

УДК 535.8

*С. С. АНУФРИК, А. П. ВОЛОДЕНКОВ, К. Ф. ЗНОСКО***ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА ХеСІ-ЛАЗЕРА ДЛЯ АБЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБНОЙ ТКАНИ***Гродненский государственный университет им. Я. Купалы**(Поступила в редакцию 06.06.2014)*

Введение. Пионерские исследования по лазерной абляции были впервые выполнены 50 лет назад группой исследователей в Институте физики АН БССР под руководством М. А. Ельяшевича [1].

Интерес к применению лазеров для абляционного воздействия в стоматологии возник после исследований, показавших, что облучение поверхности зубов излучением рубинового лазера улучшало их поверхностные свойства [2, 3].

В работе [4] эксимерные лазеры впервые были применены в стоматологии. Для лечения зубных корневых каналов использовалось излучение ХеСІ-лазера. В работе [5] АгF-лазеры применялись для улучшения адгезии материалов пломб к зубной поверхности. В работе [6] изучалась абляция зубной эмали под действием излучения АгF-лазера. Была исследована глубина кратера в зависимости от плотности энергии на поверхности эмали. Длительность импульса по полувысоте составляла 20 нс при энергии импульса от 300 до 600 мДж. При взаимодействии луча эксимерного лазера с молекулами мишени энергия фотонов оказывается достаточной или даже превышает внутреннюю энергию ковалентных связей между отдельными атомами, что ведет к разрыву этих связей, распаду молекул на отдельные фрагменты и взрывообразному, со сверхзвуковыми скоростями, извержению этих фрагментов с образованием абляционного кратера. При энергии ковалентных связей выше 3–5 эВ к фрагментации молекулы могут приводить и двухфотонные процессы. В любом случае фрагменты в виде газового облака извергаются из объекта с настолько высокой скоростью, что большая часть заключенной в них тепловой энергии не успевает передаваться на стенки образующегося кратера, которые поэтому разогреваются лишь незначительно. Таковы были представления начала 1980-х гг. о механизме данного вида абляции, который называют абляционным фотораспадом. Дальнейшие исследования подтвердили и расширили их.

Тепловые характеристики дентина человеческого зуба и абляция при воздействии ХеСІ-лазера представлены в работе [7]. Было проведено исследование влияния дозы облучения и частоты повторения импульсов на процесс абляции и температуру зоны облучения, обнаружена гибель 99,9 % бактерий при длительности облучения 100 мс (частота 100 Гц) при использовании ХеСІ-лазера и указано на перспективность этой методики для подготовки ротовой полости к стоматологическим операциям [8]. По данным работы [9] при использовании ХеСІ-лазеров с плотностью энергии 5 Дж/см² и с длительностью импульса 60 нс получают кратеры глубиной ~60 мкм при облучении 800 импульсами. Порог абляции эмали зуба составляет ~2 Дж/см². Обнаружено, что при плотности энергии 1 Дж/см² происходит эффективное удаление зубного камня, но при этом не наступает абляция эмали зуба. Представляется целесообразным выполнить исследования по абляционному воздействию излучения ХеСІ-лазера на зубную эмаль и зубной камень при использовании более коротких длительностей импульса ~7,5 нс.

Экспериментальная установка. Исследования выполнялись с помощью эксимерного электродазоразрядного лазера, система возбуждения которого представлена на рис. 1, а.

Система возбуждения, представляющая собой LC-контур, содержит накопительную емкость $C1$ и последовательно включенную с ней через индуктивность $L1$ обострительную емкость $C0$ (см. рис. 1). Так как $C1$ перезаряжается на $C0$ через коммутатор, который обладает активным сопротивлением, сравнимым с сопротивлением плазмы в межэлектродном промежутке, то на нем теряется значительная часть энергии, запасенной в $C1$. Следовательно, одним из путей увеличения эффективности и выходной энергии генерации является уменьшение потерь на коммутаторе. Возможны следующие характерные режимы работы LC-контура

1. При малых величинах обострительной емкости $C0$ ее основная функция состоит в формировании объемного разряда. Она заряжается от накопительной емкости $C1$ до напряжения порядка двойного зарядного, а LC-контур затем быстро разряжается на межэлектродный промежуток. При столь высоком перенапряжении и крутом фронте импульса возбуждения формируется однородный объемный разряд. Сама обострительная емкость $C0$ разряжается на стадии пробоя, когда сопротивление разрядной плазмы достаточно высоко. Основной энерговклад в разряд в этом случае осуществляется от накопительной емкости $C1$.

2. При увеличении обострительной емкости $C0$ (при одновременном увеличении $L1$) ее роль изменяется. Наряду с формированием разряда она осуществляет и энерговклад в разряд, причем ее вклад сравним с энерговкладом от $C1$.

3. При величине обострительной емкости $C0$ одного порядка с накопительной $C1$, возможен режим работы с полной перезарядкой. В этом случае вся энергия, запасенная в $C1$, переходит в обострительную емкость $C0$, причем именно в таком режиме обеспечивается, как правило, максимальный КПД лазера.

Излучатель представлял собой фторопластовую разрядную камеру, внутри которой располагались профилированный цельнометаллический анод (2), сетчатый катод (1) и электрод предыонизации (3).

Основной разрядный объем составлял $30 \times 2 \times 1$ см³ (ширина разряда 1 см). На торцах разрядной камеры располагались фланцы, на которых были закреплены кварцевые подложки под некоторым углом к оптической оси резонатора.

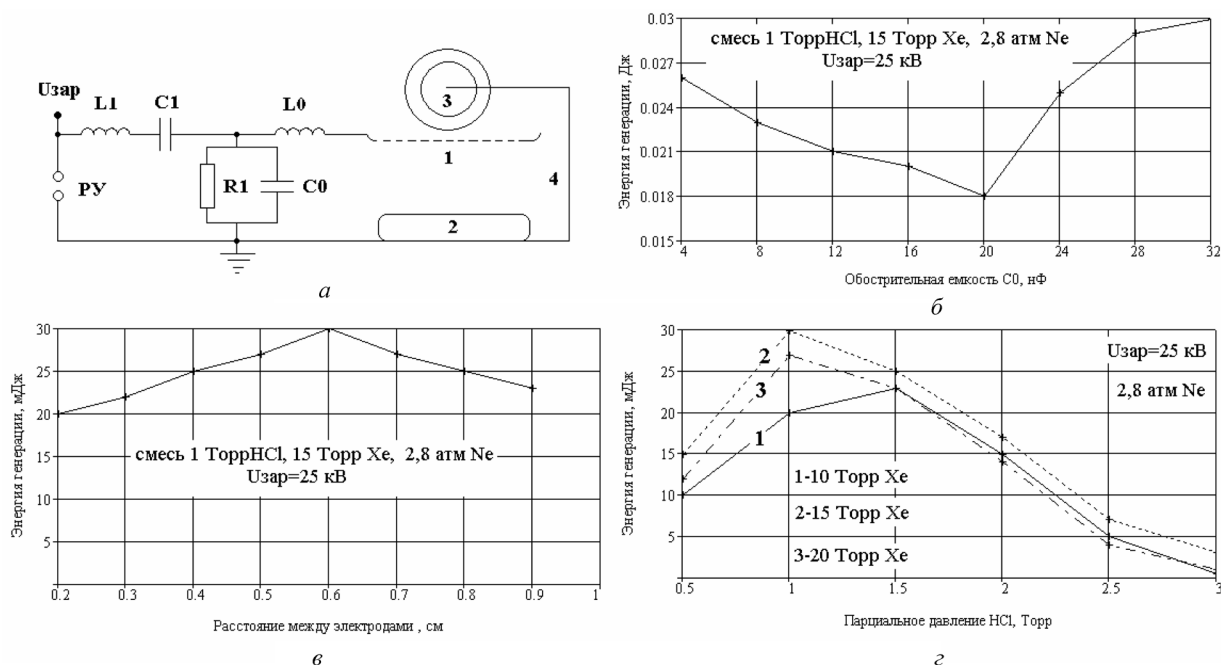


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема возбуждения лазера (а); зависимость энергии генерации от величины обострительной емкости $C0$ (б); зависимость энергии генерации от расстояния между электродами 1 и 3 (в); зависимость энергии генерации от парциального давления HCl (г)

Резонатор лазера был образован плоским зеркалом с Al-покрытием и плоскопараллельной кварцевой пластиной.

Емкость С1 представляла собой конденсатор типа КМЧ-50-0,1. Он имел емкость 100 нФ и максимальную величину зарядного напряжения 50 кВ. Емкость С0 набиралась из конденсаторов КВИ-2 (470 пФ), которые располагались с двух сторон непосредственно на разрядной камере (вдоль нее) для достижения минимальной индуктивности разрядного контура. Таким образом, емкость С0 была набрана из 68 конденсаторов и ее величина составила 32 нФ. Конструкция системы возбуждения предусматривает возможность изменения величины емкостей С1 и С0 в ходе экспериментов по оптимизации. Электрод предыонизации (3) соединен с заземленным основным электродом (2) при помощи высоковольтного кабеля (4). Такое соединение и расположение электродов обусловлено применением положительного зарядного напряжения. Предыонизация активной среды в межэлектродном промежутке осуществлялась излучением разряда между электродами 1 и 3 при подаче импульса высокого напряжения на основные электроды 1 и 2. Такое расположение системы предыонизации позволило максимально приблизить источник ионизирующего излучения к зоне основного разряда и достичь однородного распределения начальных электронов в межэлектродном промежутке. Диэлектрик на электроде предыонизации представлял собой кварцевую трубку с толщиной стенок ~ 1 мм. Отличительной особенностью предыонизации являлось то, что емкостной разряд зажигался на большой площади $\sim (30 \times 2)$ см². Этим компенсировалась меньшая по сравнению с сильноточной искрой интенсивность ионизирующего излучения. Рабочая поверхность электрода предыонизации находилась на расстоянии 5 мм от поверхности основного сетчатого электрода, причем это расстояние могло изменяться.

Для измерения формы импульса излучения использовался коаксиальный фотоэлемент ФЭК22-СПУ, сигнал с которого подавался на осциллограф 6ЛОР-04. Для измерения энергии излучения применялся прибор типа ИМО-2Н, для регистрации спектра излучения – спектрограф MS2001I фирмы «СОЛАР ТИИ» с ПЗС-детектором, сигнал с которого обрабатывался компьютером.

Оптимизация генерационных характеристик лазера. Были использованы следующие параметры системы возбуждения: накопительная емкость С1=100 нФ. В результате оптимизации

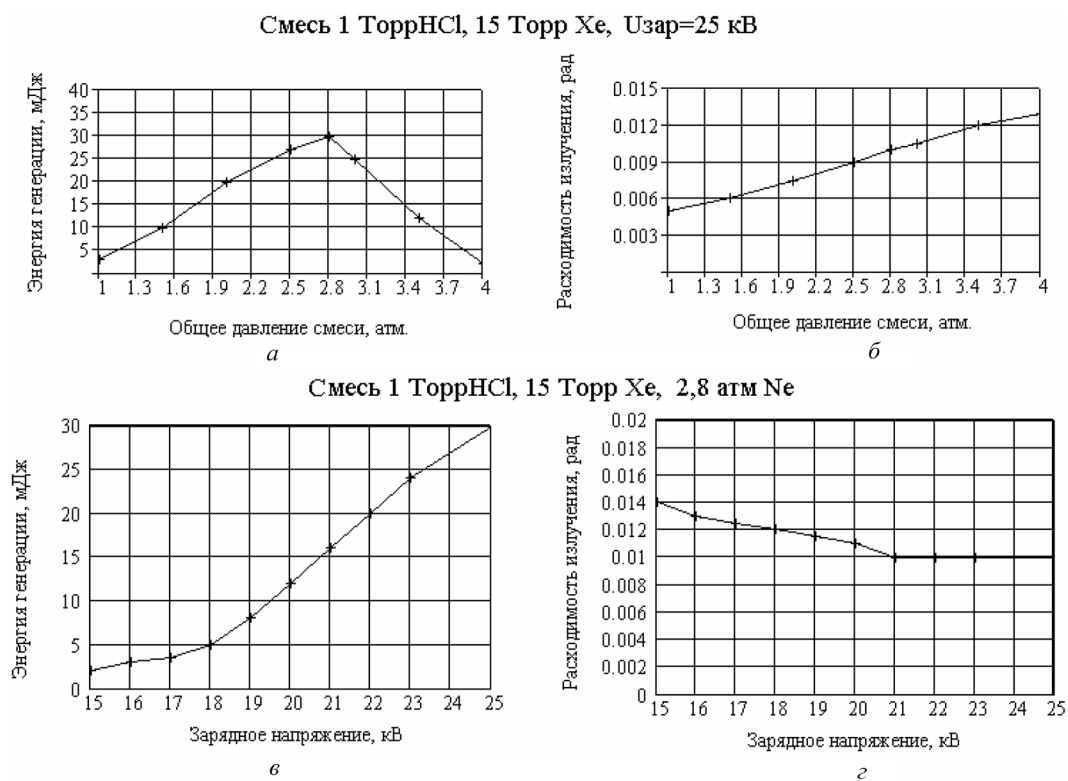


Рис. 2. Зависимость энергии генерации (а) и расходимости излучения (б) от общего давления смеси; зависимость энергии генерации (в) и расходимости излучения (г) от величины зарядного напряжения

установлено, что наибольшая величина энергии генерации 30 мДж достигается при величине обострительной емкости $C0 = 32$ нФ (рис. 1, б) и расстоянии между электродами 1 и 3 равным 0,6 см. Оптимизировано расстояние между электродом предыонизации и основным электродом. На рис. 1, в представлена зависимость энергии от величины расстояния между электродом предыонизации и основным электродом.

Была произведена также оптимизация состава и общего давления лазерной смеси при использовании в качестве буферного газа гелия и неона. На рис. 1, г показана зависимость энергии генерации от величины парциального давления HCl.

На рис. 2, а представлена зависимость энергии генерации от общего давления смеси; на рис. 2, б – зависимость расходимости от величины общего давления смеси.

Возрастание расходимости лазерного излучения с ростом давления активной среды связано с тем, что разряд становится более неоднородным. Согласно работе [10], для достижения однородности плазменного столба разряда необходимо, чтобы начальная концентрация электронов n_0 превышала критическое значение, определяемое соотношением

$$n_0 \geq n_0^{\text{кр}} = \left[\frac{4D_e}{\nu} \ln \left(\frac{kT_e}{4e^2 \sqrt[3]{n_0}} \right) \right]^{-3/2}, \quad (1)$$

где D_e – коэффициент диффузии электронов; ν – эффективная частота ионизации; e – заряд электрона, T_e – электронная температура; k – постоянная Больцмана. На рис. 2, в показана зависимость энергии от величины зарядного напряжения, а на рис. 2, г – зависимость расходимости от величины зарядного напряжения. Из представленных зависимостей следует, что при снижении зарядного напряжения расходимость излучения возрастает. Это связано с тем, что разряд становится более неоднородным.

В оптимальной смеси с буферным газом Ne (1 Торр HCl, 15 Торр Хе и 2,4 атм Ne) была получена энергии импульса $E = 15$ мДж при длительности 10 нс ($\tau = 5$ нс по полувысоте). При использовании оптимальной смеси на основе Ne (1 Торр HCl, 15 Торр Хе и 2,8 атм Ne) энергия генерации составила $E = 30$ мДж при длительности 15 нс ($\tau = 7,5$ нс по полувысоте). Применение фокусирующей линзы с фокусным расстоянием 10 см позволило получить пятно генерации диаметром ~ 1 мм.

Максимальная плотность энергии сфокусированного излучения равнялась $3,8$ Дж/см², при этом максимальная плотность мощности составляла 500 МВт/см².

Результаты экспериментальных исследований по абляции зубной ткани. Энергия импульса лазерного излучения в процессе экспериментов изменялась с помощью специальной диафрагмы, которая позволяла регулировать световой поток, падающий на фокусирующую линзу с фокусным расстоянием 10 см. Образцы зубной ткани облучались при использовании частоты повторения импульсов 1 Гц серией из 1000 импульсов. На рис. 3, а представлена зависимость глубины кратера от плотности энергии после 1000 импульсов.

Из этих данных следует, что зависимость носит пороговый характер и при плотности энергии меньшей $0,3$ Дж/см² процесс образования кратеров не наблюдается. Отметим, что получаются достаточно гладкие кратеры без следов обугливания (карбонизации), что указывает на то, что они образуются по абляционному механизму. Это согласуется также с данными работы [11], в которой использовался эксимерный ArF-лазер. Следует отметить, что при плотности энергии ниже пороговой образование кратеров не происходит, но при этом изменяется вид поверхности эмали: она становится более гладкой и блестящей, как это видно по участкам вокруг кратера (рис. 4, а).

Следует отметить, что определяющим фактором для глубины кратера является плотность мощности (на рис. 3, б представлена зависимость глубины кратера от плотности мощности лазерного излучения после 1000 импульсов).

При использовании ХеСl-лазеров с плотностью энергии 5 Дж/см², но с длительностью импульса 60 нс по полувысоте возникают кратеры глубиной ~ 60 мкм [9] при облучении 800 импульсами. Результаты, изложенные в работе [6] при использовании ArF-лазера с сопоставимой плотностью мощности, примерно совпадают с нашими данными.

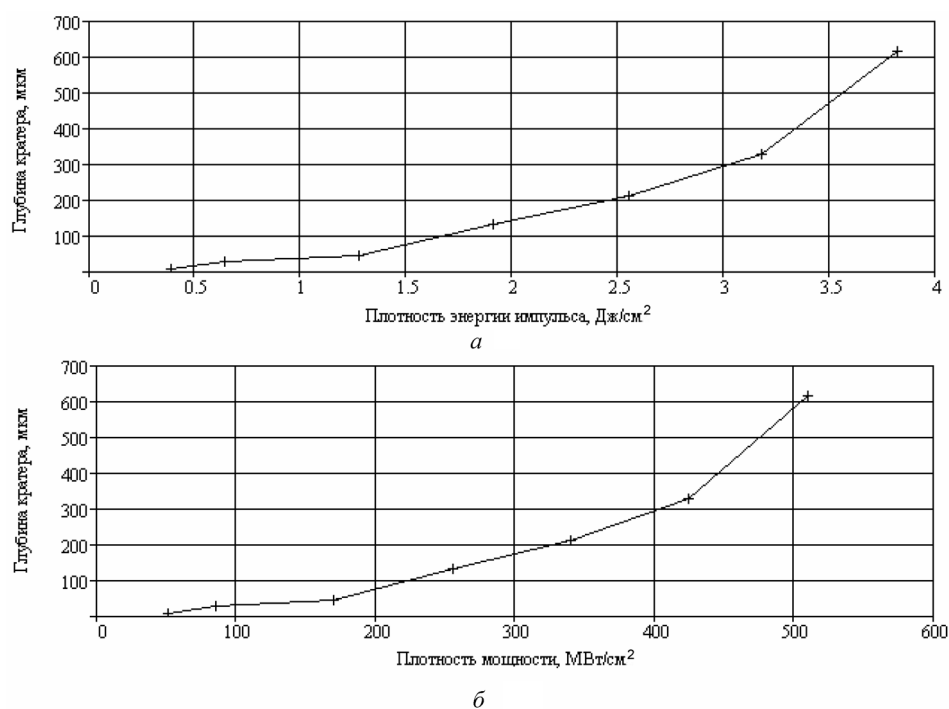


Рис. 3. Зависимость глубины кратера от плотности энергии (а) и плотности мощности (б) после 1000 импульсов облучения

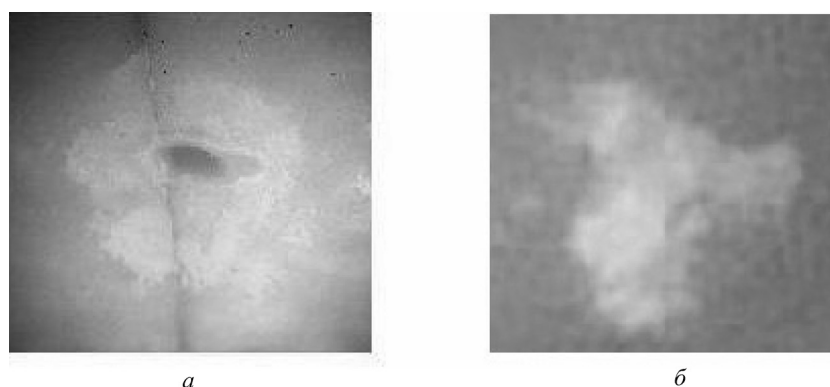


Рис. 4. Фотография поверхности эмали, полученная при помощи микроскопа

По данным работы [9] при применении ХеСl-лазеров с длительностью импульса 60 нс по плавывоте порог абляции эмали зуба составляет ~ 2 Дж/см² и обнаружено, что при плотности энергии 1 Дж/см² происходит эффективное удаление зубного камня, но при этом не наступает абляция эмали зуба.

В нашем случае при применении ХеСl-лазеров с длительностью импульса 7,5 нс порог абляции эмали зуба составляет $\sim 0,3$ Дж/см² и обнаружено, что при плотности энергии большей 0,15 Дж/см² происходит эффективное удаление зубного камня, но при этом не наступает абляция эмали зуба. Поэтому излучение ХеСl-лазера может быть использовано для удаления зубного камня с поверхности зубов без повреждения эмали. На рис. 4, б представлена поверхность зубной эмали, с участка которой удален зубной камень.

Отличие порогов абляции по плотности энергии, полученных в данной работе, $\sim 0,3$ Дж/см² и в [9] – 2 Дж/см², связано с тем, что импульсы генерации имеют различную длительность (в данной работе она в 8 раз меньше). Поэтому порог абляции по плотности мощности, который получен в нашей работе, составляет 40 МВт/см², а в [9] – 33 МВт/см², т. е. пороги совпадают с точностью до $\sim 20\%$.

Закключение. Создан макет электроразрядного ХеСl-лазера для абляционной обработки биологических тканей. Макет лазера отличается простотой конструкции. Исследованы и оптимизированы его генерационные характеристики, изучена зависимость величины энергии генерации от величины обострительной емкости, от расстояния между основным электродом и электродом предыонизации, от состава и общего давления смеси.

При использовании оптимальной смеси 1 Торр НСl, 15 Торр Хе, 2,8 атм Не и зарядного напряжения 25 кВ была получена энергия импульса $E = 30$ мДж при длительности импульса 7,5 нс по полувысоте.

Максимальная плотность энергии сфокусированного излучения равнялась 3,8 Дж/см². Максимальная плотность мощности сфокусированного излучения составляла 500 МВт/см².

Была проведена обработка зубной эмали УФ-излучением (308 нм) и определена зависимость величины абляции от плотности пиковой мощности излучения лазера при фиксированном числе облучающих импульсов (1000). Установлено, что порог абляции эмали зуба составляет ~ 0,3 Дж/см² и обнаружено, что при плотности энергии большей 0,15 Дж/см² происходит эффективное удаление зубного камня, но при этом не наступает абляция эмали зуба.

Литература

1. Ельяшевич М. А. Разрушение металлов под действием излучения оптического квантового генератора // Отчет Ин-та физики АН БССР. 1963. № КЭ-14.
2. Goldman L., Hornby P., Meyer R., Goldman B. // Nature. 1964. Vol. 203. P. 417.
3. Stern R. H., Sognnaes R. F. // J. Dent. Res. 1964. Vol. 43. P. 873–876.
4. Pini R., Salimben R., Vannini M. // Lasers. Surg. Med. 1989. Vol. 9. P. 358–361.
5. Frentzen M., Koort H. J. // Dtsch. Zahnarzt. Z. 1989. Vol. 44, N 6. P. 454–457.
6. Feuerstein O., Palanker D., Fuxbrunner O. // Lasers Surg. Med. 1992. Vol. 12 (5). P. 471–477.
7. Neev J., Stabholtz A., Liaw L. H. // Lasers Surg. Med. 1993. Vol. 13, N 3. P. 353–362.
8. Folwaczny M., Liesenhoff T., Lehn N., Horch H. // J. of endodontics. 1998. Vol. 24, N 12. P. 781–785.
9. Folwaczny M., A. Mehl A., Haffner C., Hickel R. // J. Clin. Periodontol. 1999. Vol. 26. P. 306–312.
10. Окунов В. В. // Успехи физ. наук. 2000. Т. 70, № 3. С. 225–245.
11. Tomohiro Ishida, Kenichi Tonami, Kouji Araki, Norimasa Kurosaki // J. Med. Dent. Sci. 2008. Vol. 55. P. 155–161.

S. S. ANUFRIK, A. P. VOLODENKOV, K. F. ZNOSKO

OPTIMIZATION OF GENERATION CHARACTERISTICS OF THE ХеСl LASER PROTOTYPE FOR ABLATION TREATMENT OF DENTAL TISSUE

Summary

The treatment of dental enamel by UV (308 nm) radiation is made and the dependence of the ablation value of the peak power density of laser radiation at a fixed number of pulses is determined. It is established that the ablation threshold of dental enamel is about 0.3 J/cm². It is found that at an energy density of more than 0.15 J/cm² dental calcium is removed without dental enamel ablation.