

Мощные волоконные ВКР-лазеры в диапазоне 1.22 – 1.34 мкм

А.С.Курков*, Е.М.Дианов*, В.М.Парамонов*, А.Н.Гурьянов**, А.Ю.Лаптев**,
В.Ф.Хопин**, А.А.Умников**, Н.И.Вечканов**, О.И.Медведков*, С.А.Васильев*,
М.М.Бубнов*, О.Н.Егорова*, С.Л.Семенов*, Е.В.Першина*

На основе иттербиевого волоконного световода с двойной оболочкой реализован набор волоконных лазеров с полупроводниковой накачкой, излучающих в диапазоне 1.05 – 1.15 мкм с выходной непрерывной мощностью 4 – 7.5 Вт. Излучение иттербиевого волоконного лазера использовалось для накачки рамановского конвертора на фосфорно-силикатном световоде. Это позволило получить волоконные источники излучения с длинами волн 1.26 и 1.3 мкм и непрерывной выходной мощностью более 3 Вт.

Ключевые слова: ВКР-лазеры, волоконные световоды, рамановский конвертор.

Введение

Мощные волоконные источники излучения с длиной волны $\lambda = 1.22 - 1.34$ мкм могут найти применение в волоконно-оптической связи, обработке материалов, спектроскопии, медицине и других областях. В настоящее время наиболее перспективным путем создания таких источников является рамановское преобразование излучения волоконного лазера на основе активных световодов с двойной оболочкой. При этом использование в конверторе фосфорно-силикатных световодов позволяет существенно упростить схему конвертора [1].

Это объясняется тем, что рамановский сдвиг в таких световодах составляет 1330 см^{-1} , в то время как в кварцевом стекле – всего 440 см^{-1} . Так, применение фосфорно-силикатного световода для конверсии излучения неодимового волоконного лазера позволило реализовать ВКР-источник излучения с выходной мощностью 2.5 Вт в непрерывном режиме при мощности полупроводникового источника накачки 10 Вт [2].

В то же время использование для создания волоконного лазера световодов, легированных ионами иттербия, позволяет достигать большей эффективности полупроводниковой накачки. Это связано с большим сечением поглощения накачки на $\lambda = 0.98$ мкм, составляющим $2.5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$, а также с отсутствием поглощения из возбужденного состояния и кооперативных эффектов. Так, в работе [3] мы продемонстрировали волоконный лазер с дифференциальной эффективностью около 80%. Представляется реальным достижение и более высокие мощностей в ВКР-конверторе на фосфорно-силикатном волоконном световоде с одним преобразованием. Кроме того, использование иттербия в качестве активной примеси позволяет получать лазерную генерацию в существенно более широком по сравнению с неодимом спек-

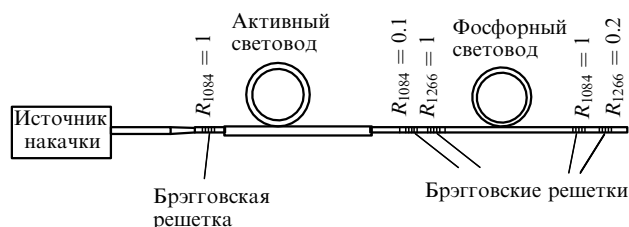


Рис.1. Схема волоконного лазера и конвертора.

ральном диапазоне [4]. Таким образом, появляется возможность создания ВКР-лазеров с различными длинами волн.

Настоящая работа посвящена ВКР-конверторам излучения иттербиевого волоконного лазера, а также определению спектрального диапазона, в котором возможно получение высоких мощностей таких источников излучения.

1. Иттербиевый волоконный лазер

Для накачки иттербиевого волоконного лазера (рис. 1) использовался полупроводниковый источник с $\lambda = 978$ нм и номинальной выходной мощностью 10 Вт, имеющий волоконный выход с диаметром световедущей сердцевины 250 мкм и числовой апертурой 0.22. Излучение источника накачки вводилось в иттербиевый волоконный световод с внутренней оболочкой квадратного сечения 120×120 мкм. Для эффективного ввода излучения активный световод был покрыт тефлоновой оболочкой (АФ), обеспечивающей числовую апертуру 0.6. Такое же покрытие имел волоконный световод, на котором записывалась брэгговская решетка, служившая входным отражателем волоконного лазера. Большое различие между показателями преломления внутренней и внешней оболочек световодов, формирующих волоконный лазер, позволяло обеспечить с помощью волоконного конечного перехода эффективность ввода накачки, превышающую 95 %.

Концентрация ионов иттербия в сердцевине активного световода составила $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при этом коэффи-

*Институт общей физики РАН, Россия, 117756 Москва, ул. Вавилова, 38

**Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49

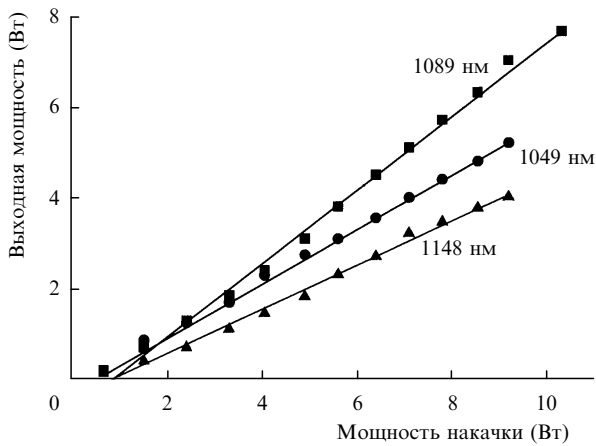


Рис.2. Зависимости выходной мощности иттербиевого волоконного лазера от мощности полупроводникового источника накачки на $\lambda = 978$ нм для разных длин волн выходного излучения.

коэффициент поглощения накачки для разных образцов был равен 1.5–2 дБ/м, что позволило использовать в лазере активный световод длиной 15–20 м. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки активного волоконного световода составила 0.009–0.011, диаметр сердцевины был равен ~ 6 мкм. Такие же параметры сердцевины были выбраны и для световода, используемого для записи входных брэгговских решеток, что позволяло минимизировать дополнительные оптические потери при его сварке с активным световодом.

Резонаторы изготовленных волоконных лазеров формировались при помощи внутриволоконных брэгговских решеток показателя преломления, отражающих на заданных длинах волн. Коэффициент отражения входных решеток составлял более 99%, выходных – от 5 до 10% (в зависимости от выбранной длины волны). Отражающие брэгговские решетки записывались голографическим методом с использованием второй гармоники излучения аргонового лазера [5]. Плотность мощности УФ источника составляла около 100 Вт/см². Для повышения фоточувствительности световода применялась водородная пропитка при давлении 100 атм.

На рис.2 представлены зависимости выходной мощности иттербиевого волоконного лазера от мощности источника накачки для различных длин волн излучения. Максимальная выходная мощность (7.5 Вт) была достигнута при $\lambda = 1089$ нм и мощности накачки 10.5 Вт, дифференциальная эффективность составила около 80%. На рис.3 представлена зависимость дифференциальной эф-

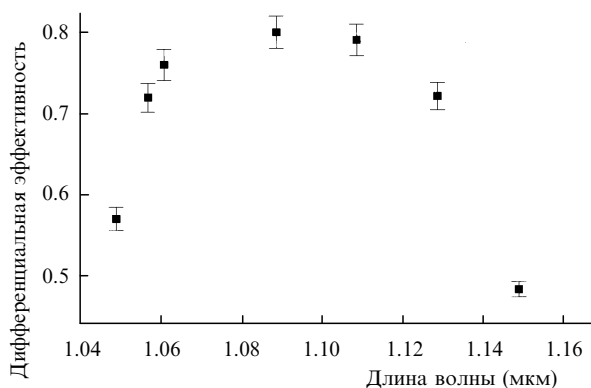


Рис.3. Спектральная зависимость дифференциальной эффективности волоконного лазера.

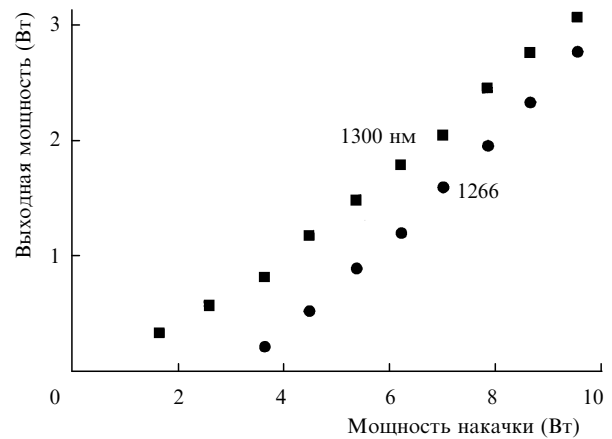


Рис.4. Зависимости выходной мощности волоконных ВКР-конверторов от мощности полупроводникового источника накачки на $\lambda = 978$ нм для различных длин волн выходного излучения.

фективности от длины волны излучения. Видно, что эта величина превышает 75% в диапазоне 1.07–1.12 мкм и 50% – в диапазоне 1.05–1.14 мкм.

Следует отметить, что максимум люминесценции ионов иттербия в кварцевом стекле достигается в диапазоне 1.03–1.04 мкм. Однако влияние потерь на длинноволновом спаде линии поглощения с центром на $\lambda = 978$ нм приводит к смещению длины волны, соответствующей максимальной эффективности лазера. Резкое уменьшение дифференциальной эффективности на длинах волн, превышающих 1.12 мкм, обусловлено соответствующим падением интенсивности люминесценции.

2. ВКР-конвертор

В качестве активной среды рамановского конвертора использовался отрезок волоконного световода длиной 700 м с сердцевиной на основе фосфорно-силикатного стекла. Молярная концентрация примеси P_2O_5 составила 13%, разность показателей преломления сердцевины и оболочки Δn была равна 0.011. Оптические потери в области длин волн накачки составили около 1.8 дБ/км, на длинах волн излучения – около 1 дБ/км.

Было изготовлено два конвертора с длинами волн излучения 1266 и 1300 нм; для их накачки использовались иттербиевые волоконные лазеры с длинами волн 1084 нм и 1108 нм соответственно. Для создания резонатора фосфорно-силикатный световод сваривался с волоконными брэгговскими решетками с заданными длинами волн отражения (1266 и 1300 нм), записанными на стандартном волоконном световоде Flexcore-1060. Для конверторов с $\lambda = 1266 \pm 1$ и 1300 ± 0.5 нм коэффициент отражения входной решетки превысил 99%, а коэффициент отражения выходной составил 20 и 50% соответственно. Кроме того, для более полного использования излучения иттербиевого лазера рядом с выходной решеткой конвертора была записана брэгговская решетка с коэффициентом отражения свыше 99% на длине волны, соответствующей длине волны накачки.

На рис.4 представлены зависимости выходной мощности конверторов от мощности полупроводникового источника накачки. Видно, что для обоих источников выходная мощность превышает 3 Вт при накачке 10 Вт, т. е. эффективность преобразования составляет более 30%. На рис.5 представлен спектр излучения ВКР-лазера с

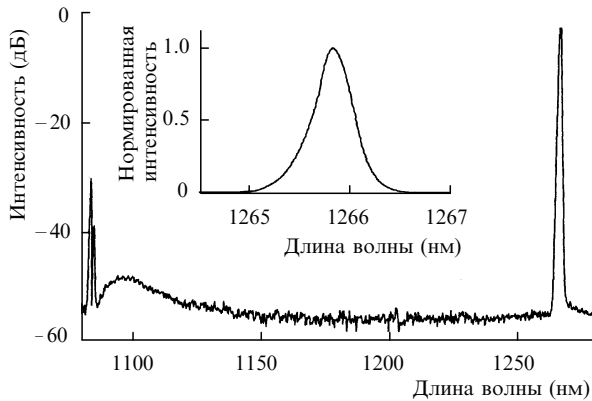


Рис.5. Спектр излучения на выходе волоконного конвертора.

длиной волны излучения 1266 нм. Подавление излучения иттербиевого лазера равно ~ 20 дБ.

Полученная выходная мощность превышает лучший результат, достигнутый в неодимовом волоконном лазере с той же мощностью полупроводникового источника накачки. Следует отметить, что увеличение эффективности ВКР-лазера связано, в первую очередь, с существенно более высокой эффективностью иттербиевого волоконного лазера по сравнению с неодимовым.

Исходя из данных по спектральной эффективности иттербиевого волоконного лазера, приведенных на рис.3, можно сделать вывод о том, что полученная эффективность преобразования (свыше 30 %) должна достигаться для длин волн в диапазоне 1.07–1.12 мкм, соответствующем для ВКР-лазера с однократным преобразованием на фосфорно-силикатном световоде спектральному диапазону 1245–1315 нм. Использование в качестве источника накачки иттербиевого лазера, излучающего в диапазонах 1.05–1.07 мкм и 1.12–1.14 мкм, позволит ожидать получения источников излучения для диапазонов 1220–1245 мкм и 1315–1340 нм с эффективностью преобразования излучения полупроводникового источника накачки более 20 %.

Заключение

Таким образом, мы продемонстрировали, что конверсия излучения иттербиевого волоконного лазера позволяет создавать мощные волоконные источники на основе однократного рамановского преобразования в фосфорно-силикатном волоконном световоде. Преимуществом предложенной схемы по сравнению со схемой, в которой используется неодимовый волоконный лазер, является большая эффективность преобразования излучения полупроводникового источника накачки и широкий спектральный диапазон, в котором может достигаться высокая эффективность такого преобразования.

Авторы выражают благодарность И.А.Буфетову за полезные обсуждения.

1. 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. *Electron. Letts*, **33**, 1542 (1997).
2. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Бубнов М.В., Греков М.М., Шубин А.В., Васильев С.А., Медведков О.И., Семенов С.Л., Егорова О.Н., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Яшков М.В., Иокко А., Костантини Д., Лимбергер Н.Г., Салате Р.-П. *Квантовая электроника*, **29**, 97 (1999).
3. Курков А.С., Карпов В.И., Лаптев А.Ю., Медведков О.И., Дианов Е.М., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Парамонов В.М., Протопопов В.Н., Умников А.А., Вечканов Н.И., Артюшенко В.Г., Фрам Ю. *Квантовая электроника*, **27**, 239 (1999).
4. Pask H.M. et al. *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, **1**, 1 (1995).
5. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. *Optics Letts*, **14**, 823 (1989).

A.S.Kurkov, E.M.Dianov, V.M.Paramonov, A.N.Gur'yanov, A.Yu.Laptev, V.F.Khopin, A.A.Umnikov, N.I.Vechkanov, O.I.Medvedkov, S.A.Vasil'ev, M.M.Bubnov, O.N.Egorova, S.L.Semenov, E.V.Pershina. Powerful fibre SRS lasers emitting in the 1.22–1.34- μ m range.

A set of diode-pumped fibre lasers producing a CW output of 4–7.5 W in the range from 1.05 to 1.15 μ m is realised on the basis of an ytterbium double-cladded fibre. The output of the ytterbium fibre laser was used to pump a Raman phosphor-silicate fibre converter, resulting in fibre lasers producing a CW output power of more than 3 W at 1.26 and 1.3 μ m.