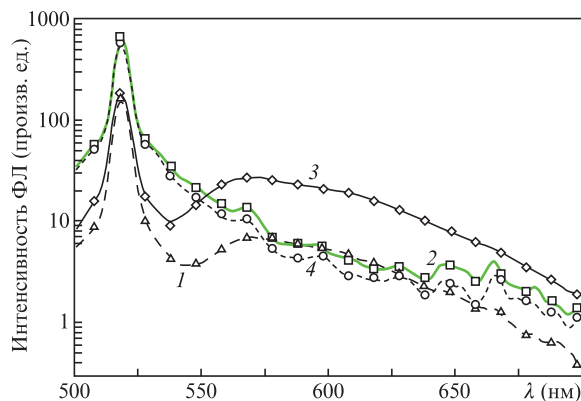


Рис.4. Спектры ФЛ микроотверстия со слоем родамина 6Ж (1,3) и без него (2,4) при использовании объективов с $NA = 0.25$ (1,2) и 0.65 (3,4). Негладкий характер спектров в отсутствие красителя связан, в том числе, со вкладом угловых компонент излучения накачки, рассеянных микроотверстием.

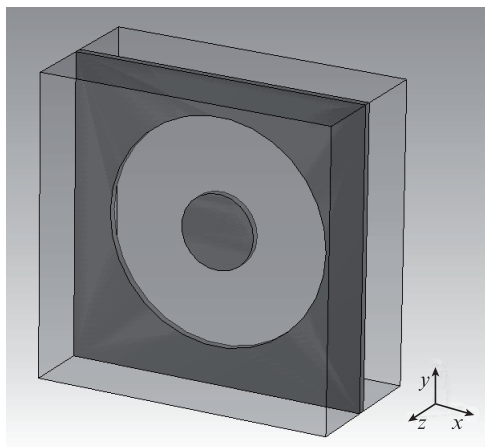


Рис.5. Трехмерная модель образца. Электромагнитная волна распространяется в отрицательном направлении оси z .

зованы периодические граничные условия в плоскости xy . Вид трехмерной модели образца представлен на рис.5.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Спектральные исследования структурированных микроотверстий

Структурированные микроотверстия напоминают параболическую микроантенну со сквозным отверстием/кратером (плазмонным зеркалом, фокусирующим ближнее поле излучения [14]) и центральным нанодиском – нанодиском – нанодиском. В результате для белого света ($\lambda = 400\text{--}900$ нм) коэффициенты пропускания (рис.6, 7) и отражения (рис.8, 9) для обычных и структурированных микроотверстий во всем спектральном диапазоне постепенно соответственно увеличиваются и уменьшаются при увеличении размера отверстия. Между тем, спектры пропускания всех микроотверстий, нормированные на спектр пропускания исходной пленки золота с ее широким (около 520 нм) плазмонным резонансом [15], демонстрирует дополнительный пик в диапазоне 750–850 нм (рис.10). Более того, по сравнению с обычными микроотверстиями коэффициенты пропускания для структурированных микроотверстий одинаковых размеров в 4–8 раз больше, по-видимому, из-за плазмонного усиления рассеяния излучения центральной нанодисковой антенной в прямом и обратном направлениях в этом спектральном диапазоне.

При характерных размерах наноструктуры $R_h = 1.5$ мкм и $r_h = 0.5$ мкм ФИТ-моделирование показывает, что в слу-

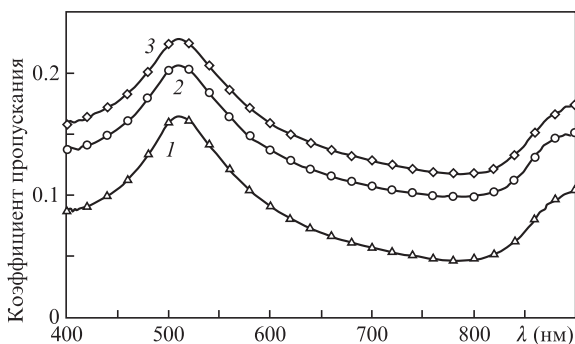


Рис.6. Спектры пропускания обычных микроотверстий с $R_h = 2.5$ (1), 3.5 (2) и 4 мкм (3).

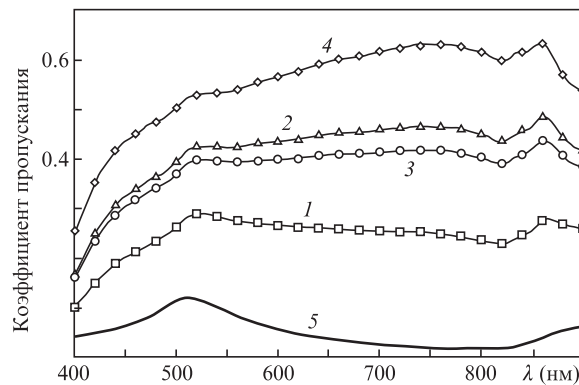


Рис.7. Спектры пропускания структурированных микроотверстий с $R_h = 1.5$ (1), 2.5 (2), 3.5 (3), 4.5 мкм (4) и неструктурированной золотой пленки, в которой возможно возникновение плазмонного резонанса (5).

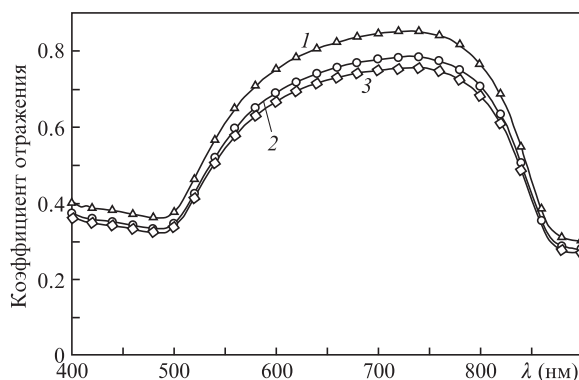


Рис.8. Спектры отражения обычных микроотверстий с $R_h = 2.5$ (1), 3.5 (2) и 4.5 мкм (3).

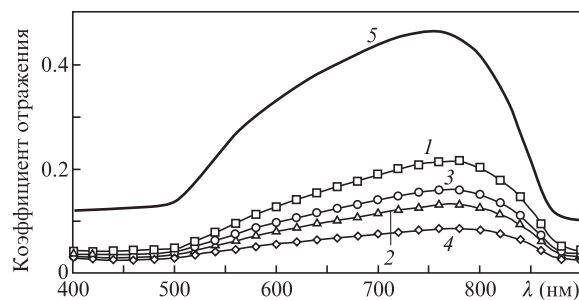


Рис.9. Спектры отражения структурированных микроотверстий с $R_h = 1.5$ (1), 2.5 (2), 3.5 (3), 4.5 мкм (4) и неструктурированной золотой пленки (5).

чае $\lambda < 500$ нм (длина волны отсечки интенсивных межзонных переходов в золоте [16]) и при линейной поляризации света в слое воздуха между центральным нанодиском и краем микроотверстия существуют только стоячие волны. Причина заключается в том, что поверхностные плазмоны сильно затухают в золоте из-за очень больших потерь в этом спектральном диапазоне. Однако в области длин волн свыше 500 нм золото становится почти недиссипативным, и поэтому поверхностные плазмоны могут распространяться по золотой пленке (см. пик 1 на рис.10). В результате дифракции они взаимодействуют с центральным нанодиском через воздушную щель, обеспечивая значительное усиление электрического поля на краях вдоль диаметра отверстия, совпадающего с направлением поляризации лазерного излучения (рис.11).

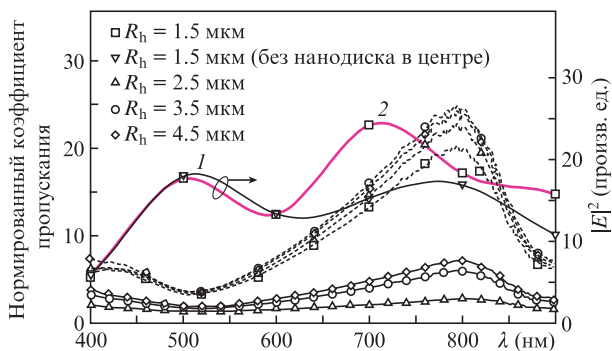


Рис.10. Спектры пропускания массивов обычных отверстий с $R_h = 2.5, 3.5, 4.5$ μm и $r_h = 0$ (сплошные кривые) и структурированных микроотверстий с $R_h = 1.5, 2.5, 3.5, 4.5$ μm и $r_h = 0.9, 0.85, 0.8, 0.6$ μm соответственно (штриховые кривые), нормированные на спектр пропускания золотой пленки толщиной 50 нм, а также рассчитанные квадраты максимальных амплитуд ближнего поля $|E|^2$ в зависимости от длины волны в структурированном (1) и в обычном (2) микроотверстиях.

Эта коллективная мода (см. пик 2 на рис.10) пропадает в случае отсутствия центрального нанодиска. На более длинных волнах оптическая связь между краями микроотверстия и центральным нанодиском становится значительно менее эффективной [17, 18].

Если рассмотреть в подобных структурах распределение электрического поля в центральных сечениях плоскостями yz , то при определенных длинах волн видно, что структура обеспечивает фокусировку поля центральным нанодиском и возникновение области с большой амплитудой (рис.12).

3.2. Исследования поверхностно-усиленной фотолюминесценции красителя на структурированных микроотверстиях

Для структурированного микроотверстия с $R_h \approx 1.5$ μm и $r_h \approx 0.5$ μm была исследована фотолюминес-

ценция осажденного монослоя родамина 6Ж для линейной, радиальной и азимутальной поляризации падающего лазерного излучения в виде импульсов Лагерра–Гаусса с меньшей энергией. При фокусировке объективом с $NA = 0.65$ все импульсы по-разному поляризованного излучения возбуждали отдельные полосы фотолюминесценции родамина 6Ж с максимумом на $\lambda = 567–570$ нм, значительно уширенные (на 20–30 нм) и смещенные на ~ 10 нм в красную область по сравнению с полосой ФЛ красителя в растворе этанола (рис.13). Этот эффект можно объяснить взаимодействием молекул родамина 6Ж с золотыми наноструктурами путем переноса заряда на металлическую поверхность [15].

Было проведено сравнение интенсивностей в максимумах полос ФЛ при ее возбуждении излучением с разными поляризациями (радиальной, азимутальной и линейной), при одинаковых энергиях падающих импульсов и использовании для сбора излучения объектива с $NA = 0.65$ (рис.13). Возбуждение излучением с радиальной поляризацией обеспечивает двукратное увеличение интенсивности ФЛ относительно интенсивности ФЛ при азимутальном возбуждении и увеличение на порядок (~ 11) по сравнению со случаем возбуждения ФЛ линейно поляризованным излучением. Наблюдаемое значительное усиление ФЛ может быть вызвано несколькими физическими механизмами:

1. Взаимодействием радиально- и азимутально-поляризованного излучения видимого диапазона со структурированным микроотверстием по всей его границе по сравнению с очень узким сектором участков усиления электрического поля при линейной поляризации (рис. 11).
2. Частичным преобразованием поперечного электрического поля падающего излучения в продольное поле, что достаточно эффективно ($\sim 31\%$ [9]) происходит при фокусировке объективом с $NA = 0.65$ излучения с радиальной поляризацией и незначительно для излучений с другими поляризациями (при таком преобразовании реализуется эффективное возбуждение локализованных плазмонов в нанозернах золота [9]).

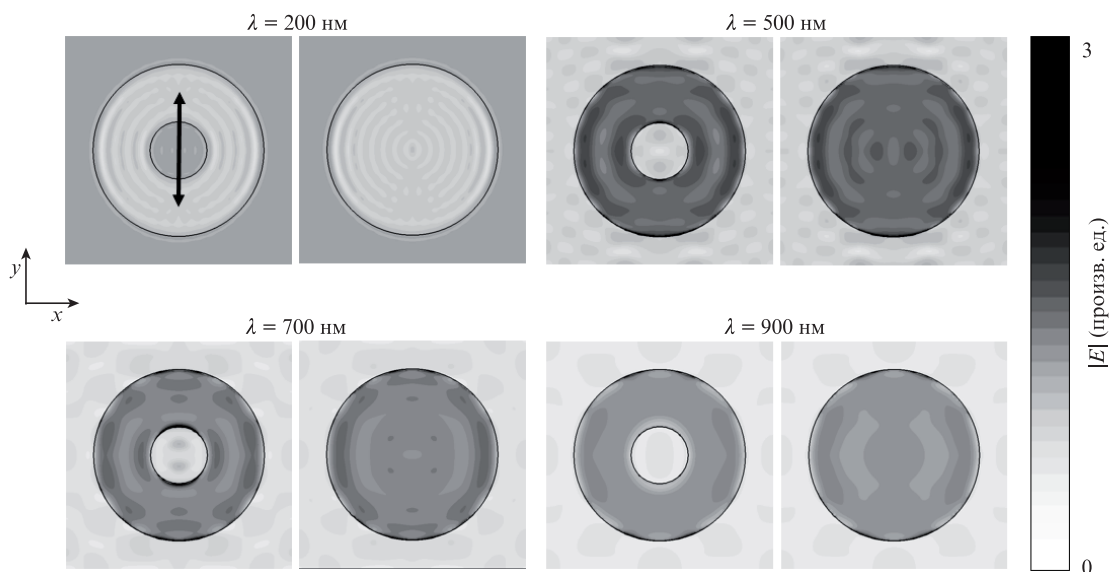


Рис.11. Рассчитанные пространственные распределения амплитуды электрического поля $|E|$ линейно поляризованной плоской волны в структурированном отверстии с $R_h = 1.5$ μm и $r_h = 0.5$ μm и в отверстии без центрального нанодиска на разных длинах волн. Стрелка указывает направление поляризации. Видно, что при $\lambda = 700$ нм амплитуда поля увеличивается на краях нанодиска, которые находятся вблизи параллельного направлению поляризации диаметра отверстия.

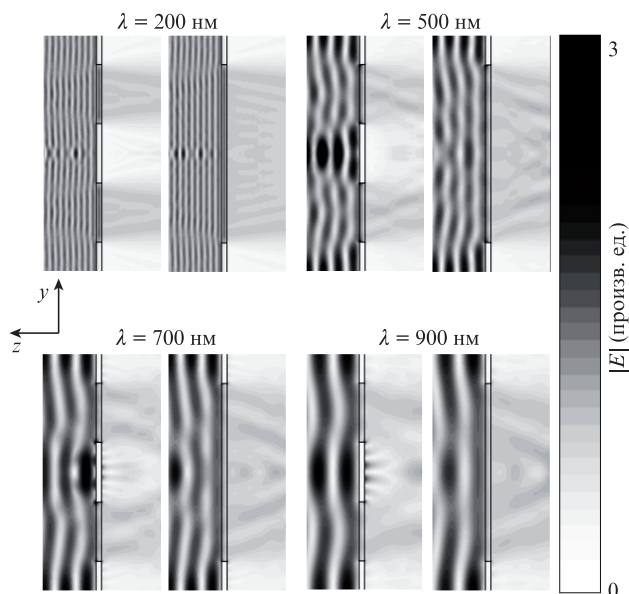


Рис.12. Рассчитанные пространственные распределения амплитуды электрического поля $|E|$ линейно поляризованной плоской волны в структурированном отверстии с $R_h = 1.5$ мкм и $r_h = 0.5$ мкм и в отверстии без центрального нанодиска на разных длинах волн (в плоскости yz). При $\lambda = 500$ нм видно увеличение амплитуды поля в области над нанодиском.

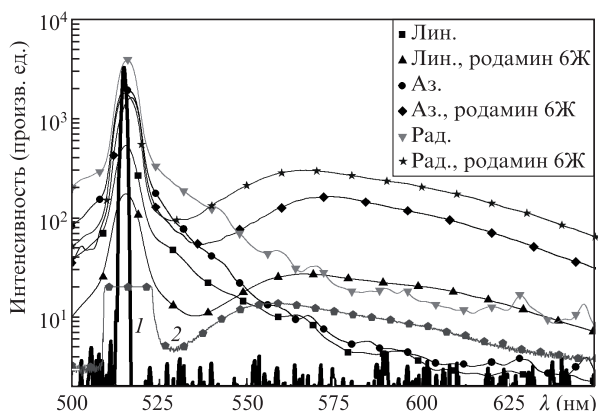


Рис.13. Спектры ФЛ чистого золотого структурированного микроотверстия и такого же отверстия с монослоем красителя родамин 6Ж для линейной (Лин.), азимутальной (Аз.) и радиальной (Рад.) поляризации излучения лазера при использовании объектива с $NA = 0.65$ и спектр излучения лазера накачки (1), а также эталонный спектр ФЛ объемного родамина 6Ж в растворе этанола (2). Негладкий характер спектров люминесценции в отсутствие красителя связан, в том числе, со вкладом угловых компонент излучения накачки, рассеянных микроотверстием.

3. Взаимодействием падающего излучения с $\lambda = 515$ нм и ФЛ с $\lambda = 520-650$ нм в виде гибридной плазмонной моды «граница отверстия-нанодиск» в видимом и ближнем ИК диапазонах в структурированных микроотверстиях, продемонстрированная как экспериментально, так и численно (см. рис.11).

4. Заключение

В работе выполнено прямое лазерное нанотекстурирование золотой пленки и возбуждение фотолюминесценции на плазмонных поверхностных структурах векторными оптическими полями с пространственно-неод-

нородными поляризационными состояниями, которые показали универсальные возможности создания (изготовления) с помощью лазеров сложных нанооптических элементов, их эффективного спектрально-, симметрично- и размерно-согласованного плазмонного возбуждения, а также поверхностно-усиленной аналитической спектроскопии с использованием наноструктур во всем оптическом диапазоне. Проанализированы особенности пропускания и отражения света подобными структурами (коэффициенты пропускания структурированных отверстий в 5–10 раз больше, чем у обычных отверстий), с помощью численного моделирования дана оценка усиления ближнего электрического поля излучения (увеличение $|E|^2$ до 19 раз (рис.10)), проведено сравнение эффективности фотолюминесценции для разных поляризаций возбуждающего излучения (при использовании излучения с радиальной поляризацией интенсивность ФЛ в 2 и 11 раз больше, чем при использовании излучений с азимутальной и линейной поляризациями соответственно).

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-12-01258), для С.И.Кудряшова – Программой повышения конкурентоспособности МИФИ (в части моделирования).

- Litchinitser N.M. *Science*, **337** (6098), 1054 (2012).
- Toyoda K., Takahashi F., Takizawa S., Tokizane Y., Miyamoto K., Morita R., Omatsu T. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 143603 (2013).
- Nivas J.J., He S., Rubano A., Vecchione A., Paparo D., Marrucci L., Bruzzese R., Amoroso S. *Sci. Rep.*, **5**, 17929 (2015).
- Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M.V., Dennis M.R., Andrews D.L., Mansuripur M., Denz C., Alpmann C., Banzer P., Bauer T., Karimi E., Marrucci L., Padgett M., Ritsch-Marte M., Litchinitser N.M., Bigelow N.P., Rosales-Guzmán C., Belmonte A., Torres J.P., Neely T.W., Baker M., Gordon R., Stilgoe A.B., Romero J., White A.G., Fickler R., Willner A.E., Xie G., McMorran B., Weiner A.M. *J. Opt.*, **19**, 013001 (2016).
- Kuchmizhak A.A., Porfirev A.P., Syubaev S.A., Danilov P.A., Ionin A.A., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N., Khonina S.N., Kudryashov S.I. *Opt. Lett.*, **42**, 2838 (2017).
- Syubaev S., Porfirev A., Zhizchenko A., Vitrik O., Kudryashov S., Fomchenkov S., et al. *Opt. Lett.*, **42**, 5022 (2017).
- Melik-Gaykazyan E.V., Kruk S.S., Camacho-Morales R., Xu L., Rahmani M., Zangeneh Kamali K., Lamprianidis A., Miroshnichenko A.E., Fedyanin A.A., Neshev D.N., Kivshar Y.S. *ACS Phot.*, **5**, 728 (2017).
- Raybould T., Fedotov V.A., Papisimakis N., Youngs I., Zheludev N.I. *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 081104 (2017).
- Данилов П.А., Сараева И.Н., Кудряшов С.И., Порфирьев А.П., Кучмижак А.А., Жижченко А.Ю., Руденко А.А., Уманская С.Ф., Зярянский Д.А., Ионин А.А., Хонина С.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **107**, 18 (2018) [*JETP Lett.*, **107**, 15 (2018)].
- Salter P.S., Booth M.J. *Opt. Lett.*, **36**, 2302 (2011).
- Hasegawa S., Ito H., Toyoda H., Hayasaki Y. *Opt. Express*, **24**, 18513 (2016).
- Skoulas E., Manousaki A., Fotakis C., Stratakis E. *Sci. Rep.*, **7**, 45114 (2017).
- Danilov P.A., Drozdova E.A., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Odinovok S.B., Rudenko A.A., Yurovskih V.I., Zayarny D.A. *Appl. Phys. A*, **117**, 981 (2014).
- Gubko M.A., Husinsky W., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Nathala C., Rudenko A.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Treshin I.V. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 065301 (2014).
- Maier S.A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (Berlin: Springer Science & Business Media, 2007).
- Palik E.D. *Handbook of Optical Constants of Solids* (Orlando: Academic, 1985).
- Ebbesen T.W., Lezec H.J., Ghaemi H.F., Thio T., Wolff P.A. *Nature*, **391** (6668), 667 (1998).
- Liu H., Lalanne P. *Nature*, **452** (7188), 728 (2008).