



Лазерные медицинские системы для лечения и диагностики

А.Симонова

В 1996 году на мировом рынке было продано 10,6 тыс. лазеров для медицины на сумму 283 млн. долл. Ожидалось, что в 1997 году эти показатели возрастут до 11,7 тыс. шт. и 306,2 млн. долл. Правильность прогноза подтверждают быстрые темпы внедрения в медицинскую практику систем на основе твердотельных лазеров. Они находят все более широкое применение в офтальмологии, косметической хирургии, стоматологии. Новые горизонты перед медиками открывают различные диагностические системы с использованием мощных лазеров. Усилия создателей такого оборудования направлены на решение самых актуальных проблем, связанных со здоровьем человека. Каковы же последние мировые достижения в области лазерных медицинских систем?

Благодаря малым габаритам и высокой надежности наибольшее распространение в медицинской аппаратуре получают твердотельные лазеры. В первую очередь это Er:YAG-устройства, излучающие в ИК-области на длине волны 2,94 мкм, соответствующей пику поглощения в спектре воды. В дерматологии, стоматологии и офтальмологии они постепенно вытесняют “традиционные” типы лазеров. Так, в последнее время Er:YAG-лазеры заменяют CO₂-устройства, до сих пор успешно применявшиеся в операциях по реконструкции кожи. Замена газового лазера твердотельным позволяет сократить участок кожи, на который воздействует излучение, и снизить вероятность возникновения эритем. Кроме того, при использовании Er:YAG-лазера применяется более слабая анестезия и сокращается период послеоперационного восстановления.

Расширению применения Er:YAG-лазеров в косметологии и дерматологии способствует постоянное улучшение их характеристик. За последние несколько лет в три раза увеличена частота следования импульсов (30 против 10 Гц), что существенно повысило качество резки тканей. Изучается возможность увеличения эффективности и уменьшения габаритов систем за счет замены Er:YAG-лазеров Er,Cr:YAG-устройствами.

Разработкой оборудования для пластических операций на базе Er:YAG-лазеров занимается целый ряд фирм, в том числе Schwartz Electro-Optics, Premier Systems, SC Medical Systems, Cell Robotics (США), Fotona (Словения). Фирма Schwartz Electro-Optics первой получила разреше-

ние Управления по санитарному надзору США на использование Er:YAG-лазеров мощностью 5 Вт (энергия в импульсе — 5 Дж, частота следования импульсов — 5 Гц) для проведения пластических операций. Фирма Premier Systems недавно завершила клинические испытания Er:YAG-лазеров собственного производства в системах дерматологии для тех же целей.

В числе последних достижений в области лазерного оборудования для косметологии — универсальные системы, работающие на нескольких длинах волн. Они весьма перспективны для устранения дефектов кожи различной окраски, в частности пигментных пятен и татуировки путем возбуждения излучения на соответствующей длине волны. Подобную систему на базе четырех лазеров с модуляцией добротности в конце 1996 года выпустила на рынок фирма Coherent. Система включает Nd:YAG-устройство с длиной волны 1,06 мкм, устройство на александрите с длиной волны 0,755 мкм и два Nd:YAG-устройства с удвоением частоты и длиной волны 0,532 мкм. Один из двух последних лазеров применяется для удаления пигментных пятен и татуировок, другой (с изменяемой длительностью импульса) — для лечения поврежденных сосудов (германгиом, шрамов).

Все чаще обращаются к Er:YAG-лазерам и в стоматологии, поскольку они обеспечивают стерильность и сохранность структуры зуба при лечении, а также исключают необходимость анестезии, сверления и возможность повреждения полости рта. Особенно интенсивно в этом направлении работают европейские и япон-

ские фирмы. Так, фирма Fotona уже несколько лет продает на европейском рынке лазерную стоматологическую систему, работающую на двух длинах волн (с использованием Er:YAG- и Nd:YAG-лазеров). Основной поставщик лазерных стоматологических систем в Японии — Continium Biomedical. Несколько систем этого типа сейчас проходят испытания в США. В начале 1996 года ученые Калифорнийского университета продемонстрировали возможности Er:YAG- и Er:YSGG-лазеров при лечении кариеса в начальной стадии. В отличие от пучка CO₂-лазера, их излучение без нагрева ткани зуба удаляет пораженную кариесом часть зуба, не затрагивая эмали соседних зубов, а также существенно замедляет процесс кислотного разложения эмали. Аналогичные клинические исследования Er:YAG-лазера с частотой повторения импульсов 30 Гц на 1200 пациентах провела фирма Premier.

Для более широкого применения Er:YAG-лазеров в медицинской аппаратуре необходимо дешевое, прочное, малотоксичное оптоволокно, с помощью которого излучение лазера передается к обрабатываемому участку. Над созданием такого волокна зарубежные фирмы работают с 1994 года. Значительных успехов добились фирмы Infrared Fiber Systems и Saphikon. Первая недавно получила волокно, не содержащее фтористых соединений, на второй создано сапфировое волокно. И то и другое волокно прочнее и дешевле широко используемого волокна на фториде циркония. ИК-оптоволокно, устойчивое к агрессивной химической среде, начала выпускать фирма Future Light.

Одна из самых перспективных областей применения лазерной техники в офтальмологии — витреоретинальная хирургия, которая предполагает оперативное вмешательство в непосредственной близости от сетчатки глаза. Возможности применения для этих целей Er:YAG-лазеров исследуются в Станфордском университете, а также в различных лечебных учреждениях, в том числе клинике штата Массачусетс, в Мексике, Греции и Великобритании. Для витреоретинальных операций разработан Er:YAG-лазер с частотой повторения импульсов 200 Гц и низкой энергией в импульсе (0,6—3,0 мДж), который обеспечивает точное воздействие на ткань без повреждения соседних участков.

Для коррекции различных дефектов зрения (близорукости, астигматизма, дальнозоркости) широко используется метод фоторефрактивной кератектомии — разрушение поврежденных участков сетчатки воздействием на них фиксированного высоко- или низкоэнергетического сканирующего пучка эксимерного лазера. К концу 1996 года в мире использовалось около 1500 таких систем, в том числе 350 — в США. В Европе (в основном в Германии) и странах АТР активно ведутся работы по созданию систем на базе Er:YAG-лазеров, сравнимых по воздействию на сетчатку с эксимерными устройствами, но более дешевых, компактных и не содержащих токсичных газов.

Твердотельные лазеры, не приводящие к образованию рубцов на ткани глаза, начинают вытеснять аргонные при лечении глаукомы. В клинике штата Массачусетс разработан новый метод лечения этого недуга, основанный на применении Nd:YAG-лазера с удвоением частоты и длиной волны 532 нм. Метод, известный как селективная трабекулопластика, использует селективное поглощение лазерного излучения на этой длине волны частицами меланина, которые присутствуют в клетках трабекулярной сетки — ткани, ответственной за регулирование и фильтрацию потока глазной жидкости, и блокируют этот поток. В результате поражения пигментированных клеток лазерным излучением поток глазной жидкости улучшается, снижая глазное давление. В отличие от пучка традиционно применявшегося для этих целей синего-зеленого аргонного лазера воздействие Nd:YAG-лазером не вызывает

коагуляции ткани и появления рубцов, что позволяет при необходимости провести повторное лечение. При клинических испытаниях метода использовался Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности, излучающий импульсы длительностью 3 нс в пучке диаметром 250—400 мкм. При этом 180-градусная дуга трабекулярной сетки облучалась примерно 50 импульсами. В результате глазное давление снижалось на 27—30%. Сейчас новая методика проходит расширенные клинические испытания в клинике штата Массачусетс, Глазном институте Крезджа в Дейтроте и Университете штата Аризона, а также контрольные испытания в Европе.

Однако и в офтальмологии конкуренцию не только аргонным, но и Nd:YAG-лазерам могут составить Er:YAG-устройства. Проблемами их использования для лечения глазных болезней, в частности для вскрытия влажной глаукомы перед удалением катаракты или проведением некоторых косметических процедур, серьезно занимается фирма Premier, уже выпускающая системы на базе Er:YAG-лазеров для внутриглазных операций. Ведущим изготовителем систем на базе Er:YAG-устройств для офтальмологии является фирма Coherent Medical, где активно исследуется возможность их применения для разрезания стекловидного тела, субретинальной хирургии.

Одно из наиболее распространенных заболеваний, приводящих к потере зрения, — катаракта. Ежегодно в мире регистрируется 50 млн. человек с таким диагнозом. Только в США по поводу катаракты каждый год оперируют 1,4 млн. человек. Оперативное удаление хрусталика глаза пока остается единственным методом ее лечения. Сегодня усилия разработчиков медицинского оборудования сосредоточены на выявлении ранних симптомов катаракты, что позволило бы проводить своевременную профилактику заболевания. Перспективное устройство такого типа, в частности, предложено специалистами Исследовательского центра Левиса НАСА. Учитывая, что человеческий глаз на 35% состоит из протеина, разработчики взяли за основу созданный в ходе выполнения космической программы зонд для изучения роста кристаллов протеина в космосе. Устройство обнаруживает небольшие скопления частиц протеина в хрусталике

глаза, свидетельствующие о начальной стадии катаракты или предрасположенности к ней. Действие устройства основано на квазиупругом (или динамическом) рассеянии света, обычно используемом для исследования дисперсии частиц, которое, как правило, проводится в жидкой среде. Хаотически движущиеся частицы рассеивают лазерное излучение, вызывая его доплеровский сдвиг. Интенсивность рассеивания со временем изменяется. На основе этих флуктуаций строится временная функция автокорреляции, из которой определяют коэффициент диффузии частиц. Затем на основе полученных данных для определенных значений вязкости, показателя преломления жидкости — «хозяина» и температуры эксперимента рассчитывают размер частиц и их распределение.

Оборудование для таких исследований пока достаточно громоздко и занимает большую площадь. Используя достижения оптоэлектроники в области миниатюризации лазерных и фотодиодов, специалисты Центра сконструировали одноименный волоконно-оптический детектор частиц или скоплений кристаллитов протеина в хрусталике. В детекторе применяется лазер, излучающий на длине волны 670 нм. Мощность излучения составляет 50 мВт, что гарантирует безвредность воздействия лазерного пучка на глаз. Волоконно-оптическая линза детектора диаметром менее 1 см собирает рассеиваемый хрусталиком свет, который по оптоволокну длиной менее 1,3 см передается на фотодиод. Сигнал последнего поступает на персональный компьютер, который рассчитывает размер частиц. Каждое измерение длится 5—10 секунд. Детектор обнаруживает частицы размером от 1 нм до нескольких микрон. В прибор также встроен миниатюрный микроскоп, позволяющий видеть макрочастицы. Таким образом с помощью детектора можно получить трехмерную «катарктограмму» хрусталика. Сейчас НАСА совместно с Национальным институтом здравоохранения США и Национальным глазным институтом исследуют возможности применения детектора для лечения других глазных болезней, в том числе вызванных диабетом.

Широкое распространение в офтальмологии получили ионные лазеры, которые применяются в фотокоагуляционных системах уже более де-

сяти лет. По габаритам эти системы сравнимы с осциллографами сороковых годов и весят от 27 до 45 кг. Поэтому разработчики видят свою главную задачу в создании более надежных, компактных и экономных твердотельных устройств с полупроводниковой накачкой и удвоением частоты. Например, система фотокоагуляции фирмы Iris Medical Instruments, поставки которой были разрешены Управлением по санитарному надзору США в августе 1996 года, весит всего 7 кг и работает от сети. Кроме того, созданы твердотельные лазеры с полупроводниковым источником возбуждения и удвоением частоты, обеспечивающие непрерывное зеленое излучение мощностью в несколько ватт и работающие от источника переменного тока на напряжении 110 В. В итоге в 1997 году объем продаж твердотельных устройств для систем фотокоагуляции должен увеличиться с 1,6 млн. до 3 млн. долларов.

Появление портативных фотокоагуляторов коренным образом изменит методику лечения новорожденных, получивших расстройство зрения вследствие преждевременных родов. Их можно будет лечить сразу же после родов, не перевозя в специальное медицинское учреждение. Лазерные фотокоагуляторы очень перспективны и при лечении ретинопатии, вызванной диабетом. В этом случае лазерное излучение интенсивно разрушает периферийные участки сетчатки глаза. Спрос на такие устройства весьма высок: только в США зарегистрировано 14 млн. больных диабетом.

При создании твердотельных лазеров для фотокоагуляторов приходится решать так называемую “зеленую проблему”, заключающуюся в существенных флуктуациях интенсивности выходного излучения лазера вследствие взаимодействия продольных мод при внутрирезонаторном удвоении частоты. Одно из решений этой проблемы, предложенное фирмой Spectra-Physics Lasers, предусматривает применение лазерного резонатора длиной до 1 м. В таком устройстве число продольных мод возрастает до 100, что значительно уменьшает коэффициент шума взаимодействия мод. Мощность твердотельного лазера фирмы с таким резонатором составляет 5 Вт, а габариты сопоставимы с ионным лазером.

Другой метод стабилизации излучения твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой и внутрирезона-

торным удвоением частоты, напротив, предполагает уменьшение длины резонатора до 1 мм. Это приводит к генерации одной продольной моды. Мощность излучения такого микролазера при воздушном охлаждении равна 2 Вт на длине волны 0,532 мкм.

В последнее время внимание разработчиков медицинской аппаратуры привлекают Ho:YAG-лазеры, излучающие на длине волны 2,1 мкм. Главное их достоинство — высокая эффективность в самых разных областях медицины: ортопедии, урологии, гинекологии, отоларингологии, общей хирургии. Лазеры этого типа успешно применяются для коагуляции капсульной ткани плечевого сустава, расщечения шейки мочевого пузыря, клиренса различных органов и абляции новообразований мочеполовой системы. Системы на базе Ho:YAG-лазеров выпускает совместное предприятие фирм Coherent, Eclihse Surgical Technologies и Trimedyne.

Все больший интерес изготовителей как хирургического, так и диагностического оборудования вызывают мощные твердотельные лазеры, позволяющие получить на выходе специального оптоволокна диаметром 200—600 мкм относительно высокую мощность. При этом цена их достаточно низкая. На рынок уже выпущены установки на базе таких твердотельных лазеров для лечения урологических заболеваний. Недавно фирма Premier Lasers объявила о создании стоматологической установки для хирургических операций на мягких тканях. Специалисты Принстонского и Дьюкского университетов показали, что магнитный резонанс, возникающий при спиновой поляризации атомов газа под воздействием мощного лазерного излучения, может быть использован для формирования изображения легочных и других тканей. Для поляризации газа (гелия или ксенона) они использовали излучение полупроводниковой лазерной решетки мощностью 120 Вт.

Весьма перспективны системы на базе твердотельных лазеров для контроля содержания кислорода в головном мозге. Это особенно важно при оперативном лечении младенцев на первом году жизни. Только в США ежегодно 14 тыс. новорожденных нуждаются в операциях на сердце. В процессе таких операций естественный ток крови прерывают на срок до одного часа, что может привести к серьез-

ным травмам головного мозга. Надежный контроль содержания кислорода в клетках мозга сократит риск травмы младенца и позволит при необходимости увеличить время операции.

Существующие системы слишком громоздки, радиоактивны и не обеспечивают непрерывный контроль в реальном времени. Поэтому большой интерес представляют работы Бостонского детского госпиталя, направленные на устранение этих недостатков за счет применения спектрометра на основе полупроводникового лазера ближнего ИК-диапазона для непосредственного контроля содержания кислорода в клетках мозга. В предложенной системе использован спектрометр NIRO 500 фирмы Hamamatsu и четыре импульсных полупроводниковых лазера с длинами волн 0,775; 0,825; 0,85 и 0,905 мкм, на которых коэффициент поглощения излучения живыми тканями намного ниже, чем в видимом диапазоне. Частота повторения импульсов — 1,9 кГц, длительность — 100 нс, средняя мощность каждого лазера — 2 мВт, общая мощность излучения, падающего на голову пациента, — примерно 3 мВт. Отраженное тканью излучение собирается линзой на выходном конце приемного волокна и передается на фотумножитель. Количество отраженных фотонов соответствует концентрации кислорода в клетках мозга. Компактные системы на базе полупроводниковых лазеров смогут найти применение и для контроля содержания кислорода в мозге ребенка в процессе родов, а также у недоношенных детей с гидроцефалией. К сожалению, данный метод не применим к пациентам более старшего возраста из-за наличия у них жидкой мембраны, окружающей мозг и препятствующей попаданию излучения на мозговую ткань. Поэтому сейчас усилия специалистов направлены на повышение пространственного разрешения метода. Такие работы ведутся в Вашингтонском и Питсбургском университетах.

Лазеры ИК-диапазона весьма перспективны для систем оптической компьютерной томографии при выявлении злокачественных опухолей молочной железы. Главное достоинство таких систем — неионизирующая природа излучения в ИК-диапазоне. Сейчас при проведении подобных обследований используется рентгеновское излучение. Ведущий изготовитель систем оптической компьютерной

томографии — фирма Imaging Diagnostic Systems. Разработанная фирмой в 1989 году первая система этого типа содержала полупроводниковый лазер мощностью 100 мВт и твердотельный детектор излучения. Практическому внедрению системы препятствовало достаточно длительное формирование изображения (1 мин/слой) и малое разрешение (около 1 см) вследствие того, что лазер не мог работать в режиме синхронизации мод. В аппаратуре следующего поколения источником излучения служил лазер на сапфире с титаном с накачкой аргоновым лазером фирмы Coherent Laser, а приемник был выполнен на основе 600 лавинных фотодиодов фирмы Texas Optoelectronics. Однако из-за невысокого отношения сигнал/шум качество изображения оказалось низким. В системе третьего поколения, появившейся в январе 1996 года, в качестве источника накачки лазера на сапфире с титаном использовано устройство на стекле с неодимом с полупроводниковой накачкой фирмы Spectra-Physics Lasers. Замена газового источника возбуждения твердотельным улучшила шумовые и пространственные характеристики лазерного излучения, а также позволила отказаться от источника трехфазового тока и громоздкой системы водяного охлаждения. Для улучшения качества изображения лавинные диоды заменены фо-

тодиодами с большой активной площадью фирмы Centronic.

Для получения томограммы расположенные по разные стороны исследуемого объекта выходные отверстие оптоволона, передающего лазерное излучение, и приемная матрица в виде дуги окружности вращаются по окружности на 360 град. Время считывания сигнала каждого фотодиода — от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд. При толщине исследуемого слоя 5 мм и сканировании до 20 слоев на одну молочную железу время обследования составляет семь часов. Поэтому сейчас основное внимание разработчиков уделяется увеличению быстродействия системы. Тем не менее Управление по санитарному надзору США уже в 1996 году санкционировало испытания установки в клинических условиях. Разрешение на ее поставки фирма рассчитывала получить в 1997 году.

При поддержке Управления научных разработок и научной медицинской технологии ВВС США ученые Городского колледжа и Высшей школы Нью-Йоркского городского университета изучают возможность использования лазерного излучения для ранней диагностики рака. С этой целью изучается генерация сигналов второй и третьей гармоник при отражении лазерного излучения исследуемой тканью. Экспериментальная уста-

новка состоит из спектрометра, присоединенного к фотоумножителю, и синхронного усилителя. Полосовой фильтр длинноволнового излучения на входе фокусирующей линзы уменьшает вклад гармоник от линейной оптики, а фильтр коротковолнового излучения на входе спектрометра исключает рассеяние основного пучка. В проводимых экспериментах (пока на тканях кожи, мускулов и жира цыпленка) использовались импульсы лазера на сапфире с титаном длительностью 120 фс при частоте повторения 78 МГц. Длина волны излучения — 810 нм, средняя выходная мощность — 1,4 Вт, эффективность преобразования — 10^{-7} — 10^{-10} . Лазерный пучок фокусировался на образце ткани под углом 45° . Испытания проводились и с импульсами длительностью 30 пс на длине волны 1064 нм. Было установлено, что для каждого вида ткани характерна своя интенсивность отраженных сигналов второй и третьей гармоник, а глубина проникновения излучения красного диапазона больше, чем ультрафиолетового.

Laser Focus World, 1996, vol.32, N1, p. 50—69; N2, p.38, 39, 47; N4, p.43; v.33, N5, p. 66, 67; N6, p. 143—152; N8, p. 73—82; 1997, v.33, N1, p.84—107; N2, p.72—92; N5, p.38, 40; N9, p. 32—36; N10, p. 113—118
Photonics Spectra, 1996, vol.30, N1, p.16, 96, 98; N6, p.116—120; N7, p.50

Проект создания космической системы мониторинга природной среды

ГКНПЦ им. Хруничева, французская фирма Matra Marconi Space и немецкая Daza подписали в Брюсселе соглашение о сотрудничестве в создании космической системы мониторинга природной среды в режиме реального времени. Одним из главных инициаторов подписания соглашения, отвечающего прежде всего интересам Европы и России, стал Международный институт прикладных технологий.

Цель сотрудничества — создание системы массового обслуживания потребителей, входящей в общегосударственные службы контроля окружающей среды. Она будет состоять из наземных и космических средств. В последние могут входить как группировки малых спутников, так и космические аппараты тяжелого класса типа высокоширотной космической станции. Последнее особенно актуально для России, поскольку со строящейся сейчас международной станции "Альфа" обзор территории страны составляет всего 6%, тогда как станция с наклоном орбиты в 72 град. позволит обозреть 94% территории. Проект обещает принести немалые выгоды его участникам. Данные дистанционного зондирования Земли используют сегодня более 50 стран, а емкость этого рынка уже сейчас оценивается в 2 млрд. долл. в год.

Финансовые известия, 16 декабря 1997 г.

Дайджест

"Гигантский шаг на пути создания накопителя объемом 100 Гбайт" — так охарактеризовал один из руководителей фирмы Hewlett-Packard В. Исхак продемонстрированный компанией лазер, излучающий в голубой части спектра. Импульсная мощность лазера на длине волны 413 нм при комнатной температуре превышает 80 мВт, квантовая эффективность равна 8%. Прибор выполнен на нитриде галлия, выращенном на сапфировой подложке. Значительных успехов добилась и японская компания Nichia Chemical Industries, срок службы голубых лазеров которой достигает 10 тыс. часов. Это открывает возможности их применения в коммерческой аппаратуре (до сих пор голубые лазеры излучали в течение очень непродолжительного периода). Работы по созданию голубых лазеров ведутся на фирмах Cree Research, Sony и Хегох, а также в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре.

Благодаря малой длине волны излучения голубых лазеров объем хранимых данных при записи информации можно увеличить в 10 раз по сравнению с современными лазерными системами. К тому же, пучок лазерного излучения на такой длине волны можно сфокусировать до чрезвычайно малого диаметра и в результате получить линейную плотность записи около 80 точек на 1 мм. Объем хранимой информации современных оптических дисков при использовании лазеров красного излучения составляет 8 Гбайт. Применение сине-зеленого устройства позволит увеличить объем хранимых данных до 12 Гбайт, а голубого прибора — до 18 Гбайт. Оптические системы памяти — не единственная перспективная область применения голубых лазеров. Они смогут широко использоваться в компьютерных дисплеях, промышленных преобразователях, системах скрытой связи, а также для записи и считывания данных видеодисков. По прогнозам, первые изделия на базе голубых лазеров появятся к 2000 году, а объем их продаж в следующем десятилетии достигнет 2 млрд. долларов.

Electronic News, 1997, Dec.22;<http://sumnet.com/enews/front/122297f4.html>

Голубой лазер "поднимает" современный предел объема памяти

Дайджест