

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ТЕРАПИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ

А.А. Чунихин, Э.А. Базикян

Московский государственный медико-стоматологический университет
им. А.И. Евдокимова, Москва

Изложены результаты технического тестирования лазерного инфракрасного модуля для микрохирургии с целью применения в малоинвазивной хирургии при проведении вмешательств в челюстно-лицевой области. Проведены исследования спектральных, частотных и мощностных характеристик прибора. Приведены результаты фотохимических экспериментов генерации синглетного кислорода в модельных растворах. Компактные размеры модуля позволяют интегрировать его в многофункциональный комплекс для роботизированной хирургии в стоматологии.

Ключевые слова: *лазерное излучение, полупроводниковый лазер, спектрометрия, синглетный кислород, светокислородная терапия, робот-ассистированная хирургия*

Введение

Развитие лазерных технологий в медицине позволило разработать высокоэффективные методы лечения ряда заболеваний. Лазерный скальпель стал привычным инструментом хирурга для применения в различных областях медицины за счет высокоэнергетического воздействия лазерного излучения. Использование тонких гибких световодов в качестве проводников лазерного излучения позволяет проводить малоинвазивные, в том числе пункционные хирургические вмешательства, широко востребованные в стоматологии [1]. Низкоинтенсивное лазерное излучение широко используется для возбуждения различных биостимулирующих эффектов в тканях и слизистых оболочках [2].

Разработка и внедрение во многие области науки и народного хозяйства полупроводниковых лазеров ознаменовало новую ступень технического развития и открыло пути созда-

ния новых технологий, в том числе медицинских. Полупроводниковые лазеры при достаточно большой мощности излучения обладают компактными габаритами, небольшой массой и энергопотреблением. Электронным управлением реализуются различные временные режимы работы: непрерывный, импульсный, импульсно-периодический и квазинепрерывный. Немаловажным является высокая надежность и простота управления аппаратами на основе полупроводниковых лазеров, что обуславливает низкую эксплуатационную стоимость таких приборов, так как не требуется серьезного инженерного обеспечения при работе [3].

Развитие медицинской техники в последние десятилетия привело к созданию роботизированных медицинских комплексов с искусственным интеллектом. Внедрение лазерного генератора в роботическую установку позволит с помощью компьютерной программы контро-

лизовать направление и глубину проникновения лазерного луча, а устойчивость самого манипулятора способствует проведению точных функциональных геометрических разрезов тканей [4].

При проведении хирургических манипуляций в челюстно-лицевой области, где находится множество анатомических образований – сосуды, нервы, воздухоносные синусы – требуется высокая точность в работе стоматолога хирурга [5]. Различные заболевания слизистой оболочки полости рта требуют математической систематизации и компьютерного расчета в лечении. Использование самых прогрессивных технологий в роботостроении и новейших разработок в лазерной медицине позволят создать роботизированный лазерный комплекс для применения в челюстно-лицевой хирургии и стоматологии.

Одним из прогрессивных и многообещающих направлений в лазерной медицине является светокислородная терапия, основанная на открытом в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия светокислородном эффекте (СКЭ) [6–8], подробно описанном в [9–11]. Суть СКЭ заключается в прямом фотовозбуждении молекулярного кислорода $^3\text{O}_2$, присутствующего во всех живых системах, в высокоэнергетическое синглетное состояние $^1\text{O}_2$ излучением в его полосах поглощения. Светокислородная терапия (СКТ) уже входит в клиническую практику [12–17], однако этот прогресс сдерживается отсутствием надежных сертифицированных лазеров с излучением в основных полосах поглощения молекулярного кислорода, прежде всего в его самой эффективной полосе 1265 ± 8 нм.

Сейчас разрабатываются новые лазерные излучатели, способные генерировать ультракороткие импульсы с высокой пиковой мощностью. Однако большинство из них имеет большие габаритные размеры и высокую стоимость [20]. Исследовательской группой кафедры хирургии полости рта МГМСУ им. А.И. Евдокимова в содружестве с ООО “Новые хирургические технологии” осуществлена разработка диодного лазерного генератора с излучением 1260 нм с заданными энергетическими параметрами. Данный прибор может использоваться как самостоятельно, так и, благодаря своим компактным размерам, может быть внедрен в разрабатываемый на кафедре робо-

тизированный комплекс для челюстно-лицевой хирургии и стоматологии [21].

Цель данного исследования состояла в исследовании спектральных, частотных и энергетических характеристик модуля при различных режимах работы с обоснованием внедрения его в роботизированный комплекс для челюстно-лицевой хирургии.

Материал и методы

В работе использовали импульсный лазерный модуль EMPD-1260-2.5P, разработанный ООО “Новые хирургические технологии” (Москва) и ООО “Эльфолум” (Санкт-Петербург). Модуль представляет собой импульсный драйвер накачки, конструктивно объединенный с диодно-лазерным модулем типа PUMA с длиной волны излучения 1260 нм. В модуле использованы полупроводниковые лазеры отечественного производства на основе InGaAsP/InP квантоворазмерных двойных гетероструктур раздельного ограничения [22] с расширенным волноводом [23]. Рабочая выходная оптическая мощность каждого лазера составляла 1 Вт при апертуре излучения 100 мкм.

Модуль состоит из двух частей – силового блока “Импульс 5/10/2014” и излучающего модуля, соединенных между собой съёмным кабелем для запуска и питания выходных каналов (рис. 1). Габаритные размеры излучающего модуля отличаются компактностью от существующих аналогов и не превышают по ширине 150 мм, высоте 70 мм и глубине 200 мм.

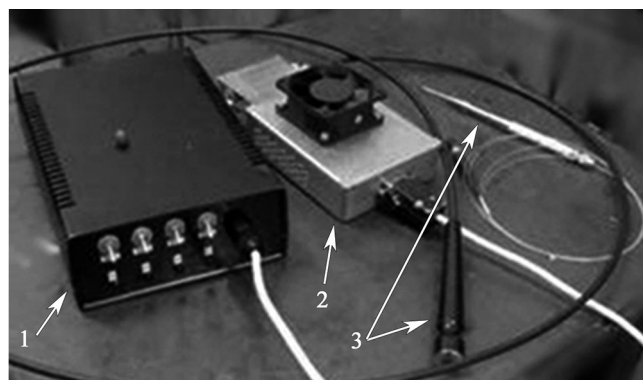


Рис. 1. Внешний вид лазерного модуля: 1 – блок излучателей; 2 – блок питания; 3 – световоды для соединения с манипулятором

Технические характеристики модуля

В работе был использован волоконный световод с оптической насадкой, которая позволяла получать на выходе слабо расходящееся пятно диаметром около 4 мм. Мощность лазерного излучения определяли с помощью измерителя мощности Ophir ORION-TN с измерительной головкой Ophir 20C-SH. В тестовом режиме “1” мощность на выходе составила $0,15 \pm 0,05$ Вт. В режиме “2” мощность составила $0,4 \pm 0,04$ Вт, в режимах “3” и “4” – $0,8 \pm 0,06$ и $1,20 \pm 0,03$ Вт соответственно.

С помощью установки, состоящей из монохроматора МДР-206 и фотоприемного устройства с германиевым фотодиодом, откалиброванным по длине волны с помощью гелий-неонового лазера ЛГН-207Б (632,8 нм), были измерены спектры излучения лазера во всех режимах работы. Чтобы отследить возможные изменения за длительный сеанс работы, для каждого режима была получена серия спектров, которые записывали каждые 10 мин работы в течение часа.

Результаты технического тестирования прибора

В результате проведенных измерений установлено, что спектр излучения лазера во всех режимах практически не меняется по положению максимума в течение всего периода работы модуля (60 мин) (рис. 2–4). В режимах с большими мощностями “2”, “3”, “4” имеются изменения по форме в течение времени, но они не оказывают существенного влияния на основной спектр излучения и их можно расценивать как шумовые и/или тепловые. Так, в режиме “2” сразу после включения излучения прослеживается смещение максимума в пределах 2 нм, а также после 30 мин работы полоса излучения смещается на 2 нм до 1262 нм (рис. 2).

В режиме работы “3” спектр излучения изменяется по форме с началом облучения и через 60 мин после его начала, но при этом максимум спектра смещается в пределах 4–5 нм, находясь также в зоне 1260 нм (рис. 3).

Измерения на самой высокой мощности в режиме “4” показали смещение максимума излучения на 1 нм до 1261 нм за все время работы, кроме этого имеется расширение полосы излучения в начале работы на 2 нм (рис. 4).

С помощью осциллографа Aktakom ADS-2121M и ФЭУ-83 с усилительной системой была проведена проверка излучения лазера в

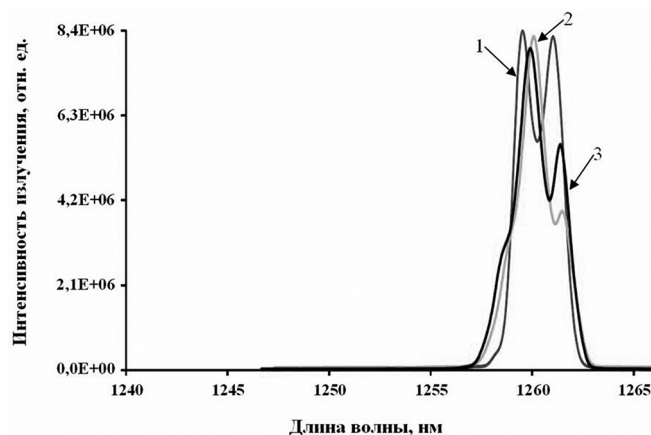


Рис. 2. Спектры излучения лазера в режиме “2” при длительной работе: 1 – в начале работы, 2 – через 30 мин, 3 – через час после включения. Спектральная ширина щели монохроматора 0,6 нм

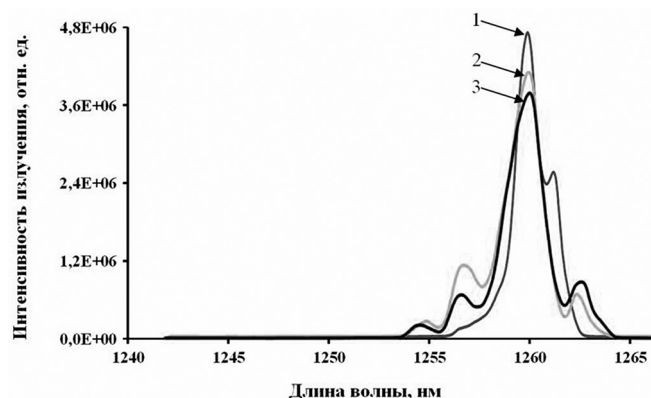


Рис. 3. Спектры излучения лазера в режиме “3” при длительной работе: 1 – в начале работы, 2 – через 30 мин, 3 – через час после включения. Спектральная ширина щели монохроматора 0,4 нм

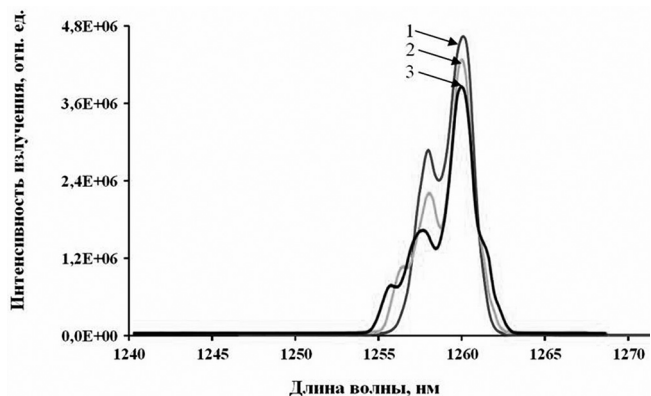


Рис. 4. Спектры излучения лазера в режиме “4” при длительной работе: 1 – в начале работы, 2 – через 30 мин, 3 – через час после включения. Спектральная ширина щели монохроматора 0,4 нм

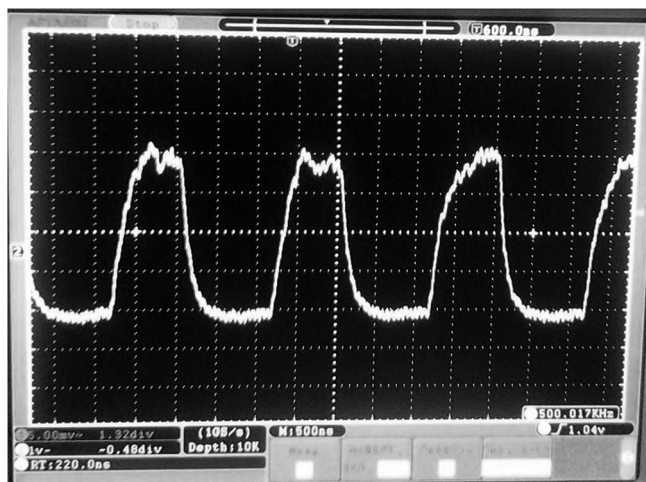


Рис. 5. Осциллограмма излучения лазера в режиме "2"

режиме "2" (рис. 5). Осциллограмма показала, что сигнал сильно модулирован. Форма импульса близка к меандру, продолжительность импульса составляет 1 мкс, а промежуток времени между импульсами – около 2 мкс, что соответствует частоте 500 кГц. Таким образом, лазерный модуль излучает в квазинепрерывном (импульсно-периодическом) режиме. Изменения спектра излучения на 2–3 нм не существенны, поскольку лежат в основной полосе поглощения молекулярного кислорода с полушириной 18 нм [9].

Результаты фотохимических экспериментов

Для оценки эффективности генерации синглетного кислорода лазерным излучением была использована методика с модельными системами [18, 19], представляющими собой насыщенные воздухом растворы 1,3-дифенилизобензофурана (ДФИБФ), являющегося ак-

тивной химической ловушкой синглетного кислорода, в различных средах: ацетоне, этаноле, воде с детергентом. Поглощение синглетного кислорода ловушкой отслеживали спектрофотометрическим методом по убыванию оптической плотности при 414 нм (максимум полосы поглощения ловушки). Для измерения этой величины использовался однолучевой спектрофотометр СФ-56. Оптическую плотность растворов при 414 нм измеряли до и после облучения. Скорость выцветания ДФИБФ определяли как отношение изменения оптической плотности за сеанс облучения к продолжительности этого сеанса в минутах.

При облучении растворов ДФИБФ в ацетоне, этаноле и водном растворе, представленном мицеллярным раствором детергента SDS (додецилсульфата натрия) с концентрацией 0,2 М, во всех образцах исследуемым ИК лазером в течение 15 мин наблюдался достоверный эффект выцветания ловушки.

В табл. 1 приведены относительные скорости выцветания ловушки в различных модельных средах в микросекундных импульсных режимах. Цифры, указанные в таблице соответствуют скорости снижения оптической плотности ловушки, нормированной на 1 Вт за минуту лазерного облучения. Каждое число является средним значением из трех независимых измерений (статистическая погрешность $\pm 5\%$).

Обсуждение

Лазерный модуль EMPD-1260-2.5P во всех режимах работы генерирует инфракрасное излучение близкое к длине волны 1260 нм, попадающее в основную полосу поглощения молекулярного кислорода $^3\text{O}_2$ 1265 нм, переводя его в синглетное состояние $^1\text{O}_2$. Спектраль-

Таблица 1

Эффективность фотодеструкции ловушки синглетного кислорода при действии излучения лазера в различных растворителях

Среда	Скорость выцветания ДФИБФ (отн. ед.), нормированная на мощность лазерного излучения (Вт) при различных режимах работы лазера			
	Режим «1»	Режим «2»	Режим «3»	Режим «4»
Ацетон	0,048	0,053	0,061	0,069
Этанол	0,067	0,075	0,082	0,086
Вода с 0,2 М SDS	0,00315	0,00328	0,00356	0,00382

ное расхождение при различных режимах работы незначительное и находится в пределах погрешности измерения. В рабочих режимах уровень интенсивности и спектр излучения становятся устойчивыми сразу после включения модуля. Во всех режимах работы форма спектра меняется незначительно, максимум в режиме "4" смещается к 1261 нм, при этом не происходит значительного падения мощности. Осциллографическое исследование показало, что во всех режимах лазер генерирует импульсный сигнал с продолжительностью импульса 1 мкс и частотой следования импульсов 500 кГц.

Подтверждено, что такое лазерное облучение приводит к окислению химической ловушки ДФИБФ в органических растворителях – ацетоне и этаноле, водном растворе мицеллярного детергента SDS (додецилсульфата натрия) с концентрацией 0,2 М, что свидетельствует о достаточно эффективной генерации в растворе синглетного кислорода за счет прямого фото-возбуждения растворенного в нем кислорода.

Заключение

Таким образом, энергетические и эргономические характеристики лазерного модуля позволяют использовать его как в низкоэнергетической лазерной терапии, так и для термотерапии новообразований и микрохирургических процедур. Однако основная область его применения – светокислородная терапия заболеваний, локализованных в визуально и эндоскопически доступных областях организма. В этом отношении стоматология является благодатной областью. Созданный модуль имеет компактные размеры и может использоваться в качестве самостоятельного многофункционального лазерного инструмента, а также может быть интегрирован в роботический медицинский комплекс для стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, что является конечной целью настоящего исследования.

Работа выполнена при поддержке в рамках субсидии по государственному заданию Министерства здравоохранения РФ 056-00139-16.

Список литературы

1. Lehnert M.N. Lasers in medicine and dentistry // Northwest Dentistry. 1996. Vol. 75. № 1. P. 17–22.
2. Farivar S., Malekshahabi T., Shiari R. Biological effects of low level laser therapy // J. Lasers Med. Sci. 2014. Vol. 5. № 2. P. 58–62.
3. Гапонцев В.П., Минаев В.П., Савин В.И., Самарцев И.Э. Медицинские аппараты на основе мощных полупроводниковых и волоконных лазеров // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 11. С. 1003–1006.
4. Deibel W., Schneider A., Augello M. et al. A compact, efficient, and lightweight laser head for CARLO: integration, performance, and benefits // Proc. SPIE, Novel Optical Systems Design and Optimization XVIII. 2015. P. 957905.
5. Робустова Т.Г. Базилян Э.А., Ушаков А.И. и соавт. Комплексный клинико-рентгенологический подход при реконструктивных операциях и синус-лифтинге в области верхней челюсти для дентальной имплантации // Российская стоматология. 2008. Т. 1. № 1. С. 61–67.
6. Захаров С.Д., Еремеев Б.В., Перов С.Н. Сравнение эффектов лазерного воздействия на длинах волн 1,26 и 0,63 мкм на эритроциты // Кратк. сообщ. по физике ФИАН. 1989. № 1. С. 15–16.
7. Данилов В.П., Захаров С.Д., Иванов А.В. и соавт. Фотодинамическое повреждение клеток в красной и ИК полосах поглощения кислорода. // Доклады АН СССР. 1990. Т. 311. № 5. С. 1255–1258.
8. Данилов В.П. Захаров С.Д. Иванов А.В. и соавт. Спектрально-селективный фотодинамический эффект без экзогенных фотосенсибилизаторов и его возможные применения для фототерапии рака и биостимуляции // Известия АН СССР. Серия Физика. 1990. № 8. С. 1610–1620.
9. Захаров С.Д., Иванов А.В. Светокислородный эффект в клетках и перспективы его применения в терапии опухолей. // Квантовая электроника. 1999. Т. 29. № 3. С. 192–214.
10. Захаров С.Д., Иванов А.В., Вольф Е.Б. и соавт. Структурные перестройки в водной фазе клеточных суспензий и белковых растворов при светокислородном эффекте // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 2. С. 149–162.

11. Zakharov S.D., Ivanov A.V. Light-oxygen effect as a physical mechanism for activation of bio-systems by quasi-monochromatic light (a review) // *Biophysics*. 2005. Vol. 50. Suppl. 1. P. 64–83.
12. Машалов А.А., Балакирев С.А., Захаров С.Д. и соавт. Светоокислородная лазерная терапия как радиопротектор в комплексном лечении онкологических больных // *Мед. физика*. 2011. № 4. С. 50–56.
13. Алексеев Ю.В., Захаров С.Д., Иванов А.В. Фотодинамический и светоокислородный эффекты: общность и различия // *Лазерная медицина*. 2012. Т. 16. № 4. С. 40–46.
14. Машалов А.А., Балакирев С.А., Иванов А.В. и соавт. Светоокислородная лазерная терапия в профилактике и лечении лучевых реакций и осложнений у онкологических больных // *Лазерная медицина*. 2013. Т. 17. № 1. С. 10–14.
15. Алексеев Ю.В., Иванов А.В., Миславский О.В., Шумилова Н.М. Перспективы применения лазерного излучения с длинами волн 1264–1270 нм (светоокислородный эффект) в клинической практике // *Актуальные вопросы дерматовенерологии, дерматоонкологии и косметологии. Сборник статей.* – М.: МОНИКИ. 2015. С. 6–9.
16. Юсупов А.С., Захаров С.Д. Лазероиндуцированный светоокислородный эффект в онкологической практике // *Креативная хирургия и онкология*. 2011. № 2. С. 24–32.
17. Semyachkina-Glushkovskaya O.V., Sokolovski S.G., Goltsov A. et al. Laser-induced generation of singlet oxygen and its role in the cerebrovascular physiology // *Progress in Quantum Electronics*. May 2017. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2017.05.001.
18. Красновский А.А., Козлов А.С. Измерение оптической плотности в ИК-максимумах спектров поглощения кислородных молекул по их фотохимической активности при прямом лазерном возбуждении // *Биофизика*. 2014. Т. 59. Вып. 2. С. 250–257.
19. Krasnovsky A.A. Jr, Kozlov A.S., Roumbal Y.V. Photochemical investigation of the IR absorption bands of molecular oxygen in organic and aqueous environment // *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2012. Vol. 11. № 6. P. 988–997.
20. Чунихин А.А., Базилян Э.А., Красновский А.А. и соавт. Перспективы совершенствования малоинвазивных лазерных технологий в фотодинамической терапии стоматологических патологий // *Российская стоматология*, 2015. Т. 8. № 2. С. 71–74.
21. Chunikhin A.A., Bazikyan E.A., Pikhtin N.A. A laser unit for photodynamic therapy and robot-assisted microsurgery in dentistry // *Tech. Phys. Lett.* 2017. Vol. 43. № 6. P. 507–510. DOI: 10.1134/S1063785017060074.
22. Голикова Е.Г., Курешов В.А., Лешко А.Ю. и соавт. Свойства гетеролазеров на основе In-GaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом // *Физика и техника полупроводников*. 2000. Т. 34. № 7. С. 886–889.
23. Слипченко С.О., Подоскин А.А., Винокуров Д.А. и соавт. Полупроводниковые лазеры (1020–1100 нм) с асимметричным расширенным одномодовым волноводом на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs // *Физика и техника полупроводников*. 2013. Т. 47. № 8. С. 1082–1086.

MULTIFUNCTIONAL LASER MODULE FOR THE TREATMENT OF DISEASES OF THE MAXILLOFACIAL REGION USING ROBOTIC SURGERY

A.A. Chunikhin, E.A. Bazikyan

A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow, Russia

Technical testing of IR-laser module for microsurgery for using in minimally invasive surgery during the interventions in the maxillofacial area are set out. Investigations of the energy parameters of the device, in particular, its spectral, frequency and power characteristics were conducted. The compact size of the module gives an opportunity to integrate it into a robotic system for robot-assisted surgery in dentistry.

Key words: laser radiation, semiconductor laser, spectrometry, singlet oxygen, light-oxygen therapy, robot-assisted surgery

E-mail: docca74@yandex.ru