

Е 2021  
Е 2136

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ  
XXXI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 05 июля - 10 июля 2021 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва - 2021



13970160

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

# ТРУДЫ

XXXI МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 05-10 июля 2021 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,  
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.



В 372

## СОЗДАНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СУБМИКРОСТРУКТУР ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИК ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Асадчиков В.Е.<sup>1</sup>, Бедин С.А.<sup>1</sup>, Васильев А.Б.<sup>1</sup>, Дьячкова И.Г.<sup>1</sup>, Назьмов В.П.<sup>2,3</sup>, Андреев А.В.<sup>4</sup>, Коновко А.А.<sup>4</sup>, Потёмкин Ф.В.<sup>4</sup>, Мигаль Е.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Москва, Россия, sig74@mail.ru)

<sup>2</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

<sup>3</sup> Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (Новосибирск, Россия)

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)

### Введение

Последние годы активно ведутся работы, связанные с улучшением эффективности регистрации ИК-излучения, а именно с повышением обнаружительной способности фотодетекторов. Основные направления данных работ сфокусированы на создании плазмонных, фотонно-кристаллических и комбинированных структур, а также микрорезонаторов, антиотражательных покрытий, оптических наноантенн [1-6]. Все указанные методы являются весьма перспективными для увеличения эффективности работы детекторов ИК-излучения, однако не лишены ряда недостатков, в том числе и фундаментального характера [7, 8]. Альтернативой им являются металлические конусы, плазмонный резонанс которых наблюдается в широком спектральном диапазоне. Применение таких структур может позволить увеличить интенсивность ближнего поля на 2–3 порядка [9].

Острые структуры, кроме того, обладают двумя важными особенностями: с ростом кривизны заряженной поверхности возрастает напряженность электрического поля, острая форма нарушает симметрию свойств однородного металла и тем самым открывается возможность генерации второй гармоники [10, 11].

Данная работа направлена на решение комплексной задачи, включающей разработку методологических основ и способов создания периодических поверхностных микро и наноструктур на площадях размеров порядка десятков квадратных сантиметров, а также развитие методов нелинейного преобразования ИК излучения в видимый и ближний ИК



диапазоны на основе таких структур с целью повышения эффективности детектирования и управления спектральными и угловыми характеристиками.

#### Методы и материалы

В работе впервые был проведен синтез регулярных металлических острых структур с заданными морфологическими характеристиками с использованием модифицированных при облучении полимерных пленок. Для этого были определены условия облучения на синхротронном источнике полимерной пленки через маску с регулярно расположенными калиброванными отверстиями для получения регулярной и протяженной трековой структуры. Облучение проводилось на станции LIGA, установленной на источнике СИ ВЭПП-3 [12]. Энергия электронов варьировалась в диапазоне от 1 до 2 ГэВ. Тепловое уширение рентгеновской маски устранялось путем эффективного охлаждения. Параметры облучения были выбраны таким образом, что облучаемая пленка находилась в непосредственной близости от маски. Экспозиционная доза составляла 14380 мА/мин. Диаметр отверстия в поглощающем слое рентгеновской маски был порядка 1 мкм с периодом отверстий порядка 4 мкм (рис. 1).

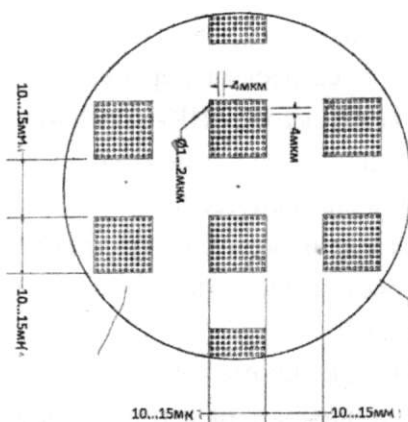


Рис.1. Схема рентгеновской маски.

Качество получаемой поровой структуры образцов отслеживалось с помощью растровых электронных микроскопов (РЭМ) FEI Scios (30 кВ) и FEI Quanta 200 3D (30 кВ) с энергодисперсионным детектором EDAX (рис. 2). Также были получены изображения структур методом оптической микроскопии на поляризационном микроскопе Nikon LV100 на просвет с объективом Планахромат 100 $\times$  (рис. 3).

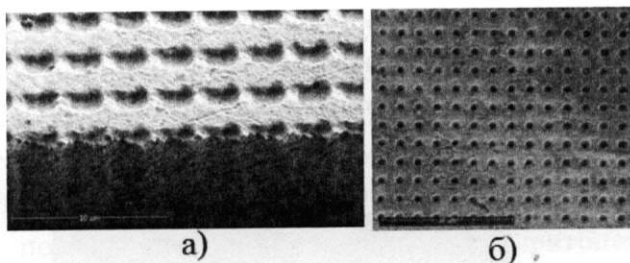


Рис.2. РЭМ изображение скола пленки (а) и полученной пленки с микропорами (б).

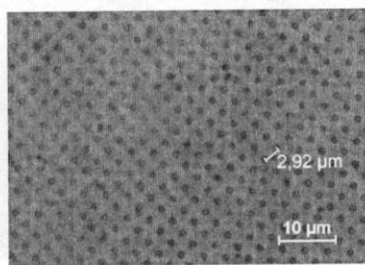


Рис. 3. Оптическая микрофотография поверхности трековой мембраны с регулярными порами.

Далее были проведены эксперименты по синтезу периодических металлических острых микроструктур на базе полимерных мембран с регулярными порами. Для изготовления металлических структур на одну из сторон пленки напыляли тонкий слой золота до образования токопроводящего покрытия. На него в дальнейшем было нанесено медное покрытие. Для его нанесения был использован специально подобранный электролит. После этого полимерная пленка стравливалась. РЭМ изображение полученных острых структур представлено на рис. 4. Видно, что они состоят из микроострий металлов при линейных размерах острий и периоде повторяемости порядка единиц микрометров.

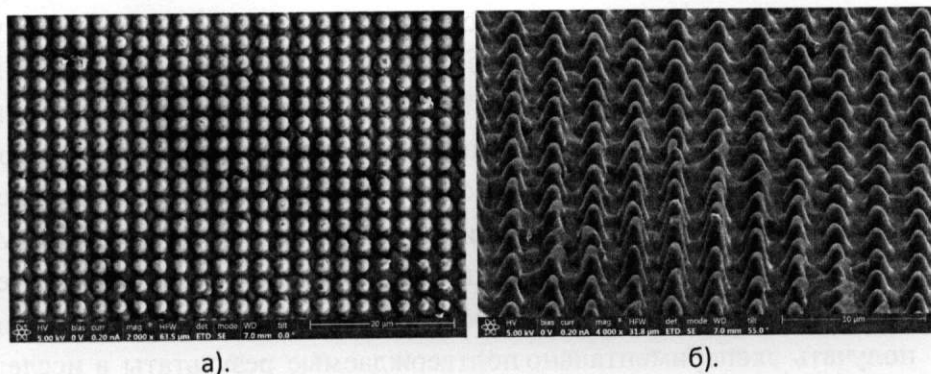


Рис. 4. РЭМ изображение полученных острых структур: а) – вид сверху, б) – вид сбоку.

Контроль периодичности синтезированных структур проверялся по наличию дифракции в оптическом диапазоне (рис. 5). Наблюдаемая картина указывает на высокую степень совершенства получаемых образцов.



Рис. 5. Изображение оптической дифракционной картины на полученной регулярной структуре.

#### Теоретическая модель

Было проведено развитие модели линейного оптического взаимодействия периодических поверхностных микро- и нано-структур с ИК излучением на основе метода связанных Фурье-мод для двумерных дифракционных решеток (однослойные решетки с модуляцией по двум направлениям). Модель была доработана для моделирования структур с острым профилем модуляции диэлектрической проницаемости. В настоящей работе используется единичный дифракционный слой с эффективным тензором диэлектрической проницаемости. Классический подход с представлением сложного профиля дифракционных решеток в виде нескольких слоёв с профилем модуляции диэлектрической проницаемости, подходящим для использования в методе связанных Фурье-мод, заключается в разбиении изначального дифракционного слоя и его гладкого профиля модуляции диэлектрической проницаемости на достаточное для корректного описания изначального профиля рельефа количество дифракционных слоёв с прямоугольным профилем модуляции диэлектрической проницаемости. Данный подход, вкуче с использованием ряда оптимизационных техник, направленных на сглаживание ступенчатости получающегося профиля дифракционного слоя, позволяет получать экспериментально подтверждаемые результаты в исследованиях трехмерных диэлектрических дифракционных решеток, направленных в том числе на изучение структуры ближнего поля наноструктур под воздействием импульсного и непрерывного лазерного излучения.

Предложенная в работе методика синтеза поверхностных микро- и наноструктур позволяет создавать образцы из серебра, золота, железа и меди. Высота структур может варьироваться от 1 мкм до 10 мкм. Для указанных материалов были проведены расчеты спектрального углового (угол падения  $\theta$  и азимутальный угол  $\phi$ ) положения резонансов, связанных с поверхностными плазмонными поляритонами, возникающими на таких решетках в первом порядке дифракции на длинах волн 1.24 мкм, 2.8 мкм, 4.3 мкм для решеток с периодами 2.83 мкм и 4.00 мкм. Проведены расчеты энергетического коэффициента зеркального отражения, который измерялся в эксперименте в зависимости от длины волны и угла падения при фиксированном азимутальном угле, а также в зависимости от угла падения и азимутального угла при фиксированной длине волны. Проведено моделирование пространственного распределения квадрата модуля отношения напряженности локального электрического поля к напряженности электрического поля падающей волны на поверхности периодической структуры в условиях возбуждения плазмонного резонанса.

Также проведено сравнение полученных экспериментально зависимостей коэффициента зеркального отражения от угла падения с теоретическими расчетами (рис. 6). Следует отметить хорошее качественное сходство графиков – спектральные положения особенностей совпадают. Количественные отличия обусловлены следующим обстоятельством. При сохранении периода расположения острий их высота и форма на одном и том же образце несколько отличаются на разных участках образца. Кроме того, высота медных острий в данном эксперименте не превышала величины 2 мкм.

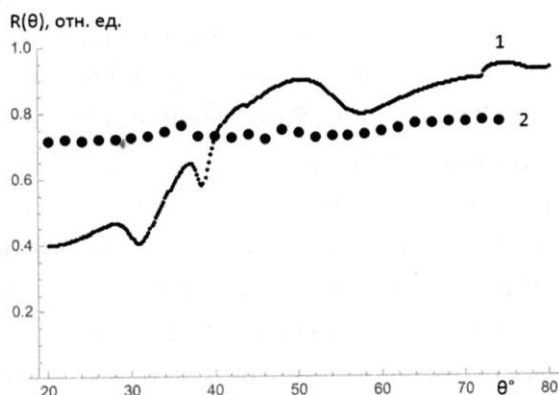


Рис. 6. Сравнение значений коэффициента зеркального отражения рассчитанных численно (1) с полученными экспериментально (2).

С учетом изложенного была исследована возможность генерации гармоник лазерного излучения (рис. 7). Использовался лазерный источник с длиной волны 1,2 мкм. Мощность излучения составляла  $5 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что спектр отражения несколько искажен ввиду наличия собственной линии возбуждения меди. Однако соотношение интенсивностей гармоник сохраняется, и для обеих гармоник эти интенсивности значительно выше, чем для немодифицированной медной подложки. Заметен также сигнал, возникающий от возбуждения азота, содержащегося в воздухе.

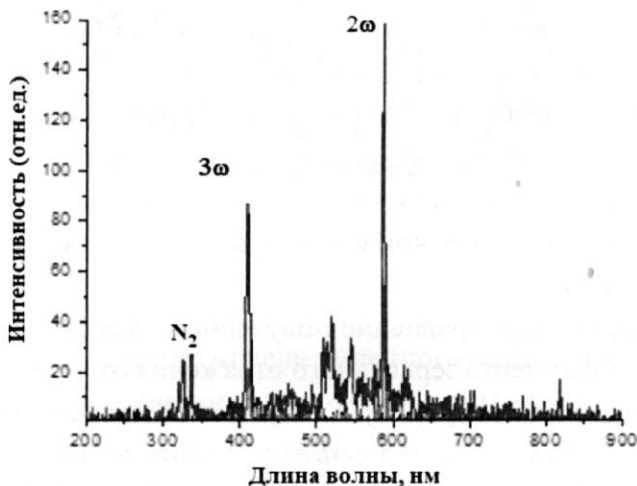


Рис. 7. Спектры сигнала, отраженного от поверхности мишени при взаимодействии с подложкой (красная кривая) и при воздействии (синяя кривая) со структурированной поверхностью.

### Выводы

В работе впервые был проведен синтез регулярных металлических острых структур с заданными морфологическими характеристиками с использованием модифицированных при облучении полимерных пленок. Была развита модель линейного оптического взаимодействия периодических острых структур с ИК излучением. Полученные экспериментальные результаты соответствуют предложенной теоретической модели. В дальнейшем необходима более тщательная проработка условий взаимодействия излучения с исследуемым элементом.

Результаты показали, что больший интерес представляет использование полученных структур в геометрии на пропускание, так как, с одной стороны, имеется возможность усиления сигнала оптических гармоник, а с другой — происходит увеличение лучевой прочности образца. Разработанные микроструктуры могут быть применены при создании оптических элементов с селективными свойствами.



Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках проведения исследований по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части выращивания и исследования металлических микроструктур, Гранта РФФИ 18-29-20090 в части получения регулярных мембран для решения задач фотоники и Гранта РФФИ 18-02-00528 в части разработки алгоритма расчета дифракции на поверхностной микроструктуре и проведения математического моделирования оптических характеристик полученных структур. Облучение полимерной пленки было выполнено в ИЯФ СО РАН с использованием инфраструктуры ЦКП «СЦСТИ» на базе источника СИ ВЭПП-3 и на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000", поддержанное проектом RFMEFI62119X0022.

#### Литература

1. Tan C.L., Mohseni H. // *Nanophotonics*. 2017. V. 7. P. 169.
2. Franzen S. // *J. Phys. Chem. C*. 2008. V. 112. P. 6027.
3. Atwater H.A., Polman A. // *Nat. Mater.* 2010. V. 9. P. 205.
4. Shvets G., Urzhumov Y.A. // *J. Opt. A. Pure Appl Opt.* 2005. V. 7. P. S23.
5. Derkacs D., Lim S., Matheu P. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 093103.
6. Краснок А.Е., Максимов И.С., Денисюк А.И. и др. // *Успехи физ. наук*. 2013. Т. 183. С. 561.
7. Schuller J.A., Barnard E.S., Cai W. et al. // *Nat. Mater.* 2010. V. 9. P. 193.
8. Mao F., Xie J., Xiao S. et al. // *Opt. Express*. 2013. V. 21. P. 295.
9. Wang Y., Plouraboue F., Chang H.-C. // *Opt. Express*. 2013. V. 21. P. 6609.
10. Dutto F., Heiss M., Lovera A. et al. // *Nano Lett.* 2013. V. 13. P. 6048.
11. Hoogh A., Opheij A., Wulf M. et al. // *ACS Photonics*. 2016. V. 3. P. 1446.
12. Goldenberg B.G., Lemzyakov A.G., Nazmov V.P. et al. // *Physics Procedia*. 2016. V. 84. P. 205.