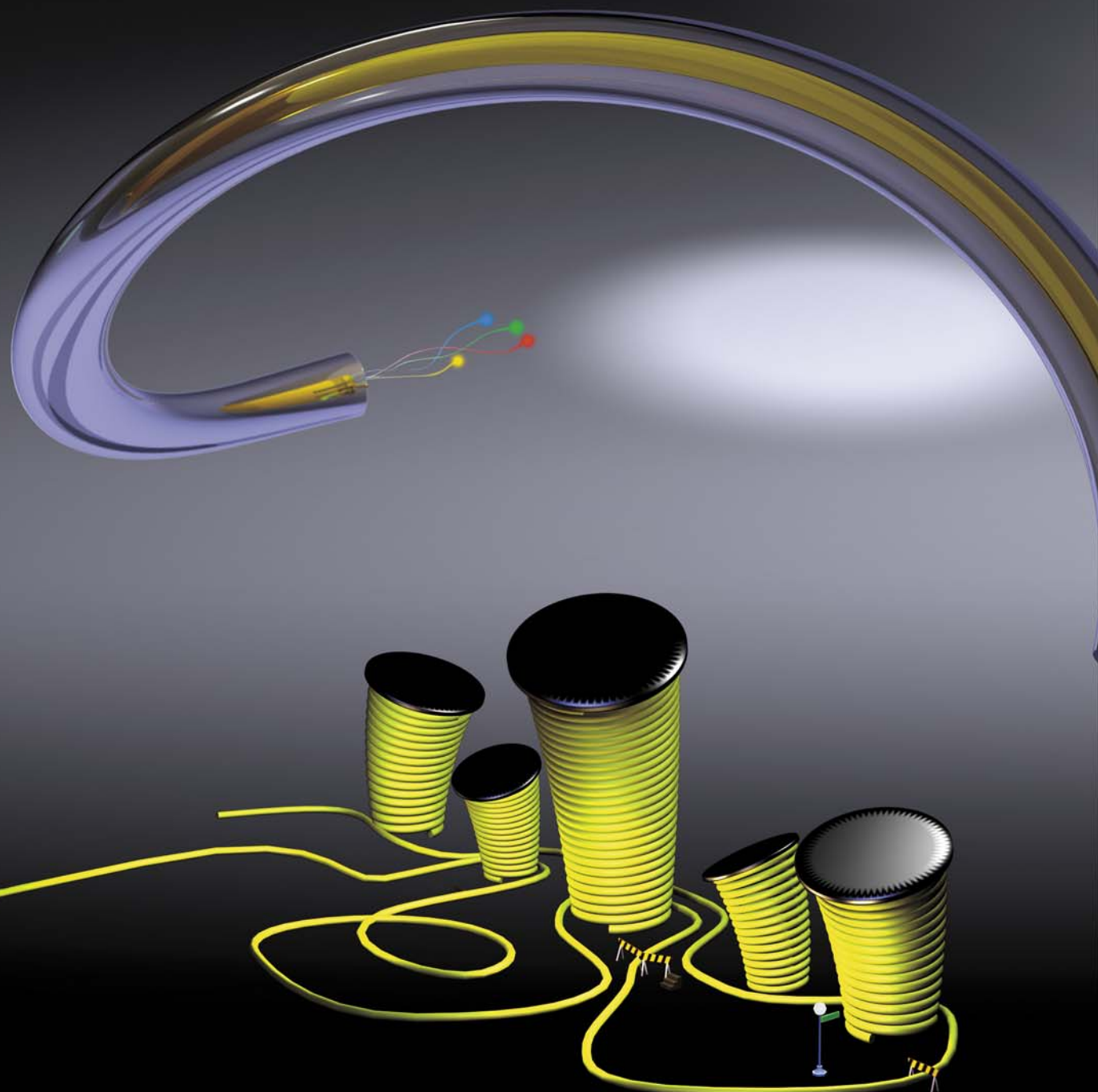


ЛАЗЕР

С. А. БАБИН



без

ЗЕРКАЛ

В длинном волоконном световоде может возникнуть лазерная генерация света – необходимая для этого положительная обратная связь создается из-за рэлеевского рассеяния генерируемого излучения на неоднородностях волокна. Такой лазер может быть отнесен к классу «случайных» лазеров, активно изучаемых в последнее время. По эффективности и качеству создаваемого пучка света лазер с распределенной случайной обратной связью не уступает лазеру с обычным резонатором, но при этом его излучение обладает рядом уникальных свойств



БАБИН Сергей Алексеевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией волоконной оптики Института автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 200 научных работ и 6 патентов

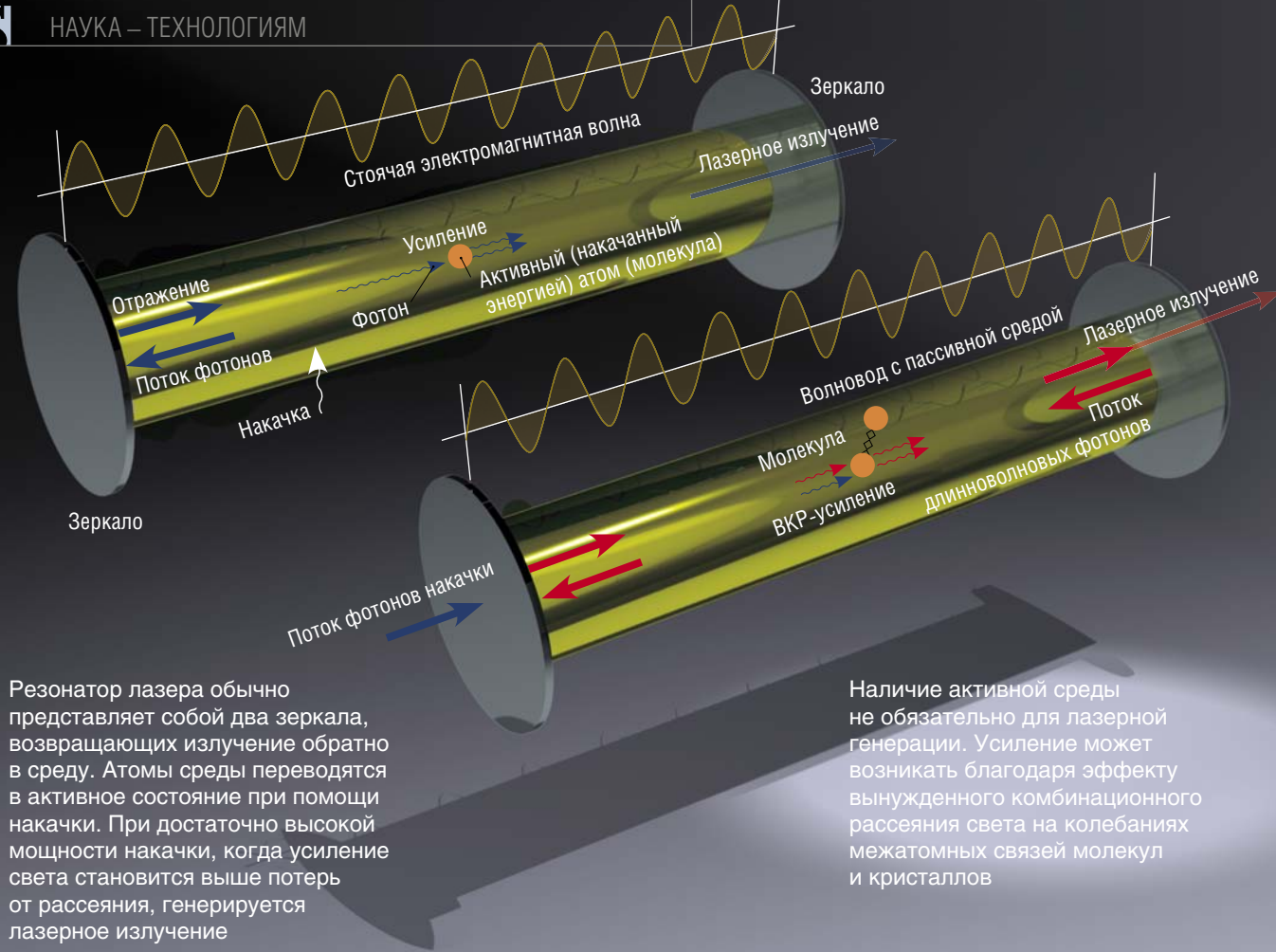
Ключевые слова: лазеры, оптоволокно, рэлеевское рассеяние, вынужденное комбинационное рассеяние.
Key words: laser, optical fiber, Rayleigh scattering, stimulated Raman scattering

Устройство лазера сейчас знает даже школьник. С лазерами мы сталкиваемся практически на каждом шагу – в магазинах при сканировании штрих-кодов, при воспроизведении и чтении компакт-дисков, при печати на лазерных принтерах. Широко используются лазеры и в промышленности – для резки, сварки и пайки деталей из различных материалов.

Известно, что для лазерной генерации нужна активная среда, атомы которой переведены в возбужденное состояние с помощью накачки, и резонатор, который позволяет генерировать когерентное излучение. Среда может быть разными – газы и плазма, жидкости и твердые тела (полупроводники, кристаллы и стекла). Возбуждение атомов активной среды в основном осуществляется электрическим током или светом, получаемым от ламп или светодиодов, – в этом случае говорят об оптической накачке.

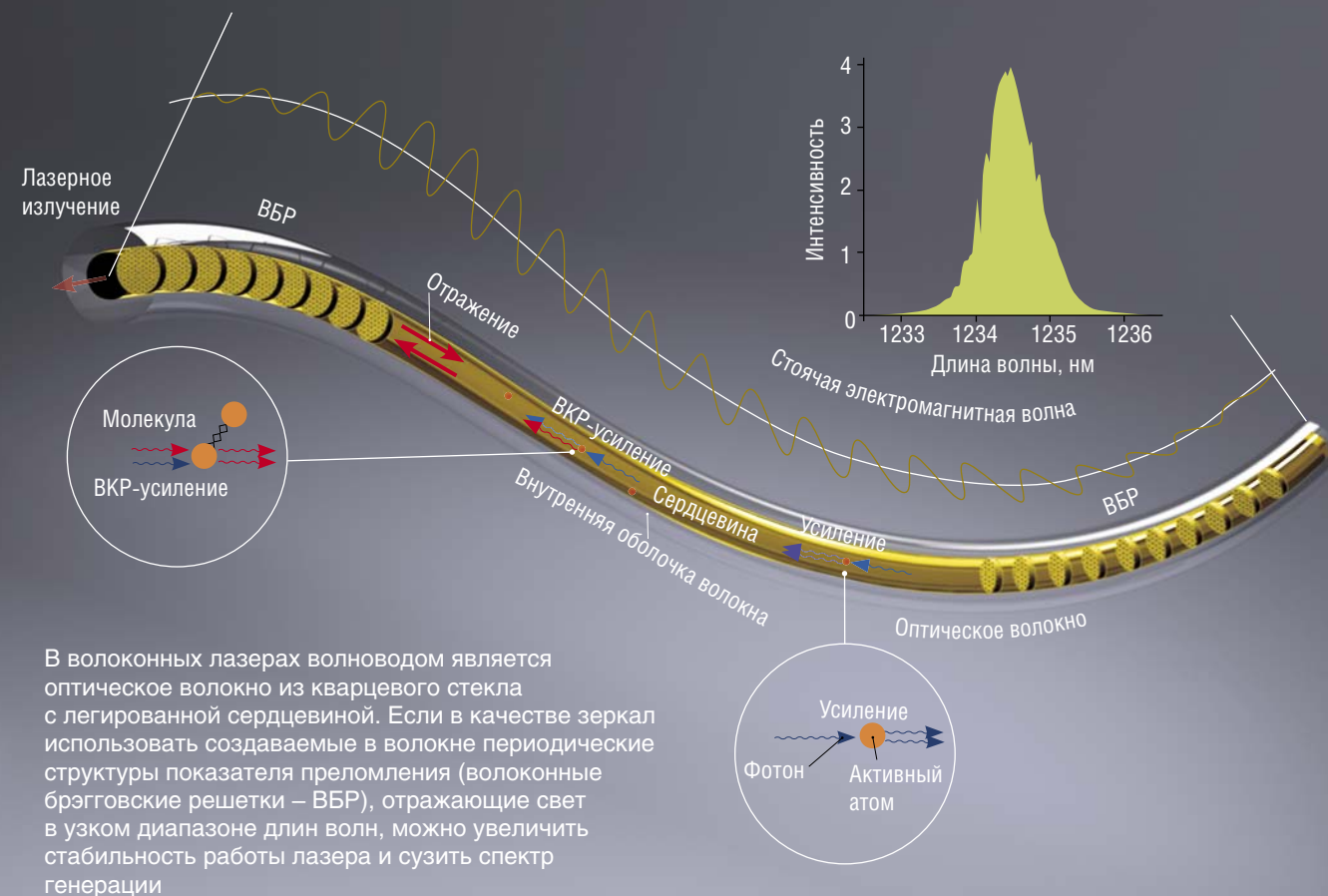
Резонатор обычно состоит из двух зеркал, установленных параллельно друг другу. Зеркала отражают свет назад в активную среду, и если его усиление за счет вынужденного излучения возбужденными атомами превышает потери, то возникает генерация и мощность излучения резко возрастает. Однако мощность не может расти до бесконечности и стабилизируется на уровне, определяемом эффектом насыщения усиления – усиление в стационарном режиме становится равным потерям в резонаторе.

Резонатор и сам лазер не могут быть очень длинными, так как пучок света при распространении расширяется из-за дифракции. Чем меньше размер пучка, тем сильнее его расходимость и, соответственно, больше потери на зеркалах. Чтобы устранить дифракционные потери при расхождении пучка, можно использовать полностью закрытый резонатор, разместив в промежутке между зеркалами волновод. В качестве волновода может выступать, например, волоконный световод. В последнее время лазеры на основе оптоволокна получили широкое распространение.



Резонатор лазера обычно представляет собой два зеркала, возвращающих излучение обратно в среду. Атомы среды переводятся в активное состояние при помощи накачки. При достаточно высокой мощности накачки, когда усиление света становится выше потерь от рассеяния, генерируется лазерное излучение

Наличие активной среды не обязательно для лазерной генерации. Усиление может возникать благодаря эффекту вынужденного комбинационного рассеяния света на колебаниях межатомных связей молекул и кристаллов



В волоконных лазерах волноводом является оптическое волокно из кварцевого стекла с легированной сердцевиной. Если в качестве зеркал использовать создаваемые в волокне периодические структуры показателя преломления (волоконные брэгговские решетки – ВБР), отражающие свет в узком диапазоне длин волн, можно увеличить стабильность работы лазера и сузить спектр генерации

Оптоволоконная революция

Как же устроен волоконный световод? Его сердцевина изготовлена из легированного кварцевого стекла и имеет повышенный показатель преломления. Диаметр сердцевины составляет около 10 мкм, диаметр внешней стеклянной оболочки порядка 100 мкм. Внешняя оболочка покрывается пластиком. В таком волноводе свет распространяется практически без потерь. Незначительные потери возникают из-за рэлеевского рассеяния на субмикронных неоднородностях показателя преломления, которые всегда есть в стекле. Коэффициент потерь уменьшается с ростом длины волны: минимум потерь в пассивных волокнах, используемых в телекоммуникациях, достигается вблизи ~1,55 мкм (инфракрасное излучение) и составляет около 5 % исходной мощности на километр волокна.

Другим важным свойством волоконных световодов является фоточувствительность: если облучать сердцевину волокна ультрафиолетовым излучением, можно локально изменить показатель преломления. Периодические изменения интенсивности, полученные например, при помощи интерференции двух пучков

ультрафиолета, позволяют сформировать в сердцевине световолокна периодическую структуру – так называемую *волоконную брэгговскую решетку* (ВБР), которая отражает свет с определенной длиной волны за счет конструктивной интерференции дифрагирующих пучков. Коэффициент отражения такой решетки может превышать 99 %. Брэгговскую решетку можно использовать в качестве узкополосных внутриволоконных лазерных зеркал, при этом они выдерживают большую мощность и «живут» много лет.

РЭЛЕЕВСКОЕ РАССЕЯНИЕ

Рассеяние света без изменения длины волны и, соответственно, практически без потерь, называемое также упругим рассеянием, на частицах, неоднородностях или других объектах, размеры которых меньше длины волны. В частности, именно рэлеевским рассеянием обусловлен голубой цвет неба – синяя часть спектра рассеивается молекулами, входящими в состав воздуха, наиболее эффективно

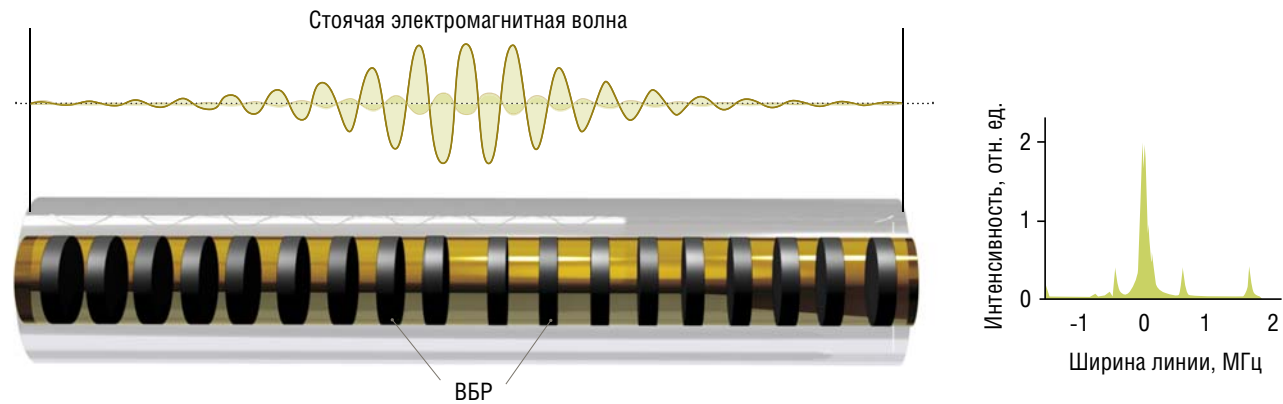
Простейший вариант волоконного лазера представляет собой отрезок волоконного световода с сердцевиной, легированной ионами редкоземельных элементов (иттербий, эрбий и др.), на концах которого сформированы брэгговские решетки. Некогерентное излучение лазерного диода накачки заводится в волокно через ответвитель и переводит ионы редкоземельной примеси в возбужденное состояние, создавая таким образом усиливающую среду. Волоконные брэгговские решетки, отражающие свет на резонансной частоте, формируют резонатор лазера непосредственно в волоконном 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. В последнее десятилетие волоконные лазеры активно развивались в технологическом плане и получили широкое распространение на практике, в первую очередь в оптической связи и обработке материалов.

Лазер длиной в 300 км

Наиболее яркие достижения лаборатории волоконных лазеров Института автоматики и электрометрии СО РАН касаются изучения двух предельных случаев: очень коротких и очень длинных волоконных лазеров. Если в активном волокне длиной всего несколько сантиметров сформировать брэгговскую решетку, то мы получим лазер с распределенной обратной связью (так называемый РОС-лазер). В нем достигается очень устойчивая и эффективная генерация излучения одной определенной длины волны.

Обратная ситуация рассматривалась по схеме лазера на основе пассивного одномодового волокна, усиление в котором достигается за счет эффекта *вынужденного комбинационного рассеяния* (ВКР) при распространении по волокну излучения накачки.

В такой схеме можно получить распределенное усиление на большой длине оптоволоконка, а с помощью брэгговских решеток, отражающих излучение на его концах, создать линейный резонатор.



РОС-лазер – самый короткий волоконный лазер, в котором пару волоконных брэгговских решеток (ВБР) формируют в активном световоде так, чтобы расстояние между ними оказалось равным половине периода. В этом случае отражение (как и усиление) происходит не только на торцах, а практически в любой точке, т.е. распределено по длине волокна. Лазер с распределенной обратной связью (РОС) генерирует очень устойчивый монохроматический свет: ширина линии такого лазера меньше 100 кГц, а с автоподстройкой частоты – менее 1 кГц. По: (Никулин и др, 2009)

До каких же пределов возможно увеличение длины волоконного лазера? Работа начиналась с реализации лазеров с длиной резонатора единицы, а затем десятки километров (Babin, 2008). В 2009 г. совместно с коллегами из британского университета Астон был достигнут предел удлинения линейного резонатора – 270 км (Turitsyn *et al.*, 2009). Оказалось, что между отражающими волоконными брэгговскими решетками, разнесенными на такое большое расстояние, все еще формируется стоячая электромагнитная волна с четко выраженными спектральными линиями (модами), что само по себе удивительно. Поразительно, но и при дальнейшем увеличении длины, до 300 км и более, лазер тоже работает, правда, в «безмодовом» режиме.

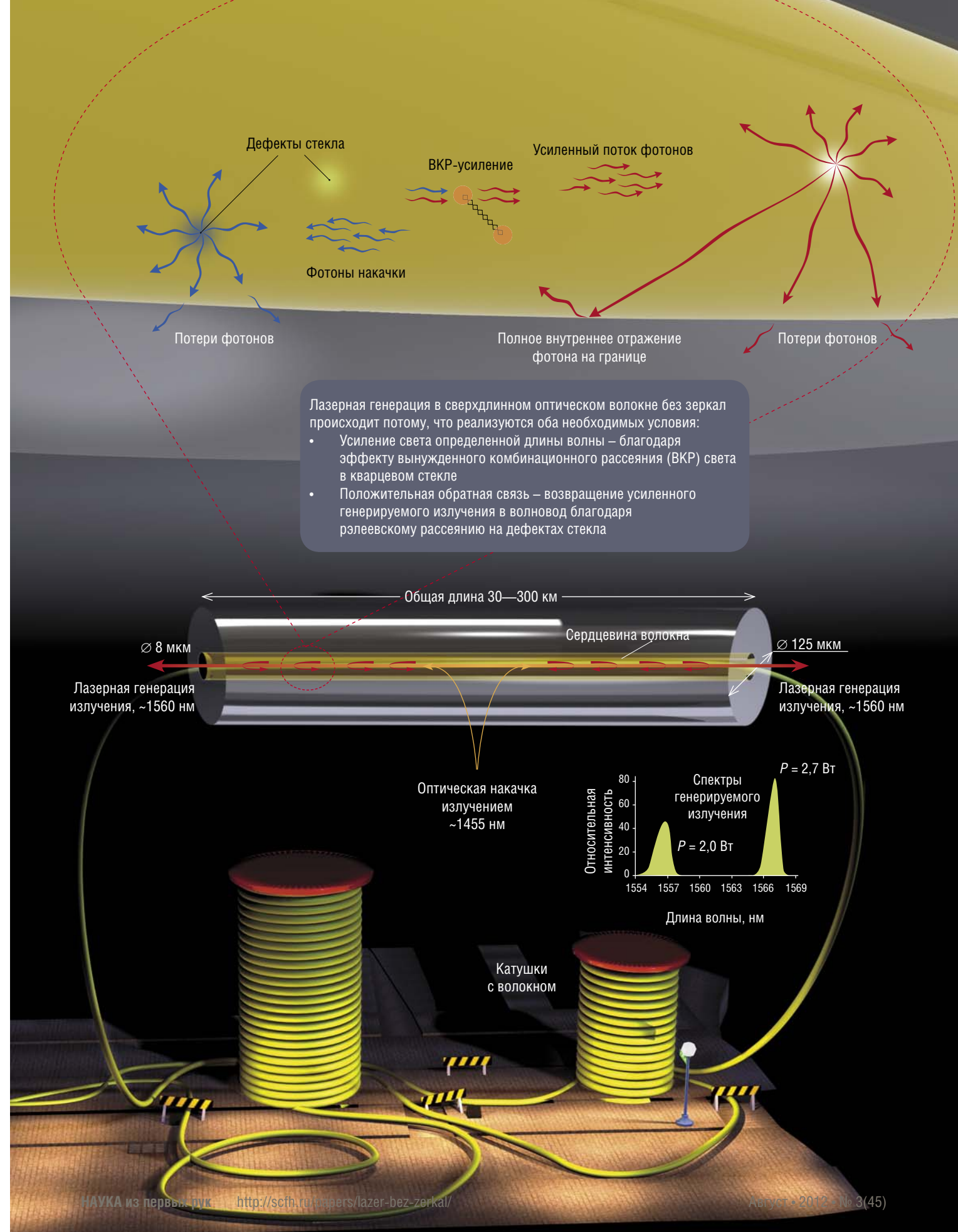
Было высказано предположение, что к генерации в этом случае приводит рэлеевское рассеяние на субмикронных неоднородностях показателя преломления – то самое, что определяет синий цвет неба над головой. Хотя такое рассеяние происходит во все стороны, часть излучения, рассеянного назад, попадает обратно в световод и распространяется во встречном направлении. Суммарный эффект рэлеевского отражения достаточно мал, на уровне 0,1 %, но если в волокне создать распределенное усиление, например за счет вынужденного комбинационного рассеяния, усиленное рассеянное излучение может быть достаточным для возникновения генерации.

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ (ВКР)

При взаимодействии фотона с молекулой может произойти поглощение энергии. При этом молекула возбуждается – возбуждаются ее внутренние колебания, а фотон теряет часть энергии. В результате частота рассеянного света становится меньше, чем у исходного. Такой процесс называют комбинационным рассеянием. Если интенсивность падающего света велика, то рассеянное какой-либо молекулой излучение вследствие квантовых эффектов усиливает процесс рассеяния падающей волны другими молекулами. Это явление называют «вынужденное комбинационное рассеяние» (ВКР), а в англоязычной литературе – эффект Рамана. Применение зеркал-резонаторов, отражающих рассеянную волну позволяет многократно увеличить этот эффект и получить когерентный пучок излучения

Самоорганизация лазерной генерации

Для проверки гипотезы был выполнен специальный эксперимент, в котором в волокне длиной 84 км создавалось распределенное ВКР-усиление и были приняты меры по устранению паразитных отражений от торцов и соединений волокна. Оказалось, что при превышении некоторого порога по мощности накачки с двух концов волокна наблюдается стационарная лазерная генерация. Поскольку в кварцевом стекле линия вынужденного комбинационного рассеяния имеет два локальных максимума, в генерации наблюдаются либо две линии, 1557 и 1567 нм, либо одна из них – в зависимости от мощности накачки. Эффективность генерации в такой системе сравнима с эффективностью обычных ВКР-лазеров. При этом было доказано, что эффект возникает благодаря случайной распределенной обратной связи (СРОС), возникающей из-за рэлеевского рассеяния.



Лазерная генерация в сверхдлинном оптическом волокне без зеркал происходит потому, что реализуются оба необходимых условия:

- Усиление света определенной длины волны – благодаря эффекту вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в кварцевом стекле
- Положительная обратная связь – возвращение усиленного генерируемого излучения в волновод благодаря рэлеевскому рассеянию на дефектах стекла



Установка для изучения волоконных лазеров Института автоматкии и электрметрии СО РАН

Такой СРОС-лазер можно представить в виде слабоотражающей брэгговской решетки показателя преломления со случайной амплитудой и случайным расстоянием между узлами в длинной слабоусиливающей среде. Удивительно, но при этом ширина и форма генерируемого спектра примерно соответствует спектру обычных волоконных лазеров с узкополосными зеркалами, т. е. ВБР.

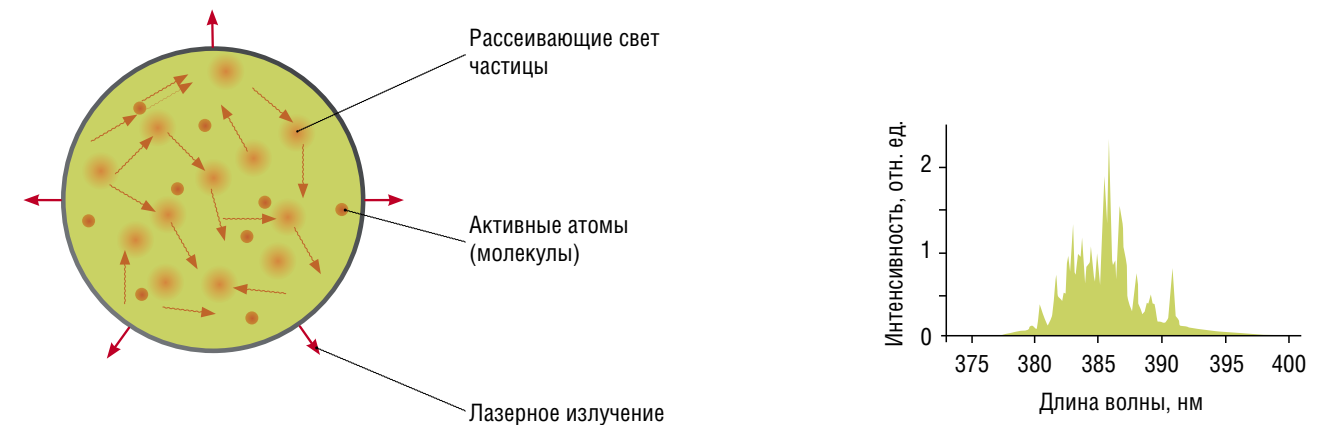
Отметим еще одну важную особенность СРОС-лазера: генерируемое в определенном месте волокна лазерное излучение локально истощает энергию излучения накачки, и это создает еще одну обратную связь. Такая связь принципиально меняет механизм генерации: открытый в продольном направлении случайный распределенный резонатор становится адаптивным и самоорганизующимся, что влияет на условия насыщения генерации, конкуренцию разных частотных компонент и, как следствие, на форму спектра и статистические свойства излучения. Эти вопросы фундаментального характера сейчас активно изучаются – после публикации наших результатов в 2010 г. (Turitsyn et al., 2010) этой проблемой занялось еще несколько групп (см., напр. (Andreasen, 2011)), и уже можно говорить о том, что научное сообщество признало предложенную схему новым типом лазерной генерации.

Из хаоса возникает порядок

Идеологически эта проблема близка активно развивающейся в последнее время концепции «случайных» лазеров (*random lasers*) – генерации в разупорядоченных усиливающих средах, таких как порошки лазерных кристаллов или полупроводников, суспензии лазерных красителей с рассеивающими наночастицами и др.

Впервые концепция была сформулирована в работе В. Г. Летохова (1967). В отличие от обычных лазеров, где свойства генерируемого излучения (спектр и форма выходного пучка) определяются резонатором, в «случайных» лазерах оптического резонатора в привычном понимании нет – их характеристики определяются процессами многократного рассеяния в разупорядоченной усиливающей среде. «Случайные» лазеры обладают предельно простой конструкцией, но обычно излучают в импульсном режиме, имеют сложный случайный спектр генерации и нестационарную направленность пучка.

Одним из способов улучшения их характеристик является переход к меньшей размерности. Было показано, что одномерные случайные среды: набор пластин случайной толщины или суспензия красителя с наночастицами в полном световоде (de Matos, 2007) – позволяют



Конструкция «случайного» лазера предельно проста: конгломерат из порошка лазерных кристаллов или суспензии лазерных красителей при оптической накачке превращается в «случайный» лазер. Их основная проблема – излучение в неперiodическом импульсном режиме, случайный спектр генерации в широком диапазоне длин волн и сложное неравномерное распределение направленности пучка

формировать направленный пучок, как в обычных лазерах, однако временные и спектральные характеристики в таком случае хуже.

В этом смысле созданный волоконный лазер со случайной распределенной обратной связью (СРОС) можно рассматривать как одномерный случайный лазер. При этом он отличается от объемных «случайных» лазеров узким спектром, высокой стабильностью и высоким качеством спектральных характеристик пучка, определяющимися волноводными свойствами оптоволокна. А в отличие от обычных волоконных лазеров с регулярными (точечными и распределенными) 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.

Уникальные свойства волоконных рэлеевских СРОС-лазеров открывают новый класс лазерных источников, которые могут найти применение как в фундаментальных и прикладных научных исследованиях, так и на практике, особенно в сверхдальней оптической связи и распределенных сенсорных системах. Благодаря лазерной генерации в оптоволоконной линии связи, которая служит накачкой ВКР-усилителя, распределенного вдоль всей линии, информационный сигнал может передаваться почти без потерь (*quasi-lossless transmission*) в широкой полосе. На этой основе возможно создание принципиально новой системы высокоскоростной передачи информации на большие расстояния без промежуточных усилителей.

Литература

Басов Н. Г., Афанасьев Ю. В. *Световое чудо века*. М.: Педагогика, 1984.

Летохов В. С. Генерация света рассеивающей средой с отрицательным резонансным поглощением // *ЖЭТФ*. 1967. Т. 53. С. 1442–1444.

Никулин М. А., Бабин С. А., Дмитриев А. К. и др. Импульсивный волоконный лазер с распределенной обратной связью с низким уровнем частотных шумов // *Квант. электроника*. 2009. Т. 39. № 10. С. 906–910.

Andreasen J., Cao H. Spectral behavior of partially pumped weakly scattering random lasers // *Opt. Express*. 2011. V. 19. № 4. P. 3418–3433.

Babin S. A., Karalekas V., Podivilov E. V. et al. Turbulent broadening of optical spectra in ultralong Raman fiber lasers // *Phys. Rev. A*. 2008. V. 77. № 3, 033803.

de Matos C. J. S., Menezes L. S., Brito-Silva A. M. et al. Random Fiber Laser // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99, 153903.

El-Taher A. E., Harper P., Babin S. A. et al. Effect of Rayleigh-scattering distributed feedback on multiwavelength Raman fiber laser generation // *Optics Letters*. 2011. V. 36. № 2. P. 130–132.

Turitsyn S. K., Ania-Castañón J. D., Babin S. A. et al. 270-km ultralong Raman fiber laser // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103, 133901.

Turitsyn S. K., Babin S. A., El-Taher A. E. et al. Random distributed feedback fibre laser // *Nature Photonics*. 2010. V. 4.