Разработка активных диэлектрических наноантенн Si–Er*

Э.И. Агеев, А.А. Дятлович, В.В. Ярошенко, А.О. Ларин, Л.Н. Дворецкая, А.М. Можаров, И.С. Мухин, Д.А. Зуев

В работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования по разработке источников, излучающих в ближнем ИК-диапазоне, на основе активных наноантенн из кремниевых наночастиц, легированных ионами эрбия (Si–Er). С помощью численного моделирования было продемонстрированно увеличение фактора Парселла на два порядка для наночастиц с электрическим или магнитным дипольным резонансом на длине волны излучения Er. Была продемонстрирована возможность перераспределения мощности излучения точечного дипольного источника между свободным пространством и поверхностным плазмон-поляритоном с помощью изменения высоты зазора между наночастицей и золотой подложкой. Также была проведена экспериментальная реализация наноантенн. За счет фемтосекундного лазерного отжига проведена кристаллизация пленки и наночастиц Si–Er и исследовано влияние лазерноиндуцированной кристаллизации на их излучательные свойства. Были разработаны и исследованы активные наноантенны для управления излучением ионов эрбия в ближнем ИК-диапазоне, представляющие собой резонансные кремниевые наноцилиндры, легированные эрбием. Полученные результаты перспективны для создания нанофотонных телекоммуникационных устройств, совместимых с существующими кремниевыми технологиями фабрикации.

Ключевые слова: активная диэлектрическая наноантенна, эрбий, кремний, эффект Парселла, фотолюминесценция, магнитный диполь, резонансы Ми.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-20107).*

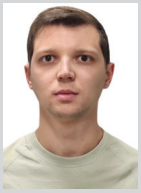
Введение

Возможность управления скоростью спонтанной эмиссии светоизлучающих наноразмерных объектов с помощью их взаимодействия с окружающей средой (эффект Парселла) является ключевым аспектом в создании активных устройств нанофотоники. К настоящему времени накоплен большой объем результатов фундаментальных исследований, связанных с применением плазмонных [1], диэлектрических [2] или гибридных наноструктур для контроля оптического излучения в наномасштабе. Разработано и реализовано множество архитектур для разных систем: от одиночных светоизлучающих дефектов [3] и молекул [4] до квантовых точек [5] и наночастиц [6], обеспечивающих увеличение локальной плотности состояний через управление электромагнитным окружением источника оптического излучения.

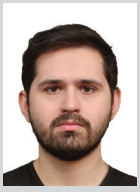
Резонансные диэлектрические наноструктуры являются относительно новым, недавно возникшим на-

АГЕЕВ
Эдуард Игоревич
Национальный исследовательский университет ИТМО

ДЯТЛОВИЧ
Анна Анатольевна
Национальный исследовательский университет ИТМО

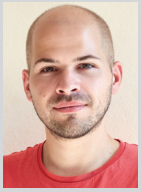


ЯРОШЕНКО
Виталий Витальевич
Национальный исследовательский университет ИТМО



ЛАРИН
Артем Олегович
Национальный исследовательский университет ИТМО

ДВОРЕЦКАЯ
Лилия Николаевна
Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН



МОЖАРОВ
Алексей Михайлович
Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН

МУХИН
Иван Сергеевич
Директор Высшей инженерно-физической школы при Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого

ЗУЕВ
Дмитрий Александрович
Национальный исследовательский университет ИТМО

правлением современной наномасштабной оптики и метафотоники [2, 7]. С помощью диэлектрических наночастиц с высоким значением показателя преломления, в которых возникают оптически индуцированные электрические и магнитные резонансы Ми, могут быть разработаны новые способы для усиления многих оптических эффектов за счет интерференции резонансов, например, таких как однонаправленное рассеяние [8] или лазерная генерация на основе анаполя [9].

Следующим важным шагом в этой области является разработка активных устройств нанофотоники, основанных на резонансах Ми, которые позволят усиливать и управлять эмиссией квантового источника, интегрированного в материал наноантенны, за счет резонансного взаимодействия с локализованными модами. Такой подход был успешно реализован, например, для уменьшения времени жизни NV-центров в алмазных наночастицах за счет их взаимодействия с Ми-резонансами наночастиц [10]; усиления фотолюминесценции (ФЛ) Ge(Si) квантовых точек, встроенных в кремниевые нанодиски [11], или ФЛ наноантенн из галогенидных перовскитов за счет взаимодействия экситонов с би- и мультиполярными резонансами Ми [12]. При этом в концепции активной наноантенны основным требованием является прозрачность материала самой антенны для диапазона излучения источника, внедренного в наноантенну.

Несмотря на недавний прогресс в усилении излучательных свойств наноструктурированного кремния [13], такие источники по-прежнему остаются малоэффективными вследствие того, что кремний – непрямозонный полупроводник. Тем не менее, оптические свойства кремния в ближней инфракрасной области (NIR) (высокий коэффициент преломления и незначительное поглощение [14]) делают этот материал привлекательным в области нанофотоники и оптоэлектроники. Материалы на основе диоксида кремния, легированные Er, представляют существенный интерес в области оптоэлектроники из-за излучения Er^{3+} на длине волны λ=1 540 нм, которая соответствует минимальному поглощению диоксида кремния и окну прозрачности в кремнии. Помимо технологической важности, комбинированные электродипольные (ЭД) и магнитодипольные (МД) излучательные переходы Er^{3+} делают его интересным для исследования селективной электрической и магнитной модификации локальной плотности фотонных состояний в диэлектрических наноструктурах, что может открыть новые пути для управления излучательными свойствами квантовых источников за счет создания как ЭД, так и МД резонансов.

Для усиления спонтанной эмиссии МД источников [15] их можно размещать внутри массивных или планарных (слоистых) структур [16]; рядом с плазмонными [17] или диэлектрическими [18] наноантеннами; а также использовать различные метаматериалы. Например, в [19] было показано усиление МД спонтанной эмиссии ионов Er^{3+} в 3.5 раза с помощью плазмонной метаповерхности. При этом разработка методов усиления люминесценции ионов Er^{3+} при помощи наноструктур, совместимых с существующими кремниевыми технологиями нанофабрикации, является важной задачей.

В настоящей работе, поддержанной грантом РФФИ (№18-29-20 107), представлены результаты, описывающие возможность создания активных диэлектрических наноантенн, обладающих магнитными резонансами, для усиления ФЛ ионов Er^{3+} без использования сложных в изготовлении многослойных систем или внешних резонаторов; а также демонстрируются оригинальные методы создания таких наноантенн.

Результаты моделирования

Первоначально проводилась разработка кремниевой наноантенны для управления излучением эрбия. С учетом особенностей нанофабрикации была выбрана цилиндрическая геометрия наноантенны, при этом контроль геометрических параметров цилиндра позволял проводить настройку спектрального положения резонансов относительно длины волны люминесценции ионов эрбия. Моделирование оптических свойств таких наноструктур проводилось в коммерчески доступном программном пакете для электродинамического моделирования CST Studio Suite. Решение уравнений Максвелла было выполнено с помощью метода конечных элементов в частотной области. Для того чтобы оценить спектральные положения резонансов в разработанной наноструктуре, ее освещали плоской волной и численно рассчитывали сечение рассеяния. Затем проводилось численное исследование влияния резонансных свойств наноструктуры на люминесценцию ионов эрбия. Так как ионы эрбия имеют оптический переход на длине волны 1 530 нм, кото-

DOI: 10.22204/2410-4639-2023-117-01-31-40 № 1 (117) январь–март 2023 г.

рый описывается одновременно электрическим и магнитным диполями [19], оба типа переходов были рассмотрены раздельно и независимо друг от друга. В численной модели точечный электрический диполь представляет собой кусочек провода длинной примерной 10 нм, в центре которого располагается дискретный порт, имитирующий генератор, а магнитный диполь – это виток провода с током диаметром 10 нм. Провод представляет собой идеальный электрический проводник диаметром 1 нм. Размер диполей много меньше длины волны, что позволяет пренебречь их размерами и рассматривать диполи как точечные. Для оценки усиления мощности излучения дипольного источника в наноантенне проводились расчеты фактора Парселла по методике, описанной в работе [20].

Для этого мощность излучения точечного дипольного источника рассчитывалась сначала в вакууме (P_0), а затем в присутствии наноструктуры (P). Фактор Парселла рассчитывался по формуле $F_p = P / P_0$.

Для определения спектрального положения резонансов был проведен расчет сечения рассеяния для кремниевого наноцилиндра, расположенного в вакууме. Показатель преломления для кремния был взят из работы [21]. Так как цилиндр – это аксиально симметричная фигура, плоская волна падала перпендикулярно оси симметрии цилиндра, и расчет был проведен для двух типов линейной поляризации плоской волны, когда вектор электрического поля ориентирован параллельно и перпендикулярно оси цилиндра (*рис. 1*, вставки).

При расчетах высота цилиндра была фиксирована и равна 300 нм, а диаметр варьировался от 350 до 900 нм. Электрические дипольные резонансы наблюдались на длине волны 1 530 нм при диаметре (D) цилиндра 590 нм и 700 нм для перпендикулярной и параллельной ориентации вектора электрического поля относительно оси цилиндра соответственно (*рис. 2*).

Затем в центр наночастицы, расположенной на стеклянной подложке,

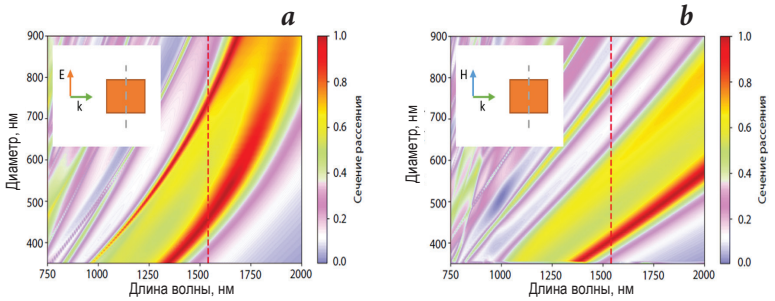


Рис. 1. *Карты численно рассчитанного сечения рассеяния для наноцилиндра, когда вектор электрического поля линейно поляризованной плоской волны параллелен (a) и перпендикулярен (b) оси цилиндра. Вставки демонстрируют ориентацию линейно поляризованной волны по отношению к оси цилиндра.*

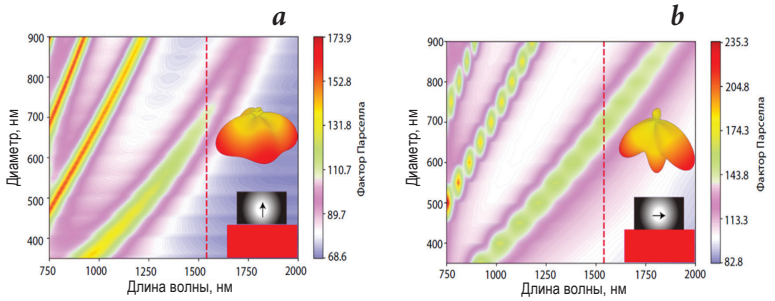


Рис. 2. *Карты рассчитанного фактора Парселла для электрического диполя, ориентированного параллельно (a) и перпендикулярно (b) оси цилиндра. Вставки демонстрируют ориентацию диполя по отношению к оси цилиндра, а также диаграммы направленности на длине волны 1 530 нм.*

помещался точечный электрический диполь. Рассчитанный фактор Парселла для наноцилиндров составил 150 (D=350 нм) и 170 (D=350 нм) для горизонтальной и вертикальной ориентации электрического диполя, соответственно (*рис. 2*). Диаграммы направленности несколько отличаются, однако практически всё излучение уходит в подложку (*рис. 2*, вставки).

Далее был исследован магнитный диполь, который также был размещен в центре наноцилиндра высотой 220 нм. При расчете также были рассмотрены две ориентации диполя. Оптимальные диаметры частиц составляют D=436 нм и D=630 нм для перпендикулярной и параллельной ориентаций диполя соответственно. Значения фактора Перселла достигали примерно 240 для перпендикулярной и 80 для параллельной ориентаций диполя (*рис. 3a*). При этом значительная часть мощности излучения уходит в подложку (*рис. 3b, c*). Сто́ит отметить, что для управления излучением магнитного диполя кремниевые наноцилиндры получились меньшего размера, чем в случае с электрическим. А диаграммы направленности (*рис. 3b, c*) обладают схожими профилями с диаграммами электрического диполя для соответствующих ориентаций (*рис. 3*, вставки).

Однако рассмотренные частицы были расположены на стеклянной подложке, когда существует только один канал излучения в свободное пространство. Дополни-

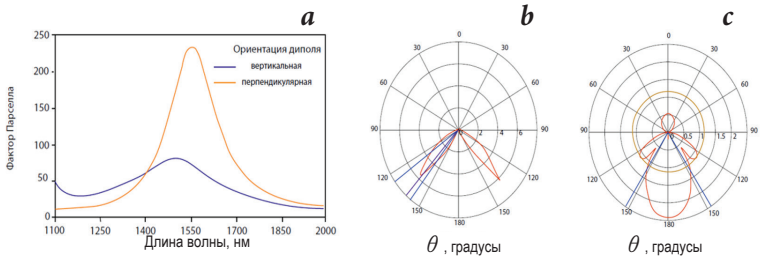


Рис. 3. *a – Рассчитанный фактор Парселла для магнитного диполя, ориентированного параллельно и перпендикулярно оси цилиндра. Диаграммы направленности излучения для магнитного диполя, ориентированного параллельно (b) и перпендикулярно (c) оси цилиндра.*

тельно в работе [22] нами было проведено численное исследования Ми-резонансной кремниевой наносферы диаметром 425 нм, расположенной над золотой подложкой. Так как частица размещается над золотой поверхностью, то излучение, рассеиваемое (излучаемое) наночастицей, может быть распределено между двумя каналами: свободное пространство (над подложкой) и поверхностный плазмон-поляритон (ППП). Магнитный дипольный резонанс наночастиц приходился на длину волны излучения эрбия. При таком типе резонанса магнитное поле локализуются внутри наночастицы, поэтому точечный магнитный дипольный источник был помещен в центр наносферы. Численные методы не позволяют прямо оценить излучение по вкладам в каналы излучения, в связи с этим был применен метод мультипольного разложения.

Сначала была рассмотрена ситуация, когда дипольный источник ориентирован параллельно поверхности золотой подложки. Меняя высоту зазора между частицей и подложкой, мы проанализировали распределение мощности излучение между свободным пространством и ППП. Когда высота зазора примерно равна 300 нм, наблюдается равное распределение мощности излучения точечного диполя, размещенного в центре сферы, в свободное пространство и ППП. Так же было обнаружено, что на этой же высоте наблюдается максимальное значение фактора Парселла, равное примерно 500, в то время как в вакууме это значение составляет 340. В случае если магнитный диполь ориентирован перпендикулярно подложке, фактор Парселла был примерно равен значению в вакууме, а излучение в канал ППП отсутствовало. Таким образом, наличие ППП позволяет дополнительно усилить излучение точечного магнитного дипольного источника, расположенного в центре кремниевой сферы, а изменение расстояния между кремниевой наносферой и золотой подложкой позволяет изменять распределение мощности излучения в свободное пространство и ППП. Таким образом, были определены геометрические параметры наноантенны, оптимальные для усиления люминесценции ионов эрбия, что позволило перейти к изготовлению активных наноантенн.

Экспериментальные результаты

Кремниевые наноматериалы могут быть получены различными способами (см., например, недавний обзор А. Кабашина и др. [23]). Для получения резонансных кремниевых структур широко распространена электронно-лучевая литография (ЭЛЛ), способная создавать как одиночные структуры [24], так и метаповерхности [25]. ЭЛС обеспечивает высокую воспроизводимость и разрешение наряду с возможностью изготовления структур сложной формы. Однако большие временны́е затраты и технологическая сложность (особенно в случае необходимости согласования между этапами фабрикации) накладывают определенные ограничения на применение метода ЭЛЛ для получения структур большой площади.

В свою очередь, лазерная обработка является перспективным и удобным способом получения оптически резонансных кремниевых наноструктур. Например, сферические наночастицы (НЧ) Si или Ge могут быть получены с помощью фемтосекундной лазерной печати (laser-induced forward transfer, LIFT) [26] или селективно иммобилизованы с помощью осаждения из полидисперсной коллоидной суспензии [27]. Кроме того, Ми-резонансные кремниевые НЧ были получены за счет распада пленки кремния на диэлектрике (SOI) при высокотемпературном отжиге [28]. Также управляемый распад пленок аморфного кремния (*a*-Si) в процессе структурирования фемтосекундным лазерным излучением был использован для крупномасштабного изготовления кристаллических резонансных НЧ [29]. При этом фемтосекундное лазерное облучение может быть использовано не только для кристаллизации *a*-Si [30], но и для одновременного внедрения излучающих центров эрбия в кремниевую матрицу, обеспечивая более низкие пороги кристаллизации и лучшее разрешение по сравнению с «длинными» лазерными импульсами. Поэтому на первом этапе экспериментов было рассмо-

трено влияние плотности энергии фемтосекундного лазерного излучения на фазовый состав и интенсивность сигнала ФЛ облученных областей многослойной пленки, состоящей из слоев Er и *a*-Si, что необходимо с точки зрения обеспечения максимальной интенсивности ФЛ внедренных ионов Er. Эксперименты проводились с многослойными пленками *a*-Si–Er–*a*-Si толщиной 105 нм, 20 нм и 10 нм соответственно на кварцевой подложке. Процесс изготовления пленок подробно рассмотрен в [31], для облучения (фемтосекундного лазерного отжига, FLA) использовалась вторая гармоника фемтосекундного лазерного источника (Авеста ТЕМА-150, центральная длина волны λ=1 050 нм, частота следования импульсов *f*=80 МГц, длительность импульса на полувысоте τ≈190 фс) [32].

При измерении спектров ФЛ был использован конфокальный микроскоп с двумя соосными оптическими каналами для возбуждения и детектирования. Для возбуждения ФЛ также использовалась вторая гармоника лазерного источника ТЕМА-150 (средняя мощность 25 мВт), излучение которого предварительно было выделено с помощью коротковолнового фильтра Thorlabs FESH0750, а после сфокусировано на поверхности образца с помощью скорректированного на бесконечность объектива Mitutoyo M Plan Apo 10×, *NA*=0.28. Излучение ФЛ собиралось скорректированным на бесконечность объективом Mitutoyo NIR M Plan Apo 50×, *NA*=0.65, остаточное излучение от источника возбуждения было отфильтровано длинноволновым фильтром Thorlabs FELH0850. Спектры ФЛ записывались с помощью спектрометра Horiba LabRAM HR UV-VIS-NIR, оснащенного дифракционной решеткой 150 лин./мм и ПЗС (прибор с зарядовой связью) камерой Andor iDus 1.7 μm InGaAs. Измерение спектров комбинационного рассеяния (КР) было реализовано в геометрии одного оптического канала, когда излучение возбуждения и измеряемый сигнал проходят через один и тот же оптический путь. Для измерений использовался He-Ne лазер с длиной волны 632.8 нм и выходной средней мощностью 0.1 мВт, излучение которого было отфильтровано длинноволновым фильтром с отсекающей длиной волны 650 нм и сфокусировано на поверхности образца при помощи скорректированного на бесконечности объектива Mitutoyo M Plan Apo 100×, *NA*=0.70. Измерение спектров КР проводилось на том же спектрометре с дифракционными решетками 150 лин./мм и 600 лин./мм и ПЗС камерой Andor DU 420A-OE 325. Все измерения проводились при комнатной температуре в условиях нормальной атмосферы.

Установлено, что увеличение плотности энергии лазерной обработки приводит к росту амплитуды сигналов ФЛ и КР (*рис. 4a, b*). Увеличение сигнала ФЛ можно объяснить увеличением концентрации эрбия в кремниевой матрице (при более низких интенсивностях воздействия) и изменением типа окружающего материала (при более высоких интенсивностях воздействия). Действительно, ионы эрбия в окружении атомов кислорода светятся ярче, чем в окружении кремния [33]. В наших экспериментах образование насыщенной кислородом (оксидной) среды можно связать с процессом окисления кремния при лазерном воздействии в воздушной атмосфере [34]. Причина последующего уменьшения сигнала ФЛ, в основном, связана с испарением материала, когда интенсивность лазера превышает порог повреждения (>8 мДж/см^2).

В свою очередь, увеличение сигнала КР можно объяснить лазерным нагревом кремния с его последующей кристаллизацией. Однако объем кристаллической фазы кремния при высоких плотностях энергии уменьшается. Этот эффект можно объяснить разрушением решетки кремния, вызванным реакцией кремния с воздушной средой при высоких температурах и сопровождающимся поглощением кислорода, что приводит к образованию *a*-SiO_2-матрицы. В пользу этого предположения свидетельствует форма спектра ФЛ, которая претерпевает заметные изменения: наблюдаемая

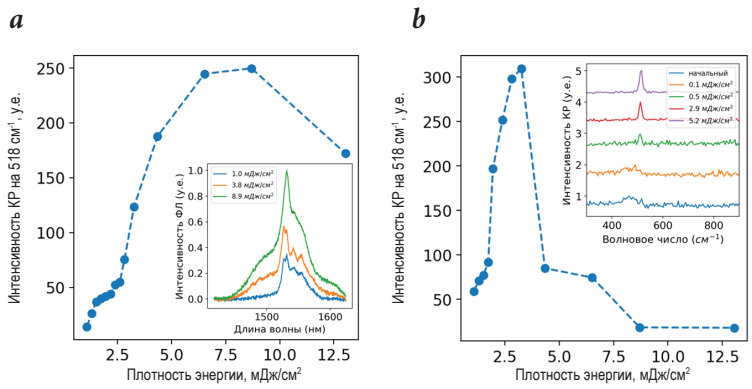


Рис. 4. *Зависимость сигнала ФЛ на 1 530 нм (a) и КР на 518 см$^{-1}$ (b) пленки кремний-эрбий в зависимости от плотности энергии лазерного облучения. На вставках показаны характерные спектры ФЛ и КР после FLA при разных значениях поглощенной плотности энергии.*

тонкая структура пиков размывается, образуя единый широкий пик. Такая ситуация характерна для люминесценции эрбия в матрицах щелочно-силикатного стекла на основе оксида кремния [35] (см. вставку на *рисунке 4a*).

На следующем этапе с помощью литографических методов были изготовлены массивы, состоящие из резонансных Si–Er наноцилиндров (метаповерхности). Каждый массив состоит из 16×16 наноцилиндров высотой 200 нм (*рис. 5a*). Затем с помощью режимов лазерного облучения, определенных в процессе предыдущих экспериментов, была проведена кристаллизация наноцилиндров.

На *рисунке 5b, c* представлены спектры КР и ФЛ наноцилиндра до и после лазерного отжига. Можно увидеть, что лазерное облучение приводит к кристаллизации кремния с одновременным внедрением эрбия в кремний и, тем самым, обеспечивает эффективную фотолюминесценцию ионов Er^{3+} на длине волны 1 530 нм.

Заключение

На основании полученных результатов может быть сделан вывод, что наиболее перспективным направлением создания активных наноантенн является сочетание литографических методов, позволяющих с высокой степенью точности контролировать как размеры, так и положение создаваемых наноантенн с последующей лазерно-индуцированной кристаллизацией, дающей возможность управлять фазовым состоянием кремния. В частности, в работе экспериментально продемонстрирован метод кристаллизации пленок и наноструктур Si–Er за счет фемтосекундного лазерного отжига. С помощью численного моделирования было проведено исследование резонансных кремниевых наночастиц для контроля люминесценции ионов Er, внедренных в такие наносистемы. Была продемонстрирована возможность усиливать излучение точечного диполя, моделирующего ион Er, а также управлять излучением между свободным пространством и поверхностны плазмоном-поляритоном на длине волны излучения ионов эрбия (1 530 нм). Немаловажно, что геометрия разработанных активных наноантенн может быть адаптирована для других точечных источников с учетом диапазона их люминесценции и оптических свойств материала наноантенн.

При этом усиление фотолюминесценции ионов Er^{3+} не только является важной задачей с фундаментальной точки зрения, но и обладает существенным потенциалом практического применения для разработки новых и усовершенствования существующих телекоммуникационных систем. Представленные результаты формируют задел для создания нового класса метаповерхностей, излучающих в ближнем ИК-диапазоне, на основе активных наноантенн из кремниевых наночастиц, легированных ионами эрбия. Подоб-

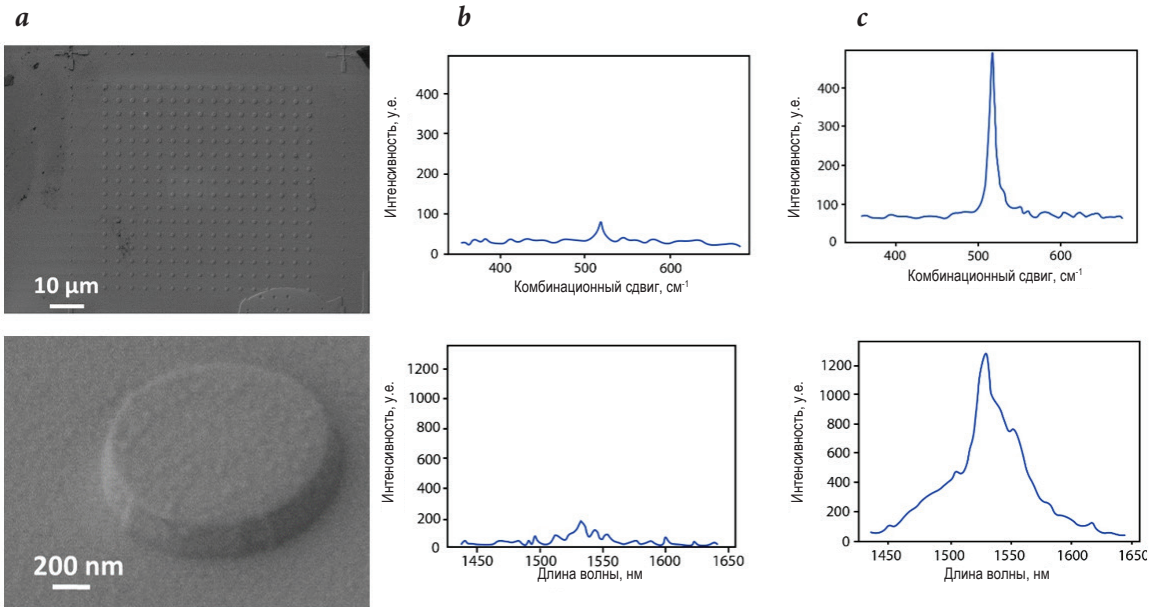


Рис. 5. *a – СЭМ-изображение наноцилиндров Si–Er (сверху) и вид отдельного наноцилиндра (снизу); спектры комбинационного рассеяния (верхний ряд) и фотолюминесценции (нижний ряд) до (b) и после (c) FLA Si–Er наноцилиндра.*

ные метаповерхности в перспективе могут найти применение в области телекоммуникационных устройств, например, для создания источников и усилителей оптического излучения, а также для управления диаграммой направленности излучения. Кроме того, разработанные наноразмерные источники перспективны для разработки компонент новых устройств, предназначенных для хранения, передачи и обработки информации оптическими методами.

Литература

1. ***D.N. Basov, M.M. Fogler***
Nat. Nanotechnol., 2017, **12**(3), 187. DOI: 10.1038/nnano.2016.283.
2. ***A.I. Kuznetsov, A.E. Miroshnichenko, M.L. Brongersma, Y.S. Kivshar, B. Luk'yanchuk***
Science, 2016, **354**(6314), aag2472. DOI: 10.1126/science.aag2472.
3. ***A. Faraon, P.E. Barclay, C. Santori, K.-M.C. Fu, R.G. Beausoleil***
Nat. Photonics, 2011, **5**(5), 301. DOI: 10.1038/nphoton.2011.52.
4. ***N. Kongsuwan, A. Demetriadou, R. Chikkaraddy, F. Benz, V.A. Turek, U.F. Keyser, J.J. Baumberg, O. Hess***
ACS Photonics, 2018, **5**(1), 186. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00668.
5. ***T.B. Hoang, G.M. Akselrod, C. Argyropoulos, J. Huang, D.R. Smith, M.H.Mikkelsen***
Nat. Commun., 2015, **6**, 7788. DOI: 10.1038/ncomms8788.
6. ***H. Aouani, M. Rahmani, M. Navarro-Cía, S.A. Maier***
Nat. Nanotechnol., 2014, **9**(4), 290. DOI: 10.1038/nnano.2014.27.
7. ***N. Bonod, Y. Kivshar***
Comptes Rendus Phys., 2020, **21**(4-5), 425. DOI: 10.5802/crphys.31.
8. ***S. Makarov, S. Kudryashov, I. Mukhin, A. Mozharov, V. Milichko, A. Krasnok, P. Belov***
Nano Lett., 2015, **15**(9), 6187. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b02534.
9. ***J.S. Totero Gongora, A.E. Miroshnichenko, Y.S. Kivshar, A. Fratalocchi***
Nat. Commun., 2017, **8**(1), 15535. DOI: 10.1038/ncomms15535.
10. ***A.S. Zalogina, R.S. Savelev, E.V. Ushakova, G.P. Zograf, F.E.Komissarenko, V.A. Milichko, S.V. Makarov, D.A. Zuev, I.V. Shadrivov***
Nanoscale, 2018, **10**(18), 8721. DOI: 10.1039/C7NR07953B.
11. ***V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling***
Nano Lett., 2017, **17**(11), 6886. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b03248.
12. ***E.Y. Tiguntseva, G.P. Zograf, F.E. Komissarenko, D.A. Zuev, A.A. Zakhidov, S.V. Makarov, Y.S. Kivshar***
Nano Lett., 2018, **18**(2), 1185. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b04727.
13. ***J. Xiang, J. Chen, Q. Dai, S. Tie, S. Lan, A.E. Miroshnichenko***
Phys. Rev. Appl., 2020, **13**(1), 014003.
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.014003.
14. ***Y. Yang, H. Kang, C. Jung, J. Seong, N. Jeon, J. Kim, D.K. Oh, J. Park, H. Kim, J. Rho***
ACS Photonics, 2023, **10**(2), 307.
DOI: 10.1021/acsphotonics.2c01341.
15. ***D.G. Baranov, R.S. Savelev, S.V. Li, A.E. Krasnok, A. Alù***
Laser Photon. Rev., 2017, **11**(3), 1600268. DOI: 10.1002/lpor.201600268.
16. ***T.H. Taminiau, S. Karaveli, N.F. Van Hulst, R. Zia***
Nat. Commun., 2012, **3**(1), 979. DOI: 10.1038/ncomms1984.
17. ***H. Nabika, S. Deki***
J. Phys. Chem. B, 2003, **107**(35), 9161. DOI: 10.1021/jp035741b.
18. ***A.B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel, B.S. Luk'Yanchuk, B.N. Chichkov***
Phys. Rev. B, 2010, **82**(4), 12. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.045404.
19. ***B. Choi, M. Iwanaga, Y. Sugimoto, K. Sakoda, H.T. Miyazaki***
Nano Lett., 2016, **16**(8), 5191. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b02200.
20. ***A.E. Krasnok, A.P. Slobozhanyuk, C.R. Simovski, S.A. Tretyakov, A.N.Poddubny, A.E. Miroshnichenko, Y.S. Kivshar, P.A. Belov***
Sci. Rep., 2015, **5**(1), 12956. DOI: 10.1038/srep12956.
21. ***M.A. Green***
Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2008, **92**(11), 1305.
DOI: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
22. ***V. Yaroshenko, D. Zuev, A.B. Evlyukhin***
Surfaces and Interfaces, 2022, **34**, 102344.
DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102344.
23. ***A.V. Kabashin, A. Singh, M.T. Swihart, I.N. Zavestovskaya, P.N. Prasad***
ACS Nano, 2019, **13**(9), 9841. DOI: 10.1021/acsnano.9b04610.
24. ***M.A. van de Haar, J. van de Groep, B.J. M. Brenny, A. Polman***
Opt. Express, 2016, **24**(3), 2047.
DOI: 10.1364/OE.24.002047.
25. ***I. Staude, J. Schilling***
Nat. Photonics, 2017, **11**(5), 274. DOI: 10.1038/nphoton.2017.39.
26. ***D.M. Zhigunov, A.B. Evlyukhin, A.S. Shalin, U. Zywietz, B.N. Chichkov***
ACS Photonics, 2018, **5**(3), 977. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01275.
27. ***C. Zaza, I.L. Violi, J. Gargiulo, G. Chiarelli, L. Schumacher, J. Jakobi, J. Olmos-Trigo, E. Cortes, M. König, S. Barcikowski, S. Schlücker, J.J. Sáenz, S.A. Maier, F.D. Stefani***
ACS Photonics, 2019, **6**(4), 815. DOI: 10.1021/acsphotonics.8b01619.
28. ***M. Naffouti, T. David, A. Benkouider, L. Favre, A. Ronda, I. Berbezier, S. Bidault, N. Bonod, M. Abbarchi***
Nanoscale, 2016, **8**(5), 2844. DOI: 10.1039/C5NR07597A.
29. ***S. Syubaev, E. Mitsai, S. Starikov, A. Kuchmizhak***
Opt. Lett., 2021, **46**(10), 2304. DOI: 10.1364/OL.425809.
30. ***K. Bronnikov, A. Dostovalov, A. Cherepakhin, E. Mitsai, A. Nepomniaschiy, S.A. Kulinich, A. Zhizhchenko, A. Kuchmizhak***
Materials (Basel), 2020, **13**(22), 5296. DOI: 10.3390/ma13225296.
31. ***A.O. Larin, E.I. Ageev, L.N. Dvoretckaia, A.M. Mozharov, I.S. Mukhin, D.A. Zuev***
JETP Lett., 2021, **114**(11), 681. DOI: 10.1134/S0021364021230090.
32. ***A.O. Larin, L.N. Dvoretckaia, A.M. Mozharov, I.S. Mukhin, A.B. Cherepakhin, I.I. Shishkin, E.I. Ageev, D.A. Zuev***
Adv. Mater., 2021, **33**(16), 2005886. DOI: 10.1002/adma.202005886.
33. ***A. Polman***
Phys. B Condens. Matter, 2001, **300**(1), 78.
DOI: 10.1016/S0921-4526(01)00573-7.
34. ***Y. Nagasaki, M. Suzuki, I. Hotta, J. Takahara***
ACS Photonics, 2018, **5**(4), 1460. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01467.
35. ***A. Prnová, J. Valúchová, N. Mutlu, M. Parchovianský, R. Klement, A. Plško, D. Galusek***
J. Therm. Anal. Calorim., 2020, **142**(1), 129.
DOI: 10.1007/s10973-020-09816-3.

English

Development of Active Dielectric Si-Er Nanoantennas*

Eduard I. Ageev
ITMO University
9 Lomonosova Str.,
Saint Petersburg, 191002, Russia
eduard.ageev@metalab.ifmo.ru

Anna A. Dyatlovich
ITMO University
9 Lomonosova Str.,
Saint Petersburg, 191002, Russia
anna.dyatlovich@metalab.ifmo.ru

Vitaly V. Yaroshenko
ITMO University
9 Lomonosova Str.,
Saint Petersburg, 191002, Russia
v.yaroshenko@metalab.ifmo.ru

Artem O. Larin
ITMO University
9 Lomonosova Str.,
Saint Petersburg, 191002, Russia
Artem.larin@metalab.ifmo.ru

Liliia N. Dvoretckaia
Alferov Saint Petersburg National
Research Academic University, RAS
8/3 Khlopin Str.,
Saint Petersburg, 194021, Russia
Liliyabutler@gmail.com

Alexey M. Mozharov
Alferov Saint Petersburg National
Research Academic University, RAS
8/3 Khlopin Str.,
Saint Petersburg, 194021, Russia
mozharov@spbau.ru

Ivan S. Mukhin
Director of the Higher School of
Engineering Physics, Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic University
29 Polytekhnicheskaya Str.,
Saint Petersburg, 195251, Russia
muhin_is@spbstu.ru

Dmitry A. Zuev
ITMO University
9 Lomonosova Str., Saint Petersburg,
191002, Russia
d.zuev@metalab.ifmo.ru

Abstract

In this work, theoretical and experimental studies on the development of sources emitting in the near infrared range based on active nanoantennas from silicon nanoparticles doped with erbium ions (Si–Er) are made. Numerical simulations have demonstrated an increase in the Purcell factor by two orders of magnitude for nanoparticles with electric or magnetic dipole resonance at the erbium radiation wavelength. The possibility of redistributing the radiation power of a point dipole source between a free space and a surface plasmon polariton by changing the height of the gap between the nanoparticle and the gold substrate was demonstrated. An experimental implementation of nanoantennas was also carried out. Due to femtosecond laser annealing, the crystallization of the Si–Er film and nanoparticles are made and the effect of laser-induced crystallization on their radiative properties is studied. Active nanoantennas have been developed and studied to control the emission of erbium ions in the near-IR range, representing resonant silicon nanocylinders doped with erbium. The results obtained are promising for the creation of nanophotonic telecommunication devices compatible with existing silicon fabrication technologies.

Keywords: active dielectric nanoantenna, erbium, silicon, Purcell effect, photoluminescence, magnetic dipole, Mie resonances.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-29-20107).*

Images & Tables

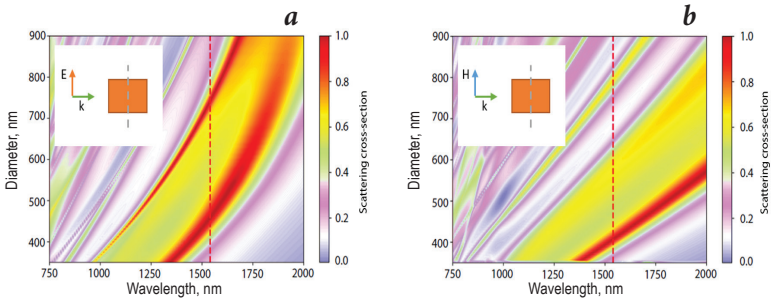


Fig 1. *Maps of the numerically calculated scattering cross section for a nanocylinder when the electric field vector of a linearly polarized plane wave is parallel (a) and perpendicular (b) to the cylinder axis. The inserts demonstrate the orientation of the linearly polarized wave with respect to the cylinder axis.*

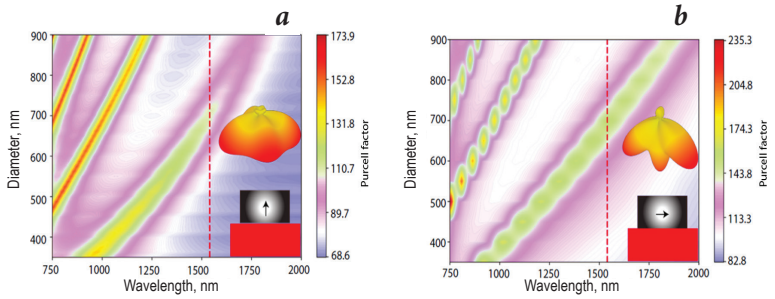


Fig. 2. *Maps of the calculated Purcell factor for an electric dipole oriented parallel (a) and perpendicular (b) to the cylinder axis. The insets show the orientation of the dipole with respect to the axis of the cylinder and directivity patterns at the wavelength of 1 530 nm.*

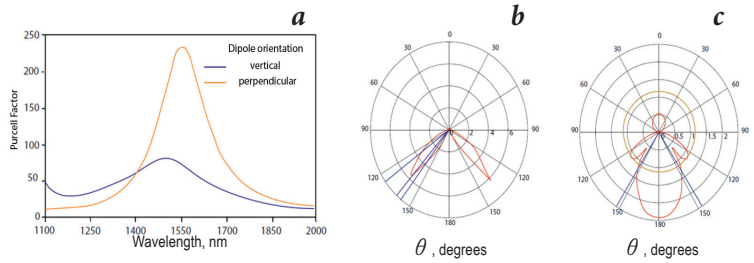


Fig. 3. *a – Calculated Purcell factor for the magnetic dipole oriented parallel and perpendicular to the cylinder axis. Directivity patterns for the magnetic dipole oriented parallel (b) and perpendicular (c) to the cylinder axis.*

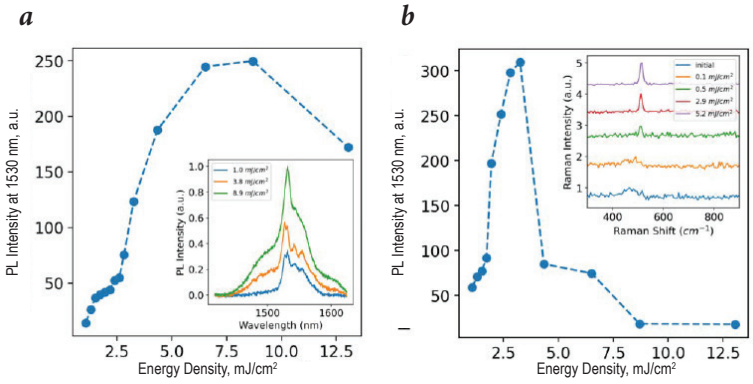


Fig. 4. *Dependence of PL at 1 530 nm (a) and Raman at 518 cm^{-1} (b) signals of silicon-erbium film on laser fluence. The insets show characteristic PL and Raman spectra after FLA at different values of absorbed laser fluence.*

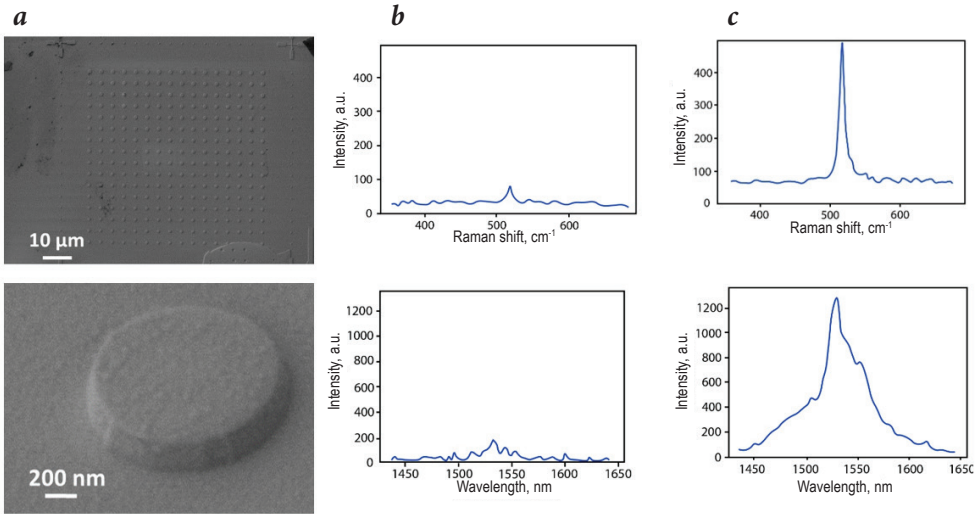


Fig. 5. a – SEM images of Si–Er nanocylinders (top) and single nanocylinder (bottom); Raman spectra (top row), and photoluminescence spectra (bottom row) before (b) and after (c) FLA of Si–Er nanocylinders.

References

1. ***D.N. Basov, M.M. Fogler***
Nat. Nanotechnol., 2017, **12**(3), 187. DOI: 10.1038/nnano.2016.283.
2. ***A.I. Kuznetsov, A.E. Miroshnichenko, M.L. Brongersma, Y.S. Kivshar, B. Luk'yanchuk***
Science, 2016, **354**(6314), aag2472. DOI: 10.1126/science.aag2472.
3. ***A. Faraon, P.E. Barclay, C. Santori, K.-M.C. Fu, R.G. Beausoleil***
Nat. Photonics, 2011, **5**(5), 301. DOI: 10.1038/nphoton.2011.52.
4. ***N. Kongsuwan, A. Demetriadou, R. Chikkaraddy, F. Benz, V.A. Turek, U.F. Keyser, J.J. Baumberg, O. Hess***
ACS Photonics, 2018, **5**(1), 186. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b00668.
5. ***T.B. Hoang, G.M. Akselrod, C. Argyropoulos, J. Huang, D.R. Smith, M.H.Mikkelsen***
Nat. Commun., 2015, **6**, 7788. DOI: 10.1038/ncomms8788.
6. ***H. Aouani, M. Rahmani, M. Navarro-Cía, S.A. Maier***
Nat. Nanotechnol., 2014, **9**(4), 290. DOI: 10.1038/nnano.2014.27.
7. ***N. Bonod, Y. Kivshar***
Comptes Rendus Phys., 2020, **21**(4-5), 425. DOI: 10.5802/crphys.31.
8. ***S. Makarov, S. Kudryashov, I. Mukhin, A. Mozharov, V. Milichko, A. Krasnok, P. Belov***
Nano Lett., 2015, **15**(9), 6187. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b02534.
9. ***J.S. Totero Gongora, A.E. Miroshnichenko, Y.S. Kivshar, A. Fratalocchi***
Nat. Commun., 2017, **8**(1), 15535. DOI: 10.1038/ncomms15535.
10. ***A.S. Zalogina, R.S. Savelev, E.V. Ushakova, G.P. Zograf, F.E.Komissarenko, V.A. Milichko, S.V. Makarov, D.A. Zuev, I.V. Shadrivov***
Nanoscale, 2018, **10**(18), 8721. DOI: 10.1039/C7NR07953B.
11. ***V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling***
Nano Lett., 2017, **17**(11), 6886. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b03248.
12. ***E.Y. Tiguntseva, G.P. Zograf, F.E. Komissarenko, D.A. Zuev, A.A. Zakhidov, S.V. Makarov, Y.S. Kivshar***
Nano Lett., 2018, **18**(2), 1185. DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b04727.
13. ***J. Xiang, J. Chen, Q. Dai, S. Tie, S. Lan, A.E. Miroshnichenko***
Phys. Rev. Appl., 2020, **13**(1), 014003.
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.014003.
14. ***Y. Yang, H. Kang, C. Jung, J. Seong, N. Jeon, J. Kim, D.K. Oh, J. Park, H. Kim, J. Rho***
ACS Photonics, 2023, **10**(2), 307. DOI: 10.1021/acsphotonics.2c01341.
15. ***D.G. Baranov, R.S. Savelev, S.V. Li, A.E. Krasnok, A. Alù***
Laser Photon. Rev., 2017, **11**(3), 1600268.
DOI: 10.1002/lpor.201600268.
16. ***T.H. Taminiau, S. Karaveli, N.F. Van Hulst, R. Zia***
Nat. Commun., 2012, **3**(1), 979. DOI: 10.1038/ncomms1984.
17. ***H. Nabika, S. Deki***
J. Phys. Chem. B, 2003, **107**(35), 9161. DOI: 10.1021/jp035741b.
18. ***A.B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel, B.S. Luk'Yanchuk, B.N. Chichkov***
Phys. Rev. B, 2010, **82**(4), 12. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.045404.
19. ***B. Choi, M. Iwanaga, Y. Sugimoto, K. Sakoda, H.T. Miyazaki***
Nano Lett., 2016, **16**(8), 5191. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b02200.
20. ***A.E. Krasnok, A.P. Slobozhanyuk, C.R. Simovski, S.A. Tretyakov, A.N.Poddubny, A.E. Miroshnichenko, Y.S. Kivshar, P.A. Belov***
Sci. Rep., 2015, **5**(1), 12956. DOI: 10.1038/srep12956.
21. ***M.A. Green***
Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2008, **92**(11), 1305.
DOI: 10.1016/j.solmat.2008.06.009.
22. ***V. Yaroshenko, D. Zuev, A.B. Evlyukhin***
Surfaces and Interfaces, 2022, **34**, 102344.
DOI: 10.1016/j.surfin.2022.102344.
23. ***A.V. Kabashin, A. Singh, M.T. Swihart, I.N. Zavestovskaya, P.N. Prasad***
ACS Nano, 2019, **13**(9), 9841. DOI: 10.1021/acsnano.9b04610.
24. ***M.A. van de Haar, J. van de Groep, B.J. M. Brenny, A. Polman***
Opt. Express, 2016, **24**(3), 2047. DOI: 10.1364/OE.24.002047.
25. ***I. Staude, J. Schilling***
Nat. Photonics, 2017, **11**(5), 274. DOI: 10.1038/nphoton.2017.39.
26. ***D.M. Zhigunov, A.B. Evlyukhin, A.S. Shalin, U. Zywietz, B.N. Chichkov***
ACS Photonics, 2018, **5**(3), 977. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01275.
27. ***C. Zaza, I.L. Violi, J. Gargiulo, G. Chiarelli, L. Schumacher, J. Jakobi, J. Olmos-Trigo, E. Cortes, M. König, S. Barcikowski, S. Schlücker, J.J. Sáenz, S.A. Maier, F.D. Stefani***
ACS Photonics, 2019, **6**(4), 815. DOI: 10.1021/acsphotonics.8b01619.
28. ***M. Naffouti, T. David, A. Benkouider, L. Favre, A. Ronda, I. Berbezier, S. Bidault, N. Bonod, M. Abbarchi***
Nanoscale, 2016, **8**(5), 2844. DOI: 10.1039/C5NR07597A.
29. ***S. Syubaev, E. Mitsai, S. Starikov, A. Kuchmizhak***
Opt. Lett., 2021, **46**(10), 2304. DOI: 10.1364/OL.425809.
30. ***K. Bronnikov, A. Dostovalov, A. Cherepakhin, E. Mitsai, A. Nepomniaschiy, S.A. Kulinich, A. Zhizhchenko, A. Kuchmizhak***
Materials (Basel)., 2020, **13**(22), 5296. DOI: 10.3390/ma13225296.
31. ***A.O. Larin, E.I. Ageev, L.N. Dvoretckaia, A.M. Mozharov, I.S. Mukhin, D.A. Zuev***
JETP Lett., 2021, **114**(11), 681. DOI: 10.1134/S0021364021230090.
32. ***A.O. Larin, L.N. Dvoretckaia, A.M. Mozharov, I.S. Mukhin, A.B. Cherepakhin, I.I. Shishkin, E.I. Ageev, D.A. Zuev***
Adv. Mater., 2021, **33**(16), 2005886. DOI: 10.1002/adma.202005886.
33. ***A. Polman***
Phys. B Condens. Matter, 2001, **300**(1), 78.
DOI: 10.1016/S0921-4526(01)00573-7.
34. ***Y. Nagasaki, M. Suzuki, I. Hotta, J. Takahara***
ACS Photonics, 2018, **5**(4), 1460. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01467.
35. ***A. Prnová, J. Valúchová, N. Mutlu, M. Parchovianský, R. Klement, A. Plško, D. Galusek***
J. Therm. Anal. Calorim., 2020, **142**(1), 129.
DOI: 10.1007/s10973-020-09816-3.