

# Влияние спектрального уширения промежуточной стоксовой компоненты на эффективность работы двухкаскадного ВКР-конвертера

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

*Изготовлен и исследован двухкаскадный волоконный ВКР-конвертер (1.089/1.273/1.533 мкм) на световоде на основе кварцевого стекла, легированного оксидом фосфора P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Исследовано спектральное уширение первой стоксовой компоненты. Проведено численное моделирование ВКР-конвертера. С использованием экспериментальных данных улучшена методика моделирования ВКР-конвертера путем учета дополнительных потерь мощности первой стоксовой компоненты. Результаты расчета по улучшенной методике хорошо совпадают с экспериментом. Показано, что наличие дополнительных потерь мощности первой стоксовой компоненты приводит к изменению области оптимальных значений длины резонатора от 300–600 до 600–800 м.*

**Ключевые слова:** волоконный ВКР-конвертер, фосфоросиликатный световод.

## 1. Введение

Развитие мощных полупроводниковых источников накачки сделало возможным создание волоконно-оптических лазеров, или конвертеров, работающих на основе каскадного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), с рабочими длинами волн практически во всем диапазоне прозрачности световодов на основе кварцевого стекла [1, 2]. Относительно высокая мощность и широкий диапазон рабочих длин волн обеспечили применение ВКР-конвертеров для накачки волоконных усилителей [3, 4], в медицине [5] и т. д.

Эффективность работы ВКР-конвертера зависит от нескольких факторов – длины волоконного световода, мощности накачки, параметров световодов и брэгговских решеток. Оптимизация ВКР-конвертера обычно заключается в правильном подборе длины световода и коэффициентов отражения брэгговских решеток, что можно осуществить с помощью теоретической модели, предложенной в работе [6]. Именно эта модель использовалась для оптимизации ВКР-конвертеров в [7–9].

В модели ВКР-конвертера [6–9] излучение накачки и стоксовых компонент считается квазимонохроматичным. Однако наличие конечной спектральной ширины стоксовых компонент в реальных ВКР-конвертерах может приводить к различию результатов расчета и эксперимента, например из-за дополнительных потерь мощности в резонаторе. Эти потери возникают вследствие того, что спектр излучения стоксовой компоненты шире спектра отражения соответствующей брэгговской решетки. Явление вытекания части мощности промежуточной стоксовой компоненты из резонатора наблюдалось в ряде работ [10, 11].

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

Поступила в редакцию 12 января 2004 г., после доработки – 9 ноября 2004 г.

В настоящей работе методика расчета модели ВКР-конвертера улучшена путем введения эффективного коэффициента отражения брэгговских решеток на длину волны первого каскада 1.273 мкм, учитывающего явление вытекания части мощности излучения первой стоксовой компоненты из резонатора. При этом было получено хорошее совпадение экспериментальных результатов и результатов расчета для ВКР-конвертера с выходной длиной волны излучения 1.533 мкм. Для мощности накачки 4.4 Вт проведена оптимизация конвертера по длине резонатора и коэффициенту отражения выходной решетки и найдена область оптимальных значений этих параметров для ВКР-конвертера данной конфигурации.

## 2. Описание модели

Схема волоконно-оптического ВКР-конвертера представлена на рис.1. Двухкаскадное ВКР-преобразование частоты излучения (1.089/1.273/1.533 мкм) происходит в световоде на основе кварцевого стекла, легированного оксидом фосфора P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Резонатор сформирован двумя входными брэгговскими решетками на длины волн 1.273 и 1.533 мкм и тремя выходными брэгговскими решетками на длины волн 1.089, 1.273 и 1.533 мкм. Все брэгговские решетки, за исключением решетки для второй стоксовой компоненты (1.533 мкм) на выходе резонатора, имеют коэффициент отражения 100 %.

В стационарном состоянии мощность излучения накачки и двух стоксовых компонент описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений [7, 8]

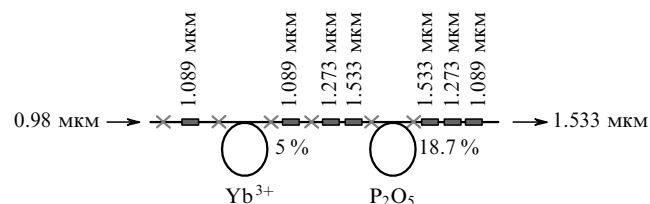


Рис.1. Схема волоконно-оптического ВКР-конвертера (0.98 мкм – длина волны излучения линейки диодных лазеров).

$$\begin{aligned} \frac{dP_p^\pm}{dz} &= \mp \alpha_p P_p^\pm \mp \frac{\lambda_{S1}}{\lambda_p} g_1 (P_{S1}^+ + P_{S1}^-) P_p^\pm, \\ \frac{dP_{S1}^\pm}{dz} &= \mp \alpha_{S1} P_{S1}^\pm \mp \frac{\lambda_{S2}}{\lambda_{S1}} g_2 (P_{S2}^+ + P_{S2}^-) P_{S1}^\pm \\ &\pm g_1 (P_p^+ + P_p^-) P_{S1}^\pm, \\ \frac{dP_{S2}^\pm}{dz} &= \mp \alpha_{S2} P_{S2}^\pm \pm g_2 (P_{S1}^+ + P_{S1}^-) P_{S2}^\pm \end{aligned} \quad (1)$$

с граничными условиями, описывающими отражение от волоконных брэгговских решеток и ввод излучения накачки в резонатор:

$$\begin{aligned} P_p^+(0) &= P_{in}, & P_p^-(L) &= R_p P_p^+(L), \\ P_{S1}^+(0) &= R_{S1} P_{S1}^-(0), & P_{S1}^-(L) &= R_{S1} P_{S1}^+(L), \\ P_{S2}^+(0) &= R_{S2} P_{S2}^-(0), & P_{S2}^-(L) &= R_{out} P_{S2}^+(L). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $P_p, P_{S1}, P_{S2}$  – мощности накачки, первой и второй стоксовых компонент, распространяющихся в прямом (+) и в обратном (–) направлениях;  $g_1$  – коэффициент усиления световода на длине волны 1.273 мкм при накачке на 1.089 мкм (1.089/1.273 мкм);  $g_2$  – коэффициент усиления световода на длине волны 1.533 мкм при накачке на  $\lambda = 1.273$  мкм (1.273/1.533 мкм);  $\alpha_p, \alpha_{S1}, \alpha_{S2}$  – оптические потери на длинах волн накачки ( $\lambda_p$ ), первой ( $\lambda_{S1}$ ) и второй ( $\lambda_{S2}$ ) стоксовых компонент;  $z$  – координата вдоль оси световода;  $P_{in}$  – входная мощность накачки;  $R_{S1}, R_{S2}$  – коэффициенты отражения брэгговских решеток для 1-й и 2-й стоксовых компонент на входе и выходе резонатора;  $R_p, R_{out}$  – коэффициенты отражения брэгговских решеток для излучения накачки и решетки на выходе резонатора;  $L$  – длина световода.

### 3. Схема эксперимента

Для накачки волоконного ВКР-конвертера использовался иттербиевый волоконный лазер с двойной оболочкой, работающий на длине волны 1.089 мкм (рис.1). Активным элементом конвертера служил световод, легированный оксидом фосфора  $P_2O_5$ , с максимальной разностью показателей преломления сердцевины и оболочки 0.01 и длиной волны отсечки первой моды 1.05 мкм. Оптические потери в световоде и коэффициенты усиления на различных длинах волн представлены в табл.1.

Оптические потери на каждой точке сварки и на решетке составляли в среднем 0.1 дБ, длина световода равнялась 400 м. Экспериментально определенный по спек-

Табл.1. Оптические потери и коэффициенты усиления исследуемого световода.

Длина волны (мкм)	Оптические потери (дБ/км)	Коэффициент усиления (дБ·Вт <sup>-1</sup> ·км <sup>-1</sup> )
1.089	1.38	6.47*
1.273	0.90	5.08**
1.533	0.99	–

\* Коэффициент усиления  $g_1$  на длине волны 1.273 мкм при  $\lambda_p = 1.089$  мкм. \*\* Коэффициент усиления  $g_2$  на длине волны 1.533 мкм при  $\lambda_{S1} = 1.273$  мкм.

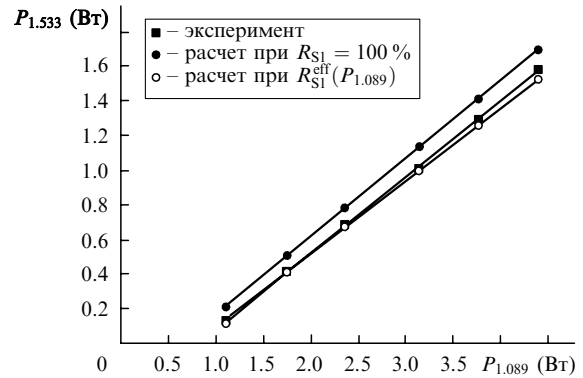


Рис.2. Экспериментально измеренная и расчетные зависимости мощности излучения на длине волны 1.533 мкм на выходе ВКР-конвертера от мощности накачки на  $\lambda_p = 1.089$  мкм при коэффициентах отражения брэгговских решеток на длине волны 1.273 мкм  $R_{S1} = 100\%$  и  $R_{S1}^{eff}(P_{1.089})$  из рис.5.

тру отражения коэффициент отражения выходной брэгговской решетки составил 18.7%, коэффициент отражения остальных решеток был близок к 100%.

### 4. Моделирование ВКР-конвертера и сравнение с экспериментом

Решение системы дифференциальных уравнений (1) с граничными условиями (2) проводилось методом переноса граничных условий [12]. На рис.2 представлены рассчитанные и экспериментально измеренные мощности излучения на длине волны 1.533 мкм. Видно, что мощность, рассчитанная для  $R_{S1} = 100\%$ , превышает экспериментально измеренные значения выходной мощности конвертера.

Одним из наиболее существенных факторов, снижающих эффективность ВКР-конвертера, очевидно, является то, что ширина спектра отражения соответствующей брэгговской решетки заметно меньше ширины спектра излучения промежуточной стоксовой компоненты. Это приводит к частичному вытеканию мощности излучения из резонатора. На рис.3 представлены спектры излучения первой стоксовой компоненты, выходящего из резонатора, при различных мощностях накачки. Провал в спектре вызван отражением излучения от брэгговской решетки. Для учета этих потерь в модели ВКР-конвертера вместо коэффициента отражения  $R_{S1}$  в условие (2) введен эффективный коэффициент отражения первой стоксовой ком-

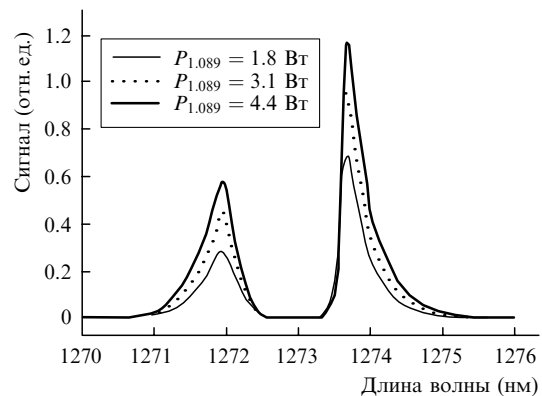


Рис.3. Спектры излучения первой стоксовой компоненты, выходящего из резонатора, при различных мощностях излучения накачки на  $\lambda_p = 1.089$  мкм.

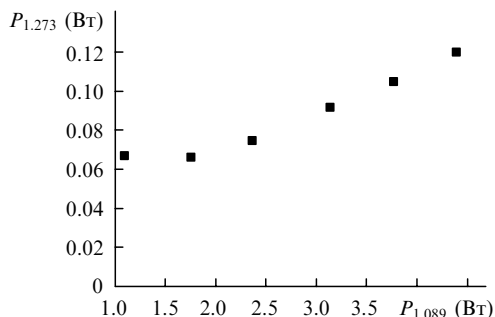


Рис.4. Зависимость мощности излучения на длине волны 1.273 мкм на выходе из резонатора от мощности накачки на  $\lambda_p = 1.089$  мкм.

поненты, учитывающий дополнительные потери мощности излучения в резонаторе.

Для каждого значения мощности накачки можно довольно точно определить эффективный коэффициент отражения первой стоксовой компоненты, исходя из ее расчетной мощности внутри резонатора в точке  $L = 400$  м и измеренной мощности излучения, вышедшего из резонатора (рис.4). Расчетные значения эффективного коэффициента отражения решетки на длину волны 1.273 мкм представлены на рис.5. Теоретическое исследование работы конвертера с учетом рассчитанного эффективного коэффициента отражения дает мощностную характеристику, более близкую к экспериментальной, чем в случае брэгговских решеток с  $R_{S1} = 100\%$  (см. рис.2).

С увеличением мощности накачки эффективный коэффициент отражения решетки уменьшается, что свидетельствует о возможном спектральном уширении первой стоксовой компоненты. Мы измерили спектр ее излучения внутри резонатора при различных мощностях накачки и установили, что с ростом мощности накачки ширина спектра действительно увеличивается (ширины спектров на рис.6,б соответствуют линиям, аппроксимированным гауссовыми кривыми).

Точные причины уширения спектра первой стоксовой компоненты до сих пор не ясны. По нашему мнению, их может быть несколько. Линия генерации в промежуточном стоксовом сигнале уширяется за счет заполнения спектрального интервала решетки (0.5–0.7 нм) с высоким коэффициентом отражения (99%). Данный процесс происходит интенсивнее при больших уровнях накачки, когда возникает генерация следующей стоксовой компоненты; при этом в ее излучение эффективно преобразуется дополнительная мощность накачки. В этих условиях рост центральной компоненты практически прекраща-

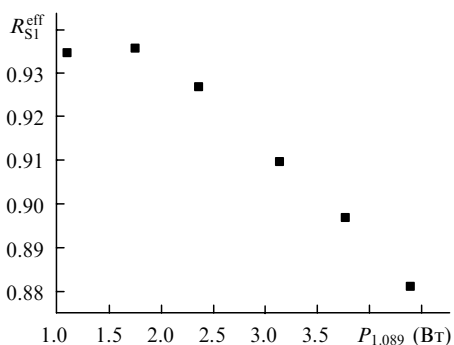


Рис.5. Расчетная зависимость эффективного коэффициента отражения брэгговских решеток на длину волны 1.273 мкм от мощности накачки на  $\lambda_p = 1.089$  мкм.

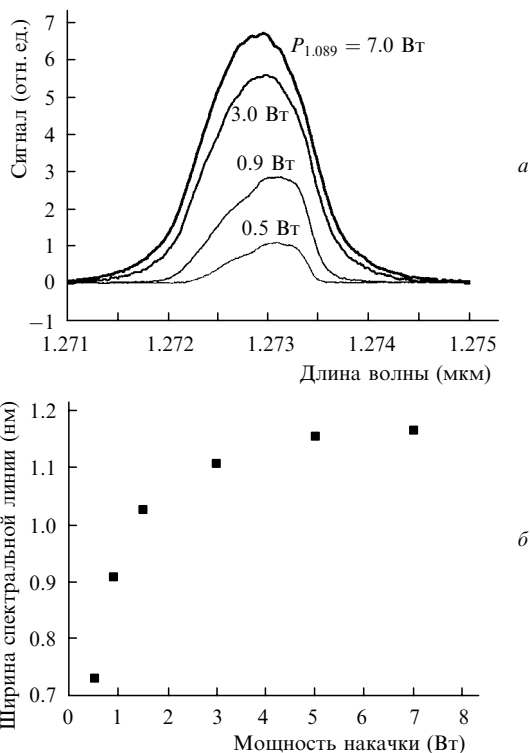


Рис.6. Спектры излучения первой стоксовой компоненты внутри резонатора ВКР-конвертера при различных мощностях накачки (а) и зависимость ширины гауссовой кривой, аппроксимирующей спектры излучения первой стоксовой компоненты, от мощности накачки на  $\lambda_p = 1.089$  мкм (б).

ется, однако на краях спектра возможно дальнейшее усиление первой стоксовой компоненты. Уширение спектра также может быть обусловлено четырехволновым смешением различных продольных мод ВКР-лазера с образованием излучения, длина волны которого лежит за пределами спектра отражения брэгговской решетки. Возникшее излучение может усиливаться излучением накачки посредством ВКР.

### 5. Влияние дополнительных потерь мощности первой стоксовой компоненты на оптимальные параметры двухкаскадного ВКР-конвертера

Эффективность работы ВКР-конвертера зависит от длины резонатора и коэффициента отражения выходной брэгговской решетки. Для каждой мощности накачки существуют оптимальные значения этих параметров, при которых выходная мощность ВКР-конвертера максимальна.

Нами была проведена численная оптимизация схемы конвертера. На рис.7 в виде номограмм представлены зависимости выходной мощности конвертера от длины световода и коэффициента отражения выходной решетки. Расчет (рис.7,а) проводился для мощности накачки 4.4 Вт и соответствующего ей эффективного коэффициента отражения брэгговской решетки на длину волны 1.273 мкм (см. рис.5).

Область, в которой выходная мощность ВКР-конвертера максимальна (свыше 1.6 Вт), соответствует длине световода  $L = 600 - 800$  м и коэффициенту отражения выходной брэгговской решетки  $R_{out} = 5\% - 10\%$ . Уменьшение длины световода до 300–400 м при соответ-

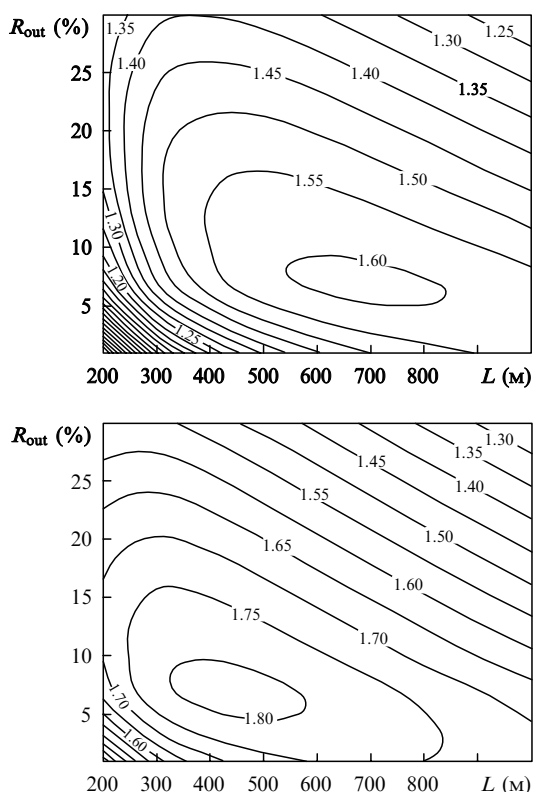


Рис.7. Расчетные зависимости выходной мощности конвертера от длины волокна и коэффициента отражения выходной решетки при реальном коэффициенте отражения брэгговской решетки (см. рис.5) (а) и  $R_{S1} = 100\%$  (б) на длине волны 1.273 мкм. Мощность накачки равна 4.4 Вт, числа на линиях соответствуют рассчитанной выходной мощности ВКР-конвертера в ваттах.

вующем выборе  $R_{out}$  не приводит к существенному уменьшению выходной мощности. Расчетная выходная мощность конвертера с параметрами, использованными в эксперименте ( $L = 400$  м,  $R_{out} = 18.7\%$ ), составляет около 94 % от максимальной выходной мощности.

Для сравнения на рис.7,б приведена зависимость выходной мощности конвертера от  $L$  и  $R_{out}$  при коэффициенте отражения брэгговской решетки на длине волны 1.273 мкм  $R_{S1} = 100\%$ . В этом случае область оптимальных значений длины резонатора и коэффициента отражения решетки  $R_{out}$  составляет 300–600 м и 5%–10% соответственно. Таким образом, при учете дополнительных потерь промежуточной стоксовой компоненты в резонаторе его оптимальная длина увеличивается.

## 6. Заключение

Установлено, что расчетная мощность излучения ВКР-конвертера (1.089/1.273/1.553 мкм) в квазимонохроматическом приближении превышает экспериментально измеренную. Это обусловлено тем, что в данной модели не учитываются дополнительные потери мощности излу-

чения, возникающие вследствие превышения шириной спектра излучения первой стоксовой компоненты (1.273 мкм) ширины спектра отражения соответствующей брэгговской решетки. Учет дополнительных потерь мощности первой стоксовой компоненты из-за рассогласования спектральных контуров позволил получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Для мощности накачки  $P_p = 4.4$  Вт проведена оптимизация параметров резонатора ВКР-конвертера с учетом и без учета дополнительных потерь первой стоксовой компоненты. Диапазоны оптимальных длин резонатора и коэффициентов отражения выходной решетки для модели, учитывающей потери мощности первой стоксовой компоненты, составляют 600–800 м и 5%–10% соответственно против 300–600 м и 5%–10% для модели, не учитывающей дополнительные потери.

Расчеты по модели (1), (2) с учетом дополнительных потерь промежуточной стоксовой компоненты показывают, что при правильном выборе коэффициента отражения выходной брэгговской решетки можно существенно уменьшить длину резонатора при незначительном снижении выходной мощности ВКР-конвертера. Так, при  $L = 400$  м и  $R_{out} = 18.7\%$  расчетная выходная мощность составляет более 94 % максимальной.

Авторы выражают благодарность К.Г.Леонтьеву за помощь в численном решении задачи (1), (2), а также И.А.Буфетову, А.В.Шубину, и М.Е.Лихачеву за измерение параметров световода.

1. Grubb S.G., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Mizrahi Y., Erdogan T., Lemaire P.J., Vengsarkar A.M., DiGiovanni D.J., Peckham D.W., Rochney B.H. *Proc. Optical Amplifiers and their Applications* (Davos, Switzerland, 1995, paper SaA4-1, p. 197).
2. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Belov A.V., Bubnov M.M., Semjonov S.L., Prokhorov A.M. *Electron. Lett.*, **33** (18), 1542 (1997).
3. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Mashinsky V.M., Sazhin O.D., Prokhorov A.M., Devyatikh G.G., Guryanov A.N., Khopin V.F. *Electron. Lett.*, **34** (7), 669 (1998).
4. Курков А.С., Парамонов В.М., Егорова О.Н., Медведков О.И., Дианов Е.М., Залевский И.Д., Гончаров С.Е. *Квантовая электроника*, **32** (8), 747 (2002).
5. Захаров С.Д., Иванов А.В. *Квантовая электроника*, **29** (3), 192 (1999).
6. Yeung J.Au., Yariv A. *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (6), 803 (1979).
7. Reed W.A., Coughram W.C., Grubb S.G. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (San Diego, Cal., 1995, paper WD1, p. 107).
8. Rini M., Cristiani I., Degiorgio V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36** (10), 1117 (2000).
9. Kurukitkoson N., Sugahara H., Turitsyn S.K., Egorova O.N., Kurkov A.S., Paramonov V.M., Dianov E.M. *Electron. Lett.*, **37** (21), 1281 (2001).
10. Karpov V.I., Clements W.R.L., Dianov E.M., Papernyi S.B. *Can. J. Phys.*, **78**, 407 (2000).
11. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Larionov Y.V., Medvedkov O.I., Vasiliev S.A., Melkoumov M.A., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Dianov E.M., Gur'yanov A.N., Khopin V.F., Durr F., Limberger H.G., Salathe R.-P., Zeller M. *Laser Phys.*, **13** (2), 234 (2003).
12. Моисеев Н.Н. *Элементы теории оптимальных систем* (М.: Наука, 1975, с. 130).