

# МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ ДЕФЕКТАМИ, ИЗЛУЧАЮЩИМИ В БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

**Ярошенко В.В.<sup>1</sup>, Дятлович А.А.<sup>1</sup>, Кустов П.Н.<sup>1</sup>, Гудовских А.С.<sup>2</sup>, Голтаев А.С.<sup>2</sup>, Мухин И.С.<sup>2</sup>, Агеев Э.И.<sup>1</sup>, Зуев Д.А.<sup>1</sup>**

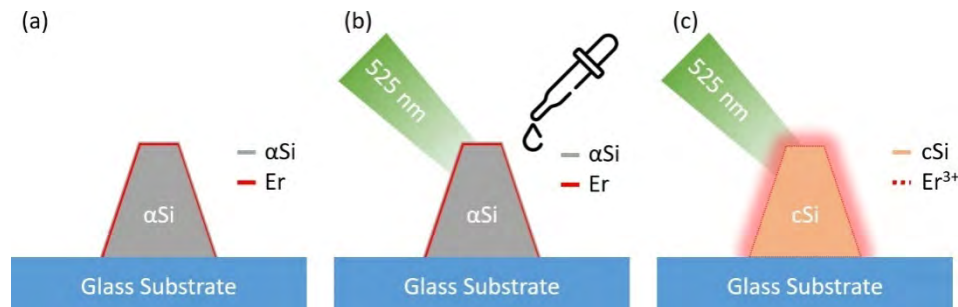
<sup>1</sup> Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

\* E-mail: v.yaroshenko@metalab.ifmo.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-104-105

Современные методы производства электронных устройств для телекоммуникаций достигли своих технологических пределов, и для преодоления этого ограничения предлагается заменить электронные компоненты на оптические чипы.[1,2] Основным элементом таких чипов является наноразмерный источник,[1] и ион эрбия является наиболее перспективным кандидатом для создания таких устройств за счет своего перехода, соответствующего стандартной телекоммуникационной длине волны.[3] Однако необходимо эффективно собирать и усиливать излучение наноразмерного источника, и для этого идеально подходят резонансные наноструктуры на основе кремния, которые обладают высоким показателем преломления и низкими потерями в ближнем инфракрасном диапазоне.[4,5] Кроме того, такие наноструктуры могут управлять и усиливать излучение наноразмерного источника благодаря наличию Ми-резонансов[6]. Однако изготовление таких структур является сложным многоэтапным процессом, поэтому упрощенные методы производства активных кремниевых наноструктур имеют большой потенциал для использования в создании большого количества оптических телекоммуникационных устройств.[7,8]

В этой работе показаны наши результаты [9], посвященные изготовлению и исследованию излучающих диэлектрических наночастиц из кремния, легированного ионами эрбия, в виде усеченного наноконуса.



**Рис. 1. Процесс изготовления: (а) кремниевый усеченный наноконус, изготовленный с использованием нанолитографии, с нанесенными слоями эрбия и кремния; (б) лазерно-индуцированный отжиг и травление; (с) Изготовленная активная диэлектрическая наночастица в виде усеченного наноконуса**

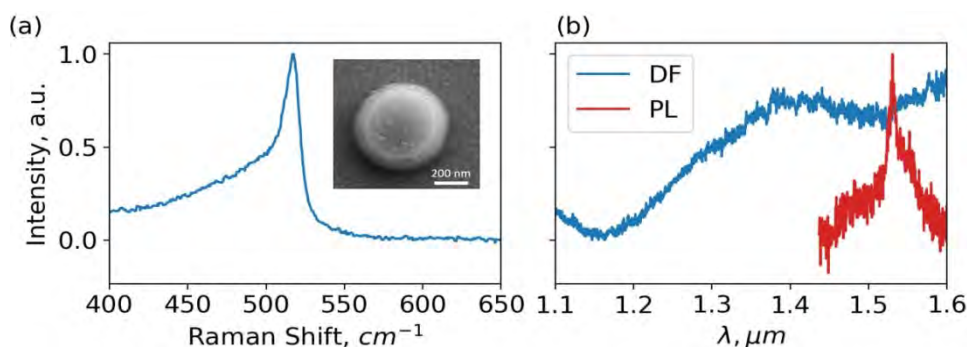
Мы начали наше исследование с численных расчетов. Форма кремниевой наноструктуры с учетом особенностей метода изготовления представляет собой усеченный конус с соотношением верхнего и нижнего диаметров примерно равным 0,95, а высота наноконуса составляет 300 нм. Дисперсия кремния была взята из ссылки[5]. Усеченный наноконус расположен на стеклянной подложке с показателем преломления 1,45. Влияние ионов эрбия на материальную дисперсию кремния не учитывалась, потому что ионы эрбия встраиваются только в поверхность и малых концентрациях.

Сначала наночастица облучалась плоской линейно-поляризованной нормально падающей волной и определялись геометрические параметры структуры, когда первый порядок Ми-резонансов в наноструктуре приходился на длину волны излучения ионов эрбия, равную 1540 нм. Затем фактор Парселла рассчитывался и усреднялся по ориентации, положению на поверхности наноконуса и типу диполя (электрический или магнитный). Для таких наночастиц усредненный фактор Парселла может быть увеличен на два порядка (около 300) за счет наличия Ми-резонансов[9].

Далее мы приступили к процессу изготовления наноструктур. Сначала на стеклянную подложку была нанесена пленка аморфного кремния толщиной 300 нм. Далее с использованием электронной лучевой литографии были изготовлены наночастицы в форме усеченного наноконуса с нижним

диаметром примерно равным 530 нм. Полученные наночастицы были покрыты слоем эрбия, а затем слоем кремния (см. рис. 1а). Слой кремния необходим для предотвращения окисления эрбия на воздухе. После изготовления структуры мы приступили к внедрению ионов эрбия с помощью лазерно-индуцированного отжига наночастиц. Для этого мы облучали наночастицы фемтосекундным лазерным лучом на длине волны 525 нм с плотностью энергии 17 мДж/см<sup>2</sup> (ниже чем порог повреждения наночастиц).[9] В качестве лазерного источника мы использовали фемтосекундный лазер Авеста ТЕМА с продолжительностью импульсов 178 фс частотой повторения 80 МГц на длине волны 1050 нм. Далее с помощью нелинейного кристалла основную гармонику преобразовали во вторую с длиной волны 525 нм. Лазерный луч фокусировался на образце снизу с помощью объектива с числовой апертурой NA = 0,26. После отжига не внедренный слой эрбия вытравливался с помощью хлористой кислоты (см. рис. 1б). Рисунок 1с демонстрирует модель изготовленной наночастицы. На рисунке 2а (вставка) представлено изображение полученной наноструктуры, сделанное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

Наконец, мы провели экспериментальное исследование изготовленных наночастиц. Для определения фазы кремния было проведено измерение комбинационного (рамановского) рассеяния. Пик комбинационного спектра рассеяния приходится на 520 см<sup>-1</sup> (см рис. 2а), который соответствует кристаллической фазе кремния. Спектроскопия комбинационного рассеяния позволяла контролировать процесс отжига (до отжига фаза кремния аморфная). Далее были измерены спектры темнопольного рассеяния от наноконуса и фотолюминесценции (ФЛ) внедренных ионов эрбия (см. рис. 2б). Мы сравнили интегральную интенсивность ФЛ в диапазоне от 1.45-1.65 мкм с интенсивностью ФЛ отожженной пленки той же толщины, что и высота усеченного конуса, и с нерезонансным наноконусом, отожженным при тех же условиях как резонансный. Интегральная интенсивность излучения ионов эрбия в резонансном наноконусе была на 2-порядка выше по сравнению с отожженной пленке и на 40 % больше по отношению к нерезонансному наноконусу.



**Рис. 2. Экспериментально измеренные спектры (а) рамановского рассеяния, (б) темнопольного рассеяния (DF) и фотолюминесценция (PL) для кремниевого усеченного наноконуса легированного ионами эрбия. вставка в (а) СЭМ-изображение изготовленной наноструктуры**

Таким образом, был разработан метод изготовления излучающих кремниевых наночастиц с помощью комбинации нанолитографии и лазерно-индуцированного отжига. Было определено, что оптимальная плотность энергий при отжиге наночастицы без нарушения геометрической формы составляет 17 мДж/см<sup>2</sup>. Также было показано, увеличение интегральной интенсивности ФЛ из-за наличия Ми-резонансов в наночастицах. Результаты, продемонстрированные в этой работе, могут найти применение в нанопотонике, особенно в оптических телекоммуникациях.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030». Ярошенко В.В. лично благодарит Фонд поддержки молодых ученых имени Геннадия Комиссарова за предоставленную финансовую поддержку.

## Литература

1. W.Elshaari et al., *Nat Photonics*, **14**, 285–298, (2020)
2. H.Zhang et al., *Nature Communications* 2021 12:1, **12**, 1–11, (2021)
3. N.Q.Vinh et al., *Proceedings of the IEEE*, **97**, 1269–1282, (2009)
4. F.Koenderink, *ACS Photonics*, **4**, 710–722, (2017)
5. M.A.Green, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **92**, 1305–1310, (2008)
6. Staude et al., *ACS Photonics*, **6**, 802–814, (2019)
7. Kalinic et al., *Phys Rev Appl*, **10**, 14086, (2020)
8. V.Rutckaia et al., *Nano Lett*, **17**, 6886–6892, (2017)
9. V.Yaroshenko et al., *Laser Photon Rev*, **17**, 2200661, (2023)