

УДК 621.373.8

Ю.Н. КУЛЬЧИН, С.Б. ЗМЕУ, Е.П. СУББОТИН, А.И. НИКИТИН

Волоконные лазеры

Кратко описана история становления нового направления в лазерной технике – волоконных оптических квантовых генераторов (волоконных лазеров). Рассматриваются принципы работы волоконных лазеров, в том числе с непрерывным режимом работы. Описаны способы непрерывной генерации излучения и наиболее распространенные схемы волоконных лазеров, материалы, из которых изготовлены лазеры, их составные части. Затрагиваются технологические процессы изготовления составных частей, трудности, с которыми столкнулись разработчики. Обозначены проблемы генерации волоконных лазеров и методы их решения.

Ключевые слова: волоконный лазер, непрерывный волоконный лазер, активные световоды, резонатор, вынужденное комбинационное рассеяние.

Fiber lasers. Yu.N. KULCHIN, S.B. ZMEU, E.P. SUBBOTIN, A.I. NIKITIN (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

The history of development of the new direction in laser technology – fiber optic quantum generators (fiber lasers) – is briefly described in the paper. The principles of fiber laser operation are considered, including continuous wave laser regime. Methods of continuous wave laser operation and most common schemes of wave lasers, laser materials as well as their components are described. We touched on the technological processes of producing the component parts and difficulties which the designers have met. The problems of wave laser generation and their solution methods are set.

Key words: fiber laser, continuous fiber laser, active waveguides, resonator, compelled combinational dispersion.

Введение

Создание принципиально нового источника оптического излучения – лазера (Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Ч. Таунс, Нобелевская премия по физике 1964 г.) явилось событием, радикально повлиявшим на жизнь человеческого общества. Уникальность характеристик лазерного излучения послужила основой для широкого использования лазеров в различных областях научных исследований и наукоемких технологий. Существует огромное количество работ, посвященных исследованию всего многообразия лазеров и технологических конструкций на их основе. При этом лазерная физика и техника непрерывно развиваются. Так, конец XX–начало XXI в. характеризуются переходом к так называемой диодной накачке (накачке полупроводниковыми лазерными диодами) твердотельных лазеров. За работы по созданию полупроводниковых лазеров на гетеропереходах, способных работать при комнатной температуре и эффективно использоваться для накачки твердотельных лазеров, российский ученый Ж.И. Алферов удостоен Нобелевской премии по физике 2000 г.

*КУЛЬЧИН Юрий Николаевич – академик, директор института, ЗМЕУ Светлана Борисовна – кандидат технических наук, ученый секретарь, СУББОТИН Евгений Петрович – кандидат физико-математических наук, директор центра лазерных технологий, НИКИТИН Александр Иванович – технический директор центра лазерных технологий (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: director@iacp.dvo.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-02-90455 и Министерства образования и науки Российской Федерации по постановлению П218, договор № 02.G25.31.0116 от 14.08.2014 между Открытым акционерным обществом «Центр судоремонта “Дальзавод”» и Министерством образования и науки Российской Федерации.

Основные преимущества диодной накачки по сравнению с ламповой заключаются в том, что значительно снижается потребление энергии, повышаются срок службы и компактность лазерной системы, снижаются требования к системам охлаждения. Из лазеров с диодной накачкой в свою очередь наиболее популярными становятся волоконные лазеры. Создание волоконных лазеров, которые являются практически идеальными преобразователями световой энергии полупроводниковых лазерных диодов накачки в лазерное излучение с рекордным КПД, – результат многолетнего развития лазерной физики и волоконной оптики.

Впервые передачу лазерного излучения по оптическому волокну продемонстрировали Э. Снитцер и У. Хикс в 1961 г. [15]. Основные проблемы их устройства состояли в высоком затухании излучения при прохождении стеклянного волокна. Однако уже через несколько лет Снитцером был создан первый лазер, в качестве рабочей среды которого использовался волоконный световод, легированный неодимом [14]. В 1966 г. Ч. Као и Дж. Хокхам создали оптическое волокно, затухание в котором составляло около 20 дБ/км, в то время как иные существующие на то время волокна характеризовались затуханием более 1000 дБ/км [10]. В 2009 г. Ч. Као присуждена Нобелевская премия по физике за выдающийся вклад в исследование волоконных световодов для оптической связи. Сегодня прогресс в производстве оптических волокон сделал обыденным серийный выпуск волоконных световодов с потерями 0,2 дБ/км [2]. Приведенная на рис. 1 зависимость иллюстрирует стремительное развитие волоконных лазеров, которое началось с конца 1980-х годов [1, 6].

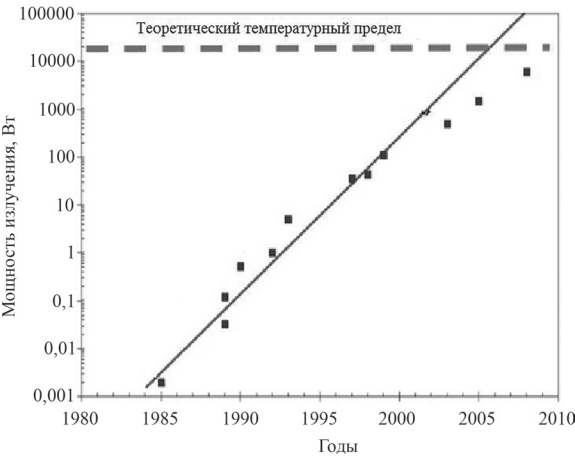


Рис. 1. Динамика роста выходной мощности непрерывных волоконных лазеров

Основные направления исследований были связаны с экспериментированием в использовании различных примесей в оптических волокнах для достижения заданных параметров генерируемого излучения. Детально исследовались непрерывный и импульсный режимы генерации волоконных лазеров и методы их реализации. Были определены преимущества волоконных лазерных систем, к которым следует отнести очень высокую (до 80 %) эффективность преобразования излучения накачки в когерентное лазерное излучение, достигнутую благодаря большой длине взаимодействия и малому диаметру световедущей сердцевинки

(обычно 4–20 мкм). Для обеспечения работы волоконных лазеров не требуется водяного охлаждения – достаточно воздушного; практически не зависящее от мощности излучения высокое качество выходного пучка, определяемое свойствами волоконного световода; простота и надежность волоконных лазеров (их резонатор может быть полностью выполнен на основе волоконных элементов, а световедущее волокно компактно свернуто в кольца и изолировано от внешней среды) – все это исключает необходимость юстировки и постоянного обслуживания лазерной системы и в целом повышает стабильность ее работы при различных внешних условиях.

Цель настоящей статьи – изложение принципов работы волоконных лазеров и обзор современного состояния исследований в этой динамично развивающейся области.

1. Принцип работы волоконного лазера

Волоконный лазер состоит из следующих основных конструктивных элементов: источника накачки (лазерные диоды), волоконного усилителя – активного световода,

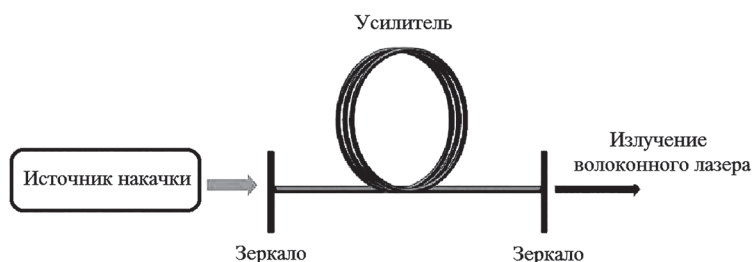


Рис. 2. Принципиальная схема волоконного лазера

легированного активным веществом, в котором происходит генерация, и резонатора, наиболее распространенные – резонаторы типа Фабри–Перо, кольцевые резонаторы, брэгговские волоконные решетки (рис. 2).

Ниже рассмотрим элементы, составляющие волоконный лазер.

1.1. Активные волоконные световоды

Высокая прозрачность кварца – основного материала для оптических волокон – обеспечивается насыщенными состояниями энергетических уровней атомов. Примеси, вносимые легированием, превращают кварц в поглощающую среду. Подобрать длину волны и мощность излучения накачки, в такой среде можно создать инверсное состояние заселенностей энергетических уровней. В качестве усиливающей среды используются световоды на основе кварцевого стекла, легированные редкоземельными элементами (РЗЭ), такими как Nd, Yb, Er, Ho, Tm. Использование в качестве активных легирующих добавок ионов лантаноидов или редкоземельных элементов обусловлено специфическими оптическими свойствами данных элементов, для которых характерна достройка внутренней f-оболочки, когда все внешние оболочки уже заполнены. Наличие незаполненной внутренней оболочки приводит к появлению ярко выраженной дискретной структуры электронных переходов, которая и обуславливает применение ионов редкоземельных элементов в качестве активной примеси.

Применение активных ионов редкоземельных элементов для легирования волоконных световодов на основе кварцевого стекла определяется следующими факторами: во-первых, активный ион должен иметь излучательный переход в ближней ИК области спектра, где кварцевое стекло наиболее прозрачно, и, во-вторых, в кварцевом стекле энергия фононов составляет $400\text{--}1100\text{ см}^{-1}$.

Наличие энергетических уровней с малым энергетическим зазором внутри оптического перехода приводит к безызлучательной рекомбинации, препятствуя появлению люминесценции. В связи с этим в качестве активной примеси волоконных световодов на основе кварцевого стекла наибольшее распространение получили следующие РЗЭ: Nd, Yb, Er, Ho, Tm, люминесцентные характеристики которых приведены ниже [4]:

Активный ион	Область люминесценции, мкм
Nd ³⁺	0,92–0,94
Ho ³⁺	1,05–1,1
Er ³⁺	1,34
Tm ³⁺	1,9–2,1
Yb ³⁺	0,98–1,16

Активные ионы РЗЭ вводятся как в сердцевину кварцевого волоконного световода, так и в его отражающую оболочку, если в ней распространяется значительная часть оптической мощности каналируемого излучения.

В производстве волоконных световодов для активной среды разработан ряд технологических процессов: MCVD (модифицированное химическое осаждение из газовой фазы), OVD (внешнее осаждение из газовой фазы), VAD (аксиальное осаждение из газовой

фазы), осаждение с использованием плазмы PCVD и SPCVD. Для введения активной примеси в материал световода наибольшее распространение нашли метод пропитки, когда непроплавленный пористый материал сердцевины пропитывается раствором соли активной добавки, и легирование из летучих соединений.

Следует отметить, что максимальная концентрация активных ионов в матрице кварцевого стекла относительно невелика ($\sim 10^{18} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и ограничивается их растворимостью, а также возникновением кооперативных эффектов. Поскольку длина активной среды волоконного лазера может достигать нескольких десятков метров, естественным требованием к активным волоконным световодам является наличие достаточно низких нерезонансных оптических потерь. Приемлемое значение потерь, как правило, составляет 5–20 дБ/км. На рис. 3 представлен пример спектра оптических потерь для волоконного световода, легированного ионами Yb^{3+} с концентрацией $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

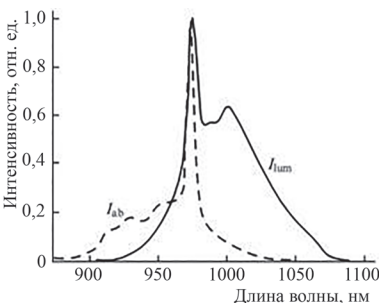


Рис. 3. Спектры поглощения (I_{ab}) и люминесценции (I_{lum}) волоконного световода, легированного ионами Yb^{3+}

Создание волоконных лазеров потребовало разработки специальных волоконных световодов с двойной оболочкой (рис. 4) [4]. В качестве активной среды волоконного лазера используется одномодовая кварцевая сердцевина, легированная активной редкоземельной примесью, а также примесью, формирующими профиль показателя преломления. Данная сердцевина окружена внутренней оболочкой из кварцевого стекла и внешней оболочкой с показателем преломления, пониженным в отношении показателя преломления кварцевого стекла.

Внутренняя оболочка вместе с внешней образуют многомодовый световод, по которому распространяется излучение накачки. Оболочка имеет типичный

размер $0,1 \div 1 \text{ мм}$. При распространении по многомодовому световоду излучение накачки поглощается ионами редкоземельной примеси, вызывая люминесценцию, которая при наличии положительной обратной связи может развиваться в лазерную генерацию.

В качестве источников накачки волоконных лазеров используются как индивидуальные лазерные диоды, так и системы лазерных диодов (матрицы и линейки) с волоконным выходом. Ряд фирм производит лазерные модули накачки с выходной мощностью до нескольких сотен ватт. Выходной волоконный световод таких модулей имеет сердцевину диаметром $\sim 200 \text{ мкм}$ и больше и числовую апертуру около 0,2.

Вполне очевидно, что эффективный ввод излучения накачки в сердцевину активного световода диаметром $5 \div 20 \text{ мкм}$ и числовой апертурой $\sim 0,1$ представляет собой весьма сложную проблему и требует разработки специальной конструкции световода. Поэтому для обеспечения эффективной связи мод внутренней оболочки с активированной сердцевиной необходимо использовать волоконные световоды с некруглой формой внутренней

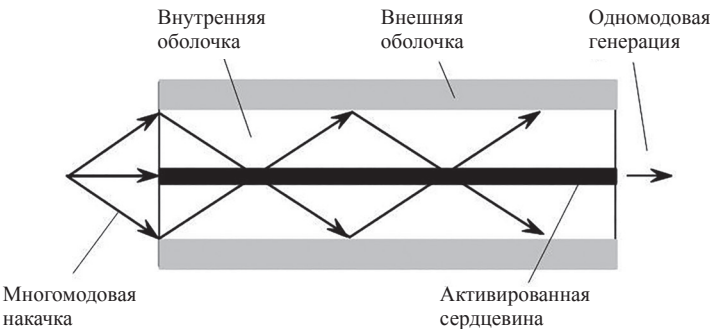
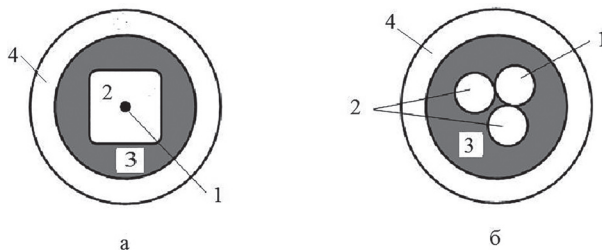


Рис. 4. Схема накачки волоконного лазера

оболочки – в противном случае большая доля мощности накачки распространяется в модах, не пересекающих область сердцевины.

На рис. 5а показана схема так называемого волоконного световода с двойной оболочкой [1]. Его сердцевина, содержащая примесь редкоземельного элемента, окружена некруглой первой оболочкой из чистого кварцевого стекла диаметром в несколько сотен микрометров.

Рис. 5. Схемы возбуждения активного волоконного световода мощными системами диодной накачки: а) 1 – сердцевина, содержащая редкоземельный элемент, 2 – первая оболочка, 3 – вторая оболочка, 4 – защитная оболочка; б) 1 – активный световод, 2 – пассивные световоды накачки, 3 – общая вторая оболочка, 4 – защитная оболочка



Эта первая оболочка, в свою очередь, окружена второй оболочкой, обычно из полимерного материала с показателем преломления более низким, чем у кварцевого стекла. Таким образом, первая оболочка является многомодовым световодом, который эффективно возбуждается излучением накачки благодаря большому поперечному размеру и высокой числовой апертуре. При определенных значениях диаметров сердцевины и первой оболочки и длины световода излучение накачки эффективно возбуждает ионы редкоземельных элементов.

Для наиболее распространенного типа волоконных световодов с двойной оболочкой в качестве материала внешней оболочки используют силиконовую резину, обеспечивающую числовую апертуру многомодового световода $NA = 0,38$, и тефлон марки AF, позволяющий увеличить числовую апертуру до значения 0,6.

К недостаткам использования силиконового покрытия следует отнести высокий уровень оптических потерь излучения накачки – 50 дБ/км и более. Использование тефлона позволяет получать световоды с потерями в оболочке ~ 10 дБ/км. Кроме того, тефлон обладает высоким пропусканием для УФ-излучения, что дает возможность записывать решетки показателя преломления без удаления полимера. Однако это покрытие имеет небольшую толщину ($\sim 10\text{--}20$ мкм), что увеличивает вероятность механического повреждения световода.

Исследования влияния различных профилей сечения внутренних оболочек активного световода на эффективность поглощения излучения накачки [3] показали, что любая некруглая форма внутренней оболочки позволяет получить эффективность поглощения накачки, близкую к 100 %.

Такие конструкции волоконного световода дают хорошие результаты при создании волоконных лазеров средней мощности (~ 100 Вт). Для мощных волоконных лазеров предложена конструкция световода, в которой излучение накачки распространяется по дискретным волоконным световодам из кварцевого стекла, находящимся в оптическом контакте с активным световодом. При этом все световоды окружены единой оболочкой из полимерного материала (рис. 5б) [1]. В такой структуре осуществляется распределенная накачка активного световода через его боковую поверхность за счет эванесцентных волн, проникающих из световода накачки в активный световод. При этом число пассивных световодов, передающих излучение накачки, может быть значительно больше трех. Излучение накачки может вводиться через оба торца пассивного световода, поэтому число возможных точек ввода излучения накачки равно удвоенному числу пассивных световодов. В литературе такую структуру обозначают аббревиатурой GTW (Gradually Transferred Wave). Еще одним вариантом увеличения взаимодействия излучения лазерных диодов с активной средой является использование активного световода с микроструктурированной

оболочкой [9]. Характерное значение числовой апертуры таких световодов составляет 0,5, что, в отличие от традиционных световодов такого же диаметра, позволяет увеличить мощность накачки в несколько раз при использовании идентичных источников излучения.

Известны и другие способы ввода излучения накачки в активный волоконный световод – например, с использованием объемных элементов, таких как линзы и зеркала. Но в этом случае конструкция лазера не является волоконной.

2. Резонаторы волоконных лазеров

2.1. Резонаторы типа Фабри–Перо

В первых волоконных лазерах для создания резонатора Фабри–Перо применялись диэлектрические зеркала (рис. 6а). Использование дихроичных зеркал позволяло делать их практически прозрачными на длине волны накачки и при этом сохранять высокий коэффициент отражения на длине волны генерации. Вначале активное волокно размещали между зеркалами резонатора, однако такую конструкцию было сложно юстировать. Частичное решение проблемы состояло в нанесении диэлектрических зеркал непосредственно на торцы волокна, что, однако, повышало риск их повреждения мощным сфокусированным излучением накачки и ужесточало требования к обработке торцов оптоволокна. Поэтому проблемы юстировки и защиты зеркал стали решать применением WDM-ответвителей (рис. 6б).

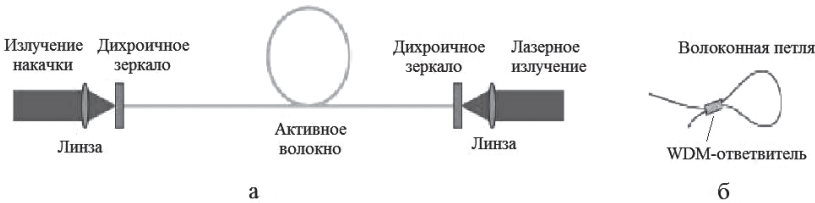


Рис. 6. Схема волоконного лазера с интерферометром Фабри–Перо (а) и зеркала на основе петли из волоконного световода и WDM-ответвителя (б)

Зеркала резонатора волоконного лазера обеспечивают многократное прохождение излучения лазера через усиливающую среду (активный световод), и если достигается порог генерации (коэффициент усиления превышает суммарные потери при двойном проходе между зеркалами), мощность излучения резко возрастает. Тем не менее мощность излучения не может расти до бесконечности, и ее величина стабилизируется на некотором стационарном уровне, определяемом эффектом насыщения: когда усиление излучения становится равным его потерям в резонаторе. Следует отметить, что если зеркала резонатора нанесены на торец активного световода, то, в отличие от других лазерных источников излучения, в волоконном лазере отсутствуют дифракционные потери мощности.

2.2. Кольцевые волоконные резонаторы

В волоконных лазерах, чаще всего импульсных, применяют специальные конструкции волоконных кольцевых резонаторов (рис. 7). Простейшей конструкцией кольцевого резонатора является соединение обоих концов WDM-ответвителя с активным волокном (рис. 7а). Особенностью волоконных кольцевых резонаторов является пропускание света лишь в одном направлении независимо от частоты, за исключением некоторых резонансных частот.

Обычно в кольцевых резонаторах также применяются дополнительные элементы – изоляторы и поляризаторы, обеспечивающие сохранность поляризации излучения и однонаправленность его распространения.

Для импульсных волоконных лазеров с синхронизацией мод используют так называемые резонаторы в форме восьмерки (рис. 7б) (англ. figure-of-eight lasers, названные так за форму соединения волокна). Обе петли такого резонатора служат в качестве петель Саньяка [5]. Активное волокно размещается несимметрично по отношению к петлям резонатора, что создает нелинейную разность фаз между встречными волнами и обеспечивает синхронизацию мод при превышении некоторой пороговой мощности накачки.

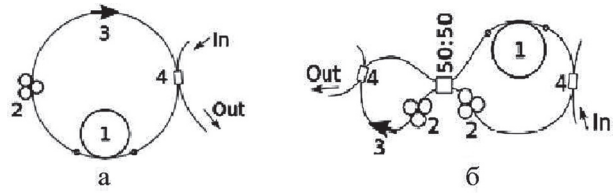


Рис. 7. Схемы кольцевых волоконных резонаторов: а) обычный кольцевой резонатор, встроенный в волоконный лазер: *In* – излучение накачки, *Out* – выходное излучение, 1 – активное волокно, 2 – поляризатор, 3 – оптический изолятор, 4 – WDM-ответвитель; б) волоконный лазер с кольцевым резонатором в виде восьмерки: *In* – излучение накачки; *Out* – выходное излучение, 1 – активное волокно, 2 – поляризатор, 3 – оптический изолятор, 4 – WDM-ответвитель, 50 : 50 – делитель 50 / 50

2.3. Резонатор на основе волоконных брэгговских решеток

В последнее время во многих волоконных лазерах в качестве зеркал резонаторов используют волоконные брэгговские решетки (ВОБР), сформированные непосредственно в активном световоде или в нелегированном волоконном световоде, сваренном с активным световодом

На рис. 8 показана схема волоконного лазера с брэгговскими зеркалами. Резонатор внутри оптического волокна создается парами внутриволоконных брэгговских решеток – участков оптического волновода, в которых образуется структура с модулированным показателем преломления.

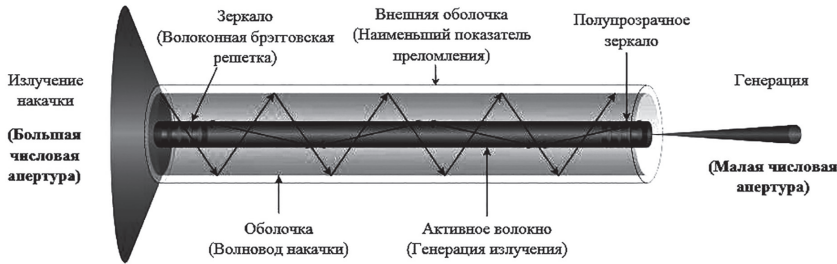


Рис. 8. Схема волоконного лазера с зеркалами на основе ВОБР

Волоконная брэгговская решетка представляет собой отрезок оптического волокна, в сердцевине которого с помощью ультрафиолетового излучения создано периодическое изменение показателя преломления с амплитудой $\sim 10^{-5} \div 10^{-3}$ со штрихами, ориентированными по нормали к оси световода, и периодом порядка длины волны распространяющегося излучения. По своей сути ВОБР представляет собой одномерный фотонный кристалл, эффективно отражающий излучение с длиной волны, близкой к брэгговской длине волны кристалла. Основными характеристиками ВОБР являются: период модуляции показателя преломления Λ , амплитуда наведенного изменения показателя преломления δn , число штрихов решетки N_p и ее длина L .

На рис. 9 приведен экспериментально измеренный спектр пропускания ВОБР со следующими параметрами: $L = 5$ мм, $\delta n = 8 \times 10^{-4}$, $\Lambda = 0,4$ мкм [4]. Как видно, ВОБР обеспечивает коэффициент отражения $R \sim 0,99$ на длине волны 1,136 мкм при ширине спектра отражения $\sim 0,4$ нм, что демонстрирует возможность применения ВОБР в качестве эффективных отражателей для волоконных лазеров.

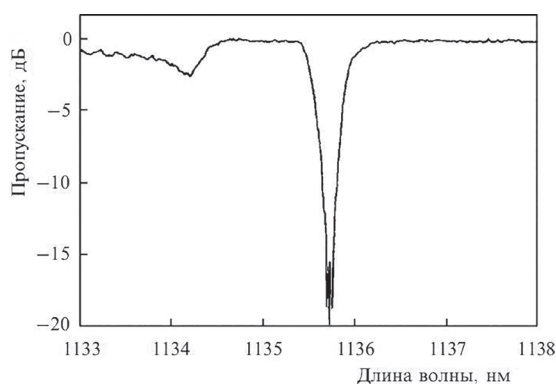


Рис. 9. Спектр пропускания ВОБР [4]

помощью многомодовых лазерных диодов с волоконным выходом (рис. 10). Селективность по частоте брэгговских решеток позволяет получить лазер, работающий на одной продольной моде с узкой частотной полосой генерации.

Таким образом, варьируя параметры ВОБР, можно создавать полностью волоконные зеркала с разной шириной спектра отражения ($0,05 \div 5$ нм) и различными коэффициентами отражения ($1 \div 99,9$ %), тем самым формировать полностью волоконный резонатор, рассчитанный на нужную длину волны и нужной добротности. Поэтому с развитием технологии производства активных световодов с двойной оболочкой начали создавать мощные одномодовые полностью волоконные лазеры с накачкой в первую оболочку с помощью

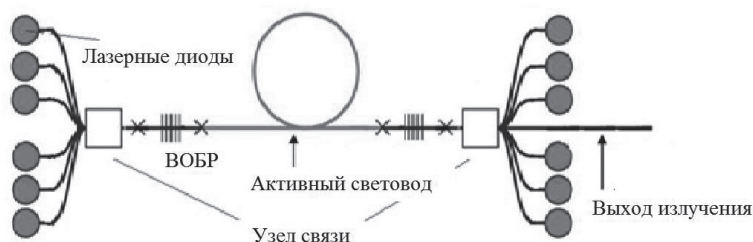


Рис. 10. Схема полностью волоконного лазера с накачкой от массива многомодовых лазерных диодов

Определенную опасность для ВОБР показателя преломления представляет высокая температура окружающей среды. Хотя в целом температура разрушения решетки существенно зависит от метода ее создания и материала волокна, чаще всего критические температуры для эксплуатации волоконных лазеров на основе ВОБР лежат в диапазоне $300\text{--}600$ °С.

3. Непрерывные волоконные лазеры

3.1. Волоконные лазеры на основе активных световодов, легированных ионами редкоземельных элементов

В последнее время непрерывные волоконные лазеры начинают находить широкое применение в различных областях науки и техники, поскольку, в противовес традиционно используемым твердотельным лазерам, они оказываются более компактными, надежными и температурно стабильными. Действительно, образующийся при оптической накачке активного волокна тепловой поток оказывается распределенным вдоль большой длины световода. Это позволяет эффективно рассеивать тепло в окружающую среду и значительно уменьшить риск, связанный с тепловым повреждением, что особенно важно при непрерывной генерации излучения.

Использование в волоконных лазерах многооболочечных конструкций и одномодовых активных световодов позволяет не только добиться высокой эффективности преобразования излучения накачки в лазерное излучение, но и обеспечить высокое качество последнего. В ряде недавних публикаций [4, 7, 8, 11] сообщается о создании лазеров с мощностью

одномодового излучения более 100 Вт и многомодовых лазеров мощностью ~ 1000 Вт. Достигнуты значительные результаты по спектральной перестройке генерируемого волоконными лазерами излучения в областях 1, 1,5 и 2 мкм (см. таблицу) [11].

Сравнительные характеристики перестраиваемых волоконных лазеров

Примесь	Область перестройки, нм	Максимальная мощность излучения, Вт	КПД, %	Порог, Вт	Длина активного световода, м	Излучение накачки, нм	Материал матрицы активного световода
Yb	1070–1106	6,6	24	1,6	30	915	Алюмино-силикат
Nd	1057–1118	0,83	15	0,2	5	808	– » –
Tm	1860–2090	7,0	26	5	3,8	787	– » –
Er–Yb	1533–1600	6,7	28	0,5	3,3	913	Фосфоро-силикат
Ho–Yb	1300–2150	0,85	8	5	5,4	676	– » –

Из таблицы видно, что волоконные лазеры на основе активных световодов, легированных Er–Yb и Tm, имеют максимальный КПД и хорошую мощность излучения.

3.2. Волоконные лазеры на основе вынужденного комбинационного рассеяния излучения

Описанные выше волоконные лазеры на основе активных световодов, легированных ионами редкоземельных элементов, способны эффективно генерировать излучение лишь в определенных областях спектра, не заполняя весь ближний ИК-диапазон. Для решения этой проблемы было предложено использовать явление вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волоконных световодах, которое позволяет создавать эффективные преобразователи длины волны излучения лазеров и получать лазерную генерацию практически на любой, заранее заданной, длине волны ближнего ИК спектрального диапазона [4].

Известно, что при освещении вещества лазерным излучением на выходе наблюдаются волны рассеянного излучения, частоты которых имеют стоксовый и антистоксовый сдвиг относительно частоты излучения лазера на некоторую величину, характерную для данного вещества [12]. Этот эффект, обусловленный взаимодействием излучения с колебательными уровнями энергии молекул вещества, называется комбинационным рассеянием света.

При увеличении мощности вводимого в вещество излучения (P_L), когда происходит превышение некоторого порогового ее значения, наблюдается эффект интенсивного преобразования мощности излучения лазера в излучение более низкочастотного спектра (стоксово рассеяние) (P_s) (рис. 11), который имеет насыщение при достижении некоторого характерного значения мощности P_{sat} . Такой процесс, являющийся следствием нелинейно-оптического взаимодействия излучения со средой, получил название вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) излучения [12].

Поскольку антистоксово рассеяние определяется молекулами, находящимися в возбужденном состоянии, а при не очень высоких температурах населенность первого колебательного уровня невелика (при комнатной температуре колебательная частота

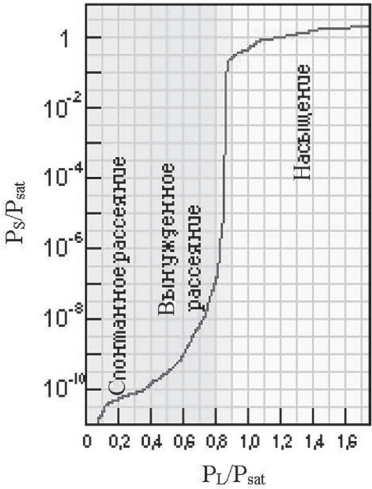


Рис. 11. Характер зависимости эффективности ВКР-преобразования лазерного излучения в стоксову волну

$\sim 1000 \text{ см}^{-1}$ и на первом колебательном уровне находится всего 0,7 % молекул), поэтому интенсивность антистоксова ВКР излучения мала.

Протяженные волоконные световоды при использовании явления вынужденного комбинационного рассеяния позволяют эффективно преобразовывать лазерное излучение накачки в излучение более низких частот. Впервые ВКР лазерного излучения в волоконном световоде наблюдали в 1971 г. [16].

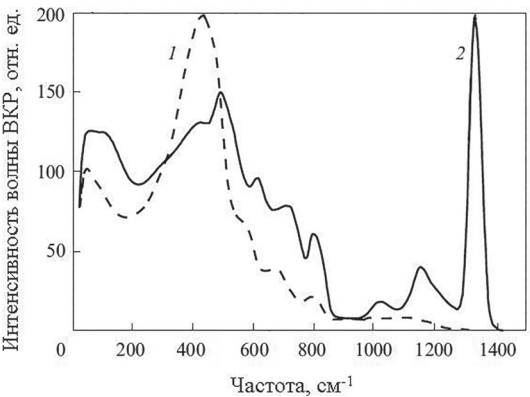


Рис. 12. Спектр ВКР-рассеяния в волоконном световоде с сердцевинной из германосиликатного (1) и фосфоросиликатного (2) стекла [4]

для получения ВКР. Само кварцевое стекло, как некристаллический материал, обладает широким спектром комбинационного рассеяния с максимумом вблизи частоты 440 см^{-1} , и добавление к нему примеси GeO_2 слабо изменяет форму спектра ВКР-излучения. Соответствующий спектр ВКР для световода с сердцевинной из германосиликатного и фосфоросиликатного стекла показан на рис. 12.

Первоначально эффект ВКР-усиления был использован для создания усилителей излучения в телекоммуникационных линиях связи. На рис. 13 приведена схема ВКР- (или рамановского) усилителя, позволяющего осуществлять преобразование энергии излучения накачки в энергию распространяющейся в волоконном световоде сигнальной волны [12].

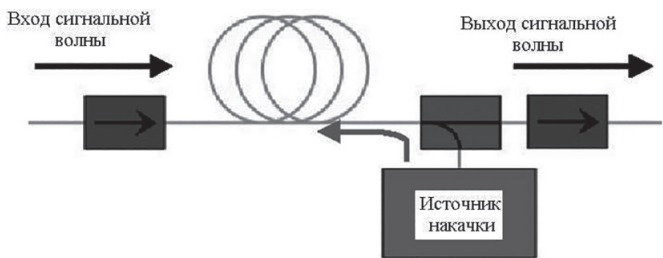


Рис. 13. Схема ВКР-усилителя, преобразующего энергию излучения накачки в сигнальную волну

Если поместить активную усиливающую среду между зеркалами резонатора, то можно получить ВКР-лазер. Применение волоконных ответвителей и брэгговских решеток позволило существенно упростить конструкцию ВКР-лазера и сделать его приемлемым для практического использования. Еще более упростить конструкцию ВКР-лазера позволило использование в качестве активной среды световода с сердцевинной, легированной оксидом фосфора. Как видно из рис. 12, такой световод имеет стоксов сдвиг по частоте 1330 см^{-1} , что в 3 раза больше, чем у германосиликатного световода.

Значительный прогресс в области разработки ВКР-лазеров был инициирован их применением в качестве многокаскадных источников накачки рамановских усилителей [4, 12].

На рис. 14 представлена схема многокаскадного ВКР-лазера, который состоит из волоконного световода и набора брэгговских решеток показателя преломления, соответствующих стоксовым сдвигам частоты излучения, распространяющегося в материале световода.

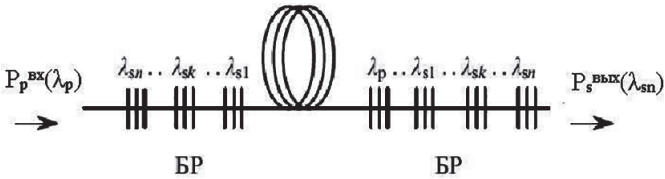


Рис. 14. Схема многокаскадного ВКР-лазера: $P_p^{BK}(\lambda_p)$ – мощность излучения накачки на входе; $P_s^{BKX}(\lambda_{sn})$ – мощность стоксовой волны на выходе n-го каскада ВКР-лазера; БР – волоконно-оптические брэгговские решетки

Решетки, настроенные на промежуточные длины волн, имеют коэффициенты отражения, близкие к 100 %.

В качестве источников накачки чаще всего используют иттербиевые волоконные лазеры вследствие их высокой эффективности генерации и широкого спектрального диапазона излучения.

Простейшими типами волоконных ВКР-лазеров являются однокаскадные, поскольку используют лишь один каскад преобразования излучения накачки. Световод с сердцевинной из германосиликатного стекла с частотным спектром, как на рис. 12, преобразует излучение иттербиевого волоконного лазера в излучение с длиной волны в области 1,1–1,22 мкм. В работе [13] исследуется преобразование излучения накачки иттербиевого лазера с длиной волны 1,09 мкм в излучение сигнальной волны $\lambda = 1,15$ мкм в волоконном световоде длиной 500 м с потерями 0,8 дБ/км на длине волны 1,06 мкм, в котором созданы брэгговские решетки с коэффициентом отражения 20 %. Эффективность преобразования излучения иттербиевого волоконного лазера составила ~ 70 %. Использование в качестве источника накачки неодимового волоконного лазера позволяет создавать ВКР-лазеры с длиной волны излучения в области 1,24 мкм с эффективностью преобразования около 70 % [3].

Многокаскадные волоконные ВКР-лазеры используют для получения излучения с длинами волн более 1,35 мкм. В частности, применение четырехкаскадного ВКР-лазера на основе германосиликатного световода позволило генерировать излучение в диапазоне 1,35–1,45 мкм при накачке иттербиевым волоконным лазером. Однако увеличение числа каскадов значительно усложняет конструкцию лазера, так как растет число пар брэгговских решеток, спектральные характеристики которых необходимо выдерживать с высокой точностью. Кроме того, брэгговские решетки вносят избыточные потери (около 0,05 дБ на решетку), что снижает эффективность преобразования излучения. В связи с этим в ВКР-лазерах были использованы световоды с фосфоросиликатной сердцевиной, в которых наблюдается усиление не только на частоте стоксова сдвига 1330 см⁻¹, но и на частоте со спектральным сдвигом 440 см⁻¹, соответствующим максимуму ВКР в чистом плавленом кварце – основном материале световода. Это позволило одновременно использовать два различных спектральных сдвига в одном и том же волоконном световоде. В результате в работе [7] реализован ВКР-лазер с длиной волны излучения 1,407 мкм, использующий одно преобразование со сдвигом частоты 1330 см⁻¹ и два преобразования со сдвигом частоты 440 см⁻¹. Максимальная мощность преобразованного излучения составила 1 Вт при

эффективности преобразования 25 %. Аналогичная конфигурация лазера использована для создания ВКР-лазера на длину волны в области 1,43 мкм [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дианов Е.М. Волоконные лазеры // УФН. 2004. Т. 174, № 10. С. 1139–1142.
2. Дианов Е.М. На пороге пета-эры // УФН. 2013. Т. 183, № 5. С. 511–518.
3. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Бубнов М.М. и др. Непрерывный высокоэффективный ВКР-лазер ($\lambda = 1,24$ мкм) на фосфосиликатном световоде // Квантовая электроника. 1999. Т. 29, № 2. С. 97–100.
4. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. 2004. Т. 34, № 10. С. 881–900.
5. Малыкин Г.Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения // УФН. 2000. Т. 170. С. 1325–1349.
6. Dawson J.W. Fiber Lasers: Technology, Applications and Associated Laser Safety // Presentation to LSO (Sept. 11, 2012). – <http://www-conf.slac.stanford.edu/lsow/lsow2012-presentations/JDawson-FiberLasers.pdf>
7. Dianov E.M., Bufetov I.A., Bubnov M.M. et al. Continuous-Wave highly Efficient Phosphosilicate Fiber-Based Raman Laser ($\lambda = 1,24$ μm) // Opt. Lett. 2000. Vol. 25, N 6. P. 402–404.
8. Dianov E.M., Kurkov A.S., Medvedkov O.I. et al. Raman Fiber Source for the 1,6–1,75 μm Spectral Region // Laser Phys. 2003. Vol. 13. P. 397–402.
9. Furusawa K., Malinowski A., Price J.H.V. et al. Cladding pumped Ytterbium-doped laser with holey inner and outer cladding // Optics Express. 2001. Vol. 9, N 13. P. 714–720.
10. Kao K.C., Hockham G.A. Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies // Proc. IEE. 1966. Vol. IEE 133. P. 1151–1158.
11. Nilsson J., Clarkson W.A., Selvas R. et al. High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers // Optical Fiber Technology. 2004. N 10. P. 5–30.
12. Raman Amplifiers for Telecommunications 1: Physical Principles (Springer Series in Optical Sciences) (v. 1). – <http://www.amazon.com/Raman-Amplifiers-Telecommunications-Physical-Principles/dp/0387007512>
13. Rini M., Cristiani I., Degiorgio V. et al. Experimental and numerical optimization of a fiber Raman laser // Opt. Commun. 2002. Vol. 203, N 1/2. P. 139–144.
14. Snitzer E. Glass lasers // Appl. Opt. 1966. Vol. 5, N 10. P. 1487–1499.
15. Snitzer E. Optical Maser Action on Nd^{+3} in Barium Crown Glass // Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7. P. 444–446.
16. Stolen R.H., Ippen E.P. Raman gain in glass optical waveguides // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 22. P. 6–8.