

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ КАВИТАЦИИ В СВОБОДНОМ ОБЪЁМЕ ЖИДКОСТИ И УЗКИХ КАНАЛАХ ПРИ ДОСТАВКЕ 1,54 МКМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА С ПЛОСКИМ И ЛИНЗОВАННЫМ ВЫХОДНЫМИ ТОРЦАМИ

Перепеляков А.<sup>1</sup>, Нассер Р.<sup>1</sup>

Научный руководитель – к.т.н., доцент Смирнов С.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

[artem.perepelyakov@mail.ru](mailto:artem.perepelyakov@mail.ru)

### Введение

Одним из актуальных и перспективных направлений в стоматологии является лазерная ирригация – метод очистки и обеззараживания системы корневых каналов зуба. Наибольшее распространение получила технология PIPS (photon-induced photoacoustic streaming) – метод, основанный на стимуляции акустических волн внутри корневого канала с помощью излучения импульсного Er:YAG лазера, формирующего в растворе ирриганта кавитационные пузыри.

Излучение лазера на иттербий-эрбиевом стекле (Yb,Er:Glass) с длиной волны 1,54 мкм хорошо поглощается водой и относится к безопасному для глаз спектральному диапазону. Большое времени жизни верхнего лазерного уровня активной среды ( $\approx 8$  мс) снижает требования к мощности коммерчески доступных диодных модулей накачки с длиной волны 940 нм, благодаря чему возможна реализация малогабаритного лазера. Эффективная частота повторения импульсов излучения может быть увеличена вплоть до 75 Гц при генерации нескольких импульсов за один импульс накачки за счёт управления затвором [1].

Микросекундные импульсы излучения Yb,Er:Glass лазера с энергией 60-100 мДж способны формировать в воде кавитационные пузыри диаметром до 3 мм [2], сопоставимые по размерам с пузырями, формируемыми при использовании излучения Er:YAG параметрами, характерными для проведения процедуры лазерной ирригации [3]. Использование волокон со специальной формой выходного торца позволяет значительно снизить энергию импульса излучения Yb,Er:Glass лазера, необходимую для формирования пузыря заданного диаметра [4]. Форма и микроструктура выходного торца оптического волокна оказывают прямое влияние на энергетический профиль лазерного луча, а значит, и на механизм образования пузыря. Для плоского выходного торца волокна характерен расходящийся пучок, тогда как сферический и клиновидный торцы способны фокусировать излучение и изменять распределение поглощённой энергии [4].

Стоит отметить, что размер кавитационного пузыря при неизменных параметрах формирующего его лазерного излучения в значительной степени зависит от объёма пространства, в котором он формируется [3]. В данной работе исследовалась лазерно-индуцированная кавитация в свободном объёме жидкости и узких каналах при доставке лазерного излучения Yb,Er:Glass-лазера через оптические волокна с плоским и линзованным (полусферическим) выходными торцами.

### Основная часть

Экспериментальные исследования проводились с кварц-кварцевым оптическим волокном с диаметром сердцевины/оболочки 470/500 мкм (числовая апертура NA = 0,18). Плоский торец волокна формировался при помощи скальвателя «SKL-6C». Линзованный выходной торец волокна формировался методом оплавления плоского

торца излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Радиус кривизны сформированной на торце полусферы составил 250 мкм, что обеспечивало фокусировку луча 360 мкм.

Yb,Er:Glass-лазер работал в режиме модуляции полезных потерь и излучал одиночные импульсы с энергией 10-100 мДж длительностью 0.5-2 мкс. Излучение через оптическое волокно доставлялось в объём дистиллированной воды.

Измерение динамики размера пузыря в жидкости проводились в стеклянной кювете 54×24×37 мм (свободный объём) и в модели зуба (узкий канал  $d = 4$  мм,  $h = 20$  мм), выполненной из акрила. Визуализация кавитации осуществлялась при помощи высокоскоростной камеры.

## **Выводы**

В ходе проведённой экспериментальной работы были получены следующие основные результаты:

1. исследованы гидроакустические процессы, индуцированные с помощью лазерного излучения с длиной волны 1.54 мкм, доставляемого с помощью оптических волокон с плоским и линзованным (полусферическим) выходными торцами;
2. для двух типов оптического волокна проведено сравнение процесса формирования кавитационного пузыря в свободной жидкости и в канале диаметром 4 мм – в докладе будут представлены зависимости диаметра кавитационного пузыря от времени и энергии импульса;
3. использование линзованного волокна обеспечило в ~ 1.5 раза меньший порог кавитации, а также на 30 % снизило требуемую для формирования пузыря того же диаметра (3 мм) энергию импульса; установлено, что при формировании пузыря в узком канале его диаметр в 1.5 раза меньше, чем в случае его формирования в свободном объёме жидкости.

## **Список использованных источников:**

1. Belikov A.V., Smirnov S.N., Batov Y., Gubin A., Pirozhkov Y., Boiko E.V., Nemsitsveridze M. In vitro study of cataract extraction by bursts of microsecond 1.54-um laser pulses // Quantum Electronics, 2022, Vol. 52, No. 1, pp. 69-77. doi: 10.1070/QEL17959
2. Смирнов С.Н. Лазерная гидроакустическая обработка хрусталика глаза микросекундными импульсами излучения лазера на иттербий-эрбиевом стекле // Дисс. канд. тех. наук. Санкт-Петербург: СПбНИУ ИТМО, 2018. 147 с.
3. Lukač M., Lukač N., Jezeršek M. Characteristics of bubble oscillations during laser-activated irrigation of root canals and method of improvement //Lasers in surgery and medicine. – 2020. – Vol. 52. – No. 9. – P. 907-915. doi: 10.1002/lsm.23226
4. Нассер Р., Смирнов С.Н. Исследование влияния формы выходного торца оптического волокна на гидроакустические процессы в жидкости, стимулируемые микросекундными импульсами излучения Yb,Er:Glass-лазера // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 1. С. 165–169. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-165-169