

Научная статья

УДК 535.515

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17111>

ПИКОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ КОНИЧЕСКОГО ИТТЕРБИЕВОГО ВОЛОКНА С НИЗКИМ СОБСТВЕННЫМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ

А. С. Козлов ✉, **А. В. Медведев**, **Е. А. Моторин**,
Е. А. Савельев, **В. С. Темкина**, **В. Н. Филиппов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

✉ kozlov_as@spbstu.ru

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментального исследования волоконного лазера, построенного по схеме задающего генератора и усилителя мощности, изготовленного из иттербиевого конического spun-волокна с двойной оболочкой и малой величиной собственного двулучепреломления. На длине волны 1040 нм при длительности импульсов 50 пс и частоте повторения 20 МГц достигнута пиковая выходная мощность 160 кВт при средней мощности 160 Вт. Параметр качества лазерного пучка $M^2 = 1,15$, диаметр модового пятна – 35 мкм. Определены значения азимута, эллиптичности и степени поляризации выходного излучения и продемонстрирована их слабая зависимость от мощности накачки. Проведенное исследование стало следующим важным шагом в развитии технологии мощных пикосекундных волоконных лазеров.

Ключевые слова: иттербиевое коническое волокно, пикосекундный волоконный лазер, активное spun-волокно, собственное двулучепреломление

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00513 (<https://rscf.ru/project/22-19-00513/>)).

Для цитирования: Козлов А. С., Медведев А. В., Моторин Е. А., Савельев Е. А., Темкина В. С., Филиппов В. Н. Пикосекундный импульсный волоконный лазер на основе конического иттербиевого волокна с низким собственным двулучепреломлением // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 1. С 103–113. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17111>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17111>

A PICOSECOND FIBER LASER BASED ON A TAPERED YTTERBIUM FIBER WITH THE LOW BIREFRINGENCE

A. S. Kozlov ✉, **A. V. Medvedev**, **E. A. Motorin**,
E. A. Savelyev, **V. S. Temkina**, **V. N. Filippov**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ kozlov_as@spbstu.ru

Abstract. This paper presents the results of the experimental study of a fiber laser connected according to the MOPA scheme, where a power amplifier was made of an ytterbium double-clad tapered spun fiber with low intrinsic birefringence. A peak output power of

160 kW with the average power of 160 W has been achieved at 1040 nm wavelength, 50 ps pulse duration and its repetition frequency of 20 MHz; the laser beam quality parameter and the mode-spot diameter being 1.15 and 35 μm , respectively. The values of azimuth, ellipticity and degree of polarization of the output radiation were found; their little sensitivity to the pump power was demonstrated. This research was the next important step in the development of high-power picosecond fiber lasers technology.

Keywords: ytterbium spun tapered fiber, picosecond fiber laser, intrinsic birefringence

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 22-19-00513 (<https://rscf.ru/project/22-19-00513/>)).

For citation: Kozlov A. S., Medvedev A. V., Motorin E. A., Savelyev E. A., Temkina V. S., Filippov V. N., A picosecond fiber laser based on a tapered ytterbium fiber with the low birefringence, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1) (2024) 103–113. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17111>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Технология мощных пикосекундных волоконных лазеров быстро развивается в течение последнего десятилетия [1]. Они находят широкое применение в обработке материалов, медицине и литографии. Обычно такие лазеры создаются по схеме мастер-осциллятор/усилитель мощности (МОУМ) (*англ.* master oscillator power amplifier (MOPA)). Такая схема включает мастер-осциллятор, генерирующий маломощные лазерные импульсы с хорошей временной и пространственной когерентностью, и цепочку оптических усилителей мощности, увеличивающих энергию импульса до требуемого уровня.

Основная проблема, ограничивающая пиковую мощность на выходе такой системы, – возникновение нежелательных нелинейных эффектов в активном волокне последнего каскада усиления. Чтобы преодолеть ограничения, налагаемые указанными эффектами, используются активные оптические волокна специальных типов. К ним относятся, например, волокна с большой площадью моды (*англ.* large mode area (LMA)), имеющие низкую апертуру и большой диаметр модового пятна (достигает 14 μm [2]), микроструктурированные световоды [3], 3С-волокна (chirally-coupled-core) [4], анизотропные конические (tapered) волокна с большой площадью моды [5]. Характеристикой мощного волоконного лазера, важной для когерентного комбинирования или нелинейного преобразования длин волн, служит стабильная выходная поляризация.

Наиболее распространенным на текущий момент техническим решением для преодоления указанных ограничений служит использование волокна с большой внутренней анизотропией [6]. Однако, если для пассивного волокна этот подход был успешным, то в случае активного световода начинает возникать ряд негативных явлений. При накачке в оболочку возбуждающего излучения, его часть поглощается и нагревает волокно (так называемый квантовый дефект), а это приводит к изменению внутренних напряжений в волокне и непредсказуемым искажениям его двулучепреломления (ДЛП) [7, 8]. В итоге изменяется состояние поляризации выходного излучения лазера.

Для решения этой проблемы было предложено использовать активное волокно с малым собственным ДЛП [9], а именно – spun-волокно, для которого этот параметр обычно составляет около 10^{-8} рад/м.

В работах [9 – 12] были экспериментально исследованы первые пикосекундные лазеры с выходной средней мощностью до 70 Вт и диаметром модового пятна 26 μm , построенные по схеме МОУМ, в которых в качестве последнего усилителя применялось spun-волокно. При этом использование spun-волокна с шагом вращения от 7,5 до 30 мм позволило получить на порядок более стабильную выходную поляризацию, чем в случае применения активных световодов с большой внутренней анизотропией.

Кроме того, в статьях [10, 11] показано, что состояние поляризации излучения на выходе активного конического волокна с сильной анизотропией значительно зависит от мощности излучения накачки, вводимого в оболочку. Авторы этих статей наблюдали существенный дрейф состояния поляризации излучения на выходе усилителя с коническим panda-волоконном (специальное волокно с сохранением поляризации). Уже при значении вводимой мощности накачки 20 Вт эллиптичность и азимут волокна изменялись на десятки градусов. Одновременно в статье [11] была продемонстрирована высокая стабильность выходной поляризации в усилителе со *srin*-волоконном, обладающим низким собственным ДЛП при тех же 20 Вт вводимой мощности накачки, без использования каких-либо мер по стабилизации температуры волокна.

Настоящая работа направлена на дальнейшее развитие технологии мощных пикосекундных волоконных лазеров, использующих в качестве последнего каскада усиления активное коническое волокно с малым собственным ДЛП. Статья нацелена на повышение пиковой и средней мощности излучения лазера указанного типа, а также посвящена исследованию его поляризационных характеристик и их зависимости от мощности вводимого излучения накачки и времени его работы.

Коническое *srin*-волоконно с двойной оболочкой (sT-DCF)

В экспериментах были использованы образцы волокна sT-DCF, изготовленные во Фрязинском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ФИРЭ РАН, г. Фрязино Московской области, Россия) [9]. Световоды были вытянуты из заготовки, легированной ионами иттербия Yb^{3+} , обладающей ступенчатым профилем показателя преломления, по технологии, аналогичной используемой для пассивных [13] и активных конических [9 – 13] *srin*-волокон. В процессе вытяжки заготовку подавали в высокотемпературную печь со скоростью, переменной во времени по заданному закону, что было необходимо для формирования оптимального продольного профиля [14]. Профиль изготовленного волокна представлен на рис. 1. Угловую скорость вращения заготовки также варьировали при вытяжке волокна в пределах 200 – 300 об/мин.

Соотношение диаметров сердцевины, первой и второй оболочек было 1,0:12,7:15,9, а числовые апертуры оболочек составляли 0,13 и 0,27, соответственно. Поглощение сердцевины – 850 дБ/м на длине волны 976 нм. У первой оболочки были срезаны два сегмента, что позволило снизить долю винтовых мод, не проходящих через сердцевину волокна. Фотографическое изображение торца широкой части волновода также представлено на рис. 1. Отметим, что это стандартный метод увеличения поглощения накачки в активных волокнах [15].

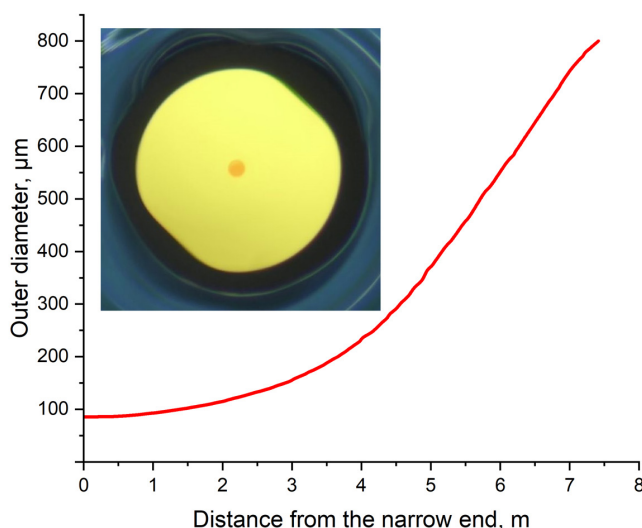


Рис. 1. Профиль изучаемого образца волокна. Представлен график изменения диаметра второй оболочки по длине волокна sT-DCF.

На вставке: фотография торца широкой части волновода

фотографическое изображение торца широкой части волновода также представлено на рис. 1. Отметим, что это стандартный метод увеличения поглощения накачки в активных волокнах [15].

Таким образом, диаметр внешней стеклянной оболочки плавно менялся от 85 до 800 мкм, а диаметр сердцевины – от 5,3 до 50,3 мкм, благодаря чему в узкой части конического волокна возбуждалась только фундаментальная мода. Общая длина волокна составила 7,5 м, шаг вращения – 30 мм. На внешнюю поверхность волокна было нанесено отражающее покрытие с низким показателем преломления (числовая апертура – 0,53), а на него – защитное акрилатное покрытие.

Значение собственного двулучепреломления (разность постоянных распространения собственных мод) для данного образца sT-DCF составила $1,45 \cdot 10^{-8}$ рад/м; последнее было определено экспериментально, методом Джонса [11, 16 – 18].

Экспериментальная установка

По схеме МОУМ был собран макет волоконного лазера, в котором изготовленные световоды использовались в качестве активной среды последнего каскада усиления (рис. 2).

В качестве задающего источника использовался коммерчески доступный лазерный диод с волоконным выходом (GS-diode), излучающий линейно-поляризованный свет длиной волны 1040 нм; частота повторения импульсов длительностью 50 пс была равна 20 МГц. Излучение мощностью порядка 1 мВт предварительно усиливалось до средней мощности около 100 мВт с сохранением ширины спектральной линии 50 пм (рис. 3), после чего вводилось в сердцевину узкой части активного sT-DCF.

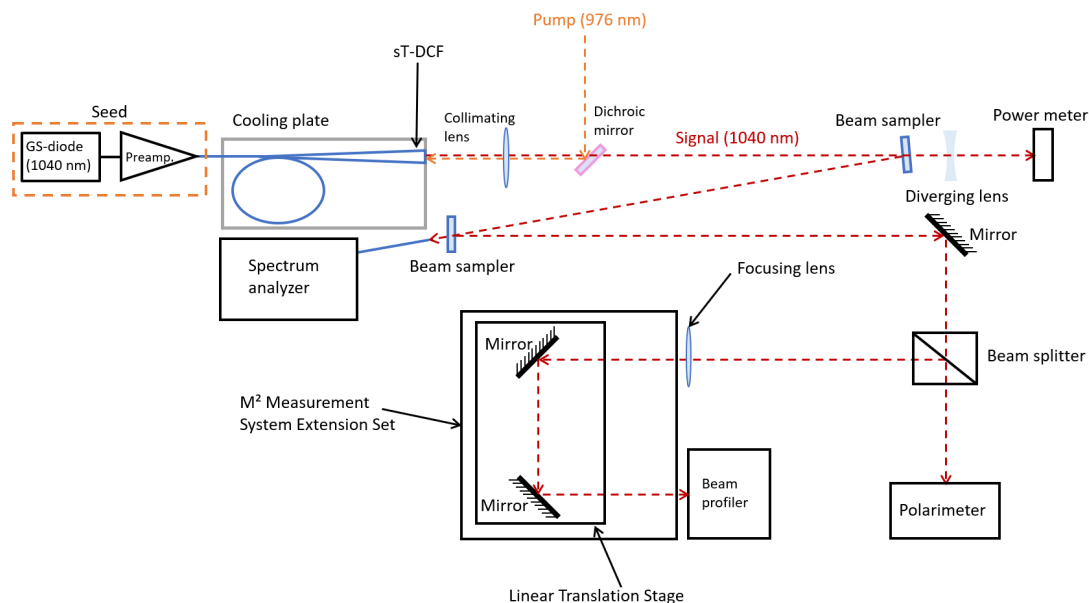


Рис. 2. Схема макета волоконного лазера для исследования параметров его излучения

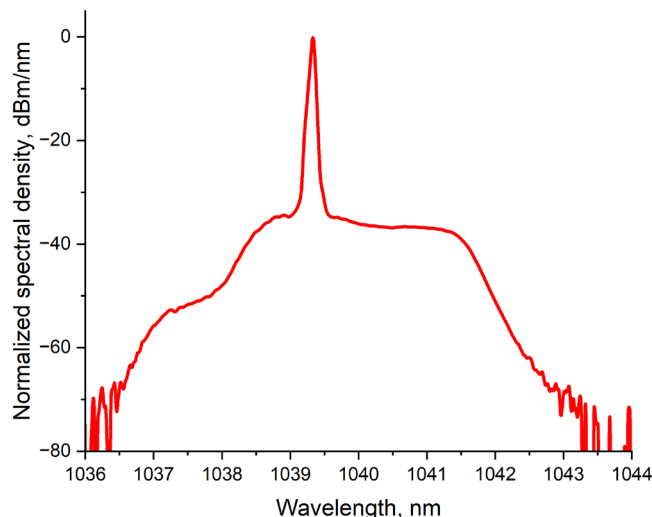


Рис. 3. Спектр предварительно усиленного излучения задающего лазера

Для накачки активного волокна применялась система из двух лазерных диодов, излучающих на длине волны 976 нм и объединенных посредством сплавного волоконно-оптического разветвителя. Излучение накачки вводилось в оболочку широкой части волокна при помощи дихроичного зеркала и асферической линзы. Весь активный световод располагался на специальной охлаждаемой плите таким образом, чтобы снизить градиент температуры внутри активной среды и избежать термического повреждения волокна.

Во время работы лазера постоянно измерялись его выходная мощность, спектр излучения, качество пучка и поляризационные характеристики излучения: степень поляризации, эллиптичность и азимут. Для этих задач использовались измеритель мощности Ophir L1500W-SH (Израиль), спектрометр Ando, анализатор пучка Thorlabs M2MS-BC106VIS/M и поляриметр Thorlabs PAX1000IR2/M (все три – производства США). В случае необходимости измерения расходимости выходного пучка, убирали фокусирующую линзу перед входной щелью анализатора пучка. Максимальный диапазон перемещений линейной подвижки, находящейся внутри анализатора, составлял 100 мм.

Экспериментальные результаты

Параметры усиления МОУМ. На рис. 4 представлена зависимость выходной мощности волоконного лазера от мощности накачки, вводимой в широкую часть активного *spun*-волокна. Эффективность преобразования излучения накачки изготовленного нами усилителя достигала 63 %. При мощности вводимой накачки 270 Вт средняя выходная мощность в режиме импульсов (длительность – 50 пс, частота следования – 20 МГц) составила

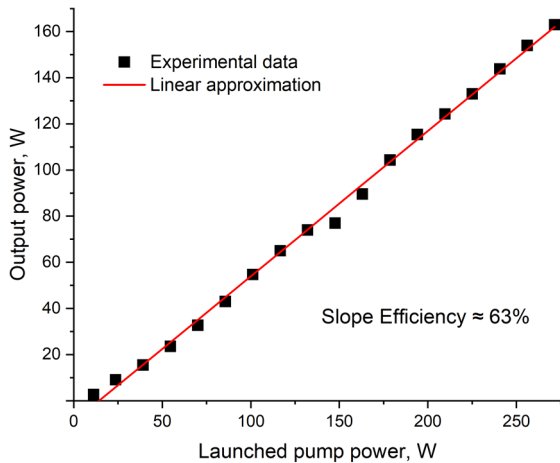


Рис. 4. Экспериментальная зависимость средней выходной мощности усилителя (волоконного лазера) (символы) от мощности накачки и ее линейная аппроксимация (красная сплошная линия)

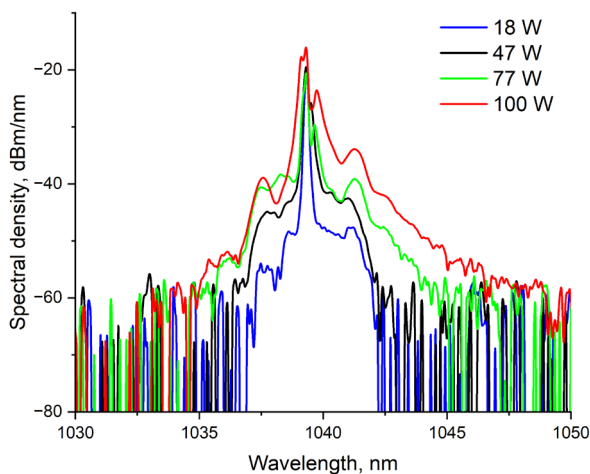


Рис. 5. Спектры лазерного излучения при разных значениях средней выходной мощности усиленного сигнала

160 Вт, пиковое значение выходной мощности – 160 кВт.

Средняя мощность ограничивалась исключительно доступной мощностью накачки. При этом эффективность преобразования не уменьшалась с увеличением мощности накачки.

Для определения размера модового пятна (MFD) мы измеряли расходимость выходного пучка и пользовались следующим отношением для дифракционного предела расходимости MFD [19]:

$$MFD = 4\lambda/\pi\Theta, \quad (1)$$

где λ – длина волны, Θ – расходимость пучка.

Измеренный диаметр модового пятна для использованного конического *spun*-волокна составил 35 мкм.

Спектры лазерного излучения, полученные при разных мощностях усиленного сигнала, приведены на рис. 5. Как следует из результатов эксперимента, с увеличением мощности выходного сигнала растет вклад, вносимый излучением, которое находится вне спектрального диапазона задающего лазера. Оно вызвано фазовой самомодуляцией и четырехволновым смешением.

Мы изучали форму каустики, а также ее поперечные сечения в ближнем и дальнем полях (рис. 6). Приведенные результаты, а также высокое качество пучка ($M^2 < 1,3$) (рис. 7) указывают на преобладание фундаментальной моды внутри активного конического световода.

Состояние поляризации выходного излучения. Состояния поляризации излучения лазера при разных уровнях выходной мощности наглядно представлены на сфере Пуанкаре (рис. 8). В работах [10, 11] был проведен подобный анализ, однако он

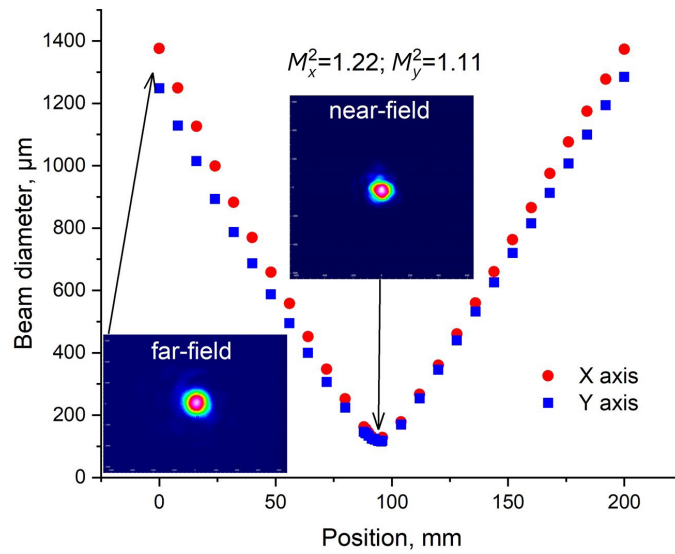


Рис. 6. Зависимости диаметра модового пятна (измерен методом 4-sigma (ISO Standart)) от расстояний по двум осям между фокусирующей линзой и анализатором пучка. На вставках: фотографии дальнего и ближнего полей

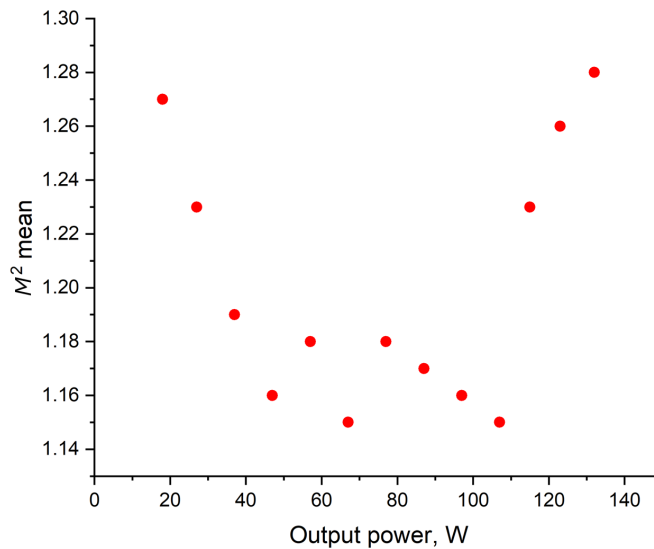


Рис. 7. Зависимость качества пучка от выходной мощности усилителя

относился к малым значениям (25 Вт) мощности накачки, вводимой в оболочку активного конического s-pm-волокна. Мы же в представленных здесь исследованиях подавали излучение накачки мощностью вплоть до 270 Вт, что вызвало изменения в состоянии поляризации при увеличении мощности выходного излучения.

С целью изучения долговременной стабильности состояния поляризации на выходе усилителя со s-pm-волокном, мы провели двухчасовой тест при постоянной выходной мощности, равной 125 Вт (рис. 9).

В рамках исследования среднее квадратическое отклонение для азимута, эллиптичности и степени поляризации составляло примерно 0,4°, 0,5° и 1,5 %, соответственно. Такой результат указывает на высокую временную стабильность состояния поляризации исследуемого нами усилителя. Плавное изменение зависимостей, составляющее всего несколько градусов, вызвано нестабильностью температуры воды, охлаждающей волокно в процессе эксперимента.

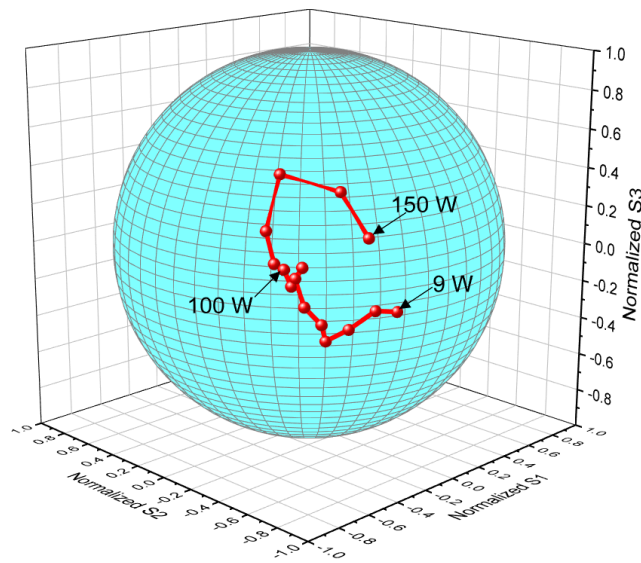


Рис. 8. Представление на сфере Пуанкаре состояний поляризации выходного излучения при разных уровнях его мощности

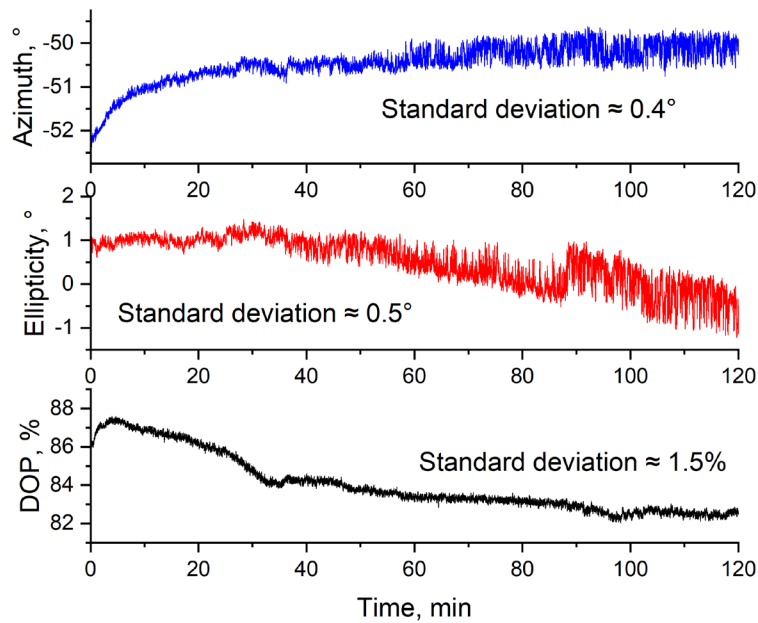


Рис. 9. Результаты двухчасового теста характеристик поляризации выходного излучения усилителя с активным коническим s-pm-волоком. Представлены дрейфы азимута (верхний график), эллиптичности (центральный) и степени поляризации (нижний). Мощность сигнала в течение эксперимента составляла 125 Вт

Обсуждение результатов и выводы

В настоящей работе исследовано активное иттербиевое коническое s-pm-волоконно с низким собственным двулучепреломлением ($1,45 \cdot 10^{-8}$ рад/м) с двойной оболочкой и большим размером модового пятна (35 мкм). Продольное изменение диаметра сердцевинны является эффективной мерой подавления вынужденного комбинационного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна [20]. Большой размер модового пятна позволяет повысить порог возникновения рамановского рассеяния. Благодаря удачной геометрии волокна, а именно – переменному диаметру по его длине и большому диаметру сердцевинны в

широкой части, использование конического активного волокна в усилителе мощности позволило существенно повысить порог возникновения нелинейных эффектов и достичь одновременно высоких значений как средней, так и пиковой выходной мощности. Низкое собственное двулучепреломление конического spun-волокна обеспечило высокую стабильность выходного состояния поляризации при изменении мощности накачки.

В результате проведенного исследования мы продемонстрировали волоконный лазер на основе активного конического spun-волокна, сконструированный по схеме МОУМ, который обеспечивает излучение с пиковой мощностью 160 кВт на длине волны 1040 нм, средней выходной мощностью 160 Вт в импульсном режиме и качеством выходного пучка $M^2 \approx 1,15$. При длительности оптических импульсов 50 пс и частоте следования 20 МГц ширина линии по уровню -3 дБ составила около 0,2 нм при средней выходной мощности 100 Вт.

Важно отметить, что одним из существенных результатов данной работы, по сравнению с опубликованными ранее (см., например, статьи [9 – 12]), является достижение стабильной поляризации выходного излучения мощного (160 Вт) усилителя на активном волокне. Кроме того, была получена зависимость состояния выходной поляризации от мощности вводимой накачки при значениях последней, существенно больших, чем в работах [9 – 12], – вплоть до 270 Вт. Помимо этого, были экспериментально зарегистрированы зависимости таких параметров волокна, как азимут и эллиптичность от мощности вводимой накачки.

Проведенное исследование стало следующим важным шагом в развитии технологии мощных пикосекундных волоконных лазеров.

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории специальных волокон ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН за предоставленные для исследований образцы волоконных световодов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrov A., Odnoblyudov M., Gumenyuk R., Minyonok L., Chumachenko A., Filippov V. Picosecond Yb-doped tapered fiber laser system with 1.26 MW peak power and 200 W average output power // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 20 October. P. 17781.
2. Kliner D. A. V., Koplow J. P., Goldberg L., Carter A. L. G., Digweed J. A. Polarization-maintaining amplifier employing double-clad bow-tie fiber // *Optics Letters*. 2001. Vol. 26. No. 4. Pp. 184–186.
3. Schmidt O., Rothhardt J., Eidam T., Röser F., Limpert J., Tünnermann A., Hansen K., Jakobsen C., Broeng J. Single-polarization large-mode-area Yb-doped photonic crystal fiber // *Conference on Lasers and ElectroOptics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*. Optical Society of America, (2008) CMB2.
4. Ma X., Zhu Ch., Hu I-N., Kaplan A., Galvanauskas A. Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores // *Optics Express*. 2014. Vol. 22. No. 1. Pp. 9206–9219.
5. Fedotov A., Noronen T., Gumenyuk R., Ustimchik V., Chamorovskii Y., Golant K., Odnoblyudov M., Rissanen J., Niemi T., Filippov V. Ultra-large core birefringent Yb-doped tapered double clad fiber for high power amplifiers // *Optics Express*. 2018. Vol. 26. No. 6. Pp. 6581–6592.
6. Rashleigh S. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1983. Vol. 1. No. 2. Pp. 312–331.
7. Ourmazd A., Varnham M. P., Birch R. D., Payne D. N. Thermal properties of highly birefringent optical fibers and preforms // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22. No. 15. Pp. 2374–2379.
8. Rashleigh S. C., Marrone M. J. Temperature dependence of stress birefringence in an elliptically clad fiber // *Optics Letters*. 1983. Vol. 8. No. 2. Pp. 127–129.
9. Fedotov A., Ustimchik V., Chamorovskii Y., Gumenyuk R., Filippov V. Low-birefringence active tapered fibers for high-power applications // *OSA (Optical Society of America) Advanced Photonics Congress*, 13–16 July, 2020. Washington, USA (2020) SoTu2H.7.
10. Fedotov A., Ustimchik V., Rissanen J., Noronen T., Gumenyuk R., Kolosovskii A., Voloshin V., Vorob'ev I., Yu. Chamorovskii, Filippov V. Large mode area double-clad ytterbium-doped spun tapered



- fiber // Journal of the Optical Society of America B. 2021. Vol. 38. No. 12. Pp. F161–F169.
11. Fedotov A., Ustimchik V., Rissanen J., Kolosovskii A., Voloshin V., Vorob'ev I., Gumenyuk R., Chamorovskiy Yu., Filippov V. Active tapered double-clad fiber with low birefringence // Optics Express. 2021. Vol. 29. No. 11. Pp.16506–16519.
 12. Fedotov A., Ustimchik V., Rissanen J., Noronen T., Gumenyuk R., Chamorovskiy Yu., Kolosovskii A., Voloshin V., Vorob'ev I., Filippov V. Large mode area double-clad ytterbium-doped tapered fiber with low birefringence // Proceedings of SPIE. March 2021. Vol. 11665. P. 116651T.
 13. Chamorovskiy Yu., Starostin N., Ryabko M., Sazonov A., Morshnev S., Gubin V., Vorob'ev I., Nikitov S. Miniature microstructured fiber coil with high magneto-optical sensitivity // Optics Communications. 2009. Vol. 282. No. 23. Pp. 4618–4621.
 14. Filippov V., Kerttula J., Chamorovskii Yu., Golant K., Okhotnikov O. G. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser // Optics Express. 2010. Vol. 18. No. 12. Pp. 12499–12512.
 15. Kouznetsov D., Moloney J. V. Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers. II. Broken circular symmetry // Journal of the Optical Society of America B. 2002. Vol. 19. No. 6. Pp. 1259–1263.
 16. Jones R. C. A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix* // Journal of the Optical Society of America. 1947. Vol. 37. No. 2. Pp. 110–112.
 17. Jones R. C. A new calculus for the treatment of optical systems. VII. Properties of the N -matrices // Journal of the Optical Society of America. 1948. Vol. 38. No. 8. Pp. 671–685.
 18. Kozlov A., Medvedev A., Temkina V., Fillipov V., Chamorovskiy Y. Investigation of polarization characteristics of active tapered fibers // Proceedings of the 2023 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2023). October 19–20, 2023. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia, 2024. Pp. 402–405.
 19. Guttman J. L. Mode-field diameter and "spot size" measurements of lensed and tapered specialty fibers // Proceedings of Symposium on Optical Fiber Measurements. September 24–26, 2002. National Institute of Standards and Technology, San-Jose, USA, 2002. 34 p.
 20. Shiraki K., Ohashi M., Tateda M. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fiber by changing the core radius // Electronics Letters. 1995. Vol. 31. No. 8. Pp. 668–669.

REFERENCES

1. Petrov A., Odnoblyudov M., Gumenyuk R., et al., Picosecond Yb-doped tapered fiber laser system with 1.26 MW peak power and 200 W average output power, Sci. Rep. 10 (20 Oct) (2020) 17781.
2. Kliner D. A. V., Koplou J. P., Goldberg L., et al., Polarization-maintaining amplifier employing double-clad bow-tie fiber, Opt. Lett. 26 (4) (2001) 184–186.
3. Schmidt O., Rothhardt J., Eidam T., et al., Single-polarization large-mode-area Yb-doped photonic crystal fiber, Proc. Conf. on Lasers and ElectroOptics/Quantum Electronics and Laser Sci. Conf. & Photonic Appl. Syst. Technol, OSA (2008) CMB2.
4. Ma X., Zhu Ch., Hu I-N., et al., Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores, Opt. Express. 22 (1) (2014) 9206–9219.
5. Fedotov A., Noronen T., Gumenyuk R., et al., Ultra-large core birefringent Yb-doped tapered double clad fiber for high power amplifiers, Opt. Express. 26 (6) (2018) 6581–6592.
6. Rashleigh S. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers, J. Light. Technol. 1 (2) (1983) 312–331.
7. Ourmazd A., Varnham M. P., Birch R. D., Payne D. N., Thermal properties of highly birefringent optical fibers and preforms, Appl. Opt. 22 (15) (1983) 2374–2379.
8. Rashleigh S. C., Marrone M. J., Temperature dependence of stress birefringence in an elliptically clad fiber, Opt. Lett. 8 (2) (1983) 127–129.
9. Fedotov A., Ustimchik V., Chamorovskii Y., et al., Low-birefringence active tapered fibers for high-power applications, OSA (Optical Society of America) Advanced Photonics Congress, 13–16 July, 2020. Washington, USA (2020) SoTu2H.7.
10. Fedotov A., Ustimchik V., Rissanen J., et al., Large mode area double-clad ytterbium-doped spun tapered fiber, J. Opt. Soc. Am. B. 38 (12) (2021) F161–F169.
11. Fedotov A., Ustimchik V., Rissanen J., et al., Active tapered double-clad fiber with low birefringence, Opt. Express. 29 (11) (2021) 16506–16519.

12. Fedotov A., Ustimchik V., Rissanen J., et al., Large mode area double-clad ytterbium-doped tapered fiber with low birefringence, Proc. SPIE, 11665 (March) (2021) 116651T.
13. Chamorovskiy Yu., Starostin N., Ryabko M., et al., Miniature microstructured fiber coil with high magneto-optical sensitivity, Opt. Commun. 282 (23) (2009) 4618–4621.
14. Filippov V., Kerttula J., Chamorovskii Yu., et al., Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser, Opt. Express. 18 (12) (2010) 12499–12512.
15. Kouznetsov D., Moloney J. V., Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers. II. Broken circular symmetry J. Opt. Soc. Am. B. 19 (6) (2002) 1259–1263.
16. Jones R. C., A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix*, J. Opt. Soc. Am. 37 (2) (1947) 110–112.
17. Jones R. C., A new calculus for the treatment of optical systems. VII. Properties of the N -matrices, J. Opt. Soc. Am. 38 (8) (1948) 671–685.
18. Kozlov A., Medvedev A., Temkina V., et al., Investigation of polarization characteristics of active tapered fibers, Proc. 2023 Int. Conf. Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech-2023), Oct. 19–20, 2023. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia (2024) 402–405.
19. Guttman J. L., Mode-field diameter and "spot size" measurements of lensed and tapered specialty fibers, Proc. Symp. on Optical Fiber Measurements, Sept. 24–26, 2002. National Institute of Standards and Technology, San-Jose, USA, 2002.
20. Shiraki K., Ohashi M., Tateda M., Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fiber by changing the core radius, Electron. Lett. 31(8) (1995) 668–669.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЗЛОВ Артемий Сергеевич – инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
kozlov_as@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-1722-1964

МЕДВЕДЕВ Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
medvedev@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7083-9184

МОТОРИН Евгений Анатольевич – инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
eug.motorin@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7901-3933

САВЕЛЬЕВ Евгений Александрович – инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
swoopermsu@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-0213-5833

ТЕМКИНА Валентина Сергеевна – ассистентка Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
temkina_vs@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-2083-8989

ФИЛИППОВ Валерий Николаевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
filippov_vn@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-0354-8616

THE AUTHORS

KOZLOV Artemy S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
kozlov_as@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-1722-1964

MEDVEDEV Andrey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
medvedev@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7083-9184

MOTORIN Evgenii A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
eug.motorin@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7901-3933

SAVELYEV Evgeny A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
swoopermsu@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-0213-5833

TEMKINA Valentina S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
temkina_vs@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-2083-8989

FILIPPOV Valery N.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
filippov_vn@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-0354-8616

Статья поступила в редакцию 30.09.2023. Одобрена после рецензирования 24.11.2023. Принята 24.11.2023.

Received 30.09.2023. Approved after reviewing 24.11.2023. Accepted 24.11.2023.