УДК 681.5.08

А.С. Курков

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Пермь, Россия
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ВОЛОКОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ДВУХМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

Показано, что развитие технологии получения волокон с поллой сердцевиной позволяет рассматривать их применение для линий связи, оперирующих в двухмикронной области. В свою очередь, это требует разработки волоконно-оптических усилителей для этого спектрального диапазона. Рассмотрено построение таких усилителей и основные результаты, достигнутые к настоящему времени.

Ключевые слова: микроструктурированные волокна, волоконно-оптические усилители, двухмикронная область.

A.S. Kurkov

General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation
Photonics Laboratory of Perm Scientific Center of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Perm, Russian Federation
Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

FIBER AMPLIFIERS FOR TWO-MICRON RANGE

The article shows that the development of technology for production of fibers with a hollow core allows us to consider their application for communication lines, operating in two-micrometer region. In turn, this requires development of optical fiber amplifiers for this spectral range. In this paper, we consider the construction of such amplifiers and the main results achieved so far.

Keywords: microstructured fiber, optical fiber amplifiers, two-micrometer region.

Введение

Волоконные усилители различных конфигураций широко используются как в системах волоконной связи, так и для увеличения мощности волоконных лазеров со специальными спектральными и временными характеристиками излучения. Наибольшее применение нашли эрбиевые волоконные усилители, эксплуатируемые в большинстве современных волоконно-оптических линиях связи [1]. Они позволяют усиливать опти-

ческий сигнал в диапазоне 1,53–1,6 мкм, что и определяет используемый для связи оптический диапазон. Другим распространенным типом усилителей для линий связи являются усилители на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), или рамановские усилители [2]. Поскольку ВКР-усилители используют нелинейные свойства волокна, а не оптические переходы, усиление может быть достигнуто в любом спектральном диапазоне. Однако на практике эффективное усиление достигается в области малых оптических потерь волокна, поэтому ВКР-усилители используются в диапазоне 1,3–1,65 мкм. В последнее время активно исследуются оптические волокна, легированные висмутом. В работе [3] показана перспективность использования таких волокон в качестве активной среды усилителей диапазонов 1,28–1,37 мкм, 1,4–1,47 мкм, а также вблизи 1,7 мкм.

Иттербиевые волоконные усилители широко используются для получения оптических импульсов с высокой пиковой мощностью и энергией, а также мощного одночастотного излучения для систем когерентного сложения [4].

Появление нового типа оптических волокон – микроструктурированных – предъявляет новые требования к оптическим усилителям. Одним из перспективных типов микроструктурированных волокон являются волокна с полой сердцевиной [5]. Специфической чертой таких волокон является то, что основная доля мощности оптического излучения распространяется по воздуху, а перекрытие оптического поля с материалом волокна весьма мало. Это позволяет существенно повышать порог возникновения нелинейных эффектов и передавать по таким волокнам излучения с большой мощностью. Перспектива использования волокон с полой сердцевиной открылась после опубликования результатов по получению волокон с малыми оптическими потерями [6]. На рис. 1, *а* представлена микрофотография поперечного сечения волокна с гексагональной структурой оболочки. Оптические потери в волокне составили 1,2 дБ/км на длине волны 1,62 мкм. При этом теоретические предельно низкие потери имеют существенно меньшие потери. Рис. 1, *б* иллюстрирует расчетную спектральную зависимость оптических потерь.

Как видно из рис. 1, *б*, спектральный диапазон малых потерь составляет примерно 1,4–2,1 мкм. В случае использования таких волокон в линиях связи неизбежным образом встает вопрос об усилителях оптического сигнала. Для коротковолновой части спектра могут использоваться ВКР-, эрбиевые и висмутовые усилители. Для усиления

Рис. 1. Поперечное сечение волокна с гексагональной структурой оболочки – *а*;
расчетная спектральная зависимость оптических потерь – *б*

в области 1,8–2,1 мкм могут применяться усилители с использованием волокон, легированных ионами тулия (Tm) и гольмия (Ho). В данной работе мы рассмотрим построение таких усилителей и основные результаты, достигнутые к настоящему времени.

1. Тулиевые волоконные усилители

Построение тулиевых волоконных усилителей основано на использовании оптических переходов, определяемых схемой уровней ионов Tm^{3+} , представленной на рис. 2.

Рис. 2. Энергетическая схема ионов Tm^{3+}

На рис. 3 представлена спектральная зависимость сечения люминесценции, обусловленной переходом ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$. Из рисунка видно, что наибольшее эффективное усиление должно осуществляться в диапазоне 1,7–2 мкм.

На рис. 4 представлен типичный спектр поглощения волокна, легированного ионами тулия, и обозначены соответствующие оптические переходы. Из спектра поглощения следует, что накачка тулиевого усилителя может осуществляться на длинах волн вблизи 0,79, 1,21 и 1,6 мкм.

Рис. 3. Спектральная зависимость сечения люминесценции ионов Tm^{3+}

Рис. 4. Типичный спектр поглощения волокна, легированного ионами Tm^{3+}

В качестве источников, излучающих в области 0,79 мкм, как правило, используются мощные диодные матрицы. Поскольку они обладают большими размерами излучающей области, их излучение вводится в активное волокно с двойной оболочкой. Накачка в оболочку ока-

зывается возможной за счет высокого сечения поглощения в пике соответствующей полосы. Использование мощных источников накачки позволяет достигать высоких мощностей на выходе усилителя. Так, в работе [7] был продемонстрирован усилитель одночастотного сигнала на длине волны 2,04 мкм с выходной мощностью более 600 Вт. Для накачки использовались две диодные матрицы на 0,79 мкм. Зависимость выходной мощности от мощности накачки представлена на рис. 5.

Рис. 5. Зависимость выходной мощности от мощности накачки на 0,79 мкм

Обращает на себя внимание то, что дифференциальная эффективность составила 54 %, что превышает квантовый предел. Это является возможным благодаря эффекту кросс-релаксации, который заключается в том, что энергия при релаксации с уровня $^3\text{H}_4$ на уровень $^3\text{H}_6$ используется для возбуждения другого иона. Однако для активных волокон с накачкой в оболочку характерна невысокая степень инверсии, обусловленная относительно низкой плотностью излучения накачки. В результате для трехуровневой схемы, к которой относится и схема уровней ионов тулия, эффективное усиление возможно лишь в длинноволновой части спектра излучения. В коротковолновой части спектра происходит перепоглощение излучения не инвертированной части активных ионов. Кроме того, при малой степени инверсии наблюдается повышенный уровень шума. Поэтому для усилителей телекоммуникационных сигналов использование накачки на 0,79 мкм является проблематичным.

Для накачки активных волокон, легированных ионами Tm^{3+} , в области 1,21 мкм могут быть использованы достаточно мощные ВКР-лазеры. Данный подход использовался в работе [8] для реализации ту-

лиевого волоконного лазера. Однако эффективность использования такой накачки ограничена появлением поглощения из возбужденного состояния, приводящего к покаскадному заселению верхних уровней и потере энергии накачки.

Наиболее перспективным представляется использование накачки в области 1,55–1,6 мкм. Одним из вариантов является применение полупроводниковых диодных лазеров с малой излучающей площадкой и мощностью, составляющей сотни милливатт. Так, в работе [9] был продемонстрирован усилитель для сигналов в диапазоне 1,8–2,05 мкм. На рис. 6 представлены спектральные зависимости коэффициента усиления при использовании отрезков активного волокна различной длины. Мощность входного сигнала составила –20 дБм.

Рис. 6. Спектральные зависимости коэффициента усиления

Для получения более мощного выходного сигнала использовались два диодных лазера накачки. В качестве входного сигнала использовалось излучение 5 на длине волны 1,9 мкм с мощностью 0 дБм. На рис. 7 показана зависимость мощности усиленного сигнала от мощности накачки.

Более сложную задачу представляет собой усиление на длинах волн короче 1,7 мкм. Это связано с тем, что в данной области спектра сечение поглощения сравнимо с сечением эмиссии, что иллюстрирует рис. 8.

Для реализации усиления в спектральной области короче 1,7 мкм необходимо повышение степени инверсии, что требует использования

Рис. 7. Зависимость выходной мощности сигнала от мощности накачки

Рис. 8. Спектральные зависимости сечений эмиссии и поглощения ионов Tm^{3+} в кварцевом стекле

более мощной накачки, а также фильтрация усиленной спонтанной люминесценции в длинноволновой части спектра люминесценции ионов тулия. В работе [10] в качестве источника накачки использовался Er/Yb-волоконный лазер с накачкой в оболочку. Мощность коммерчески доступных Er/Yb-волоконных лазеров достигает 100 Вт¹. Для фильтрации усиленной спонтанной люминесценции использовался отрезок изогнутого волокна DCF (dispersion compensated fiber), помещенного между двумя отрезками волокна, легированного ионами тулия. Изгиб волокна

¹ <http://www.ipgphotonics.com>

обеспечивал резкое возрастание оптических потерь в области длин волн, превышающих 1,71 мкм. В результате для входного сигнала с мощностью –20 дБм было продемонстрировано усиление с коэффициентом 29 дБ на длине волны 1,69 мкм. На длине волны 1,65 мкм коэффициент усиления составил около 10 дБ.

Таким образом, использование тулиевых волоконных усилителей различных конфигураций позволяет эффективно усиливать сигналы в диапазоне 1,65–2,05 мкм.

2. Гольмиевые волоконные усилители

Оптические свойства волокон, легированных ионами гольмия (Ho^{3+}), как и в предыдущем случае, определяются схемой уровней, представленной на рис. 9.

Рис. 9. Энергетическая схема ионов Ho^{3+}

На рис. 10 представлена спектральная зависимость сечения люминесценции, обусловленной переходом ${}^5\text{I}_8 \rightarrow {}^5\text{I}_7$. Из рисунка видно, что наиболее эффективное усиление должно осуществляться в диапазоне 1,7–2 мкм. На рис. 11 показан типичный спектр поглощения в волокне, легированном ионами гольмия. Из приведенных данных следует, что накачка гольмиевого лазера может осуществляться в области 1,15 и 1,9 мкм. С учетом перепоглощения сигнала в области 1,9 мкм эффективное усиление может достигаться в спектральной области 2–2,15 мкм.

С использованием волокна, легированного ионами гольмия, были продемонстрированы высокоэффективные непрерывные [11] и импульсные лазеры [12] с накачкой иттербиевым волоконным лазером. В работе [13]

Рис. 10. Спектральная зависимость интенсивности люминесценции ионов Ho^{3+}

Рис. 11. Типичный спектр поглощения волокна, легированного ионами Ho^{3+}

аналогичный подход был применен для реализации волоконного усилителя на длине волны 2,1 мкм. На рис. 12 представлена схема установки для измерения коэффициента усиления. В качестве задающего источника использовался гольмиевый лазер с накачкой иттербиевым волоконным лазером. Излучение гольмиевого лазера модулировалось по амплитуде электро-оптическим модулятором. Через изолятор промодулированное излучение подавалось на вход усилительного волокна через мультиплексор, позволяющий объединить излучение сигнала

и накачки. На выходе усилителя устанавливался разъем с косым сколом для предотвращения возникновения лазерной генерации. Следует отметить, что как гольмиевое волокно, так и модулятор были изготовлены в Пермской научно-производственной приборостроительной компании.

Рис. 12. Схема установки для измерения коэффициента усиления

В эксперименте измерялась зависимость коэффициента усиления от мощности накачки. Мощность входного сигнала, измеренная после изолятора, составила 0,25 мВт (–6 дБм). На рис. 13 представлена измеренная зависимость. Максимальный коэффициент усиления составил 27 дБ при мощности накачки 4,2 Вт.

Другая серия экспериментов была связана с усилением относительно мощного сигнала [14]. На рис. 14 представлена зависимость выходной мощности усилителя от мощности накачки при уровне входного сигнала 30 мВт. Максимальная выходная мощность усилителя составила 1,7 Вт при дифференциальной эффективности 26 %.

Другой подход был использован в работе [15], где в качестве источника накачки применялся тулиевый волоконный лазер, а в качестве источника сигнала – перестраиваемый полупроводниковый источник. В результате было продемонстрировано усиление в диапазоне 2,05–2,13 мкм с коэффициентом от 15 до 27 дБ.

Рис. 13. Зависимость коэффициента усиления от мощности накачки

Рис. 14. Зависимость выходной мощности усилителя от мощности накачки.

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что существуют все предпосылки для разработки высокоэффективных компактных усилителей, перекрывающих диапазон 1,7–2,13 мкм, что составляет 430 нм, существенно превышая диапазон распространенных эрбиевых волоконных усилителей. Дальнейшее развитие в этой области существенным образом зависит от практических потребностей в данных усилителях. В частности, такие потребности могут определяться успехами в разработке оптических волокон с поллой сердцевиной.

Список литературы

1. Desurvire E. Erbium-doped fiber amplifiers: Device and System Developments. – Wiley-Interscience, 2002.
2. Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 26–49.
3. Волоконные световоды, легированные висмутом, – новая активная среда для лазеров и усилителей ближнего ИК-диапазона / С.В. Фирстов, С.В. Алышев, М.А. Мелькумов, К.Е. Рюмкин, А.В. Шубин, Е.М. Дианов // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 5–18.
4. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier / A.I. Trikshev, A.S. Kurkov, V.B. Tsvetkov, S.A. Filatova, J. Kertulla, V. Filippov, Yu. K. Chamorovskiy, O.G. Okhotnikov // Laser Physics Letters. – 2013. – Vol. 10, no. 6. – P. 065101.
5. Желтиков А.М. Цвета тонких пленок, антирезонансные явления в оптических системах и предельные потери собственных мод полых световодов // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, №. 6. – С. 619–629.
6. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres / P. Roberts, F. Couny, H. Sabert, B. Mangan, D. Williams, L. Farr, M. Mason, A. Tomlinson, T. Birks, J. Knight, P.St.J. Russell // Optics Express. – 2005. – Vol. 13, no. 1. – P. 236–244.
7. Goodno G.D., Book L.D., Rothenberg J.E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34 (8). – P. 1204–1206.
8. 7-W single-mode thulium-doped fibre laser pumped at 1230 nm / K.S. Kravtsov, I.A. Bufetov, O.I. Medvedkov, E.M. Dianov, M.V. Yashkov, A.N. Gur'yanov // Quantum Electron. – 2005. – Vol. 35 (7). – P. 586–590.
9. Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800 – 2050 nm window / Z. Li, A.M. Heidt, N. Simakov, Y. Jung, J.M.O. Daniel, S.U. Alam, D.J. Richardson // Optics Express. – 2013. – Vol. 21. – P. 26450–26455.
10. Extreme short wavelength operation (1.65–1.7 μm) of silica-based thulium-doped fiber amplifier / Z. Li, Y. Jung, J.M.O. Daniel, N. Simakov, P.C. Shardlow, A.M. Heidt, W.A. Clarkson, S.U. Alam, D.J. Richardson // Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, USA, 22–26 March 2015. – Los Angeles, 2015.

11. Kurkov A.S., Dvoyrin V.V., Marakulin A.V. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at $\lambda=1.15\ \mu\text{m}$ // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35. – P. 490–492.
12. Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С. Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,1 мкм для медицинских применений // *Прикладная фотоника*. – 2014. – № 1. – P. 130.
13. Holmium fiber laser emitting at $2.21\ \mu\text{m}$ / S.O. Antipov, V.A. Kamynin, O.I. Medvedkov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina, A.S. Kurkov, A.V. Baranikov // *Quantum Electron.* – 2013. – Vol. 43(7). – P. 603–604.
14. Antipov S.O., Kurkov A.S. Ho-doped fiber amplifier at 2.1 micron // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10(12). – P. 125106.
15. Holmium-Doped Fiber Amplifier for Optical Communications at $2.05\text{--}2.13\ \mu\text{m}$ / N. Simakov, Z. Li, S.U. Alam, P.C. Shardlow, J.M.O. Daniel, D. Jain, J.K. Sahu, A. Hemming, W.A. Clarkson, D.J. Richardson // *Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, USA, 22–26 March 2015. – Los Angeles, 2015.

References

1. Desurvire E. Erbium-doped fiber amplifiers: Device and System Developments. Wiley-Interscience, 2002.
2. Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Usiliteli na osnove vynuzhdenного kombinatsionного rasseianiia v opticheskikh sistemakh sviazi [Amplifiers based on stimulated Raman scattering in optical communication systems]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 26-49.
3. Firstov S.V., Alyshev S.V., Mel'kumov M.A., Riumkin K.E., Shubin A.V., Dianov E.M. Volokonnye svetovody, legirovannye vismutom, – novaia aktivnaia sreda dlia lazerov i usilitelei blizhnego IK-diapazona [Optical fibers doped with bismuth, a new active medium for lasers and amplifiers near infrared range]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 5-18.
4. Trikshev A.I., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B., Filatova S.A., Kertulla J., Filippov V., Chamorovski Yu.K., Okhotnikov O.G. A 160 W single-frequency laser based on an active tapered double-clad fiber amplifier. *Laser Physics Letters*, 2013, vol.10, no. 6, p. 065101.
5. Zheltikov A. M. Tsveta tonkikh plenok, antirezonsnyye iavleniia v opticheskikh sistemakh i predel'nye poteri sobstvennykh mod polykh svetovodov [The colors of thin films, antiresonance phenomena in optical systems and limit the loss of modes in hollow fibers]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2008, vol. 178, no. 6, pp. 619-629.

6. Roberts P., Couny F., Sabert H., Mangan B., Williams D., Farr L., Mason M., Tomlinson A., Birks T., Knight J., Russell P.St.J. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 1, pp. 236-244.
7. Goodno G.D., Book L.D., Rothenberg J.E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier. *Optics letters*, 2009, vol. 34 (8), pp. 1204-1206.
8. Kravtsov K.S., Bufetov I.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M, Yashkov M.V., Gur'yanov A.N. 7-W single-mode thulium-doped fibre laser pumped at 1230 nm. *Quantum Electron.*, 2005, vol. 35 (7), pp. 586-590.
9. Li Z., Heidt A.M., Simakov N., Jung Y., Daniel J.M.O., Alam S.U., Richardson D.J. Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800–2050 nm window. *Optics Express*, 2013, vol. 21, pp. 26450-26455.
10. Li Z., Jung Y., Daniel J.M.O., Simakov N., Shardlow P.C., Heidt A.M., Clarkson W.A., Alam S.U., Richardson D.J. Extreme short wavelength operation (1.65–1.7 μm) of silica-based thulium-doped fiber amplifier. *Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles, 2015.
11. Kurkov A.S., Dvoyrin V.V., Marakulin A.V. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at $\lambda=1.15 \mu\text{m}$. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, pp. 490-492.
12. Filatova S.A., Tsvetkov V.B., Kurkov A.S. Impul'snyi gol'mievyi volokonnyi lazer s dlinoi volny izlucheniia 2.1 mkm dlia meditsinskih primeneniï [Pulsed holmium fiber laser with a wavelength of 2.1 μm for medical applications]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, p. 130.
13. Antipov S.O., Kamynin V.A., Medvedkov O.I., Marakulin A.V., Minashina L.A., Kurkov A.S., Baranikov A.V. Holmium fiber laser emitting at 2.21 μm . *Quantum Electron.*, 2013, vol. 43 (7), pp. 603-604.
14. Antipov S.O., Kurkov A.S. Ho-doped fiber amplifier at 2.1 micron. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10 (12), p. 125106.
15. Simakov N., Li Z., Alam S.U., Shardlow P.C., Daniel J.M.O., Jain D., Sahu J.K., Hemming A., Clarkson W.A., Richardson D.J. Holmium-Doped Fiber Amplifier for Optical Communications at 2.05–2.13 μm . *Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles, 2015.