

МУЛЬТИВОЛНОВЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОФТАЛЬМОКОАГУЛЯТОР

© 2014 г. Л. Н. Пантелеев*, канд. экон. наук; Ю. С. Астахов**, доктор мед. наук;
А. А. Иванов***; Ю. В. Соболев*; Е. Л. Акопов**, канд. мед. наук

*"ОРИОН МЕДИК", Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И.П. Павлова,
Санкт-Петербург

***"Алком Медика", Санкт-Петербург

E-mail: sale@orionmedic.ru

Рассмотрены анализ и обоснование технического решения создания на базе целевой лампы мультиволнового паттерн-сканирующего лазерного офтальмокоагулятора. Использование мультиволнового лазерного источника с возможностью работы на двух длинах волн 532 и 810 нм отдельно или одновременно с подстройкой интенсивности каждой длины волны расширяет круг возможных применений, в первую очередь, при лечении патологий сетчатки.

Лечебно-диагностический комплекс позволит эффективно проводить операции как по паттерновой лазерной фотокоагуляции сетчатки и лазерной трабекулопластике зеленым лазером, так и по транспупиллярной термотерапии внутриглазных новообразований, транссклеральной фото-коагуляции сетчатки и цилиарного тела инфракрасным лазером. В статье обсуждаются особенности прибора и перспективы его развития.

Ключевые слова: мультиволновый паттерн-сканирующий фотокоагулятор, лазерная коагуляция сетчатки, лазерная трабекулопластика.

Коды OCIS: 140.3070, 170.1020, 170.3890, 190.4970

Поступила в редакцию 28.10.2013

Введение

Лазерная коагуляция сетчатки была апробирована в 1963 г. [1] спустя всего три года после изобретения лазера и остается эталоном в лечении различных болезней сетчатки, включая пролиферативную диабетическую ретинопатию, диабетический макулярный отек, окклюзию сосудов, центральную серозную хориоретинопатию, разрывы сетчатки. Для минимизации побочных эффектов (изменение контрастной чувствительности и цветового зрения, отек макулы, отслойка хориоидеи, и др.) был введен ряд улучшений в процедуру лазерного лечения, включая вариацию длины волны, интенсивности и длительности импульса, локализацию лазерного воздействия.

В 80-ые годы прошлого столетия в результате совместной работы КБТМ, ГОИ им. С.И. Вавилова и Загорского ОМЗ был создан и внедрен в медицинскую практику передовой для того времени многофункциональный мультиволновый лазерный офтальмологический комплекс

"ЛИМАН-2", работавший на 4-х длинах волн (514, 694, 1060, 1540 нм) [2]. Дальнейшее развитие работ в области создания серийной лазерной офтальмологической аппаратуры шло по пути разработки экономичных, малогабаритных приборов на основе полупроводниковых лазерных излучателей. Лазерный инфракрасный (длина волны излучения $\lambda = 810$ нм) офтальмокоагулятор "АЛОД-02", разработанный совместно ООО "Алком Медика" и ГОИ им. С.И. Вавилова (Санкт-Петербург), нашел широкое применение в клиниках России и стран СНГ.

Первая модульная мультиволновая лазерная система *OcuLight Symphony* (IRIDEX, США), сочетающая в одном устройстве клиническую универсальность и удобство лазеров, излучающих на длинах волн 532 нм и 810 нм, предназначалась для лазерной коагуляции сетчатки (ЛКС), транспупиллярной термотерапии хориоидальной неоваскуляризации, транссклеральной фотокоагуляции сетчатки и цилиарного тела, лазерной трабекулопластики (ЛТП) [3].



Рис. 1. Офтальмологический лечебно-диагностический комплекс. 1 – лампа щелевая, 2 – мультиволновый сканирующий лазерный излучатель.

Российским предприятием ЗАО "ОРИОН МЕДИК" совместно с ООО "АЛКОМ Медика" разработан офтальмологический лечебно-диагностический комплекс (рис. 1) на основе щелевой лампы, оснащенный мультиволновым фотокоагулятором с применением паттерн-сканирующего луча. Фотокоагулятор на длинах волн 532 и 810 нм имеет возможность работы на двух длинах волн как поочередно, так и одновременно при подстройке интенсивности излучения каждой длины волны [4].

Мультиволновый лазерный источник излучения

Применение мультиволнового лазерного источника расширяет круг возможных применений в лечении патологий сетчатки. Различные характеристики светопоглощения излучения разных длин волн ориентированы на два эндогенных хромофора, которые имеют первостепенное значение в хирургии сетчатки – меланин и гемоглобин.

Имея возможность выбирать из нескольких цветов лазерного излучения, отличающихся по своим характеристикам проникновения в ткани

Таблица 1. Сравнение мультиволновых лазерных офтальмокоагуляторов

Характеристики (параметры)	<i>OcuLight Symphony</i> IRIDEX, США	<i>Novus Varia Lumenis Vision</i> , Израиль	<i>PASCAL Synthesis</i> , Topcon, США	<i>VISULAS Trion</i> VITE, Zeiss, Германия	MC-500 NIDEK, Япония	"ОРИОН МЕДИК", Россия
Год выпуска	2002	2002	2006	2007	2011	2013
Щелевая лампа	CSO SL 980, Zeiss 30SL, Zeiss SL 130	Zeiss, 30SL, 20SL, 125SL, SL130	Haag-Streit 900 BM/BQ, Topcon D7	Zeiss SL 120, SL 130	Zeiss 30SL/M, NIDEK SL-1800	"ОРИОН МЕДИК"
Адаптер к щелевой лампе	<i>Symphony 2</i>	<i>LaserLink Z-1000</i>	<i>PASCAL Synthesis™ Delivery System</i>	<i>LSL Trion / LSL Trion VITE</i>	<i>Slit Lamp Delivery (Nidek, Haag Streit)</i>	"Алком Медика"
Лазер						
Длины волн излучения, нм	532 или 810	532, 561 или 659	532 или 577	532, 561, 659 или 1064	532, 577, 647 или 1064	532 и/или 810
Выходная мощность / энергия излучения на длине волны, нм	1,5 Вт – 532, 3 Вт – 810	1,5 Вт – 532, 0,6 Вт – 561, 0,6 Вт – 659	2 Вт – 532, 2 Вт – 577	1,5 Вт – 532, 8 Вт – 561, 1,0 Вт – 659, 2,5 мДж – 1064	1,7 Вт – 532, 1,6 Вт – 577, 0,8 Вт – 647, 2,5 мДж – 1064	2 Вт – 532, 3 Вт – 810, 5 Вт – 532 + 810
Время экспозиции, с	–	0,01–3,0	0,01–1,0	0,01–3,0		0,05–0,7
Диаметр пятна облучения, мм	0,05–0,5(532) 0,12–1,0(810)	0,05–1,0	0,05–0,4	0,05–1,0		0,06–1,0
Режим "PASCAL"	нет		есть			

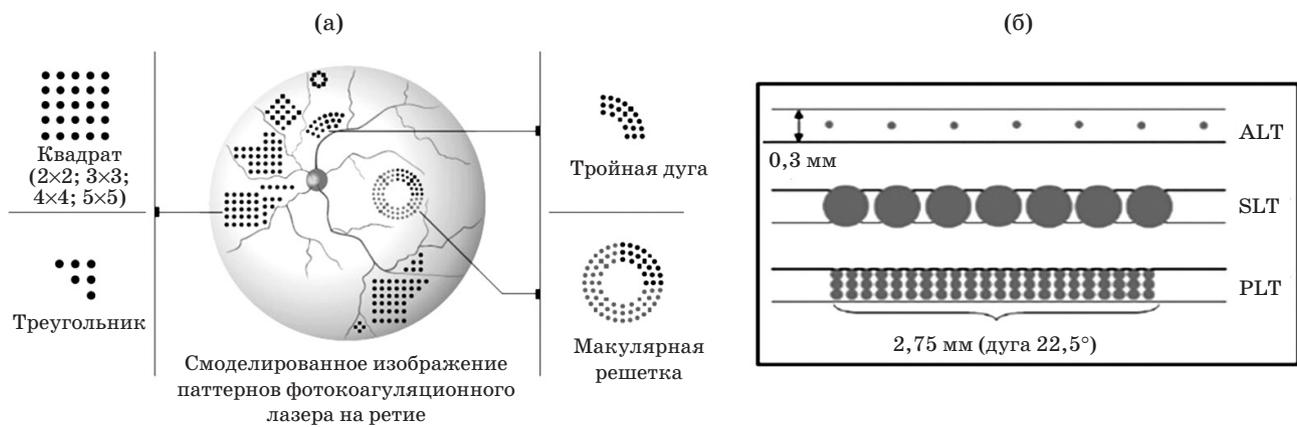


Рис. 2. Лазерные паттерны при лазерной коагуляции сетчатки (а). Относительные размеры лазерных пятен при ЛТП и их расположение на трабекулярной сети (б) при различных методах лазерной трабекулопластики – аргоновая (ALT), селективная (SLT) и паттерн (PLT) [4].

глаза, многоцветный ($\lambda = 532$ и 810 нм) фотокоагулятор позволяет специалистам оптимизировать длину волны, которая максимально поглощается целевым хромофором, и в то же время минимально поглощается другими хромофорами. В результате обеспечивается индивидуальное лазерное лечение с оптимальным клиническим результатом и минимальными побочными эффектами [5].

Кроме того, мультиволновый лазерный источник расширяет возможности хирурга, позволяя подбирать комфортные режимы лечения для пациентов, страдающих фотофобией.

В разработанном мультиволновом фотокоагуляторе (табл. 1), в отличие от фотокоагулятора *OcuLight Symphony*, использована технология автоматического позиционирования области коагуляции (PASCAL) [6]. За одно нажатие на педаль управления лазером возможно получение до 25 коагулятов с длительностью импульса излучения ≥ 50 мс, которые наносятся по заранее выбранной программе (рис. 2). Это позволяет сократить среднее время коагуляции до трех-четырех раз.

Технология PASCAL для лазерной коагуляции сетчатки и трабекулы впервые была использована в 2006 г. в офтальмокоагуляторе *Optimedica Corp.*, США. Паттерны могут иметь форму квадрата, треугольника, дуги или решетки (рис. 2а). Основной областью применения технологии PASCAL является выполнение массивных лазерных вмешательств на глазном дне, например, панретинальной лазерной коагуляции сетчатки (ПРЛКС) при ее диабетических поражениях или посттромботической ретинопатии [7].

Другой особенностью технологии PASCAL явилась работа с длительностью импульса, короче традиционно используемых в ПРЛКС (≥ 100 мс), что позволяет снизить нагрев пигментного эпителия сетчатки и сосудистой оболочки вследствие термодиффузии и, тем самым, уменьшить возможность повреждения внутренних слоев сетчатки [8]. PASCAL с короткой длительностью импульса ≤ 10 мс представляет интерес также в ЛТП (PLT), рис. 2б.

Мультиволновой лазерный офтальмологический комплекс кроме мультиволнового лазерного источника оснащен также целевой лампой и оптическим блоком – адаптером к лазерному блоку.

Оптический блок

Оптический блок состоит из формирующей и сканирующей систем.

Формирующая апохроматическая система предназначена для передачи лазерного излучения от выходной апертуры мультиволнового лазерного источника к внутриглазным средам. Плавная регулировка диаметров пятен рабочих лазеров в диапазоне от 0,06 мм до 1,0 мм и прицельного лазера в диапазоне от 0,085 мм до 1,0 мм осуществляется с помощью панкратической системы смены увеличений фотокоагуляционной приставки, соединенной гибким волоконным световодом с лазерным блоком (рис. 3). Формирующая система обеспечивает низкую плотность мощности на роговице и хрусталике для больших пятен облучения при короткой длительности импульса.

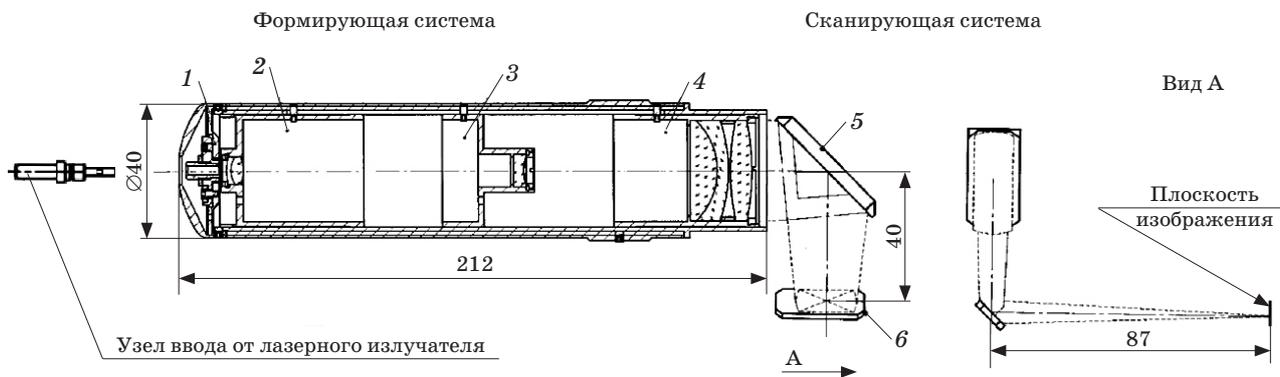


Рис. 3. Схема оптического блока лазерного излучателя. 1 – узел ввода, 2–4 – линзы апохроматической панкратической системы, 5 и 6 – поворотные зеркала (дихроичное зеркало 6 устанавливается за призмой осветителя щелевой лампы, см. рис. 4).

Сканирующая система предназначена для отклонения лазерного пучка при коагуляции по методу "PASCAL". Для быстрого сканирования луча лазера используются гальванометрические системы, представляющие собой вращательные двигатели с высокой разрешающей способностью по углу сканирования, на осях которых закреплены зеркала, которые отклоняют лазерный луч в двух направлениях, позиционируя его с точностью, необходимой для создания "паттернов".

Щелевая лампа

Щелевая лампа – офтальмологический прибор с высокой степенью разрешения, применяемый для визуального наблюдения при проведении обследования пациента. Стереомикроскоп щелевой лампы разработан по схеме Галилея, благодаря чему обеспечивается широкое поле зрения и удобство для окулиста при смене увеличений. Щелевая лампа имеет привычное для российских офтальмологов расположение осветителя – снизу под микроскопом. Прибор предназначен для стереоскопического наблюдения и исследования как переднего отрезка глазного яблока и хрусталика, так и сетчатки, и по своим параметрам соответствует стандарту ISO 10939:2007 (табл. 2).

В состав микроскопа щелевой лампы входят: объектив с фокусным расстоянием 125 мм, 3-х или 5-ти позиционная система смены увеличений микроскопа, прямая бинокулярная насадка с окулярами от +5 до –5 дптр. Видеокамера с разрешением 8 Мп дает возможность вывода изображения на экран персонального компьютера. Для работы с лазерным аппаратом

в стереомикроскопе щелевой лампы установлен модуль с защитными фильтрами, обеспечивающий врачу безопасные условия работы.

Элементом новизны является применение в осветителе щелевой лампы в качестве источника белого света суперлюминесцентного светодиода (LUMINUS, SBT-90-W65S-F71-LB101) с цветовой температурой 6000 К (до половины всей энергии приходится на видимое излучение) и спектральной областью излучения 400–700 нм (наибольший световой поток 2200 лм, средний срок горения – 60000 ч). Широко используемые в качестве источника белого света галогенные лампы имеют малый срок службы (горения) порядка 100–2000 ч при световом потоке 350–1350 лм и низкую цветовую температуру (3000–3200 К), что искажает воспроизведение цвета, добавляя в изображение желтые тона.

Другие параметры осветителя: диаметры диафрагмы, диапазон раскрытия щели, переключаемые светофильтры, диапазон поворота и наклона щели – соответствуют лучшим мировым аналогам.

Увеличенная до 24 мм стереобаза микроскопа, без уменьшения выходных зрачков, обеспечивает в сравнении с российскими аналогами (ЩЛ-2Б и SL-P-04, ЗОМЗ, стереобаза 22 мм) стереоскопическое изображение с большей объемностью. Кроме того, такая большая стереобаза при большом расстоянии изображения щели от входной грани призмы (96 мм) позволили ввести в теньевую зону каналов микроскопа поворотную призму осветительного блока AP-90 размером 15×8 мм и дихроичное 45°-зеркало для соосной с осветительной системой щелевой лампы доставки лазерного излучения (рис. 4).

Таблица 2. Щелевые лампы

Фирма	Zeiss		NIDEK	Takagi	Shin Nippon	ЗОМЗ		"Орион Медик"
Страна	Германия		Япония			Россия		
Название	SL 30-M	SL 130	SL-1600	SM 2N	SL 45	ЩЛ-2Б	SL-P-04	–
Год выпуска	1977	1996	–	–	–	1982	–	2013
Увеличение, крат	6, 10, 25, 40	6, 10, 16, 25, 40	6, 10, 16, 25, 40	10, 16, 25, 6	10, 16, 25	8–40	5,6, 9, 14, 22, 35	6, 10, 16, 25, 40
Поле зрения, мм	7–40	6–40	6,5, 10, 16, 25, 39	8,8, 14, 23.3	8, 13, 21,5	5–25	32, 19,6, 12,5, 8, 5	5–35
Окуляр; увеличение, крат	12,5	10, 12,5	16	16	12,5	–	12	10/16, 12,5/14
Стереобаза, мм	22	24	–	22	24	22	–	24
Объектив, фокусное расстояние, мм; увеличение, крат	125	110	130	98	0,75 [×] , 1,2 [×] , 1,85 [×]	–	0,4, 0,64, 1,0, 1,57, 2,5 [×]	125
Объектив, диаметр, мм	–	–	–	50	≈ 45 (в оправе 47)	–	–	40
Рабочий отрезок, мм	–	106	–	115	100	100	–	118
Расстояние от изображения щели до входной грани призмы, мм	–	66	–	65	75	–	–	96
Угол конвергенции, град	10	12,5	–	13	13,5	–	–	11
Ширина щели, мм	0–9	0–14	0–14	0–14	0–15	0,04–10	0,04–12	0–14
Длина щели, мм	0,3, 1, 3, 5, 7, 9	0,3, 2,5, 3,5, 7, 10,14	0,2, 1, 3, 5, 9, 14	(0,3) 1–14	0,2, 1, 3, 5, 8, 15	1, 3, 10	1, 3, 8, 12	0,2, 1, 3, 5, 8, 15
Разрешающая способность	90 л/мм	–	65 л/мм	9,4 (12,6) мкм	10 мкм	–	90 л/мм (9 [×] –35 [×])	≤ 10 мкм (25 [×] и 40 [×])

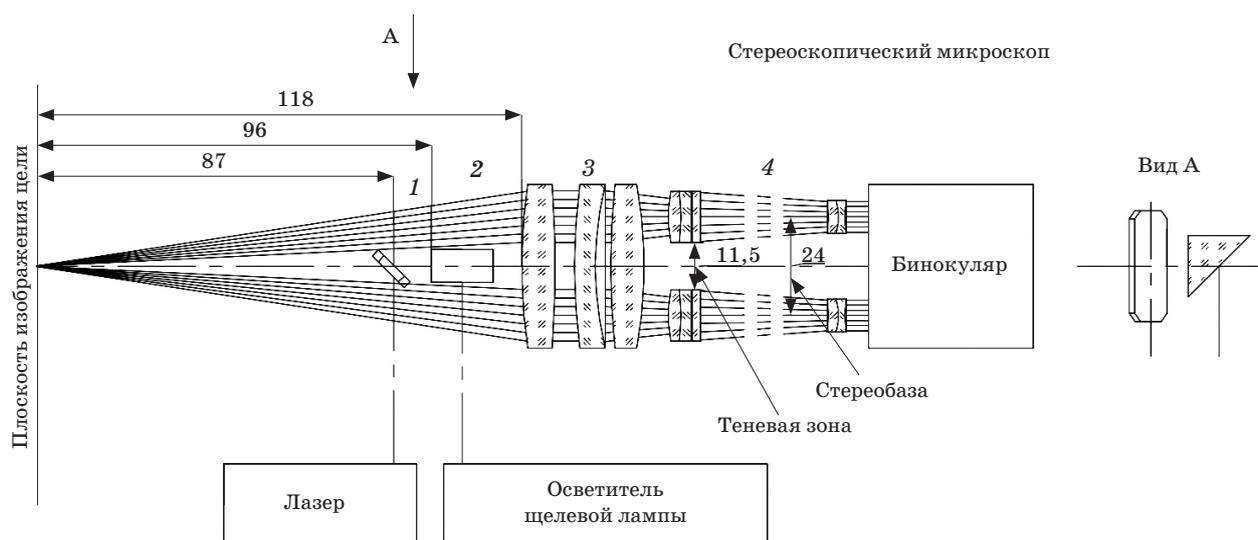


Рис. 4. Блок-схема узла сопряжения мультиволнового лазерного источника, стереоскопического микроскопа и осветителя щелевой лампы. 1 – дихроичное зеркало сканирующей системы, 2 – призма осветителя щелевой лампы, 3 – входной объектив, 4 – телескоп со сменным увеличением стереомикроскопа.

Дихроичное зеркало обеспечивает максимальное отражение лазерного излучения (532 ± 2 и 810 ± 2 нм) и излучения маркера (640–650 нм) и максимальное пропускание излучения осветителя щелевой лампы в диапазоне 400–700 нм с минимальным до 1–2% пропусканием в зонах, соответствующих отражению лазерного излучения.

Создание офтальмологического комплекса, обеспечивающего точное совмещение оптической оси мультиволнового лазерного излучателя и осветителя щелевой лампы, обеспечивает и необходимые характеристики лазерного пучка, используемого для лечения, и достаточную освещенность внутриглазных сред, необходимую для визуального контроля процесса лазеротерапии. Это исключает эффект "мертвых зон", когда в определенные области можно доставить только освещение или только лазерное излучение.

При этом обязательным условием в конструкции узла сопряжения щелевой лампы и лазерного излучателя фотокоагулятора является соблюдение принципа фокального освещения: плоскость изображения щели совмещена с передней фокальной плоскостью объектива стереоскопического микроскопа и задней фокальной плоскостью объектива формирующей системы оптического блока лазерного излучателя.

Перспективы мультиволновых лазерных офтальмокоагуляторов

В табл. 1 приведены параметры разработанного мультиволнового фотокоагулятора в сравнении с параметрами многоцветных фотокоагуляторов, выпускаемых мировыми производителями. Впервые в российском офтальмокоагуляторе осуществлено автоматическое позиционирование коагуляторов в операционной зоне сетчатки. Апробация комплекса показала, что заложенные технические решения и, в первую очередь, использование теневой зоны микроскопа для введения лазерного излучения обеспечили практически полную автономность лазерного блока от щелевой лампы. Это позволяет сравнительно легко, без переделки адаптера, увеличить как число лазерных излучателей в видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра, так и временной диапазон импульсов облучения, и, тем самым, реально вывести фотокоагулятор на мировой уровень.

Для расширения областей применения, повышения производительности и эффективности воздействия лазерного излучения мультиволнового фотокоагулятора планируется:

1. Снижение длительности лазерного импульса с 50 до 5–20 мс с соответствующим увеличением пиковой мощности излучения. При этом излучение с длительностью 5 мс оптимально при трабекулопластике, 10 мс для вмешательства в макулярной зоне и 20 мс для ПРЛКС и работы одиночным пятном.

Укорочение импульса позволит снизить влияние термодиффузии на избыточный нагрев наружных слоев сетчатки и сосудистой оболочки (длительность лазерного импульса больше времени терморелаксации слоя меланинсодержащего пигментного эпителия сетчатки, равного 0,05–0,1 мс, основной локализации поглощения лазерного излучения и, соответственно, температуры). Улучшение пространственной локализации зоны термовоздействия ведет как к меньшему повреждению слоя нервных волокон, так и к уменьшению отека хориоидеи из-за нагрева.

Диапазон длительностей 5–20 мс представляет оптимальный компромисс между временем облучения и пространственного удержания температуры, с одной стороны, и пиковой плотностью мощности излучения, т.е. обеспечения безопасности от разрыва ткани, с другой [6].

2. Удвоение количества лазерных воздействий в паттерне с 25 до 50–60 за счет снижения

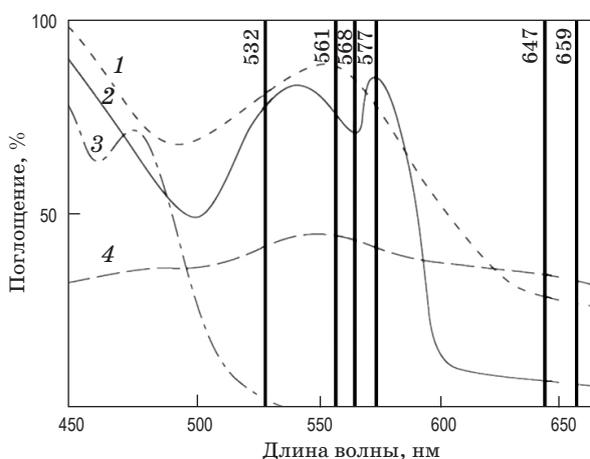


Рис. 5. Спектры поглощения основных хромофоров тканей глаза и длины волн лазерного излучения в видимой области спектра. 1 — дезоксигемоглобин, 2 — оксигемоглобин, 3 — ксантофилл, 4 — пигментный эпителий.

длительности импульсов в паттерне с 50 мс до ≤ 20 мс.

3. Оснащение лазерного блока дополнительно двумя непрерывными диодными лазерами с длинами волн 577 и 647 нм, а также импульсным Nd-лазером (1060 нм). Это позволит осуществлять лазерную терапию как переднего сегмента глаза (фотодеструкция ИК излучением), так и заднего сегмента (мультиволновая фотокоагуляция) [9].

Излучение, соответствующее $\lambda = 577$, в отличие от излучения на $\lambda = 532$ нм, практически не поглощается ксантофильным пигментом и, в то же время, лучше поглощается оксигемоглобином по сравнению с излучением на $\lambda = 561$ или 568 нм (рис. 5), что повышает эффективность ПРЛКС, благодаря возможности более близкого расположения зоны облучения к макуле.

Излучение, соответствующее $\lambda = 647$ нм, много лет тестированное Kr-лазером, хотя и имеет меньшую глубину проникновения, чем излучение на 810 нм, успешно используется для коагуляции глубокой хориоидальной патологии, благодаря существенно большему поглощению эндотелиальных клеток, выстилающих стенки кровеносных сосудов.

Излучение с $\lambda = 1064$ нм выполняет капсулотомию при крайне низкой энергии ($\leq 1,5$ мДж), гарантируя надежность и максимальный комфорт пациенту.

Заключение

Разработанный мультиволновый паттерн-сканирующий лазерный офтальмокоагулятор, работающий на двух длинах волн 532 и 810 нм, со щелевой лампой с высоким разрешением, позволит эффективно проводить обследование и лечение пациентов и, при необходимости, проводить операции как по стандартной и паттерновой ЛКС и ЛТП зеленым лазером, так и по транспупиллярной термотерапии внутриглазных новообразований, транссклеральной фотокоагуляции сетчатки и цилиарного тела ИК лазером. На основании сравнительного анализа мультиволновых фотокоагуляторов обсуждаются перспективы создания офтальмологического лазерного прибора, который позволит осуществлять лазерную терапию как переднего сегмента, так и заднего сегмента глаза для широкой области патологий.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Karany N.S., Peppers N.A., Zweng H.C., Flocks M. Retinal photocoagulation by lasers // Nature. V. 199. 1963 (July). P. 146–149.
2. Тверской Ю.Л., Балашевич Л.И., Березин Ю.Д., Бейлин Е.Н., Волков В.В., Горбунов Б.В., Лапшин Л.А., Либман Е.С., Линник Л.А., Орлов Г.Н., Овчинников Б.В., Семенов А.Д., Соколов В.М., Федоров С.Н. Многоцелевой лазерный офтальмологический комплекс "Лиман-2" // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. "Оптика лазеров". Л., 1984. С. 357.
3. Marketplace. IRIDEX OFFERINGS // Ophthalmology Management. Issue: December 2002.
4. Астахов Ю.С., Астахов С.Ю., Акопов Е.Л., Фролов С.В., Бабенков Е.Е., Смирнова М.А. Офтальмологический лазерный комплекс // Патент РФ № 127624. 2011.
5. Астахов Ю.С., Акопов Е.Л., Иванов А.А., Смирнова М.А., Пантелеев Л.Н., Неворотин А.И. Разработка и экспериментальное испытание двухволновой лазерной установки для фотокоагуляции тканей глаза // Офтальмологические ведомости. 2013. Т. VI. № 2. С. 62–67.
6. Blumenkrantz M.S., Yellachich D., Andersen D.E., Wiltberger M.W., Mordaunt D., Marcellino G.R., Palanker D. Semiautomated patterned scanning laser for retinal photocoagulation // Retina. 2006. № 3. P. 370–376.
7. Шадричев Ф.Е., Краснощекова Е.Е. PASCAL – паттерн-сканирующая лазерная установка // Офтальмологические ведомости. 2010. № 3(2). С. 48–52.
8. Jain A., Blumenkrantz M.S., Paulus Y., Wiltberger M.W., Andersen D.E., Huie P., Palanker D. Effect of pulse duration on size and character of the lesion in retinal photocoagulation // Arch. Ophthalmol. 2008. V. 126. № 1. P. 78–85.
9. Lee R., Murata T., Hirano T. MC-500 Vixi. Multicolor laser photocoagulator. Case report // Eye & Health Care. NIDEK Co., LTD. 2011. P. 1–25.