

# Селекция мод в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой при использовании ВБР в многомодовом градиентном световоде

С.И.Каблуков, Е.А.Злобина, М.И.Скворцов, И.Н.Немов, А.А.Вольф, А.В.Достовалов, С.А.Бабин

*Исследовалась селекция основной поперечной моды в ВКР-лазере с прямой накачкой излучением многомодового лазерного диода и резонатором, образованным волоконными брэгговскими решетками (ВБР) в градиентном волоконном световоде. Применение ВБР, записанных фемтосекундным излучением в центральной области сердцевины световода, позволило получить рекордно высокое для таких лазеров качество пучка ( $M^2 < 1.2$ ) при уровне генерируемой мощности более 5 Вт.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, ВКР-лазер, градиентный световод, волоконная брэгговская решетка, диодная накачка, селекция мод.

## 1. Введение

Известно, что волоконные ВКР-лазеры, работающие на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния света, перспективны как источники излучения, перестраиваемого в широком диапазоне длин волн. В качестве усиливающей среды ВКР-лазеров обычно используют пассивные одномодовые световоды, а накачка осуществляется в сердцевину световода излучением одномодовых волоконных лазеров. Наиболее мощные лазеры накачки используют в качестве активной среды одномодовые иттербиевые световоды с двойной оболочкой. Последние, в свою очередь, накачиваются в оболочку мощными многомодовыми (ММ) лазерными диодами (ЛД). В отличие от лазеров на редкоземельных элементах с фиксированными спектральными областями, ВКР-лазеры могут работать почти на любой длине волны, отстоящей на величину стоксова сдвига от длины волны накачки, и перестраиваться в пределах широкого контура ВКР-усиления. Для ВКР-лазеров характерен малый квантовый дефект, малое время отклика на индуцированное накачкой усиление, низкий уровень спонтанного излучения, отсутствие эффекта фотопотемнения, являющегося проблемой для волоконных лазеров, генерирующих в области  $\sim 1$  мкм, в частности для иттербиевого волоконного лазера (ИВЛ) [1].

В то же время генерация ВКР-лазеров на длинах волн менее 1 мкм затруднена из-за отсутствия мощных одномодовых источников накачки в коротковолновой области (так, например, нижний предел длины волны генерации ИВЛ составляет  $\sim 980$  нм [1]). Альтернативным подходом может служить накачка ВКР-лазеров напрямую

коммерчески доступными ММ лазерными диодами, так как их мощность в диапазоне 915–980 нм уже превышает 100 Вт для одного модуля. Пучок излучения ММ накачки можно эффективно ввести в относительно большую сердцевину многомодового пассивного световода с градиентным профилем показателя преломления (градиентного световода) [2], который к тому же обладает свойством «чистки» пучка накачки в результате ВКР-преобразования [3].

В первых работах по ВКР-лазерам на основе многомодовых градиентных световодов в качестве источника накачки использовались неодимовые твердотельные ММ лазеры. С развитием технологии многомодовых лазерных диодов начались работы по применению таких источников для получения ВКР-генерации в градиентных световодах. В одной из первых работ нами был продемонстрирован непрерывный ВКР-лазер с прямой накачкой лазерным диодом с длиной волны  $\sim 940$  нм [4]. Выходная мощность ВКР-лазера на длине волны 980 нм составила 2.9 Вт при дифференциальной эффективности преобразования излучения накачки в стоксовую волну около 25%. Резонатор лазера был образован в градиентном световоде длиной 4.5 км высокоотражающей волоконной брэгговской решеткой (ВБР) и торцом световода, сколотым под прямым углом. Генерируемый выходной пучок был существенно более высокого качества, чем пучок излучения диодной накачки, благодаря эффекту «чистки» пучка при ВКР-преобразовании в градиентном световоде, а также дополнительной модовой селекции ВБР с узким спектром отражения.

Недавно Т. Яо с соавторами [5] продемонстрировали возможность увеличения выходной мощности и дифференциальной эффективности ВКР-лазера с диодной накачкой до 20 Вт и 80% соответственно при использовании относительно короткого (1.5 км) градиентного световода, двухпроходной схемы накачки с большей мощностью, полученной при объединении пучков двух ЛД с длиной волны 975 нм. Еще более высокая мощность ( $\sim 80$  Вт) была получена в градиентном световоде длиной 0.5 км для похожей конфигурации ВКР-резонатора при мощности накачки  $\sim 150$  Вт, введенной от многомодового ЛД с длиной волны 980 нм [6]. Однако продемонстри-

---

С.И.Каблуков, Е.А.Злобина, М.И.Скворцов, И.Н.Немов, А.А.Вольф. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; e-mail: kab@iae.nsk.ru  
В.Достовалов, С.А.Бабин. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 21 октября 2016 г.

рованная в обеих работах длина волны генерации лазеров ( $\sim 1020$  нм) не очень интересна, так как на ней достигается существенно большая мощность в случае использования стандартного ИВЛ.

Параллельно проводились работы по многомодовой накачке ВКР-лазеров на основе пассивных световодов с двойной оболочкой. При использовании многомодового ИВЛ для оптической накачки в оболочку световода была получена мощность генерации  $\sim 100$  Вт [7]. При использовании для накачки излучения многомодовых ЛД мощность генерации достигала лишь уровня 6 Вт, но при более высоком качестве пучка ( $M^2 = 1.9$ ), чем в случае ВКР-лазеров на основе градиентных световодов. Для дальнейшего развития ВКР-лазеров с накачкой многомодовыми ЛД в оболочку требуется совершенствование технологии изготовления специальных световодов с двойной оболочкой, обладающих пока более высокими потерями, чем у коммерчески доступных градиентных световодов.

Для продвижения в коротковолновый диапазон нами реализован ВКР-лазер в градиентном световоде с диодной накачкой в области 915 нм [8], обладающий большей, по сравнению с ВКР-лазером, описанным в [4], выходной мощностью ( $\sim 4$  Вт) и дифференциальной эффективностью свыше 40%. Высокие значения параметров лазера при меньшей длине волны генерации (954 нм) были достигнуты благодаря оптимизации длины градиентного световода исходя из имеющегося уровня мощности накачки  $\sim 50$  Вт.

В настоящей работе исследуется возможность модовой селекции излучения ВКР-лазеров в градиентных световодах с помощью ВБР. Показано, что при ваттных уровнях выходной мощности качество пучка может быть существенно улучшено по сравнению с полученным в других работах по ВКР-лазерам с прямой диодной накачкой, вплоть до генерации на основной поперечной моде.

## 2. Экспериментальная установка

Для защиты мощных многомодовых ЛД ввод излучения (как и в работе [8]) осуществлялся с помощью объемной оптики (рис.1). Излучение накачки мощного ММ диода вводилось в сердцевину световода Corning 62.5/125 (числовая апертура  $NA = 0.275$ ) с помощью коллимирующих линз Л1 и Л2 с эффективностью свыше 70%. В отличие от [8], введенная мощность накачки на 915 нм была увеличена примерно до 60 Вт, что позволило уменьшить длину градиентного световода с 2.5 до 1.1 км. Селективные зеркала 31–33 разделяли излучения ВКР-генерации и накачки. Мощности излучения ВКР-лазера и непоглощенной части излучения накачки измерялись тремя ИМО.

Линейный резонатор, как и в предыдущих экспериментах [4, 8], был образован высокоотражающей ( $R_1 \sim 80\%$ ) ВБР1, записанной в интерференционной схеме ультрафиолетовым излучением в сердцевине градиентного световода.

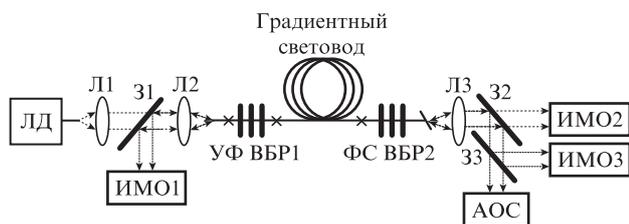


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

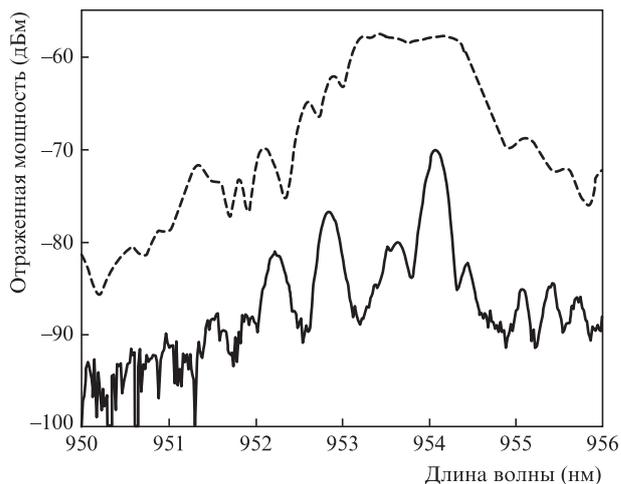


Рис.2. Спектры отражения УФ ВБР1 (штриховая кривая) и выходной ФС ВБР2 (сплошная кривая).

вода Corning 62.5/125 (см. [9]), и торцом световода, сколотым под прямым углом (коэффициент френелевского отражения  $R_2 \sim 4\%$ .) Кроме того, для улучшения селекции основной моды градиентного световода на выходе лазера устанавливалась фемтосекундная (ФС) ВБР2, записанная в центральной области сердцевины световода излучением фемтосекундного лазера методом поточечной записи [10]. Для сравнения на выходе также использовалась УФ ВБР2, записанная, как и ВБР1, УФ излучением. При этом торец выходного световода для уменьшения обратной связи, возникающей за счет френелевского отражения, скалывался под углом более  $10^\circ$ . Фемтосекундная ВБР длиной 1.3 мм с периодом  $\Lambda = 0.645$  мкм работала во втором порядке с коэффициентом отражения  $\sim 4\%$  и шириной спектра  $\Delta\lambda = 0.21$  нм на длине волны 954 нм. Отметим также, что градиентный световод (в отличие от описанного в [10]) имел стандартную оболочку диаметром 250 мкм, поэтому для улучшения качества ФС ВБР акриловая оболочка световода перед записью удалялась.

На рис.2 представлены спектры отражения УФ ВБР1 и выходной ФС ВБР2, измеренные с помощью одномодового волоконного разветвителя с коэффициентом деления 50:50. ВБР, записанные в многомодовом градиентном световоде, по очереди приваривались к одному из одномодовых портов разветвителя. Отметим, что при такой постановке эксперимента теряется информация о коэффициенте отражения для мод высших порядков, тем не менее в спектре отражения выходной ФС ВБР2 наблюдается несколько резонансов с длиной волны менее 954 нм, соответствующих модам низших порядков.

## 3. Экспериментальные результаты

Вначале проведем сравнение спектров генерации ВКР-лазера длиной 2.5 км для нескольких типов выходных зеркал (рис.3,а). При использовании неселективного по модам френелевского отражения от выходного торца волоконного световода наблюдается генерация относительно однородного спектра шириной  $\sim 1$  нм (штриховая кривая). В случае выходной УФ ВБР2 (использовалась также в [8]) наблюдается трехпиковая структура с расстоянием между пиками  $\sim 0.6$  нм, отвечающая отражению трех отдельных групп мод градиентного световода с малыми поперечными индексами (штрихпунктирная кри-

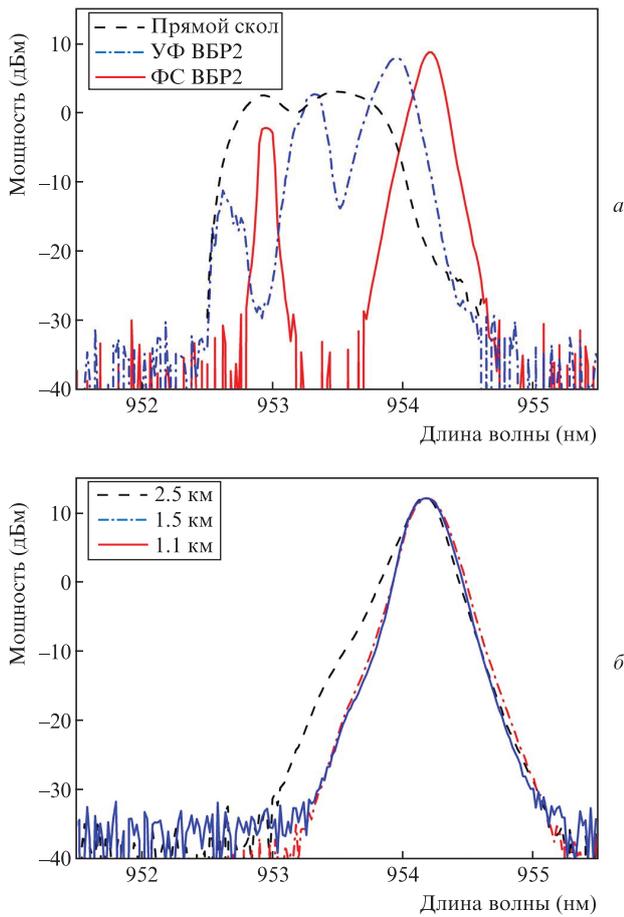


Рис.3. Спектры генерации ВКР-лазера длиной  $L = 2.5$  км при выходной мощности  $P_{\text{out}} = 1.9$  Вт и разных типах выходных зеркал: торцев сколотого под прямым углом световода, УФ ВБР2 и ФС ВБР2 (а), а также спектры генерации ВКР-лазера с выходной ФС ВБР2 при мощности генерации  $P_{\text{out}} = 4.8$  Вт и длинах лазера  $L = 2.5, 1.5$  и  $1.1$  км (б).

вая). Компонента на длине волны 954 нм соответствует основной моде, номер группы мод увеличивается в коротковолновую сторону. Ширина спектра отражения для каждой группы мод мала, поэтому спектры генерации разных групп хорошо различаются. В случае использования плотной УФ ВБР1 спектр отражения относительно широк, что не позволяет разрешить отдельные резонансы. При установке выходной ФС ВБР2 наблюдается двухпиковый спектр генерации с расстоянием между пиками  $\sim 1.2$  нм (сплошная кривая). Видно, что вторая группа мод на длине волны 953.6 нм, отстоящая на 0.6 нм от основной, не участвует в генерации. Можно также отметить, что амплитуда пиков, соответствующих группам мод более высокого порядка, относительно мала. При использовании ФС ВБР2 пик на длине волны 953 нм нестабилен по времени и не всегда проявляется в спектре генерации.

Как и в работе [8], эффективность генерации заметно падала при установке выходной УФ ВБР2 вместо использования в качестве выходного зеркала прямого скола. При замене же прямого скола на выходную ФС ВБР2 мощность генерации практически не изменялась, что в сочетании с хорошей модовой селекцией подтверждало перспективность данной конфигурации резонатора.

В дальнейших экспериментах длина лазера была сокращена до 1.1 км. Из рис.3,б видно, что спектр генерации

лазера при фиксированной выходной мощности 4.8 Вт незначительно изменяется с уменьшением длины резонатора. Следует отметить, что периодическое появление дополнительного пика на длине волны 953 нм, соответствующего модам более высокого порядка, наблюдалось только в лазере длиной 2.5 км. При уменьшении длины градиентного световода до 1.1 км устанавливался стабильный одномодовый режим генерации. Независимые измерения выходного пучка для лазера с длиной резонатора 1.1 км показали, что параметр качества  $M^2$  был лучше 1.2 при выходной мощности, изменяющейся от 5 до 10 Вт. Это свидетельствует о том, что генерация близка к одномодовой.

#### 4. Обсуждение результатов

Проведенные измерения показали соответствие спектров отражения волоконных брэгговских решеток и генерации лазера (см. рис.2 и 3,а). Остановимся более подробно на описании спектра отражения многомодовой ВБР в градиентном световоде [11]. Спектр состоит из набора эквидистантных пиков, расстояния между которыми  $\Delta\lambda$  можно упрощенно записать как  $\Delta\lambda = \lambda^2 \text{NA} / (\pi d n_1^2)$ , где  $\lambda$  – длина волны отражения ВБР,  $d$  – диаметр сердцевинки световода,  $n_1$  – показатель преломления оболочки. Исходя из характеристик используемого световода ( $\text{NA} = 0.275$ ,  $d = 62.5$  мкм,  $n_1 = 1.45$ ) и длины волны  $\lambda = 954$  нм, получим расстояние между пиками для отдельных групп мод  $\Delta\lambda = 0.61$  нм, что хорошо согласуется с расстоянием между пиками в спектре генерации при установке выходной УФ ВБР2 в ВКР-лазере. Вместе с тем, вдвое большее расстояние между пиками, наблюдаемое при установке выходной ФС ВБР2, можно объяснить отсутствием пика отражения для моды второй группы из-за малой величины интеграла перекрытия поля этой моды с записанной в центральной части сердцевинки световода решеткой.

Известно (см., напр., [12]), что номер группы мод в градиентном световоде можно охарактеризовать числом  $g = 2p + |m| - 1$ , где  $p$  и  $m$  – радиальные и азимутальные числа мод. Радиальное ( $\rho$ ) и азимутальное ( $\phi$ ) распределение полей мод  $\text{LP}_{mp}$  описывается полиномами Лагерра  $L_p^{m|}$ :  $E_{p,m}(\rho, \phi) \sim \exp(im\phi) \exp(-\rho^2/2\rho_0^2) L_p^{m|}(\rho^2/\rho_0^2) \rho^{|m|} / \rho_0^{|m|+1}$ , где  $\rho_0$  – радиус поля основной моды. Из этого следует, что первые две группы мод не вырождены и содержат моды  $\text{LP}_{01}$  и  $\text{LP}_{11}$ , а третья группа состоит из двух мод  $\text{LP}_{02}$  и  $\text{LP}_{21}$ .

Для оценки малости интеграла перекрытия полей мод световода с областью фотомодификации в ФС ВБР2 отметим, что диаметр основной моды  $2\rho_0$  градиентного световода Corning 62.5/125 можно оценить согласно [12] как  $\sim 9.8$  мкм, а область фотомодификации имеет форму эллипса в поперечном сечении световода с характерным размером главных осей примерно 1 и 8 мкм соответственно (см., напр., [13]). Заметим, что, несмотря на сравнимый размер модового диаметра и области фотомодификации в одном из направлений, интегралы перекрытия малы для мод с отличным от нуля азимутальным индексом  $m$ . Таким образом, только моды с индексом  $m = 0$  имеют максимальное перекрытие с ВБР, записанной вблизи центра световода, поэтому только пики отражения таких мод ( $\text{LP}_{01}$  из первой группы,  $\text{LP}_{02}$  из третьей группы) появляются в спектре отражения ФС ВБР2 и, соответственно, в спектре генерации ВКР-лазера при использовании этой выходной решетки.

## 5. Заключение

Таким образом, использование высокоотражающей УФ ВБР1 и выходной ФС ВБР2, записанных в сердцевине градиентного световода, в качестве зеркал резонатора ВКР-лазера с прямой накачкой многомодовым ЛД позволяет достичь высокого качества пучка ( $M^2 < 1.2$ ) генерируемого излучения при уровне выходной мощности более 5 Вт. Это качество пучка значительно лучше продемонстрированного в ВКР-лазерах с прямой многомодовой диодной накачкой при использовании объемной оптики и ММ градиентных световодов ( $M^2 > 2.9$ ) [5, 6], а также световодов с двойной оболочкой ( $M^2 = 1.9$ ) [5]. Конфигурация резонатора ВКР-лазера на основе ВБР позволяет перейти к полностью волоконной схеме, а мощность и эффективность генерации могут быть увеличены при комбинировании меньшей длины световода с большей мощностью накачки, а также при применении специальных мер подавления мод высших порядков при ВКР-генерации.

Исследования поддержаны Российским научным фондом (проект № 14-22-00118).

1. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, B63-92 (2010).
2. Baek S.H., Roh W. *Opt. Lett.*, **29**, 153 (2004).
3. Terry N.B., Alley T.G., Russell T.H. *Opt. Express*, **15**, 17509 (2007).
4. Kablukov S.I., Dontsova E.I., Zlobina E.A., Nemov I.N., Vlasov A.A., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 085103 (2013).
5. Yao T., Harish A.V., Sahu J.K., Nilsson J. *Appl. Sci.*, **5**, 1323 (2015).
6. Glick Y., Fromzel V., Zhang J., Dahan A., Ter-Gabrielyan N., Pattnaik R.K., Dubinskii M. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 065101 (2016).
7. Ji J., Codemard C.A., Sahu J.K., Nilsson J. *Opt. Fiber Technol.*, **16**, 428 (2010).
8. Zlobina E.A., Kablukov S.I., Skvortsov M.I., Nemov I.N., Babin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 035102 (2016).
9. Немов И.Н., Скворцов М.И., Злобина Е.А., Каблуков С.И. *Прикладная фотоника*, **3**, 166 (2016).
10. Dostovalov A.V., Wolf A.A., Parygin A.V., Zyubin V.E., Babin S.A. *Opt. Express*, **24**, 16232 (2016).
11. Mizunami T., Djambova T.V., Niiho T., Gupta S. *J. Lightwave Technol.*, **18**, 230 (2000).
12. Mafi A. *J. Lightwave Technol.*, **30**, 2803 (2012).
13. Thomas J., Jovanovic N., Becker R.G., Marshall G.D., Withford M.J., Tünnermann A., Nolte S., Steel M. *J. Opt. Express*, **19**, 325 (2011).