

Фемтосекундная лазерная печать Ми-резонансных Si, Ge и SiGe наночастиц и их оптический отклик

Д.М. Жигунов^{1,*}, Д.А. Шилкин², В.О. Бессонов^{2,3}

¹ Сколковский институт науки и технологий

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

³ Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН

*E-mail: d.zhigunov@skoltech.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.132-133

Оптически резонансные наноструктуры, изготовленные из полупроводниковых материалов с высоким показателем преломления, таких как Si, Ge и GaAs, в настоящее время находятся в центре внимания исследователей, занимающихся проблемой управления светом на наномасштабах. Этому способствуют относительно низкие потери на поглощение на оптических частотах и выраженные резонансы типа Ми, позволяющие усиливать локальное электромагнитное поле внутри отдельных наночастиц за счет возбуждения характерных магнитных и электрических мод в видимой и ближней ИК областях спектра. Вследствие низких потерь подобные наноструктуры принято называть в литературе диэлектрическими, а соответствующую область исследований – диэлектрической нанофотоникой.

В рамках настоящей работы были исследованы оптические свойства Si, Ge и SiGe наночастиц, полученных методом фемтосекундной лазерной печати из соответствующих тонких пленок [1-3]. Метод лазерной печати основан на явлении прямого или обратного лазерного переноса, в процессе которого происходит расплавление тонкой пленки требуемого материала единичным фемтосекундным лазерным импульсом с последующим выбросом капли в направлении приемной подложки. Достигая подложки, капля застывает и формирует наночастицу с близкой к сферической формой и размерами порядка нескольких сотен нанометров. При этом геометрией полученных наночастиц можно управлять, изменяя параметры лазерного импульса (длина волны, длительность, энергия) и толщину исходной донорной пленки. Также к достоинствам метода лазерной печати следует отнести прецизионное позиционирование наночастиц на приемной подложке и возможность переноса практически на любую поверхность.

Впервые методом лазерной печати были получены упорядоченные массивы кристаллических одиночных Ge и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ наночастиц с размерами от 100 до 300 нм и измерены их спектры рассеяния в видимой области спектра [1]. Получено хорошее согласие экспериментальных спектров рассеяния и соответствующих сечений рассеяния, рассчитанных с помощью теории Ми. Кристалличность наночастиц и параметр стехиометрии x для $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ наночастиц были исследованы с помощью спектров комбинационного рассеяния света. Показано, что наилучшей упорядоченности и контроля размера наночастиц можно добиться за счет подбора длины волны и энергии фемтосекундного лазерного импульса в совокупности с требуемой толщиной донорной пленки, что приводит к оптимальному объему расплавленной части пленки.

За счет поглощения и рассеяния света и своей конечной толщины подложка может снижать добротность оптических резонансов расположенных на ней наночастиц. В целях минимизации влияния окружения на свойства Ми-резонансных наночастиц было предложено использовать мембраны из одностенных углеродных нанотрубок (SWCNT) в качестве приемной подложки в

процессе лазерной печати. Так лазерный перенос Si наночастиц размером около 200 нм был впервые осуществлен на SWCNT мембрану толщиной 20 нм [2]. Было продемонстрировано, что электрический и магнитный квадрупольные резонансы Ми, слабо различимые в спектрах рассеяния Si наночастиц, находящихся на подложке из покровного стекла, становятся заметно более выраженными при переходе к SWCNT мембране. Показано также, что оптический контраст при наблюдении Si наночастиц в светлопольный микроскоп составляет около 7 % при использовании покровного стекла в качестве подложки и может быть улучшен до 70 % в случае SWCNT мембраны. Такое улучшение обусловлено малой оптической толщиной и крайне низким коэффициентом отражения света для SWCNT мембраны, зеркальная компонента которого не превышает 0.1 % в видимом диапазоне спектра. Подобное снижение фонового сигнала от подложки может быть эффективно использовано для целей рентгеновских и синхротронных исследований, для которых рассеяние и поглощение излучения подложкой может зачастую ограничивать получение полезного сигнала от исследуемой одиночной наночастицы.

Нелинейный оптический отклик от Si наночастиц размером около 300 нм был исследован методом спектроскопии возбуждения вблизи магнитного квадрупольного (mq) Ми резонанса в спектре рассеяния [3]. Было показано, что резонанс усиливает как эффективность генерации второй гармоники, так и сигнал фотолюминесценции, вызванной многофотонным поглощением света при накачке фемтосекундными лазерными импульсами с варьируемой длиной волны (рис. 1). Дополнительное облучение Si наночастиц фемтосекундными импульсами с более высокой энергией приводило к существенной модификации формы частиц за счет их расплавления и последующего застывания, что сопровождалось подавлением либо полным исчезновением резонансов Ми в спектрах рассеяния. Одновременно с этим существенно понижалась интенсивность полного нелинейного отклика от облученной наночастицы, что подтверждает ключевую роль Ми резонансов в усилении эффективности нелинейных оптических явлений для Si наночастиц.

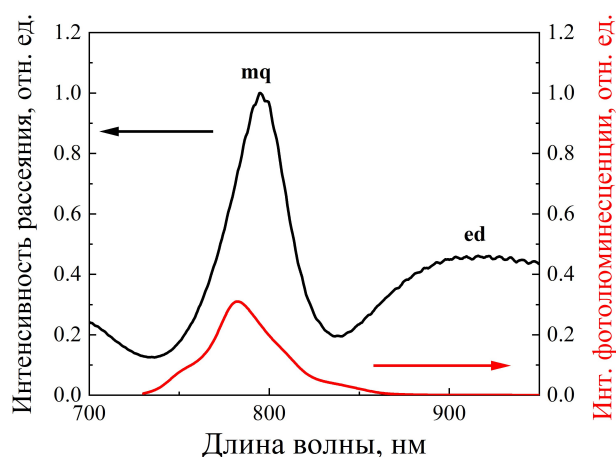


Рис. 1. Спектр рассеяния одиночной Si наночастицы в сравнении с сигналом фотолюминесценции, вызванной многофотонным поглощением, измеренным при различных длинах волн накачки.

Литература

- [1] D.M. Zhigunov, A.B. Evlyukhin et al, *ACS Photonics* **5**, 977–983 (2018)
- [2] D.M. Zhigunov, D.A. Shilkin et al, *Nanotechnology* **32**, 095206 (2021)
- [3] D.M. Zhigunov, D.A. Shilkin et al, *Opt. Mater.* **154**, 115616 (2024)