

УДК 535:621.373.826:539

**АБЛЯЦИЯ ТВЕРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБА ЧЕЛОВЕКА ИЗЛУЧЕНИЕМ
YLF: Eг ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

А.В. Беликов, М.В. Иночкин, А.В. Скрипник, Л.В. Хлопонин, В.Ю. Храмов, К.В. Шатилова

Разработан макет YLF: Eг микролазера с диодной накачкой. Исследованы особенности воздействия излучения разработанного макета микролазера с длиной волны генерации 2,84 мкм на твердые ткани зуба человека. Обнаружены эффекты побеления, карбонизации и абляции твердых тканей зуба человека в результате лазерного воздействия. Определены пороги этих эффектов. Установлено, что микротвердость дентина зуба человека может быть увеличена более чем на 20% в результате многократного воздействия лазерных импульсов с энергией ниже порога побеления.

Ключевые слова: YLF: Eг лазер, диодная накачка, эмаль, дентин, абляция, микротвердость.

Введение

Эрбиевые лазеры с ламповой накачкой успешно используются для обработки эмали и дентина [1]. Современный этап развития лазерных технологий в стоматологии связан с разработкой и исследованием применения эрбиевых микролазеров с диодной накачкой. В настоящем исследовании в качестве активной среды таких микролазеров предлагается использовать кристалл YLF: Eг, позволяющий получать генерацию в диапазоне длин волн 2,66–2,84 мкм [2].

В работах [3–6] были проведены исследования воздействия на эмаль и дентин зуба человека излучения YLF: Eг лазера с различными длинами волн. В [3, 4] описаны основные процессы, происходящие при взаимодействии лазерного излучения трехмикронного диапазона с твердыми тканями зуба человека. Определены пороги разрушения эмали и дентина излучением YLF: Eг лазера с длиной волны 2,81 мкм. В [5] был определен порог разрушения дентина излучением YLF: Eг лазера с длиной волны 2,66 мкм. В [5, 6] проводилась обработка твердых тканей зуба, а именно – создание текстур и микроканалов излучением YLF: Eг лазера с диодной накачкой и длинами волн генерации 2,66 и 2,81 мкм. Было показано, что эффективность удаления эмали и дентина излучением YLF: Eг лазера с $\lambda=2,66$ мкм в 2 раза меньше, а с $\lambda=2,81$ мкм – в 3 раза меньше эффективности удаления биотканей излучением YAG: Eг лазера с ламповой накачкой ($\lambda=2,94$ мкм). В [6] была продемонстрирована возможность создания микроканалов в дентине с аспектным соотношением более 4.

В настоящей работе описан макет YLF: Eг микролазера с диодной накачкой и длиной волны генерации 2,84 мкм. Исследованы эффекты, возникающие в результате воздействия излучения YLF: Eг лазера на эмаль и дентин зуба человека, определены пороги этих эффектов. Проведено исследование изменения микротвердости дентина вследствие многократного воздействия YLF: Eг излучения.

Материалы и методы

В эксперименте использовались зубы человека, принадлежащие одной возрастной категории людей (25–40 лет), удаленные по ортодонтическим показаниям. До начала эксперимента образцы хранились в 0,1%-ом водном растворе тимола не более двух недель при температуре +4°C в защищенном от света месте.

Воздействие на биоткань проводилось излучением одномодового YLF: Eг лазера с диодной накачкой, работающего в режиме свободной генерации, на длине волны генерации 2,84 мкм. Энергия E_p и длительность τ_p одиночного лазерного импульса для YLF: Eг ($\lambda=2,84$ мкм) изменялись посредством варьирования тока накачки $I_{\text{нак}}$ и длительности импульса накачки $\tau_{\text{нак}}$. В работе использовались три величины импульса накачки: 300, 650 и 1000 мкс, при частоте следования импульсов 3 Гц. На рис. 1 представлены осциллограммы YLF: Eг лазерных импульсов, полученные при различном токе и длительности импульсов диодной накачки. При длительности импульса накачки $\tau_{\text{нак}}=300$ мкс и токе накачки $I_{\text{нак}}=2\text{--}20$ А длительность импульса YLF: Eг излучения τ_p составляла 160–290 мкс, энергия импульса YLF: Eг излучения E_p – до 2 мДж; при $\tau_{\text{нак}}=650$ мкс и $I_{\text{нак}}=2\text{--}16$ А τ_p составляла 430–650 мкс, E_p – до 3,4 мДж; при $\tau_{\text{нак}}=1000$ мкс и $I_{\text{нак}}=2\text{--}12$ А τ_p составляла 720–1010 мкс, E_p – до 4 мДж.

В работе измерялись пороги эффектов, возникающих в биоткани в результате лазерного воздействия с различной энергией и длительностью YLF: Eг лазерного импульса. Под порогом в данном случае

понималась минимальная энергия YLF: Ег лазерного импульса, при которой возникал эффект. В исследовании непосредственно перед экспериментом на поверхности эмали и дентина формировалась плоская площадка при помощи алмазного диска. Лазерная обработка тканей зуба производилась в одноимпульсном ($N_p = 1$), неконтактном режиме, без внешнего водяного охлаждения. Лазерное излучение фокусировалось на поверхность биоткани в пятно диаметром порядка 200 мкм по уровню e^{-2} . После однократного воздействия импульса YLF: Ег лазера биоткань смещалась, а следующее однократное воздействие проводилось уже в новую область поверхности образца. После каждого воздействия ток накачки изменялся на 1 А. Оценка состояния поверхности эмали и дентина зуба человека после лазерного воздействия осуществлялась с помощью оптического микроскопа AxioScope A1 (Carl Zeiss). Фотографирование проводилось при помощи камеры AxioCam ICm1 (Carl Zeiss).

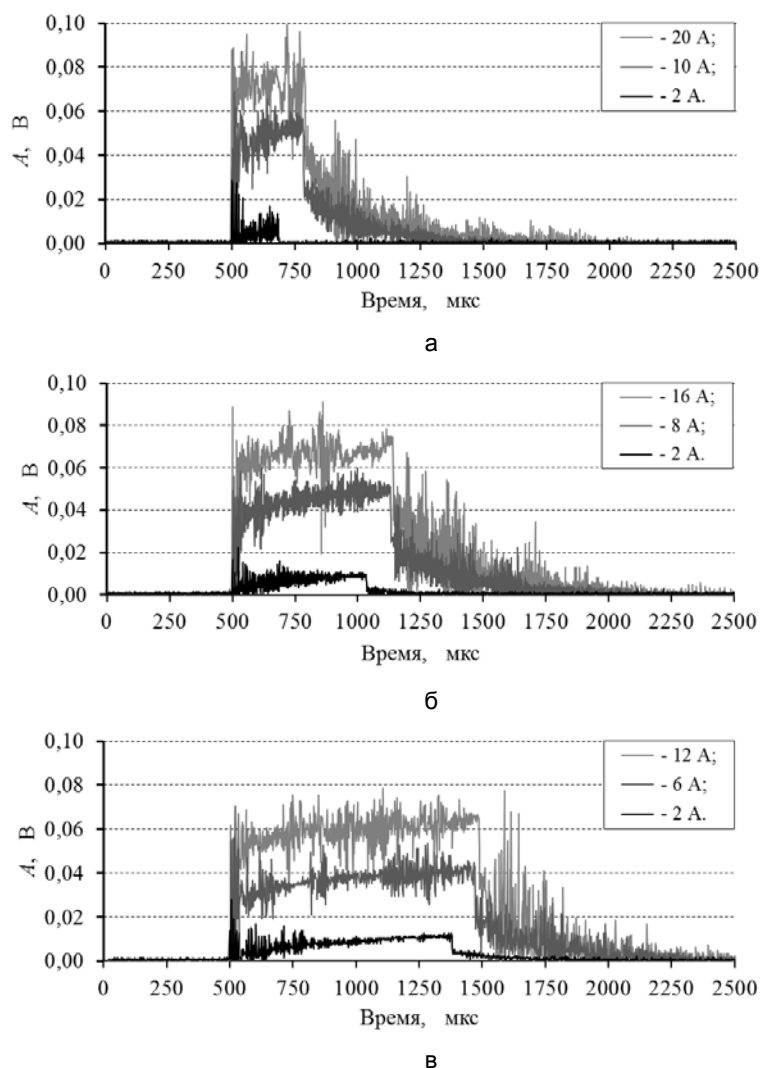


Рис. 1. Осциллограммы импульсов YLF: Ег лазера, типичных для различных токов и импульсов накачки, используемых в настоящем исследовании: $\tau_{\text{нак.}} = 300$ мкс (а); $\tau_{\text{нак.}} = 650$ мкс (б); $\tau_{\text{нак.}} = 1000$ мкс (в)

В работе исследовалось влияние излучения YLF: Ег микролазера на микротвердость дентина корня зуба. В этой части работы авторы производили воздействие на дентин зуба человека в многоимпульсном режиме ($N_p = 10, 55, 100, 150$ и 200), неконтактно, без внешнего водяного охлаждения. Параметры лазерного излучения были следующими: плотность энергии лазерного излучения $6,0 \pm 0,1$ Дж/см², $\tau_p = 270$ мкс, частота следования импульсов – 3 Гц. Предварительно на поверхности дентина формировалась плоская площадка при помощи алмазного диска. На поверхности такой площадки проводилось измерение микротвердости по методу Виккерса интактного дентина при нагрузке 100 г. Для таких измерений использовался микротвердомер «ПТМ–3М» (ОАО «ЛОМО»). Затем на этой поверхности с помощью YLF: Ег микролазера создавалась текстура. Общий размер текстуры $\sim 400 \times 400$ мкм (5×5 точек). Расстоя-

ние между центрами элементов в текстуре составляло ~ 80 мкм. Далее в месте воздействия проводилось измерение микротвердости обработанного дентина при нагрузке 100 г.

Результаты и обсуждения

В результате экспериментов было установлено, что воздействие излучения YLF: Eг лазера ($\lambda=2,84$ мкм) на эмаль зуба человека приводит к появлению двух эффектов: побеление и абляция (рис. 2, а, б), а на дентин – трех эффектов: побеление, абляция и карбонизация (рис. 2, в–д). Эффект побеления связывается с тем, что на биоткань воздействует лазерный импульс с энергией, недостаточной для разрушения и выноса материала (абляции эмали или дентина), но достаточной для изменения ее рассеивающих свойств, происходящих в результате испарения воды, возникновения микротрещин, переориентации кристаллов гидроксиапатита и т.д.

Зависимости порогов эффектов, возникающих в результате воздействия на эмаль или дентин зуба человека одиночного импульса YLF: Eг лазера от длительности лазерного импульса, представлены на рис. 3. Следует отметить, что сокращение длительности импульса излучения приводит к снижению порога.

Результаты измерения микротвердости (HV) дентина после многоимпульсной обработки излучением YLF: Eг лазера представлены на рис. 4. Изменение микротвердости ΔHV рассчитывалось в соответствии с выражением

$$\Delta HV = \frac{HV_{\text{воз.}} - HV_{\text{инт.}}}{HV_{\text{инт.}}} \cdot 100,$$

где $HV_{\text{инт.}}$ – микротвердость интактного дентина; $HV_{\text{воз.}}$ – микротвердость дентина после воздействия YLF: Eг лазера. Видно, что после воздействия на дентин в многоимпульсном режиме $N_p=150$ микротвердость дентина возрастает на 20–25%.

На рис. 5 показаны фотографии отпечатков от микротвердомера до и после лазерного воздействия на дентин. Среднее значение длины ребра отпечатка до лазерного воздействия при 150 импульсах составило 60 ± 2 мкм, после лазерного воздействия – 54 ± 2 мкм.

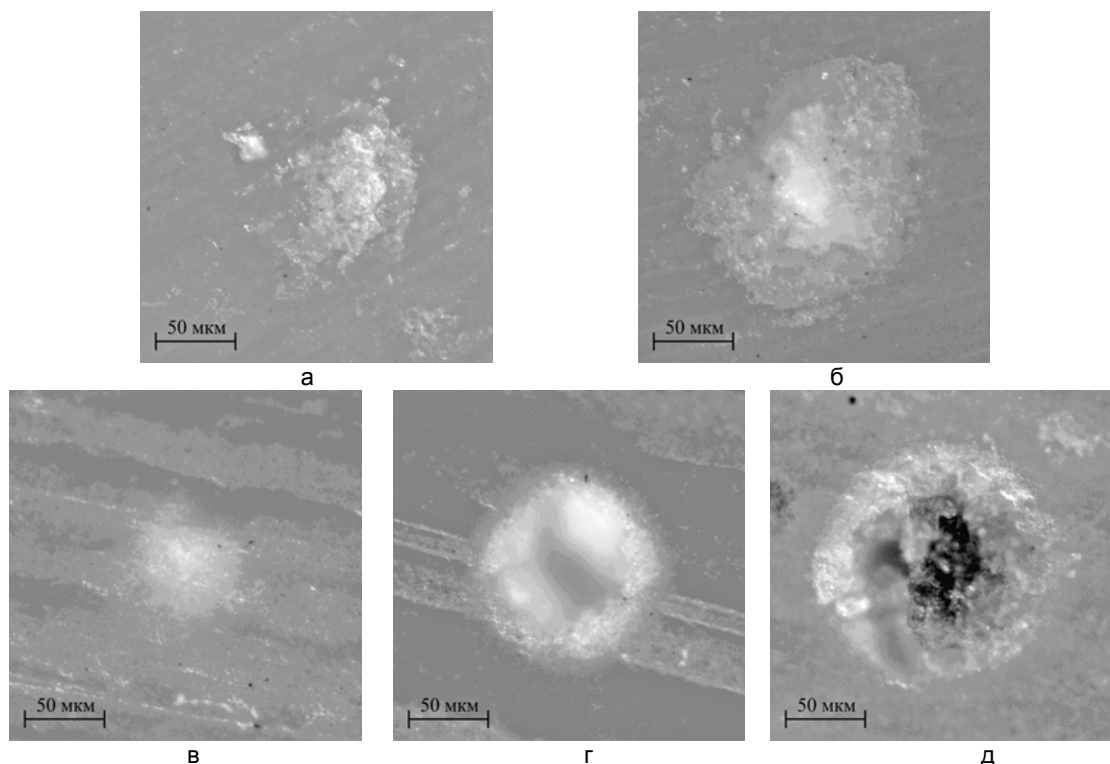


Рис. 2. Эффекты, возникающие в результате однократного воздействия излучения YLF: Eг лазера на эмаль и дентин зуба человека: побеление эмали ($E_p = 1,82$ мДж, $\tau_p = 970$ мкс) (а); абляция эмали ($E_p = 4,01$ мДж, $\tau_p = 1010$ мкс) (б); побеление дентина ($E_p = 0,71$ мДж, $\tau_p = 275$ мкс) (в); абляция дентина ($E_p = 1,49$ мДж, $\tau_p = 290$ мкс) (г); карбонизация дентина ($E_p = 3,33$ мДж, $\tau_p = 990$ мкс) (д)

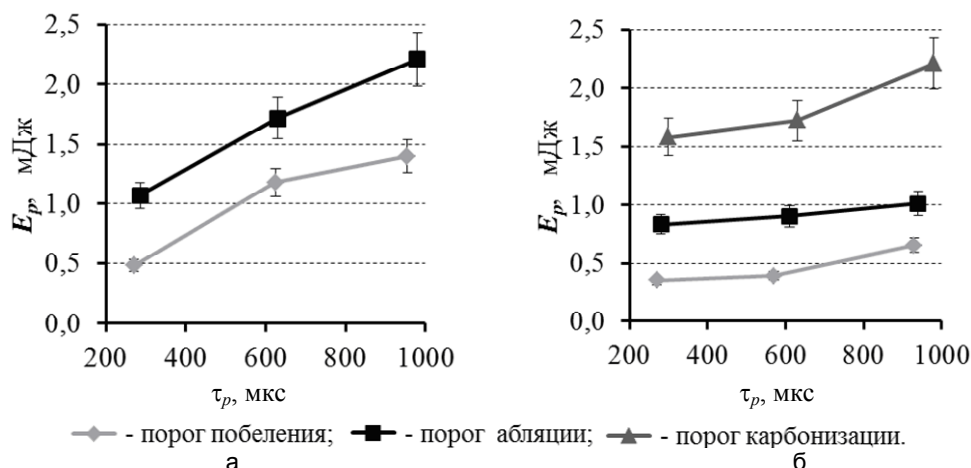


Рис. 3. Зависимость порогов эффектов побеления, карбонизации и абляции от длительности импульса YLF: Ег лазера ($N_p = 1$): эмаль (а); дентин (б)

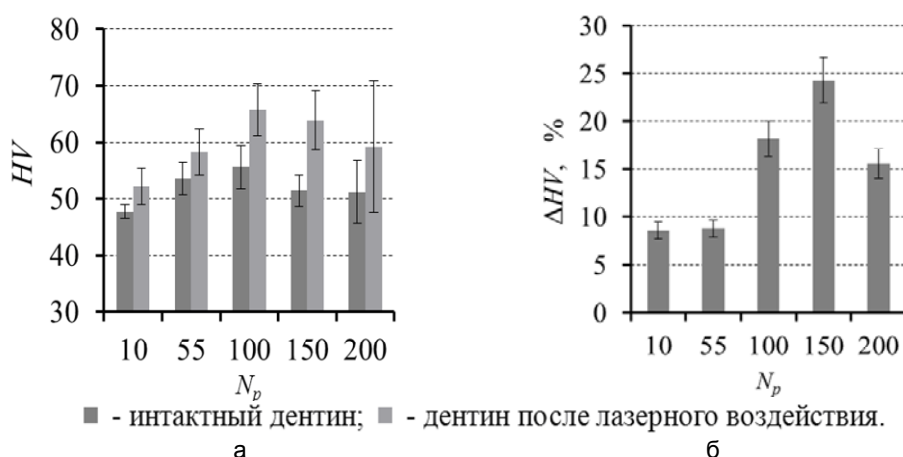


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости дентина до и после многоимпульсного воздействия излучением YLF: Ег лазера: результаты абсолютных измерений микротвердости (а); изменение микротвердости после лазерного воздействия (б)

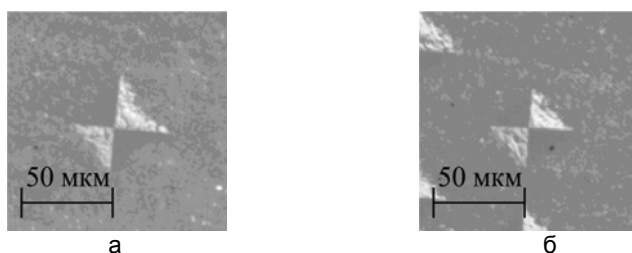


Рис. 5. Фотографии отпечатков от микротвердомера на поверхности дентина зуба человека: intactный дентин (а); после воздействия излучения YLF: Ег лазера (б)

Заключение

Исследованы особенности воздействия излучения YLF: Ег микролазера ($\lambda = 2,84$ мкм) с диодной накачкой на эмаль и дентин зуба человека. Установлено, что однократное воздействие излучения данного лазера способно вызвать в эмали такие эффекты, как побеление и абляция, а в дентине – побеление, карбонизация и абляция. Были определены пороги наблюдаемых эффектов. Установлено, что сокращение длительности лазерного импульса приводит к снижению любого из порогов. Многократное $N_p = 150$ воздействие излучения YLF: Ег лазера на intactный дентин зуба человека с плотностью энергии $6,0 \pm 0,1$ Дж/см², длительностью импульса порядка 270 мкс и частотой следования импульсов, равной 3 Гц, приводит к повышению микротвердости дентина более чем на 20%.

Литература

1. Coluzzi D.J., Convisar R.A. Atlas of laser applications in dentistry. – Quintessence Publishing Co, 2007. – 220 p.
2. Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю. Динамика спектра излучения Er: YLF-лазера в импульсно-периодическом режиме работы // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 7. – С. 8–13.
3. Belikov A.V., Erofeev A.V., Shumilin V.V., Tkachuk A.M. Comparative study of the 3 μm laser action on different hard tooth tissue samples using free running pulsed Er-doped YAG, YSGG, YAP and YLF lasers // Proc. of SPIE. Dental Applications of Lasers. – 1993. – V. 2080. – P. 60–67.
4. Altshuler G.B., Belikov A.V., Erofeev A.V. Laser treatment of enamel and dentine by different Er-lasers // Proc. of SPIE. – 1994. – V. 2128. – P. 273–281.
5. Беликов А.В., Скрипник А.В., Шатилова К.В. Сравнительное исследование параметров элементов текстур, сформированных излучением YAG: Er и YLF: Er лазеров на поверхности твердых тканей зуба человека // Материалы 14-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофизике (5–8 октября 2010 г.). Проблемы оптической физики и биофотоники. – Саратов: Новый Ветер, 2010. – С. 20–26.
6. Беликов А.В., Скрипник А.В., Струнина Т.В., Шатилова К.В. Исследование процессов воздействия оптического излучения на биологические ткани и элементы лазерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 4 (74). – С. 107–111.

- Беликов Андрей Вячеславович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, meddv@grv.ifmo.ru
- Иночкин Михаил Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, m_inochkin@mail.ru
- Скрипник Алексей Владимирович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, alesch_skrupnik@mail.ru
- Хлопонин Леонид Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, l_khloponin@yahoo.com
- Храмов Валерий Юрьевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, khramov@grv.ifmo.ru
- Шатилова Ксения Владимировна** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kshatilova@mail.ru