

УДК 681.7.068/.069

**Б.И. Галаган<sup>1</sup>, А.П. Вельмузов<sup>2</sup>, Б.И. Денкер<sup>1</sup>, В.В. Колташев<sup>3</sup>,  
В.Г. Плотниченко<sup>3</sup>, С.Е. Сверчков<sup>1</sup>, Г.Е. Снопатин<sup>2</sup>, М.В. Суханов<sup>2</sup>,  
М.П. Фролов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,  
Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр  
волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия

## **ПЯТИМИКРОННЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР НА ИОНАХ $\text{Ce}^{3+}$**

В работе исследованы спектральные и временные характеристики халькогенидного волоконного лазера, легированного  $\text{Ce}^{3+}$  и накачиваемого непрерывным лазером на  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ .

**Ключевые слова:** халькогенидные оптические световоды, трёхвалентный церий, волоконный лазер среднего ИК-диапазона.

**B.I. Galagan<sup>1</sup>, A.P. Velmuzhov<sup>2</sup>, B.I. Denker<sup>1</sup>, V.V. Koltashev<sup>3</sup>, V.G.  
Plotnichenko<sup>3</sup>, S.E. Sverchkov<sup>1</sup>, G.E. Snopatin<sup>2</sup>,  
M.V. Sukhanov<sup>2</sup>, M.P. Frolov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian  
Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

## **FIVE-MICRON $\text{Ce}^{3+}$ ION FIBER LASER**

The spectral and temporal characteristics of a  $\text{Ce}^{3+}$ -doped chalcogenide fiber laser pumped by a continuous  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser were investigated in this work.

**Keywords:** chalcogenide optical fibers, trivalent cerium, mid-infrared fiber laser.

В работе [1] было показано, что в селенидном стекле целый ряд оптических переходов редкоземельных ионов в области 4–6 мкм имеют высокие квантовые выходы люминесценции, миллисекундные времена релаксации, высокие сечения переходов и позволяют реализовать лазерную генерацию. К настоящему времени уже продемонстрирована лазерная генерация на переходах ионов  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$  в селенидном стекле. Важно отметить, что этому поспособствовала разработка технологии получения высокочистых составов стекол с минимальным содержанием примесных групп Ge-H и Se-H, имеющих полосы поглощения на 4,95 и 4,54 мкм. Среди перечисленных лазерных ионов трёхвалентный церий имеет наибольшие значения сечений как поглощения, так и излучения ( $\sim 4 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ ). В отличие от других ионов церий имеет в области прозрачности селенидных стекол лишь два электронных уровня, соответствующих основному состоянию  $^2F_{5/2}$  и возбуждённому  $^2F_{7/2}$ . Поэтому его оптическая накачка должна осуществляться либо резонансно, в коротковолновую часть спектра поглощения, либо с использованием иона-сенсibilизатора. Как показали исследования, эффективным сенсibilизатором является ион диспрозия  $\text{Dy}^{3+}$  [2]. Однако такая схема ещё требует дополнительной оптимизации. Исследования лазеров с резонансной накачкой объёмных цериевых активных элементов при помощи импульсных  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  лазеров [3] показали не только их эффективность, но и возможность значительной спектральной перестройки (4,5–5,6 мкм) излучения генерации (рис. 1).

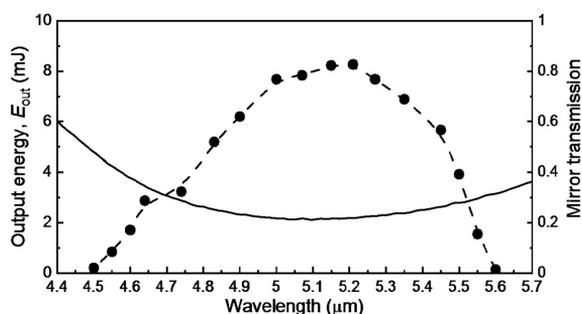


Рис. 1. Зависимость выходной энергии цериевого лазера от длины волны генерации [3]

Наибольший интерес представляет реализация цериевого лазера в волоконном исполнении. Первые попытки были сделаны в работе [4], в которой авторы для оптической накачки использовали квантовый

каскадный лазер с длиной волны 4,15 мкм и наблюдали существенную деформацию спектра излучения  $\text{Ce}^{3+}$  при увеличении мощности накачки. Пороговый характер этой деформации был интерпретирован как возникновение лазерной генерации в световоде.

В настоящей работе представлены результаты исследований спектральных и временных характеристик лазерного излучения в халькогенидном световоде, активированном церием. В качестве источника накачки использовался непрерывный лазер на  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , излучающий на длине волны 4,16 мкм.

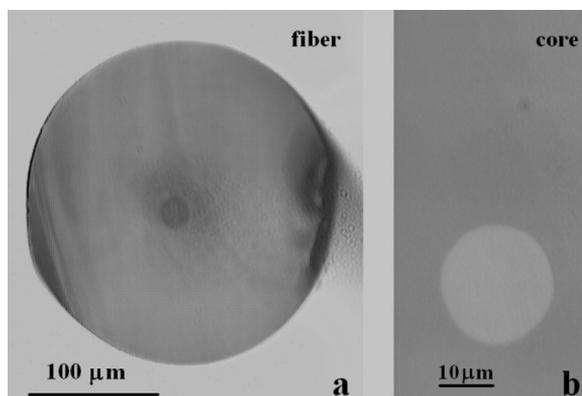


Рис. 2. Изображение торца световода

Сердцевина активированного волокна была изготовлена из стекла  $\text{Ge}_{20}\text{Ga}_5\text{Sb}_{10}\text{Se}_{65}$  и имела диаметр 21 мкм. Концентрация церия в сердцевине составляла  $5,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Оболочка диаметром 240 мкм была изготовлена из стекла  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{20}\text{Sb}_5\text{S}_{63}$ . На рис. 2 представлены изображения торца волокна. Благодаря большой разнице между показателями преломления сердцевины и оболочки (2,55 и 2,35 соответственно) волокно было очень многомодовым и имело числовую апертуру  $\text{NA} \approx 1$ , что легко позволяло удерживать в сердцевине как излучение накачки, так и лазера. Были исследованы два резонатора волоконного лазера: резонатор низкой добротности, образованный просто двумя торцами волокна (каждый из которых отражал около 19%), и резонатор с более высокой добротностью с дополнительным диэлектрическим зеркалом. Зеркало, отражающее  $\sim 70\%$  в спектральном диапазоне 4,5–6 мкм, находилось непосредственно рядом с торцом волокна.

В отсутствие дополнительного зеркала порог генерации достигался при мощности накачки в 14 мВт. Максимальная выходная

мощность ограничивалась мощностью имеющегося лазера на  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  в 70 мВт (рис. 3). Таким образом, с учетом двунаправленной генерации достигнутая выходная мощность превышала 1 мВт, а дифференциальный КПД составил 2 %. Следует отметить, что в отличие от тербиевого волоконного лазера при непрерывной накачке генерация имела не пиковый, а чисто непрерывный характер.

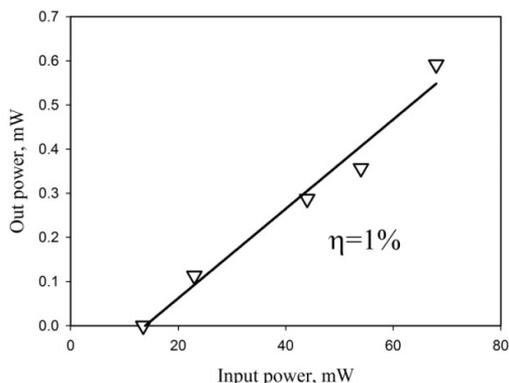


Рис. 3. Мощность цериевого волоконного лазера на выходе одного торца в зависимости от мощности накачки

Особое внимание было уделено спектральным исследованиям излучения генерации. Оказалось, что для низкодобротного резонатора, т.е. образованного лишь торцами световода, длина волны генерации устойчиво находилась вблизи 4,62 мкм (рис. 4). Напротив, в присутствии дополнительного зеркала длина волны генерации перескакивала к 5,1 мкм (см. рис. 4).

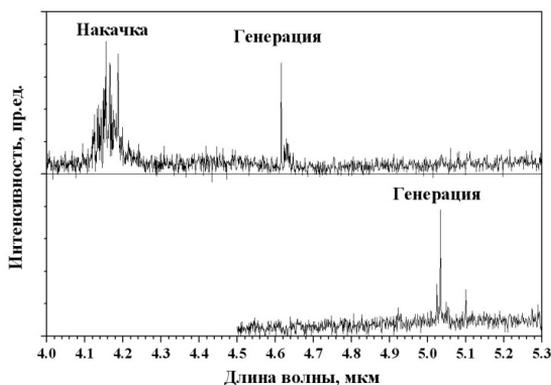


Рис. 4. Спектры излучения накачки и генерации цериевого лазера для двух типов резонаторов

Для объяснения эффекта перескока длины волны генерации были проведены расчёты зависимости сечения усиления ( $\sigma_{\text{gain}}$ ) от уровня возбуждения ионов церия  $\sigma_{\text{gain}} = \beta \cdot \sigma_{\text{em}} - (1 - \beta)\sigma_{\text{abs}}$ , где  $\beta$  – уровень возбуждения,  $\sigma_{\text{abs}}$  и  $\sigma_{\text{em}}$  – сечения соответственно поглощения и испускания. Проведенные расчёты позволили уверенно объяснить причину спектральных особенностей излучения цериевого лазера в неселективном резонаторе.

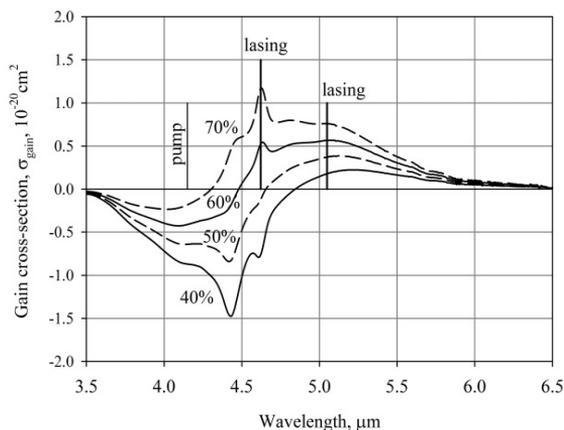


Рис. 5. Спектральная зависимость сечения усиления от уровня возбуждения ионов церия

Как видно из рис. 5, при превышении уровня возбуждения в 60 % максимум в сечении усиления переходит с плато вблизи 5–5,1 мкм на узкий пик с длиной волны 4,62 мкм.

Таким образом, впервые исследованы спектральные и временные характеристики халькогенидного волоконного лазера, легированного  $\text{Ce}^{3+}$  и накачиваемого непрерывным лазером на  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ . В случае низкой добротности лазер работал на длине волны  $\lambda = 4,62$  мкм, соответствующей узкому пику в спектре излучения  $\text{Ce}^{3+}$ . В случае высокой добротности длина волны излучения изменялась до 5,0–5,1 мкм, что соответствует плато в спектре усиления. Была продемонстрирована выходная мощность порядка 1 мВт с дифференциальным КПД  $\sim 2$  %.

### Список литературы

1. Comparison of 4.5–6  $\mu\text{m}$  luminescent and lasing properties of rare earth dopants in chalcogenide glasses / M.F. Churbanov, B.I. Denker, B.I. Galagan, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov,

S.E. Sverchkov, A.P. Velmuzhov // *Journal of Luminescence*. – 2022. – Vol. 245. – P. 118756.

2. Cascade sensitization of mid-infrared  $Ce^{3+}$  luminescence by  $Dy^{3+}$  ions in selenide glass / M.F. Churbanov, B.I. Denker, B.I. Galagan, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov, S.E. Sverchkov, A.P. Velmuzhov // *Journal of Luminescence*. – 2021. – Vol. 231. – P. 117809.

3. Mid-infrared laser performance of  $Ce^{3+}$ -doped selenide glass / P. Fjodorow, M.P. Frolov, S.O. Leonov, B.I. Denker, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov, A.P. Velmuzhov // *Optics express*. – 2021. – Vol. 29, № 17. – P. 27674–27682.

4. Room temperature mid-infrared fiber lasing beyond  $5\ \mu m$  in chalcogenide glass small-core step index fiber / J.J. Nunes, Ł. Sojka, R.W. Crane, D. Furniss, Z.Q. Tang, D. Mabwa, B. Xiao, T.M. Benson, M. Farries, N. Kalfagiannis, E. Barney, S. Phang, A.B. Seddon, S. Sujecki // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46, № 15. – P. 3504–3507.

## References

1. Churbanov M.F., Denker B.I., Galagan B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P. Comparison of  $4.5\text{--}6\ \mu m$  luminescent and lasing properties of rare earth dopants in chalcogenide glasses. *Journal of Luminescence*, 2022, vol. 245, p. 118756.

2. Churbanov M.F., Denker B.I., Galagan B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P. Cascade sensitization of mid-infrared  $Ce^{3+}$  luminescence by  $Dy^{3+}$  ions in selenide glass. *Journal of Luminescence*, 2021, vol. 231, p. 117809.

3. Fjodorow P., Frolov M.P., Leonov S.O., Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Velmuzhov A.P. Mid-infrared laser performance of  $Ce^{3+}$ -doped selenide glass. *Optics express*, 2021, vol. 29, no. 17, pp. 27674-27682.

4. Nunes J.J., Sojka Ł., Crane R.W., Furniss D., Tang Z.Q., Mabwa D., Xiao B., Benson T.M., Farries M., Kalfagiannis N., Barney E., Phang S., Seddon A.B., Sujecki S. Room temperature mid-infrared fiber lasing beyond  $5\ \mu m$  in chalcogenide glass small-core step index fiber. *Optics Letters*, 2021, vol. 46, no. 15, pp. 3504-3507.

**Сведения об авторах**

**ГАЛАГАН Б.И.**

e-mail: [galagan@ran.gpi.ru](mailto:galagan@ran.gpi.ru)

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

**ВЕЛЬМУЖОВ А.П.**

e-mail: [tej4@mail.ru](mailto:tej4@mail.ru)

Кандидат химический наук, старший научный сотрудник Института химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН, г. Нижний Новгород.

**ДЕНКЕР Б.И.**

e-mail: [denker@lst.gpi.ru](mailto:denker@lst.gpi.ru)

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

**КОЛТАШЕВ В.В.**

e-mail: [kvv@fo.gpi.ru](mailto:kvv@fo.gpi.ru)

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научного центра волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

**ПЛОТНИЧЕНКО В.Г.**

e-mail: [v.plotnichenko@gmail.com](mailto:v.plotnichenko@gmail.com)

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, г. Москва.

**About the authors**

**GALAGAN B.I.**

e-mail: [galagan@ran.gpi.ru](mailto:galagan@ran.gpi.ru)

Ph.D. in physics and mathematics, Principal Scientist at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

**VELMUZHOV A.P.**

e-mail: [tej4@mail.ru](mailto:tej4@mail.ru)

Ph. D. in chemical sciences, senior scientist at Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod.

**DENKER B.I.**

e-mail: [denker@lst.gpi.ru](mailto:denker@lst.gpi.ru)

D. in Physics and Mathematics, chief scientist at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

**KOLTASHEV V.V.**

e-mail: [kvv@fo.gpi.ru](mailto:kvv@fo.gpi.ru)

Ph.D. in physics and mathematics, senior scientist at Dianov Fiber Optics Research Center, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

**PLOTNICHENKO V.G.**

e-mail: [v.plotnichenko@gmail.com](mailto:v.plotnichenko@gmail.com)

Professor, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow.

**СВЕРЧКОВ С.Е.**

e-mail: *glasser@lst.gpi.ru*

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

**SVERCHKOV S.E.**

e-mail: *glasser@lst.gpi.r*

D. in Physics and Mathematics, Principal Scientist at Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow.

**СНОПАТИН Г.Е.**

e-mail: *snopatin@ihps-nnov.ru*

Кандидат химический наук, старший научный сотрудник Института химии высококочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН, г. Нижний Новгород.

**SNOPATIN G.E.**

e-mail: *snopatin@ihps-nnov.ru*

Ph. D. in chemical sciences, senior scientist at Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod.

**СУХАНОВ М.В.**

e-mail: *mrmaks@yandex.ru*

Кандидат химический наук, старший научный сотрудник Института химии высококочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН, г. Нижний Новгород.

**SUKHANOV M.V.**

e-mail: *mrmaks@yandex.ru*

Ph. D. in chemical sciences, senior scientist at Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod.

**ФРОЛОВ М.П.**

e-mail: *frolovmp@x4u.lebedev.ru*

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва.

**FROLOV M.P.**

e-mail: *frolovmp@x4u.lebedev.ru*

Ph.D. in physics and mathematics, senior scientist at P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 22-22-00742.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Получена:** 20.07.2023

**Одобрена:** 25.07.2023

**Принята к публикации:** 27.07.2023

**Financing.** The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 22-22-00742).

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Author Contributions.** All authors have made an equivalent contribution to the publication.

**Received:** 20/07/2023

**Approved:** 25/07/2023

**Accepted for publication:** 27/07/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Пятимикронный волоконный лазер на ионах  $Ce^{3+}$  / Б.И. Галаган, А.П. Вельмузов, Б.И. Денкер, В.В. Колташев, В.Г. Плотниченко, С.Е. Сверчков, Г.Е. Снопатин, М.В. Суханов, М.П. Фролов // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 42–50.

Please cite this article in English as: Galagan B.I., Velmuzhov A.P., Denker B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sverchkov S.E., Snopatin G.E., Sukhanov M.V., Frolov M.P. Five-micron  $Ce^{3+}$  ion fiber laser // Applied photonics, 2023, no. 5, pp. 42-50.