

# Мощный эрбиевый волоконный усилитель с накачкой от рамановского волоконного конвертера на основе фосфоросиликатного световода

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

*Изготовлен и исследован эрбиевый волоконный усилитель с высокой выходной мощностью и одномодовой накачкой на длине волны 1478 нм. В качестве источника накачки применялся рамановский конвертер на волокне с фосфоросиликатной сердцевиной. Максимальная выходная мощность, достигнутая в спектральных диапазонах С (1.53–1.56 мкм) и L (1.56–1.60 мкм), составила 28 дБм.*

**Ключевые слова:** эрбиевый волоконный усилитель, рамановский конвертер, мощный волоконный усилитель.

## 1. Введение

Эрбиевые волоконные усилители находят широкое применение в современных волоконно-оптических линиях связи, используемых для передачи сигнала спектрального диапазона в области 1.55 мкм. При этом эффективное усиление сигнала достигается как в общепринятом спектральном диапазоне 1.53–1.56 мкм (С-полоса), так и в длинноволновой области 1.56–1.60 мкм (L-полоса). Одной из важных характеристик усилителя является его мощность насыщения, или максимальная выходная мощность в режиме усиления сигнала, входная мощность которого обеспечивает значительное подавление спонтанной люминесценции. Повышение мощности насыщения усилителей представляется актуальным с точки зрения их использования в системах связи со спектральным уплотнением каналов, т. к. увеличение числа каналов приводит к росту суммарной оптической мощности сигнала, распространяющегося в световоде.

Максимальная мощность усилителей, используемых в настоящее время для усиления сигнала в линиях связи, составляет 100–200 мВт. Она определяется мощностью одномодовых полупроводниковых источников накачки, излучающих на длине волны 0.98 мкм либо в области 1.45–1.48 мкм. В то же время в системах со спектральным уплотнением каналов требуется применение усилителей с мощностью, близкой к 1 Вт.

В настоящее время предложено несколько способов достижения высокой выходной мощности эрбиевого волоконного усилителя. Один из них состоит в использовании световода с сердцевиной, легированной ионами эрбия, и двойной оболочкой, позволяющей осуществлять накачку мощными многомодовыми источниками [1]. Однако при накачке в оболочку световода уменьшается эф-

фективность ее поглощения активной сердцевиной. В связи с этим возникает проблема достижения высокой степени инверсии, необходимой для эффективного усиления излучения трехуровневой системой. В результате высокую выходную мощность усилителя (400 мВт) удается получить только в области 1.56–1.60 мкм (L-полоса), где перепоглощение сигнала не так существенно.

Для увеличения поглощения излучения накачки предложено дополнительное легирование световода ионами иттербия, которые, имея большое сечение поглощения на длине волны накачки (0.98 мкм), передают возбуждение ионам эрбия [2, 3]. Однако для эффективной передачи энергии необходимо использовать кварцевое стекло, легированное оксидом фосфора. Это в свою очередь приводит к тому, что спектр люминесценции ионов эрбия становится уже спектра в общепринятой алюмосиликатной матрице. Таким образом, усилители, использующие активные волоконные световоды с добавкой иттербия, не могут усиливать оптический сигнал в широком спектральном диапазоне.

Другой способ достижения высокой выходной мощности усилителя состоит в увеличении мощности одномодовой накачки, в частности в применении рамановского волоконного конвертера, излучающего в области 1.45–1.48 мкм. Наиболее просто такое устройство может быть реализовано при использовании в качестве активной среды конвертера [4] фосфоросиликатного волоконного световода. В настоящей работе исследуются характеристики эрбиевого волоконного усилителя на одномодовом волоконном световоде с алюмосиликатной матрицей стекла сердцевины и накачкой на длине волны 1478 нм от рамановского волоконного конвертера.

## 2. Схема эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Для накачки рамановского конвертера использовался иттербиевый волоконный лазер на основе активного световода с двойной оболочкой [5]. В свою очередь источником накачки иттербиевого лазера служил полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 978 нм и максимальной мощностью 5.5 Вт в волоконном световоде с выходным диаметром 200 мкм. Для согласования

\*Институт общей физики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

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

\*\*\*Федеральное государственное унитарное предприятие "НИИ «Полос» им. М.Ф.Стельмаха", Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

\*\*\*\*Компания «Миллон», Россия, 194021 Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 2

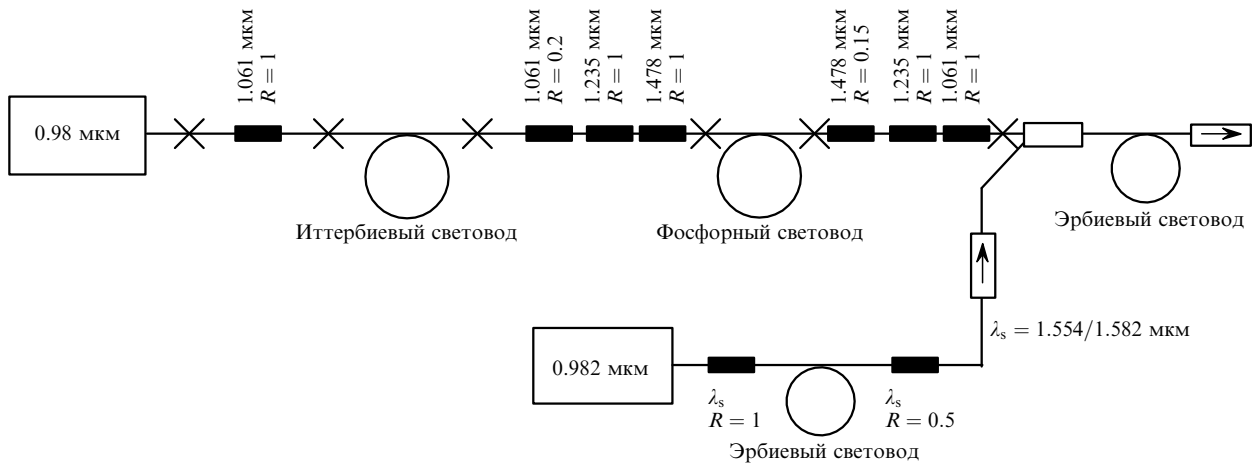


Рис.1. Схема установки (крестиками обозначены места сварки, черными прямоугольниками – решетки).

источника накачки с активным световодом использовался волоконный конус. Резонатор волоконного лазера был сформирован двумя внутриволоконными брэгговскими решетками с длиной волны отражения 1061 нм. Выходная непрерывная мощность лазера на этой длине волны составляла 3 Вт при мощности полупроводникового источника накачки 5 Вт.

В качестве активной среды рамановского волоконного конвертера был использован одномодовый волоконный световод с сердцевинной на основе фосфоросиликатного стекла. Оптические потери в таком световоде составили 1.55, 0.92 и 0.75 дБ/км на длинах волн 1.061, 1.24 и 1.48 мкм соответственно. Резонатор конвертера был образован парами брэгговских волоконных решеток с резонансными длинами волн отражения 1235 и 1478 нм. Кроме того, для отражения непреобразованной части излучения иттербиевого лазера на выходе схемы находилась решетка, имеющая высокий коэффициент отражения на длине волны 1061 нм. Коэффициент отражения выходной брэгговской решетки на длине волны 1478 нм, выбранный по результатам численной оптимизации рамановского конвертера [6], составил 15%. Зависимость мощности излучения на длине волны 1478 нм от мощности иттербиевого волоконного лазера показана на рис.2. Полученная квантовая эффективность была равна 36%, что хорошо совпадает с результатами моделирования для данных оптических потерь в фосфоросиликатном световоде и интегральных потерь на сварку брэгговских решеток и дополнительное рассеяние на решетках; по-

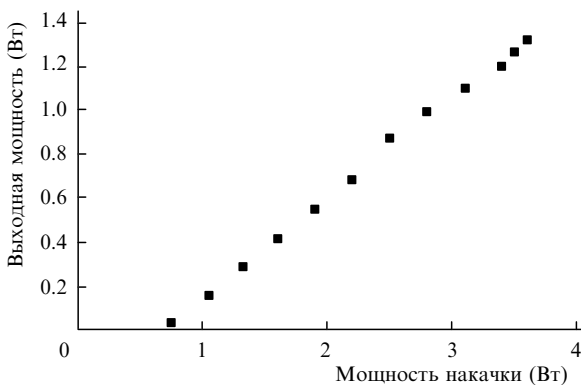


Рис.2. Зависимость выходной мощности рамановского конвертера на длине волны 1478 нм от мощности накачки иттербиевого лазера.

тери для входной и выходной цепочек конвертера составили по 4%.

Источниками сигнала служили волоконные эрбиевые лазеры с накачкой от одномодового полупроводникового лазера на  $\lambda = 982$  нм. Длины волн излучения волоконных лазеров  $\lambda_s$  (1554 и 1582 нм) определялись параметрами брэгговских волоконных решеток и соответствовали С-полосе (1530–1560 нм) и L-полосе (1560–1600 нм) спектральной области, используемой для передачи сигнала.

Активной средой усилителя служил одномодовый волоконный световод, легированный ионами эрбия, изготовленный по MCVD-технологии с осаждением всех легирующих добавок из газовой фазы. Концентрация ионов эрбия в сердцевине световода составляла  $1.2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>; кроме того, сердцевина была легирована Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с молекулярной концентрацией 5%. Длина используемого в эксперименте отрезка световода была равна 8 м. Для предотвращения возникновения генерации вследствие отражения на торцах эрбиевого световода при большой мощности накачки в схему были включены два изолятора, расположенные между источником сигнала и ответвителем и на выходе усилителя.

### 3. Результаты

Мощность и коэффициент усиления эрбиевого волоконного усилителя были измерены при различных мощностях накачки и входного сигнала. На рис.3,а представлена зависимость выходной мощности сигнала на длине волны 1554 нм от мощности накачки при разных входных мощностях сигнала. Выходная мощность свыше 600 мВт была достигнута при мощности накачки 900 мВт и мощности сигнала 4 мВт. Подавление спонтанной люминесценции составило около 40 дБ. Из рис.3 видно, что выходная мощность усилителя практически не зависит от мощности входного сигнала в диапазоне 1–4 мВт. Для мощности входного сигнала 1 мВт коэффициент усиления равнялся 28 дБ (рис.3,б).

Аналогичные зависимости были получены для сигнала на длине волны 1582 нм (рис.4). Максимальная выходная мощность на длине волны 1582 нм была близка к выходной мощности на длине волны 1554 нм. Следует отметить, что в данном случае мощность входного сигнала оказывает большее влияние на выходную мощ-

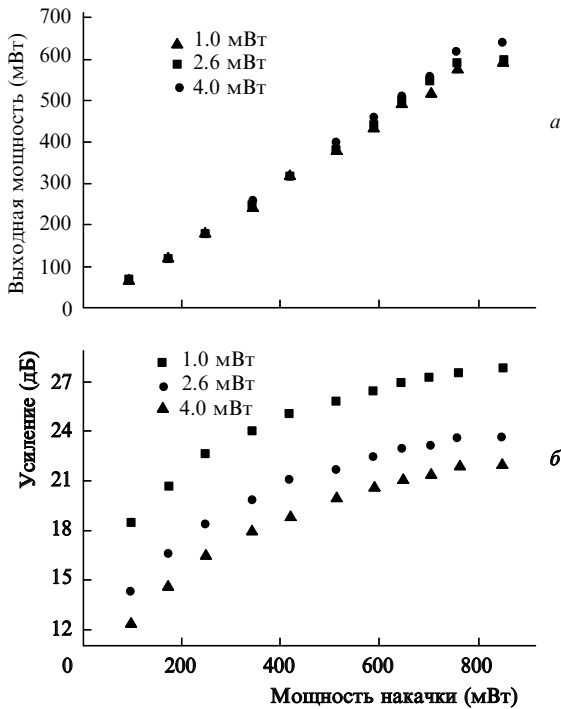


Рис.3. Зависимости выходной мощности (а) и усиления (б) эрбиевого волоконного усилителя на длине волны 1554 нм от мощности накачки на длине волны 1478 нм.

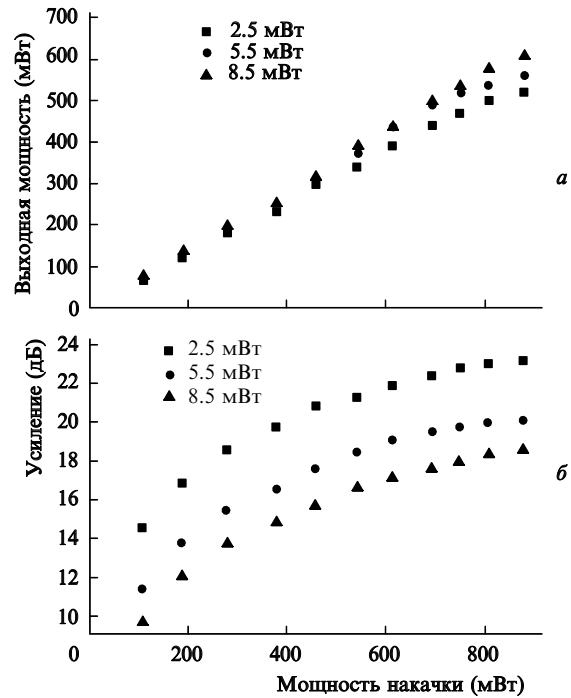


Рис.4. Зависимости выходной мощности (а) и усиления (б) эрбиевого волоконного усилителя на длине волны 1582 нм от мощности накачки на длине волны 1478 нм.

ность. Это может быть объяснено тем, что длина волны 1582 нм соответствует спектральной области с резким уменьшением сечения люминесценции, что приводит к большей конкуренции с усиленной спонтанной люминесценцией по сравнению с сигналом на длине волны 1554 нм. Тем не менее для одной и той же мощности входного сигнала (2.5 мВт) коэффициент усиления на обеих исследованных длинах волн практически одинаков (23 дБ).

#### 4. Заключение

В данной работе высокоэффективный рамановский конвертер с длиной волны излучения 1478 нм был использован в качестве источника накачки эрбиевых волоконных усилителей с высокой выходной мощностью. Исследованы характеристики усилителя для оптических сигналов с длинами волн, соответствующими различным спектральным диапазонам. Достигнута выходная мощность усиленного сигнала более 600 мВт (усиление 28 дБм). Использование эрбиевого волоконного световода с высокой концентрацией  $Al_2O_3$  в сердцевине позво-

лило продемонстрировать возможность его применения как в С-, так и в L-полосе спектрального диапазона передачи сигнала. Одним из преимуществ реализованной схемы является возможность получения мощного выходного сигнала при использовании в качестве активного элемента усилителя одномодового эрбиевого световода с произвольным составом сердцевины.

1. Bousselet P., Bettiati M., Gasca L., Goix M., Boubal F., Sinet C., Leplingard F., Bayart D. *Techn.Dig.OFC'2000* (Baltimore, Maryland, 2000, p.WG5).
2. Grubb S.G., DiGiovanni D.J., Simpson J.R., Cheung W.Y., Sanders S., Welch D.F., Rockney B. *Techn.Dig.OFC'96* (San Jose, California, 1996, p.TuG4).
3. Pasquale F.D., Grasso G., Meli F., Sacchi G., Turolla S. *Techn.Dig.OFC'99* (San Diego, California, 1999, p.WA2).
4. 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).
5. Курков А.С., Карпов В.И., Лаптев А.Ю., Медведков О.И., Дианов Е.М., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Пармонов В.М., Протопопов В.Н., Умников А.А., Вечканов Н.И., Артюшенко В.Г., Фрам Ю. *Квантовая электроника*, **29**, 239 (1999).