

НА ОБЩЕМ СОБРАНИИ СО РАН

Волоконные лазеры: достижения и перспективы

Известно, что первый волоконный лазер был продемонстрирован Элиасом Снитцером ещё в 1961 году, т.е. всего через год после запуска Теодором Мейманом первого рубинового лазера. Уже тогда были очевидны преимущества волоконного активного элемента лазера в сравнении с объёмным лазерным кристаллом: за счёт большой удельной площади поверхности волоконного световода достигается эффективный теплоотвод, а его волноводные свойства обеспечивают высокое качество выходного пучка, нечувствительного к нагреву активного элемента. Однако уровень технологий того времени (низкое качество световодов, сложность схем накачки и необходимость сопряжения активных световодов с объёмной оптикой резонатора) отодвинули на десятки лет развитие и внедрение этого типа лазеров в практику.

Прогресс в развитии волоконных лазеров стал возможен во многом благодаря появлению волоконно-оптической связи и телекоммуникационных технологий. В первую очередь, это создание в конце 60-х годов прошлого столетия световодов на основе кварцевого стекла с низкими потерями, что было достигнуто за счёт уменьшения концентрации примесей — за это (а точнее за «новаторские достижения в области передачи света по волокнам для оптической связи») Чарльзу Као была присуждена Нобелевская премия по физике 2009 года. Практическое внедрение волоконно-оптических линий связи, которое было особенно бурным в 90-х годах после появления Интернета, привело к созданию принципиально новой элементной базы волоконной оптики: эффективных полупроводниковых лазеров с выводом излучения в оптическое волокно, волоконных брэгговских решёток, волоконных разветвителей и объединителей и др. элементов, на основе которых стало возможным создание эффективных лазеров в полностью волоконном исполнении.

Несколько слов об устройстве однододового волоконного световода. Свет распространяется по легированной сердцевине световода диаметром около 10 микрон, имеющей повышенный показатель преломления. Диаметр внешней стеклянной оболочки составляет ~ 100 микрон, в свою очередь, она покрывается пластиком. В таком волноводе свет распространяется практически без потерь — потери определяются рэлеевским рассеянием и уменьшаются с ростом длины волны: минимум потерь (~ 0,2 дБ/км) достигается в области ~ 1,5 мкм. Другим важным свойством волоконных световодов является фоточувствительность: если облучать сердцевину волокна УФ излучением, можно локально изменить показатель преломления. Периодические изменения интенсивности (например, в области интерференции УФ пучков) позволяют сформировать в сердцевине периодическую структуру показателя преломления — т.н. волоконную брэгговскую решётку (ВБР), коэффициент отражения которой может достигать 99%. Такие решётки можно использовать в качестве внутриволоконных лазерных зеркал, при этом они выдерживают большую мощность и «живут» много лет.

Простейший вариант лазера представляет собой отрезок активного волоконного световода с сердцевинной, легированной ионами редкоземельных элементов (иттербия, эрбия и др.), на концах которого сформированы брэгговские решётки. Излучение лазерного диода накачки заводится через волоконный ответвитель и переводит активные ионы в возбуждённое состояние, создавая таким образом усиливающую среду, а волоконные брэгговские решётки, отражающие свет на резонансной частоте, формируют резонатор лазера непосредственно в волноводном световоде. Реализация полностью волоконной схемы привела к революции в лазерной технике — такой лазер не требует юстировки зеркал, обладает высокой эффективностью и стабильностью генерации при высоком качестве пучка.

Квинтэссенцией развития волоконных лазеров стали мощные промышленные лазеры, разработанные в 1990—2000-х годах В.П. Гапонцевым с сотрудниками НТО «ИРЭ-Полус» — российской фирмы, превратившейся в международную корпорацию IPG Photonics, самую большую и быстрорастущую лазерную компанию в мире. Собственные технологии изготовления многододовых лазерных диодов (мощностью до ~100 Вт), суммирования излучения большого количества диодов с помощью волоконных объединителей с последующей мощной накачкой в оболочку активных волокон с увеличенным диаметром сердцевины, суммирования выходных пучков нескольких активных волокон со специальной выходной коллимирующей оп-

тикой, выдерживающей большие световые нагрузки, привели к созданию линейки коммерчески доступных иттербиевых волоконных лазеров мощностью до 2 кВт в одномодовом режиме и до 50 кВт в многомодовом режиме, которые широко используются для резки, сварки и обработки материалов в автомобильной, самолётной и судостроительной и для ряда других промышленных применений. В импульсных волоконных лазерах с фотонно-кристаллическими широкоапертурными активными волокнами уже практически достигнут порог самофокусировки по мощности (~ 1 МВт), а при применении техники усиления «чирпованных» (т.е. растяннутых по спектру и по времени) импульсов их энергия достигает уровня 1 мДж при длительности в сотни фемтосекунд после сжатия. Безусловным лидером в этом направлении является группа А. Тюннерманна из Германии. Мощные фемтосекундные импульсы уже используются в новых технологиях микрообработки и фотомодификации, в первую очередь, прозрачных нефоточувствительных материалов.

Другое важное достижение связано с разработкой волоконных лазеров, работающих на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) — нелинейном эффекте, который становится сильным в протяжённых волоконных световодах за счёт концентрации интенсивного излучения на большой длине. В волоконных ВКР-лазерах реализуется большой диапазон перестройки частоты стоковой волны: существующие ВКР-лазеры на основе германо- и фосфоросиликатных волокон с накачкой волоконными же лазерами (Yb, Er) позволяют получать генерацию практически на любой длине волны ближнего ИК-диапазона: от 1 до 1,7 мкм. Пионерские работы в этом направлении были сделаны Е.М. Диановым с сотрудниками Научного центра волоконной оптики. В последние годы ими же были продемонстрированы большие возможности по перестройке частоты в лазерах на основе активных волокон, легированных висмутом.

В Сибирском отделении работы в области волоконных лазеров начались в начале нового тысячелетия, и за относительно небольшое время появились результаты, заметные не только у нас, но и во всем мире. Я остановлюсь в основном на работах, проводимых в Институте автоматики и электрометрии как самостоятельно, так и в сотрудничестве с другими институтами. Институт имеет давние «лазерные традиции»: в нём долгое время работали два соавтора первого сибирского лазера (Г.В. Кривошеков и Ю.В. Троицкий), запущенного в ИРЭ СО РАН в 1962 году. Позднее С.Г. Раутианом и А.М. Шалагиным здесь была создана школа по лазерной спектроскопии.

Наиболее яркие достижения касаются изучения двух предельных случаев: очень коротких и очень длинных волоконных лазеров. Если в активном волокне длиной всего несколько сантиметров сформировать брэгговскую решётку со сдвигом фазы на полпериода посередине, то мы получим лазер с распределённой обратной связью (т.н. РОС-лазер). В РОС-лазере достигается очень устойчивая и эффективная генерация одной продольной моды. Кроме того, в нём достаточно просто осуществляется автоподстройка частоты генерации по внешнему реперу с использованием управления током диода накачки в цепи обратной связи. Таким способом в совместной работе с ИЛФ СО РАН была получена очень узкая и стабильная линия генерации (< 1 КГц) иттербиевого волоконного РОС-лазера. При этом использование волоконных усилителей позволяет достаточно просто достичь уровня мощности в несколько ватт в области ~ 1 мкм в очень компактной и стабильной полностью волоконной конфигурации. Этот уникальный прибор имеет большие перспективы в прецизионной метрологии. В частности, в ИЛФ идёт работа по созданию на этой основе компактных стандартов частоты для системы ГЛОНАСС.

Также был рассмотрен и другой предельный случай: до каких пределов возможно увеличение длины волоконного лазера? За основу была взята схема ВКР-лазера, в которой можно получить усиление на большой длине оптоволокна, а с помощью брэгговских решёток, отражающих излучение на его концах, создать линейный резонатор. Работа начиналась с реализации лазеров с длиной резонатора единицы, а затем десятки километров. В 2009 году совместно с группой из британского университета Астон был достигнут предел увеличения длины линейного резонатора — 270 км. Оказалось, что вплоть до такой большой длины наблюдается структура продольных мод (с межмодовым расстоянием $c/2L \sim 400$ Гц). Это означает, что между зеркалами (ВБР), разнесёнными

на 270 км, формируется стоячая электромагнитная волна, что само по себе удивительно. Ещё более удивительным оказалось то, что при дальнейшем увеличении длины (до 300 км и более) лазер тоже работает, но уже в «безмодовом» режиме. К генерации в этом случае приводит рэлеевское рассеяние на субмикронных неоднородностях показателя преломления — то самое, которое определяет синий цвет неба над головой и минимальный уровень потерь в телекоммуникационных волоконных световодах. Хотя рассеяние в световоде идёт во все стороны, часть излучения, рассеянного назад, попадает обратно в световод и распространяется во встречном направлении. Интегрально эффект очень мал (на уровне 0,1%), но если в волокне создать распределённое усиление, например, за счёт вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), усиленное рассеянное излучение может быть достаточным для преодоления порога генерации даже в отсутствие обычных точечных отражателей.

В коллаборации с группой из университета Астон был также выполнен специальный эксперимент, в котором в волокне длиной около 100 км создавалось распределённое усиление и были приняты меры по устранению паразитных отражений (от торцов волокна и т.п.). Оказалось, что в таком открытом резонаторе при превышении некоторого порога по накачке (~ 1,5 Вт) возникает стационарная узкополосная (~ 1 нм) лазерная генерация с локализацией спектра вблизи максимума ВКР-усиления (~ 1560 нм в нашем случае). Была достигнута дифференциальная эффективность генерации на уровне 30%, что сравнимо с эффективностью обычных ВКР-лазеров. При этом было доказано, что механизм генерации определяется случайной распределённой обратной связью (сРОС) из-за рэлеевского рассеяния на естественных неоднородностях показателя преломления. Такой сРОС-лазер можно представить в виде слабой решётки показателя преломления со случайной амплитудой и фазой в длинной слабоусиливающей среде. Качественно сРОС-лазер похож на описанный выше иттербиевый РОС-лазер с регулярной распределённой обратной связью, но из-за разницы в силе решёток линейные масштабы таких лазеров отличаются на семь порядков (сотни километров и сантиметры соответственно). Принципиальную роль играет также случайный характер распределённой обратной связи. При этом её зависимость от распределённого усиления, определяющегося накачкой в условиях её истощения, принципиально меняют механизм генерации: открытый случайный резонатор становится адаптивным и самоорганизующимся, что влияет на условия насыщения генерации, конкуренции разных частотных компонент и, как следствие, форму спектра и статистические свойства излучения. Эти вопросы фундаментального характера сейчас активно



изучаются, и не только нами — после публикации наших результатов в журнале «Nature Photonics» в 2010 году этой проблемой занялись ещё несколько групп. Уже можно говорить о том, что научное сообщество признало, что такая схема представляет собой новый тип лазерной генерации.

Идеологически эта проблема близка активно развивающейся области «random lasing» — генерации в разупорядоченных усиливающих средах, таких как порошки лазерных кристаллов, суспензии лазерных красителей с рассеивающими наночастицами и др. В отличие от обычных лазеров, где свойства генерируемого излучения (спектр и форма пучка) определяются модами резонатора, в т.н. «случайных» лазерах оптического резонатора в привычном понимании нет — их генерационные характеристики определяются процессами многократного рассеяния в разупорядоченной усиливающей среде. Случайные лазеры обычно излучают в импульсном режиме, имеют сложный случайный спектр генерации и сложную диаграмму направленности. Созданный нами волоконный лазер со случайной распределённой обратной связью (сРОС) можно рассматривать как одномерный случайный лазер. При этом он отличается от объёмных случайных лазеров узким спектром, высокой стабильностью и высоким качеством пучка (близко к гауссовому), определяющимся волоконными свойствами оптоволокна. А в отличие от обычных волоконных лазеров с регулярными (точечными и распределёнными) отражателями, рэлеевские сРОС-лазеры генерируют «безмодовое» излучение, не имеют принципиальных ограничений по длине, могут достаточно просто перестраиваться по частоте и генерировать на многих линиях в разных спектральных диапазонах без селекторов и зеркал.

Уникальные свойства волоконных рэлеевских сРОС-лазеров, открывают новый класс лазерных источников, которые могут найти применения как в фундаментальных и прикладных исследованиях, так и на практике, в частности, в сверхдальней оптической связи и распределённых сенсорных системах, что является предметом будущих исследований.

С.А. Бабин, д.ф.-м.н., ИИЭО СО РАН

Новый главврач академической больницы

На заседании Президиума ИИЭО СО РАН на пост главного врача академической больницы-поликлинического комплекса утвержден Ю.К. Усольцев, Заслуженный врач РФ, кандидат медицинских наук, хирург по специальности, награжден знаком «Отличник здравоохранения».

Юрий Константинович закончил Иркутский медицинский институт, работал в Усть-Илимской ЦРБ, потом в областной больнице. Но самый большой период деятельности пришёлся на Железнодорожную клинику. Спас жизнь не одному человеку. Попасть на операцию именно к нему считалось за удачу. Последние три года Усольцев работал заместителем главного врача клиники.

Юрий Константинович проходил специализацию в швейцарском кантонном госпитале в Цюрихе, в медицинском госпитале Лос-Анжелеса. Получил высшую категорию врача при проведении различного рода переподготовок в 1998, 2003, 2008, 2009 годах.

Сейчас новый руководитель «Академки» готовит стратегию её развития. По его мнению, поликлиника соответствует современным требованиям городского цикла, но отсутствуют



какая-либо аппаратура, необходимая для полноценного обследования пациентов, в частности, томограф. Требуется, по мнению Юрия Константиновича, создать хирургическое отделение, внедрить современные методики лечения.

Наш корр.
Фото В.Короткоручко