УДК 621.373.826; 621.9.048.7

**А.А. Кучмижак¹, С.О. Гурбатов¹,
О.Б. Витрик^{1, 2}, Ю.Н. Кульчин^{1, 2}**

¹ Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ МОД И УСИЛЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НА СЕРЕБРЯНОМ НАНОКОЛЬЦЕ

Продemonстрирован лазерный метод фабрикации серебряных нанокольцев, основанный на воздействии на поверхность металлической пленки сфокусированного импульса наносекундной длительности и последующей полировки расфокусированным пучком ионов аргона. За счет подбора режимов лазерной абляции, а также толщины модифицируемой пленки данный метод позволяет контролировать диаметр и толщину полученных нанокольцев, в то время как последующая полировка пучком ионов аргона позволяет создавать нанокольца нужной высоты. Картины рассеяния линейно-поляризованного лазерного излучения, падающего под наклоном на нанокольца, демонстрируют наличие характерного внутреннего фокуса рассеяния, смещенного относительно его центра на расстояние $0,57R$ при наклонном освещении и находящегося в центре при нормальном падении лазерного пучка. Продemonстрировано пятикратное усиление фотолюминесценции органического красителя родамина 6Ж вблизи серебряного нанокольца. Усиление фотолюминесценции достигается за счет увеличения напряженности электромагнитного поля вблизи поверхности нанокольца вследствие возбуждения падающим лазерным излучением мультипольных локальных плазмонных резонансов, что подтверждается измеренными «темнопольными» спектрами рассеяния широкополосного оптического излучения, а также численными расчетами распределения полей и спектра рассеяния, выполненными на основе трехмерного метода конечных разностей во временной области.

Ключевые слова: лазерное наноструктурирование, наносекундные лазерные импульсы, металлические нанокольца, плазмонные моды, усиление фотолюминесценции.

**A.A. Kuchmizhak¹, S.O. Gurbatov¹,
O.B. Vitrik^{1, 2}, Yu.N. Kulchin^{1, 2}**

¹ Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch,
the Russian Academy of Science, Vladivostok, Russian Federation

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

PLASMON MODE EXCITATION AND PHOTOLUMINESCENCE ENHANCEMENT ON SILVER NANORING

We demonstrate a simple and high-performance laser-assisted technique for silver nanoring fabrication, which includes the ablation of the Ag film by focused nanosecond pulses and subsequent reactive ion polishing. The nanoring diameter and thickness can be controlled by optimizing both the pulse energy

and the metal film thickness at laser ablation step, while the subsequent reactive ion polishing provides the ability to fabricate the nanoring with desirable height. Scattering patterns of s-polarized collimated laser beam obliquely illuminating the nanoring demonstrate the focal spot inside the nanoring shifted from its center at a distance of $\sim 0,57R$ ring. Five-fold enhancement of the photoluminescence signal from the Rhodamine 6G organic dye near the Ag nanoring was demonstrated. This enhancement was attributed to the increase of the electromagnetic field amplitude near the nanoring surface arising from excitation of the multipole plasmon modes traveling along the nanoring. This assumption was confirmed by dark-field back-scattering spectrum of the nanoring measured under white-light illumination as well as by supporting finite-difference time-domain simulations.

Keyword: laser nanostructuring, nanosecond pulses, metal nanorings, plasmon modes, photoluminescence enhancement.

Введение

Кольцевые наноструктуры на основе благородных металлов привлекают все большее внимание специалистов благодаря тому, что они не только обеспечивают значительное усиление в них локализованного электромагнитного поля за счет возбуждения поверхностных плазмонных резонансов за счет вариации размера и формы колец [1–4]. Такие наноструктуры уже нашли применение в качестве высокоэффективных антенн в поверхностно усиленной спектроскопии (SERS, SEIRA) [5], как ячейки оптических устройств сверхплотного хранения информации [6], как плазмонные волноводы в системах оптической передачи информации [7], а также в биологических и химических сенсорах [8]. Для создания кольцевых металлических наноструктур, как правило, применяются методы коллоидальной [2], электронной [3] и ионно-лучевой литографии [5], а также химического синтеза [4], благодаря которым созданы не только единичные нанокольца различных размеров, геометрии и формы, но и их периодические массивы. Однако использование указанных методов требует применения дорогостоящего высокотехнологичного оборудования, зачастую недоступного широкому кругу исследователей. Существуют, однако, технологически гораздо более простые лазерные методы модификации поверхностей, которые уже продемонстрировали возможность создания широкой номенклатуры функциональных наноструктур [9–17]. В настоящей работе будет показано, что использование таких методов в сочетании с последующим реактивным ионным травлением позволяет изготавливать изолированные кольцевые серебряные наноструктуры с контролируемыми геометрическими размерами на диэлектрической подложке. Будет показано, что такие нанокольца способны увеличивать напряженность электромагнитного поля вблизи их поверхности в той же мере,

что и структуры, изготовленные другими способами. Также будет продемонстрировано использование изготовленных лазерным методом нанокольц в качестве функциональных плазмонных наноструктур для локального усиления сигнала фотолюминесценции.

1. Изготовление нанокольц серебра

В настоящей работе фабрикация субмикронных колец осуществляется в два этапа. На первом этапе поверхность нанесенных на кварцевую подложку оптического качества методом электронно-лучевого испарения пленок серебра с толщинами 35 нм и 50 нм подвергается воздействию единичных импульсов второй (532 нм) гармоники Nd:YAG-лазера (длительность импульса ~ 7 нс, максимальная энергия в импульсе 10 мДж), которые фокусируются на поверхности пленки с помощью объектива с числовой апертурой $NA = 0,65$ (рис. 1 [14]).

Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения лазерного структурирования металлических пленок и исследования оптических свойств полученных структур. I – исследование рассеивающих свойств нанокольца в режиме темного поля; II – исследование усиления сигнала фотолюминесценции органического красителя R6G

Результаты такого воздействия на поверхность 35-нм и 50-нм пленки Ag для различных значений энергии падающего импульса E проиллюстрированы соответственно на рис. 2, а, в. Из рисунков видно,

что воздействие лазерных импульсов на поверхность пленки приводит к формированию на ней кольцевых структур, представляющих собой сквозные отверстия, окруженные стенками из застывшего после модификации расплава серебра. Интересно, что такие структуры возникают только в случае облучения пленок импульсами наносекундной длительности, в то время как при использовании фемтосекундных лазерных импульсов (конечно, в этом случае в качестве источника излучения на рис. 1 используется фемтосекундный Ti:Sapphire-лазер) колец из застывшего расплава вокруг сформированных отверстий не наблюдается. По-видимому, в последнем случае за счет генерации термоупругих напряжений происходит отрыв пленки от подложки [15, 18], в результате чего кромка вокруг сформированного отверстия оказывается тонкой и рваной (рис. 2, *е*).

В случае же импульсов наносекундной длительности реализуются иные термодинамические механизмы, обусловленные подповерхностным кипением в толще серебряной пленки, что в конечном счете приводит к растеканию расплавленного материала и его застыванию в виде кольца с гладкой равномерной кромкой по краям отверстия [19, 20]. Из рис. 2, *а, в* также видно, что в случае достаточно больших значений энергии наносекундных импульсов ($E > 41$ нДж для 35-нм пленки и $E > 52$ нДж для 50-нм пленки) по краям колец наблюдаются дополнительные выбросы в виде «короны», что является нежелательным эффектом с точки зрения достижения правильной геометрической формы для кольцевых структур. В случае меньших энергий, когда радиусы полученных структур R_{ring} лежат в пределах от 325 нм до 1,1 мкм для 35-нм пленки и от 300 нм до 0,75 мкм – для 50-нм пленки, они приобретают почти правильную кольцевую форму. Результаты АСМ-исследования показали, что высота всех правильных кольцевых структур превышает 200 нм, что значительно больше толщины исходной серебряной пленки. Это открывает возможность изготовления отдельно лежащих на диэлектрической подложке металлических наноколец за счет послойного удаления остатков окружающей металлической пленки. Для этого в работе используется метод реактивного ионного травления (Hitachi I4000), обеспечивающий среднюю скорость утонения, равную $\sim 0,33$ нм/с. Для того чтобы избежать плавления металла под действием греющего пучка ионов аргона, процесс полировки осуществляется за несколько последовательных циклов облучения, каждый

Рис. 2. а, в – лазерно-индуцированные сквозные отверстия в 35-нм и 50-нм пленках Ag при различных энергиях модифицирующего импульса наносекундной длительности; б, г – соответствующие им кольцевые структуры, полученные после полировки ускоренными ионами Ag^+ ; е – сквозное отверстие в 50-нм пленке Ag, сформированное импульсом фемтосекундной длительности

из которых не превышает 15 с; между этими циклами пленка остывает в течение 1 мин.

На рис. 2, б, г представлен результат утонения наноструктур, ранее представленных на рис. 2, а, в, в течение суммарного время воздействия пучка ионов 110 с и 155 с соответственно. Видно, что такое воздействие приводит к удалению металлической пленки из окрестности нанокольца, причем полировка не искажает геометрической формы последних. Высота стенок полученных колец h с высокой точностью задается временем воздействия утоняющего пучка, и в данной работе эта высота выбрана равной 200 нм и 250 нм для структур на основе 35-нм и 50-нм

пленок соответственно. В то же время толщина колец t зависит от толщины модифицируемой пленки и составляет 150 нм и 200 нм для структур на основе пленок с толщинами 35 и 50 нм соответственно.

2. Оптические свойства металлических наноколец

Структура в виде металлического нанокольца, радиус которого R_{ring} существенно превышает его толщину t ($R_{\text{ring}} \gg t$), представляет оптическую наноантенну, которая усиливает падающее электромагнитное излучение за счет возбуждения плазмонных мод [5, 21], а также обеспечивает трансформацию распространяющегося излучения в сильные эванесцентные поля [22]. Лазерная технология фабрикации наноколец, наряду с отмеченными выше преимуществами, не дает, однако, возможности формирования наноструктур с однородным по их длине сечением (см. рис. 2). В данной работе мы продемонстрируем, что эта особенность не оказывает влияния на способность наноколец концентрировать и удерживать в его окрестности электромагнитное излучение оптических частот. Для этого мы сформировали описанным выше методом единичное нанокольцо серебра радиусом $R_{\text{ring}} = 1,1$ мкм, средней толщиной $t = 150$ нм и высотой $h = 200$ нм [23] непосредственно на сколотом торце 10 см отрезка волоконного световода (ВС) ThorlabsS460-HP [24]. Высокая точность позиционирования лазерного пучка, модифицирующего нанесенную на торец пленку серебра, позволила изготовить нанокольцо с указанными размерами в геометрических пределах оптической сердцевины ВС диаметром $\sim 3,95$ мкм (рис. 3, *а*). Такое техническое решение существенно облегчает механические манипуляции с нанокольцом, а также обеспечивает дополнительную возможность его возбуждения направляемым по световоду пучком с практически идеальным гауссовым профилем распределения интенсивности при обеспечении в ВС одномодового режима распространения (при $\lambda > 470$ нм [24]), что, как мы покажем далее, оказалось весьма полезным в задачах регистрации фотолюминесцентных изображений.

Оптическое изображение картины рассеяния s-поляризованного излучения непрерывного полупроводникового лазера с центральной длиной волны $\lambda = 475$ нм, освещающего нанокольцо под углом 70° по отношению к оси ВС (рис. 3, *б*), отчетливо демонстрирует наличие фокального пятна внутри нанокольца, смещенного относительно его центра на расстояние порядка $\sim 0,6R_{\text{ring}}$. Отметим, что полученный результат

Рис. 3. Оптические свойства серебряного нанокольца: *а* – СЭМ-изображение (под углом 45°) нанокольца, изготовленного на торце волоконного световода в пределах его оптической сердцевины (зеленая окружность указывает размер сердцевины световода. На вставке схематически показаны реальные размеры нанокольца); *б* – оптическое изображение, демонстрирующее характерную картину рассеяния s-поляризованного лазерного излучения с центральной длиной волны $\lambda = 475$ нм, освещающего нанокольцо под углом 20° относительно плоскости торца световода (синяя стрелка указывает направление падения лазерного луча); *в* – «темнопольное» оптическое изображение нанокольца, полученное при освещении его неполяризованным широкополосным источником белого света (белые окружности показывают реальные размеры нанокольца); *г* – экспериментально измеренный, а также расчетный нормированный спектр рассеяния серебряного нанокольца. На вставках приведены рассчитанные распределения нормированного квадрата напряженности электромагнитного $(E/E_0)^2$ поля вблизи указанного нанокольца, выполненные при освещении кольца узкополосным источником с длинами 475 нм (слева) и 532 нм (справа) (направление поляризации источника излучения показано оранжевой стрелкой. Масштабная полоска – 600 нм)

качественно и количественно согласуется с результатом, полученным для колец существенно большего диаметра (вплоть до 20 мкм [21, 25]), демонстрируя универсальный характер рассеяния лазерного излучения на таких структурах. Отметим, что схожие картины рассеяния наблюдаются также при освещении нанокольцев различного радиуса источниками с другими длинами волн (в данной работе не показано), демонстрируя, что изготовленные лазерным методом нанокольца, несмотря на некоторое несовершенство геометрической формы, обладают оптиче-

скими свойствами, сравнимыми со свойствами химически синтезированных монокристаллических нанокольц серебра идеальной геометрической формы, а также колец, изготовленных методом электронно-лучевой литографии [5, 21, 22, 25]. Наличие подобного фокуса обычно объясняется конструктивной интерференцией лазерного излучения, рассеянного от поверхности нанокольца. Возможно также, что определенный вклад в картину рассеяния вносят возбуждающиеся в нанокольце эванесцентные моды высоких порядков [22], а также «темные» плазмонные моды [5]. Последнее предположение, очевидно, опровергается тем фактом, что идентичные «ближнепольные» картины рассеяния наблюдаются как от металлических, так и от диэлектрических нанокольц одного размера [22].

Яркое сине-зеленое свечение (рис. 3, *в*) изготовленного лазерным методом нанокольца, наблюдаемое при рассеянии излучения широкополосного источника белого света, освещающего нанокольцо в режиме темного поля (см. вставку на рис. 1, *а*), скорее всего, свидетельствует о возбуждении множественных плазмонных мод в видимой области спектра. Для измерения «темнопольного» спектра рассеяния нанокольца с минимизированной засветкой от поверхности ВС излучение, рассеянное от нанокольца, освещаемого источником белого света, собиралось посредством оптического микроскопа, оснащенного объективом с числовой апертурой $NA = 0,9$ ($\times 100$), и направлялось на чувствительный спектрометр (Andor Shamrock 303i) с охлаждаемой CCD-камерой (Newton 971 [26]). Результат измерения спектра рассеяния, содержащего нанокольцо участка поверхности ВС, нормированного на спектры, измеренные от ровной поверхности ВС, а также на спектр источника белого света приведен на рис. 3, *г*. Как видно, экспериментально измеренный пик рассеяния приходится на диапазон длин волн 480–580 нм, что в целом согласуется с визуально наблюдаемым в «темном поле» оттенком свечения наноструктуры (см. рис. 3, *в*).

Для интерпретации экспериментально полученных результатов мы провели численное моделирование рассеяния оптического излучения на нанокольце трехмерным методом конечных разностей во временной области (программный пакет LumericalSolutions [27]). В рассматриваемой модели нанокольцо серебра с указанными выше геометрическими размерами (см. рис. 3, *а*) располагалось на кварцевой подложке ($n_{\text{sub}} = 1,45$) и освещалось гауссовым источником с централь-

ной длиной волны $\lambda = 420$ нм и полушириной спектра $\Delta\lambda = 300$ нм при нормальном падении. Моделирование дисперсионной зависимости серебра в спектральном диапазоне возбуждающего источника излучения выполнялось с использованием мультикоэффициентной модели [27], осуществляющей подгон параметров по экспериментальным данным, приведенным в работе [28].

Результаты расчета спектра рассеяния нанокольца в видимой области спектра хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений (рис. 3, *з*). Очевидное различие расчетного и измеренного спектров рассеяния в ближней ИК-области, по-видимому, связано с возбуждением в модельном случае ЛППР низких порядков [2], в то время как наблюдение таких мод в экспериментальном спектре рассеяния невозможно вследствие отсутствия соответствующих спектральных компонент в используемом источнике белого света. Отсутствие «острого» резонанса в спектре рассеяния нанокольца в видимой части оптического спектра, скорее всего, связано с возбуждением большого числа плазмонных мод высоких порядков, из-за перекрытия спектральных кривых которых и формируется единый широкий спектр рассеяния [1]. Это позволяет получить усиленные электромагнитные поля вблизи стенок, а также внутри нанокольца для широкого диапазона длин волн. Данное предположение подтверждается численными расчетами распределения нормированной напряженности электромагнитного поля $((E/E_0)^2$, где E_0 – напряженность возбуждающего источника излучения) вокруг нанокольца, выполненными при его освещении линейно-поляризованным гауссовым источником с длинами волн 475 и 532 нм (см. вставки на рис. 3, *з*).

3. Усиление фотolumинесценции органического красителя на нанокольце

В данной работе мы продемонстрируем, что локализованное вблизи нанокольца поле может быть использовано для усиления сигнала фотolumинесценции (ФЛ) одного из наиболее распространенных органических красителей – родамина 6Ж (Р6Ж). Для данных экспериментов использовался спиртовой раствор Р6Ж, который наносился на торец ВС при помощи микроинъектора. Освещение нанокольца осуществлялось при помощи излучения непрерывного лазерного источника с центральной длиной волны 532 нм (MillesGriot) (см. вставку 2 на рис. 1, *а*), вводимого в отрезок ВС, на торце которого располагалась

наноантенна. Изображение ФЛ красителя детектировалось при помощи высокоразрешающего оптического микроскопа (XiroxKH7700), оснащенного объективом с числовой апертурой $NA = 0,8 (\times 100)$. Рассеянное излучение накачки ослабляется на 6 порядков при помощи длинноволнового фильтра, помещенного перед ПЗС-камерой микроскопа, который в то же время практически не ослабляет излучение длины волны люминесценции. На рис. 4, *а* представлено изображение ФЛ слоя Р6Ж, нанесенного на торец ВС, содержащего серебряное нанокольцо в области оптической сердцевины. Видно, что наиболее интенсивная ФЛ наблюдается вблизи стенок нанокольца, что, как было отмечено выше, связано с усилением интенсивности падающего электромагнитного поля («горячие точки»).

Рис. 4. Усиление фотолюминесценции на серебряном нанокольце. Оптическое изображение фотолюминесценции спиртового раствора родамина 6Ж, нанесенного на торец волоконного световода, содержащего серебряное нанокольцо (*а*), а также в случае отсутствия (*б*) кольца на сердцевине световода (зеленая окружность указывает геометрическое положение оптической сердцевины световода с диаметром 4 мкм. Белые окружности на рис. *а* указывают на положение нанокольца, смещенного относительно центра сердцевины световода на ~ 1 мкм); *в* – распределения интенсивности фотолюминесценции, измеренные вдоль направлений, отмеченных А и В на рис. 4, *а*, *б* соответственно

Неравномерность сигнала фотолюминесценции вдоль нанокольца в данном эксперименте, очевидно, определяется несимметричностью его расположения относительно центра оптической сердцевины (см. рис. 4, *а*) и, соответственно, неравномерной засветкой поверхности кольца. Вместе с тем необходимо отметить, что некоторое усиление ФЛ также наблюда-

ется в центре кольца (показано зеленой стрелкой на рис. 4, в), что, по-видимому, связано со смещением внутреннего фокуса рассеяния в центр кольца в случае его освещения лазерным излучением при нормальном падении [5, 22].

Для сравнения изображение фотолюминесценции было записано для случая нанесения РБЖ на гладкую сколотую поверхность идентичного световода, не содержащую каких-либо неоднородностей в области оптической сердцевины (рис. 4, б). Как видно, в сравнении со случаем освещения нанокольца, интенсивность фотолюминесценции в данном случае существенно меньше, причем ее пространственное распределение в области сердцевины ВС в целом соответствует распределению интенсивности возбуждающего поля, указывая на ключевой вклад нанокольца в усиление сигнала. Сравнение приведенных результатов измерений (рис. 4, в) демонстрирует достижение максимального усиления интенсивности фотолюминесценции вблизи серебряного нанокольца приблизительно в 5,5 раза. Отметим, что полученное значение несущественно меньше фактора усиления ($\sim 7,5$ раза, [1]), достигнутого с использованием монокристаллического, химически синтезированного серебряного кольца идеальной геометрической формы, указывая на применимость высокопроизводительной лазерной технологии изготовления таких оптических элементов.

Заключение

В данной работе продемонстрирован простой и высокопроизводительный лазерный метод изготовления серебряных нанокольцев, основанный на воздействии на поверхность металлической пленки сфокусированного импульса наносекундной длительности и последующей полировки расфокусированным пучком ионов аргона. За счет подбора режимов лазерной абляции (оптический размер пятна, энергия в импульсе и т.д.), а также толщины модифицируемой пленки данный метод позволяет контролировать диаметр и толщину полученных нанокольцев, в то время как время последующей полировки пучком ионов аргона позволяет создавать нанокольца нужной высоты. Картины рассеяния линейно-поляризованного лазерного излучения, падающего под наклоном на нанокольца, демонстрируют наличие характерного внутреннего фокуса рассеяния, смещенного относительно его центра на расстояние $0,57R_{\text{ring}}$ при наклонном освещении и находящегося в цен-

тре при нормальном падении лазерного пучка. Продemonстрировано пятикратное усиление фотолюминесценции органического красителя родамина 6Ж вблизи серебряного нанокольца. Усиление фотолюминесценции достигается за счет увеличения напряженности электромагнитного поля вблизи поверхности нанокольца вследствие возбуждения падающим лазерным излучением мультипольных локальных плазмонных резонансов, что подтверждается измеренными «темнопольными» спектрами рассеяния широкополосного оптического излучения, а также численными расчетами распределения полей и спектра рассеяния, выполненными на основе трехмерного метода конечных разностей во временной области.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-02-08810-а, 14-02-31323-мол_а, 15-02-03173) и программой «Дальний Восток» Федерального агентства научных организаций. Авторы также выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0116 между ОАО «Центр судоремонта «Дальзавод» и Министерством образования и науки Российской Федерации).

Список литературы

1. Nordlander P. The Ring: A Leitmotif in Plasmonics // ASC Nano 3. – 2009. – Vol. 3. – P. 488–492.
2. Optical Properties of Gold Nanorings / J. Aizpurua, P. Hanarp, D.S. Sutherland, M. Kall, G.W. Bryant, F.G. De Abajo // Phys. Rev. Lett.– 2003. – Vol. 90. – P. 057401.
3. Enhanced Tunability and Linewidth Sharpening of Plasmon Resonances in Hybridized Metallic Ring/Disk Nanocavities / F. Hao, P. Nordlander, M.T. Burnett, S.A. Maier // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 76. – P. 245417.
4. Patterned Arrays of Au Rings for Localized Surface Plasmon Resonance / S. Kim, J.-M. Jun, D.-G. Choi, H.-T. Jung, S.-M. Yang // Langmuir. – 2006. – Vol. 22. – P. 7109.
5. Illuminating Dark Plasmons of Silver Nanoantenna Rings to Enhance Exciton–Plasmon Interactions / H.-M. Gong, L. Zhou, X.-R. Su, S. Xiao, S.-D. Liu, Q.-Q. Wang // Adv. Funct. Mater. – 2009. – Vol. 19. – P. 298.

6. Application of Surface Polariton Coupling between Nano Recording Marks to Optical Data Storage / K.P. Chiu, K.F. Lai, D.P. Tsai // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16. – P. 13885.

7. Au/SiO₂ Nanoring Plasmon Waveguides at Optical Communications Band / K.-Y. Jung, F.L. Texeira, R.M. Reano // *J. Lightwave Technol.* – 2007. – Vol. 25. – P. 2757.

8. Sensing Characteristics of NIR Localized Surface Plasmon Resonances in Gold Nanorings for Application as Ultrasensitive Biosensors / E.M. Larsson, J. Alegret, M. Kall, D.S. Sutherland // *Nano Lett.* – 2007. – Vol. 7. – P. 1256.

9. Formation of high-aspect-ratio protrusions on gold films by localized pulsed laser irradiation / J.P. Moening, S.S. Thanawala, D.G. Georgiev // *Appl. Phys. A.* – 2009. – Vol. 95. – P. 635.

10. Nanotexturing of gold films by femtosecond laser-induced melt dynamics / J. Koch, F. Korte, T. Bauer, C. Fallnich, B.N. Chichkov // *Appl. Phys. A.* – 2005. – Vol. 81. – P. 325.

11. Fabrication and spectral tuning of standing gold infrared antennas using single fs-laser pulses / M. Reininghaus, D. Wortmann, Z. Cao, J.M. Hoffmann, T. Taubner // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21. – P. 32176.

12. Optical apertureless fiber microprobe for surface laser modification of metal films with sub-100nm resolution / A.A. Kuchmizhak, Y.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.G. Savchuk, S.V. Makarov, S.I. Kudryashov, A.A. Ionin // *Opt. Comm.* – 2013. – Vol. 308. – P. 125–129.

13. Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses / U. Zywietz, A.B. Evlyukhin, C. Reinhardt, B.N. Chichkov // *Nat. Comm.* – 2014. – Vol. 5. – P. 3402.

14. Flash-imprinting of intense femtosecond surface plasmons for advanced nanoantenna fabrication / A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov, A.A. Rudenko, Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, T.V. Efimov, A.A. Kuchmizhak // *Opt. Lett.* – 2015. – Vol. 40. – P. 1687–1690.

15. Solid–liquid–solid process for forming free-standing gold nanowhisker superlattice by interfering femtosecond laser irradiation / Y. Nakata, N. Miyana, K. Momoo, T. Hiromoto // *Appl. Surf. Sci.* – 2013. – Vol. 274. – P. 27–32.

16. Formation of crown-like and related nanostructures on a thin supported gold film irradiated by single diffraction-limited nanosecond laser pulses / Y.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.A. Kuchmizhak, V.I. Emel'yanov, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov // *Phys. Rev. E.* – 2014. – Vol. 90. – P. 023017.

17. Liquidly process in femtosecond laser processing / Y. Nakata, K. Tsuchida, N. Miyanaga, and H. Furusho // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 255. – P. 9761.

18. Time-resolved studies of femtosecond-laser induced melt dynamics / C. Unger, J. Koch, L. Overmeyer, B.N. Chichkov // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20. – P. 24864.

19. Формирование нанопичков и наноотверстий в тонких металлических пленках под действием острофокусированных наносекундных лазерных импульсов / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Кучмижак, А.Г. Савчук, А.А. Непомнящий, П.А. Данилов, Д.А. Заярный, А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, С.В. Макаров, А.А. Руденко, В.И. Юровских, А.А. Самохин // *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* – 2014. – Т. 146, вып. 1. – С. 21–30.

20. Through nanohole formation in thin metallic film by single nanosecond laser pulses using optical dielectric apertureless probe / Y.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.A. Kuchmizhak, A.V. Nepomnyashchii, A.G. Savchuk, A.A. Ionin, S.V. Makarov // *Opt.Lett.* – 2013. – Vol. 38, iss. 9. – P. 1452–1454.

21. Scattering focusing and localized surface plasmons in a single Ag nanoring / Q. Zhang, X.-Y. Shan, L. Zhou, T.-R. Zhan, C.-X. Wang, M. Li, J.-F. Jia, J. Zi, Q.-Q. Wang, Q.-K. Xue // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97. – P. 261107.

22. Confining Standing Waves in Optical Corrals / Y. Babayan, J.M. McMahon, S. Li, S.K. Gray, G.C. Schatz, T.W. Odom // *ASC Nano.* – 2009. – Vol. 3. – P. 615.

23. Crystal Structure and Optical properties of silver nanoring / L. Zhou, X.-F. Fu, L. Yu, X. Zhang, X.-F. Yu, Z.-H. Hao // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – P. 153102.

24. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals // *Phys. Rev. B.* – 1972. – Vol. 6. – P. 4370.

References

1. Nordlander P. The Ring: A Leitmotif in Plasmonics. *ASC Nano* 3, 2009, vol. 3, pp. 488-492.

2. Aizpurua J., Hanarp P., Sutherland D.S., Kall M., Bryant G.W., De Abajo F.G. Optical Properties of Gold Nanorings. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, vol. 90, pp. 057401.

3. Hao F., Nordlander P., Burnett M.T., Maier S.A. Enhanced Tunability and Linewidth Sharpening of Plasmon Resonances in Hybridized Metallic Ring/Disk Nanocavities. *Phys. Rev. B*, 2007, vol. 76, pp. 245417.
4. Kim S., Jun J.-M., Choi D.-G., Jung H.-T., Yang S.-M. Patterned Arrays of Au Rings for Localized Surface Plasmon Resonance. *Langmuir*, 2006, vol. 22, pp. 7109.
5. Gong H.-M., Zhou L., Su X.-R., Xiao S., Liu S.-D., Wang Q.-Q. Illuminating Dark Plasmons of Silver Nanoantenna Rings to Enhance Exciton–Plasmon Interactions. *Adv. Funct. Mater.*, 2009, vol. 19, pp. 298.
6. Chiu K.P., Lai K.F., Tsai D.P. Application of Surface Polariton Coupling between Nano Recording Marks to Optical Data Storage. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, pp. 13885.
7. Jung K.-Y., Texeira F.L., Reano R.M. Au/SiO₂ Nanoring Plasmon Waveguides at Optical Communications Band. *J. Lightwave Technol.*, 2007, vol. 25, p. 2757.
8. Larsson E.M., Alegret J., Kall M., Sutherland D.S. Sensing Characteristics of NIR Localized Surface Plasmon Resonances in Gold Nanorings for Application as Ultrasensitive Biosensors. *Nano Lett.*, 2007, vol. 7, pp. 1256.
9. Moening J.P., Thanawala S.S., Georgiev D.G. Formation of high-aspect-ratio protrusions on gold films by localized pulsed laser irradiation. *Appl. Phys. A*, 2009, vol. 95, pp. 635.
10. Koch J., Korte F., Bauer T., Fallnich C., Chichkov B.N. Nanotexturing of gold films by femtosecond laser-induced melt dynamics. *Appl. Phys. A*, 2005, vol. 81, pp. 325.
11. Reininghaus M., Wortmann D., Cao Z., Hoffmann J.M., Taubner T. Fabrication and spectral tuning of standing gold infrared antennas using single fs-laser pulses. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, pp. 32176.
12. Kuchmizhak A.A., Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Savchuk A.G., Makarov S.V., Kudryashov S.I., Ionin A.A. Optical apertureless fiber microprobe for surface laser modification of metal films with sub-100nm resolution. *Opt. Comm.*, 2013, vol. 308, pp. 125-129.
13. Zywiets U., Evlyukhin A.B., Reinhardt C., Chichkov B.N. Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses. *Nat. Comm.*, 2014, vol. 5, pp. 3402.
14. Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V., Rudenko A.A., Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Efimov T.V., Kuchmizhak A.A. Flash-imprinting of intense femtosecond surface plasmons for advanced nanoantenna fabrication. *Opt. Lett.*, 2015, vol. 40.

15. Nakata Y., Miyanaga N., Momoo K., Hiromoto T. Solid-liquid-solid process for forming free-standing gold nanowhisker superlattice by interfering femtosecond laser irradiation. *Appl. Surf. Sci.*, 2013, vol. 274, pp. 27-32.

16. Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Emel'yanov V.I., Ionin A.A., Kudryashov S.I., Makarov S.V. Formation of crown-like and related nanostructures on a thin supported gold film irradiated by single diffraction-limited nanosecond laser pulses. *Phys. Rev. E.*, 2014, vol. 90, pp. 023017.

17. Nakata Y., Tsuchida K., Miyanaga N., Furusho H. Liquidly process in femtosecond laser processing. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, vol. 255, pp. 9761.

18. Unger C., Koch J., Overmeyer L., Chichkov B.N. Time-resolved studies of femtosecond-laser induced melt dynamics. *Opt.Express*, 2012, vol. 20, pp. 24864.

19. Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Savchuk A.G., Nepomnyashchii A.A., Danilov P.A., Samokhin A.A. Formirovanie nanopichkov i nanootverstii v tonkikh metallicheskih plenках pod deistviem ostrofokussirovannykh nanosekundnykh lazernykh impul'sov [Formation of nanobumps and nanoholes in thin metal films by strongly focused nanosecond laser pulses]. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 2014, vol. 146, iss. 1, pp. 21-30.

20. Kulchin Y.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Nepomnyashchii A.V., Savchuk A.G., Ionin A.A., Makarov S.V. Through nanohole formation in thin metallic film by single nanosecond laser pulses using optical dielectric apertureless probe. *Opt.Lett.*, 2013, vol. 38, iss. 9, pp. 1452-1454.

21. Zhang Q., Shan X.-Y., Zhou L., Zhan T.-R., Wang C.-X., Li M., Jia J.-F., Zi J., Wang Q.-Q., Xue Q.-K. Scattering focusing and localized surface plasmons in a single Ag nanoring. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 97, pp. 261107.

22. Babayan Y., McMahon J.M., Li S., Gray S.K., Schatz G.C., Odom T.W. Confining Standing Waves in Optical Corrals. *ASC Nano*, 2009, vol. 3, pp. 615.

23. Zhou L., Fu X.-F., Yu L., Zhang X., Yu X.-F., Hao Z.-H. Crystal Structure and Optical properties of silver nanoring. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 94, pp. 153102.

24. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals. *Phys. Rev. B*, 1972, vol. 6, pp. 4370.

Получено 10.06.2015