

## Расширение области излучения волоконных лазеров в длинноволновую область спектра свыше 5 мкм\*

А.П. Вельмузов, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, В.В. Колташев, С.Е. Сверчков, Г.Е. Снопатин, М.В. Суханов,  
В.Г. Плотниченко

Памяти академика Е.М. Дианова

Представлен обзор основных результатов работ в рамках междисциплинарного проекта РФФИ по созданию лазеров на халькогенидных стеклах, работающих при комнатной температуре в ранее недоступной для лазеров на стеклах области длин волн свыше 4 мкм.

Синтезированы образцы халькогенидных стекол, легированные редкоземельными ионами (РЗИ)  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  рекордного уровня химической чистоты и высокого оптического качества, и исследованы их спектрально-люминесцентные свойства. Выбраны перспективные для лазерной генерации переходы РЗИ и схемы их возбуждения. Продемонстрирована лазерная генерация в области спектра 4.5–6 мкм на ранее не генерировавших переходах церия, празеодима и тербия. В объемном образце легированного церием селенидного стекла получены выходная энергия до 43 мДж в импульсе и спектральная перестройка в полосе 4.5–5.6 мкм. В композитном волоконном световоде (с легированной тербием селенидной сердцевиной в нелегированной сульфидной оболочке) при непрерывной накачке получена выходная мощность до 100 мВт на длине волны ~ 5.25 мкм.

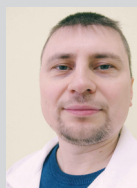
**Ключевые слова:** халькогенидное стекло, редкоземельные ионы, волоконный лазер среднего инфракрасного диапазона.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-29-20079).

### Введение

Разработка твердотельных лазеров для области 3–8 мкм среднего инфракрасного (ИК) диапазона представляет особый интерес для таких применений, как спектроскопия, дистанционное зондирование газовых смесей и атмосферы в экологии, медицине, контроле производственных процессов и других областях. В этой спек-

тральной области располагаются основные полосы поглощения многих органических и неорганических молекул и соединений, интенсивность которых значительно превышает поглощение соответствующих обертонов в ближней ИК-области. Для их дистанционного мониторинга и возможного воз-



**ВЕЛЬМУЗОВ**

**Александр Павлович**

Институт химии высококичистых веществ имени Г.Г. Девярых РАН



**ГАЛАГАН**

**Борис Иванович**

Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН



**ДЕНКЕР**

**Борис Ильич**

профессор,  
Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН



**КОЛТАШЕВ**

**Василий Васильевич**

Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН,  
Научный центр волоконной оптики имени Е.М. Дианова РАН



**СВЕРЧКОВ**

**Сергей Евгеньевич**

Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН



**СНОПАТИН**

**Геннадий Евгеньевич**

Институт химии высококичистых веществ имени Г.Г. Девярых РАН



**СУХАНОВ**

**Максим Викторович**

Институт химии высококичистых веществ имени Г.Г. Девярых РАН



**ПЛОТНИЧЕНКО**

**Виктор Геннадиевич**

профессор,  
Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН

действия на них требуются достаточно мощные источники лазерного излучения. В указанной спектральной области работают газовые лазеры на оксиде углерода, химические лазеры, квантово-каскадные лазеры, ВКР-лазеры и параметрические генераторы света. Более подробную информацию о них можно найти, например, в обзорах [1, 2].

Для многих применений наиболее удобными в использовании являются твердотельные, и особенно волоконные лазеры. Однако диапазон длин волн излучения свыше 4 мкм только недавно начал заполняться твердотельными лазерами. Доступные до сегодняшнего дня наиболее длинноволновые волоконные лазеры на фторидных стеклах не достигают и длины волны 4 мкм.

Среди длинноволновых твердотельных лазеров наиболее разработаны лазеры на халькогенидных кристаллах соединений  $A_2B_6$ , легированных ионами  $Fe^{2+}$  [3–8]. Их преимуществами являются высокая теплопроводность кристаллических материалов, высокие сечения вынужденного испускания ионов  $Fe^{2+}$  и возможность перестройки длины волны в широком спектральном диапазоне (от 3.7 до 6.8 мкм в различных кристаллах). Общим недостатком всех лазеров на  $Fe^{2+}$  является очень короткое (<1 мкс) время жизни верхнего лазерного уровня при комнатной температуре. По этой причине для них требуется либо накачка импульсами наносекундной длительности (чаще всего с помощью лазеров Er:YAG с модуляцией добротности), либо криогенное охлаждение.

Активированные РЗИ халькогенидные стекла уже в течение нескольких десятилетий являются предметом исследования научных групп в США, Франции, Японии, Канаде, Великобритании, КНР и других странах. Перспективность этого класса материалов для лазерной генерации в средневолновом инфракрасном диапазоне (прежде всего для длин волн свыше 4 мкм, недоступных для лазеров на фторидных стеклах) с давних пор осознавалась исследователями.

Эта перспективность связана, прежде всего, с низкой (по сравнению с фторидными и тем более оксидными стеклами) максимальной энергией колебаний сетки халькогенидных стекол, а также с технологической возможностью вытяжки из них волоконных световодов. Действительно, люминесценция в активированных сульфидных, селенидных и теллуридных составах стекол была зарегистрирована на многочисленных переходах редкоземельных активаторов на длинах волн вплоть до 8 мкм (см., например, статьи [9–11]). Тем не менее, несмотря на многообещающие данные люминесцентной спектроскопии, попытки получения лазерной генерации (кроме 1.08 мкм генерации неодиима [12, 13]) на этих стеклах успеха не приносили. Ситуация возникла курьезная: было опубликовано немало работ (см., например, статьи [14–18]), в заголовках и аннотациях которых фигурировали в той или иной форме слова «лазер», «лазерный эффект», а генерации при этом никем получено не было.

По устоявшемуся мнению, это было связано с наличием в исследуемых стеклах примесей, вносящих как дополнительные оптические потери, так и тушащих люминесценцию редкоземельных активаторов. Наиболее вредными растворенными примесями для халькогенидных стекол в области 3–8 мкм являются водород и кислород. Водородсодержащие (Se–H, S–H, Ge–H) и кислородсодержащие (Ge–O, As–O) группы имеют полосы поглощения в диапазонах 3.7–5.3 и 5.3–8 мкм соответственно. Другим типом вредных примесей являются гетерогенные включения микронного и субмикронного размеров, на которых происходят потери излучения на рассеяние.

Ситуация начала меняться с 2019 г., когда в результате совместных работ сотрудников нескольких академических институтов: НЦВО (с 2020 г. вошел в качестве обособленного подразделения в ИОФ РАН), ИХВВ РАН и ИОФ РАН впервые были достигнуты пороги 5–6 мкм лазерной генерации на ряде новых лазерных переходов нескольких РЗИ в особо чистых селенидных стеклах [19–21]. Успех этих работ был всецело обусловлен объединением компетенций каждой их вышеупомянутых организаций.

В ИХВВ РАН была разработана уникальная технология синтеза легированных РЗИ халькогенидных стекол с рекордным уровнем чистоты (содержание примесей водорода и кислорода значительно ниже 1 ppm) [22] и с высоким оптическим качеством, а также освоена методика вытяжки из этих стекол оптических волокон методом двойного тигля. После этого перспективы создания лазеров среднего ИК-диапазона на активированных РЗИ стеклах стали вполне реалистичными.

В ИОФ РАН и НЦВО были проведены исследования спектрально-люминесцентных свойств РЗИ в халько-

генидных стеклах, выделен ряд перспективных для лазеров РЗИ и оптических переходов, определены возможные схемы накачки и благоприятные для достижения лазерной генерации условия и выполнены первые успешные генерационные эксперименты. В дальнейшем к лазерным экспериментам присоединились также ученые Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, располагающие такими уникальными источниками накачки, как лазеры на ZnSe:Fe<sup>2+</sup>.

Настоящая публикация подводит итоги четырехлетних исследований (2018–2021) спектрально-люминесцентных и лазерных свойств легированных РЗИ халькогенидных стекол и волоконных световодов, которые были проведены в рамках междисциплинарного проекта РФФИ №18-29-20079. Несмотря на завершение проекта, работы в данном направлении продолжают и их результаты также частично отражены в данной статье.

### Выбор объектов исследования

Халькогенидные стекла характеризуются широкой областью ИК-прозрачности, сдвигающейся в длинноволновую область в ряду сульфидные–селенидные–теллуридные стекла. Они намного превосходят в этом отношении фторидные и тем более оксидные, в частности, кварцевые стекла (рис. 1).

Колебательные спектры халькогенидных стекол обеспечивают низкие скорости многофононного тушения люминесценции оптических переходов редкоземельных легирующих добавок. Высокие показатели преломления халькогенидных стекол (2.1–2.4 для сульфидных, 2.4–2.7 для селенидных и более 3 для теллуридных составов) приводят к увеличению сечений стимулированного излучения оптических переходов РЗИ. Все эти факторы делают халькогенидные стекла перспективными матрицами для объемных и особенно для волоконных лазеров, излучающих на длинах волн, превышающих 4 мкм. На данном этапе исследований мы ограничились

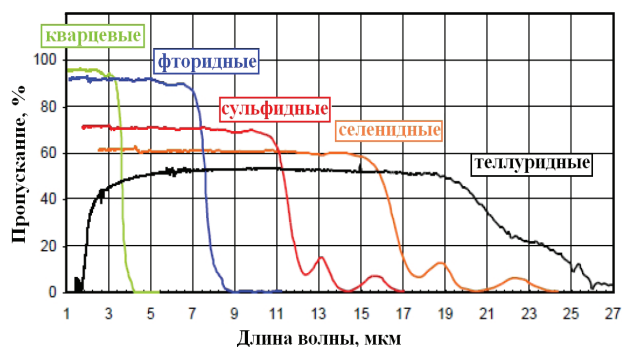


Рис. 1. Области прозрачности стекол с различными анионами [23].

в основном селенидными стеклами и оптическими переходами в спектральной полосе 5–6 мкм. В селенидных стеклах, в отличие от сульфидных, 5–6-микрометровые переходы РЗИ могут иметь высокий, приближающийся к 100% квантовый выход. Теллуридные стекла, в отличие от сульфидных и селенидных, еще недостаточно освоены технологически. Кроме того, область их высокой прозрачности начинается только от ~3 мкм, что сильно ограничивает выбор возможных источников оптической накачки. По итогам предварительных исследований нами был выбран в качестве базового селенидный состав Ga<sub>5</sub>Ge<sub>20</sub>Sb<sub>10</sub>Se<sub>65</sub>. Он достаточно устойчив к кристаллизации и допускает введение до 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup> РЗИ.

На рис. 2 представлены схемы низкорасположенных энергетических уровней некоторых РЗИ в стекле выбранного базового состава, построенные на основании проведенных спектроскопических исследований. У всех есть общая особенность: долгоживущие излучательные переходы из первого возбужденного состояния в основное находятся в 5–6 мкм спектральной области, на которых мы и решили получать лазерную генерацию. Разумеется, это далеко не исчерпывающий список перспективных для лазерной генерации переходов РЗИ в халькогенидных стеклах – это

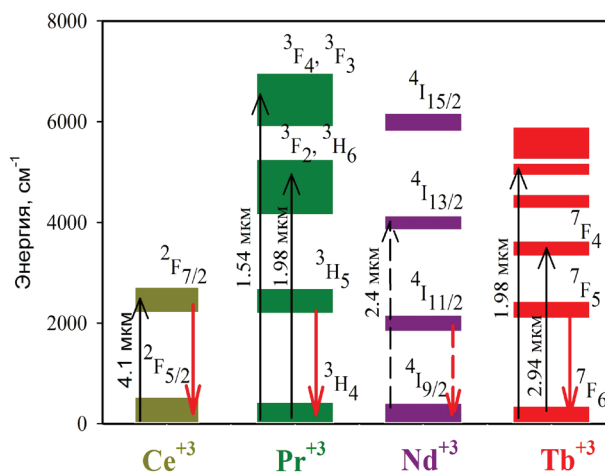


Рис. 2. Схемы энергетических уровней некоторых РЗИ в исследованных селенидных стеклах. Возможные длины волн оптической накачки отмечены черными стрелками, лазерные переходы – красными.

переходы, которые мы исследовали на данном этапе работ.

**Люминесцентные свойства РЗИ в селенидных стеклах [23–25]**

Сложности спектрально-люминесцентных и кинетических измерений в среднем ИК-диапазоне состоят в наличии многочисленных полос поглощения в земной атмосфере (в основном из-за примесей CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), в необходимости использования для всех оптических элементов специальных и редких ИК-прозрачных материалов, охлаждаемых жидким азотом фотоприемников (на основе соединений InSb и HgCdTe), в необходимости постоянного учета возможного влияния на результаты измерений теплового излучения окружающих предметов и самих экспериментаторов.

На рис. 3 и рис. 4 представлены, соответственно, спектры поглощения и сечения вынужденного испускания перечисленных выше РЗИ в исследованном селенидном стекле. В таблице 1 представлены расчетные (радиационные) и экспериментально измеренные люминесцентные времена жизни каждого из этих ионов на переходах из первого возбужденного в основное состояние [24].

**Спектроскопические особенности выбранных ионов**

Ce<sup>3+</sup> обладает единственной, но интенсивной полосой поглощения в области прозрачности халькогенидных стекол с максимумом вблизи 4.5 мкм. Эта область длин волн до недавнего времени не была освоена лазерными источниками, и, по-видимому, поэ-

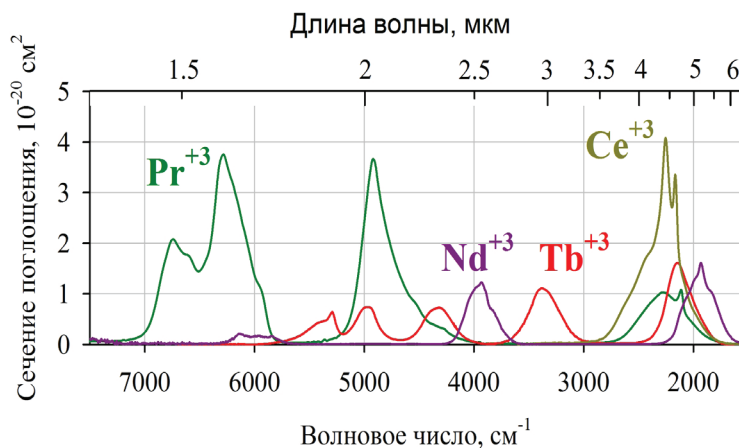


Рис. 3. Спектры поглощения РЗИ в Ga<sub>5</sub>Ge<sub>20</sub>Sb<sub>10</sub>Se<sub>65</sub> стекле.

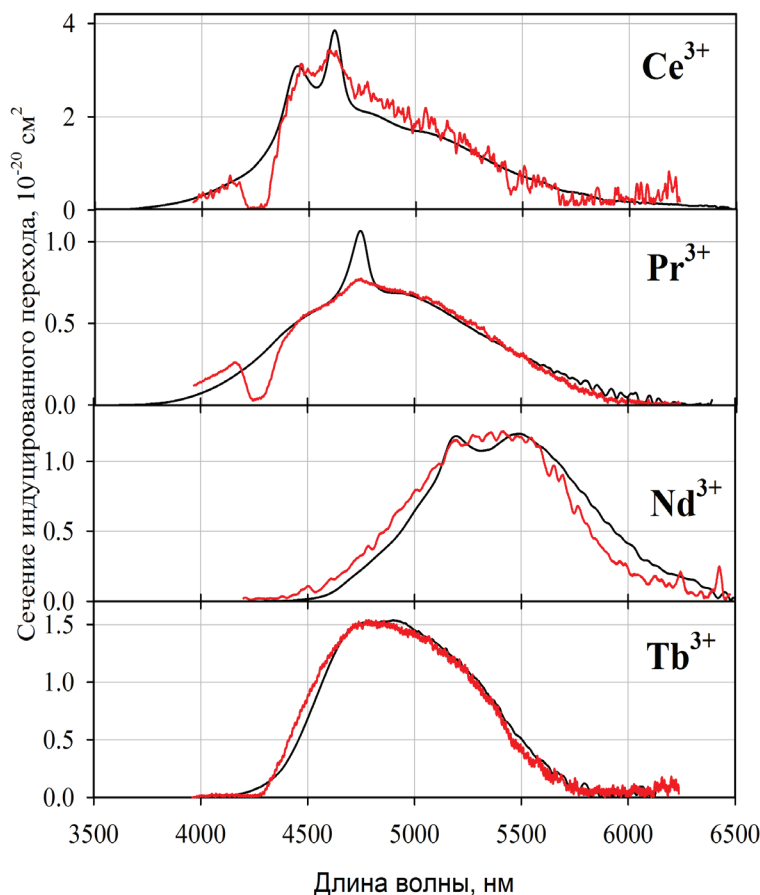


Рис. 4. Сечения вынужденного испускания РЗИ в Ga<sub>5</sub>Ge<sub>20</sub>Sb<sub>10</sub>Se<sub>65</sub> стекле. Черные кривые – расчет из спектров поглощения. Красные кривые – эксперимент.

Таблица 1. Времена жизни первого возбужденного состояния РЗИ

Ион	Радиационное время (расчет), мс	Люминесцентное время (эксперимент), мс
Ce <sup>3+</sup>	4.72	3.7
Pr <sup>3+</sup>	11.1	8.5
Nd <sup>3+</sup>	20.2	10.0
Tb <sup>3+</sup>	8.51	7.5

тому до наших работ никто не регистрировал долгоживущую ИК-люминесценцию церия. Для изучения люминесцентных свойств церия мы использовали эффект сенсбилизации его люминесценции ионами  $Dy^{3+}$  при оптическом возбуждении на длинах волн 1.3 мкм, 1.7 мкм или 3 мкм [25].

Ионы  $Pr^{3+}$  и  $Nd^{3+}$ , как видно из рис. 3, в отличие от ионов церия, обладают несколькими полосами поглощения в 1.5–3 мкм спектральной области. Каждая из этих полос, в принципе, может быть использована для оптической накачки интересующего нас верхнего лазерного уровня. Однако, как показано на схеме рис. 2, зазоры на энергетической шкале между накачиваемыми уровнями и верхним лазерным уровнем сопоставимы с энергетическим зазором, соответствующим самому предполагаемому лазерному переходу. Это означает, что накачиваемые уровни также должны быть излучательными и долгоживущими, а энергия их оптического возбуждения будет в значительной мере излучаться в виде люминесценции, не достигая первого возбужденного уровня.

Проблема эффективного заселения верхнего лазерного уровня ионов  $Pr^{3+}$  была решена нами в работе [26] за счет использования процессов кросс-релаксации возбуждений, скорость которых быстро возрастает с повышением концентрации празеодима. При высоких (порядка  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>) концентрациях празеодима один поглощенный квант накачки, соответствующий длине волны ~1.54 мкм, может породить до трех возбужденных на верхнем лазерном уровне  $^3H_5$  ионов  $Pr^{3+}$ . Эффективность предложенного способа накачки празеодима при его повышенных концентрациях была подтверждена в работе американских коллег на примере кристалла  $KPr_2Cl_5$  [27]. Аналогичные процессы должны протекать и в случае неодима.

Ионы  $Tb^{3+}$  также обладают достаточно богатым спектром поглощения в ближнем ИК. Но, в отличие от  $Pr^{3+}$  и  $Nd^{3+}$ , энергетические зазоры между соответствующими уровнями невелики, вследствие чего возбуждение достаточно быстро (в течение нескольких десятков микросекунд) достигает верхнего лазерного уровня  $^7F_5$  и для этого не требуются повышенные концентрации активатора. В этом смысле ионы тербия наиболее удобны для получения 5–6 мкм лазерной генерации.

Сравнение спектров люминесценции исследуемых ионов (рис. 4) показывает, что полосы люминесценции  $Se^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$  и  $Tb^{3+}$  практически полностью перекрываются между собой и имеют максимумы вблизи 4.7 мкм. При этом сечение люминесценции церия в несколько раз превышает таковое для остальных двух ионов. Спектр люминесценции  $Nd^{3+}$  несколько сдвинут в длинноволновую область и простирается чуть далее 6 мкм, что позволяет надеяться на получение наиболее длинноволновой лазерной генерации. Сопоставление экспериментальных и расчетных времен жизни (та-

блица 1) показывает, что квантовый выход люминесценции в исследованном селенидном стекле для  $Se^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$  и  $Tb^{3+}$  составляет около 80%, а для более длинноволнового перехода  $Nd^{3+}$  – около 50%.

### Лазерные эксперименты на объемных образцах [19–20, 28, 29]

Первые эксперименты по получению лазерной генерации проводились на объемных образцах стекол в виде стержней  $\varnothing 12 \times (20–30)$  мм с плоскопараллельными торцами, отполированными с параллельностью не хуже  $15'$ . Образцы помещались в резонатор, образованный высокоотражающими в области 4.5–6-микрометровыми диэлектрическими зеркалами. Накачка осуществлялась продольно импульсными лазерами, как показано на схеме рис. 5. Для накачки ионов  $Pr^{3+}$  использовался 1.54-микрометровый лазер на  $Cr-Yb-Er$  фосфатном стекле, для ионов  $Tb^{3+}$  – 2.93-микрометровый лазер на АИГ:Er, для ионов  $Se^{3+}$  – 4.08-микрометровый лазер на  $ZnSe:Fe^{2+}$ , для ионов  $Nd^{3+}$  – 2.70-микрометровый лазер на ИСГГ:Cr, Er,  $Pr^{3+}$ . Генерация была получена на ионах  $Pr^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  и  $Se^{3+}$ . В случае ионов  $Pr^{3+}$  генерация возбуждалась только на длинноволновом краю полосы люминесценции в спектральном интервале 5.5–5.9 мкм. Это, по-видимому, объясняется наличием поглощения из возбужденного состояния с верхнего лазерного уровня  $^3H_5$  на уровень  $^3H_6$  в области длин волн короче 5.5 мкм (рис. 2). В случае ионов  $Tb^{3+}$  и  $Se^{3+}$  генерация возбуждалась на длинах волн 4.9–5.5 мкм. Принудительная перестройка длины волны излучения с помощью внутррезонаторной призмы позволила расширить этот интервал до 4.5–5.6 мкм.

Таким образом, впервые была продемонстрирована лазерная генерация в халькогенидных стеклах в среднем ИК-диапазоне и при этом задействованы 3 новых, ранее ни в каких средах не генерировавших, лазерных перехода РЗИ. Наиболее вероятная

причина, по которой лазерной генерации на ионах неодима на настоящее время достичь не удалось, – плохое перекрытие спектра лазера накачки с полосой поглощения неодима из-за отсутствия более подходящих источников накачки.

Дальнейшее совершенствование условий экспериментов позволило создать на объемном элементе из активированного ионами  $\text{Ce}^{3+}$  халькогенидного стекла импульсный лазер с практически значимой выходной энергией  $\sim 45$  мДж на длине волны 5.25 мкм при дифференциальном КПД  $\eta=25\%$  по поглощенной энергии (рис. 6). При этом для накачки использовался 4.6 мкм  $\text{ZnSe:Fe}^{2+}$  лазер, работавший при температуре 9°C, подерживаемой элементом Пельтье.

### Лазеры на легированных тербием халькогенидных волоконных световодах [30, 31]

Перечисленные в предыдущем параграфе эксперименты показали, что генерация в средневолновом диапазоне на легированных РЗИ халькогенидных стеклах вполне достижима, и при этом, в отличие от легированных ионами железа халькогенидных кристаллов, им не требуется охлаждение ниже комнатной температуры. Другим важным преимуществом стекол перед кристаллами является возможность вытяжки из них волоконных световодов. Волоконная конфигурация позволяет осуществлять как импульсный, так и непрерывный режимы накачки, а также достигать высоких коэффициентов усиления за счет длины световода. Наиболее подходящим для использования в волоконных лазерах является ион тербия.  $\text{Tb}^{3+}$  имеет несколько удобных для оптической накачки полос поглощения в ближнем ИК-диапазоне. Кроме того, как упоминалось выше, особенности структуры энергетических уровней ионов  $\text{Tb}^{3+}$  позволяют свободно варьировать его концентрацию.

Активированный тербием световод изготавливался методом двойного тигля. В качестве материала оболочки было использовано не содержащее тербия стекло состава  $\text{Ge}_{18}\text{As}_{22}\text{S}_{60}$  с тепло-

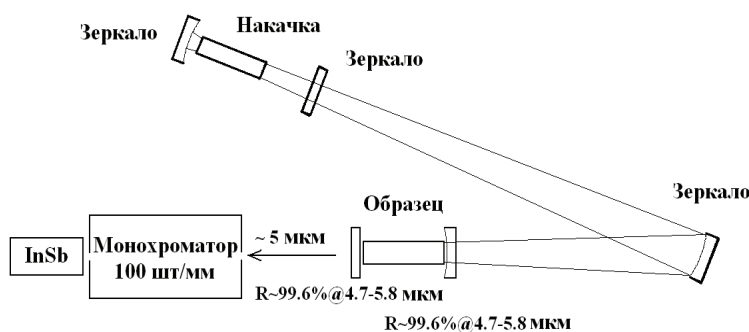


Рис. 5. Схема экспериментов по получению лазерной генерации в объемных образцах халькогенидных стекол.

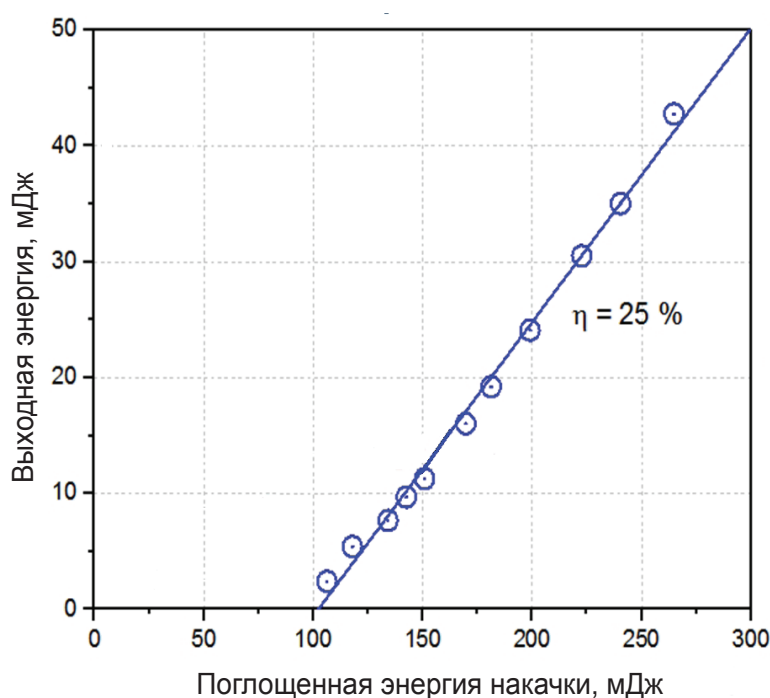


Рис. 6. Энергетическая характеристика импульсного лазера на легированном ионами церия селенидном стекле.

физическими свойствами, близкими к материалу сердцевин (Ga<sub>5</sub>Ge<sub>20</sub>Sb<sub>10</sub>Se<sub>65</sub>). При этом показатель преломления стекла оболочки (2.3) оказался существенно ниже показателя преломления стекла сердцевин (2.55). Диаметр легированной  $2 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup> тербия сердцевин составлял 19 мкм, диаметр нелегированной оболочки – 270 мкм. Оболочка дополнительно защищалась фторопластовым покрытием. При такой геометрии световод был существенно многомодовым. Его числовая апертура NA была близка к единице, что легко позволяло концентрировать в сердцевине излучение как накачки, так и генерации. Световод был механически достаточно прочным и допускал изгиб с радиусом до 10 см без изменения световодящих свойств и лазерных характеристик.

На рис. 7 представлены фото скола торца этого световода. Оптические потери в нем составили около

1.7 дБ/м на длине волны 1.56 мкм вне полос поглощения тербия, что является неплохим показателем для легированных РЗИ волоконных световодов.

На таком световоде длиной 48.5 см был создан лазер, работающий с выходной мощностью до 100 мВт и динамическим КПД 3.7 % при накачке непрерывным 1.908 мкм тулиевым волоконным лазером. Схема лазерного эксперимента представлена на рис. 8.

Длина волны излучения лазера лежала в пределах спектрального интервала 5.1–5.4 мкм и несколько изменялась в зависимости от длины световода, коэффициента отражения выходного зеркала и мощности накачки. Достигнутые выходные характеристики этого лазера представлены на рис. 9.

Следует отметить некоторые особенности работы такого лазера. Первая – несмотря на непрерывную накачку, излучение лазера представляло собой цуг упорядоченных незатухающих пиков длительностью порядка 0.5 мкс (рис. 10) с периодом следования, зависящим от мощности накачки.

Вторая особенность – хотя волоконный световод был существенно многомодовым, выходящее излучение лазера имело близкое к гауссову распределение интенсивности по сечению. При этом его расходимость соответствовала дифракционной (рис. 11а, б).

Третья особенность состояла в том, что выходная мощность лазера (около 100 мВт средней мощности)

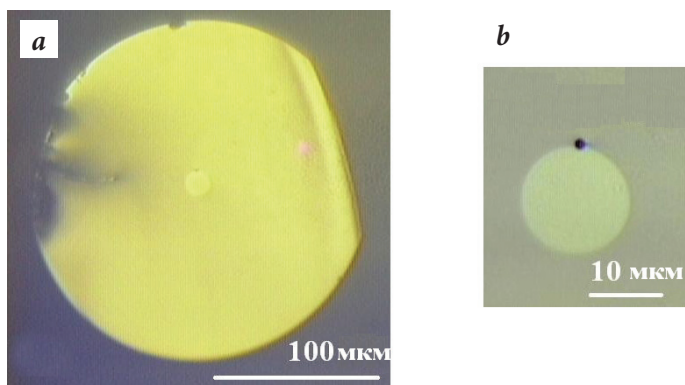


Рис. 7. Фото скола торца (а) и сердцевин (б) легированного тербием световода.

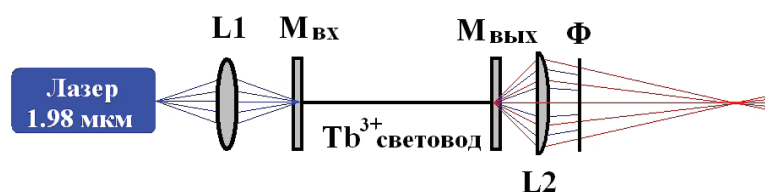


Рис. 8. Схема лазерного эксперимента с легированным тербием волоконным световодом: L1 – объектив с исправленной сферической аберрацией, фокусирует накачку в сердцевину световода; M<sub>вх</sub>, M<sub>вых</sub> – 100% и полупрозрачное зеркала, вплотную придвинутые к торцам волокна; L2 – коллимирующая линза; Ф – светофильтр, отсекающий накачку.

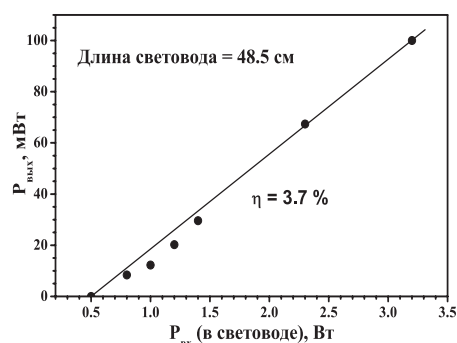


Рис. 9. Зависимость выходной мощности тербиевого волоконного лазера от вводимой в него непрерывной мощности накачки. Выходным зеркалом служил сколотый торец световода.

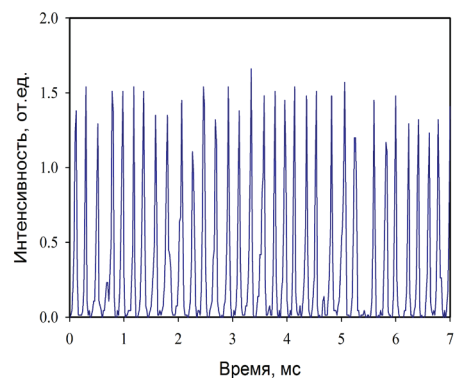


Рис. 10. Осциллограмма генерации лазера при непрерывной накачке.

ограничивалась разрушением световода генерируемым излучением и в необычном характере разрушений. В большинстве случаев его сердцевина была оптически пробита вдоль всего генерирующего отрезка. Такие внезапные повреждения очень похожи на последствия самофокусировки. Здесь следует отметить, что порог самофокусировки в сильно нелинейном халькогенидном стекле может быть на 2–3 порядка ниже, чем, скажем, в кварцевом стекле, а вызывающая разрушения пиковая мощность генерации на порядок превышает среднюю (рис. 10).

Причины указанных особенностей требуют дальнейших исследований, но, скорее всего, все они связаны с сильными нелинейными свойствами халькогенидных стекол. Что касается импульсного характера генерации, предварительные данные показывают, что его вполне можно избежать

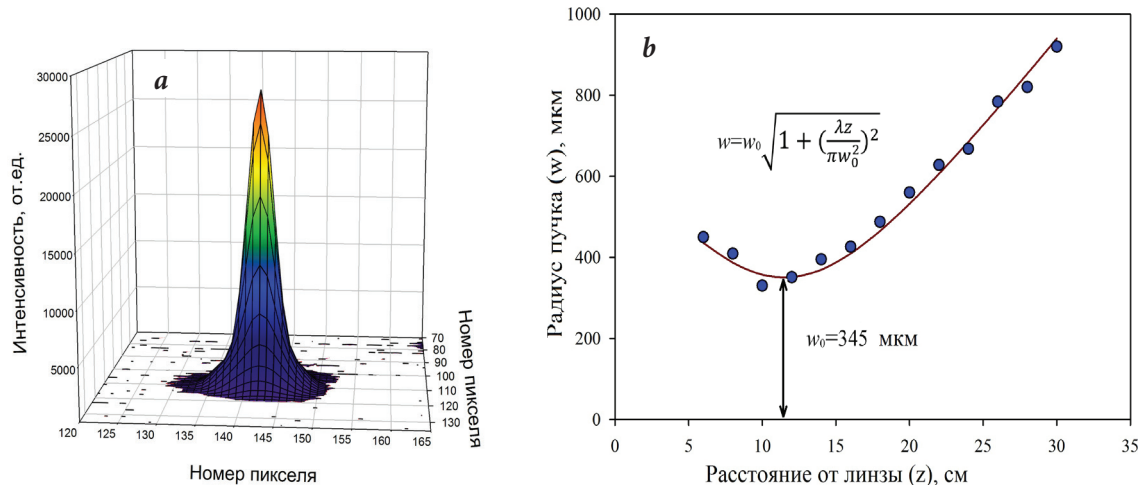


Рис. 11. Форма поперечного сечения пучка (а) и его радиус (b) вблизи перетяжки, образуемой линзой L2.

за счет снижения концентрации активатора и/или за счет обеспечения отрицательной обратной связи в резонаторе лазера. Эти меры, а также сокращение оптических потерь в световодах должны позволить поднять мощность генерации как минимум в несколько раз.

**Заключение**

При выполнении проекта получены следующие **основные результаты**:

1. По специально разработанным методикам были синтезированы образцы легированных РЗИ стекол на основе селенидов германия и галлия с рекордным уровнем химической чистоты и с высоким оптическим качеством.
2. В синтезированных образцах исследованы спектрально-люминесцентные свойства ряда РЗИ (Pr<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup>, Ce<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>), обладающих перспективными для получения лазерной генерации оптическими переходами в 5–6 мкм спектральной области. При этом полоса долгоживущей ИК-люминесценции Ce<sup>3+</sup> с максимумом вблизи 4.5 мкм была зарегистрирована впервые.
3. С учетом особенностей каждого иона предложены способы их оптической накачки, включая сенсibilизационные и кросс-релаксационные схемы заселения верхнего лазерного уровня.

4. Впервые продемонстрирована лазерная генерация в среднем ИК-диапазоне спектра в легированных РЗИ (Pr<sup>3+</sup>, Tb<sup>3+</sup> и Ce<sup>3+</sup>) халькогенидных стеклах.

5. На объемном образце легированного церием стекла создан лазер, работающий на длине волны 5.25 мкм, с выходной энергией ~45 мДж в импульсе при дифференциальном КПД по поглощенной энергии 25%. Также осуществлена перестройка цериевого лазера в полосе 4.5–5.6 мкм.

6. Изготовлен волоконный световод с сердцевинкой из легированного ионами Tb<sup>3+</sup> стекла Ga<sub>5</sub>Ge<sub>20</sub>Sb<sub>10</sub>Se<sub>65</sub> и оболочкой из стекла Ge<sub>18</sub>As<sub>22</sub>S<sub>60</sub>. Световод имел достаточную механическую прочность, допускающую изгиб с радиусом вплоть до 10 см без изменения световедущих свойств и выходных лазерных характеристик.

7. Впервые получена лазерная генерация в волоконном световоде в спектральной области 5–6 мкм. На световоде длиной 48.5 см создан лазер, работающий с выходной мощностью до 100 мВт и динамическим КПД 3.7% при накачке непрерывным тулиевым волоконным лазером на длине волны 1.908 мкм. Выходная мощность лазера ограничивалась разрушением световода генерируемым излучением.

Обращают на себя внимание следующие особенности работы этого лазера:

- несмотря на непрерывную накачку, излучение лазера представляло собой цуг упорядоченных незатухающих пачек длительностью порядка 0.5 мкс с периодом следования, зависящим от мощности накачки;
- несмотря на существенно многомодовую структуру световода, пучок выходного излучения лазера имел близкое к гауссову распределение интенсивности по сечению, а его расходимость соответствовала дифракционной.

Все перечисленные генерационные эксперименты проводились при комнатной температуре, а достигну-



тые выходные характеристики лазеров уже позволяют предложить их для практических применений.

Результаты, полученные в ходе выполнения данного проекта, были отмечены в отчетных докладах ака-

демиков-секретарей Отделения химии и наук о материалах за 2020 год и Отделения физических наук за 2021 год.

## Литература

1. S.D. Jackson  
*Nat. Photonics*, 2012, **6**, 423. DOI: 10.1038/nphoton.2012.149.
2. B.M. Walsh, H.R. Lee, N.P. Barnes  
*J. Lumin.*, 2016, **169**, 400. DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.03.004.
3. M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, S.O. Leonov, P. Fjodorow, Ya.K. Skasyrsky  
*Opt. Lett.*, 2020, **45**(4), 6647. DOI: 10.1364/OL.411559.
4. M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, S.O. Leonov, Ya.K. Skasyrsky  
*Opt. Express*, 2020, **28**(12), 17449. DOI: 10.1364/OE.394889.
5. M.P. Frolov, V.M. Gordienko, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, Yu.P. Podmar'kov, F.V. Potemkin, Ya.K. Skasyrsky  
*Laser Phys. Lett.*, 2017, **14**, 025001. DOI: 10.1088/1612-202X/aa5130.
6. M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, V.V. Mislavsky, Yu.P. Podmar'kov, Ya.K. Skasyrsky, A.A. Voronov  
*J. Russ. Laser Res.*, 2011, **32**, 528. DOI: 10.1007/s10946-011-9243-x.
7. J. Evans, B. Dolasinski, T. Harris, J. Cleary, P. Berry  
*Opt. Express*, 2017, **7**(3), 860. DOI: 10.1364/OME.7.000860.
8. H. Jelínková, M.E. Doroshenko, M. Jelínek, J. Šulc, D. Vyhliďal, A. Říha, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko  
*Solid State Lasers XXVIII: Technology and Devices*, 2019, **10896**, 108961V. DOI: 10.1117/12.2509387.
9. F. Starecki, A. Braud, N. Abdellaoui, V. Nazabal, J.-L. Doualan, C. Boussard-Plédel, P. Camy  
*B Proc. Laser Congress 2018 (ASSL) (USA, MA, Boston, 4–8 September, 2018)*, USA, MA, Boston, Optica Publishing Group, 2018, ATu2A.6. DOI: 10.1364/ASSL.2018.ATu2A.6.
10. F. Starecki, A. Braud, N. Abdellaoui, J.-L. Doualan, C. Boussard-Plédel, B. Bureau, P. Camy, V. Nazabal  
*Opt. Express*, 2018, **26**(20), 26462. DOI: 10.1364/OE.26.026462.
11. N. Abdellaoui, F. Starecki, C. Boussard-Plédel, Y. Shpotyuk, J.-L. Doualan, A. Braud, E. Baudet, P. Nemeč, F. Chevire, M. Dussauze, B. Bureau, P. Camy, V. Nazabal  
*Opt. Mater. Express*, 2018, **8**(9), 2887. DOI: 10.1364/OME.8.002887.
12. B.N. Samson, T. Schweizer, R.C. Moore, D.W. Hewak, D.N. Payne  
*B Technical Digest CLEO/Pacific Rim '97 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Japan, Chiba, 14–18 July, 1997)*, Japan, Chiba, IEEE Publ., 1997, pp. 51–52. DOI: 10.1109/CLEOPR.1997.610399.
13. T. Schweizer, B. Samson, R. Moore, D. Hewak, D. Payne  
*Electron Lett.*, 1997, **33**(5), 414. DOI: 10.1049/el:19970270.
14. A. Seddon, Z. Tang, D. Furniss, S. Sujecki, T. Benson  
*Opt. Express*, 2010, **18**(25), 26704. DOI: 10.1364/OE.18.026704.
15. B. Walsh, H. Lee, N. Barnes  
*J. Lumin.*, 2016, **169**, 400. DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.03.004.
16. S. Jackson, R. Jain  
*Opt. Express*, 2020, **28**(21), 30964. DOI: 10.1364/OE.400003.
17. J. Heo, W.J. Chung  
*B Chalcogenide Glasses: Preparation, Properties and Applications*, Eds J.-L. Adam, X. Zhang, USA, PA, Philadelphia, Woodhead Publishing, 2014, 347–380. DOI: 10.1533/9780857093561.2.347.
18. Ľ. Sójka, Z. Tang, H. Zhu, E. Bereš-Pawlik, D. Furniss, A. Seddon, T. Benson, S. Sujecki  
*Opt. Mater. Express*, 2012, **2**(11), 1632. DOI: 10.1364/OME.2.001632.
19. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, S. Sverchkov, M. Sukhanov, A. Velmuzhov  
*Appl. Phys. B*, 2020, **126**, 117. DOI: 10.1007/s00340-020-07473-w.
20. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, G. Snopatin, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*J. Non-Cryst. Solids*, 2021, **559**, 120592. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120592.
21. B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, M. Frolov, Yu. Korostelin, V. Kozlovsky, S. Leonov, P. Fjodorow, Ya. Skasyrsky  
*Opt. Lett.*, 2021, **46**(16), 4002. DOI: 10.1364/OL.431938.
22. A. Velmuzhov, M. Sukhanov, V. Plotnichenko, A. Plekhovich, V. Shiryaev, M. Churbanov  
*J. Non-Cryst. Solids*, 2019, **525**, 119669. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119669.
23. L. Calvez  
*Comptes Rendes Physique*, 2017, **18**(5-6), 314. DOI: 10.1016/j.crhy.2017.05.003.
24. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*J. Lumin.*, 2022, **245**, 118756. DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.118756.
25. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*J. Lumin.*, 2021, **231**, 117809. DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117809.
26. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*Opt. Mater. Express*, 2019, **9**(11), 4154. DOI: 10.1364/OME.9.004154.
27. L. Merkle, Z. Fleischman, E. Brown, J. Allen, U. Hommerich, M. Dubinskii  
*Opt. Express*, 2021, **29**(24), 39001. DOI: 10.1364/OE.441516.
28. P. Fjodorov, M. Frolov, S. Leonov, B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, A. Velmuzhov  
*Opt. Express*, 2021, **29**, 27674. DOI: 10.1364/OE.433828.
29. M. Frolov, S. Leonov, Yu. Korostelin, V. Kozlovsky, Ya. Srsysrsky, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, P. Fjodorow, B. Galagan, B. Denker, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko  
*Opt. Mater. Express*, 2022, **12**(12), 4619. DOI: 10.1364/OME.472550.
30. V. Shiryaev, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, E. Karaksina, T. Kotereva, G. Snopatin, B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko  
*J. Non-Cryst. Solids*, 2021, **567**, 120939. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120939.
31. B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, G. Snopatin, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*Opt. Laser Technol.*, 2022, **154**, 108355. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108355.

English

## Expansion of Fiber Laser Wavelengths over 5 Microns\*

**Alexander P. Velmuzhov**G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of  
High-Purity Substances, RAS  
49 Tropinin Str.,  
Nizhny Novgorod, 603951, Russia  
velmuzhov@ihps-nnov.ru**Boris I. Galagan**Prokhorov General Physics Institute, RAS  
38 Vavilov Str.,  
Moscow, 119991, Russia  
galagan@ran.gpi.ru**Boris I. Denker**Professor,  
Prokhorov General Physics Institute, RAS  
38 Vavilova Str.,  
Moscow, 119333, Russia  
denker@lst.gpi.ru**Vasily V. Koltashev**Prokhorov General Physics Institute, RAS,  
Dianov Fiber Optics Research Center, RAS  
38 Vavilova Str.,  
Moscow, 119333, Russia  
kvv@fo.gpi.ru**Sergei E. Sverchkov**Prokhorov General Physics Institute, RAS  
38 Vavilova Str.,  
Moscow, 119333, Russia  
glasser@lst.gpi.ru**Gennady E. Snopatin**G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of  
High-Purity Substances, RAS  
49 Tropinin Str.,  
Nizhny Novgorod, 603951, Russia  
snopatin@ihps-nnov.ru**Maksim V. Sukhanov**G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of  
High-Purity Substances, RAS  
49 Tropinin Str.,  
Nizhny Novgorod, 603951, Russia  
sukhanov@ihps-nnov.ru**Victor G. Plotnichenko**Professor,  
Prokhorov General Physics Institute, RAS  
38 Vavilova Str.,  
Moscow, 119333, Russia  
v.plotnichenko@gmail.com

## Abstract

*In memory of academician E.M. Dianov*

In this review we present the results of the interdisciplinary RFBR project N18-29-20079. The project was aimed on the creation of room-temperature bulk and fiber chalcogenide glass lasers operating at wavelengths exceeding 4  $\mu\text{m}$ . Before this investigation this wavelength range was inaccessible for glass lasers. Record purity  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Nd}^{3+}$  doped chalcogenide glass samples were synthesized. The analysis of their luminescent properties has made it possible to choose the promising laser transitions and the ways of their optical pumping.

Lasering has been demonstrated on a number of 4.5–6  $\mu\text{m}$  optical transitions of  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$  ions. Previously all these transitions were never used in lasers. In a bulk sample of cerium-doped selenide glass, an output energy of up to 43 mJ per pulse and tuning in the 4.5–5.6  $\mu\text{m}$  spectral range were obtained. In a continuously pumped composite optical fiber with terbium-doped selenide core in an undoped sulfide cladding 100 mW output power at ~ 5.25  $\mu\text{m}$  was obtained.

**Keywords:** chalcogenide glass, mid infrared range, rare earth ions, fiber laser.

\*The work was financially supported by RFBR (project 18-29-20079).

## Images &amp; Tables

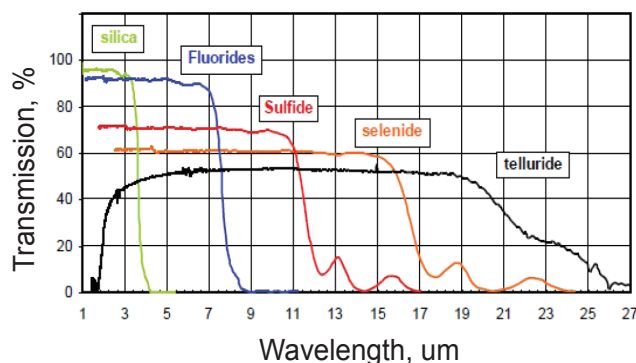


Fig. 1. Transmission windows of glasses with different anions.

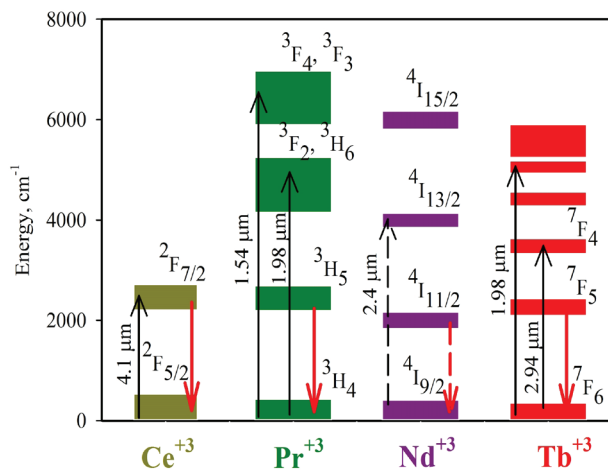


Fig. 2. Energy levels of some rare earth ions in selenide glasses. Possible optical pump wavelengths are marked with black arrows and the laser transitions – by red ones.

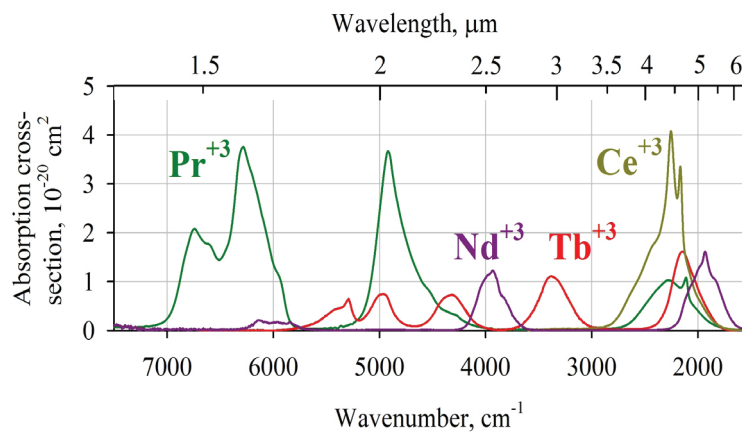


Fig. 3. Absorption spectra of rare earth ions in  $Ga_3Ge_{20}Sb_{10}Se_{65}$  glass.

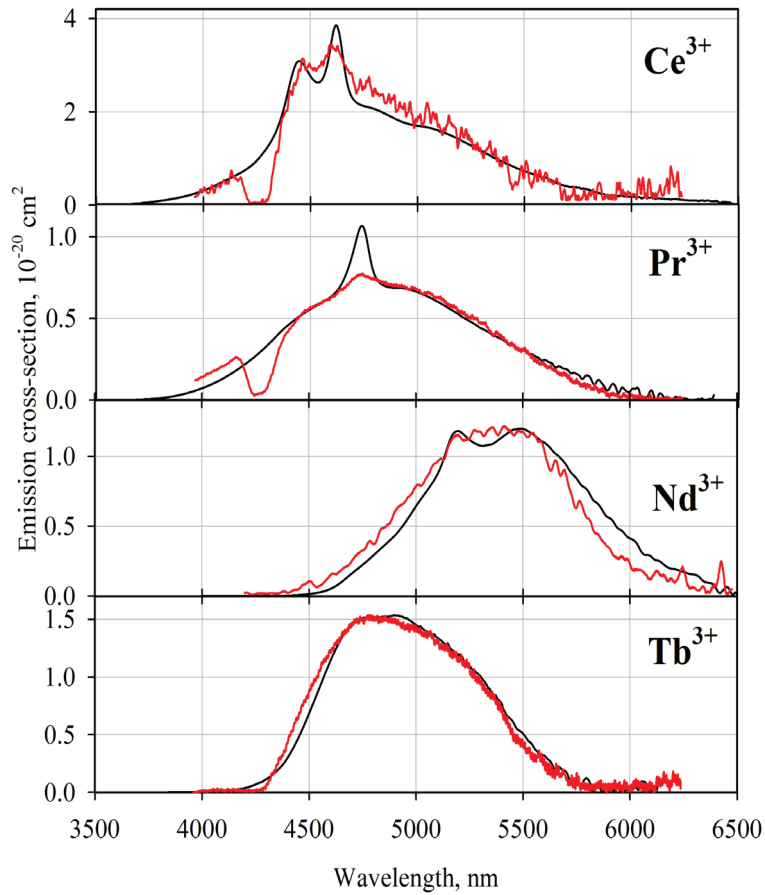


Fig. 4. Emission cross-sections of rare earth ions in  $Ga_5Ge_{20}Sb_{10}Se_{65}$  glass. Black curves are calculated from the absorption spectra. Red curves – experimental data.

Table 1. Lifetimes of the first excited state of rare earth ions

Ion	Calculated radiative lifetime, ms	Experimental luminescent lifetime, ms
Ce <sup>3+</sup>	4.72	3.7
Pr <sup>3+</sup>	11.1	8.5
Nd <sup>3+</sup>	20.2	10.0
Tb <sup>3+</sup>	8.51	7.5

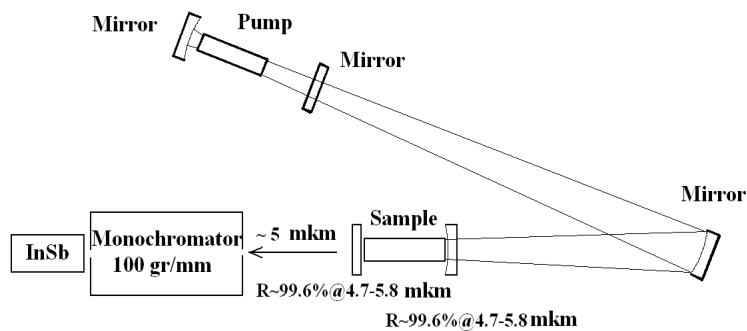


Fig. 5. Experimental arrangement for laser action in bulk chalcogenide glass samples.

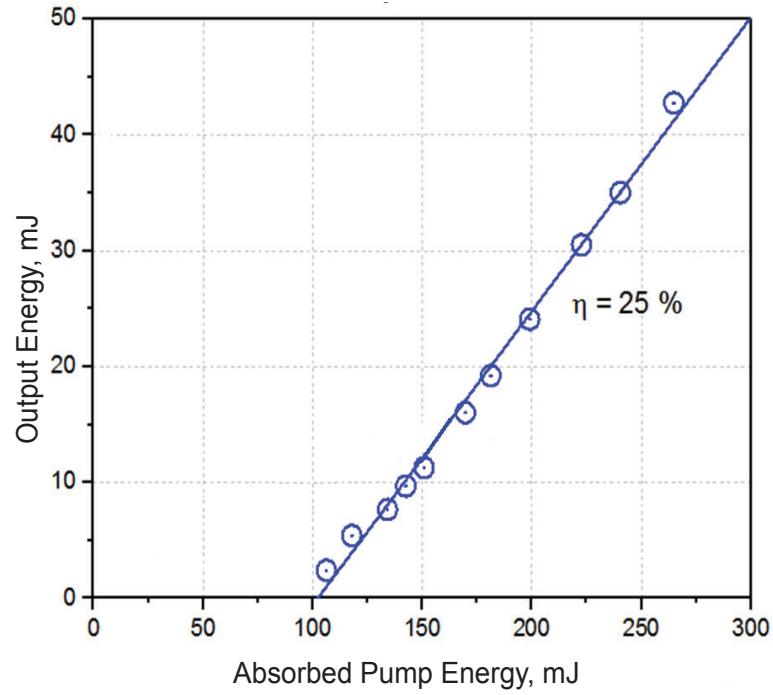


Fig. 6. Energy parameters of a pulsed Ce-doped chalcogenide glass laser.

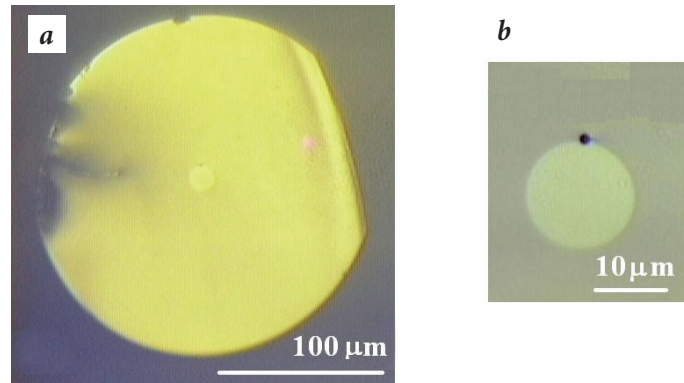


Fig. 7. Transmission spectrum of a Tb-doped optical fiber (a) and a photo of its cleaved end (b).

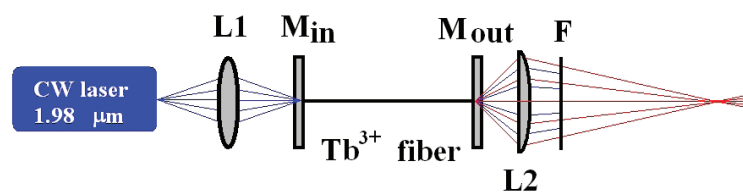


Fig. 8. Arrangement of the laser experiment with a Tb-doped optical fiber. L1 is a lens with corrected spherical aberration. M<sub>in</sub> and M<sub>out</sub> are the highly reflective and semitransparent mirrors immediately adjacent to the fiber ends. L2 is the collimating lens and F is the cut-off filter.

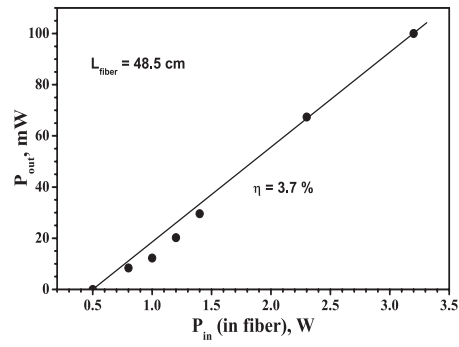


Fig. 9. Output power of the Tb-doped fiber laser versus CW pumping power inserted into it. Outcoupling is due to Fresnel reflection from the cleaved fiber end.

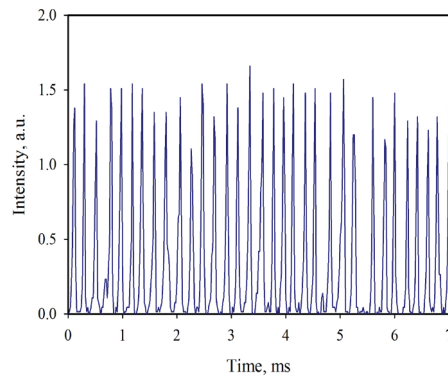


Fig. 10. Lasing oscillogram at continuous pumping.

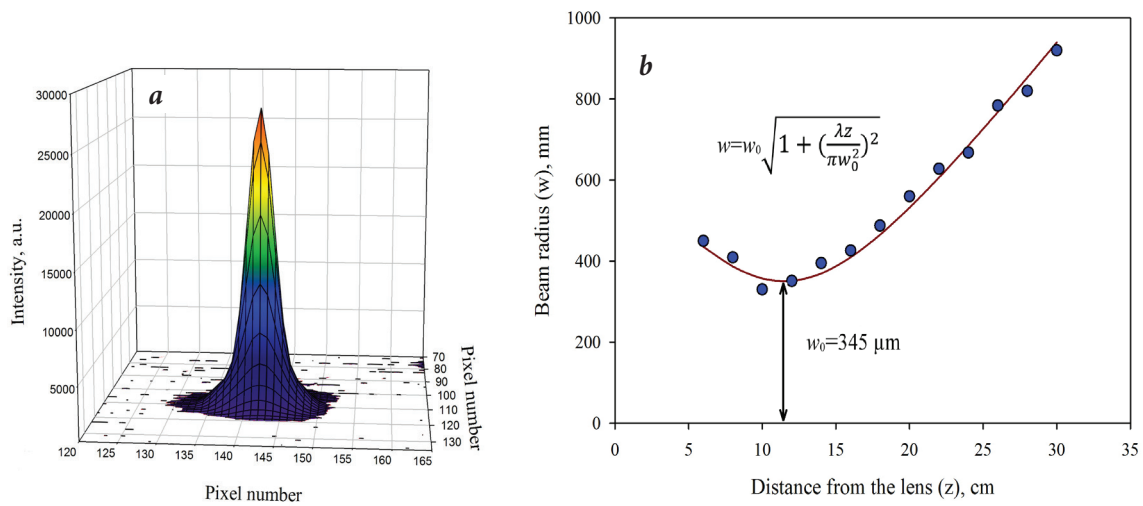


Fig. 11. Laser beam cross-section and its radius near the waist formed by L2 lens.

## References

1. S.D. Jackson  
*Nat. Photonics*, 2012, **6**, 423. DOI: 10.1038/nphoton.2012.149.
2. B.M. Walsh, H.R. Lee, N.P. Barnes  
*J. Lumin.*, 2016, **169**, 400. DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.03.004.
3. M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, S.O. Leonov, P. Fjodorow, Ya.K. Skasyrsky  
*Opt. Lett.*, 2020, **45**(4), 6647. DOI: 10.1364/OL.411559.
4. M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, S.O. Leonov, Ya.K. Skasyrsky  
*Opt. Express*, 2020, **28**(12), 17449. DOI: 10.1364/OE.394889.
5. M.P. Frolov, V.M. Gordienko, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, Yu.P. Podmar'kov, F.V. Potemkin, Ya.K. Skasyrsky  
*Laser Phys. Lett.*, 2017, **14**, 025001. DOI: 10.1088/1612-202X/aa5130.
6. M.P. Frolov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, V.V. Mislavsky, Yu.P. Podmar'kov, Ya.K. Skasyrsky, A.A. Voronov  
*J. Russ. Laser Res.*, 2011, **32**, 528. DOI: 10.1007/s10946-011-9243-x.
7. J. Evans, B. Dolasinski, T. Harris, J. Cleary, P. Berry  
*Opt. Express*, 2017, **7**(3), 860. DOI: 10.1364/OME.7.000860.
8. H. Jelínková, M.E. Doroshenko, M. Jelínek, J. Šulc, D. Vyhliďal, A. Říha, N.O. Kovalenko, A.S. Gerasimenko  
*Solid State Lasers XXVIII: Technology and Devices*, 2019, **10896**, 108961V. DOI: 10.1117/12.2509387.
9. F. Starecki, A. Braud, N. Abdellaoui, V. Nazabal, J.-L. Doualan, C. Boussard-Plédel, P. Camy  
In *Proc. Laser Congress 2018 (ASSL) (USA, MA, Boston, 4–8 September, 2018)*, USA, MA, Boston, Optica Publishing Group, 2018, ATu2A.6. DOI: 10.1364/ASSL.2018.ATu2A.6.
10. F. Starecki, A. Braud, N. Abdellaoui, J.-L. Doualan, C. Boussard-Plédel, B. Bureau, P. Camy, V. Nazabal  
*Opt. Express*, 2018, **26**(20), 26462. DOI: 10.1364/OE.26.026462.
11. N. Abdellaoui, F. Starecki, C. Boussard-Plédel, Y. Shpotyuk, J.-L. Doualan, A. Braud, E. Baudet, P. Nemeč, F. Chevire, M. Dussauze, B. Bureau, P. Camy, V. Nazabal  
*Opt. Mater. Express*, 2018, **8**(9), 2887. DOI: 10.1364/OME.8.002887.
12. B.N. Samson, T. Schweizer, R.C. Moore, D.W. Hewak, D.N. Payne  
In *Technical Digest CLEO/Pacific Rim '97 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (Japan, Chiba, 14–18 July, 1997)*, Japan, Chiba, IEEE Publ., 1997, pp. 51–52. DOI: 10.1109/CLEOPR.1997.610399.
13. T. Schweizer, B. Samson, R. Moore, D. Hewak, D. Payne  
*Electron Lett.*, 1997, **33**(5), 414. DOI: 10.1049/el:19970270.
14. A. Seddon, Z. Tang, D. Furniss, S. Sujecki, T. Benson  
*Opt. Express*, 2010, **18**(25), 26704. DOI: 10.1364/OE.18.026704.
15. B. Walsh, H. Lee, N. Barnes  
*J. Lumin.*, 2016, **169**, 400. DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.03.004.
16. S. Jackson, R. Jain  
*Opt. Express*, 2020, **28**(21), 30964. DOI: 10.1364/OE.400003.
17. J. Heo, W.J. Chung  
In *Chalcogenide Glasses: Preparation, Properties and Applications*, Eds J.-L. Adam, X. Zhang, USA, PA, Philadelphia, Woodhead Publishing, 2014, 347–380. DOI: 10.1533/9780857093561.2.347.
18. Ł. Sójka, Z. Tang, H. Zhu, E. Bereś-Pawlik, D. Furniss, A. Seddon, T. Benson, S. Sujecki  
*Opt. Mater. Express*, 2012, **2**(11), 1632. DOI: 10.1364/OME.2.001632.
19. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, S. Sverchkov, M. Sukhanov, A. Velmuzhov  
*Appl. Phys. B*, 2020, **126**, 117. DOI: 10.1007/s00340-020-07473-w.
20. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, G. Snopatin, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*J. Non-Cryst. Solids*, 2021, **559**, 120592. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120592.
21. B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, M. Frolov, Yu. Korostelin, V. Kozlovsky, S. Leonov, P. Fjodorow, Ya. Skasyrsky  
*Opt. Lett.*, 2021, **46**(16), 4002. DOI: 10.1364/OL.431938.
22. A. Velmuzhov, M. Sukhanov, V. Plotnichenko, A. Plekhovich, V. Shiryaev, M. Churbanov  
*J. Non-Cryst. Solids*, 2019, **525**, 119669. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.119669.
23. L. Calvez  
*Comptes Rendes Physique*, 2017, **18**(5–6), 314. DOI: 10.1016/j.crhy.2017.05.003.
24. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*J. Lumin.*, 2022, **245**, 118756. DOI: 10.1016/j.jlumin.2022.118756.
25. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*J. Lumin.*, 2021, **231**, 117809. DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117809.
26. M. Churbanov, B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*Opt. Mater. Express*, 2019, **9**(11), 4154. DOI: 10.1364/OME.9.004154.
27. L. Merkle, Z. Fleischman, E. Brown, J. Allen, U. Hommerich, M. Dubinskii  
*Opt. Express*, 2021, **29**(24), 39001. DOI: 10.1364/OE.441516.
28. P. Fjodorov, M. Frolov, S. Leonov, B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko, M. Sukhanov, A. Velmuzhov  
*Opt. Express*, 2021, **29**, 27674. DOI: 10.1364/OE.433828.
29. M. Frolov, S. Leonov, Yu. Korostelin, V. Kozlovsky, Ya. Srsysrsky, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, P. Fjodorow, B. Galagan, B. Denker, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko  
*Opt. Mater. Express*, 2022, **12**(12), 4619. DOI: 10.1364/OME.472550.
30. V. Shiryaev, M. Sukhanov, A. Velmuzhov, E. Karaksina, T. Kotereva, G. Snopatin, B. Denker, B. Galagan, S. Sverchkov, V. Koltashev, V. Plotnichenko  
*J. Non-Cryst. Solids*, 2021, **567**, 120939. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120939.
31. B. Denker, B. Galagan, V. Koltashev, V. Plotnichenko, G. Snopatin, M. Sukhanov, S. Sverchkov, A. Velmuzhov  
*Opt. Laser Technol.*, 2022, **154**, 108355. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108355.