

ЛАЗЕРНАЯ ФАБРИКАЦИЯ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ МИ-РЕЗОНАНСНЫХ НАНОЧАСТИЦ КРЕМНИЯ В ПРОТОЧНОЙ КЮВЕТЕ С РЕЦИРКУЛЯРНЫМ ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Карамянц А.Г. (ИТМО), Бикметова С.У. (ИТМО), Андреев Ю.С. (ИТМО)
Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Зуев Д.А.(ИТМО)

Введение. Ми-резонансные наночастицы кремния имеют важное место в приложениях современной нанофотоники, поскольку они позволяют управлять свойствами электромагнитного поля, что актуально в создании nanoантенн [1], волноводов [2] и биосенсоров [3]. Для возбуждения магнитно-дипольных резонансов, согласно теории рассеяния Ми, необходимо, чтобы частицы обладали размерами в пределах 100 - 300 нм [4]. Среди методов синтеза кремниевых наночастиц химические методы считаются наиболее распространенными, несмотря на использование токсичных материалов [5]. Поскольку существует тренд на использование экологически чистых методов в производстве, лазерный синтез наночастиц в растворе имеет преимущество. [6] Однако существует проблема в ограниченной производительности при использовании лазерных источников наносекундного действия, вследствие повышенного нагрева в сравнении с ультракороткими импульсами. [7] Пикосекундные и фемтосекундные лазеры действительно являются стандартом для производительной генерации наночастиц. Но такие устройства имеют высокие требования к окружающим условиям, что сужает спектр применений на предприятиях. Наносекундная лазерная генерация оптически резонансных наночастиц в потоке жидкости позволяет снизить влияние повышенных температур на свойства частиц, а также повысить их массовый выход, что повышает производительность процесса.

Основная часть. В настоящей работе была проведена лазерно-индуцированная фабрикация коллоидных растворов наночастиц кремния с оптическими резонансами Ми за счёт использования проточной кюветы с рециркулярным потоком жидкости (деионизированной воды). Установка состоит из алюминиевой проточной ячейки, двух мембранных насосов, соединенные трубками. Кроме того, были интегрированы устройства для контроля скорости потока путём регулировки работы насосов. Предложенная кювета таким образом способствует повышению массового выхода наночастиц и автоматизирует контроль потока жидкости, что повышает эффективность процесса. Чтобы получить наночастицы кремния с размерами 80-280 нм, при которых наблюдаются оптические магнитно-дипольные резонансы, использовался коммерчески доступный комплекс «Минимаркер-2» на базе иттербиевого волоконного лазера наносекундного действия. Кремниевая мишень находилась под воздействием излучения с плотностью энергии, которая была подобрана ранее для оптимального синтеза резонансных наночастиц в неподвижном слое жидкости. Эксперименты проводились в несколько этапов: очистка используемых материалов, лазерный синтез наночастиц в проточной кювете, характеристика их оптических свойств и морфологии. Очистка мишени и кюветы осуществлялась последовательно в ацетоне, изопропиловом спирте и деионизированной воде с применением ультразвуковой ванны. Для фабрикации коллоидных растворов в проточной кювете требуется 100-150 мл деионизированной воды. В рамках характеристики свойств полученных наночастиц были

построены гистограммы их распределения по размерам на основе данных сканирующей электронной микроскопии с использованием программного обеспечения ImageJ. Для исследования их фазового состава определялись спектры рамановской спектроскопии. Оценка оптических свойств полученных наночастиц осуществлялась по изображениям темнопольной микроскопии, а также по спектрам фотолюминесценции. Установлено, что используемые параметры синтеза позволяют повысить долю наночастиц кремния с размерами, при которых наблюдаются оптические резонансы Ми. В перспективе существует необходимость в разработке методов автоматической сортировки наночастиц по размерам.

Выводы. В результате фабрикации коллоидных растворов Ми-резонансных наночастиц кремния в проточной кювете с рециркулярным потоком жидкости было обнаружено улучшение эффективности синтеза наночастиц за счет увеличения массового выхода в 2 раза. Распределения размеров наночастиц, построенные на основе снимков СЭМ, подтверждают количественное преобладание наночастиц с желаемыми размерами 80-280 нм и сферической формой. Более того, дальнейший анализ рамановского рассеяния наночастиц показал, что они являются поликристаллическими. Для исследования оптических свойств полученных наночастиц кремния были сделаны фотографии в темном поле, которые подтверждают, что наночастицы способны рассеивать свет, а измеренные спектры рассеяния демонстрирует согласованность оптических резонансов с теорией Ми. Таким образом, проточная кювета с рециркулярным потоком жидкости способствует повышению производительности синтеза наночастиц.

Список использованных источников:

1. Hasan M.R., Hellesø O.G. Dielectric optical nanoantennas // Nanotechnology. IOP Publishing, 2021. Vol. 32, № 20. P. 202001.
2. Jiang X.-D. et al. High-Performance coupled plasmon waveguide resonance optical sensor based on SiO₂:Ag film // Results in Physics. 2021. Vol. 26. P. 104308.
3. Altug H. et al. Advances and applications of nanophotonic biosensors // Nature nanotechnology. – 2022. – Т. 17. – №. 1. – С. 5-16.
4. Zhang C. et al. Lighting up silicon nanoparticles with Mie resonances // Nature Communications. – 2018. – Т. 9. – №. 1. – С. 2964.
5. Baranov, D. G.; Zuev, D. A.; Lepeshov, S. I.; Kotov, O. V.; Krasnok, A. E.; Evlyukhin, A. B.; Chichkov, B. N. All-dielectric nanophotonics: The quest for better materials and fabrication techniques. Optica 2017, 4, 814–825
6. Zhang D., Gokce B., Barcikowski S. Laser synthesis and processing of colloids: fundamentals and applications // Chemical reviews. – 2017. – Т. 117. – №. 5. – С. 3990-4103.
7. Khairani I. Y. et al. Green nanoparticle synthesis at scale: a perspective on overcoming the limits of pulsed laser ablation in liquids for high-throughput production // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2023. – Т. 25. – №. 29. – С. 19380-19408.

Автор _____ Карамянц А.Г.

Научный руководитель _____ Зуев Д.А.