

УДК 661.182

**Влияние частоты следования импульсов на характеристики кремниевых наночастиц, полученных методом лазерной абляции в потоке жидкости**  
**Золотарева А.А. (ГБОУ лицей № 344), Ханыкова Л.О. (ГБОУ лицей № 344), Федорин М.Р. (ГБОУ лицей № 344), Быков А.С. (ГБОУ лицей №344)**  
**Научный руководитель - Сенникова Д.В. (Университет ИТМО)**

**Актуальность.** От разных режимов лазерной абляции зависит качество полученных частиц. Чистота раствора напрямую влияет на успешность применения в разных сферах жизни общества, например: наночастицы можно использовать в медицине, а именно в доставке лекарств, лечении рака [1], фармакотерапии [2] и других отраслях. Кремниевые наночастицы (SiNP) занимают особое место в мире наноматериалов благодаря уникальному сочетанию свойств, а именно: фотолюминесценции, биодеграции, фотоиндуцированному нагреву [3]. Благодаря своим уникальным свойствам, SiNP используются для решения целого комплекса задач: фото гипертермии [4], биовизуализации [5], доставке лекарств. За пределами медицины кремниевые нанокристаллы рассматриваются как перспективный материал для создания оптоэлектронных устройств и компонентов солнечных батарей [6]. У кремниевых наночастиц есть ряд принципиальных преимуществ перед другими неорганическими наноматериалами: уникальная биосовместимость и биоразлагаемость, уникальные оптические свойства в лице резонансного рассеяния света [7], поглощения в УФ-области. Кремниевые наночастицы лучше всего делать лазерной абляцией.

**Основная часть.** Первым этапом было создание коллоидных растворов кремния. Генерация осуществлялась методом импульсной лазерной абляции в потоке жидкости. В качестве материала мишени использовался кремний. Абляция проводилась на установке МиниМаркер-2 при четырех фиксированных значениях частоты следования импульсов: 200, 400, 600 и 800 кГц, длина волны излучения 1064 нм, длительность импульса - 220 нс. Для всех экспериментов объем деионизированной воды был постоянным и составлял 150 мл, что обеспечивало идентичные условия формирования коллоидных растворов и корректность последующего сравнения образцов, полученных при различных частотных режимах. Определение порога абляции осуществлялось методом D<sup>2</sup>.

Первым этапом характеризации полученных коллоидных частиц являлось определение массового выхода гравиметрическим выходом. Данный метод заключается в постепенном удалении жидкости из образца путем нагревания до температуры, обеспечивающей интенсивное испарение, но не приводящей к деструкции или окислению кремниевых наночастиц, в частности, нами была использована температура 70 °С. После полного удаления жидкой фазы производилось взвешивание сухого остатка. Результаты показали, что аблированная масса материала закономерно уменьшалась с увеличением частоты импульсов. Полученные массы для режимов с частотами 200, 400, 600 и 800 кГц составили 42,3 мг, 36,5 мг, 31,8 мг и 16,8 мг соответственно. Снижение массового выхода с ростом частоты может быть вызвано эффектом накопления тепла, а также экранировкой импульсов кавитационным пузырьком и частицами. Следующим этапом характеризации было измерение кинематической вязкости сформированных систем. Кинематическая вязкость измеряется с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-1 путем определения времени истечения строго определенного объема жидкости под действием силы тяжести через капилляр: прибор устанавливается в термостат для поддержания постоянной температуры, затем жидкость засасывается в измерительный резервуар выше верхней метки, после чего запускается секундомер при прохождении мениском верхней метки и останавливается при достижении нижней метки; кинематическая вязкость рассчитывается как произведение измеренного времени истечения на постоянную

вискозиметра, которая зависит от геометрических параметров капилляра и указана на приборе. Для образцов, полученных при частотах 200, 400, 600 и 800 кГц, значения вязкости составили 0,819, 0,824, 0,823 и 0,900 мм<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> соответственно. Для частот 200-600 кГц зафиксированы близкие значения вязкости (0,819-0,824), свидетельствующие о формировании частиц со сходными размерами, тогда как резкое возрастание вязкости до 0,900 при 800 кГц указывает на увеличение размеров частиц или изменением их морфологии. Для верификации полученных результатов и получения прямой информации о морфологии и размерах синтезированных частиц было проведено исследование методом сканирующей электронной микроскопии. Для образцов, полученных при частотах 200–600 кГц, наблюдается узкое распределение частиц по размерам со средним диаметром порядка микрона. В образце, генерацией при 800 кГц, наблюдается неоднородный план распределения без ярко выраженного пика, что объясняет рост вязкости системы.

**Заключение.** Сопоставление данных по массе абляции, геометрии кратеров, вязкости растворов и микроскопических наблюдений выявило немонотонный характер зависимости свойств коллоидной системы от частотного режима. В диапазоне 200-600 кГц формируются частицы со сходными размерными характеристиками при постепенном снижении массового выхода, тогда как при 800 кГц происходит качественная трансформация системы: падение массы абляции более чем в 2,5 раза, существенный рост вязкости. Таким образом, данное исследование, позволило установить корреляцию между частотными режимами и свойствами получаемых кремниевых наночастиц, что создает основу для дальнейших применений.

#### **Список литературы:**

1. МАРТЫНОВА, Е. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ЛЕЧЕНИИ РАКА / МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ. — Курск : Юго-Западный гос. ун-т, 2022.
2. Александрова, А. В. НАНОЧАСТИЦЫ СЕРЕБРА В ФАРМАКОТЕРАПИИ / ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕДИЦИНА. — 2010. — № 1. — С. 5-8.
3. СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ / КРИСТАЛЛОГРАФИЯ. — С. 942–947, том 57 №6.
4. Перспективы применения кремниевых наночастиц, полученных методом лазерной абляции, для гипертермии злокачественных опухолей / Квантовая электроника. —, 2021. — С. 64-72 том 51 №1.
5. Кремниевые наночастицы как контрастирующие агенты в методах оптической биомедицинской диагностики / Квантовая электроника. — 2017. — № 7 том 47. — С. 638–646.
6. Галочкин, В. А. Нанoeлектроника и наносхемотехника телекоммуникационных устройств / учебное пособие, 2024. — 260 с.
7. Применимость метода динамического рассеяния света для анализа диапазона размеров наночастиц золота и меди, полученных при помощи лазерной абляции твердых тел в жидкости / Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн.. — 2014. — № 10. — С. 15-28.