

# Двухчастотный волоконный ВКР-лазер

В.М.Парамонов, А.С.Курков, О.И.Медведков, Д.А.Грух, Е.М.Дианов

*Предложена оригинальная схема волоконного ВКР-лазера, излучающего на двух длинах волн. В схеме используется одноступенчатый рамановский конвертер с выходной брэгговской решеткой, имеющий коэффициент отражения более 99 %. Генерация на двух длинах волн достигается за счет «охвата» спектра выходного излучения спектром отражения выходной решетки.*

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, волоконный лазер, брэгговская решетка.

## 1. Введение

В настоящее время волоконные конвертеры (лазеры), использующие эффект вынужденного комбинационного рассеяния, находят широкое применение в качестве источников накачки рамановских и эрбиевых усилителей [1, 2]. Рамановские волоконные источники, излучающие на двух и более длинах волн, были предложены для расширения спектра усиления рамановских волоконных усилителей и улучшения их шумовых характеристик [3, 4]. Как правило, в таких устройствах в качестве активной среды используется один волоконный световод, а генерация на нескольких длинах волн достигается установкой соответствующего числа пар брэгговских решеток, образующих резонатор конвертера. Следует отметить, что поскольку в схеме используются различные решетки, фазовые соотношения между разными длинами волн меняются случайным образом. Это обусловлено внешними воздействиями (тепловыми, акустическими, механическими), которые не могут быть одинаковыми для решеток, записанных на различных участках световода. Кроме того, такие воздействия меняют оптическую длину отрезка световода между решетками. Поэтому генерируемые излучения не являются взаимно когерентными. В то же время представляет интерес создание двухволнового источника взаимно когерентного излучения, который можно будет рассматривать как генератор высокочастотных колебаний на разностной частоте излучаемых длин волн. Такой генератор с двумя полупроводниковыми излучателями был продемонстрирован в работе [5].

В настоящей работе предлагается новая схема рамановского волоконного лазера, излучающего на двух длинах волн. При этом резонатор лазера образуется лишь одной парой решеток, что позволяет предполагать взаимную когерентность излучений на разных длинах волн.

В.М.Парамонов, А.С.Курков, О.И.Медведков, Д.А.Грух, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 15 июля 2003 г.

## 2. Оптическая схема эксперимента

В процессе исследования оптических свойств двухступенчатых ВКР-конвертеров было обнаружено, что спектр выходящего излучения на частоте первого (промежуточного) стока сдвига представляет собой два пика, разнесенных на 0.2–1 нм. Поскольку резонатор конвертера для первого резонатора образуется двумя брэгговскими решетками с коэффициентами отражения, близкими к 100 %, логично предположить, что на его выходе наблюдается излучение, «охватывающее» спектр отражения выходной решетки на соседних длинах волн. Возникновение этого эффекта можно объяснить уширением спектра излучения внутри резонатора из-за нелинейных процессов. При этом спектр излучения оказывается шире спектра отражения выходной брэгговской решетки. Мы предлагаем использовать этот эффект для генерации двух длин волн в одноступенчатом рамановском конвертере с резонатором, сформированным двумя брэгговскими решетками с высокими коэффициентами отражения.

Оптическая схема двухчастотного лазера представлена на рис.1. Полупроводниковый лазер с длиной волны около 980 нм и максимальной мощностью 4 Вт использовался для накачки волоконного лазера на основе световода с двойной оболочкой, легированного ионами  $\text{Yb}^{3+}$ . Резонатор  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера был сформирован двумя брэгговскими решетками – входной, с коэффициентом отражения  $R \approx 1$ , и выходной, с  $R = 0.2$ . Иттербиевый лазер имел длину волны излучения 1080 нм и максимальную мощность 2.5 Вт; его излучение вводилось в ВКР-лазер на ос-

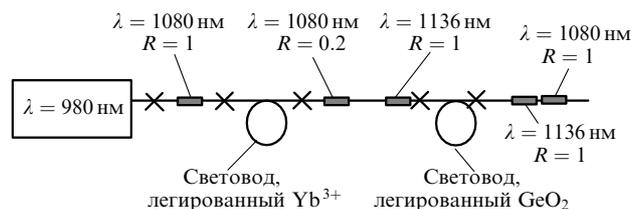


Рис.1. Оптическая схема двухволнового ВКР-лазера (прямоугольниками обозначены брэгговские решетки, крестиками – точки сварки волокон).

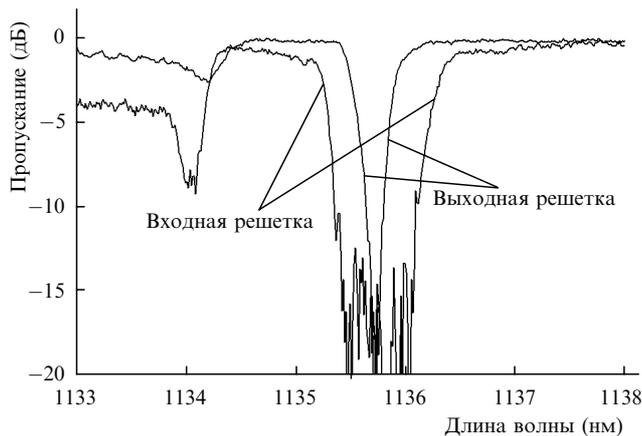


Рис.2. Спектры пропускания брэгговских решеток, формирующих резонатор ВКР-лазера.

нове волоконного световода с сердцевинной из германосиликатного стекла, молярная концентрация двуокиси германия в сердцевине составляла около 4%. В экспериментах использовались отрезки  $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ -световода длиной 200, 620 и 1000 м. Резонатор ВКР-лазера был образован двумя брэгговскими решетками с коэффициентами отражения  $R \approx 1$  на  $\lambda = 1136$  нм. При этом ширина спектра отражения выходной решетки была меньше ширины спектра отражения входной. Спектры пропускания обеих решеток ВКР-лазера представлены на рис.2. На выходе ВКР-лазера использовалась также дополнительная брэгговская решетка с высоким коэффициентом отражения на длине волны 1080 нм, обеспечивающая возврат непоглощенной части излучения волоконного  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера в резонатор ВКР-лазера.

### 3. Экспериментальные результаты

На выходе ВКР-лазера наблюдалось излучение на двух длинах волн с расстоянием между максимумами около 0.5 нм. Соответствующий спектр излучения, измеренный с разрешением 0.1 нм, показан на рис.3. Следует отметить, что соотношение амплитуд обоих пиков определяется точностью совпадения максимумов отражения входной и выходной брэгговских решеток. Для выравнивания амплитуд пиков в спектре излучения можно использовать температурную подстройку спектра отражения одной из решеток.

На рис.4 представлены зависимости выходной мощности двухволнового ВКР-лазера от мощности полупроводникового лазера накачки

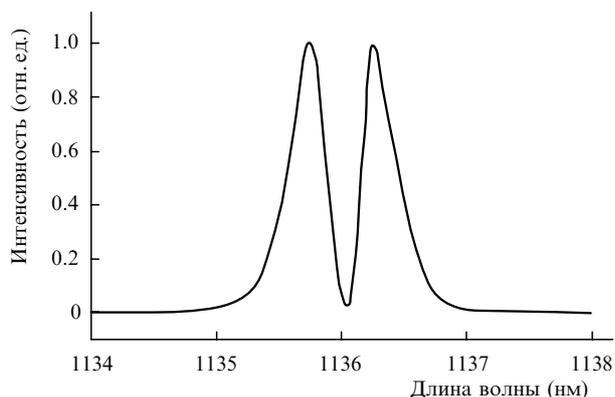


Рис.3. Выходной спектр излучения ВКР-лазера.

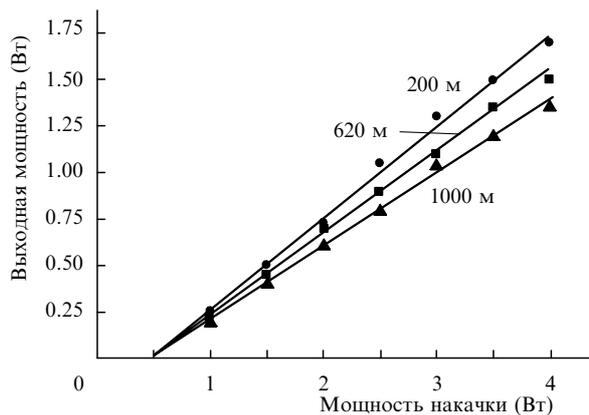


Рис.4. Зависимости выходной мощности ВКР-лазера ( $\lambda = 1136$  нм) от мощности полупроводникового лазера накачки ( $\lambda = 980$  нм) для трех различных длин световода в резонаторе ВКР-лазера

водникового лазера накачки при использовании  $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ -световода с тремя различными длинами в резонаторе ВКР-лазера. Наибольшая эффективность достигнута при длине световода 200 м. Максимальная мощность в данном случае составляет 1.7 Вт, что соответствует 42%-ному преобразованию излучения многомодового источника накачки и, следовательно, 68%-ному преобразованию излучения иттербиевого многомодового лазера. Нужно отметить, что достигнутая эффективность практически не уступает результатам, полученным в лазере с выходной решеткой, оптимизированной для достижения максимальной мощности. (Для использованного типа световода максимальная эффективность преобразования составляет 73% без учета эффекта «охвата» спектра отражения выходной решетки [6].)

### 4. Динамические характеристики устройства

Реализованный двухволновый ВКР-лазер обладает интересными динамическими свойствами. Известно, что удаление из резонатора волоконного иттербиевого лазера стабилизирующей решетки может привести к импульсной генерации устройства. Качественно это можно объяснить следующим образом. В отсутствие выходной решетки непосредственно в схеме  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера обратная связь обеспечивается решеткой, установленной на выходе ВКР-конвертера. В условиях высокой эффективности преобразования излучения  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера обратная связь ослабевает настолько, что может произойти срыв его генерации. Однако при малой мощности генерации  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера коэффициент ВКР-преобразования становится пренебрежимо малым, поэтому обратная связь и режим генерации восстанавливаются. Как правило, в этом случае ВКР-лазер работает в режиме самосинхронизации мод на частоте, соответствующей времени двойного обхода его резонатора.

В случае двухволнового ВКР-лазера устранение из оптической схемы стабилизирующей выходной решетки волоконного иттербиевого лазера привело к появлению другой динамической картины. На рис.5 показана осциллограмма излучения импульсного режима двухволнового лазера (длина использованного  $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ -световода составила 620 м). Видно, что наблюдаются два типа импульсов. Частота следования наиболее интенсивных из них составляет около 160 кГц, что соответствует времени двойного обхода резонатора ВКР-лазера. Частота

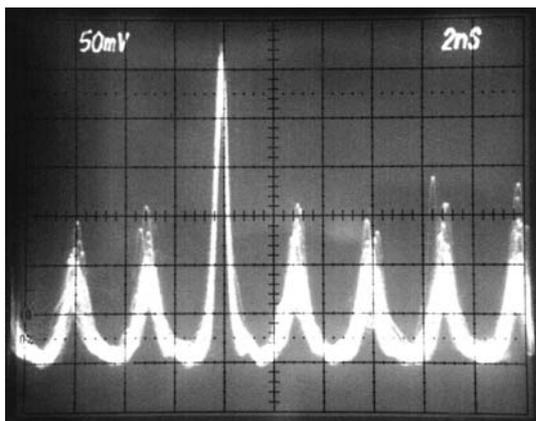


Рис.5. Оциллограмма импульсного режима работы двухволнового ВКР-лазера.

импульсов с меньшей амплитудой составляет около 330 МГц, при этом пьедестал от непрерывного излучения практически отсутствует. Следует отметить, что данная частота равна  $c/2\Delta L$ , где  $\Delta L$  – разность оптических путей, возникшая из-за разности фаз для различных длин волн излучения:

$$\Delta L = L \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (1)$$

Здесь  $L$  – длина резонатора, равная 640 м с учетом длины иттербиевого лазера;  $\Delta \lambda$  – разность длин волн ВКР-лазера;  $\lambda$  – длина волны его излучения.

При использовании  $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ -световода длиной 1000 м в резонаторе ВКР-лазера частота модуляции снизилась примерно до 200 МГц, что соответствует расчету по формуле (1). При этом временная стабильность формы импульсов улучшилась. Однако в случае длины световода 200 м стабильная картина импульсной генерации ВКР-лазера не наблюдалась. По-видимому, при такой длине световода существенная часть излучения иттербиевого лазера, отраженного выходной решеткой, остается преобразованной и обратная связь для  $\text{Yb}^{3+}$ -лазера

полностью не срывается. Поэтому для получения генерации импульсов с частотой повторения  $\sim 1$  ГГц лучше уменьшать спектральный интервал  $\Delta \lambda$  между длинами волн генерации, чем длину световода  $L$  в резонаторе ВКР-лазера.

## 5. Заключение

Таким образом, показано, что однопроходная схема ВКР-лазера с глухим выходным брэгговским отражателем позволяет реализовать двухволновый источник излучения. Спектральное расстояние между длинами волн определяется параметрами брэгговских решеток и может составлять от долей нанометра до единиц нанометров. То обстоятельство, что для генерации двух длин волн используются одни и те же брэгговские решетки, позволяет предположить взаимную когерентность полученных излучений. Прямое подтверждение когерентности путем измерения биений сигналов с различными длинами волн требует использования специальной аппаратуры, т. к. разностная частота в нашем случае составляет более 100 ГГц.

Авторы благодарят И.А.Буфетова за помощь в работе.

1. Dianov E.M., Prokhorov A.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 1022 (2000).
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. Normandin X., Leplingard F., Bourova E., Leclère C., Lopez T., Guérin J.J., Bayart D. *Tech. Dig. OFC-2002* (Anaheim, USA, 2002, p.TuB2).
4. Bouteiller J.C., Brar K., Bromage J., Wang Z., Headley C. *Tech. Dig. OFC-2002* (Anaheim, USA, 2002, p.FB3).
5. Belovolov M.I., Belov A.V., Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Chernikov S.V., Dianov E.M., Fursa D.G., Gurjanov A.N., Kurkov A.S., Mamyshev P.V., Miroshnichenko S.I., Rummyantsev S.D., Semenov V.A., Sysolyatin A.A. *Tech. Dig. CLEO'92* (Anaheim, USA, 1992, Postdeadline paper, p. 66–67).
6. Rini M., Cristiani I., Degiorgio V., Kurkov A.S., Paramonov V.M. *Opt. Commun.*, **203** (1–2), 139 (2002).