

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт
спектроскопии Российской академии
наук (ИСАН)

д.ф.-м.н., проф.
Задков Виктор Николаевич

«05» декабря 2017 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Нгуен Тхи Хуен Чанг
«Создание массивов нано- и микроотверстий в тонких металлических пленках и
исследование их оптических свойств»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико–математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Массивы нано- и микроотверстий являются одними из ключевых объектов современной наноплазмоники и нанопотоники, поскольку обладают уникальными оптическими, нелинейно оптическими и спектральными свойствами. Высокая **актуальность** выбранной темы диссертации связана с отсутствием на сегодняшний день развитых подходов создания и контроля больших массивов упорядоченных нано/микроотверстий. Решение этой задачи является ключевым фактором в развитии различных приложений наноплазмоники, биосенсорики, оптофлюидики, нанопотоники.

Одним из ярких проявлений уникальных оптических свойств матрицы наноотверстий, изготовленных в плоской металлической наноплёнке, является экстраординарно большое пропускание света через эти отверстия. Как показывают измерения, высокие значения оптического пропускания света в этом случае существенно превышают геометрическое прохождение света через наноотверстия, что связано с плазмонным каналом передачи энергии с одной стороны поверхности плёнки на другую. Эффективность передачи энергии в такой схеме оказывается чрезвычайно чувствительна к величине локального показателя преломления среды, граничащей с наноотверстиями. Поэтому, с момента обнаружения эффекта экстраординарного пропускания света (ЭПС) через массив упорядоченных субволновых отверстий в тонкой металлической пленке, в сравнении с пропусканием через единичные отверстия, не прекращаются исследования возможности применения данного эффекта в наноплазмонике, в частности, для задач

сенсорики. Отметим существующую сложность практической реализации эффекта ЭПС, связанную с сильной зависимостью оптических свойств упорядоченных массивов нано- и микроотверстий от диаметра отверстий, формы отверстий, значения периода их пространственного расположения, толщины пленки.

Существует ряд подходов к созданию массивов отверстий, основанных на использовании литографических процессов (ионная, электронная, и фото-литография). Однако, возможности применения этих подходов сильно ограничены размером создаваемых образцов, технологической сложностью многостадийных литографических процессов, высокой стоимостью процесса производства. Одним из альтернативных подходов создания нано- и микроотверстий в тонких металлических пленках, обладающий рядом существенных преимуществ, является использование остро сфокусированных лазерных импульсов.

Диссертация Нгуен Тхи Хуен Чанг посвящена сверхскоростному созданию больших упорядоченных массивов нано- и микроотверстий в тонких металлических пленках с использованием сильносфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов. Кроме этого, в диссертационной работе проведены исследования спектральных и плазмонных свойств образцов массивов упорядоченных субволновых наноотверстий в ИК-диапазоне. Убедительно показана возможность практического применения плазмонных свойств таких образцов для задач хемо- и биосенсорики, в том числе - на примере детектирования малых концентраций бактерий золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*).

Работа состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения и списка цитированной литературы из 177 наименований. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, включая 69 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, научная новизна работы, достоверность, практическая и научная значимость работы. Также определяются цели и задачи диссертационной работы, приведены защищаемые положения и основные научные результаты.

В первой главе, являющейся обзором литературы, представлен критический анализ работ по формированию нано- и микроотверстий литографическими методами и лазерным импульсом, а также применению массивов нано- и микроотверстий в ИК-сенсорике и других областях науки и техники. Кроме этого, рассмотрены общие оптические свойства

массивов нано- и микроотверстий – такие, как экстраординарное пропускание света, локализованные поверхностные плазмоны и усиление ИК-поглощения света.

Вторая глава посвящена подробному описанию схем экспериментальных установок, методик проведения экспериментов и измерений, приведены использовавшееся в экспериментах оборудование и материалы, а также основные программы для обработки экспериментальных данных.

В третьей главе даны основные экспериментальные результаты исследований по выбору энергетических и скоростных режимов при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на тонкие металлические пленки (сплав Au/Pd, Ag, Al, Cu) в режиме формирования отдельных микроотверстий или их последовательностей с различными параметрами. Исследованы зависимости основных параметров нано- и микроотверстий (диаметр, период) от условий фокусировки, плотности энергии лазерного излучения и частоты следования импульсов, а также длительности экспозиции фемтосекундных лазерных импульсов. Описано формирование больших массивов микроотверстий с диаметром 2 – 4 мкм и периодом 5 – 8 мкм в тонких металлических пленках (сплав Au/Pd, Ag, Al, Cu) с варьируемой толщиной.

В четвертой главе исследованы спектральные свойства массивов микроотверстий, сформированных с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. В частности, подробно исследованы коэффициенты пропускания и отражения света через решетки из микроотверстий в зависимости от толщины и типа пленки, размеров (диаметра, периода) микроотверстий в ИК диапазоне.

Одним из интересных результатов диссертационной работы, является демонстрация высокого усиления ИК-поглощения света красителем родамин 6Ж в диапазоне 1400 – 1600 см⁻¹ на решетках микроотверстий периодом 6 мкм, изготовленных в наноплёнках из различных материалов. Так, для плёнок сплава золота с палладием, максимальное усиление соответствовало 10 крат, в то время как для серебряных плёнок, максимальное усиление составило значение около 455 крат с максимумом на длине волны 1261 см⁻¹. Другим значимым результатом работы, имеющим высокую практическую ценность, является демонстрация возможности применения полученных массивов микроотверстий для детектирования малых концентраций бактерий золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*).

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

Достоинством диссертации является актуальность темы, практическая значимость и высокий экспериментальный уровень выполненных работ. Новизной полученных экспериментальных результатов являются формирование больших массивов микроотверстий лабораторных масштабов – порядка нескольких мм в размере – и исследование их оптических свойств.

Достоверность результатов не вызывает сомнений ввиду использованного сертифицированного оборудования, хорошей воспроизводимости данных, их принятия научным сообществом в виде 8 докладов на российских и международных конференциях и 5 научных статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Результаты, полученные в диссертации Нгуен Тхи Хуен Чанг могут быть использованы в ФИАН, ФГУП «ВНИИА», МГУ, МФТИ, университете ИТМО и ряде других научных учреждений для задач сенсорики.

Следует отметить некоторые недостатки, имеющиеся в работе.

1. Практически важные свойства массивов наноотверстий сильно зависят от качества используемых наноплёнок. В диссертационной работе отсутствуют измерения плазмонных потерь используемых наноплёнок.
2. Одной из проблем создания отверстий с помощью остророфокусированного лазерного излучения, является сложность изготовления отверстий с гладкой внутренней поверхностью образованного отверстием канала. Как показано в настоящей диссертационной работе, поверхность таких наноканалов, как правило, состоит из большого числа субволновых структур, особенно на выходе из канала. Такие субволновые структуры могут обладать плазмонными резонансами, сильно увеличивающими плазмонные потери матрицы отверстий в целом. В диссертационной работе нет соответствующего анализа и характеристики влияния геометрии таких структур на потери плазмонных резонансов.
3. Используемый в работе краситель имеет ограниченное число актов поглощения – испускания фотонов, что приводит к известной проблеме его «выцветания». В работе не приведены детали измерения пропускания с использованием красителя, в частности, нет ясности влияния эффекта «выцветания» используемого красителя на полученные результаты.

4. В диссертационной работе нет анализа минимально детектируемой концентрации бактерий золотистого стафилококка, факторов, ограничивающих полученную чувствительность сенсора.

5. Диссертационная работа содержит орфографические опечатки, в некоторых местах необходима коррекция пунктуации.

Отмеченные недостатки, однако, носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы.

Тематика диссертационной работы соответствует специальности «Оптика». Текст автореферата правильно отражает ее содержание. Список цитируемой литературы соответствует содержанию.

Все вышесказанное дает основание считать, что представленная диссертация «Создание массивов нано- и микроотверстий в тонких металлических пленках и исследование их оптических свойств», представленная Нгуен Тхи Хуен Чанг, является законченным научным исследованием, по своей тематике полностью соответствует заявленной специальности и удовлетворяет всем условиям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней, утвержденном постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а автор работы Нгуен Тхи Хуен Чанг, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Доклад по материалам диссертации был представлен автором 17 октября 2017 года на Семинаре № 1070 отдела лазерной спектроскопии ИСАН.

Отзыв на диссертацию составлен ведущим научным сотрудником лаборатории лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), Мелентьевым Павлом Николаевичем и одобрен на семинаре № 1070 отдела лазерной спектроскопии ИСАН 17 октября 2017 г.

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН
кандидат физико-математических наук

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии



Мелентьев Павел Николаевич

Российской академии наук (ИСАН)
108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5
телефон: 8 (495) 851-02-33
e-mail: melentiev@isan.troitsk.ru

Заведующий отделом
лазерной спектроскопии ИСАН
профессор, доктор физико-математических наук

Рябов Евгений Артурович

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)
108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5
Тел: 8 (495) 851-02-31
E-mail: ryabov@isan.troitsk.ru

Подписи сотрудников ИСАН Мелентьева П.Н.

и Рябова Е.А. заверяю.

Учёный секретарь ИСАН,

кандидат физико-математических наук



Перминов Евгений Борисович

Список основных публикаций сотрудников ИСАН по теме диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. P. Melentiev, A. Kalmykov, A. Gritchenko, A. Afanasiev, V. Balykin, A. Baburin, E. Ryzhova, I. Filippov, I. Rodionov, I. Nechepurenko, A. Dorofeenko, I. Ryzhikov, A. Vinogradov, A. Zyablovsky, E. Andrianov, and A.A. Lisyansky, "Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics", *Appl. Phys. Lett.* **111**, 213104 (2017).
2. V.N. Konopsky, et al. "Phase-matched third-harmonic generation via doubly resonant optical surface modes in 1D photonic crystals." *Light: Science & Applications* **5**, e16168 (2016).
3. I. Valuev, et al. "FDTD subcell graphene model beyond the thin-film approximation." *Applied Physics A* **123**, 60 (2017).
4. P. N. Melentiev, A. A. Kuzin, V. I. Balykin, A. I. Ignatov and A. M. Merzlikin "Dielectric-loaded plasmonic waveguide in the visible spectral range", *Laser Phys. Lett.* **14**, 126201 (2017).
5. P.N. Melentiev, A.E. Afanasiev, V.I. Balykin, "Single plasmonic split hole resonator nanostructure as an efficient nanoscale light source", *Quantum Electron.* **47**, 818 (2017).
6. V. Konopsky, "Long-range surface plasmon amplification with current injection on a one-dimensional photonic crystal surface." *Optics letters* **40.10** (2015): 2261-2264.
7. Lozovik, Yu E., et al. "Intracavity absorption spectroscopy based on graphene spaser." *Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS), 2015 9th International Congress on. IEEE, 2015.*
8. A.E. Afanasiev, P.N. Melentiev, A.A. Kuzin, A.Yu. Kalatskiy, V.I. Balykin "Quantum transport of a single photon through a subwavelength hole by a single atom" *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **125**, 372-383 (2017).
9. E.V. Alieva, et al. "Blue surface plasmon propagation along thin gold film–gas interface and its use for sensitive nitrogen dioxide detection." *Optics Communications* **309**, 148-152 (2013).
10. A.Yu. Kalatskiy, A.E. Afanasiev, P.N. Melentiev and V.I. Balykin "Frequency stabilization of a diode laser on the $5P \rightarrow 5D$ transition of the Rb atom", *Laser Physics*, **27**, p.055703 (2017)
11. V.N. Konopsky, et al. "Photonic crystal biosensor based on optical surface waves." *Sensors* **13**, 2566-2578 (2013).
12. P.N. Melentiev, A.A. Kuzin, V.I. Balykin, "Control of SPP propagation and focusing through scattering from nanostructures", *Quantum Electronics* **47** (3) 266 – 271 (2017)
13. P. N. Melentiev, A. A. Kuzin, A. S. Gritchenko, A. S. Kalmykov, V. I. Balykin "Femtosecond Plasmon Interferometer", *Optics Communications* **382**, 509 (2017). DOI: 10.1016/j.optcom.2016.07.061
14. L. Wang, A.S. Shorokhov, P.N. Melentiev, S. Kruk, M. Decker, C. Helgert, F. Setzpfandt, A.A. Fedyanin, Y.S. Kivshar, and D.N. Neshev, "Multipolar third-harmonic generation in fishnet metamaterials", *ACS Photonics* **3**, 1494-1499 (2016); DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00040 (2016)
15. A.E. Afanasiev, P.N. Melentiev, A.A. Kuzin, A.Yu. Kalatskiy and V.I. Balykin, «Photon transport through a nanohole by a moving atom» *New J. Phys.* **18**, 053015 (2016).