

Медицинские аппараты на основе мощных полупроводниковых и волоконных лазеров

В.П.Гапонцев, В.П.Минаев, В.И.Савин, И.Э.Самарцев

Представлены характеристики и возможные применения выпускаемых и разрабатываемых НТО «ИРЭ-Полус» скальпелей на основе полупроводниковых и волоконных лазерных модулей с длинами волн рабочего излучения 0.97, 1.06, 1.56 и 1.9 мкм. Показаны преимущества подобных устройств, существующие возможности увеличения их выходной мощности и расширения спектрального диапазона.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, волоконные лазеры, лазерная медицинская аппаратура.

1. За последние два десятилетия были созданы лазерные технологии лечения различных заболеваний, и лазер стал привычным и эффективным инструментом для врачей крупных медицинских центров. Однако сложность такой медицинской техники, необходимость постоянного квалифицированного инженерного обслуживания, потребность использования специальных операционных, обусловленная громоздкостью оборудования и необходимостью мощного электропитания, мешали широкому использованию лазерной техники для хирургии и силовой терапии в массовом здравоохранении.

Появление в 90-х годах XX века мощных полупроводниковых лазеров (лазерных диодов), быстрый прогресс в увеличении их надежности и выходной мощности при снижении себестоимости – все это позволило в значительной степени устранить существующие препятствия. В последнее время лазерные диоды и лазеры с полупроводниковой накачкой начали вытеснять из медицинских аппаратов лазеры других типов. Это обусловлено следующими преимуществами лазерных диодов и лазеров с полупроводниковой накачкой:

- малые вес, энергопотребление и габариты;
- отсутствие потребности в жидкостном охлаждении;
- высокая надежность и большой ресурс работы;
- простота в обращении, отсутствие необходимости в частом проведении регламентных работ и квалифицированном обслуживании;
- высокая стабильность параметров, простота управления характеристиками излучения (мощностью, модуляцией и, в определенной степени, длиной волны излучения);
- низкая чувствительность к механическим и климатическим воздействиям.

Эти преимущества, а также снижение цены аппаратов и стоимости их эксплуатации создали предпосылки к более широкому их внедрению в массовое здравоохранение, включая амбулаторно-поликлиническую службу и

даже службу скорой помощи и мобильные полевые госпитали.

Дополнительные возможности медицинских применений открываются при использовании волоконных лазеров (лазеров на активированных волоконных световодах) с накачкой от полупроводниковых лазеров. Новые технологии позволяют усовершенствовать и медицинские аппараты на основе полупроводниковых лазеров с волоконным выводом излучения.

2. Наибольшим неудобством для медиков в аппаратуре прежних поколений и во многих современных аппаратах является то, что лазерный излучатель представляет собой конструкцию из дискретных элементов, требующих точной юстировки. При этом возникают сложности с сохранением юстировки при неминуемых механических воздействиях, с необходимостью восстановления юстировки после замены вышедших из строя элементов, например ламп накачки. Дополнительная сложность заключается в проблеме защиты оптических поверхностей от влаги и загрязнений, приводящих к снижению выходной мощности или выходу лазера из строя.

Разработанные в «ИРЭ-Полус» технологии позволяют создать аппараты, в которых формирование излучения, управление его свойствами, суммирование излучения (в том числе с разными длинами волн) осуществляются внутри оптических волоконных элементов и не требуют юстировки дискретных элементов (это относится в равной мере к волоконным лазерам и полупроводниковым лазерным модулям с волоконным выводом излучения). Естественно, что в готовом устройстве исключается попадание влаги и пыли внутрь оптического тракта вплоть до выходного торца световода, что выгодно отличает подобные лазеры, например, от лазеров на кристаллах с полупроводниковой накачкой, которые при высокой эффективности и хороших весо-габаритных характеристиках обладают вышеописанными недостатками лазеров из дискретных элементов.

Благодаря этому удается повысить надежность медицинских аппаратов, снизить влияние на них окружающей среды и механических воздействий, упростить и удешевить их эксплуатацию.

3. При воздействии лазерного излучения на биологические ткани излучение с различными длинами волн по-

ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус», Россия, 141120 Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1; e-mail: mail@ntoire-polus.ru

Поступила в редакцию 3 октября 2002 г.

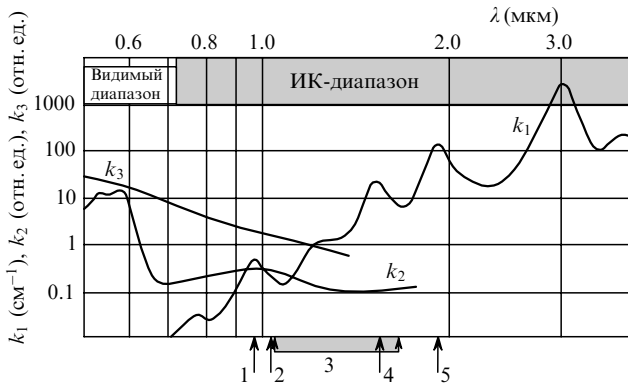


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициентов поглощения в воде (k_1), оксигемоглобине (k_2) и меланине (k_3) излучений: 1 – диодного лазера ($\lambda = 0.97$ мкм); 2 – лазера на Yb-активированном волокне ($\lambda = 1.03 - 1.12$ мкм); 3 – рамановского волоконного лазера ($\lambda = 1.12 - 1.7$ мкм); 4 – лазера на Er-активированном волокне ($\lambda = 1.53 - 1.62$ мкм); 5 – лазера на Tm-активированном волокне ($\lambda = 1.9 - 2.0$ мкм).

глощается неодинаково в разных компонентах этих тканей. На рис. 1 представлены полученные из литературных источников зависимости коэффициентов поглощения лазерного излучения в меланине, оксигемоглобине и воде от длины волны. Там же представлены длины волн излучения, которые реализованы в полупроводниковых и волоконных лазерных модулях «ИРЭ-Полус». Видно различие их коэффициентов поглощения в указанных средах.

Важно отметить, что каждая длина волны реализует специфическое воздействие на биоткань, которое может быть оптимальным для различных медицинских технологий. Например, излучение с длиной волны около 0.81 мкм (полупроводниковый лазер) и 1.06 мкм (YAG: Nd – лазер или волоконный лазер на Yb), глубоко проникаю-

щее в ткани, оптимально для лазерной термотерапии опухолей [1]. Приходящееся на локальные максимумы коэффициентов поглощения в воде и оксигемоглобине излучение лазерных диодов с длиной волны 0.97 мкм хорошо сочетает режущие и кровоостанавливающие свойства [2]. Высокую эффективность показало использование аппаратов с длиной волны 0.97 мкм при малоинвазивном пункционном лечении пациентов с болевыми синдромами поясничного остеохондроза и невралгии тройничного нерва [3]. Излучение с длиной волны около 1.56 мкм (волоконный лазер на активированном ионами Er волокне) слабо поглощается в гемоглобине и меланине, но хорошо – в воде, поэтому может быть использовано для лазерной термопластики хрящей [4] при коррекции формы носовой перегородки, когда необходимо нагреть хрящ при минимальном воздействии на кровосодержащие ткани. С помощью аппаратов с длиной волны 1.56 мкм также получены результаты по регенерации хрящевой ткани межпозвоночных дисков [5], кроме того, эта длина волны может оказаться эффективной для нехирургической коррекции дефектов зрения [6]. Предварительные исследования [7] показали ряд привлекательных особенностей воздействия на биоткань излучения с длиной волны 1.9–2.0 мкм (волоконный лазер на Tm-активированном волокне).

Таким образом, врач получает возможность подбирать длину волны рабочего излучения. В табл. 1 приведены характеристики, достигнутые в нескольких типах волоконных лазеров, выпускаемых НТО «ИРЭ-Полус». Следует отметить, что среднее время наработки используемых в таких устройствах мощных лазерных диодов достигает миллионов часов.

Более полную информацию о выпускаемой продукции можно получить на сайтах фирмы [8, 9]. Следует обратить внимание на возможность создания на основе рамановских волоконных лазеров медицинских аппара-

Табл. 1. Характеристики волоконных лазеров, выпускаемых «ИРЭ-Полус».

Лазер	Выходная мощность (Вт)	Длина волны (мкм)	Длительность импульса (нс)	Частота повторения (МГц)	Нестабильность мощности за 6 ч (%)	КПД (%)	Потребляемая мощность (Вт)	Температура (°C)
Непрерывные на Yb-активированном волокне	100*	1.075–1.095	–	–	< 5	≤ 30	< 700	0... + 40
Непрерывные на Er-активированном волокне	15	1.545–1.565	–	–	< 1	> 8	180	–20... + 60
Модулированные на Yb- или Er-активированном волокне	20	1.03–1.12 1.53–1.62	1–1000	0–100	< 3	≤ 30	–	–20... + 60
Непрерывные рамановские	10	1.12–1.7	–	–	< 2	≤ 10	–	–20... + 60
Непрерывные на Tm-активированном волокне	15	1.9–2.0	–	–	< 5	> 5	180	–20... + 60

*Указана максимальная выходная мощность (100 Вт) для одного одномодового лазера на Yb-активированном волокне. С использованием суммирования мощностей нескольких таких лазеров внутри единого интегрального волоконного устройства для промышленных целей созданы и эксплуатируются лазеры с мощностью до 2 кВт в выходном волокне. В ближайшее время планируется поднять выходную мощность до 6 и 10 кВт.

Примечание: при модуляции по питанию – длительности импульса и паузы – более 10 мс.

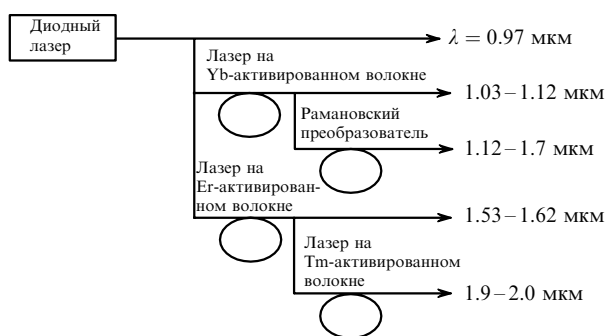


Рис.2. Семейство лазерных модулей «ИРЭ-Полнос».

тов, работающих на любой заданной в диапазоне 1.12–1.7 мкм длине волны излучения.

Эти разработки не только расширяют диапазон доступных для использования длин волн, но и позволяют без особого усложнения конструкции и серьезных потерь эффективности объединить в рабочем волокне излучение с различными длинами волн и изменять долю каждого из них в соответствии с потребностями выполняемой медицинской процедуры. При этом с сохранением вышеописанных преимуществ можно суммировать излучение волоконных и полупроводниковых лазеров. Более того, появляется возможность в ходе процедуры плавно изменять в определенных пределах длину волны всего рабочего излучения или его части. Структура семейства лазерных модулей «ИРЭ-Полнос», на основе которых могут изготавливаться медицинские аппараты, представлена на рис.2.

Все описанные волоконные лазеры основываются на унифицированных полупроводниковых лазерных модулях накачки (излучение которых в медицинских аппаратах может использоваться и в качестве рабочего) и управляющей электронике, поэтому легко комбинируются в составе медицинских аппаратов. Унификация упрощает обслуживание такой аппаратуры.

Кроме этого, перечень используемых длин волн может быть расширен за счет полупроводниковых лазеров с другими длинами волн рабочего излучения, например красного диапазона, используемых для фотодинамической терапии опухолей [10].

4. Дополнительные возможности открываются в связи с тем, что в волоконных лазерах «ИРЭ-Полнос» высокие уровни мощности достигаются в одномодовом режиме. Это позволяет осуществлять вывод рабочего излучения в очень тонкое рабочее волокно, на выходе ко-

торого излучение обладает идеальными пространственными характеристиками. Используя на выходе волокна фокусирующую оптику, можно получить в рабочей зоне перетяжку, обладающую предельно возможным отношением диаметра пятна к длине каустики. При этом фокусирующая оптика может размещаться в ручном держателе или быть сопряжена с операционным микроскопом (целевой лампой). Таким образом, появляется возможность создания лазерного инструмента с высокой плотностью мощности для работы на микрооперационных полях.

5. Существенно, что характер воздействия лазерного излучения зависит не только от длины волны излучения, но и от его временных параметров. В волоконных лазерах можно в широких пределах осуществлять управление временными характеристиками лазерного излучения (см. табл.1). Существенным ограничением при этом является невозможность получения высоких пиковых мощностей из-за разрушения оптического волокна.

Практическая реализация изложенных возможностей была начата в разработанном совместно с Федеральным научно-производственным центром «Прибор» аппарате «Лазон-10П» и получила развитие в разработанных «ИРЭ-Полнос» лазерных медицинских аппаратах «ЛС», характеристики которых представлены в табл.2.

Некоторые из этих аппаратов сертифицированы и имеют разрешение Минздрава России на их применение в медицинской практике, остальные существуют в виде опытных аппаратов, проходящих испытания, необходимые для получения этого разрешения.

В ходе клинических испытаний и последующего использования аппаратов «Лазон-10П» и «ЛС» было показано, что аппараты надежны, удобны и просты в эксплуатации. Очень важно, что многие медицинские технологии, реализованные (а в некоторых случаях и разработанные) с использованием этих аппаратов, позволили заменить трудоемкие и болезненные операции, требующие длительной последующей госпитализации, на более простое для врача малоинвазивное, органосберегающее и малобезопасное для пациента лечение в поликлинических условиях или стационаре одного дня.

К этим применениям относятся уже упоминавшаяся термопластика хрящей [4], операции по лечению различных ЛОР [11–13], гинекологических [14], урологических и онкологических заболеваний. Благодаря волоконному выводу излучения аппараты хорошо зарекомендовали себя при малоинвазивных эндоскопических и лапароскопических операциях [15]. Многие применения реализованы врачами на практике, но результаты не опубликованы.

Табл.2. Характеристики лазерных скальпелей, разработанных «ИРЭ-Полнос».

Лазерный скальпель	Длина волны (мкм)	Выходная мощность (Вт)	Режим работы	Масса (кг)	Стадия освоения
Лазон 10П*	0.97	10	Непрерывный	7	Производство
ЛС-0.97	0.97	до 30		≤ 9	Производство
ЛС-1.56	1.56	до 10		≤ 9	Производство
ЛС-1.06	1.06	до 10		9	Испытания
ЛС-1.9	1.9	3	Непрерывный, импульсный и импульсно-периодический	9	Испытания
ЛС-0.97/1.56	0.97	10		9	Испытания
ЛС-0.97/1.56	1.56	2.5		9	Испытания

*Совместно с Федеральным научно-производственным центром «Прибор».

Примечание: длительность импульса и паузы 10–2000 мс, длина волны целеуказателя 0.53 или 0.67 мкм, диаметр волокна 400–600 мкм, размеры аппарата 120 × 260 × 330 мм, питание: 220 В, 50 Гц, не более 150 Вт, ресурс работы лазерных диодов более 20000 часов.

В последние годы для лечения ишемической болезни сердца эффективно используется метод лазерной ревазуляризации миокарда, при котором восстановление кровообращения достигается прожиганием лазером десятков отверстий в миокарде. Достаточно сказать, что в США [16] этот метод применялся для лечения более 12000 пациентов. При этом использовалось громоздкое и дорогостоящее оборудование на СО₂-лазерах. Даже отечественная система «Перфофор» [17] стоит около \$250000. Однако подобные операции могут проводиться и с помощью полупроводниковых аппаратов (см., например, [18], где описываются результаты лечения с помощью лазера с мощностью 30 Вт и длиной волны 0.81 мкм). Исследования, проведенные в НИИ кардиологии Томского НЦ СО РАМН, показали, что использование излучения с длиной волны 0.97 мкм позволяет снизить необходимую мощность до 10 Вт. Несколько операций по лазерной ревазуляризации миокарда с помощью аппарата «Лазон-10П» выполнено в Хабаровской краевой больнице № 1 им. проф. С.И.Сергеева. Стоимость же этого аппарата около \$6500. Кроме того, важным фактором при применении полупроводниковых лазеров в медицине является их высокая надежность.

Таким образом, можно утверждать, что появилось и развивается семейство недорогих, простых в эксплуатации и надежных лазерных аппаратов для хирургии и силовой терапии. Они работают в различных областях ближнего ИК диапазона и не требуют специальных условий эксплуатации. Внедрение в медицинскую практику методик, основанных на использовании этих аппаратов, позволяет проводить в поликлиниках многие операции, выполнение которых традиционными способами требует госпитализации.

1. Chapmen R. *Lasers in Surgery and Medicine*, **22**, 171 (1998).

2. Cecchetti W., et al. *SPIE of Bios Europe '96. The Biomedical Optics Week* (Vien, 1996).
3. Сандлер Б.И. и др. В сб. *Использование лазеров для диагностики и лечения заболеваний* (М.: Лазерная ассоциация, 2001, т. 3, с. 8).
4. Bagratashvili V.N., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3914**, 102 (2000); Баграташвили В.Н. и др. В сб. *Использование лазеров для диагностики и лечения заболеваний* (М.: Лазерная ассоциация, 2001, т. 3, с.114).
5. Sobol E.N., et al. *Proc. XII Word Congress of Neurosurgery* (Sydney, Australia, 2001, p. 140).
6. Большунов А.В. и др. *Рефракционная хирургия и офтальмология*, **2**, 55 (2002).
7. Pierce M.C., et al. *Laser in Surgery and Medicine*, **25**, 407 (1999).
8. <http://www.ntoire-polus.ru>
9. <http://www.ipgphotonics.com>
10. Stranadko E.Ph., et al. *Proc. X Intern. Laser Physics Workshop (LPHYS'01)* (Moscow, 2001, p. 163).
11. Андрианов О.А. и др. *Ученые записки Санкт-Петербургского Государственного медицинского университета им. И.П.Павлова*, **V**, № 2, 83 (1998).
12. Гарашенко Т.И., Богомильский М.Р., Минаев В.П. *Лечение ЛОР-заболеваний с использованием лазерных скальпелей. Пособие для врачей* (Тверь: ООО «Губернская медицина», 2001).
13. Агеева С.А. и др. *Тезисы Междунар. конф. «Лазерные и информационные технологии в медицине XXI века»* (С.-Пб.: изд-во С.-Пб. Государственного медицинского ун-та им. И.П.Павлова, 2001, ч. 1, с. 222).
14. Зуев В.М., Ищенко А.И., Джибладзе Т.А. В сб. *Использование лазеров для диагностики и лечения заболеваний* (М.: Лазерная ассоциация, 2001, т. 3, с. 71).
15. Рошаль Л.М. и др. *Тезисы симп. «Эндоскопическая хирургия у детей»* (Уфа, 2002, с. 123).
16. *Biophotonics International*, **12**, 14 (2000).
17. Васильцов В.В. и др. В сб. *Использование лазеров для диагностики и лечения заболеваний* (М.: Лазерная ассоциация, 2001, т. 3, с. 98).
18. Евдокимов С.В. и др. В сб. *Лазерные технологии в медицине* (Челябинск: Челябинский институт лазерной хирургии, 1999, с. 80).