

УДК 535.015

## ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЗАВИСИМАЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ГИБРИДНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ ЗОЛОТО-КРЕМНИЕВАЯ НАНОАНТЕННА

Кустов П.Н. (ИТМО), Ярошенко В.В. (ИТМО), Сандомирский М.П. (ИТМО), Петрова Е.А. (ИТМО)

Научный руководитель – к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Зуев Д.А. (ИТМО)

**Введение.** Способность нанообъектов резонировать с внешними оптическими полями и реагировать на них по сей день вызывает большой интерес и волнение в научном сообществе. Эти оптические свойства открывают целый мир возможностей для практических применений, таких как передовые сенсорные технологии, системы хранения данных, лазеры, метки безопасности и т. д. Более того, это позволяет манипулировать энергией света и направлять ее через цепочки наночастиц, что приводит к созданию эффективных микрооптических устройств, использующих, например, поверхностные плазмон-поляритоны.

Одним из таких свойств является рассеяние, основанное на резонансах Ми. Общеизвестно, что спектральные положения и добротность этих резонансов зависят от размера, формы и условий окружающей среды наночастиц. Эти аспекты дают возможность управлять и регулировать оптический отклик наночастиц. Например, в работе Pidgayko et al. [1] авторы теоретически описали гибкое управление относительными амплитудами магнитного и электрического дипольных моментов и их интерференцию, изменяя угол падения света на кремниевую наносферу, расположенную на кремниевой подложке, и толщину самой этой подложки. Однако в данной работе и подобных ей, приложения, основанные на этом эффекте, еще не были показаны.

В данной работе мы предлагаем гибридные резонансные наноантенны из золота и кремния в качестве единичных элементов для защиты от подделки. Эти структуры были необратимо модифицированы фемтосекундным лазерным облучением, что отразилось на их геометрических параметрах и оптических свойствах соответственно. Такие изменения по-разному проявляются в спектрах рассеяния при освещении ТЕ- и ТМ-поляризациями. В результате чего, на основе этого явления предложена скрытая метка безопасности.

**Основная часть.** Массивы гибридных наноантенн, представляющих из себя золотой нанодиск, помещенный на вершину усеченного кремниевого наноконуса, были изготовлены с помощью сочетания электронно-лучевой литографии, испарения металла, процедуры отрыва и газофазного химического травления. Результатом литографии стали наноантенны со следующими геометрическими параметрами: диаметр золотых нанодисков и оснований кремниевых наноконусов составляет  $\approx 170 \pm 10$  нм, высота кремниевых наноконусов  $\approx 170$  нм, период массива  $\approx 1$  мкм, а общий размер каждого массива  $19 \times 19$  мкм. Причиной выбора таких небольших структур с относительно небольшим расстоянием между ними стала миниатюризация. Несмотря на выбранные геометрические параметры массивов наноантенн мы реализовали их лазерную обработку и измерения рассеяния. Для лазерной модификации наноантенн нами был выбран режим фемтосекундного облучения, в связи с достаточно высокой энергией лазерного импульса, и так как такой режим уже не раз доказывал свою эффективность при кристаллизации кремния [2], а также изменении формы плазмонных наночастиц [3]. Для лазерной модификации использовалась фемтосекундная лазерная система ТЕМА-150 (Avesta) со средней мощностью излучения 7 Вт, длиной волны 1050 нм, длительностью импульса 150 фс и частотой повторений 80 МГц. Фемтосекундное излучение фокусировалось объективом Mitutoyo M Plan APO NIR HR 100x с числовой апертурой (NA) 0,7 снизу относительно образца. Плотность потока излучения была выбрана  $30$  мДж/см<sup>2</sup>.

Воздействие фемтосекундного лазерного излучения на наноантенны повлияло как на их геометрические параметры, так и на спектры рассеяния. С геометрической точки зрения золотой нанодиск уменьшился в диаметре, что подтвердилось при исследовании в

сканирующей электронной микроскопии (Carl Zeiss, Neon 40). Для наблюдения изменений в рассеянии образец освещался широкополосным излучением ТЕ- и ТМ-поляризации от галогенной лампы (HL-2000-FHSA) под углом 65 градусов к нормали поверхности, который был сфокусирован с помощью объектива M Plan Apo, Mitutoyo 10x с коррекцией на бесконечность с NA= 0,26, а рассеянный сигнал собирался с помощью объектива (Mitutoyo M Plan APO NIR HR 100x, NA = 0,7) для получения достаточно высокого разрешения. В такой геометрии четко наблюдалось, что при ТЕ-поляризованном освещении решетки изменений практически не происходит. Однако в ТМ-поляризации видно, что существует разница между модифицированными и исходными наноантеннами. Рассматривая спектры рассеяния исходной и модифицированной наноантенн, видно, что в ТЕ-поляризации изменение действительно небольшое, однако для ТМ-поляризации разница критична. На основе данного явления впервые была предложена скрытая защитная метка.

**Выводы.** Мы предложили концепт скрытой защитной метки с лабораторным методом считывания на основе резонансных гибридных золото-кремниевых наноантенн. Впервые экспериментально показано, что фемтосекундное лазерное манипулирование геометрическими параметрами наноантенн приводит к очень чувствительному управлению спектрами рассеяния в ТЕ- и ТМ-поляризациях. Дальнейшие исследования данного оптического эффекта с теоретической точки зрения будут рассмотрены на следующем этапе нашей работы с использованием мультипольного разложения и соответственно исследования мультиполей, индуцированных внутри наноантенны.

#### **Список использованных источников:**

1. Pidgayko D. A., Sadrieva Z. F., Ladutenko K. S., Bogdanov A. A. Polarization-controlled selective excitation of Mie resonances in a dielectric nanoparticle on a coated substrate // *Phys. Rev. B.* – 2020. – № 102(24). – С. 245406.
2. Kustov P., Petrova E., Nazarov M., Gilmullin A., Sandomirskii M., Ponkratova E., Yaroshenko V., Ageev E., Zuev D. Mie-resonant Silicon nanoparticles for physically unclonable anti-counterfeiting labels // *ACS Appl. Nano Mater.* – 2022. – №5(8). – С. 10548–10559.
3. Zhang A., Feng J., Yan J., Hu M., Zhang L., Zeng H. Laser reshaping of gold nanoparticles for highly sensitive SERS detection of ciprofloxacin // *Appl. Surf. Sci.* – 2022. – №583. – С. 152543.

Кустов П. Н. (автор)

Подпись

Зуев Д. А. (научный руководитель)

Подпись