

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов



10 » июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Еранова Ильи Дмитриевича «Высокоэффективные широкоперестраиваемые твердотельные лазерные системы в диапазоне длин волн 1,9...5,2 микрометров» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.19. Лазерная физика.

Работа выполнена в отделе «сверхбыстрых процессов» (отд. 330) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Антипов Олег Леонидович, ведущий научный сотрудник ИПФ РАН, доктор физико-математических наук.

Еранов И.Д. начал работу в ИПФ РАН в 2014 году при выполнении курсовых и дипломных студенческих работ. В 2019 г. он окончил с отличием магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.03 Радиофизика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2021 года по 31 августа 2025 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000030 от 10 июля 2025 года.

В период подготовки диссертации Еранов Илья Дмитриевич работал инженером в отделе «сверхбыстрых процессов» (отд. 330) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор разрабатывал экспериментальные установки, проводил экспериментальные исследования, обрабатывал и анализировал полученные результаты, проводил теоретические оценки совместно с научным

руководителем и коллегами. Материалы для публикаций подготавливались совместно с научным руководителем и соавторами. Автор непосредственно разрабатывал узлы мощных лазерных источников, осуществлял техническое сопровождение их изготовления и принимал участие в разработке технологии изготовления.

Научная новизна диссертационного исследования

1. Разработаны и экспериментально апробированы схемные решения компактных и высокоэффективных лазеров и усилителей на основе кристаллов $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с продольной накачкой с одной или двух сторон излучением твердотельных или волоконных лазеров на длине волны 1908 нм, генерирующих импульсно-периодическое излучение как с низкой, так и с высокой частотой следования импульсов и высоким качеством пучка, при высокой энергии импульсов и высокой в среднем по времени мощностью.

2. Впервые экспериментально продемонстрированы лазеры на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ с накачкой излучением лазеров на кристаллах $\text{Ho}:\text{YAG}$ и перестройкой длины волны генерации в диапазоне 2700...3200 нм.

3. Исследованы лазерные системы, включающие лазерные генераторы и усилители мощности на основе поликристаллов $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с накачкой излучением лазеров на кристаллах $\text{Ho}:\text{YAG}$ и электронной перестройкой длины волны за счет акустооптического фильтра в диапазоне длин волн 2300...2700 нм.

4. Впервые получена узкополосная параметрическая генерация, перестраиваемая в спектральном диапазоне 3500...5200 нм за счёт изменения температуры внутрирезонаторного эталона на основе тонкой кремниевой пластинки.

5. Продemonстрирована параметрической генерации в среднем ИК диапазоне в кристаллах ZnGeP_2 с прямой накачкой импульсно-периодическим излучением диодно-накачиваемых лазеров на кристаллах $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$.

Основные результаты диссертационного исследования

1. В лазерах на основе кристаллов $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ с односторонней или двухсторонней продольной накачкой излучением волоконных тулиевых лазеров или твердотельных лазеров на кристаллах $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ получена генерация на длине волны 2091 нм или 2097 нм как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме (при использовании акустооптического модулятора) с частотой следования импульсов от единиц Герц до сотни килогерц при высокой в среднем по времени мощности и/или высокой энергии в импульсах. Мощность непрерывной генерации достигала 100 Вт, средняя мощность импульсно-периодической генерации в режиме модуляции добротности резонаторов достигала 80 Вт при длительности импульсов 10-50 нс (в зависимости от частоты их следования). Лазеры на основе кристаллов $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ были использованы для накачки ПГС. Исследовано также использование излучение лазеров на кристаллах $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ для контролируемого разлома мочевого камня - лазерной трипсии.

2. В лазерах на поликристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с накачкой излучением $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера получена импульсно-периодическая генерация с узкой спектральной линией (шириной менее 0,8 нм), перестраиваемая в диапазоне длин волн 2,3...2,7 мкм при использовании акустооптического фильтра с электронной перестройкой частоты. Мощность узкополосной

генерации после усилителя достигала 9,5 Вт в пучке высокого качества на длине волны $\sim 2,44$ мкм.

3. В лазерах на монокристаллах $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ с накачкой излучением импульсно-периодического $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера получена генерация, перестраиваемая в диапазоне длин волн $2,7 \dots 3,2$ мкм при использовании интерференционно-поляризационного фильтра. Мощность генерации на длине волны $\sim 2,7$ мкм достигала 6 Вт при ширине линии ≤ 20 нм.

4. В параметрических генераторах света на основе кристаллов ZGP с накачкой импульсно-периодическим излучением $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$ лазера и кольцевым резонатором получена узкополосная генерация с перестройкой длины волны от 3,6 мкм до 4,2 мкм (по сигнальной волне) и $4,3 \dots 5,2$ мкм (по холостой волне) за счёт управления температурой внутрирезонаторного эталона и нелинейного кристалла. Энергия в импульсах, следующих с частотой повторения $10 \dots 50$ Гц, достигала 1,7 мДж для узкополосного излучения (при ширине линии ≤ 5 нм) и 4,8 мДж для спектральной гребёнки.

5. В параметрических генераторах света на основе кристаллов ZGP с накачкой импульсно-периодическим излучением $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ лазера на длине волны 1908 нм и кольцевым резонатором получена генерация на длине волны в диапазоне $3,2 \dots 4,6$ мкм.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными. Достоверность полученных результатов основана на анализе выполненных ранее работ и подтверждается сравнением экспериментальных результатов с существующими теоретическими моделями и представлениями. Исследования и разработки проводились на современном научно-технологическом оборудовании с использованием современных средств обработки и вычислений.

Основные положения и результаты диссертационной работы были опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, что подтверждает их научную ценность и соответствие высоким стандартам оценки. Доклады по теме исследования делались на всероссийских и международных симпозиумах, конференциях, научных школах, а также обсуждались на научных семинарах, что дополнительно свидетельствует о признании их научной значимости и надежности.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Практическая значимость работы связана с разработкой новых лазерных источников, имеющих широкие применения в различных областях: хирургии и медицинской диагностике, экологическом мониторинге и контроле производственных процессов, избирательном прецизионном воздействии на материалы, решении специальных задач.

Теоретическая значимость работы обусловлена разработкой новых методов перестройки длины волны лазерных и параметрических генераторов, развитием физики лазеров с квазитрёхуровневой структурой, резонаторов с хорошим согласованием моды генерации с продольной накачкой при разных диаметрах пучков и предотвращением оптического пробоя поверхности.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. O. L. Antipov, I. D. Eranov, M. P. Frolov, Yu. V. Korostelin, V. I. Kozlovsky, A. A. Novikov, Yu. P. Podmar'kov and Ya. K. Skasyrsky, "2.92 μm Cr²⁺:CdSe single crystal laser pumped by a repetitively pulsed Tm³⁺:Lu₂O₃ ceramics laser at 2.066 μm ," Laser Physics Letters, v. 12, N4, 2015, 045801.
2. O. L. Antipov, I. D. Eranov, R. I. Kositsyn, "36 W Q-switched Ho: YAG laser at 2097 nm pumped by a Tm fiber laser: evaluation of different Ho³⁺ doping concentrations", Laser Physics Letters, v. 14, N1, 2017, 015002.
3. О.Л. Антипов, И.Д. Еранов, Р.И. Косицын, "Параметрические генераторы света среднего ИК диапазона мощностью 10 Вт на основе элементов ZnGeP₂, накачиваемых излучением Ho³⁺:YAG-лазера с волоконно-лазерной накачкой. Экспериментальное и численное исследование," Квантовая электроника, т. 47, N 7, 2017, 601-606.
4. Антипов О.Л., Еранов И.Д., Стрельцова О.С., Почтин Д.П., Гребенкин Е.В. "Лазерная трипсия: контролируемый разлом мочевых камней", Экспериментальная и клиническая урология, № 1, 2018, С. 36-41.
5. O.L. Antipov, I.D. Eranov, O.S. Streltsova, D.P. Pochtin, E.V. Grebenkin, "Lasertripsy For the Controlled Coarse Fragmentation of Urinary Tract Stones," Journal of Urology & Nephrology Studies, vol. 1, № 2, 2018, P. 23-24.
6. O.L. Antipov, I. D. Eranov, M.P. Frolov, D.O. Kalyanov, Yu.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, Ya.K. Skasyrsky, "High-efficiency high-repetition-rate gain-switched operation around 3 μm in Cr²⁺: CdSe single-crystal laser pumped by fiber-laser-pumped Ho³⁺:YAG laser," Optics Letters, Vol. 44, Issue 5, pp. 1285-1288, 2019.
7. N.Yu. Kostyukova, A.A. Boyko, I.D. Antipov, D.B. Kolker, A.I. Kostyukov, E.Yu. Erushin, I.B. MirN. Yu. Kostyukova; A. A. Boyko; D. B. Kolker; O. L. Antipov; E. Yu. Erushin; A. I. Kostyukov; D. V. Badikov; V. V. Badikov, Miroshnichenko, D.V. Badikov, V.V. Badikov, "Laser-induced damage threshold of the nonlinear crystals BaGa₄Se₇ and BaGa₂GeSe₆ at 2091 nm in the nanosecond regime," Journal of Optical Society of America B, vol. 37, № 9, 2020, pp. 2655-2659
8. Юдин Н.Н., Антипов О.Л., Грибенюков А.И., Еранов И.Д., Подзывалов С.Н., Зиновьев М.М., Воронин Л.А., Журавлева Е.В., Зыкова М.П. Влияние технологии постростовой обработки и параметров лазерного излучения на длинах волн 2091 и 1064 нм на порог оптического пробоя монокристалла ZnGeP₂ / Квантовая электроника - 2021. - Т. 51, № 4. - С. 306-316.
9. Chongqiang Zhu, Victor Dyomin, Nikolay Yudin, Oleg Antipov, Eranov I., Galina Verozubova, Mikhail Zinoviev, Sergey Podzyvalov, Yelena Zhuravlyova, Yelena Slyunko, Chunhui Yang, "Laser-Induced Damage Threshold of Nonlinear GaSe and GaSe: In Crystals upon Exposure to Pulsed Radiation at a Wavelength of 2.1 μm ," Applied Sciences MDPI, 11(3), 1208, 2021
10. Yudin N., Antipov O., Eranov I., Gribenyukov A., Verozubova G., Lei Z., Zinoviev M., Podzvalov S., Slyunko E., Voevodin V., Zav'jalov A., Yang Ch. Laser-Induced Damage

Threshold of Single Crystal ZnGeP₂ at 2.1 μm : The Effect of Crystal Lattice Quality at Various Pulse Widths and Repetition Rates / Crystals – 2022. – V. 12, iss. 5. – P. 652-661.

11. Nikolay Yudin, Oleg Antipov, Ilya Eranov, Stanislav Balabanov, Yuri Getmanovskiy, Elena Slyunko, “Effects of the Processing Technology of CVD-ZnSe, Cr²⁺:ZnSe, and Fe²⁺:ZnSe Polycrystalline Optical Elements on the Damage Threshold Induced by a Repetitively Pulsed Laser at 2.1 μm ,” Ceramics MDPI, 5(3), 459-471, 2022.

12. Yudin N., Dyomin V., Gribenyukov A., Antipov O., Khudoley A., Kinyaevskiy I., Zinovev M., Podzyvalov S., Kuznetsov V., Slyunko E., Lysenko A., Kalsin A., Eranov I., Baalbaki H. “Physical and Technological Aspects of Laser-Induced Damage of ZGP Single Crystals under Periodically Pulsed Laser Irradiation at 2.1 μm ”, Photonics MDPI – 2023. - V. 10, is. 12. - p. 1364.

13. Oleg Antipov, Ilya Eranov, Stanislav Balabanov, Valeriy Sharkov and Nikolay Yudin “High-Repetition-Rate 2.3–2.7 μm Acousto-Optically Tuned Narrow-Line Laser System Comprising Two Master Oscillators and Power Amplifiers Based on Polycrystalline Cr²⁺:ZnSe with the 2.1 μm Ho³⁺:YAG Pulsed Pumping”, Photonics MDPI - 2024, V. 11, 555.

14. И.Д. Еранов, Н.Н. Юдин, О.Л. Антипов, Е.С. Слюнько, М.М. Зиновьев, В.С. Кузнецов, Д.В. Власов, М.М. Кулеш, С.Н. Подзывалов, А.Б. Лысенко, А.Ю. Кальсин, «Однорезонаторный параметрический генератор света на базе монокристалла ZGP с прямой накачкой излучением Tm:YLF лазера», принята в печать и будет опубликована в журнале «Известия вузов. Физика» в 2025 г.

15. Еранов И.Д, Антипов О.Л., Добрынин А.А., Гетмановский Ю.А., Шарков В.В. “Узкополосный широкоперестраиваемый параметрический источник излучения среднего ИК диапазона на основе кристаллов ZGP,” принята в печать и будет опубликована в журнале “Оптический журнал”, т. 92, вып. 11 (2025).

Патенты

16. Антипов Олег Леонидович, Еранов Илья Дмитриевич, Гетмановский Юрий Андреевич, Лазерный источник ИК диапазона на основе халькогенидных кристаллов, активированных Cr²⁺, с акустооптической перестройкой длины волны. Патент— Россия. — 041501 В1. — дата публикации 31.10.2022. — РОСКОСМОС

17. Антипов Олег Леонидович, Еранов Илья Дмитриевич, Гетмановский Юрий Андреевич, Лазерный источник мощного излучения среднего ИК-диапазона на основе кольцевого параметрического генератора на кристалле ZGP с высокой частотой импульса,” Патент № 2 831 713(13) С2 – Россия – дата публикации 12.12.2024 Бюл. № 35

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых международных журналах. Результаты работы неоднократно обсуждались на различных конференциях и семинарах, получили высокую оценку ведущих специалистов и имеют высокую цитируемость. Получены 2 патента.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.19. Лазерная физика.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация Еранова Ильи Дмитриевича «Высокоэффективные широкоперестраиваемые твердотельные лазерные системы в диапазоне длин волн 1,9...5,2 микрон» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.19. Лазерная физика.

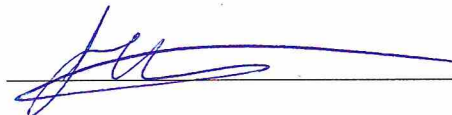
Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.19. Лазерная физика.

Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: «за» — 15 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел.
протокол № 3/7 от « 26 » июня 2025 г.



Стародубцев Михаил Викторович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения
нелинейной динамики и оптики



Шилягин Павел Андреевич,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения нелинейной динамики
и оптики, зам. зав. отделом 340