

Самомодуляция добротности иттербиевого волоконного лазера с накачкой в оболочку световода

Д.А.Грух*, А.С.Курков*, И.М.Раздобрев**, А.А.Фотиади***

Представлена схема импульсного волоконного лазера с самомодулирующей добротности на основе световода с двойной оболочкой, легированного ионами Yb^{3+} . В качестве фильтра для защиты источника накачки применен световод, легированный самарием. Для получения нелинейной обратной связи использован волоконный ответвитель. Рассмотрен механизм образования импульсов в лазере. Изучена зависимость выходного импульса от параметров ответвителя.

Ключевые слова: иттербиевый волоконный лазер, модуляция добротности, нелинейная обратная связь.

1. Введение

В последнее время интенсивно разрабатываются и исследуются мощные волоконные лазеры на основе активных световодов с двойной оболочкой [1]. Одно из их главных применений – накачка ВКР-конверторов для волоконно-оптических линий связи [2]. Обычно такие лазеры работают в непрерывном режиме. Работа в импульсном режиме позволит расширить круг их применений благодаря увеличению пиковой мощности. В предложенных ранее методах получения импульсного режима генерации используются, как правило, дискретные элементы, например акусто- и электрооптические модуляторы, затворы на насыщающихся поглотителях и пр. [3, 4].

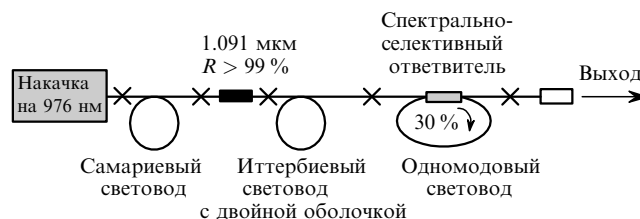
Современный уровень развития волоконной оптики предполагает отказ от применения дискретных элементов в волоконно-оптических устройствах, поэтому представляет интерес реализация мощного импульсного источника в цельноволоконном исполнении.

Основной идеей создания импульсного лазера является подавление постоянной обратной связи и получение переменной обратной связи за счет использования нелинейных свойств волоконного световода. Для этого в схему лазера вносятся дополнительные волоконные элементы. Так, в работе [5] к выходу волоконного лазера приваривался световод, а в работе [6] в схему лазера вводилось волоконное кольцо. Для подавления постоянной обратной связи на выходе указанных устройств использовался световод со скошенным торцом, позволяющий устранить френелевское отражение. В обеих схемах нелинейная обратная связь реализовывалась сначала за счет обратного рэлеевского рассеяния, приводящего к возникновению ВРМБ, которое и обеспечивало возникновение импульсной генерации [7, 8].

В работе [5] активной средой лазера служил легированный ионами Nd^{3+} световод с двойной оболочкой; ввод излучения накачки осуществлялся через дихроичное зеркало. Наличие дополнительного волоконного световода (для получения нелинейной обратной связи) привело к значительной нестабильности параметров выходного излучения, поэтому на выходе схемы использовался акустооптический модулятор, возвращающий в резонатор часть выходной мощности на частоте генерации. В работе [6] исследована более стабильная конфигурация – с волоконным кольцом. Однако при использовании в качестве активной среды легированного ионами Yb^{3+} волоконного световода с накачкой в сердцевину следует для достижения высоких мощностей включить в схему лазер на титанате сапфира, являющийся источником накачки. Целью нашей работы было создание и исследование цельноволоконного лазера с самомодулирующей добротности на основе иттербиевого активного световода с двойной оболочкой и с накачкой от полупроводникового источника.

2. Схема эксперимента

На рис.1 представлена схема исследуемого лазера. Для накачки волоконного лазера использовался полупроводниковый излучатель, разработанный фирмами «Сигм-Плюс» (Москва) и «Мелон» (Санкт-Петербург). Он позволял вводить излучение мощностью около 6 Вт на длине волны 976 нм в волоконный световод диаметром 100 мкм с числовой апертурой $NA = 0.22$. Отметим, что одной из главных технических проблем применения полупроводникового источника для накачки мощного импульсного лазера является организация ввода излуче-



*Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: rayoflight@fo.gpi.ru; kurkov@fo.gpi.ru

**Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molecules, UMR 8523, Centre d'Etudes et de Recherches Lasers Applications, Universite des Sciences et Technologies de Lille, F-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (France)

***Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26

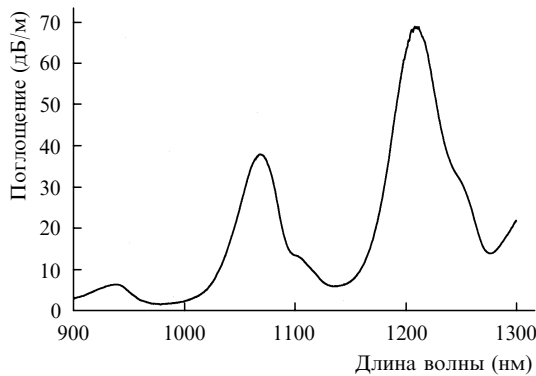


Рис.2. Спектр поглощения волоконного световода, легированного ионами Sm^{3+} .

ния накачки. Непосредственный ввод излучения накачки в активный световод может привести к разрушению полупроводникового источника из-за попадания на него мощных импульсов, которые возникают на длинах волн ВКР-компонент, отличных от резонансной длины волны входной брэгговской решетки световода.

Для решения этой проблемы было предложено два варианта ввода накачки. В первом из них ввод осуществлялся через Х-образный ответвитель, объединяющий одномодовое излучение, попадающее в сердцевину, с многомодовым, попадающим в оболочку активного световода. Во втором варианте схемы накачка происходила через отрезок световода с двойной оболочкой и сердцевиной, легированной ионами Sm^{3+} , спектр поглощения которой представлен на рис.2. Видно, что такой световод позволяет обеспечивать поглощение сигнала в несколько десятков децибел в спектральном диапазоне 1030–1300 нм. При этом дополнительные потери для излучения накачки не превышают 0.5 дБ и определяются в первую очередь тем, что излучение распространяется в основном вне сердцевины, легированной поглощающей примесью. Отметим, что оба варианта схемы накачки давали схожие результаты. В дальнейшем мы будем рассматривать результаты, полученные при накачке волоконного лазера через легированный ионами Sm^{3+} световод.

Входным зеркалом лазера служила внутриволоконная фотоиндуцированная брэгговская решетка с коэффициентом отражения более 99 % на длине волны 1091 нм при селективности 0.5 нм. К выходу активного световода приваривался спектрально-селективный ответвитель, обеспечивающий ввод около 30 % мощности лазера в волоконное кольцо на основе отрезков стандартного световода длиной от нескольких метров до 1 км. Выходное излучение лазера регистрировалось лавинным фотодиодом с временным разрешением менее 1 нс.

3. Результаты

Непрерывная генерация лазера с максимальной мощностью 2.1 Вт при мощности накачки 4.2 Вт наблюдалась, когда выходной торец ответвителя был сколот перпендикулярно оси световода, что обеспечивало 4 %-ный коэффициент отражения. Относительно невысокая эффективность генерации (около 50 %) объяснялась дополнительными потерями излучения в точках сварки волоконного ответвителя с активным световодом и со световодом, формирующим волоконное кольцо.

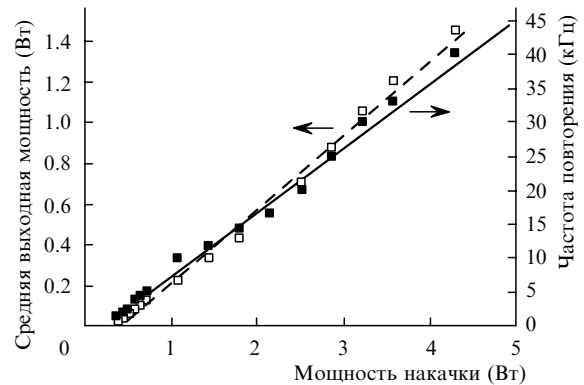


Рис.3. Зависимости средней выходной мощности и частоты повторения импульсов генерации от мощности накачки.

Если же выходной торец ответвителя был скошен, что позволяло устранить постоянную обратную связь, то лазер переходил в режим импульсной генерации. На рис.3 представлена зависимость средней выходной мощности и частоты повторения импульсов лазера от мощности накачки. Видно, что частота повторения линейно зависит от мощности накачки, изменяясь от нескольких килогерц на пороге генерации до 40 кГц при максимальной мощности накачки. Максимальная средняя выходная мощность лазера составила 1.4 Вт. Измерение временных характеристик генерации с высоким разрешением показало, что происходит генерация пуга импульсов с параметрами, зависящими от длины световода в волоконном кольце. На рис.4 представлена осциллограмма для кольца длиной 8 м.

Использование волоконных колец из световодов различной длины (вплоть до 1 км) показало, что период следования импульсов в пуге определяется длиной кольца, точнее временем его однократного обхода. Таким образом, генерация происходит на резонансных частотах кольцевого интерферометра. Следует отметить, что при увеличении длины кольца до 1 км в пуге различаются лишь два импульса, при этом в более мощном аккумулируется свыше 90 % суммарной энергии. Длительность импульсов в пуге составляет 5–10 нс, что позволяет оценить пиковую мощность импульса в 5 кВт.

Исследование показало, что при переходе лазера в импульсный режим работы его спектр уширяется и сдвигается в длинноволновую сторону (рис.5). Спектральный сдвиг составил примерно 0.18 нм (спектральное разрешение 0.1 нм). Это позволяет утверждать, что генерация в волоконном лазере такой конфигурации происходит преимущественно на второй ВРМБ-компоненте.

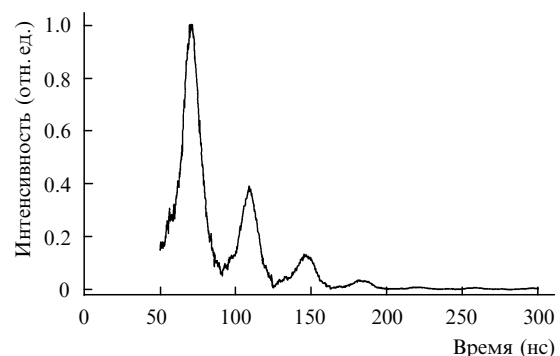


Рис.4. Динамика лазерных импульсов в кольце длиной 8 м.

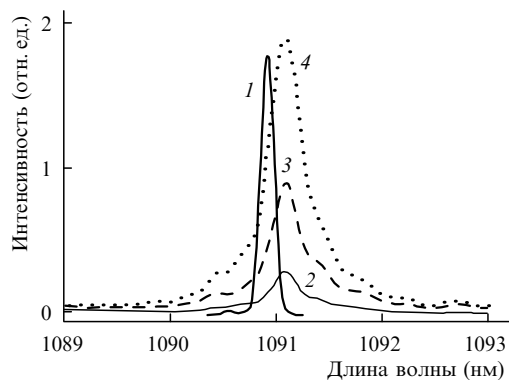


Рис.5. Спектр излучения лазера в непрерывном режиме (1) и в импульсном режиме при мощностях накачки 0.7 (2), 2.1 (3) и 3.6 Вт (4).

4. Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты, представленные на рис.4, 5, будем интерпретировать с помощью динамической модели лазера [9], которая основана на каскадном процессе рэлеевского рассеяния и ВРМБ в волоконной лазерной системе. В начале каждого цикла инверсная населенность в иттербиевом волокне растет, но отсутствие отражения от торца выходного волокна лазера препятствует развитию генерации. Усиленное спонтанное излучение иттербиевого волокна через ответвитель проникает в кольцо и, циркулируя в нем против часовой стрелки, накапливается в волоконном кольцевом интерферометре на его резонансных частотах. Рэлеевское (линейное, без сдвига частот) рассеяние назад этого излучения приводит к образованию встречной волны. Она циркулирует в кольце по часовой стрелке и, частично ответвляясь в волоконном ответвителе, обеспечивает обратную связь в лазере. Таким образом, коэффициент отражения от кольцевого рэлеевского зеркала обладает резонансной частотной зависимостью с максимумами на собственных частотах кольцевого интерферометра. Отражение от него осуществляет спектральную фильтрацию усиленного спонтанного шума и определяет узкополосный характер начальной генерации лазера.

Начальная генерация лазера возникает за счет рэлеевского рассеяния в кольце на частоте вблизи максимума коэффициента отражения брэгговской решетки. Эта частота должна быть резонансной как для кольца, так и для линейного резонатора. Рост мощности узкополосного лазерного излучения, распространяющегося в кольце против часовой стрелки, приводит к генерации импульса встречного ВРМБ в кольце. Оптическая частота импульса сдвинута в стоксову область относительно частоты начальной генерации на величину ВРМБ-сдвига (~ 16 ГГц) [10]. Через ответвитель импульс попадает в иттербиевое волокно, где, усиливаясь, вызывает генерацию нового ВРМБ-импульса в волокне усилителя в направлении выхода лазера. Прохождение сигнала ВРМБ по усилителю истощает инверсную населенность, завершая цикл.

Таким образом, излучение, регистрируемое на выходе лазера, – это излучение, рассеянное в результате последнего ВРМБ. Его оптическая частота соответствует частоте второй стоксовой компоненты и поэтому сдвинута на ~ 32 ГГц (~ 0.18 нм) в красную сторону относительно частоты начальной генерации (рис.5). Так как генерация ВРМБ в иттербиевом волокне происходит из

усиленного спонтанного шума, а шум имеет спектральную структуру, обусловленную коэффициентом рэлеевского рассеяния от кольца, то излучение ВРМБ формируется в виде цуга импульсов, отстоящих друг от друга на время однократного пробега света по кольцу (рис.4).

Когда длина волокна в кольце увеличивается до 1 км, эффективность рэлеевского рассеяния при однократном прохождении кольца становится достаточной для обеспечения необходимой обратной связи в лазере, формирующей одиночный импульс ВРМБ. Второй (слабый) импульс – это основной импульс, ответвленный в кольцо после одного полного оборота по нему.

5. Заключение

Таким образом, легированные ионами Yb^{3+} волоконные световоды с накачкой в оболочку могут быть использованы в схемах мощных импульсных волоконных лазеров. Авторами предложена оригинальная схема накачки через легированный ионами Sm^{3+} волоконный световод, позволяющая защитить источник накачки от попадания распространяющихся назад мощных лазерных импульсов. Реализованный лазер имеет максимальную среднюю выходную мощность 1.4 Вт и импульсную – 5 кВт. Следует отметить, что, как и любой другой лазер с пассивной модуляцией добротности, он не обладает возможностями широкой перестройки параметров выходного импульса. В то же время использование модулированного по интенсивности излучения накачки может позволить управлять частотой генерации лазера, однако данный вопрос требует дополнительного изучения. Кроме того, дальнейшие исследования предполагают реализацию ВКР-преобразователей и источников суперконтинуума с использованием разработанного импульсного излучателя. Интерес вызывает также создание импульсных источников на основе световодов, активированных ионами других редкоземельных элементов, в частности эрбия.

Авторы выражают благодарность В.М.Парамонову за консультацию и большую помощь в проведении исследований. Один из авторов (А.А.Фотиади) благодарит за финансовую поддержку РФФИ (грант № 00-02-16903).

1. Курков А.С., Карпов В.И., Лаптев А.Ю., Медведков О.И., Дианов Е.М., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Парамонов В.М., Протопопов В.Н., Умников А.А., Вечканов Н.И., Артюшенко В.Г., Фрам Ю. *Квантовая электроника*, **27**, 239 (1999).
2. Курков А.С., Парамонов В.М., Егорова О.Н., Медведков О.И., Дианов Е.М., Яшков М.В., Гурьянов А.Н., Залевский И.Д., Гончаров С.Е. *Квантовая электроника*, **31**, 801 (2001).
3. Alvares-Chavez J.A., Offerhaus H.L., Nillson J., Turner P.W., Clarkson W.A., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **25**, № 1, 37 (2000).
4. Paschotta R., Haring R., Gini E., Melchior H., Keller U., Offerhaus H.L., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **24**, № 6, 388 (1999).
5. Chen Z.J., Grudinin A.B., Porta J., Minely J.D. *Opt. Lett.*, **23**, № 6, 454 (1998).
6. Chernikov S.V., Zhu Y., Taylor J.R., Gapontsev V.P. *Opt. Lett.*, **22**, 298 (1997).
7. Chernikov S.V., Fotiadi A.A. *Proc. Conf. on Laser and Electro-Optics* (Baltimore, 1997, p. 477).
8. Фотиади А.А., Киян Р.В., Шакин О.В. *Письма в ЖТФ*, **27**, № 10, 79 (2001).
9. Fotiadi A.A., Ikiades A., Deparis O., Kiyan R., Chernikov S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4354**, 125 (2000).
10. Smith R.G. *Appl. Opt.*, **11**, № 11, 2489 (1972).