

«СЛУЧАЙНЫЙ» ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР

Член-корреспондент РАН Сергей БАБИН,
заведующий лабораторией волоконной оптики,
заместитель директора по научной работе
Института автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск)

В сегодняшнем динамичном мире все большую роль играют высокоскоростные средства связи. В настоящее время до 75% передаваемой информации — от интернета до мобильных телефонов и телевидения — проходит по магистральным волоконно-оптическим линиям, и из года в год этот объем растет. Вот почему перед разработчиками стоит задача развития нового поколения коммуникационных систем, в частности способных доставлять сигнал без потери качества на всё большие расстояния с минимальными затратами. Решать эти проблемы помогают лазерные технологии.

Напомним некоторые принципы, на которых действует лазер. Известно, что для лазерной генерации нужна активная среда, усиливающая свет (например, кристалл рубина), и положительная обратная связь, превращающая оптический усилитель в генератор когерентного излучения. Для формирования такой связи активную среду помещают в резонатор — он обычно состоит из двух зеркал, настроенных параллельно друг другу. Зеркала отражают свет обратно в усиливающую среду, и если коэффициент усиления превышает потери при двойном проходе между зеркалами, то достигается порог генерации и мощность излучения резко возрастает, но не до бесконечности, а стабилизируется на уровне, определяемом эффектом насыщения, — усиление в активной среде с ростом мощности падает и в стац-

онарном режиме становится равным потерям в резонаторе.

Поперечное сечение лазерного пучка ограничено размерами активной среды или зеркал резонатора, который не может быть очень длинным, так как пучок в свободном пространстве расширяется из-за дифракции. И чем меньше размер пучка, тем сильнее его расходимость и, соответственно, потери на зеркалах. От этих недостатков свободен полностью закрытый вариант резонатора, когда в промежутке между зеркалами пучок распространяется по волноводу, каковым является, например, волоконный световод*. Последний важен для дальнейшего изложения, поэтому коротко остановимся на его устройстве.

*См.: А. Прохоров, Е. Дианов. Волоконная оптика: проблемы и перспективы. — Наука в СССР, 1987, № 3 (прим. ред.).

**В лаборатории волоконной оптики
Института автоматики и электрометрии
СО РАН российские участники проекта.**

**Слева направо:
кандидат физико-математических наук
Сергей Каблуков,
доктор физико-математических наук
Евгений Подвиллов,
член-корреспондент РАН Сергей Бабин.**



Сердцевина световода диаметром около 10 мкм изготавливается из легированного кварцевого стекла и имеет повышенный показатель преломления. Внешняя оболочка (ее диаметр ~ 100 мкм) также стеклянная, а сверху покрыта пластиком. Свет распространяется по сердцевине за счет эффекта полного внутреннего отражения, причем практически без потерь — совсем незначительные потери определяются рэлеевским рассеянием* на неоднородностях показателя преломления субмикронного масштаба, присущих структуре стекла. В пассивных волоконных световодах, используемых в телекоммуникациях, коэффициент потерь уменьшается с ростом длины волны и достигает минимума (~0,2 дБ/км) вблизи ~1,55 мкм, т.е. сигнал слабеет в 100 раз, пройдя 100 км пути, что и определяет предельную длину участка волоконной линии связи между усилителями сигнала.

Другое ценное свойство таких световодов — фоточувствительность: если воздействовать на какой-то участок сердцевины волокна ультрафиолетовым излучением, то можно на протяжении этого отрезка изменить показатель преломления. Упрощенно говоря, таким образом реально создать подобие фильтров или, если хотите, шторок на пути света, вдобавок обладающих способностью к его отражению, т.е. берущими на себя роль зеркал. Для отражения конкретной длины волны света в сердцевине световода формируется периодическая структура показателя преломления — так называемая волоконная брэгговская решетка**, коэффициент отражения которой

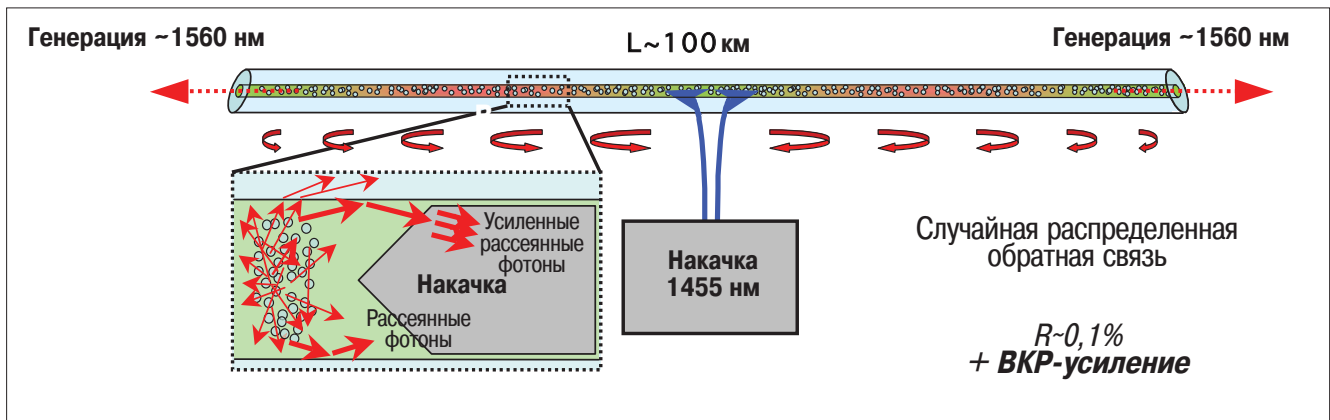
*Рэлеевское рассеяние — рассеяние света на объектах, размеры которых меньше длины его волны. Названо в 1871 г. в честь открывшего это явление британского физика лорда Рэля (*прим. ред.*).

**Брэгговская решетка — названа по фамилии английских физиков отца и сына Уильяма Генри и Уильяма Лоренса Брэггов, основоположников рентгеноструктурного анализа; нобелевские лауреаты 1915 г. (*прим. ред.*).

может превышать 99%. Эти внутриволоконные лазерные зеркала выдерживают большую мощность и «живут» много лет. И именно с их помощью можно из световода сделать волоконный лазер (его идею предложил сотрудник компании «American Optical» Элиас Снитцер еще в 1961 г., т.е. всего через год после запуска американским физиком Теодором Мейманом первого лазера на кристалле рубина).

Уже тогда были очевидны преимущества волоконного активного элемента в сравнении с кристаллом: за счет 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 оптоволокна, сложность схем накачки и необходимость сопряжения активных световодов с объемной оптикой — зеркалами и другими элементами) отодвинул на десятки лет внедрение этого типа лазеров в практику.

Прогресс в их развитии стал реален во многом благодаря появлению волоконно-оптической связи и телекоммуникационных технологий, в первую очередь, созданию в конце 1960-х годов световодов с низкими потерями на основе кварцевого стекла, чего удалось достичь за счет уменьшения концентрации примесей. За работы в этой области китайскому (одновременно британскому и американскому) инженеру-физику Чарльзу Као присудили Нобелевскую премию по физике 2009 г. Практическое внедрение волоконно-оптических линий связи, особенно бурное в 1990-х годах после появления интернета, привело к созданию принципиально новой элементной базы волоконной оптики: эффективных источников оптической накачки — полупроводни-



Принцип работы лазера со случайной распределенной обратной связью.

При введении в световод в двух направлениях излучения накачки (1455 нм) из-за эффекта вынужденного комбинационного рассеяния создается распределенное усиление как для прямых, так и рассеянных фотонов, и если интегральный показатель их усиления превышает потери за полный проход, возникает генерация на ~1560 нм.

ковых лазеров* с выводом излучения в оптическое волокно, волоконных брэгговских решеток и других элементов, на основе которых были разработаны эффективные лазеры в полностью волоконном исполнении.

Простейший вариант устройства такого типа представляет собой отрезок активного волоконного световода с сердцевиной, легированной ионами редкоземельных элементов (иттербия, эрбия и др.), на концах которого сформированы волоконные брэгговские решетки, выступающие в роли отражателей светового пучка. Некогерентное излучение многомодового лазерного диода накачки вводится в световод через ответвитель и переводит активные ионы в возбужденное состояние, создавая тем самым усиливающую среду. При этом брэгговские решетки, отражающие свет на резонансной частоте, формируют резонатор лазера непосредственно в волоконном световоде.

Реализация полностью волоконной схемы привела к революции в лазерной технике — она не требует юстировки зеркал, обладает высокой эффективностью и стабильностью генерации при высоком качестве пучка. Как оказалось, для усиления не обязательно использовать оптическую накачку лазерных уровней ионов редкоземельных элементов. Его можно создать и в пассивном телекоммуникационном волокне за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света на оптических фоновых (колебаниях) в стекле. Проявление этого эффекта связано с концентрацией интенсивного излучения в сердцевине световода большой протяженности.

В 2006 г., проводя эксперименты с ВКР-лазерами совместно с группой британских коллег из Университета Астон (Бирмингем), руководимой нашим соотечественником профессором Сергеем Турицыным, мы сформулировали два вопроса: до каких пределов

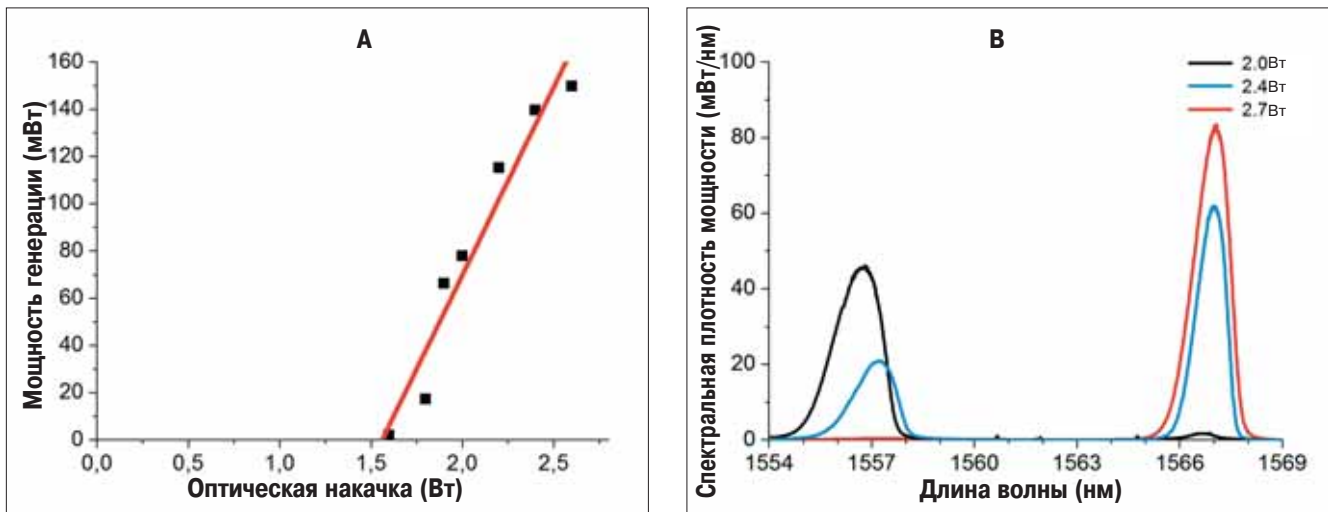
можно увеличивать длину волоконного лазера? может ли она превысить протяженность пассивного участка волоконно-оптической линии связи (~100 км)? Работа начиналась с реализации ВКР-лазеров с длиной резонатора (расстояние между волоконными брэгговскими решетками, выступающими в роли зеркал) в 10–20 км, а затем этот показатель достиг ~100 км. В 2009 г. удалось обнаружить искомым предел — он оказался равным 270 км. Выяснилось, что вплоть до этой границы наблюдается структура продольных мод* линейного резонатора (с межмодовым расстоянием ~400 Гц). Это означает: между «зеркалами», разнесенными на 270 км, формируется стоячая электромагнитная волна** (она получается в результате наложения движущихся навстречу падающей и отраженной волн одинаковой интенсивности), что само по себе поразительно. Еще удивительнее оказалось то, что при дальнейшем увеличении длины (до 300 км и более) лазер тоже работает, но уже в «безмодовом» режиме.

Было высказано предположение: 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 идет во все стороны, часть излучения, ушедшего назад, попадает обратно в световод и распространяется во встречном направлении. Интегрально эффект очень мал (на уровне 0,1%), но если в волокне создать распределенное усиление

* Мода — тип колебаний; отличаются друг от друга скоростью распространения, распределением интенсивности по сечению световода, направлением вектора электрического поля. По поперечной структуре световоды разделяются на одно- и многомодовые (прим. ред.).

** Стоячая волна (в общем виде) — колебания в распределенных колебательных системах с характерным распределением максимумов и минимумов амплитуд. Возникают при отражениях от преград и неоднородностей в результате наложения отраженной волны на падающую; примеры — колебания струны, колебания воздуха в органичных трубах (прим. ред.).

*За создание лазеров на гетероструктурах, работающих при комнатной температуре, российскому ученому академику Жоресу Алфорову была присуждена Нобелевская премия по физике 2000 г. (прим. ред.).



**Мощность генерации с одного конца волокна в зависимости от полной мощности накачки (А).
Спектр генерации $p(\lambda)$ в зависимости от полной мощности накачки (В):
2 Вт — генерируется линия 1557 нм; 2,4 Вт — одновременно линии 1557 и 1567 нм,
соответствующие двум локальным максимумам в спектре ВКР-усиления; 2,7 Вт — 1567 нм.**

(например, за счет вынужденного комбинационного рассеяния), такое рассеянное излучение может оказаться достаточным для преодоления порога генерации даже в отсутствие обычных точечных отражателей.

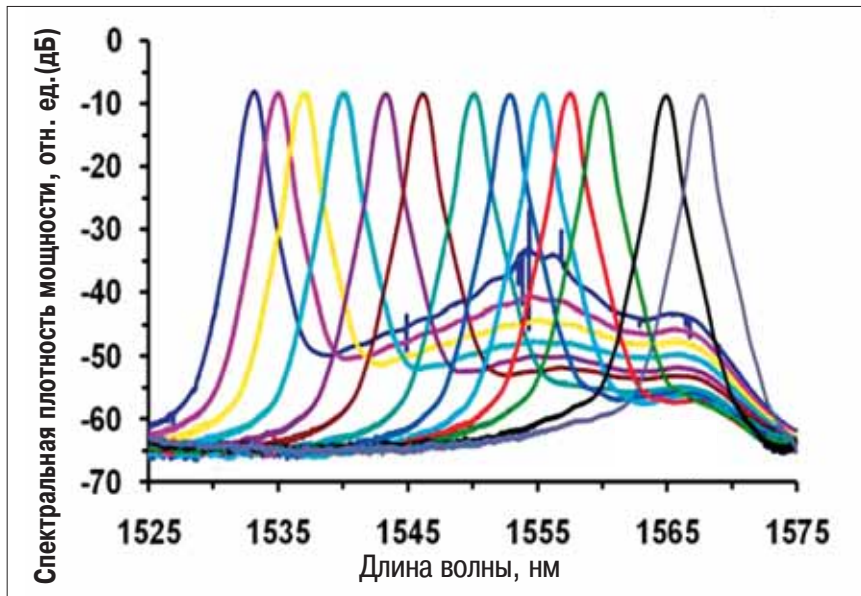
Для проверки гипотезы был выполнен эксперимент: в ходе его в волокне длиной ~ 100 км создавалось распределенное усиление при одновременном устранении паразитных отражений (от торцов и соединений волокна). Оказалось, что и без брэгговских зеркал при превышении некоторого порога по мощности накачки ($\sim 1,5$ Вт) с двух концов волокна наблюдается узкополосная лазерная генерация с локализацией спектра вблизи максимума ВКР-усиления. Поскольку в кварцевом стекле линия ВКР имеет два локальных максимума, в генерации наблюдаются две линии (1557 и 1567 нм) или одна из них в зависимости от мощности накачки. При этом было доказано, что генерация возникает благодаря так называемой случайной распределенной обратной связи (СРОС) из-за рэлеевского рассеяния.

Качественно СРОС-лазер похож на хорошо изученные волоконные лазеры с регулярной распределенной обратной связью (так называемые РОС-лазеры, в которых брэгговская решетка формируется вдоль всего активного волоконного световода), но из-за разницы в силе решеток линейные масштабы таких лазеров отличаются на 7 порядков (сотни километров и сантиметры соответственно). Принципиальную роль играет также случайный характер распределенной обратной связи. В СРОС-лазере регулярная структура продольных мод отсутствует и в генерацию выходит континуум случайных спектральных компонент вблизи двух максимумов усиления сигнала на 1557 и 1567 нм. Отметим еще одно принципиальное отличие СРОС-лазера: обратная связь в нем зависит от распределенного усиления, определяемо-

го оптической накачкой, а она, в свою очередь, истощается с ростом мощности лазера, генерируемой в континууме спектральных компонент, которые взаимодействуют между собой. Это принципиально меняет механизм генерации. Не вдаваясь в детали, важные для специалистов, отметим, что для его понимания предстоит ответить на вопросы фундаментального характера. Такие попытки предпринимаем не только мы — после публикации наших результатов в журнале «Nature Photonics» в 2010 г. данной проблемой занялись еще несколько групп ученых. И уже можно говорить, что научное сообщество признало: предложенная нами схема представляет собой новый тип лазерной генерации.

Идеологически эта проблема близка активно развивающейся в последнее время концепции «случайных» лазеров (от англ. «random lasers») — генерации в разупорядоченных (случайно неоднородных) усиливающих средах, таких как порошки лазерных кристаллов или полупроводников, суспензии красителей с рассеивающими наночастицами и др. В отличие от обычных лазеров, где свойства излучения (спектр и форма выходного пучка) определяются модами резонатора, в «случайных» оптического резонатора в привычном понимании нет — их характеристики определяются процессами многократного рассеяния в разупорядоченной усиливающей среде. Отметим, что эта концепция впервые была сформулирована первооткрывателем лазерного охлаждения атомов профессором Владиленом Летоховым еще в 1967 г.

«Случайные» лазеры обладают предельно простой конструкцией, особенно в сравнении с микролазерами на полупроводниковых гетероструктурах и кристаллах, требующих прецизионного резонатора. Правда, еще предстоит улучшить их выходные характеристики: эти новые системы обычно излучают в импульсном режиме, имеют сложный случайный



Перестройка спектра генерации СРОС-лазера в диапазоне 1535 – 1570 нм с помощью специального фильтра.

спектр генерации и очень непростую диаграмму направленности пучка. Один из способов совершенствования подобных устройств — переход к меньшей размерности. Еще до нас было показано, что одномерные случайные среды (набор пластин случайной толщины или суспензия красителя с наночастицами в полном световоде) позволяют формировать направленный пучок точно так же, как в обычных лазерах, однако временные и спектральные характеристики случайных лазеров пока им уступают.

В этом смысле созданный нами волоконный лазер со случайной распределенной обратной связью можно рассматривать как одномерный «случайный» лазер, так как свет усиливается и рассеивается только в одном направлении — вперед или назад по волоконному световоду. А в обычных «случайных» лазерах, представляющих из себя «шарик» из рассеивающих и/или усиливающих частиц, свет распространяется во всех направлениях. При этом волоконный «случайный» лазер отличается от объемных узким спектром, высокой стабильностью и качеством пучка, определяющимися волноводными свойствами оптоволокна, как и у обычных волоконных «собратьев». А в отличие от последних, имеющих резонатор из зеркал (регулярных отражателей — точечных или распределенных), рэлеевские СРОС-лазеры не имеют принципиальных ограничений по длине, могут достаточно просто перестраиваться по частоте и генерировать на многих линиях в разных спектральных диапазонах. В частности, установка в центр схемы (между вводами накачки) акустооптического фильтра с волоконными входом и выходом позволила реализовать плавную перестройку СРОС-лазера в широком диапазоне длин волн 1535–1570 нм с вариациями мощности $<3\%$ ($\sim 0,1$ дБ), что на порядок лучше, чем у перестраиваемых ВКР-лазеров с линейным или кольцевым резонатором.

Уникальные свойства волоконных рэлеевских СРОС-лазеров применимы как в фундаментальных и прикладных работах, так и на практике, особенно в сверхдальней оптической связи и распределенных сенсорных системах, что является предметом будущих исследований. В частности, в ультрадлинном волоконном лазере (с комбинированным резонатором из точечных отражателей и распределенного рэлеевского «зеркала»), реализованном непосредственно в волоконно-оптической линии связи, генерируемое излучение может быть достаточно однородным по длине и использовано в качестве однородной вторичной накачки распределенного ВКР-усилителя оптического сигнала. При равенстве индуцированного усиления и его потерь сигнал в линии может успешно передаваться на большие расстояния в широкой полосе частот. На этой основе реально создание принципиально новых систем высокоскоростной передачи информации, причем без промежуточных усилителей. Такая работа начата в нашем институте по договору с ОАО «Ростелеком». В конце 2011 г. в лабораторных условиях продемонстрирована эффективная передача по линии длиной до 250 км без промежуточных усилителей. В ближайшем будущем планируется проведение испытаний новой технологии на действующей магистральной линии связи.