

# Генерация линейно поляризованного излучения в области 1.4 мкм в каскадном ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью

Е.А.Злобина, С.И.Каблуков, С.А.Бабин

*Продemonстрирована эффективная генерация линейно поляризованного излучения в ВКР-лазере со случайной распределенной обратной связью в волокне длиной 1.8 км при накачке линейно поляризованным излучением иттербиевого волоконного лазера с длиной волны генерации вблизи 1.06 мкм. Получена каскадная генерация до 5-й стоксовой компоненты (1.4 мкм) с перестройкой длины волны путем изменения длины волны накачки. Выходная мощность 4-й стоксовой компоненты достигала 5 Вт на  $\lambda = 1.34$  мкм. В работе также обсуждается проблема дальнейшего продвижения в длинноволновую область спектра.*

**Ключевые слова:** волоконная оптика, ВКР-лазер, случайная распределенная обратная связь, каскадная генерация, рэлеевское рассеяние, волокно с сохранением поляризации.

## 1. Введение

ВКР-лазеры со случайной распределенной обратной связью (СРОС) [1, 2] относятся к новому типу лазеров, в которых вынужденное комбинационное и рэлеевское рассеяние света в пассивных оптических волокнах обеспечивают распределенное усиление и случайную обратную связь соответственно. Обратная связь очень мала, но ее достаточно для возникновения лазерной генерации в километровых пассивных волокнах, т.к. величина интегрального ВКР-усиления пропорциональна длине волокна и мощности накачки. В ВКР-лазерах со СРОС при использовании относительно коротких волокон (менее 1 км) и больших мощностей накачки продемонстрирована мощная (10–200 Вт) генерация неполяризованного [3] и линейно поляризованного [4] излучения с абсолютной оптической эффективностью преобразования мощности накачки в стоксову компоненту около 90%, что близко к квантовому пределу (95%) ВКР-лазеров на основе германо-силикатного волокна.

Недавно была продемонстрирована каскадная генерация линейно поляризованного излучения в ВКР-лазере со СРОС на основе волокна с сохранением поляризации (РМ-волокно) длиной 1 км [5]. Оптическая эффективность преобразования излучения накачки иттербиевого волоконного лазера (ИВЛ) с длиной волны 1.05 мкм в первую и вторую стоксовы компоненты достигала 75%, а в третью – 70%, что близко к соответствующему квантовому пределу. Высокая эффективность и простота схем ВКР-лазеров со СРОС делают их привлекательными для различных

применений, в том числе для генерации длин волн в телекоммуникационной области спектра. Недавно в работе [6] была продемонстрирована каскадная генерация с 1-й до 6-й стоксовой компоненты в ВКР-лазере со СРОС в волокне длиной 10 км при увеличении мощности накачки от ИВЛ. Однако из-за большой длины волокна эффективность преобразования была невысокой (менее 15% на длине волны 1.36 мкм), а генерируемая мощность не превышала 1.8 Вт. Кроме того, выходное излучение было неполяризованным.

В настоящей работе мы исследовали возможность продвижения в длинноволновую область спектра в предложенной нами ранее схеме ВКР-лазера со СРОС [5], собранной на основе волоконных компонент с сохранением поляризации. За счет увеличения длины пассивного волокна с 1 до 1.8 км при той же мощности накачки (до 15 Вт) была получена каскадная ВКР-генерация линейно поляризованного излучения до 5-й стоксовой компоненты с длиной волны вблизи 1.4 мкм. Оптическая эффективность преобразования излучения накачки в первые три стоксовы волны была на уровне 55%–60%. Выходная мощность 4-й стоксовой компоненты на длине волны 1.34 мкм достигала 5 Вт, что соответствует оптической эффективности преобразования 33%. Генерация в длинноволновой области спектра была ограничена другими нелинейными эффектами, конкурирующими с ВКР-усилением в области длины волны нулевой дисперсии (ДВНД) волокна (~1.4 мкм), что также наблюдалось и в работе [6]. Здесь мы обсуждаем несколько способов решения этой проблемы.

## 2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1, она аналогична схеме, представленной в работе [5]. Накачка осуществлялась иттербиевым волоконным лазером, собранным по схеме задающий генератор–усилитель мощности. Лазер генерировал одномодовое линейно поляризованное излучение с выходной мощностью до 15 Вт. В качестве задающего генератора использовался ИВЛ

Е.А.Злобина, С.И.Каблуков. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: kab@iae.nsk.su

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 – 24 октября 2016 г.

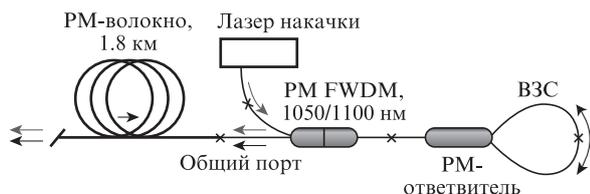


Рис.1. Схема экспериментальной установки: PM-волокно – волокно с сохранением поляризации; PM FWDМ – фильтрующий селективный ответвитель с сохранением поляризации; ВЗС – волоконное зеркало Саньяка.

с кольцевым резонатором и селектором на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) с большим коэффициентом отражения. Длина волны излучения менялась от 1040 до 1080 нм при установке в схему ВБР с соответствующей брэгговской длиной волны. Так как выходное излучение задающего лазера было неполяризованным, после него помещался волоконный делитель поляризации, выделяющий одну линейно поляризованную компоненту, которая затем заводилась в двухкаскадный иттербиевый волоконный усилитель, собранный из компонент, сохраняющих поляризацию. ВКР-лазер со СРОС был собран по схеме с сонаправленной накачкой. Лазер состоял из пассивного волокна с сохранением поляризации (Fujikura SM98-PS-U25D) длиной 1.8 км. Выходной конец волокна был сколот под углом более  $10^\circ$  для устранения френелевского отражения назад, к другому торцу волокна было приварено широкополосное волоконное зеркало Саньяка (ВЗС), сформированное из волоконного ответвителя с сохранением поляризации. Коэффициент отражения ВЗС  $R = 4\kappa(1 - \kappa)$ , зависящий от коэффициента ветвления ответвителя  $\kappa$ , уменьшался с увеличением длины волны генерации с 93% ( $\lambda = 1.1$  мкм) до 6% ( $\lambda = 1.4$  мкм) (рис.2).

В эксперименте излучение накачки вводилось в пассивное волокно длиной 1.8 км через фильтрующий селективный ответвитель (PM FWDМ), при этом лазерная генерация возникла за счет ВКР-усиления на стоксовой длине волны и обратной связи, которую с одной стороны обеспечивало отражение кольцевого зеркала, а с другой стороны – обратное рэлеевское рассеяние в длинном пассивном волокне. Выходная мощность и спектры измерялись со стороны сколотого под углом торца волокна при помощи измерителя мощности и анализатора оптического спектра (АОС) соответственно.

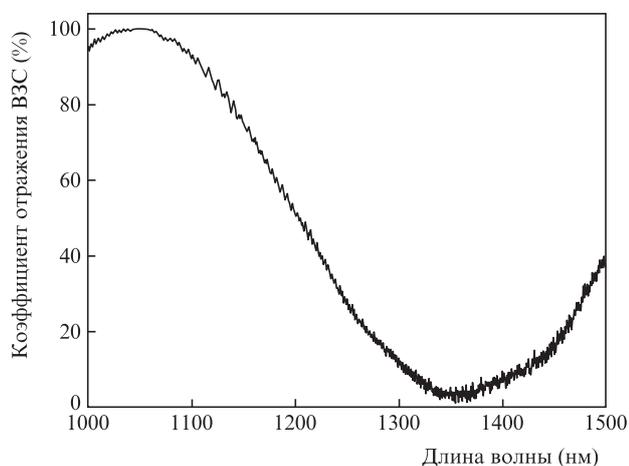


Рис.2. Зависимость коэффициента отражения волоконного зеркала Саньяка от длины волны излучения.

### 3. Результаты

Увеличение входной мощности накачки с 1 до 15 Вт приводило к последовательной (с 1-й по 5-ю) генерации стоксовых компонент. При изменении длины волны накачки соответственно перестраивались и длины волн генерации. На рис.3,а–в показаны спектры выходного излучения при максимальной входной мощности накачки с длинами волн 1040.6, 1064.4 и 1080.1 нм. Видно, что стоксовы компоненты имеют узкую линию генерации с полной шириной на полувысоте  $\sim 1$ ,  $\sim 1.7$ ,  $\sim 3$  и  $\sim 4$  нм для 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядка соответственно при максимальной мощности генерации этих компонент. Указанные значения согласуются с данными, полученными для ВКР-лазера со СРОС в волокне длиной 1 км [5]. Однако с приближением длины волны очередной стоксовой компоненты к длине волны нулевой дисперсии используемого пассивного волокна ( $\sim 1.4$  мкм), возникает широкополосная линия генерации 5-й стоксовой компоненты (рис.3,а–в). Похожий эффект наблюдался в ВКР-лазере со СРОС длиной 10 км, генерирующем неполяризованное излучение [6].

Мощность спектральных компонент излучения определялась в эксперименте следующим образом. Вначале с помощью анализатора оптического спектра устанавливалось относительное распределение выходной мощности по линиям излучения. Затем АОС заменяли измерителем мощности и измеряли полную мощность на выходе схемы. По полученным значениям выходной мощности проводилась калибровка мощностей проходящей накачки и стоксовых компонент в различных каскадах. Из рис.3,з–е видно, что эволюция мощностей вплоть до 4-го каскада качественно напоминает таковую в коротких ВКР-лазерах со СРОС, генерирующих как неполяризованное [7], так и поляризованное [5] излучение. До порога ВКР-генерации на выходе присутствует только излучение проходящей накачки, мощность которой ослабляется примерно на 35% при распространении в волокне длиной 1.8 км. После достижения порога мощность 1-й стоксовой компоненты начинает экспоненциально расти, а мощность накачки – сильно истощаться, пока почти все излучение накачки не перейдет в ВКР-сигнал. Мощность 1-й стоксовой компоненты увеличивается до достижения второго порога генерации, после которого мощность 2-й стоксовой компоненты экспоненциально нарастает, а мощность 1-й падает и т.д. Однако вблизи ДВНД волокна 5-я стоксова компонента начинает генерировать, несмотря на то что мощность предыдущей компоненты не достигает своего максимального значения (см. рис.3,з–е).

Уменьшение порога генерации для стоксовых компонент высших порядков связано с влиянием нелинейных эффектов, в первую очередь процесса четырехволнового смешения, который становится значительно эффективнее вблизи нуля дисперсии. Конкуренция между нелинейными эффектами и ВКР-усилением приводит к существенному уменьшению эффективности ВКР-преобразования при генерации следующих стоксовых порядков и росту спектрального континуума в области аномальной дисперсии волокна. Из рис.3 видно, что порог генерации стоксовых компонент высших порядков увеличивается при изменении длины волны накачки с 1040 до 1080 нм. Это можно объяснить влиянием нескольких факторов – уменьшением рэлеевского рассеяния с ростом длины волны, уменьшением коэффициента ВКР-усиления, а также коэффициента отражения кольцевого зеркала Саньяка с

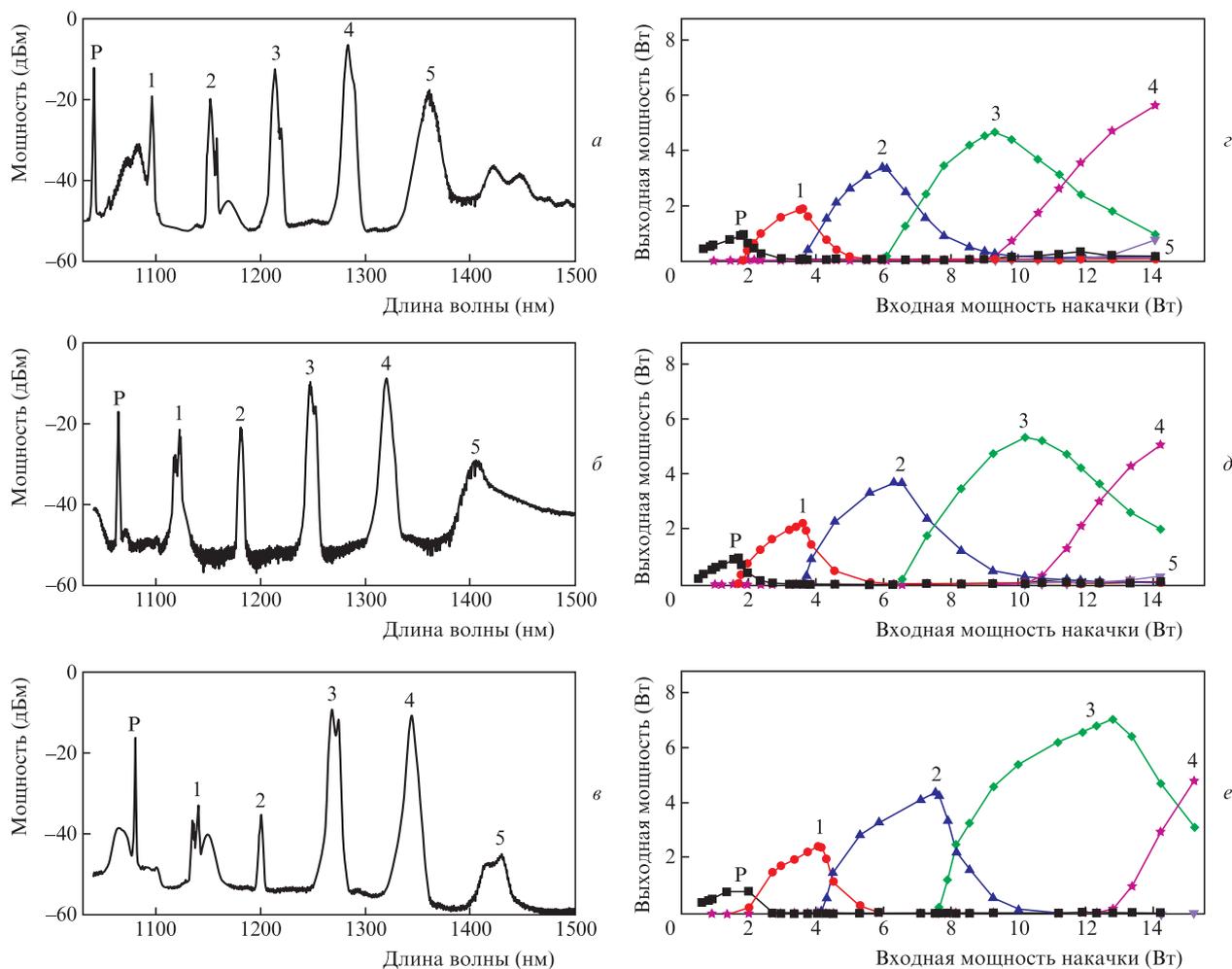


Рис.3. Выходные спектры ВКР-лазера со СРОС в волокне длиной 1.8 км при входных мощностях накачки  $P_p = 14.1$  (а), (б) и 15.2 Вт (в) для длин волн накачки  $\lambda_p = 1040.6$  (а), 1064.4 (б) и 1080.1 нм (в), а также выходные мощности различных стоксовых компонент и проходящей мощности накачки в зависимости от  $P_p$  для  $\lambda_p = 1040.6$  (з), 1064.4 (д) и 1080.1 нм (е); буквой Р показаны длины волн и мощности накачки, цифрами 1–5 – длины волн и мощности стоксовых компонент.

93% на  $\lambda = 1.1$  мкм до 6% на 1.4 мкм (см. рис.2). В результате мощность генерации соответствующих стоксовых компонент заметно увеличивается при перестройке длины волны накачки в длинноволновую область.

Оптическая эффективность преобразования, рассчитанная как отношение мощности стоксовой компоненты соответствующего порядка к входной мощности накачки, составила примерно 62%, 59% и 54% для 1-й, 2-й и 3-й компоненты соответственно при  $\lambda_p = 1064.4$  и 1080.1 нм (рис.3, д, е) и немного меньше при  $\lambda_p = 1040.6$  нм (рис.3, з). Мощность генерации изменялась от 2 до 7 Вт для различных стоксовых порядков и достигала 5 Вт для 4-й стоксовой компоненты на длине волны 1.34 мкм (рис.3, в, е), что соответствует эффективности преобразования 33%. Из-за ограничения мощности накачки и конкуренции с процессом четырехволнового смешения мощность генерации для 5-й стоксовой компоненты вблизи длины волны 1.36 мкм составила 0.8 Вт (рис.3, а, з). Полученные значения мощностей и эффективностей преобразования существенно больше продемонстрированных в работе [6], т. к. нами использовалось волокно значительно меньшей длины. Кроме того, наша схема, собранная из волоконных компонент с сохранением поляризации, позволяет генерировать стабильное линейно поляризованное излучение. Как было продемонстрировано в работах [4, 5], ко-

эффициент экстинкции излучения в такой схеме превышает 22 дБ и не падает для различных стоксовых компонент при увеличении мощности генерации.

#### 4. Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что эффективная каскадная генерация возможна в том случае, когда она происходит в области нормальной дисперсии длинного волоконного световода. Кроме того, генерация узкополосного стоксова излучения наблюдается также при накачке далеко в области аномальной дисперсии световода [1]. Но в окрестностях ДВНД ( $\sim 1.4$  мкм) конкуренция между нелинейными эффектами приводит к росту широкополосного спектрального континуума и уменьшению эффективности каскадной ВКР-генерации. Для дальнейшего продвижения в длинноволновую область спектра необходимо решить эту проблему.

Одним из решений является использование узкополосной ВБР, записанной на длине волны 5-й стоксовой компоненты. Ожидалось, что установка такой ВБР между фильтрующим селективным ответвителем и широкополосным зеркалом Саньяка в схеме на рис.1 должна способствовать возникновению узкополосной генерации 5-й стоксовой компоненты. На рис.4 показаны выходные

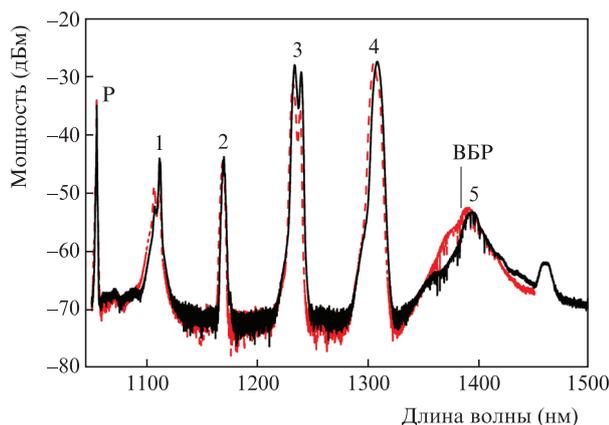


Рис.4. Выходные спектры ВКР-лазера со СРОС в волокне длиной 1.8 км при накачке линейно поляризованным излучением на длине волны 1055 нм при использовании ВБР на 1384 нм (сплошная линия) и без нее (штриховая линия).

спектры при накачке на длине волны 1055 нм, полученные без использования ВБР и с ВБР, записанной на длине волны 1384 нм. Видно, что спектральный континуум вблизи 1.4 мкм остался и при наличии ВБР, следовательно, он генерируется за один проход по длинному пассивному волоконному световоду.

Увеличение числа стоксовых каскадов возможно, кроме того, при укорочении волоконного световода с одновременным увеличением мощности накачки, а также при использовании пассивного волокна с длиной волны нулевой дисперсии, сдвинутой в длинноволновую область спектра (например, до 2 мкм).

## 5. Заключение

В настоящей работе за счет ВКР-усиления и рэлеевской обратной связи в пассивном волокне с сохранением поляризации длиной 1.8 км при накачке линейно поляризованным излучением продемонстрирована эффективная каскадная ВКР-генерация линейно поляризованного излучения. Получены стоксовы компоненты до 5-го порядка (с длиной волны вблизи 1.4 мкм). Оптическая эффективность преобразования излучения накачки в первые три стоксовы компоненты находилась на уровне 55%–60% и примерно 36% для 4-й стоксовой компоненты (на  $\lambda =$

1.32 мкм). При перестройке 4-й компоненты на длину волны 1.34 мкм ее мощность достигла 5 Вт с эффективностью преобразования  $\sim 33\%$ . Мощность 5-й стоксовой компоненты на длине волны 1.36 мкм составила  $\sim 1$  Вт. При увеличении длины волны до  $\sim 1.4$  мкм наблюдалась генерация широкополосного континуума в области аномальной дисперсии волокна, возникающая из-за других нелинейных эффектов, в частности четырехволнового смешения, которое ограничивало каскадную ВКР-генерацию на длинах волн свыше 1.4 мкм.

Разработанная лазерная схема интересна для фундаментальных исследований, а также для сенсорных и телекоммуникационных применений, где необходимы эффективные источники с линейно поляризованным излучением. Так, полученный спектральный диапазон (1.34–1.36 мкм) вполне подходит для того, чтобы использовать представленный ВКР-лазер со СРОС в схеме волоконного распределенного ВКР-усилителя с накачкой второго порядка [8] или в схеме распределенной бриллюэновской сенсорной системы [9]. Хотя схема каскадного ВКР-лазера на основе традиционного волоконного резонатора из ВБР на все промежуточные стоксовы компоненты имеет на сегодняшний день большую эффективность (до 65% [10]), она гораздо сложнее и не позволяет получать линейно поляризованное излучение.

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

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., El-Taher A.E., Harper P., Churkin D.V., Kablukov S.I., Ania-Castanon J.D., Karalekas V., Podivilov E.V. *Nat. Photon.*, **4**, 231 (2010).
2. Turitsyn S.K., Babin S.A., Churkin D.V., Vatik I.D., Nikulin M., Podivilov E.V. *Phys. Rep.*, **542**, 133 (2014).
3. Du X., Zhang H., Wang X., Zhou P., Liu Z. *Opt. Lett.*, **41**, 571 (2016).
4. Zlobina E.A., Kablukov S.I., Babin S.A. *Opt. Lett.*, **40**, 4074 (2015).
5. Babin S.A., Zlobina E.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V. *Sci. Rep.*, **6**, 22625 (2016).
6. Zhang L., Jiang H., Yang X., Pan W., Feng Y. *Opt. Lett.*, **41**, 215 (2016).
7. Babin S.A., Vatik I.D., Laptev A.Yu., Bubnov M.M., Dianov E.M. *Opt. Express*, **22**, 24929 (2014).
8. Rosa P., Rizzelli G., Tan M., Harper P., Ania-Castanon J.D. *Opt. Express*, **23**, 28634 (2015).
9. Rao Y., Jia X., Wang Z., Zhang W., Yuan C., Li J., Yan X., Wu H., Zhu Y., Peng F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9157**, 91575P (2014).
10. Supradeepa V.R., Nicholson J.W., Headley C.E., Yan M.F., Palsdottir B., Jakobsen D. *Opt. Express*, **21**, 7148 (2013).