

УДК 535.015

НЕЛИНЕЙНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ДВУХСЕРДЦЕВИННОМ ТЕЛЛУРИТНОМ СВЕТОВОДЕ

© А. В. Андрианов¹, Н. И. Сальников^{1,2}, Е. А. Анашкина¹,
В. В. Дорофеев^{1,3}, С. Е. Моторин^{1,3}, А. Р. Шарафеев³,
О. В. Тимофеев³, А. Г. Литвак¹

¹Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,
603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23

³Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН,
603951, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49

E-mail: andrian@ipfran.ru

Изготовлено двухсердцевинное волокно на основе теллуричного стекла с взаимодействующими одномодовыми сердцевинами, в котором исследовано линейное и нелинейное распространение ультракоротких импульсов. В изготовленном волокне экспериментально продемонстрирован эффект нелинейно-оптического переключения ультракоротких импульсов на длине волны 1,56 мкм, который проявлялся в виде перераспределения энергии между сердцевинами на выходе волокна при увеличении энергии входного импульса, введённого в одну из сердцевинок волокна. Эффект наблюдался при относительно невысоких энергиях импульсов менее 2 нДж, что представляет интерес для создания насыщающихся поглотителей для волоконных лазеров с синхронизацией мод.

Ключевые слова: многосердцевинные световоды, нелинейно-оптические переключатели, теллуричные световоды, ультракороткие импульсы.

DOI: 10.15372/AUT20250102

EDN: RWBMEF

Введение. Многосердцевинные оптические волокна (МСВ) являются перспективной платформой для разработки нового поколения волоконных лазерных систем, линий связи и сенсоров и могут служить в качестве активной среды в лазерах и усилителях [1–3], элемента для транспортировки и преобразования излучения или чувствительного элемента в распределённой сенсорной системе [4, 5]. Важный аспект исследований МСВ связан с изучением нелинейной пространственно-временной динамики излучения. Нелинейные свойства МСВ позволяют реализовать интересные для приложений оптические устройства, такие как полностью оптические переключатели, нелинейные объединители излучения, насыщающиеся поглотители, устройства для очистки импульсов от пьедестала и улучшения контраста [6–9]. В этом отношении большой интерес вызывает изучение новых материалов для изготовления МСВ, которые имеют большую нелинейность и более широкий диапазон прозрачности, чем традиционно используемое кварцевое стекло.

Теллуричные стёкла, в основе составов которых лежит диоксид теллура, обладают интересными с точки зрения нелинейной оптики и лазерной физики свойствами. Они прозрачны в области от ближнего до среднего инфракрасного (ИК) диапазона (до 5–6 мкм в зависимости от состава), обладают высокой по сравнению с кварцевым стеклом нелинейностью, а также пригодны в качестве матрицы для легирования редкоземельными ионами, которые генерируют на длинах волн, недоступных для кварцевых волокон [10–12]. Разно-

образии составов теллуридных стёкол, совместимых по физическим и химическим свойствам, но различающихся значениями показателя преломления, позволяет изготавливать достаточно прочные волоконные световоды с различными волноводными структурами, как например: волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и микроструктурированные волокна. В теллуридных волокнах продемонстрированы генерация суперконтинуума и широкополосная перестройка ультракоротких импульсов, получены лазерная и рамановская генерации в различных диапазонах длин волн [11, 13–15]. Однако технологии создания многосердцевидных теллуридных световодов не так хорошо развиты, как технологии кварцевых МСВ. Продемонстрированы семисердцевидные пассивные теллуридные волокна и трёхсердцевидные волокна, легированные редкоземельными ионами [16–18]. Насколько нам известно, нелинейные режимы распространения излучения в теллуридных МСВ экспериментально не исследовались. Считаем, что теллуридные МСВ имеют хороший потенциал для создания усилителей (в том числе рамановских) и преобразователей импульсного излучения (например, для широкополосной перестройки ультракоротких импульсов), как это показано в наших теоретических работах [19–22]. Это стимулирует разработку технологий изготовления теллуридных МСВ и экспериментальное исследование их свойств.

Целью представленной работы являлись разработка и изготовление двухсердцевидного волокна на основе теллуридного стекла, а также экспериментальное и численное исследование нелинейного распространения ультракоротких импульсов на длине волны $\sim 1,56$ мкм в данном волокне, в частности эффекта нелинейно-оптического переключения излучения между сердцевинами при изменении энергии импульсов.

Изготовление теллуридного многосердцевидного волокна и исследование его линейных свойств. В данной работе предложена технология изготовления теллуридного МСВ, основанная на сборке заготовки из нескольких односердцевидных заготовок. Широко используемые технологии для изготовления многосердцевидных МСВ предполагают сверление массива отверстий в стеклянном стержне и вставку в отверстия стержней сердцевин либо сборку из набора стержней с различными показателями преломления, укладываемых в определённом порядке в опорную трубку. Оба варианта оказались плохо совместимы с технологией изготовления теллуридных МСВ с близко расположенными сердцевинами, что необходимо для обеспечения достаточно сильного взаимодействия между ними. Данная работа основана на хорошо отработанной нами технологии изготовления односердцевидных заготовок из высокочистых теллуридных стёкол [11], позволяющей достичь низкого содержания гидроксильных групп и других примесей в наиболее критичных областях волноводной структуры (где сосредоточено излучение моды) и, соответственно, добиться низких потерь в волокне, которое может быть вытянуто из данных заготовок. Реализованный далее процесс создания многосердцевидной заготовки схематически показан на рис. 1, а.

Вначале была изготовлена односердцевидная заготовка из стёкол с составами $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3$ для сердцевины и $\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-La}_2\text{O}_3$ для оболочки. Одна сторона заготовки была сошлифована и отполирована таким образом, чтобы расстояние от центра сердцевины до границы равнялось половине желаемого расстояния между центрами сердцевин (с учётом фактора масштабирования размеров при вытяжке). Далее заготовка разделялась на две части, которые были сложены плоскими гранями вместе и помещены в опорную трубку из теллуридного стекла. Из полученной сборки было вытянуто волокно. В первой экспериментальной реализации данной технологии изготовлено простейшее двухсердцевидное волокно. На основе данной технологии также изготовлено четырёхсердцевидное волокно, но его исследование выходит за рамки представленной работы.

Фотография торца полученного экспериментального образца показана на рис. 1, б. В процессе вытяжки не удалось получить полную консолидацию опорной трубки с одно-

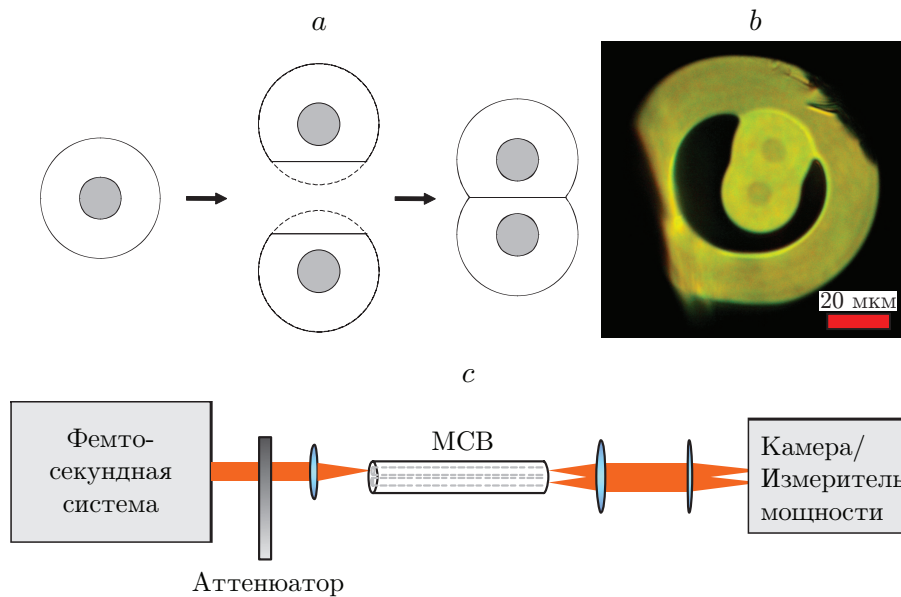


Рис. 1. Схема создания заготовки теллуричного МСВ (а), микрофотография торца МСВ (b), схема исследования распространения излучения в МСВ (с)

сердцевинными заготовками. Тем не менее произошла полная консолидация двух заготовок, при этом область между сердцевинами оказалась свободна от включений и пузырьков. Для проведения экспериментов выбран отрезок волокна, в котором диаметры сердцевин составляли 7 мкм, а расстояние между центрами сердцевин — 16 мкм. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки $dn \approx 0,006$. Это позволило провести экспериментальное исследование линейных и нелинейных свойств данного волокна.

Перед экспериментальной работой проведены численные расчёты мод световода, реализованные с помощью конечно-элементного численного моделирования на основе геометрических размеров сердцевин и расстояния между ними, измеренными по микрофотографии торца волокна. В двумерной модели задавались сердцевинки с идеально круглыми сечениями и цилиндрическая круглая оболочка достаточно большого размера, чтобы исключить влияние её внешней границы на распределение полей мод. Решались уравнения Максвелла методом конечных элементов (аналогично тому, как описано в [23]). На длине волны 1,56 мкм, на которой проводился эксперимент, каждая из сердцевин является одномодовой, поэтому в двухсердцевинном волокне существуют две супермоды — синфазная и противофазная. Структуры полей этих мод представлены на рис. 2, а. Для данных мод также рассчитаны постоянные распространения, на основе чего найден коэффициент связи между сердцевинами $\chi = 0,33 \text{ см}^{-1}$. Расчётный период линейной перекачки излучения между модами составил $L_b = 9,5 \text{ см}$.

Для экспериментального исследования использована схема, показанная на рис. 1, с. В качестве источника импульсов взят эрбиевый фемтосекундный лазер на длине волны 1,56 мкм с волоконным усилителем. Импульсы длительностью 220 фс с максимальной энергией 2,5 нДж и средней мощностью 200 мВт при частоте повторения 80 МГц с выхода усилителя проходили через регулируемый аттенюатор и фокусировались в одну из сердцевин МСВ с помощью асферической линзы. Излучение на выходе МСВ измерялось с помощью ИК-камеры и измерителя мощности.

Вначале исследовано линейное распространение излучения в световоде. Для этого мощность излучения уменьшена до 1 мВт, при этом влияние нелинейности волокна пренебрежимо мало. В данном эксперименте входной торец волокна фиксирован и входная

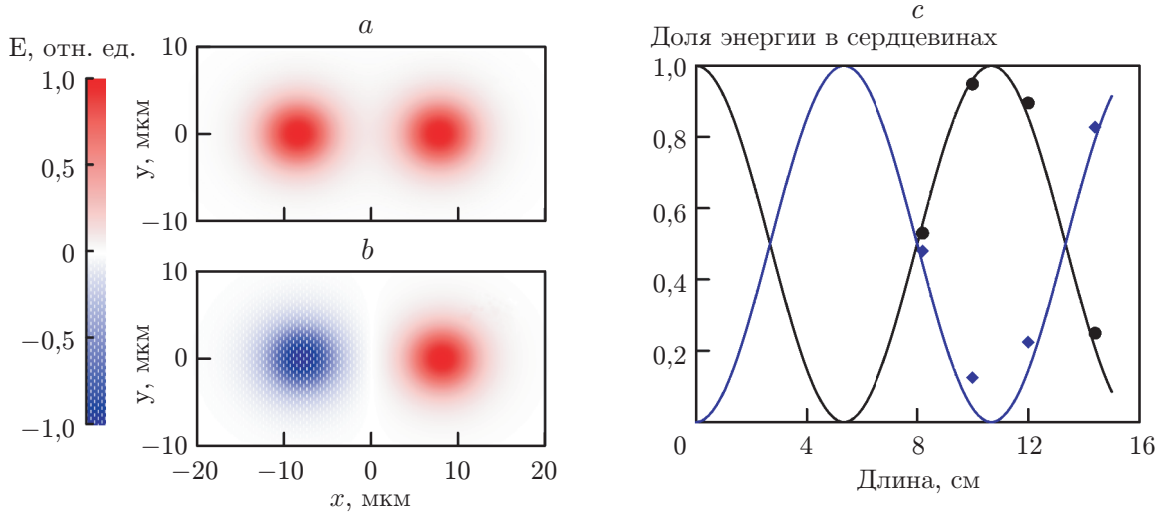


Рис. 2. Рассчитанные распределения поперечной компоненты электрического поля синфазной (a) и противофазной (b) супермод, измеренные (круги и ромбы) и рассчитанные (сплошные кривые) доли энергии в сердцевинах при различной длине волокна в режиме линейного распространения (c)

мощность неизменна. Последовательно производилось уменьшение длины волокна с помощью скалывания небольших отрезков длиной около 2 см. Регистрировались профили выходного излучения, на основании которых рассчитывались мощности в сердцевинах. Измеренные энергии в сердцевинах, отнормированные на полную энергию, для различных длин волокна показаны на рис. 2, c, а также результаты моделирования в случае линейного распространения. Видно, что происходит периодическая перекачка излучения между сердцевинами за счёт наличия связи между ними. Этот процесс можно также интерпретировать как биения между синфазной и противофазной супермодами, которые возбуждены приблизительно в равных пропорциях на входе в волокно. Период биений оценён как $L_b = 10,5$ см, что близко к значению 9,5 см, полученному в численном моделировании свойств мод. При построении графиков на рис. 2, c использовалось значение коэффициента перекачки, демонстрирующего наилучшее согласие с экспериментом. Укорочение световода остановлено в тот момент, когда интенсивности в сердцевинах приблизительно были равными, а полная длина световода составляла 8 см, что приблизительно соответствовало длине $0,75L_b$. Это позволило далее провести эксперименты по исследованию нелинейного распространения.

Нелинейное распространение ультракоротких импульсов. С учётом влияния нелинейности картина распространения существенно меняется. В этом случае уже нельзя напрямую использовать модовую картину распространения, а удобнее рассматривать распространение излучения в одинаковых взаимодействующих сердцевинах, которое может быть описано в рамках системы связанных нелинейных уравнений Шрёдингера:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_1}{\partial z} &= i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} + i\gamma|A_1|^2 A_1 + i\chi A_2, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} &= i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} + i\gamma|A_2|^2 A_2 + i\chi A_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $A_{1,2}$ — комплексные огибающие полей в первой и второй сердцевинах, z — координата вдоль волокна, t — время в сопровождающей системе отсчёта, β_2 — коэффициент

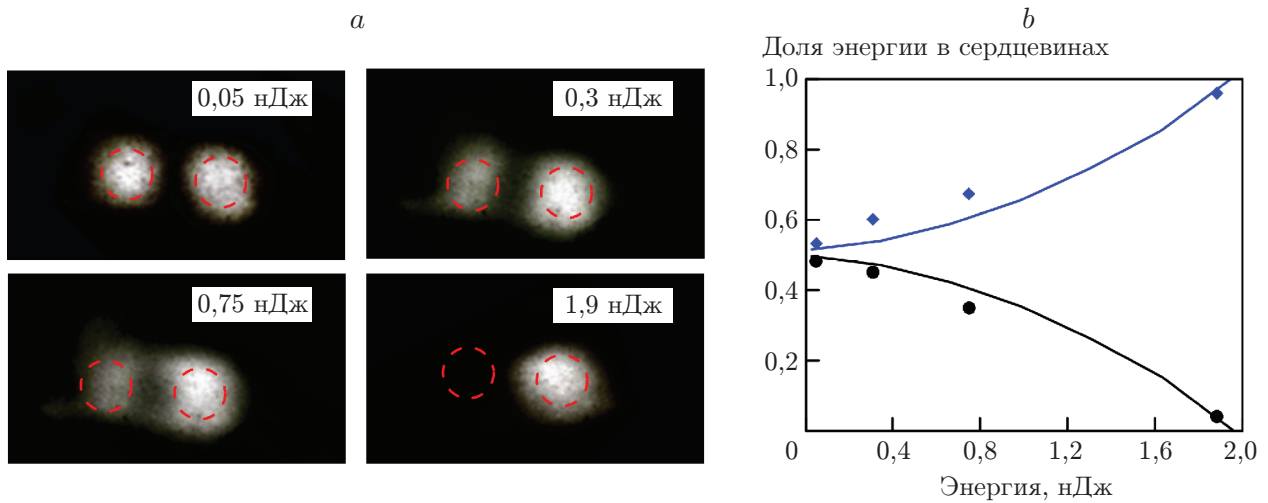


Рис. 3. Профили пучка на выходе волокна при различных энергиях импульса (а), измеренные (круги и ромбы) и полученные в численном моделировании (сплошные кривые) доли энергии в сердцевинах в зависимости от энергии (б). Пунктирными кругами показаны положения сердцевин

дисперсии второго порядка, χ — коэффициент связи между сердцевинами, γ — коэффициент нелинейности.

Качественно процесс распространения можно описать следующим образом. На входе в волокно, где излучение в основном находится в одной сердцевине, за счёт действия кубической нелинейности эффективная постоянная распространения излучения увеличивается. При этом уменьшается перекачка энергии в соседнюю сердцевину, поскольку появляется фазовое рассогласование между волнами в сердцевинах. В предельном случае очень высокой интенсивности излучение оказывается заперто в одной сердцевине.

Данный эффект достаточно хорошо известен и изучен в контексте нелинейных волоконных ответвителей, массивов связанных волноводов и многосердцевинных световодов [8, 24–28]. В массивах связанных волноводов данный эффект может быть интерпретирован как нелинейное подавление дискретной дифракции [26, 27]. Нам не известно о демонстрации данного эффекта в теллуридных многосердцевинных световодах.

Для экспериментального исследования этого эффекта мощность (и, соответственно, энергия) импульсов излучения на входе в волокно изменялась с помощью перестраиваемого аттенюатора, а выходное излучение регистрировалось с помощью камеры. Примеры изображений с камеры и зависимости выходных энергий импульсов в сердцевинах от суммарной энергии представлены на рис. 3, а. Поскольку потери на входе в волокно точно не известны, зависимости строились от суммарной выходной энергии (а не энергии на входе), которая более адекватно отражает энергию импульсов непосредственно внутри волокна. Видно, что при увеличении энергии распределение излучения между сердцевинами существенно изменяется — излучение концентрируется в одной сердцевине. Это происходит в результате увеличения эффективной длины биений из-за действия нелинейности. Происходит нелинейное переключение между режимом линейного распространения импульсов, при котором их энергия распределяется в равных долях между сердцевинами, и нелинейным режимом, при котором основная доля энергии оказывается в одной сердцевине. Таким образом, исследованное МСВ может работать как нелинейный оптический переключатель, а также как насыщающийся поглотитель. При выборе другой длины световода можно получить иные характеристики переключателя, например, при длине световода, равной L_b ,

излучение малой мощности оказывается почти полностью сосредоточено в одной сердцевине, а излучение большой мощности — в другой.

На основе систем уравнений (1) проведено численное моделирование распространения излучения в волокне. Эффекты дисперсии высших порядков не учитывались, поскольку действие большой нормальной дисперсии второго порядка (расчётное значение $\beta_2 \approx 150 \text{ пс}^2/\text{км}$) оказывается намного более сильным; вынужденное комбинационное рассеяние и эффект самоукручения огибающей импульса также не оказывают сильного влияния из-за большой длительности импульса и короткой трассы распространения.

Результаты численного моделирования показаны на рис. 3, *b* сплошными кривыми. Видно, что результаты измерения неплохо согласуются с расчётными зависимостями. Таким образом, эффект нелинейного переключения фемтосекундных импульсов между сердцевинами подтверждается теоретически. Важной особенностью данного эффекта в теллуридном МСВ является относительно невысокая энергия импульсов, требуемая для заметного перераспределения энергии между сердцевинами, что связано с высокой нелинейностью теллуридного стекла. Отметим, что в кварцевых МСВ для наблюдения эффекта требуются энергии порядка сотен нДж [8]. Невысокая энергия, необходимая для нелинейного переключения, делает теллуридные МСВ перспективными для использования в качестве насыщающихся поглотителей в волоконных лазерах с синхронизацией мод [29]. Исследование временных и спектральных характеристик излучения, прошедшего через теллуридное МСВ, также представляет большой интерес, но выходит за рамки данной работы.

Заключение. В процессе исследования была разработана технология изготовления теллуридного МСВ, основанная на сборке заготовки МСВ из односердцевинных заготовок с сошлифованной гранью. Данная технология позволяет получить МСВ с малым контролируемым расстоянием между сердцевинами, что обеспечивает необходимую связь между ними. В изготовленном двухсердцевинном световоде экспериментально был наблюдаем эффект нелинейно-оптического переключения ультракоротких 220-фемтосекундных импульсов, который проявлялся в виде перераспределения энергии между сердцевинами на выходе волокна при увеличении энергии входного импульса. Эффект наблюдался при относительно невысоких энергиях импульсов 2 нДж, что представляет интерес для создания насыщающихся поглотителей для волоконных лазеров с синхронизацией мод.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00248).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abedin K. S., Yan M. F., Taunay T. F. et al.** State-of-the-art multicore fiber amplifiers for space division multiplexing // *Opt. Fiber Technol.* 2017. **35**. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.yofte.2016.09.010.
2. **Kuznetsov A. G., Wolf A. A., Egorova O. N. et al.** Spectrum collapse in a 7-core Yb-doped fiber laser with an array of fs-inscribed fiber Bragg gratings // *Opt. Lett.* 2023. **48**, Iss. 13. P. 3603–3606. DOI: 10.1364/OL.493139.
3. **Andrianov A. V., Kalinin N. A., Anashkina E. A. et al.** Selective Excitation and Amplification of Peak-Power-Scalable Out-of-Phase Supermode in Yb-Doped Multicore Fiber // *Journ. Lightwave Technol.* 2023. **38**, Iss. 8. P. 2464–2470. DOI: 10.1109/JLT.2020.2966025.
4. **Zhao Z., Tang M., Lu C.** Distributed multicore fiber sensors // *Opto-Electron. Adv.* 2020. **3**, N 2. 190024. DOI: 10.29026/oea.2020.190024.
5. **Bronnikov K., Wolf A., Yakushin S. et al.** Durable shape sensor based on FBG array inscribed in polyimide-coated multicore optical fiber // *Opt. Exp.* 2019. **27**, Iss. 26. P. 38421–38434. DOI: 10.1364/OE.380816.

6. **Nazemosadat E., Mafi A.** Design considerations for multicore optical fibers in nonlinear switching and mode-locking applications // *JOSA B*. 2014. **31**, Iss. 8. P. 1874–1878. DOI: 10.1364/JOSAB.31.001874.
7. **Chekhovskoy I. S., Rubenchik A. M., Shtyrina O. V. et al.** Nonlinear combining and compression in multicore fibers // *Phys. Rev. A*. 2016. **94**. 043848. DOI: 10.1103/PhysRevA.94.043848.
8. **Andrianov A. V., Kalinin N. A., Koptev M. Yu. et al.** High-energy femtosecond pulse shaping, compression, and contrast enhancement using multicore fiber // *Opt. Lett.* 2019. **44**, Iss. 2. P. 303–306. DOI: 10.1364/OL.44.000303.
9. **Kharenko D., Koliada N., Gervaziev M. et al.** Nonlinear pulse dynamic in a weak coupled normal dispersion multicore fiber // *Proc. SPIE*. 2023. **12775**. 127750W. DOI: 10.1117/12.2688542.
10. **Tao G., Ebendorff-Heidepriem H., Stolyarov A. M. et al.** Infrared fibers // *Adv. in Opt. and Photon.* 2015. **7**, Iss. 2. P. 379–458. DOI: 10.1364/AOP.7.000379.
11. **Anashkina E. A., Dorofeev V. V., Koltashev V. V., Kim A. V.** Development of Er³⁺-doped high-purity tellurite glass fibers for gain-switched laser operation at 2.7 μm // *Opt. Mater. Exp.* 2017. **7**, Iss. 12. P. 4337–4351. DOI: 10.1364/OME.7.004337.
12. **Muravyev S. V., Anashkina E. A., Andrianov A. V. et al.** Dual-band TM³⁺-doped tellurite fiber amplifier and laser at 1.9 μm and 2.3 μm // *Sci. Rep.* 2018. **8**, № 1. 16164. DOI: 10.1038/s41598-018-34546-w.
13. **Kibler B., Lemi re A., Gomes J.-T. et al.** Octave-spanning coherent supercontinuum generation in a step-index tellurite fiber and towards few-cycle pulse compression at 2 μm // *Opt. Commun.* 2021. **488**. 126853. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.126853.
14. **Koptev M. Yu., Anashkina E. A., Andrianov A. V. et al.** Widely tunable mid-infrared fiber laser source based on soliton self-frequency shift in microstructured tellurite fiber // *Opt. Lett.* 2015. **40**, Iss. 17. P. 4094–4097. DOI: 10.1364/OL.40.004094.
15. **Qin G., Liao M., Suzuki T. et al.** Widely tunable ring-cavity tellurite fiber Raman laser // *Opt. Lett.* 2008. **33**, Iss. 17. P. 2014–2016. DOI: 10.1364/OL.33.002014.
16. **Cheng T., Duan Z., Liao M. et al.** All-solid tellurite microstructured optical fiber with one layer of high-index rods // *Opt. Exp.* 2013. **21**, Iss. 3. P. 3318–3323. DOI: 10.1364/OE.21.003318.
17. **Cheng T., Duan Z., Gao W. et al.** A Novel Seven-Core Multicore Tellurite Fiber // *Journ. Lightwave Technol.* 2013. **31**, Iss. 11. P. 1793–1796. DOI: 10.1109/JLT.2013.2260133.
18. **Bookey H. T., Lousteau J., Jha A. et al.** Multiple rare earth emissions in a multicore tellurite fiber with a single pump wavelength // *Opt. Exp.* 2007. **15**, Iss. 26. P. 17554–17561. DOI: 10.1364/OE.15.017554.
19. **Anashkina E. A., Andrianov A. V., Litvak A. G.** Numerical Simulation of High-Power Optical Amplifiers at 2.3 μm Based on a Special Multicore Fiber // *Photonics*. 2023. **10**, Iss. 7. 711. DOI: 10.3390/photonics10070711.
20. **Anashkina E. A., Andrianov A. V.** Design and Dispersion Control of Microstructured Multicore Tellurite Glass Fibers with In-Phase and Out-of-Phase Supermodes // *Photonics*. 2021. **8**, Iss. 4. 113. DOI: 10.3390/photonics8040113.
21. **Skobelev S. A., Balakin A. A., Anashkina E. A. et al.** Ultrawide shifting of the laser pulse wavelength in a multicore tellurite fiber with two zero-dispersion wavelengths // *Phys. Rev. A*. 2021. **104**. 033518. DOI: 10.1103/PhysRevA.104.033518.
22. **Анашкина Е. А., Андрианов А. В.** Моделирование лазеров на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния света в специальных теллуридных волокнах и микрорезонаторах // *Автометрия*. 2024. **60**, № 1. С. 15–26. DOI: 10.15372/AUT20240102.

23. **Santos D. F., Guerreiro A., Baptista J. M.** Numerical investigation of a refractive index SPR D-type optical fiber sensor using COMSOL multiphysics // *Photon. Sens.* 2013. **3**, N 1. P. 61–66. DOI: 10.1007/s13320-012-0080-5.
24. **Saitoh K., Matsuo S.** Multicore Fiber Technology // *Journ. Lightwave Technol.* 2016. **34**, Iss. 1. P. 55–66. DOI: 10.1109/JLT.2015.2466444.
25. **Fu W., Wright L. G., Sidorenko P. et al.** Several new directions for ultrafast fiber lasers // *Opt. Exp.* 2018. **26**, Iss. 8. P. 9432–9463. DOI: 10.1364/OE.26.009432.
26. **Christodoulides D. N., Joseph R. I.** Discrete self-focusing in nonlinear arrays of coupled waveguides // *Opt. Lett.* 1988. **13**, Iss. 9. P. 794–796. DOI: 10.1364/OL.13.000794.
27. **Minardi S., Eilenberger F., Kartashov Y. V. et al.** Three-Dimensional Light Bullets in Arrays of Waveguides // *Phys. Rev. Lett.* 2010. **105**. 263901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.263901.
28. **Hudson D. D., Shish K., Schibli T. R. et al.** Nonlinear femtosecond pulse reshaping in waveguide arrays // *Opt. Lett.* 2008. **33**, Iss. 13. P. 1440–1442. DOI: 10.1364/OL.33.001440.
29. **Chao Q., Hudson D. D., Kutz J. N., Cundiff S. T.** Waveguide Array Fiber Laser // *IEEE Photon. Journ.* 2012. **4**, Iss. 5. P. 1438–1442. DOI: 10.1109/JPHOT.2012.2209411.

Поступила в редакцию 10.10.2024

После доработки 29.11.2024

Принята к публикации 10.01.2025
