

# Ближнеполевые эффекты в узлах золотой наносети, выращенной лазерной абляцией в сверхтекучем гелии: кроссовер между “горячими точками” типа “острие” и “зазор”

М. Е. Степанов<sup>a,1)</sup>, С. А. Хоркина<sup>a,b</sup>, А. И. Аржанов<sup>a,f</sup>, А. В. Карабулин<sup>c,d</sup>, В. И. Матюшенко<sup>e</sup>, А. В. Наумов<sup>a,f</sup>

<sup>a</sup>Московский педагогический государственный университет (МПГУ), 119435 Москва, Россия

<sup>b</sup>Международный научно-образовательный центр физики наноструктур, Университет ИТМО, 197101 С.-Петербург, Россия

<sup>c</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, Россия

<sup>d</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

<sup>e</sup>Филиал федерального исследовательского центра химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 142432 Черноголовка, Россия

<sup>f</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение (ТОП ФИАН), 108840 Троицк, Москва Россия

Поступила в редакцию 14 июня 2024 г.

После переработки 18 июля 2024 г.

Принята к публикации 18 июля 2024 г.

Поиск новых способов синтеза и анализа наносистем, обладающих плазмонными свойствами, - актуальная задача современной фотоники. В данной работе рассматривается низкотемпературный лазерный синтез золотых квазидвумерных наносетей (диаметры отдельных нанопроволок 5 нм), осуществляемый в сверхтекучем гелии. Впервые в эксперименте по комбинационному рассеянию света рассматриваются плазмонные свойства полученных таким способом наносистем. Возможные особенности ближнего поля изучаются с помощью электродинамического 3D численного моделирования методом конечных элементов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра (400–1000 нм). Демонстрируется сложная внутренняя структура и разнообразие форм локализации горячих точек, возникающих вокруг моделируемого узла – двух скрещивающихся нанопроволок диаметрами 5 нм (tip-to-gap transition).

DOI: 10.31857/S0370274X24080129, EDN: UMVIVR

**Введение.** С момента опубликования в ранней статье [1] первых доказательств гигантского усиления комбинационного рассеяния света (ГКРС) молекулы пиридина шероховатыми серебряными электродами интерес к изучению оптических методов усиления поля не угасает и активно поддерживается развитием нанотехнологий [2]. Повышенное внимание к этой области исследований вызвано многообещающими возможностями, которые она открывает, начиная со способности определять исчезающе малые концентрации молекул (важно для пищевой [3], фармацевтической [4] промышленности, экологии [5], сферы социального обеспечения [6], вплоть до современных решений в интегральной фотонике (миниатюризация элементной базы [7], планарная инфракрасная фотоника на сверхлегированном кремнии [8]) и биомедицине (распознавание биомолекул внутри живых клеток для целей ранней диагности-

ки заболеваний [9], в том числе злокачественных новообразований [10], фотодинамическая терапия [11]). Следует подчеркнуть, что вопросы усиления представляют также существенный интерес и при рассмотрении светозахвата и фотолюминесценции [12]. С прикладной точки зрения повышение эффективности взаимодействия материала со светом может повысить эффективность фотовольтаических элементов [13]. В свою очередь методы усиления фотолюминесценции необходимы при создании новых источников излучения, как классических, так и неклассических для решения задач квантовых технологий.

Природа усиления поля и сегодня остается обсуждаемым вопросом [2], однако в общих чертах ее можно объяснить концентрированием объемной энергии свободных электромагнитных волн вблизи ограниченной поверхности наночастиц (в их ближнем поле), происходящем за счет образования эванесцентных волн, сопровождающих коллективные колебания электронов (на языке квазичастиц – возникно-

<sup>1)</sup>e-mail: stepanov\_me@mail.ru

вением локализованных поверхностных плазмонов). При размещении излучателя в области сконцентрированного поля (в так называемой горячей точке) он получает усиленный оптический отклик благодаря эффекту Парселла [14], согласно которому пространство вокруг наночастицы трактуется как нанорезонатор, модифицирующий локальную плотность оптических состояний в зависимости от геометрии полости [15].

В целом исследования закономерностей, управляющих усилением плазмонных наноструктур, находятся сегодня в активной стадии (см., например, [16]). Так, было показано [17], что конфигурация горячих точек на ГКРС-активных подложках чрезвычайно важна при детектировании спектров от макромолекул, а наноструктура горячих точек на поверхностях плазмонных металлов может также служить способом контроля их надмолекулярных характеристик [18, 19]. Таким образом, можно считать доказанным, что локальная геометрия является определяющим фактором, влияющим как на характер ближнего поля, так и на возможность его использования.

В этих условиях важной задачей становится поиск методов создания наногеомерий – синтеза плазмон-активных наноструктур. К настоящему времени сформировалась самая разнообразная практика синтеза наноразмерных материалов, открывающая новые физические закономерности и приложения (см., например, направление фотоники полупроводниковых квантовых точек [20–22]). Некоторые наиболее интересные методы создания наноструктур включают: осаждение вещества из газовой фазы [23], молекулярно-лучевую эпитаксию [24], электронно-лучевую литографию [25], комбинацию эпитаксии и электронной литографии [26, 27], фотонанолитографию [28], прямое лазерное письмо [29], обратный STED [30, 31], фотополимеризацию [32, 33], атомную камеру Обскура [34], оптический пинцет [35, 36], темплатный синтез [37], электрохимический синтез в пористых структурах (порах трековых мембран) [38–40], коллоидный синтез [41], коллоидный синтез в жидкокристаллической мезофазе [42], самосборка [43, 44]. Некоторые из перечисленных методов используют подход, заключающийся в измельчении больших заготовок (подход сверху–вниз), другие – рост наноструктур из атомов и кластеров (подход снизу–вверх). К последней категории относится также ультрасовременный метод ДНК-оригами. Он основывается на использовании ДНК-молекул для контролируемой сборки наноструктур практически любой формы с высокой повторяемостью и точностью, и предполагает возможность адресного обра-

щения к любому элементу ДНК-наноструктуры для последующей модернизации [45, 46]. Также активно развиваются сегодня и лазерные методы синтеза (см., например, создание флюоритовых нанорешеток пс-импульсами [47], создание неравновесных электронных состояний в пленках серебра [48], создание микро-структурированных метаповерхностей для контроля поглощения [49]). В том числе, импульсная лазерная техника применяется для синтеза и/или модификации нанобъектов [50].

В данной статье кратко рассматривается вопрос о локализации электромагнитной энергии в ближнем поле золотой наносети, полученной при помощи лазерной абляции в условиях сверхтекучего гелия [51, 52]. Наносети, получаемые таким способом, обладают уникальной геометрией – они представляют собой сильно разупорядоченный квази-двумерный массив нанопроволочных “перекрытий” диаметрами  $\sim 5$  нм, разделенных зазорами различной конфигурации на масштабе от единиц до десятков нанометров. От такой сложной наноструктуры можно ожидать наличия небольших по величине усилений в широком диапазоне длин волн, что потенциально может быть использовано для детектирования веществ не известного заранее состава по их ГКРС сигналу. Локализация падающей волны в ближнем поле и связанное с ней усиление рассеяния исследуется в данной работе двумя путями: в оптическом эксперименте по наблюдению эффекта ГКРС, а также на основе численного моделирования одной из возможных конфигураций узла наносети в диапазоне длин волн 400–1000 нм. Таким образом, данная работа представляет собой первый шаг в изучении ближнеполевых эффектов, возникающих в сложной разупорядоченной металлической наносети, сделанной в сверхтекучем гелии.

**Эксперимент и моделирование.** Принципиальная схема низкотемпературной установки приведена на рис. 1а. Согласно представленной схеме, золотые наносети были получены путем импульсной лазерной абляции золотой мишени, помещенной внутри откачного оптического гелиевого криостата OptStyo 105. Перед охлаждением мишень помещалась в нижней части криостата напротив сапфировых окон. В качестве материала для создания наноструктур было выбрано золото, так как оно обладает выраженными плазмонными свойствами. Затем шахта криостата заполнялась жидким гелием (4.2 К) и дополнительно охлаждалась до температуры ниже 2.17 К путем откачки паров гелия до давлений меньше 40 Торр. После достижения сверхтекучего состояния гелия мишень облучалась сфокусированными на ее поверхности лазерными импульсами.

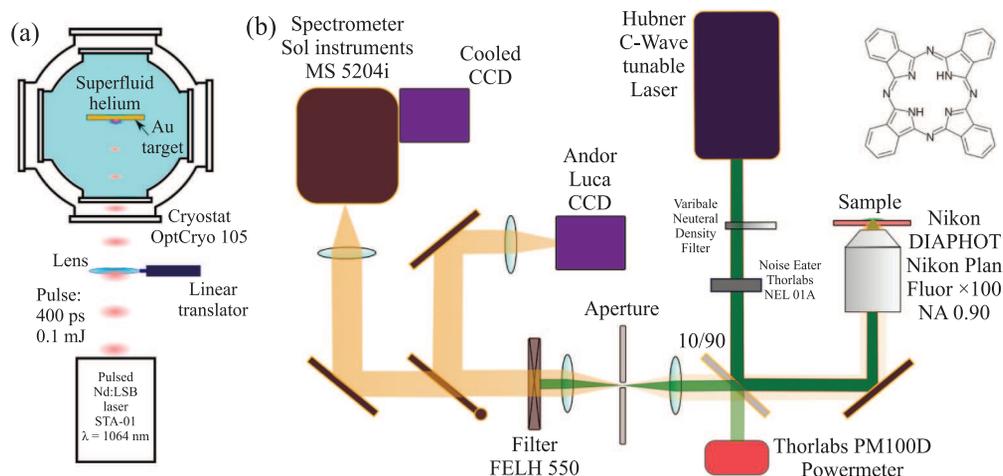


Рис. 1. (Цветной онлайн) (а) – Схема низкотемпературной установки для импульсной лазерной абляции золотой мишени в сверхтекучем гелии; (б) – схема оптической установки, используемой для наблюдения ГКРС эффекта (в качестве модельной использовалась молекула фталоцианина H2PC)

Для этого использовался твердотельный ИК-лазер с диодной накачкой Nd:LSB (длина волны 1064 нм, длительность импульса 0.4 нс, энергия импульса 0.1 мДж, частота повторений 4 кГц). Чтобы собрать материал для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), перед началом эксперимента в криостате ниже уровня абляции размещались покрытые углеродом сеточки диаметром 3 мм. Абляция велась в течение  $\sim 1$  ч для получения более плотной наносети. После синтеза криостат медленно отогревался до комнатной температуры, далее образцы хранились несколько дней в комнатных условиях до проведения исследования. ПЭМ высокого разрешения (рис. 2) была получена с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 компании JEOL.

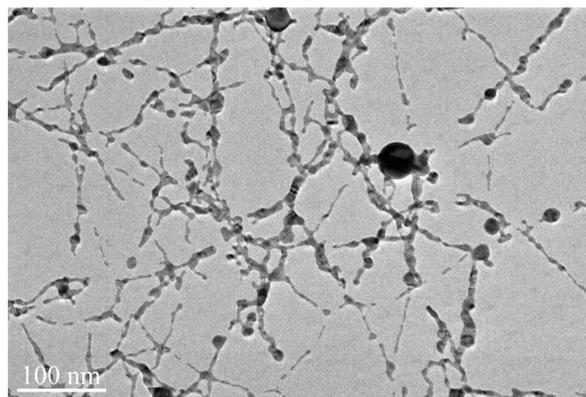


Рис. 2. ПЭМ-изображение участка золотой наносети, полученной методом лазерной абляции в сверхтекучем гелии

Спектроскопия комбинационного рассеяния света проводилась с использованием оптической схемы микроскопа-спектрометра, представленной на рис. 1b. Для этого 1 мкл раствора фталоцианина (H2PC, растворитель – хлороформ) наносился при помощи микропипетки на стекло, покрытое золотыми наносетями. Для сравнения 1 мкл того же раствора наносился также на золотую фольгу и на кремний (рис. 3а). После высыхания при комнатных условиях образцы размещались в поле микроскопа Nikon DIAPHOT, оснащенного объективом Nikon Plan Fluor  $\times 100$  с числовой апертурой 0.90, как показано на рис. 1а. Для наблюдения ГКРС использовалась линия лазера C-WAVE (HUBNER Photonics) с длиной волны 545 нм (в этой области не поглощает H2PC), лазерное излучение дополнительно стабилизировалось Thorlabs NEL01A Noise Eater. Мощность

контролировалась с помощью измерителя мощности Thorlabs PM100D. Комбинационно-рассеянный свет анализировали с помощью спектрометра Sol Instruments MS 5204i, оснащенного ПЗС-матрицей, охлажденной до  $-20^\circ\text{C}$ . Фоновый сигнал вычитался автоматически. Условия фокусировки контролировались охлаждаемой ( $-20^\circ\text{C}$ ) ПЗС-матрицей Andor Luca. Лазерная линия отрезалась интерференционным фильтром FELH 550.

Численное моделирование выполнялось в программе COMSOL Multiphysics (модуль EM waves, frequency domain). Моделировалось ближнее поле идеализированного узла в виде двух нанопроволок-цилиндров длиной 100 нм и диаметром 5 нм, скрещенных на одном уровне под углом  $60^\circ$ , помещенных в центре куба ( $480 \times 480 \times 480 \text{ nm}^3$ ), заполненного воздухом. Ось X системы координат располага-

лась параллельно оси одной из проволок; вторая проволока была расположена в плоскости  $XU$  под углом  $60^\circ$  к первой. Сверху на наноструктуру направлялась плоская электромагнитная волна (амплитуда  $1 \text{ В/м}$ ), поляризованная в направлении оси  $Y$  (перпендикулярно первой проволоке, рис. 4). Программа методом конечных элементов с учетом граничных условий на поверхности проволок искала решение волнового уравнения для волн от  $400$  до  $1000 \text{ нм}$  с шагом  $20 \text{ нм}$ . Свойства материалов учитывались на основе экспериментальных данных о реальной и мнимой частях показателя преломления золота [53] и воздуха [54]. Сетка при 3D моделировании в программе COMSOL была выбрана тетраэдрической с размерами тетраэдров  $\sim 0.5 \text{ нм}$  вблизи/внутри нанопроволок, постепенно нарастающими до  $\sim 5 \text{ нм}$  по мере удаления от поверхности нанопроволок для оптимизации вычислительного ресурса. Общее число элементов при расчетах составляло  $\sim 5 \cdot 10^5$ . Внешние грани воздушного куба были прозрачны для падающих изнутри волн (граничное условие рассеяния 1-го порядка в COMSOL). Приведенные ниже визуализации показывают только рассеянную на наноструктуре часть поля.

**Обсуждение результатов.** Для того чтобы убедиться в возможности локализации поля в горячих точках вокруг золотой наносети (Au nanonetwork, Au NN) были получены спектры рамановского рассеяния молекул H2PC на трех подложках: золотые наносети на стекле (Au NN/glass), золотой фольге (Au foil), кремнии (Si plate), рис. 3а.

При измерении спектров H2PC на разных подложках при одинаковых параметрах записи (рис. 3б) линия  $1344 \text{ см}^{-1}$  молекул H2PC наблюдалась только на Au NN/glass и Au foil подложках, при этом уровень сигнала воспроизводимо был на порядок выше в случае Au NN/glass (см. вставку на рис. 3б), что можно объяснить проявлением эффекта ГКРС, поскольку измерения проводились при неизменных прочих параметрах. Для Si подложки были хорошо различимы только линии самого кремния ( $520$  и  $935\text{--}990 \text{ см}^{-1}$ ). Мы ограничимся здесь качественным наблюдением усиления, поскольку не учитывали возможных концентрационных эффектов, возникающих при высыхании капли с раствором H2PC на твердой поверхности подложек, однако при перестроении лазера на  $580 \text{ нм}$  и  $597.5 \text{ нм}$  наблюдалась схожая картина усиления сигнала, но уже для резонансного ГКРС.

Для установления возможного характера локализации ближнего поля вокруг узлов наносети в качестве первого шага мы дополнительно провели 3D

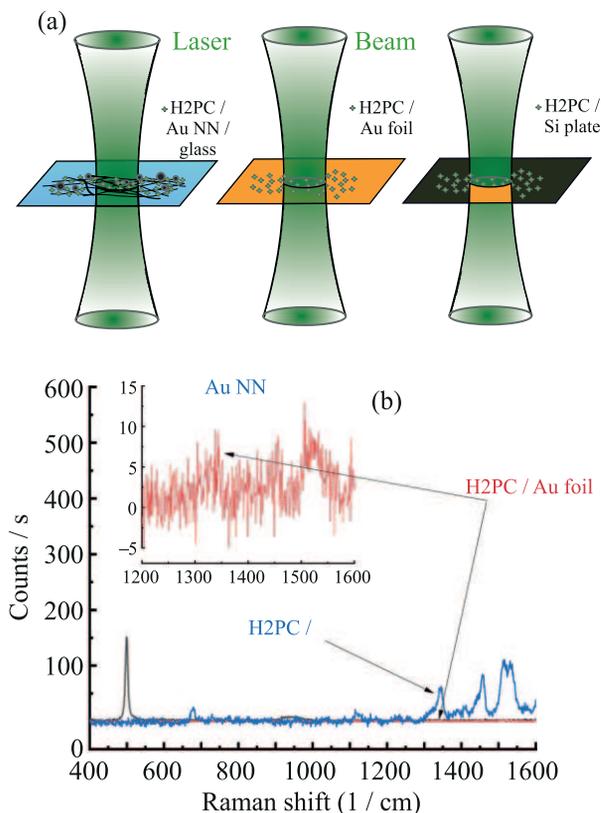


Рис. 3. (Цветной онлайн) (а) – Геометрия эксперимента по наблюдению эффекта ГКРС (Au NN – золотые наносети, H2PC – фталоцианин) на длине волны лазера  $545 \text{ нм}$  (мощность  $1.23 \text{ мВт}$ , экспозиция  $10 \text{ с}$ ); (б) – спектры комбинационного рассеяния для трех рассмотренных случаев. На вставке изображен спектр H2PC/Au foil в увеличенном масштабе

моделирование идеализированного узла, представляющего собой две пересекающиеся под углом  $60^\circ$  нанопроволоки длиной по  $100 \text{ нм}$  каждая (параметры подобраны на основе данных ПЭМ так, чтобы отражать возможный узел сети) в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра.

Для введения количественного описания мы использовали локальный максимум амплитуды рассеянного поля  $|\mathbf{E}|_{\text{max}}$  (численно совпадает с коэффициентом усиления напряженности поля, поскольку падающая волна имеет единичную амплитуду), качественно же мы наблюдали за геометрией возникающего усиленного ближнего поля. Нужно сказать, что использование локального параметра  $|\mathbf{E}|_{\text{max}}$  в идеализированной геометрии дает лишь приближенное понимание величины ближнего поля, поскольку величина локального максимума зависит от расчетной сетки, а идеализированные резкие края цилиндра представляют собой особые точки в расчете, од-

нако варьирование параметров сетки показало, что порядок величины  $|E|_{\max}$  вблизи особых точек при этом сохраняется.

Для того чтобы разделить эффекты локализации и усиления поля на концах (“Tip”, горячие точки типа “острие”) наноструктуры и ее центральной части (“Gap”, горячие точки типа “зазор”) из расчета были получены данные о максимумах поля как внутри области пересечения (ограниченной произвольно выбранным радиусом в 25 нм, закрашенные точки на рис. 4а), так и снаружи этой области (пустые точки на рис. 4а). Спектр локальной величины поля в горячих точках был, таким образом, получен для двух разновидностей горячих точек – “tip” и для “gap”, – он показан в основной части рис. 4а. Обе разновидности горячих точек демонстрируют наличие двух полос усиления, происхождение которых можно объяснить гибридизацией продольных и поперечных плазмонных мод в моделируемом узле. Тем не менее, между “tip” и “gap” горячими точками существует сложная взаимосвязь, проявляющаяся в спектральном чередовании их первенства (tip-to-gap transition). Для иллюстрации этой “миграции” горячих точек были построены карты величины ближнего поля в срезе, лежащем в плоскости XY, проходящем через центр нанопроволок (рис. 4b, c). Для того, чтобы подчеркнуть различия случаев первенства того или иного типа горячих точек были выбраны длины волн, отмеченные на рис. 4а и соответствующие “первенству” либо “gap” горячей точки ( $\lambda = 620$  нм), либо “tip” горячей точки ( $\lambda = 780$  нм). Рисунки приведены в одной цветовой гамме для удобства сравнения, однако следует иметь в виду, что второй максимум ( $\lambda = 780$  нм) интенсивнее первого, что может быть связано с возникновением продольной дипольной плазмонной моды, возникающей в наклоненной по полю нанопроволоке.

Порядок расчетных величин усиления согласуется с экспериментально наблюдаемыми, если учесть, что в эксперименте выявляются усредненные величины усиления ввиду неидеального расположения молекул относительно узлов наносети.

Обращает на себя внимание также разница в размерах областей усиления (см. рис. 4b и c), возникающих вокруг горячих точек (понимаемых как локальные максимумы поля на поверхности наноструктуры) на разных длинах волн. Их величина должна давать вклад в среднее наблюдаемое усиление сигнала рассеяния, поскольку молекулы анализируемого вещества в реальной ситуации могут попадать в эти области с большей вероятностью за счет их размера, что частично компенсирует их более низкую величину амплитуды поля. Изучение закономерностей,

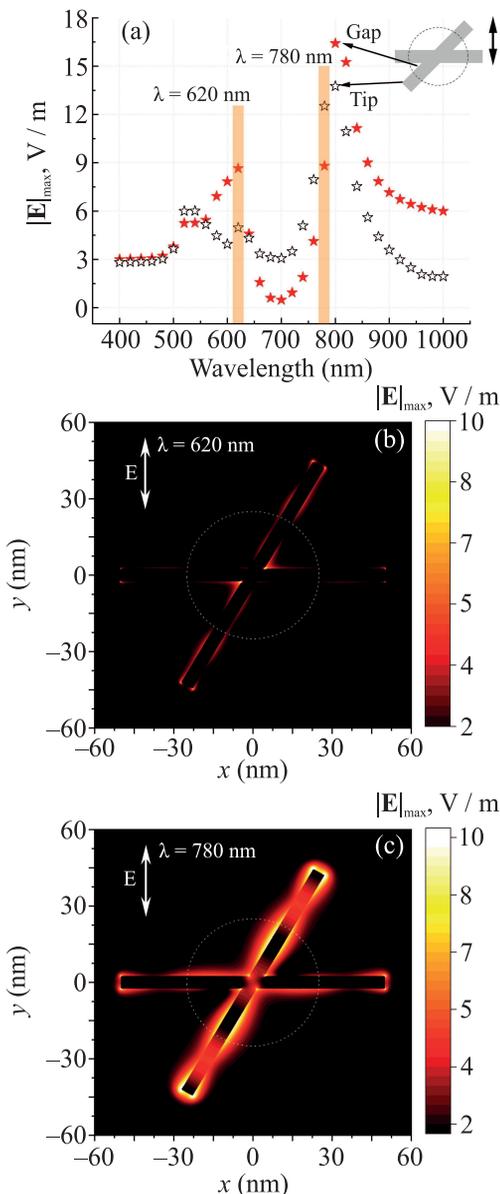


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Расчетные спектры величин локальных максимумов ближнего поля (рассеянная часть), возникающих в ответ на падающее поле амплитудой 1 В/м, подразделенные по двум областям локализации, показанным на вставке; (b) – карта ближнего поля в срезе, лежащем в плоскости нанопроволок для длины волны  $\lambda = 620$  нм, когда наиболее интенсивные горячие точки локализованы в зазоре (“gap”); (c) – карта ближнего поля для  $\lambda = 780$  нм, когда наиболее интенсивные горячие точки локализованы на концах (“tip”). Пунктиром выделена область, разграничивающая две рассматриваемые формы локализации горячих точек

связанных с размером областей усиления, представляется интересной точкой приложения усилий в дальнейшем.

**Заклучение.** Метод лазерного синтеза наноструктур в сверхтекучем гелии позволяет получать металлические наносети, которые обладают плазмонными свойствами, как было показано на примере усиления сигнала комбинационного рассеяния света органических молекул. Комплексная морфология, внутренне присущая таким наносетям, согласно результатам проведенных расчетов, приводит к возникновению вблизи их поверхности различных по локализации горячих точек (как на концах - “tip”, так и в зазорах - “gap”), которые динамически изменяют свои характеристики (положение, интенсивность и объем) в ответ на изменение падающих длин волн (tip-to-gap transition). С точки зрения совокупности всех этих параметров и их взаимосвязи квазидвумерные металлические наносети представляются интересными объектами для дальнейшего изучения, поскольку степень их разупорядочения такова, что в пятне засветки лазерного луча можно ожидать наличия десятков узлов различной 3D-геометрии, которые могут взаимодействовать в рамках сети, по-разному и в разных своих частях реагируя на падающие электромагнитные волны. Учитывая чистую поверхность получаемых лазерной абляцией в гелии наносетей (отсутствие загрязнений в процессе получения), можно предполагать умеренный уровень усиления оптических сигналов в широкой спектральной полосе. Такие подложки могут быть использованы для быстрого детектирования в широком диапазоне возбуждения не слишком низких концентраций неизвестных заранее молекулярных соединений.

**Финансирование работы.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации “Физика наноструктурированных материалов и высокочувствительная сенсорика: синтез, фундаментальные исследования и приложения в фотонике, науках о жизни, квантовых и нанотехнологиях” (тема # 124031100005-5).

Работы по низкотемпературному синтезу выполнены по теме Государственного задания федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук # 124020600049-8.

Данные электронной микроскопии получены в рамках темы федерального исследовательского центра химической физики им. Н. Н. Семенова российской академии наук # 122040500073-4.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. M. Fleischmann, P. J. Hendra, and A. J. McQuillan, *Chem. Phys. Lett.* **26**(2), 163 (1974).
2. V. Klimov, *Nanoplasmonics*, Jenny Stanford Publishing, N.Y. (2014), 598 с.
3. R. Shi, X. Liu, and Y. Ying, *J. Agric Food Chem.* **66**(26), 6525 (2018).
4. C. Chen, W. Liu, S. Tian, and T. Hong, *Sensors (Basel)* **19**(7), 1712 (2019).
5. L. Y. Vélez-Escamilla and F. F. Contreras-Torres, *Particle & Particle Systems Characterization* **39**(3), 2100217 (2022).
6. T. Demeritte, R. Kanchanapally, Z. Fan, A. K. Singh, D. Senapati, M. Dubey, E. Zakar, and P. C. Ray, *Analyst* **137**(21), 5041 (2012).
7. E. Pelucchi, G. Fagas, I. Aharonovich, D. Englund, E. Figueroa, Q. Gong, H. Hannes, J. Liu, C.-Y. Lu, N. Matsuda, J.-W. Pan, F. Schreck, F. Sciarrino, C. Silberhorn, J. Wang, and K. D. Jons, *Nat. Rev. Phys.* **4**(3), 194 (2021).
8. М. С. Ковалев, И. М. Подлесных, К. Э. Певчих, С. И. Кудряшов, *Фотоника* **18**(2), 136 (2024).
9. T. J. Moore, A. S. Moody, T. D. Payne, G. M. Sarabia, A. R. Daniel, and B. Sharma, *Biosensors (Basel)* **8**(2), 46 (2018).
10. И. Н. Сараева, Е. Н. Римская, А. В. Горевой, А. Б. Тимурзиева, С. Н. Шельгина, Е. В. Переведенцева, С. И. Кудряшов, *Оптика и спектроскопия* **132**(1), 13 (2024).
11. L. Li, J. Yang, J. Wei, C. Jiang, Z. Liu, B. Yang, B. Zhao, and W. Song, *Light Sci Appl.* **11**(1), 285 (2022).
12. Y. Jeong, Y. M. Kook, K. Lee, and W. G. Koh, *Biosens. Bioelectron.* **111**, 102 (2018).
13. M. W. Dlamini and G. T. Mola, *Physica B: Condensed Matter* **552**, 78 (2019).
14. E. M. Purcell, *Phys. Rev.* **69**(11)(12), 674 (1946).
15. R. Chikkaraddy, V. A. Turek, N. Kongsuwan, F. Benz, C. Carnegie, T. van de Goor, B. de Nijs, A. Demetriadou, O. Hess, U. F. Keyser, and J. J. Baumberg, *Nano Lett.* **18**(1), 405 (2018).
16. V. I. Kukushkin, V. E. Kirpichev, E. N. Morozova, A. S. Astrakhantseva, V. V. Solov'ev, and I. V. Kukushkin, *JETP Lett.* **116**(4), 212 (2022).
17. E. Kozhina, S. Bedin, A. Martynov, S. Andreev, A. Piryazev, Y. Grigoriev, Y. Gorbunova, and A. Naumov, *Biosensors (Basel)* **13**(1), 46 (2022).
18. N. P. Kovalets, I. V. Razumovskaya, S. A. Bedin, and A. V. Naumov, *Письма в ЖЭТФ* **118**(4), 245 (2023).
19. Н. П. Ковалец, С. А. Бедин, И. В. Разумовская, А. В. Наумов, *Фотоника* **8**(8), 620 (2023).
20. А. И. Аржанов, А. О. Савостьянов, К. А. Магарян, К. Р. Каримуллин, А. В. Наумов, *Фотоника* **15**(9), 622 (2021).

21. А. И. Аржанов, А. О. Савостьянов, К. А. Магарян, К. Р. Каримуллин, А. В. Наумов, *Фотоника* **16**(2), 96 (2022).
22. A. A. Rempel, O. V. Ovchinnikov, I. A. Weinstein, S. V. Rempel, Y. V. Kuznetsova, A. V. Naumov, M. S. Smirnov, I. Y. Eremchev, A. S. Vokhmintsev, and S. S. Savchenko, *Russ. Chem. Rev.* **93**(4), 1 (2024).
23. F. Porrati, S. Barth, G. C. Gazzadi, S. Frabboni, O. M. Volkov, D. Makarov, and M. Huth, *ACS Nano* **17**(5), 4704 (2023).
24. C. Tan, J. Chen, X.-J. Wu, and H. Zhang, *Nat. Rev. Mater.* **(3)**(2), 17089 (2018).
25. X. Wang, X. Dai, H. Wang et al. (Collaboration), *ACS Nano* **17**(5), 4933 (2023).
26. G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, *Appl. Phys. Lett.* **79**(6), 705 (2001).
27. E. L. Shangina, K. V. Smirnov, D. V. Morozov, V. V. Kovalyuk, G. N. Gol'tsman, A. A. Verevkin, and A. I. Toropov, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **74**(1), 100 (2010).
28. J. Fan and L. Qian, *Nat. Nanotechnol* **17**(9), 906 (2022).
29. N. Anscombe, *Nat. Photonics* **4**(1), 22 (2010).
30. D. A. Chubich, D. A. Kolymagin, I. A. Kazakov, and A. G. Vitukhnovsky, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **82**(8), 1012 (2018).
31. R. Zvagelsky, D. Chubich, D. Kolymagin, A. Pisarenko, and A. Vitukhnovsky, *AIP Conf. Proc.* **2069**, 040004 (2019).
32. П. А. Демина, К. В. Хайдуков, В. В. Рочева, Р. А. Акасов, А. Н. Генералова, Е. В. Хайдуков, *Фотоника* **16**(8), 600 (2022).
33. Y. E. Begantsova, R. Zvagelsky, E. V. Baranov, D. A. Chubich, Y. V. Chechet, D. A. Kolymagin, A. V. Pisarenko, A. G. Vitukhnovsky, and S. A. Chesnokov, *Eur. Polym. J.* **145**, 110209 (2021).
34. V. I. Balykin, P. A. Borisov, V. S. Letokhov, P. N. Melentiev, S. N. Rudnev, A. P. Cherkun, A. P. Akimenko, P. Y. Apel, and V. A. Skuratov, *JETP Lett.* **84**(8), 466 (2006).
35. O. M. Marago, P. H. Jones, P. G. Gucciardi, G. Volpe, and A. C. Ferrari, *Nat. Nanotechnol.* **8**(11), 807 (2013).
36. D. A. Shilkin, E. V. Lyubin, I. V. Soboleva, and A. A. Fedyanin, *JETP Lett.* **98**(10), 644 (2014).
37. A. Kaur, B. Bajaj, A. Kaushik, A. Saini, and D. Sud, *Mater. Sci. Eng. B* **286**, 116005 (2022).
38. P. Apel, *Radiat. Meas.* **34**(1–6), 559 (2001).
39. E. P. Kozhina, S. N. Andreev, V. P. Tarakanov, S. A. Bedin, I. M. Doludenko, and A. V. Naumov, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **84**(12), 1465 (2021).
40. E. P. Kozhina, S. A. Bedin, N. L. Nechaeva, S. N. Podoymitsyn, V. P. Tarakanov, S. N. Andreev, Y. V. Grigoriev, and A. V. Naumov, *Appl. Sci.* **11**(4), 1375 (2021).
41. D. Huo, M. J. Kim, Z. Lyu, Y. Shi, B. J. Wiley, and Y. Xia, *Chem. Rev.* **119**(15), 8972 (2019).
42. K. A. Magaryan, M. A. Mikhailov, K. R. Karimullin, I. A. Vasilieva, and G. V. Klimusheva, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **78**(12), 1336 (2014).
43. J. F. Galisteo-Lopez, M. Ibisate, R. Sapienza, L. S. Froufe-Perez, A. Blanco, and C. Lopez, *Adv Mater.* **23**(1), 30 (2011).
44. M. Grzelczak, J. Vermant, E. M. Furst, L. M. Liz-Marzan, *ACS Nano* **4**(7), 3591 (2010).
45. М. Е. Степанов, У. А. Хохрякова, Т. В. Егорова, К. А. Магарян, А. В. Наумов, *Фотоника* **18**(1), 72 (2024).
46. М. Е. Степанов, У. А. Хохрякова, Т. В. Егорова, К. А. Магарян, А. В. Наумов, *Фотоника* **18**(2), 166 (2024).
47. S. I. Kudryashov, P. A. Danilov, M. P. Smaev, A. E. Rupasov, A. S. Zolot'ko, A. A. Ionin, and R. A. Zakoldaev, *JETP Lett.* **113**(8), 493 (2021).
48. П. А. Данилов, С. И. Кудряшов, К. П. Мигдал, А. С. Ривнюк, А. А. Ионин, *Письма в ЖЭТФ* **113**(5), 299 (2021) [P. A. Danilov, S. I. Kudryashov, K. P. Migdal, A. S. Rivnyuk, and A. A. Ionin, *JETP Lett.* **113**(5), 297 (2021)].
49. M. S. Kovalev, I. M. Podlesnykh, G. K. Krasin, A. Y. Dunaev, and S. I. Kudryashov, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **87**(S1), S116 (2023).
50. A. Balachandran, S. P. Sreenilayam, K. Madanan, S. Thomas, and D. Brabazon, *Results in Engineering* **16**, 100646 (2022).
51. E. Gordon, A. Karabulin, V. Matyushenko, V. Sizov, and I. Khodos, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**(46), 25229 (2014).
52. E. B. Gordon, A. V. Karabulin, V. I. Matyushenko, V. D. Sizov, and I. I. Khodos, *JETP* **112**(6), 1061 (2011).
53. P. B. Johnson and R. W. Christy, *Phys. Rev. B* **6**(12), 4370 (1972).
54. P. E. Ciddor, *Appl. Opt.* **35**(9), 1566 (1996).