

## Волоконный ВКР-усилитель на длину волны 1.65 мкм

А.С.Курков, В.М.Парамонов, О.Н.Егорова, О.И.Медведков, Е.М.Дианов, И.Д.Залевский, С.Е.Гончаров

*Создан волоконный ВКР-усилитель, предназначенный для работы на длине волны 1.65 мкм. Для накачки ВКР-усилителя изготовлен и исследован двухстадийный ВКР-конвертер на фосфоросиликатном световоде на длину волны 1.53 мкм. Используя данную конструкцию усилителя с накачкой от ВКР-конвертера на фосфоросиликатном световоде, можно создавать устройства с максимумом полосы усиления сигнала в диапазоне 1.6–1.7 мкм. Основой ВКР-усилителя является световод с высоким (25%) молекулярным содержанием  $\text{GeO}_2$  в сердцевине. Коэффициент усиления, полученный при различных мощностях входного сигнала, составил 22–25 дБ. Проведенный расчет показывает, что использование стандартного телекоммуникационного световода (с меньшим содержанием  $\text{GeO}_2$ ) позволяет увеличить коэффициент усиления данной схемы за счет уменьшения оптических потерь на стыковку световодов.*

**Ключевые слова:** ВКР-усилитель, ВКР-конвертер, высоколегированный волоконный световод, коэффициент усиления.

### 1. Введение

В течение десятилетий увеличение пропускной способности волоконно-оптических линий связи происходило за счет роста скорости передачи сигналов при использовании одной длины волны. В последние годы для существенного повышения скорости передачи информации используется спектральное уплотнение каналов, т.е. передача сигналов на нескольких длинах волн по одному световоду. Современное качество световодов позволяет передавать оптические сигналы с длинами волн вплоть до 1.7 мкм благодаря достаточно низким оптическим потерям в этой области. Однако для практического освоения длинноволнового диапазона необходимы соответствующие усилители оптического сигнала. Длинноволновая граница полосы усиления эрбиевых волоконных усилителей, широко применяемых в настоящее время, составляет 1.6 мкм. Для работы в области свыше 1.6 мкм могут использоваться усилители, действующие на эффекте вынужденного комбинационного, или рамановского, рассеяния (ВКР).

В отличие от редкоземельных усилителей, рабочий диапазон ВКР-усилителей не ограничен в области прозрачности кварцевых световодов. Так, например, в оксиде германия, который является наиболее часто используемой добавкой для повышения коэффициента преломления сердцевинны световода, а также в оксиде кремния сдвиг частоты комбинационного рассеяния относительно длины волны накачки  $\Delta\nu_R = 440 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, для усиления сигнала в диапазоне 1.6–1.7 мкм в таких световодах необходима их накачка на длинах волн в области 1.5–1.58 мкм. Достаточно мощными источниками накачки здесь являются волоконные эрбий-иттербиевые лазеры с двойной оболочкой и ВКР-конвертеры.

Для линий связи со спектральным уплотнением каналов необходимы усилители с полосой усиления, покрывающей весь рабочий диапазон длин волн. Для создания эффективного усилителя на диапазон 1.6–1.7 мкм (где уже не работают эрбиевые усилители и еще достаточно малы оптические потери в световоде) необходима накачка усилителя на нескольких длинах волн одновременно, т.к. ширина спектра комбинационного рассеяния в кварцевых световодах обычно не превышает 50 нм. Рабочий диапазон эрбий-иттербиевого лазера составляет 1.53–1.6 мкм и может быть использован для ВКР-усилителей, работающих в диапазоне 1.65–1.7 мкм. С другой стороны, волоконный ВКР-конвертер может применяться для усиления сигналов во всем спектральном диапазоне – от 1.6 до 1.7 мкм и выше. Таким образом, для накачки усилителей, работающих в диапазоне 1.6–1.7 мкм, могут использоваться как комбинация эрбий-иттербиевого лазера и ВКР-конвертера, так и несколько волоконных ВКР-конвертеров, работающих на различных длинах волн.

В этой связи ВКР-лазеры, или ВКР-конвертеры, привлекают к себе большое внимание. Было опубликовано множество работ, посвященных волоконным ВКР-конвертерам на германосиликатном волокне с накачкой от иттербиевых или неодимовых лазеров [1, 2]. Однако для получения ВКР-генерации на длине волны 1.53 мкм в германосиликатном волокне при накачке иттербиевым лазером ( $\lambda = 1.06 - 1.12 \text{ мкм}$ ) требуется семикаскадное ВКР-преобразование. Необходимая при этом сложная конструкция резонатора приводит к большим оптическим потерям, а также к высокой стоимости данного устройства.

Конструкция резонатора ВКР-конвертера может быть существенно упрощена с помощью использования материалов с большим, чем у оксида германия, частотным сдвигом комбинационного рассеяния. Таким материалом, в частности, является пятиокись фосфора  $\text{P}_2\text{O}_5$ , в

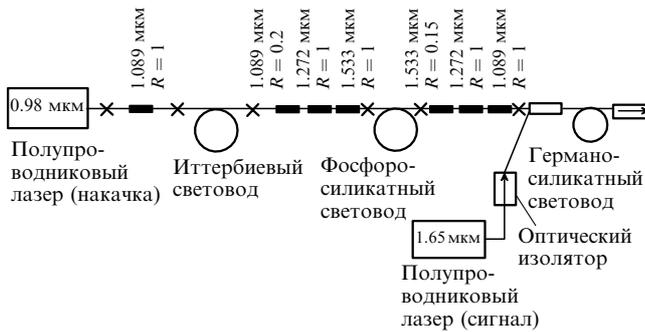


Рис.1. Схема усилителя (крестиками обозначены точки сварки).

которой  $\Delta\nu_R = 1300 \text{ см}^{-1}$ . Разработанные в последние годы оптические волокна с сердцевиной, легированной  $\text{P}_2\text{O}_5$ , и малыми оптическими потерями [3] позволяют создавать эффективные ВКР-конвертеры на их основе [4].

В настоящей работе нами изготовлены и исследованы волоконный ВКР-усилитель на длину волны 1.65 мкм, а также двухкаскадный ВКР-конвертер на фосфоросиликатном волокне, являющийся источником накачки усилителя. В качестве усиливающей среды в ВКР-усилителе использовалось волокно с высоким содержанием оксида германия в сердцевине. Однако по расчетам характеристики ВКР-усилителя могут быть существенно улучшены при использовании стандартного одномодового волокна со сдвинутой дисперсией (DSF), имеющего при существенно меньшем коэффициенте усиления гораздо меньшие потери на сварку из-за большего, чем у высокогерманатного волокна, размера пятна моды.

## 2. Схема установки

Для накачки волоконного ВКР-конвертера использовалось излучение волоконного иттербиевого лазера с двойной оболочкой, работающего на  $\lambda = 1.089 \text{ мкм}$  (рис.1). Максимальная выходная мощность лазера составляла 5.2 Вт. Резонатор ВКР-конвертера был образован двумя парами брэгговских решеток на длины волн излучения первой и второй стоксовых компонент 1.272 и 1.533 мкм, а также решеткой на длину волны накачки. В качестве активной среды был использован световод с молекулярным содержанием  $\text{P}_2\text{O}_5$  11% и оптическими потерями на уровне 1 дБ/км, что при настоящем развитии технологии фосфоросиликатных световодов отвечает оптимальным параметрам [3]. Длина фосфоросиликатного световода составляла 250 м.

Источником усиливаемого сигнала на длине волны 1.65 мкм служил полупроводниковый лазер с волоконным выходом. Излучения накачки и сигнала вводились в

Рис.2. Зависимость выходной мощности волоконного конвертера на длину волны  $\lambda = 1.533 \text{ мкм}$  от введенной мощности накачки.

усилитель с помощью направленных ответвителей. Для предотвращения возникновения генерации в резонаторе, сформированном выходным торцом усилителя и выходным зеркалом полупроводникового лазера, в схему были введены два оптических изолятора.

В экспериментах использовались два световода (I и II типов) с высоким содержанием  $\text{GeO}_2$  в сердцевине и сходными характеристиками (табл.1). Диаметры пятна моды в световоде с высоким содержанием оксида германия и в стандартном световоде, использовавшемся при изготовлении направленного ответвителя, существенно различались, что приводило к большим оптическим потерям на сварку. Мощность накачки, введенная в усиливающий световод, составляла 800–900 мВт.

## 3. Результаты эксперимента

Зависимость выходной мощности ВКР-конвертера от мощности накачки представлена на рис.2. Дифференциальная эффективность генерации составляет 52%, а квантовая эффективность при мощности накачки 5.2 Вт равна 56%. Максимальная выходная мощность ВКР-конвертера достигает 2.1 Вт.

Характеристики усилителя измерялись при входной мощности сигнала  $P_{s0} = 5$  и 220 мкВт (рис. 3). При мощности  $P_{s0} = 220 \text{ мкВт}$  в световоде I типа длиной 7.2 км удалось получить усиление 25 дБ (рис. 3, а). Поскольку оптический изолятор частично пропускал излучение на длине волны 1.65 мкм в обратном направлении, то при уменьшении мощности сигнала в световоде I типа возникла самопроизвольная генерация в резонаторе, сформированном выходным торцом световода и выходным зеркалом полупроводникового лазера. В связи с этим для исследования усиления сигнала меньшей мощности был использован световод II типа меньшей длины (3.3 км), в котором при усилении сигнала мощностью  $P_{s0} = 5 \text{ мкВт}$  был достигнут коэффициент усиления свыше 20 дБ (рис.3,б).

Табл.1.

Характеристики световода	Световод со сдвинутой дисперсией (DSF)	Высоколегированный $\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$ -световод	
		I тип	II тип
Оптические потери $\alpha_s$ на $\lambda = 1.65 \text{ мкм}$ (дБ·км <sup>-1</sup> )	0.25	0.57	0.58
Оптические потери $\alpha_p$ на $\lambda = 1.53 \text{ мкм}$ (дБ·км <sup>-1</sup> )	0.2	0.68	0.8
Коэффициент усиления световода $g_0$ (дБ·Вт <sup>-1</sup> ·км <sup>-1</sup> )	2.3	8.8	10.5
Длина световода (км)	1.0	7.2	3.329
Мощность входного сигнала $P_{s0}$ (мкВт)	370	220	5
Потери на сварку с ответвителем $\alpha_w$ (дБ)	0.4	2.8	2.2
Диаметр пятна моды на $\lambda = 1.65 \text{ мкм}$ (мкм)	7.3	4.7	4.3

Табл.2.

Характеристики световода	Световод со сдвинутой дисперсией (DSF)		Высоколегированный SiO <sub>2</sub> /GeO <sub>2</sub> -световод	
			I тип	II тип
Мощность входного сигнала P <sub>s0</sub> (мкВт)	5	220	220	5
Оптимальная длина ВС (км)	39.5	23.2	10.2	12.8
Усиление G (дБ)	40.3	30.9	26.4	37.9

**4. Анализ полученных данных и численная оптимизация ВКР-усилителя**

Существенным недостатком созданных усилителей являются большие потери на сварку германосиликатного световода с выходом направленного ответвителя, вызванные большим различием диаметров пятен мод. Увеличение диаметра пятна моды германатного световода с высоким содержанием GeO<sub>2</sub>, а следовательно, с большой разностью показателей преломления сердцевины и оболочки Δn, до диаметра пятна моды стандартного телекоммуникационного световода с меньшим содержанием GeO<sub>2</sub> и с гораздо меньшим Δn приведет к сдвигу длины волны отсечки второй моды германатного световода за λ > 1.65 мкм.

С другой стороны, для усиления сигнала может быть использован сам стандартный световод, обладающий меньшим коэффициентом усиления, позволяющим, однако, ввести в него всю мощность накачки. В этой связи нами был проведен расчет, позволивший сравнить характеристики волоконного ВКР-усилителя на световоде, сильно легированном оксидом германия, и на стандартном световоде со смещенной дисперсией типа DSF.

ВКР-усилитель описывается системой четырех дифференциальных уравнений

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp [k_0 g_0 (P_s^+ + P_s^-) P_p^\pm + \alpha_p P_p^\pm], \tag{1}$$

$$\frac{dP_s^\pm}{dz} = \pm [g_0 (P_p^+ + P_p^-) P_s^\pm - \alpha_s P_s^\pm]$$

с граничными условиями

$$P_p^+(0) = P_{p0}, P_s^+(0) = P_{s0}, \tag{2}$$

$$P_p^-(L) = P_p^+(L) R_{out}^p, P_s^-(L) = P_s^+(L) R_{out}^s,$$

где P<sub>p</sub><sup>+</sup>, P<sub>p</sub><sup>-</sup>, P<sub>s</sub><sup>+</sup>, P<sub>s</sub><sup>-</sup> – мощности накачки (p) и сигнала (s), распространяющихся в прямом (+) и обратном (-) направлениях; z – координата по длине световода; g<sub>0</sub> – коэффициент усиления световода; k<sub>0</sub> = λ<sub>s</sub>/λ<sub>p</sub> – отношение длины волны сигнала к длине волны накачки; α<sub>p</sub>, α<sub>s</sub> – оптические потери на длинах волн λ<sub>p</sub> и λ<sub>s</sub>; P<sub>p0</sub>, P<sub>s0</sub> – мощности накачки и сигнала на входе усилителя; R<sub>out</sub><sup>p</sup>, R<sub>out</sub><sup>s</sup> – коэффициенты отражения выходных решеток на длине волны накачки и сигнала.

В табл.1 представлены необходимые для расчета характеристики световодов. Коэффициент усиления волокна g<sub>0</sub>, входящий в систему (1), зависит только от свойств световода и может быть найден из решения системы (1), исходя из измеренных значений усиления и мощностей сигнала и накачки на входе усилителя.

Коэффициент g<sub>0</sub> для световодов I и II типов был рассчитан на основе данных, представленных на рис. 3. Для измерения усиления в световоде DSF был использован отрезок световода длиной 1 км. При максимальной мощности накачки, введенной в световод, 1.4 Вт и мощности входного сигнала 0.37 мВт было получено усиление сигнала 2.9 дБ. Это позволило рассчитать коэффициент усиления световода DSF g<sub>0</sub>, который составил 2.3 дБ × Вт<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup>.

Расчет характеристик усилителя проводился с учетом оптических потерь на сварку (табл.1) при мощности накачки на выходе направленного ответвителя 1.5 Вт. Расчетные значения усиления при оптимальной длине световода представлены в табл.2. Важно отметить, что усиление, которое может быть достигнуто в данной схеме при использовании стандартного световода (DSF), превышает усиление устройства на основе световода с высоким содержанием GeO<sub>2</sub>, что обусловлено большими потерями мощности накачки в точке сварки усиливающего световода с направленным ответвителем из-за значительного различия диаметров пятен мод.

**Заключение**

Таким образом, в настоящей работе изготовлен и исследован двухкаскадный ВКР-конвертер на фосфоросиликатном световоде, работающий на длине волны 1.53 мкм, который используется для накачки ВКР-усилителя. Дифференциальная эффективность ВКР-конвертера составила 52 %, максимальная выходная мощность – 2.1 Вт.

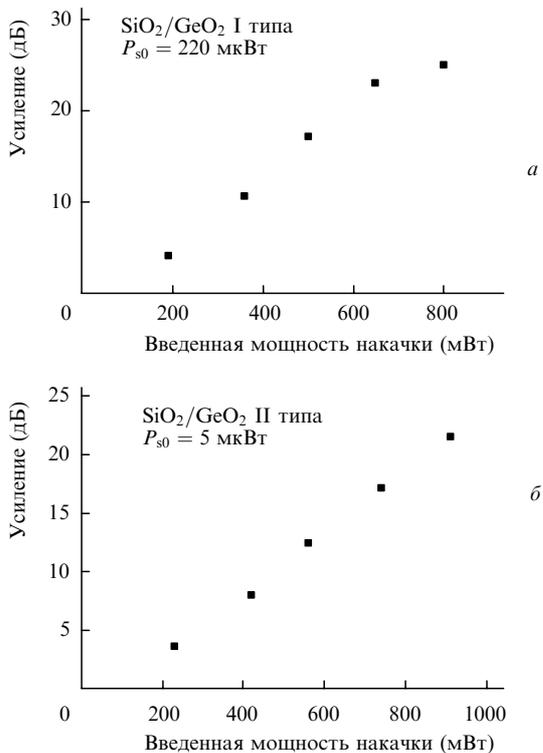


Рис.3. Зависимость усиления ВКР-усилителя от введенной мощности накачки для световодов I (а) и II (б) типов.

Изготовлен и исследован ВКР-усилитель, предназначенный для работы на длине волны 1.65 мкм. При входном сигнале мощностью 220 мкВт усиление составило 25 дБ, а при мощности 5 мкВт – 22 дБ. Существенным недостатком данной схемы являются потери мощности накачки при вводе в усиливающее волокно, обусловленные большим различием диаметров пятен мод световодов.

Были исследованы также усилительные характеристики стандартного световода со смещенной дисперсией. По полученным данным проведена расчетная оптимизация схемы ВКР-усилителя с использованием высоколегированного ( $\text{GeO}_2$ ) световода и стандартного DSF-волокна. Диаметр пятна моды последнего соответствует диаметру пятна моды волокна направленного ответвителя, что позволяет вводить мощность накачки практически без потерь. Благодаря этому максимальное усиление, которое может быть получено в стандартном световоде, существенно превышает максимальное усиление в высоколегированном световоде, достигая 40.3 дБ при мощности сигнала 5 мкВт и оптимальной длине 39.5 км и 30.9 дБ – при мощности сигнала 220 мкВт и оптимальной длине 23.2 км.

Авторы выражают благодарность В.Ф.Хопину и В.М.Машинскому за предоставленные световоды и А.В.Шубину за проведение измерений характеристик световодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ (гос. контракт № 37.023.11.0036).

1. Grubb S.G., Erdogan T., Mizrahi Y., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Lemaire P.J., Miller A.E., Kosinski S.G., Nykolak G., Becker P.C., Peckham D.W. *Proc. Opt. Amplifiers and Their Applications* (Brickridge, USA, 1994, PD-3).
2. Дианов Е.М., Фурса Д.Г., Абрамов А.А., Беловолов М.И., Бубнов М.М., Шипулин А.В., Прохоров А.М., Девярых Г.Г., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф. *Квантовая электроника*, **21**, 807 (1994).
3. Dianov E.M., Egorova O.N., Bubnov M.M., Bufetov I.A., Gur'anov A.N., Khopin V.F., Semjonov S.L., Shubin A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Ing.*, **4216**, 32 (2000).
4. Karpov V.I., Dianov E.M., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Bubnov M.M., Semyonov S.L., Vasiliev S.A., Protopopov V.N., Egorova O.N., Khopin V.F., Gur'yanov A.N., Machynskii M.P., Clements W.R.L. *Opt. Lett.*, **24**, 887 (1999).

## ПОПРАВКА

**Н.Г.Басов**, А.А.Ионин, Ю.М.Климачев, А.А.Котков, А.К.Курносков, Дж.Е.МакКорд, А.П.Напартович, Л.В.Селезнев, Д.В.Синицын, Г.Д.Хагер, С.Л.Шнырёв. Импульсный лазер на первом колебательном обертоне молекулы CO, действующий в спектральном диапазоне 2.5–4.2 мкм. 3. Коэффициент усиления и кинетические процессы на высоких колебательных уровнях («Квантовая электроника», 2002, т. 32, № 5, с. 404–410).

В статье допущены следующие опечатки: на рис.4 (с. 406) на правой оси ординат вместо «... (мДж·л<sup>-1</sup>·Амага<sup>-1</sup>)» следует читать «... (Дж·л<sup>-1</sup>·Амага<sup>-1</sup>)», на рис.6 (с. 407) на оси ординат вместо «... (Дж·л<sup>-1</sup>·Амага<sup>-1</sup>)» следует читать «... (мДж·л<sup>-1</sup>·Амага<sup>-1</sup>)».