

Непрерывный высокоэффективный ВКР-лазер ($\lambda = 1.24$ мкм) на фосфосиликатном световоде

Е.М.Дианов*, И.А.Буфетов*, М.М.Бубнов*, М.В.Греков*, А.В.Шубин*, С.А.Васильев*, О.И.Медведков*, С.Л.Семенов*, О.Н.Егорова*, А.Н.Гурьянов**, В.Ф.Хопин**, М.В.Яшков**, Д.Варелас***, А.Иокко***, Д.Костантини***, Н.Г.Лимбергер***, Р.-П.Салате***

Создан эффективный волоконный ВКР-лазер на основе фосфосиликатного световода с низкими оптическими потерями. Волоконные брэгговские решетки, образующие резонатор лазера, записаны непосредственно в активном световоде. Проведены исследования параметров лазера, математическое моделирование и оптимизация устройства. В результате оптимизации выходная мощность достигла 2.4 Вт при накачке излучением неодимового волоконного лазера мощностью 3.5 Вт, что соответствует квантовой эффективности ВКР-лазера 77%.

Ключевые слова: ВКР, волоконный лазер, фосфосиликатный световод.

Введение

В последнее время в волоконно-оптической связи развивается тенденция к расширению спектрального диапазона и внедрению систем со спектральным уплотнением каналов. Имеющие широкий спектр усиления ВКР-усилители представляют с этой точки зрения особый интерес. Их важным достоинством является способность работать (при выборе соответствующей длины волны накачки) на любой длине волны спектрального диапазона, используемого для оптической связи. Так, для обеспечения усиления на длине волны 1.31 мкм необходим источник накачки с длиной волны около 1.24 мкм.

Одним из возможных источников накачки для ВКР-усилителя на $\lambda = 1.31$ мкм является ВКР-лазер, накачиваемый излучением Nd- или Yb-волоконного лазера и дающий в результате ВКР стоксово излучение с $\lambda = 1.24$ мкм. В последнее время было разработано несколько таких устройств [1–3]. В [3] нами был предложен ВКР-лазер, в котором вместо традиционно применяемого германосиликатного световода [1, 2] в качестве активной среды впервые был использован световод с сердцевинной, легированной фосфором (фосфосиликатный световод). Это позволило, благодаря стоксовому сдвигу, равному 1330 см^{-1} (что втрое превышает сдвиг в германосиликатном световоде), отказаться от каскадного ВКР-преобразования и уже в первой стоксовой компоненте получить необходимую длину волны 1.24 мкм. Таким образом, было достигнуто значительное упрощение схемы лазера.

В настоящей работе сообщается о существенном повышении эффективности волоконного ВКР-лазера на фосфосиликатном световоде за счет снижения распре-

ленных оптических потерь, повышения коэффициента рамановского усиления световода и оптимизации его длины, а также записи брэгговских решеток (БР) непосредственно в активном световоде [4].

В результате совершенствования структуры и технологии изготовления фосфосиликатного световода было достигнуто существенное снижение потерь на длинах волн накачки (α_p) и генерации (α_s) при одновременном повышении коэффициента рамановского усиления световода (g_0). На рис.1 приведен спектр оптических потерь световода с молярным содержанием P_2O_5 в сердцевине 13% ($\Delta n \approx 0.01$) (кривая 1). Оптические потери составляют $\alpha_p = 2.34$ дБ/км и $\alpha_s = 1.45$ дБ/км при $g_0 = 6.3$ дБ/(км·Вт). Для сравнения на рис.1 (кривая 2) представлен спектр потерь фосфосиликатного световода, использовавшегося в работе [3]. Для него $\alpha_p = 2.99$ дБ/км, $\alpha_s = 2.26$ дБ/км при $g_0 = 5.0$ дБ/(км·Вт).

1. Потери в резонаторе ВКР-лазера

При заданной мощности накачки КПД волоконного ВКР-лазера определяется g_0 , α_p , α_s и сосредоточенными потерями в резонаторе (в значительной мере это потери в точках сварки разнородных световодов). Если использу-

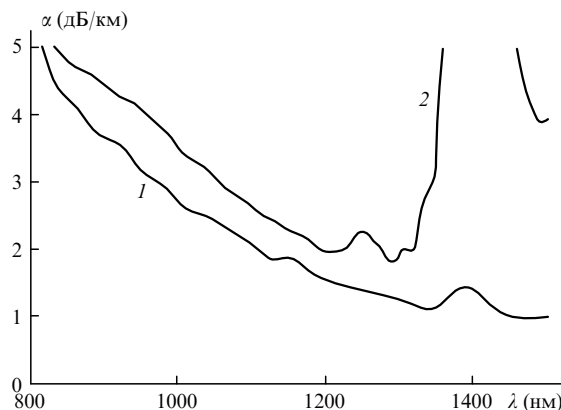


Рис.1. Спектры оптических потерь в фосфосиликатном световоде, использованном в настоящей работе (1) и в работе [3] (2).

*Научный центр волоконной оптики при ИОФ РАН, Россия, 117942 Москва, ул. Вавилова, 38

**Институт химии высокоочищенных веществ, Россия, 603600 Нижний Новгород, ул. Тropicина, 49

***Institute of Applied Optics, Swiss Federal Institute of Technology, CH-1015 Lausanne, Switzerland

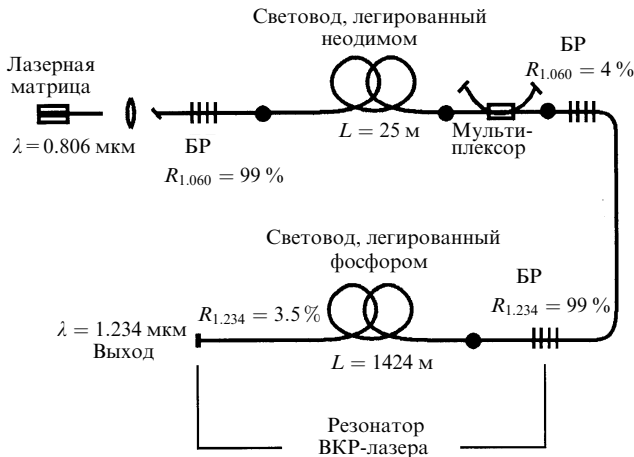


Рис.2. Схема ВКР-лазера I с торцом световода в качестве выходного зеркала резонатора. Точками отмечены места сварки.

емые в качестве зеркал резонатора БР записываются не в активном световоде, то в общем случае в резонаторе содержатся две точки сварки. Одна точка сварки (и, следовательно, половина сосредоточенных потерь резонатора) может быть устранена, если в качестве выходного зеркала используется непосредственно скол активного световода. В этом случае коэффициент отражения выходного зеркала определяется показателем преломления кварцевого стекла и составляет 3.5%. Обе точки сварки могут быть устранены при записи БР непосредственно в активном световоде. Нами реализованы схемы ВКР-лазеров на фосфосиликатном световоде с одной точкой сварки волокон в резонаторе (лазер I) и с БР, записанными непосредственно в активном световоде (лазер II).

2. Исследование лазера I

В лазере I (рис.2) длина активного световода составляла 1424 м. В качестве источника накачки использовался неодимовый волоконный лазер. Мультиплексор играл роль широкополосного фильтра, препятствующего возникновению генерации в диапазоне $\lambda = 1.09 - 1.13$ мкм, соответствующем кварцевому стоксову сдвигу в спектре комбинационного рассеяния. К выходу неодимового лазера была приварена волоконная БР с коэффициентом отражения более 99% для $\lambda = 1.234$ мкм, являющаяся зеркалом резонатора ВКР-лазера. Выходным зеркалом резонатора лазера служил торец, перпендикулярный оси фосфосиликатного световода.

При накачке Nd-лазера излучением диодной матрицы с волоконным выходом (модель ОРС-D010-806-НВ/250, мощность до 10 Вт, $\lambda = 0.806$ мкм) измерялась мощность лазерного излучения на выходе схемы на длинах волн 1.06 и 1.234 мкм. По известному коэффициенту поглощения в фосфосиликатном световоде измеренная на выходе мощность накачки пересчитывалась ко входу в ВКР-лазер. Полученные зависимости представлены на рис.3 точками. Максимальный КПД ВКР-лазера, показанного на рис.2, при мощности накачки $P_{1.06} \approx 2.7$ Вт ($\lambda = 1.06$ мкм) составил $\sim 44\%$. Данная схема волоконного ВКР-лазера позволяет определить g_0 для фосфосиликатного световода. Низкий коэффициент отражения выходного зеркала является основным источником оптических потерь в резонаторе, значительно превышающих как распределенные потери, так и потери при сварке. Этот факт

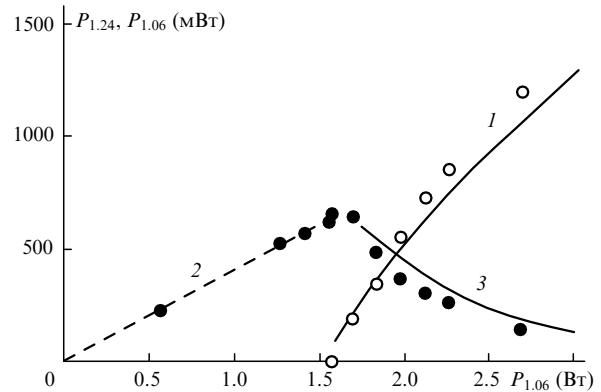


Рис.3. Экспериментальные (точки) и теоретические (кривые) зависимости мощности излучения на выходе ВКР-лазера I от мощности накачки на входе в фосфосиликатный световод для $\lambda = 1.24$ (●, 1) и 1.06 мкм (○, 2, 3).

позволяет, зная пороговую мощность $P_{th 1.06}$, потери α_p и α_s , коэффициент отражения выходного торца $R \approx 0.035$ и длину световода L , с высокой точностью определить g_0 :

$$g_0 = \frac{L\alpha_s + 5 \lg(1/R)}{P_{th 1.06} L_{ef}},$$

где

$$L_{ef} = \frac{4.34}{\alpha_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{L\alpha_p}{4.34}\right) \right]$$

– эффективная длина фосфосиликатного световода [5]. Абсолютная погрешность определения g_0 в данном случае задается, главным образом, погрешностью измерения пороговой мощности накачки ($\sim 5\%$). Для используемого в настоящей работе фосфосиликатного световода коэффициент рамановского усиления g_0 составлял приблизительно 6.3 дБ/(км·Вт).

3. Оптимизация конструкции ВКР-лазера I

На основе измеренных параметров используемого активного световода было проведено математическое моделирование работы ВКР-лазера, исходя из известных уравнений для описания ВКР [5, 6]. Результаты моделирования работы лазера I представлены на рис.3 и находятся в хорошем согласии с экспериментом, что позволяет использовать эту же математическую модель для оптимизации схемы ВКР-лазера.



Рис.4. Расчетные зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины фосфосиликатного световода при разных коэффициентах отражения R выходной БР. Мощность накачки $P_{1.06} = 3.5$ Вт, сосредоточенные потери в резонаторе составляют 0 (1), 0.05 (2) и 0.1 дБ (3).

Результаты выбора оптимальной длины световода даны на рис.4 в виде трех групп кривых, представляющих собой зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины активного световода при фиксированной мощности накачки, равной 3.5 Вт. Внутри каждой группы различные кривые соответствуют разным коэффициентам отражения выходной БР, взятым из ряда 0.9, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, и 0.1. Группы кривых соответствуют разным сосредоточенным оптическим потерям в резонаторе ВКР-лазера.

Из полученных результатов следует, что высокая эффективность волоконного ВКР-лазера может быть достигнута при минимальных сосредоточенных потерях в резонаторе и минимальной длине активного световода, определяемой остаточными сосредоточенными потерями (например, на БР). При этом максимальная выходная мощность, достижимая для данного световода, будет определяться, главным образом, α_s .

4. Формирование волоконных БР в фосфосиликатном световоде

Как известно, фосфосиликатные световоды не обладают достаточной для записи решеток фоточувствительностью при воздействии УФ излучения с $\lambda = 248$ и 193 нм [7]. Для повышения фоточувствительности таких световодов их обрабатывают в атмосфере молекулярного водорода при высоком давлении. После такой обработки становится возможным наведение стабильного изменения показателя преломления в сердцевине световода порядка 10^{-3} и более при облучении излучением эксимерного ArF-лазера на $\lambda = 193$ нм [7].

В наших экспериментах водородной обработке подвергался весь волоконный световод длиной 200 м, после чего необходимые решетки записывались на его концах. Водородная обработка производилась при давлении 150 атм и температуре 80°C в течение 50 ч. Волоконные БР записывались излучением эксимерного ArF-лазера (LPX-150, «Лямбда Физик») через фазовую маску, как это было предложено в работе [8]. Плотность энергии на поверхности световода при записи решеток была равна 100 мДж/см², частота повторения импульсов составляла 10 Гц, а время облучения варьировалось от 1 до 10 мин в зависимости от требуемого коэффициента отражения решетки. Длина записываемых решеток составляла 3 мм.

Контроль спектральных характеристик решеток осуществлялся непосредственно в процессе их записи, при

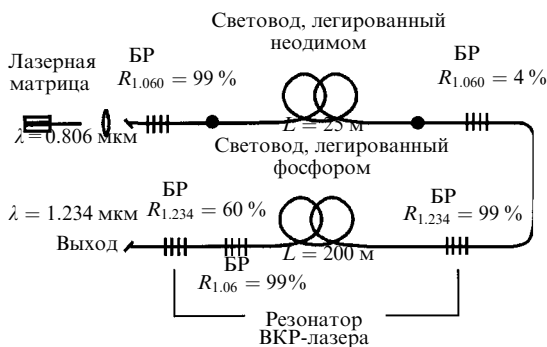


Рис.5. Схема ВКР-лазера II с БР, записанными непосредственно в фосфосиликатном световоде. Точками отмечены места сварки.

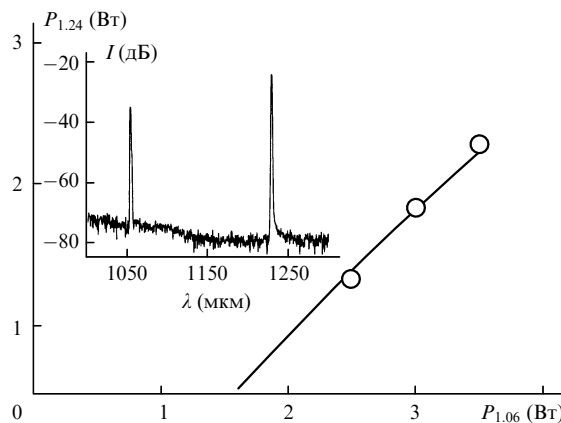


Рис.6. Зависимость выходной мощности ВКР-лазера от мощности накачки на входе в фосфосиликатный световод. На врезке представлен спектр излучения на выходе ВКР-лазера.

этом источниками тестирующего широкополосного оптического излучения являлись светодиоды, а спектр пропускания регистрировался монохроматором. При измерениях спектральное разрешение составляло 0.05 нм, что при характерной спектральной ширине решеток 0.5 нм позволяло качественно регистрировать их спектр. Типичный динамический диапазон при спектральных измерениях составлял 20 дБ, при этом коэффициент отражения решеток, используемых в качестве глухих зеркал резонатора, превышал 20 дБ, хотя точно он не измерялся.

После записи решеток оставшийся в сердцевине световода водород должен быть удален, т. к. наличие молекулярного водорода, растворенного в стекле, вызывает избыточное поглощение в диапазоне $\lambda = 1.05 - 1.3$ мкм [9]. Световод с записанной решеткой выдерживался при температуре 80°C в течение двух суток. После выхода молекулярного водорода из стеклянной матрицы спектр потерь волоконного световода вновь измерялся. Сопоставление этого спектра с исходным показало, что в используемом нами спектральном диапазоне водородная обработка и УФ облучение в пределах погрешности измерения потерь $0.1 - 0.2$ дБ не приводит к увеличению потерь. Это подтверждается также результатами исследования генерационных свойств световода.

5. Исследование оптимизированного ВКР-лазера

В результате проведенных исследований стала возможной реализация схемы волоконного ВКР-лазера на основе фосфосиликатного световода с низкими потерями (лазер II), в котором волоконные БР резонатора были записаны непосредственно в активном световоде. Схема лазера II приведена на рис.5. В качестве его активной среды использовался отрезок описанного выше световода длиной 200 м. Длина световода выбрана исходя из соображений компенсации возможных сосредоточенных потерь, наведенных при записи БР.

Накачка лазера осуществлялась на $\lambda = 1.06$ мкм от волоконного неодимового лазера, причем выходная БР резонатора неодимового лазера была также записана в фосфосиликатном световоде. Кроме того, в нем была записана волоконная БР с высоким коэффициентом отражения на $\lambda = 1.06$ мкм, расположенная на выходе ВКР-лазера. Она возвращает в активный световод непогло-

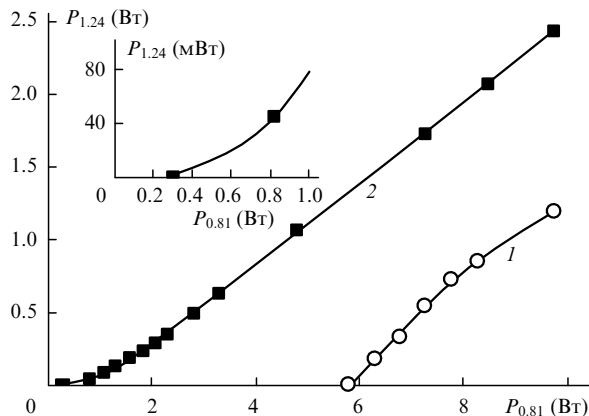


Рис. 7. Зависимости выходной мощности излучения с $\lambda = 1.24$ мкм от мощности полупроводниковой матрицы с $\lambda = 0.806$ мкм для лазеров I (1) и II (2). На врезке показана пороговая область приведенной зависимости 2.

ценную часть излучения накачки и, таким образом, способствует более эффективному ее использованию, снижая порог генерации неодимового лазера. Волоконная БР, выполнявшая роль глухого зеркала резонатора неодимового лазера со стороны ввода накачки на длине волны 0.806 мкм, была записана на отрезке стандартного германосиликатного световода типа Flexco-1060 и приварена к неодимовому световоду.

На рис.6 представлена зависимость выходной мощности излучения ВКР-лазера с $\lambda = 1.234$ мкм от мощности накачки с $\lambda = 1.06$ мкм на входе в фосфосиликатный световод. Максимальная выходная мощность достигала 2.4 Вт при мощности накачки 3.5 Вт. Энергетическая эффективность составляла 66 % (квантовая эффективность 77%). На врезке рис.6 представлен спектр излучения ВКР-лазера.

Волоконные неодимовый и ВКР-лазеры представляют собой единое устройство с накачкой диодной лазерной матрицей, суммарная эффективность которого составила 25 % по отношению к мощности накачки с $\lambda = 0.806$ мкм. Зависимости выходной мощности ВКР-лазера от мощности накачки для лазера I и лазера II представлены на рис.7. Важно отметить, что оптимизированный лазер II обладает очень низким порогом генерации стоксовой компоненты по отношению к излучению накачки с $\lambda = 0.806$ мкм. Как видно на врезке рис.7, он составляет всего лишь 300 мВт. Это открывает потенциальную возможность создания систем с накачкой от отдельных многомодовых полупроводниковых лазеров с выходной мощностью порядка 1–3 Вт вместо дорогостоящих мощных диодных матриц. При такой мощности накачки описанная система обеспечивает мощность до 600 мВт с $\lambda = 1.24$ мкм, которой достаточно для достижения в волоконном ВКР-усилителе усиления более 25 дБ [10].

Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые продемонстрирована возможность создания высокоэффективного ВКР-лазера на фосфосиликатном световоде с записанными непосредственно в нем БР. Это стало возможным благодаря впервые созданному фосфосиликатному световоду с высоким рамановским коэффициентом усиления ($g_0 = 6.3$ дБ/(км·Вт)) и низкими потерями ($\alpha_p = 2.34$ дБ/км и $\alpha_s = 1.45$ дБ/км). В результате оптимизации максимальная квантовая эффективность ВКР-лазера с $\lambda = 1.234$ мкм составила 77 % при выходной мощности 2.4 Вт.

Работа была частично поддержана РФФИ (гранты № 98-02-16807 и № 99-02-17843), а также Швейцарским национальным научным фондом (грант № 7 IP 050160).

Авторы выражают признательность В.М.Машинскому и О.Д.Сажину за проведение измерений оптических потерь, а также М.Ю.Цветкову за изготовление используемого в экспериментах мультиплексора.

1. Grubb S.G., Erdogan T., Mizrahi V., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Lemmaire P.J., Miller A.E., Kosinski S.G., Nykolak G., Beker P.C., Peckham D.W. *Proc. Top. Meet. Opt. Ampl. Appl.* (Breckenridge, USA, 1994, PD-3.)
2. Chernikov S.V., Taylor J.R., Platonov N.S., Gapontsev V.P., Kuppers F., Mattheus A., Gabitov I. *Techn. Dig. Opt. Fib. Com.* (Dallas, USA, 1997, FA3.)
3. 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. Letts*, **33**, 1542 (1997).
4. Dianov E.M., Bufetov I.A., Bubnov M.M., Shubin A.V., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Semjonov S.L., Grekov M.V., Paramonov V.M., Guryanov A.N., Khopin V.F., Varelas D., Iocco A., Costantini D., Limberger H.G., Salathe R.-P. *OFC'99, Techn. Dig. Opt. Fib. Com.* (San Diego, USA, 1999, PD25).
5. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М., Мир, 1996, с.323).
6. Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М., Наука, 1989, с.558).
7. Strasser T.A., White A.E., Yan M.F., Lemmaire P.J., Erdogan T. *Techn. Dig. Opt. Fib. Com.* (San Diego, USA, 1995, p. 159–160).
8. Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C., Albert J. *Appl. Phys. Letts*, **62**, 1035 (1993).
9. Lemmaire P.J. *Opt. Engng*, **30**, 780 (1991).
10. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Mashinsky V.M., Sazhin O.D., Prokhorov A.M., Devyatykh G.G., Guryanov A.N., Khopin V.F. *Electron. Letts*, **34**, 669 (1998).

E.M.Dianov, I.A.Bufetov, M.M.Bubnov, M.V.Grekov, A.V.Shubin, S.A.Vasil'ev, O.I.Medvedkov, S.L.Semenov, O.N.Egorova, A.N.Gur'yanov, V.F.Khopin, M.V.Yashkov, D.Varelas, A.Iocco, D.Costantini, H.G.Limberger, R.-P.Salathé Continuous-wave highly efficient phosphosilicate fibre-based Raman laser ($\lambda = 1.24 \mu\text{m}$).

An efficient fibre-based Raman laser was constructed on the basis of a phosphosilicate optical fibre with low optical losses. Bragg fibre gratings, constituting the laser cavity, were formed directly in the active fibre. The parameters, mathematical modelling, and optimisation of the laser were investigated. As a result of the optimisation, the output power reached 2.4 W for pump with radiation from a neodymium fibre-based laser with a power of 3.5 W, which corresponds to a 77 % quantum efficiency of the Raman laser.