

Список литературы

1. Хохлов Р В *Нелинейные процессы в оптике* (М.: Наука, 1970)
2. Вавилов С И *Микроструктура света; исследования и очерки* (М.: Изд-во АН СССР, 1950)

PACS numbers: 42.55.Wd, 52.55.Ye

Волоконные лазеры

Е.М. Дианов

1. Введение

Создание волоконных лазеров — одно из наиболее ярких достижений квантовой электроники.

Первый волоконный лазер был создан Снитцером в 1963 г. [1]. В качестве активного элемента использовался стеклянный волоконный световод, содержащий ионы неодима. Однако в то время это направление лазерной физики не получило развития и понятно почему. Создание современных высокоэффективных и компактных волоконных лазеров стало возможным только благодаря разработке в начале 70-х годов стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями (≤ 1 дБ км⁻¹ в ближней ИК-области) и последующему бурному развитию волоконно-оптической связи. Последнее обстоятельство стало решающим фактором в разработке и промышленном производстве долгоживущих и высокоярких лазерных диодов и целого набора специальных волоконных световодов. Среди них — световоды, легированные редкоземельными элементами, нелинейные, фоточувствительные, инфракрасные и ряд других. Эта элементная база и явилась основой для создания волоконных лазеров. Особо следует отметить разработку технологии записи в фоточувствительных световодах брэгговских решеток показателя преломления, используемых в качестве распределенных отражателей в волоконных лазерах (см., например, [2]).

Вместе с тем, развитие волоконно-оптических систем связи с высокой скоростью передачи информации (более 1 Гбит с⁻¹) потребовало создания эффективных волоконных лазеров и усилителей, совместимых с такими системами. Этим объясняются проведение широких исследований и большие финансовые вложения для решения данной проблемы.

Принципиальное преимущество волоконных световодов как лазерной среды по сравнению с объемными активными средами заключается в низких оптических потерях, большой длине взаимодействия и малом диаметре световедущей сердцевинки (обычно 4–20 мкм), что обеспечивает высокую эффективность накачки излучением лазерных диодов. Большое отношение площади поверхности волоконного световода (диаметром ~ 100 мкм) к его объему радикально решает проблему теплоотвода, позволяя создавать волоконные лазеры с выходной мощностью ~ 1 кВт и воздушным охлаждением. Исключительно важным для многих применений является высокое качество выходного пучка волоконных лазеров. Использование внутриволоконных брэгговских решеток показателя преломления в качестве распределенных отражателей обеспечивает компактность и высокую стабильность волоконных лазеров. Указанные обстоятельства привели к разработке разнообразных

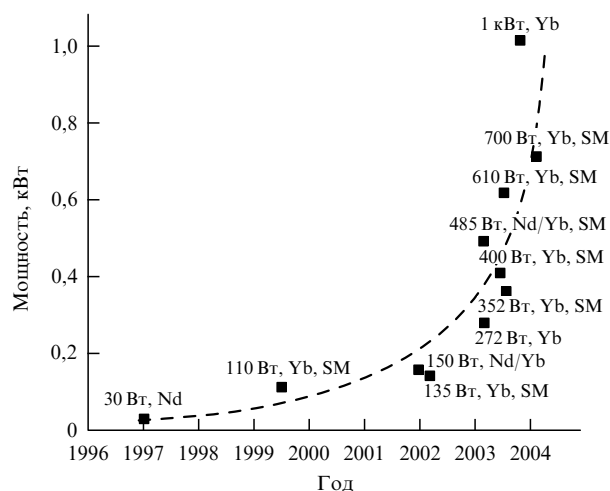


Рис. 1. Рост выходной мощности непрерывных волоконных лазеров (SM — одномодовый лазер).

волоконных лазеров, включая непрерывные мощные лазеры, пико- и фемтосекундные лазеры, одностолотные лазеры, ВКР-лазеры и ряд других.

В данной статье я остановлюсь лишь на недавних результатах по созданию мощных непрерывных волоконных лазеров и лазеров, работающих на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния в волоконных световодах (ВКР-лазеры).

2. Мощные непрерывные волоконные лазеры

За последние годы наблюдается исключительно быстрый прогресс в создании непрерывных волоконных лазеров большой мощности (см., например, [3, 4] и ссылки в них). Рисунок 1 демонстрирует рост выходной мощности лазеров с длиной волны генерации около 1 мкм (Yb и Nd), достигнутый за последние 8 лет. Видно, что за это время мощность увеличилась с 30 Вт до ~ 1 кВт. Такой быстрый прогресс в росте выходной мощности объясняется, прежде всего, разработкой улучшенной структуры активных волоконных световодов и успехами в создании систем накачки на основе лазерных диодов.

Принципиальная схема волоконного лазера приведена на рис. 2а. В качестве активного волоконного световода (1а) используются световоды на основе кварцевого стекла с добавками редкоземельных элементов, таких как Nd, Yb, Er, Ho, Tm. В настоящее время для создания мощных лазеров наибольшее распространение получили волоконные световоды с Yb, обеспечивающие наибольшую эффективность генерации на волне с $\lambda \cong 1,1$ мкм. Большой интерес проявляется к лазерам, генерирующим излучение в спектральной области 1,5–2,0 мкм, которое считается безопасным для глаз. В этом случае используются волоконные световоды с добавками Er/Yb (1,5–1,6 мкм), Tm и Ho (~ 2,0 мкм).

Весьма перспективными представляются в настоящее время и неодимовые волоконные лазеры, генерирующие в спектральной области вблизи 0,9 мкм. Это связано, прежде всего, с возможностью получения мощного излучения в синей области спектра путем умножения частоты излучения неодимового лазера. Основная проблема создания такого лазера — подавление генерации на длине волны 1,06 мкм, соответствующей более сильному переходу иона неодима. В работе [5] это

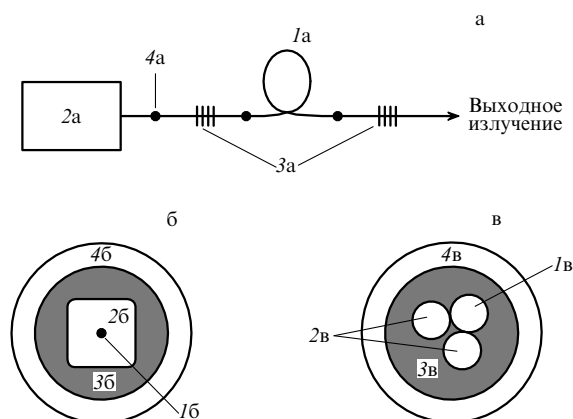


Рис. 2. (а) Принципиальная схема волоконного лазера: 1а — активный волоконный световод, 2а — модуль накачки, 3а — внутриволоконные брэгговские решетки, 4а — точки сварки волоконных световодов. (б, в) Различные сечения волоконного световода: 1б — сердцевина волоконного световода, содержащая редкоземельный элемент, 2б — первая оболочка, 3б — вторая оболочка, 4б — защитная оболочка, 1в — активный световод, 2в — пассивные световоды, 3в — общая вторая оболочка, 4в — защитная оболочка.

удалось сделать путем выбора конструкции неодимового световода, обеспечивающей высокие оптические потери световода на длине волны 1,06 мкм. В результате впервые получена генерация излучения с длиной волны 0,92 мкм и выходной мощностью 0,5 Вт при мощности накачки 2,0 Вт при комнатной температуре.

Существенное значение имеет состав стекла сердцевины активного световода, от которого зависят спектрально-люминесцентные характеристики редкоземельных элементов, определяющие, в частности, длину волны излучения накачки. В работе [6] подробно исследованы спектрально-люминесцентные характеристики иона Yb в алюмосиликатных и фосфосиликатных волоконных световодах, а также генерационные характеристики соответствующих волоконных лазеров. От состава стекла сердцевины световода зависит также фоточувствительность световода. Достаточно высокая фоточувствительность позволяет записывать брэгговские решетки (зеркала резонатора лазера 3а) непосредственно в активном световоде. В противном случае брэгговские решетки записываются в специальном фоточувствительном световоде и привариваются (4а) к активному световоду.

Источниками накачки волоконных лазеров используются как индивидуальные лазерные диоды, так и системы лазерных диодов (матрицы, линейки) с волоконным выходом. Ряд фирм производит лазерные модули накачки с выходной мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен ватт. Выходной волоконный световод таких модулей имеет сердцевину диаметром ~ 200 мкм и выше и числовую апертуру около 0,2. Ясно, что эффективный ввод излучения накачки в сердцевину активного световода диаметром 5–20 мкм и числовой апертурой ~ 0,1 представляет собой непростую проблему и требует разработки специальной конструкции световода.

На рисунке 2б показана структура так называемого световода с двойной оболочкой [7]. Сердцевина 1б, содержащая редкоземельный элемент, окружена первой оболочкой из чистого кварцевого стекла диаметром в несколько сотен микрометров. В свою очередь первая

оболочка окружена второй оболочкой, обычно из полимерного материала с показателем преломления, значительно 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.

Такая конструкция волоконного световода дает хорошие результаты для создания 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 (пассивные световоды), находящимся в оптическом контакте с активным световодом, при этом все световоды окружены единой отражающей оболочкой из полимерного материала. В этой структуре осуществляется распределенная накачка активного световода через его боковую поверхность, при этом число пассивных световодов может быть 1, 2, 3 и более. Излучение накачки может вводиться через оба торца пассивных световодов, поэтому число возможных точек ввода излучения накачки равно удвоенному числу пассивных световодов. Это расширяет возможность осуществления мощной накачки волоконных лазеров. В иностранной литературе такая структура волоконного световода известна под названием GTWave [8]. В нашей работе [9], посвященной разработке и исследованию мощных волоконных лазеров, использована структура световода, изображенная на рис. 2в. При имеющейся мощности накачки 90 Вт получена мощность генерации на волне 1,07 мкм, равная 60 Вт, т.е. КПД составляет около 65 %.

В литературе описаны и другие способы ввода излучения накачки в активный волоконный световод с использованием объемных элементов, таких как линзы и зеркала. В этом случае конструкция лазера не является целиком волоконной.

Несколько слов о применениях мощных непрерывных волоконных лазеров. В настоящее время лазерные технологии широко используются для обработки различных материалов, в частности для упрочнения, резки, сверления и сплавления. Для этих целей применяются мощные твердотельные и CO₂-лазеры. Мощные волоконные лазеры рассматриваются как альтернатива указанным лазерам благодаря лучшему качеству пучка, гибкости в доставке лазерного излучения к обрабатываемому объекту, компактности и потенциально более низкой стоимости.

3. Волоконные ВКР-лазеры

В 90-х годах прошлого столетия замечательные результаты были достигнуты в разработке и исследовании волоконных ВКР-лазеров, накачиваемых неодимовыми или иттербиевыми волоконными лазерами, которые, в свою очередь, накачиваются излучением лазерных диодов (см., например, обзор [10]).

Явление вынужденного комбинационного рассеяния света лежит в основе эффективного метода преобразования частоты лазерного излучения, поскольку использование различных материалов (кристаллов, стекол, жидкостей, газов) позволяет получать стоксов частот-

ный сдвиг от нескольких сотен до нескольких тысяч обратных сантиметров. Особенно перспективно ВКР-преобразование для получения лазерного излучения в ИК-области спектра, где редкоземельные твердотельные лазеры обладают низкой эффективностью.

Хотя сечение комбинационного рассеяния в стеклах имеет значения на 2–3 порядка более низкие, чем в ряде нелинейных кристаллов и жидкостей, большая длина взаимодействия, малый диаметр сердцевины и низкие оптические потери стеклянных волоконных световодов приводят к эффективному ВКР-преобразованию излучения накачки в стоксово излучение.

Первый волоконный ВКР-лазер был продемонстрирован Столеном и др. [11] в 1972 г. вскоре после появления стеклянных волоконных световодов с низкими оптическими потерями. В качестве излучения накачки использовалась вторая гармоника импульсного Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532$ нм). Резонатор лазера был образован объемными зеркалами, а излучение накачки вводилось в световод с помощью линзы. Стоксов сдвиг в кварцевом стекле составляет 440 см^{-1} , поэтому длина волны выходного излучения равнялась 545 нм. Только к середине 90-х годов благодаря бурному развитию волоконной оптики и волоконно-оптической связи были разработаны целиком волоконные эффективные ВКР-лазеры [12]. Зеркалами резонатора в таких лазерах служили внутриволоконные брэгговские решетки показателя преломления. В качестве активной среды использовался германийсодержащий волоконный световод, стоксов сдвиг которого составлял около 430 см^{-1} , в качестве источника накачки — волоконный Yb-лазер, генерирующий излучение с длиной волны около 1,1 мкм.

Обладая высокой эффективностью, разработанный ВКР-лазер имел и такой недостаток, как малая величина стоксова сдвига ($\sim 430\text{ см}^{-1}$), требующая генерации стоксовых компонентов высокого порядка для получения излучения в области 1,4–1,5 мкм. Для этого надо было записать в волоконном световоде 5–6 пар брэгговских решеток, что сильно усложняло конструкцию лазера. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на поиск стеклянных волоконных световодов с большим стоксовым сдвигом. Оказалось, что фосфоросиликатный световод имеет две полосы комбинационного рассеяния со стоксовыми сдвигами 490 и 1330 см^{-1} [13]. Использование стоксова сдвига 1330 см^{-1} позволило сильно упростить конструкцию волоконного ВКР-лазера и создать семейство ВКР-лазеров, генерирующих излучение практически на любой длине волны в спектральной области 1,1–1,65 мкм [10].

На рисунке 3 приведена схема трехкаскадного волоконного ВКР-лазера, в котором для генерации излучения с $\lambda = 1407$ нм используется фосфоросиликатный световод и волоконный Nd-лазер в качестве источника накачки [14]. Излучение накачки с длиной волны $\lambda_p = 1,06$ мкм эффективно преобразовывалось в стоксово излучение со сдвигом 1330 см^{-1} ($\lambda_{S1} = 1236$ нм) в резонаторе, образованном брэгговскими решетками со 100%-ным отражением на волне с $\lambda_{S1} = 1236$ нм. В свою очередь, это излучение служило накачкой для генерации стоксова излучения со сдвигом 490 см^{-1} ($\lambda_{S2} = 1316$ нм) в резонаторе, образованном брэгговскими решетками со 100%-ным отражением на волне с $\lambda_{S2} = 1316$ нм. После достижения пороговой мощности это излучение служило накачкой для генерации следующего стоксова излучения

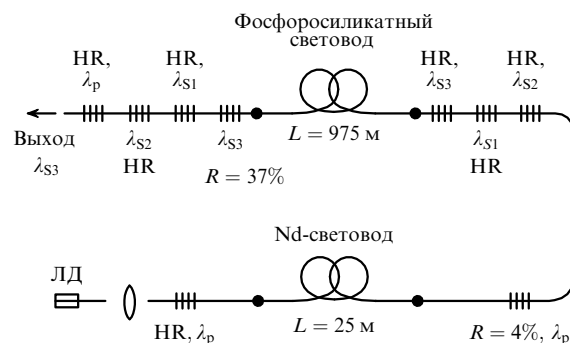


Рис. 3. Схема ВКР-лазера на фосфоросиликатном световоде на длину волны 1407 нм: HR — высокоотражающая брэгговская решетка; R — коэффициент отражения; L — длина.

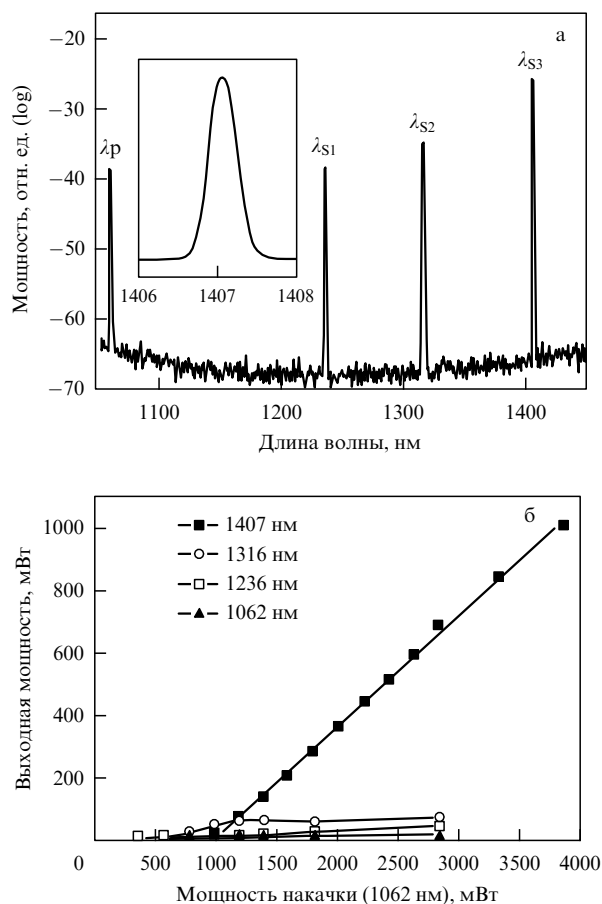


Рис. 4. (а) Спектр излучения ВКР-лазера. На врезке — спектр излучения на длине волны 1407 нм в увеличенном масштабе. (б) Зависимость выходной мощности ВКР-лазера от мощности накачки (Nd-лазера).

со сдвигом тоже 490 см^{-1} ($\lambda_{S3} = 1407$ нм) в резонаторе для волны с $\lambda_{S3} = 1407$ нм, при этом выходная брэгговская решетка имела коэффициент отражения, равный 37%. Спектр выходного излучения и зависимость выходной мощности от мощности накачки показаны на рис. 4а,б соответственно. Видно, что выходная мощность лазера составляет 1 Вт, и этого достаточно для накачки оптических усилителей в волоконно-оптических системах связи.

Большой интерес представляет генерация лазерного излучения в спектральной области 2–3 мкм и на более

длинных волнах. К сожалению, волоконные световоды на основе кварцевого стекла нельзя использовать в качестве активной среды ВКР-лазеров из-за быстрого роста фундаментальных оптических потерь в этой спектральной области.

Нами изготовлены волоконные световоды на основе германатного (GeO_2) стекла, которое имеет минимум фундаментальных оптических потерь на волне с $\lambda = 2$ мкм, кроме того, сечение комбинационного рассеяния в этих стеклах на порядок выше, чем в кварцевом стекле [15]. На основе этих световодов разработаны трех- и четырехкаскадные ВКР-лазеры, которые генерируют излучение в спектральной области 2 мкм [16]. Схема этих лазеров аналогична схеме на рис. 3, только лазером накачки в них служит волоконный Er/Yb -лазер, генерирующий на волне с $\lambda = 1610$ нм, а вместо фосфосиликатного световода используется германатный световод. Получена генерация излучения с длинами волн 2027 и 2200 нм и мощностью 900 и 210 мВт соответственно при мощности накачки около 4200 мВт.

Таким образом, разработано семейство волоконных ВКР-лазеров, обеспечивающих генерацию лазерного излучения практически на любой длине волны в области 1,1–2,2 мкм, при этом в качестве лазеров накачки используются волоконные Yb - и Er/Yb -лазеры.

4. Заключение

Недавние успехи в технологиях стеклянных волоконных световодов и лазерных диодов привели к созданию нового поколения твердотельных лазеров — волоконных лазеров. Несмотря на огромные успехи в создании непрерывных одномодовых волоконных лазеров с выходной мощностью ~ 1 кВт в спектральной области 1,06–1,1 мкм, ожидается дальнейшее увеличение выходной мощности непрерывного одноволоконного лазера до 10 кВт.

Однако для достижения этого уровня выходной мощности необходимо разработать новые структуры волоконных световодов с большим диаметром поля моды и низкой нелинейностью. Кроме того ожидается расширение спектральной области генерации мощных волоконных лазеров до 2 мкм за счет создания эрбиевых ($\lambda = 1,55$ мкм) и тулиевых ($\lambda = 2$ мкм) лазеров.

Создание стеклянных волоконных световодов с высокой прозрачностью в ИК-области спектра позволит создать семейство ВКР-волоконных лазеров для спектральной области 3–5 мкм.

Список литературы

1. Koester C J, Snitzer E *Appl. Opt.* **3** 1182 (1964)
2. Russell P St J et al. *Phys. World* (Oct.) 41 (1993)
3. Jeong Y et al., *LEOS 2003*
4. Jeong Y et al., *CLEO'2004, San Francisco, CMS1, 2004*; Liu C H et al., *CLEO'2004, San Francisco, CMS2, 2004*
5. Буфетов И А и др. *Квантовая электроника* **33** 1035 (2003)
6. Мелькумов М А и др. *Квантовая электроника* **34** 843 (2004)
7. Snitzer E et al., in *Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors, New Orleans, La., USA, January 27–29, 1988* (Technical Digest Ser., Vol. 2) (Washington, DC: OSA, 1988) PD-5
8. Grudinin A B et al., in *28th European Conf. on Optical Communication, Sept. 8–12, 2002, Copenhagen, Denmark*, PD-1
9. Melkumov M A et al., in *Proc. of the 30th European Conf. on Optical Communication, Sept. 5–9, 2004, Stockholm, Sweden* Vol. 4 (2004) p. 792
10. Dianov E M, Prokhorov A M *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **6** 1022 (2000)
11. Stolen R H, Ippen E P, Tynes A R *Appl. Phys. Lett.* **20** 62 (1972)
12. Grubb S G et al., in *Optical Amplifiers and Their Applications, Conf., June 15–17, 1995, Davos, Switzerland* (Technical Digest Ser., Vol. 18) (Washington, DC: OSA, 1995) SaA4
13. Dianov E M et al. *Electron. Lett.* **33** 1542 (1997)
14. Dianov E M et al. *Opt. Lett.* **25** 402 (2000)
15. Mashinsky V M et al., in *Proc. of the 29th European Conf. on Optical Communication; 14th Intern. Conf. on Integrated Optics and Optical Fibre Communication, Sept. 21–25, 2003, Rimini, Italy* Vol. 2 (2003) p. 210
16. Дианов Е М и др. *Квантовая электроника* **34** 695 (2004)

PACS numbers: 01.65. + g, 42.55. – f, 84.40. – x

Об истории создания инжекционного лазера

Ю.М. Попов

В 1958 г. в ФИАНе по инициативе Н.Г. Басова начались исследования, направленные на создание лазеров. Эти работы носили пионерский характер не только в нашей стране, но и в мире, наряду с работами Ч. Таунса и А. Шавлова в США.

Хотя молекулярные генераторы работали на газах, но уже парамагнитные усилители вынужденного излучения использовали кристаллы, что подтверждало возможность получения инверсной заселенности в твердых средах.

Это время характеризовалось бурным развитием полупроводниковой электроники. Но единственными материалами для этих целей служили германий и кремний, причем широкое развитие кремния только начиналось. В ФИАНе исследованием свойств полупроводников в сильных электрических полях занимались в лаборатории физики полупроводников, руководимой Б.М. Вулом. С обсуждением возможной реализации идеи о получении необходимой для усиления света инверсной населенности в полупроводниках Н.Г. Басов с сотрудниками обратился к Б.М. Вулу и его коллегам.

В качестве первого шага Н.Г. Басов, Б.М. Вул и Ю.М. Попов послали авторскую заявку (1958 г.) и опубликовали статью об использовании коротких импульсов тока для лавинного размножения носителей тока из валентной зоны (или с примесей), образующих после охлаждения решеткой инверсную заселенность [1].

Так как для межзонного лавинного размножения в германии и кремнии требовались высокие напряженности поля, а оптические межзонные переходы были непрямыми, в экспериментальном плане было решено работать над ионизацией примесей в этих материалах, а для межзонной ионизации использовать полупроводники с узкими запрещенными зонами и прямыми оптическими переходами.

В то время таким наиболее исследованным полупроводником был антимонид индия, который выращивался в Ленинградском физико-техническом институте в лаборатории профессора Д.Н. Наследова.

Николай Геннадиевич с присущим ему энтузиазмом собирал сотрудников и, используя любую возможность, организовывал визиты в Ленинград. Мне хорошо помнится время, когда в конце 50-х в лютые морозы