



## РОССИЙСКИЕ УЧЕНЫЕ ДЕЛАЮТ ПРОРЫВ В НАНОПЛАЗМОНИКЕ И СОЗДАЮТ БИОСЕНСОР С РЕКОРДНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Ученые и инженеры совместного НОЦ ФМН (ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова" и МГТУ им. Н.Э.Баумана) и Института спектроскопии РАН (ИСАН РАН) (г. Троицк) впервые в мире на базе запатентованной SCULL-технологии (публикация в Scientific Reports, патент РФ № 20190618, международная РСТ-заявка на патент, цитирование в журнале Science) создали материал с рекордным показателем длины пробега поверхностных плазмон-поляритонов – 200 микрометров (публикация в Optical Materials Express). Полученный результат впервые за 60 лет экспериментально доказал теоретически предсказанные показания.

С использованием SCULL-технологии созданы плазмонные кристаллы передового уровня для определения предельно малых концентраций (до 20 пикограмм на миллилитр, то есть 3 ppt (parts per trillion) – 3 молекулы на триллион частиц раствора) флуоресцирующих молекул (публикация в Optical Materials Express). Показанные результаты сегодня позволяют детектировать менее 1000 молекул в анализируемом объеме вещества, и сегодня работы ведутся над созданием так называемых одномолекулярных детекторов.

Технологии найдут практическое применение как в средствах персонифицированной медицины (фиксация изменения веществ в крови), так и в системах безопасности аэропортов и торговых центров (определение наличия молекул взрывчатых или биологически опасных веществ в местах массового скопления людей).

Направление наноплазмоники активно развивается последние 15–20 лет усилиями ведущих мировых лабораторий. Благодаря наноплазмонике в распоряжении специалистов появились маркеры, расшифровывающие человеческий геном, эффективные фотодетекторы и диоды, среды с отрицательным показателем преломления, оптическая спектроскопия и многое другое. Основное препятствие, сдерживающее бум плазмонных устройств нового поколения – отсутствие необходимой материальной базы в силу больших потерь в плазмонных металлах.

Потери полезного сигнала в этих устройствах из-за несовершенства материалов до сих пор являются ключевым барьером на пути разработки

сверхчувствительных лечебно-диагностических комплексов, квантовых компьютеров будущего, абсолютно защищенных систем безопасности и т.п. Ведущие мировые лаборатории многие годы активно работают над поиском новых технологических подходов и альтернативных плазмонных материалов.

### Материал с рекордным показателем длины распространения поверхностных плазмон-поляритонов

Более 60 лет известно, что серебро обладает природно-минимальными оптическими потерями из всех металлов в видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн. Именно с серебром были связаны основные надежды создания наиболее эффективных устройств наноплазмоники. Дело в том, что теоретически рассчитанное значение длины распространения плазмонов для серебра (около 200 микрометров в видимом диапазоне длин волн) – это один из основных параметров качества плазмонных материалов – существенно превосходит значения для всех остальных металлов. Экспериментальное подтверждение этому впервые появилось благодаря совместным усилиям инженеров НОЦ ФМН на базе МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова" и ученых ИСАН РАН (г. Троицк).

На базе собственной запатентованной SCULL-технологии (публикация в Scientific Reports, патент РФ № 20190618, международная РСТ-заявка на патент) командой ученых был синтезирован материал и измерена рекордная длина пробега поверхностного плазмона – порядка 200 микрометров, удвоив предыдущие достижения ведущих мировых ученых и открыв дорогу к плазмонным устройствам качественного нового уровня.

"Уникальным элементом оптической среды является атомарно гладкая монокристаллическая тонкая пленка серебра, обеспечивающая чрезвычайно низкие потери. Поверхностная плазмон-поляритонная волна, возбуждаемая излучением с длиной волны  $\lambda=780$  нм на поверхности таких тонких пленок, осажденных по нашей SCULL-технологии, имеет длину распространения порядка 200 мкм, что вдвое превышает опубликованные ранее ведущими мировыми научными группами результаты и соответствует теоретическому максимальному значению для пленок серебра. К этому результату мы шли более двух лет, проведя исследования и глубокий анализ более 3000 изготовленных у нас образцов", – отметил Илья Родионов, директор центра "Функциональные Микро/Наносистемы". Достижение российских ученых представлено в публикации в журнале Optical Materials Express (рис.1).

### Сверхчувствительные биосенсоры нового поколения

На базе SCULL-технологии российским ученым также удалось сделать еще одно основополагающее открытие: создать передовые плазмонные кристаллы для сверхчувствительных сенсоров. Учеными ИСАН РАН и НОЦ ФМН

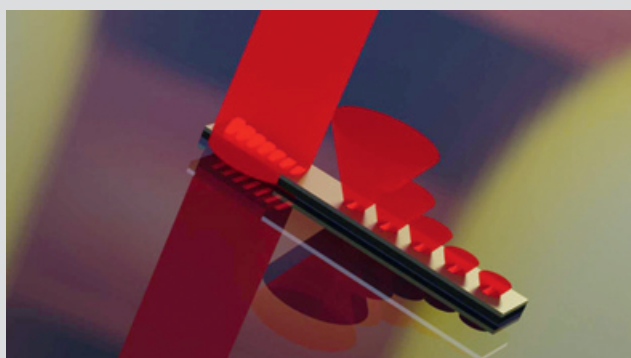


Рис.1. Схема измерения распространения поверхностной плазмон-поляритонной волны



предложен новый метод измерения предельно низких концентраций детектируемых молекул в малых объемах жидких растворителей, основанный на эффекте экстраординарного пропускания света через плазмонный кристалл, созданный на основе наноструктурированных пленок серебра.

### Публикация в *Optical Materials Express*

По технологии, эффект экстраординарного пропускания света реализуется на длине волны флуоресценции детектируемых молекул с низким пропусканием света на длине волны поглощения. Он позволяет изготавливать высокочувствительные датчики с уровнем чувствительности, близким к одномолекулярному, благодаря подавлению неизбежного паразитного свечения подложки датчика. Предложенный способ был успешно продемонстрирован на примере обнаружения ультранизкой концентрации флуоресцирующих маркеров цианина (Cy-5) в растворе диметилсульфоксида, соответствующих менее чем 1000 молекулам в объеме обнаружения датчика. Показанные результаты сегодня позволяют детектировать менее 1000 молекул в анализируемом объеме вещества, и сегодня работы ведутся над созданием так называемых одномолекулярных детекторов. Одномолекулярный детектор – это предельный случай эффективности сенсоров, когда наличие даже одной молекулы (физически минимальное количество) детектируемого вещества в пробе может быть обнаружено с высокой вероятностью. Одномолекулярные детекторы – крайне эффективный инструмент для выявления самых опасных болезней на ранних стадиях развития, а также обнаружения опасных веществ в больших объемах воздушных масс.

### Микрометровый размер элемента сенсора – новые возможности

Принимая во внимание тот факт, что чувствительный элемент сенсора, выполненный с использованием запатентованной ФМН SCULL-технологии, имеет микрометровый размер, размеры самого прибора также изменяются в сторону существенного уменьшения в сравнении с устройствами, используемыми в настоящее время. Так, например, биосенсоры на основе SCULL-пленок в перспективе заменят громоздкие аналитические приборы, которые используются сегодня для проведения сложных медицинских анализов. Более того, благодаря микрометровым размерам сенсоров, на одном чипе может быть расположено сразу несколько сотен чувствительных элементов, каждый из которых будет детектировать свое анализируемое вещество (на сегодняшний момент такая схема не возможна), или же несколько элементов будут одновременно детектировать одно, что на порядки повысит достоверность результатов анализов.

### Перспективы использования

Биосенсоры на базе SCULL-материалов позволят определять вещества предельно малых концентраций (для флуоресцирующих молекул до 20 пикограмм на миллилитр или 3 ppt (parts per trillion – 3 молекулы на триллион частиц раствора) в жидкостях и воздухе (при определенной

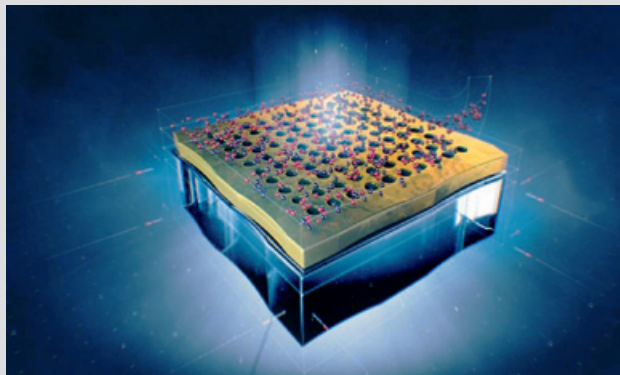


Рис. 2. Плазмонный датчик на основе эффекта Эббесена

подготовке пробы). Технологии найдут практическое применение как в средствах персонализированной медицины в виде фиксации изменений веществ в крови, так и в системах безопасности аэропортов, торговых центров, определяя наличие молекул взрывчатых или биологически опасных веществ в здании. Помимо одномолекулярных биосенсоров, на основе открытия российских ученых станет возможной разработка оптических и квантовых суперкомпьютеров нового поколения, низкопороговых нанолазеров, эффективных солнечных батарей и метаматериалов.

Низкопороговый нанолазер – это источник когерентного излучения субмикронных размеров, который является одним из ключевых элементов для создания полностью оптических систем межпроцессорной связи на чипе и новых высокопроизводительных вычислительных систем. Также нанолазеры используются в качестве источников излучения и элементов высокочувствительных биосенсоров и сенсоров физических величин.

Метаматериалы – это искусственные оптические среды, часто состоящие из металлических и диэлектрических структур с характерными размерами элементов меньше длины волны их рабочего излучения. Однако устройства на основе метаматериалов также до сих пор не находят практического применения из-за высоких потерь на распространение, которые могут быть частично или полностью решены при разработке и внедрении материалов с ультрамалыми потерями.

### SCULL-технология от НОЦ ФМН

Основой научного прорыва стала собственная SCULL-технология НОЦ ФМН. Это оригинальная вакуумная установка и технология, предлагающая принципиально новый подход к "сборке" ультрагладких тонких пленок металлов за счет термодинамического управления их ростом на атомарном уровне. SCULL-материалы обладают практически идеальной структурой (шероховатость на уровне размера атома серебра), обеспечивающей сверхмалые потери в оптическом диапазоне. Причем, эта универсальная технология может одновременно применяться в разработках в области биомедицины, нанофотоники, энергетики, квантовых вычислений и коммуникаций.

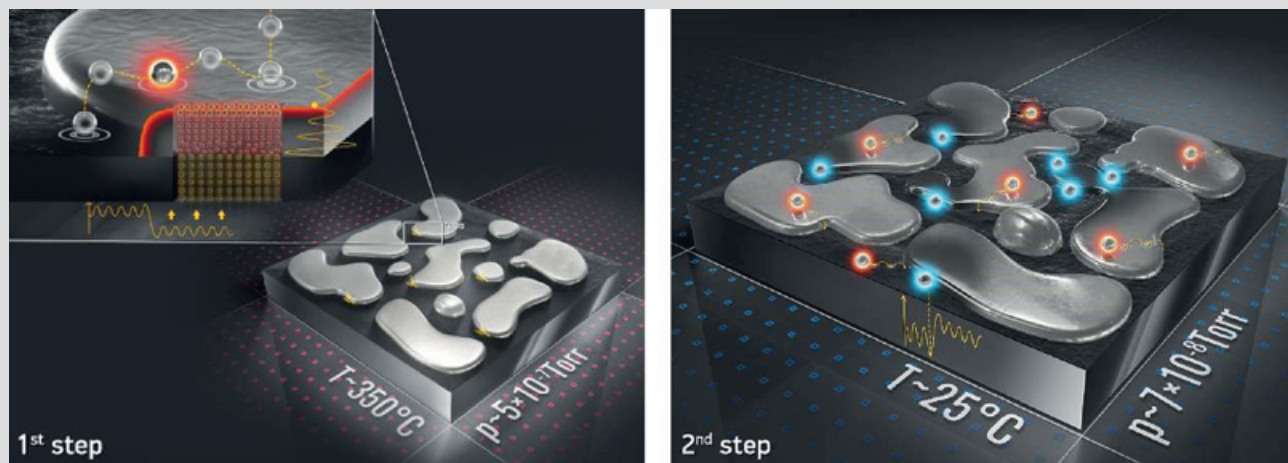


Рис.3. Стадии изготовления биосенсора по технологии SCULL

Благодаря технологии SCULL, уже получившей российский патент и ожидающей международный в ближайшее время, ученым удалось то, над чем мировые ученые работали последние десятилетия. Сама запатентованная технология и подтвержденные экспериментально значения существенно превосходят достижения лидирующих в этой области научных групп из США и Швейцарии, занятых разработками аналогичных технологий уже более 20 лет. Разработанный в НОЦ ФМН комплекс технологий открывает принципиально новые горизонты в изучении фундаментальной физики и практической реализации важнейших квантовых устройств. Разработки SCULL начались в НОЦ ФМН в сотрудничестве с партнерами из ИТПЭ РАН в 2014 году. Для целого ряда перспективных приборов нанопотоники требовались "совершенные" материалы практически без потерь, но их не было ни в одной лаборатории мира. Подробно изучив несколько сотен статей, российские ученые спроектировали оригинальную вакуумную установку, изготовление которой производителем из Канады и последующая тонкая доработка заняли около 1,5 лет. В итоге был найден нестандартный механизм – технология, которая не только обеспечила беспрецедентное качество осаждаемых пленок металлов, но и позволила сделать это абсолютно повторяемым для широкого спектра материалов и дешевым способом. Сегодня российские специалисты могут создавать практически структурно идеальные тонкие пленки металлов с шероховатостью поверхности на уровне диаметра атома самого материала пленки, то есть 90–200 пикометров (в миллион раз меньше диаметра волоса). Владимир Шалаев (профессор Университета Пардю (США), директор по направлению нанопотоники Birk Nanotechnology Center (США)) о SCULL материалах: "После обсуждения на одной из конференций мы получили от коллег из Бауманского университета первые образцы, и результаты измерений нас действительно приятно удивили. Наша команда сотрудничает с лучшими мировыми группами в области нанопотоники и квантовой плазмоники, но SCULL-технология сегодня действительно не имеет аналогов. Для ряда наших исследований, например при изготовлении однофотонных

источников излучения в Университете Пардю, мы используем именно эти образцы. Мне очень приятно, что в России появляются действительно уникальные технологические разработки и возможности". НОЦ ФМН – совместный технологический центр МГТУ им. Н.Э.Баумана и ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова", обеспечивающий реализацию передовых практических исследований в области элементной базы на новых физических принципах, квантовых технологий, нанопотоники и оптики, биоаналитических платформ типа "лаборатория на чипе", МЭМС/МОЭМС и тонкопленочных технологий. Исследования в центре выполняются с использованием комплексов оборудования ведущих мировых производителей, объединенных в единый технологический кластер.

МГТУ им. Н.Э.Баумана – один из крупнейших государственных технических университетов и научных центров России и Европы. Обучение в МГТУ им. Н.Э.Баумана ведется на 19 факультетах дневного отделения. Открыты 2 филиала МГТУ в Калуге и Мытищах, а также техникум. Основными структурными подразделениями университета являются научно-учебные комплексы, имеющие в своем составе факультет и научно-исследовательский институт.

ФГУП "ВНИИА им. Н.Л.Духова", созданное в 1954 году – одна из ведущих научно-исследовательских организаций Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом".

ИСАН РАН создан в 1968 году на базе лаборатории Комиссии по спектроскопии в составе Отделения общей физики и астрономии Академии наук СССР. В настоящее время Институт входит в состав Отделения физических наук РАН, в штате Института насчитывается около 200 человек, из них примерно половина – научные сотрудники, в числе которых ~30 докторов и ~45 кандидатов наук. Институт спектроскопии – первый Российский институт в Российской академии наук, удостоенный высокой награды Европейского физического общества – EPS – Historic Sites Award. Премия EPS Historic Sites Award присуждается тем научным центрам в Европе, которые важны для развития и истории физики.