

Импульсно-периодический Fe:ZnSe-лазер со средней мощностью излучения 20 Вт при комнатной температуре поликристаллического активного элемента

С.Д.Великанов, Е.М.Гаврищук, Н.А.Зарецкий, А.В.Захряпа,
В.Б.Иконников, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, А.А.Манешкин,
Д.А.Машковский, Е.В.Салтыков, К.Н.Фирсов, Р.С.Чуваткин, И.М.Юткин

Исследованы энергетические и спектрально-временные характеристики Fe:ZnSe-лазера в импульсном и импульсно-периодическом режимах работы при комнатной температуре поликристаллического активного элемента. Накачка кристалла осуществлялась нецепным электроразрядным HF-лазером. Достигнутая в моноимпульсном режиме энергия излучения Fe:ZnSe-лазера составила 1.67 Дж при эффективности по поглощенной в кристалле и падающей на кристалл энергии ~43% и ~27% соответственно. В импульсно-периодическом режиме при частоте следования импульсов 20 Гц и эффективности по поглощенной в кристалле мощности ~40% получена средняя мощность излучения лазера ~20 Вт с энергией в отдельном импульсе ~1 Дж. Обсуждаются возможности дальнейшего увеличения средней мощности излучения импульсно-периодического Fe:ZnSe-лазера при комнатной температуре активного элемента.

Ключевые слова: Fe:ZnSe-лазер, поликристалл, комнатная температура, импульсно-периодический режим, электроразрядный HF-лазер, средняя мощность излучения.

1. Введение

Лазеры на кристаллах селенида цинка, легированного двухвалентными ионами железа (Fe:ZnSe), активно исследуются уже более пятнадцати лет [1–25]. Усилия исследователей направлены, в основном, на увеличение энергии в импульсе и средней мощности излучения, что определяется широким спектром возможных применений Fe:ZnSe-лазера для спектроскопии молекул, физических экспериментов при высоких плотностях потоков излучения, мониторинга окружающей среды, медицинских приложений и т. п. [6, 7, 17, 24]. Накачка кристаллов осуществляется лазерами, генерирующими в трехмикронном диапазоне длин волн. В настоящее время самые большие значения энергии излучения и средней мощности Fe:ZnSe-лазера достигнуты при температуре активных элементов, близкой к температуре жидкого азота. В [22] получена энергия в импульсе 10.6 Дж, в [21] средняя мощность излучения импульсно-периодического лазера составила 35 Вт при частоте следования импульсов 100 Гц. Кристаллы в [21, 22] накачивались Er:YAG-лазерами, работавшими в режиме свободной генерации.

Для практических применений наиболее привлекательной является возможность работы лазера при ком-

натной температуре или при неглубоком охлаждении активного элемента. Из-за относительно малого времени жизни верхнего лазерного состояния в кристалле Fe:ZnSe (~360 нс при комнатной температуре [25]) накачка в этих условиях должна производиться короткими импульсами излучения [7, 25]. Идеальными источниками накачки, по совокупности характеристик не имеющими конкурентов в трехмикронном диапазоне длин волн, в данном случае являются импульсные и импульсно-периодические электроразрядные HF(DF)-лазеры [12, 26–29]. Возбуждение кристаллов HF-лазером позволило получить самые большие в настоящее время значения энергии в импульсе и средней мощности Fe:ZnSe-лазера при комнатной температуре. Энергия генерации составила 1.43 Дж при эффективности по поглощенной в кристалле энергии 48% [23]. Работа Fe:ZnSe-лазера, возбуждаемого импульсно-периодическим HF-лазером, продемонстрирована в [11, 12]. В работе [12] получена средняя мощность излучения 2.4 Вт с энергией в отдельном импульсе 14 мДж.

Частота следования импульсов в [11, 12] достигала 200 Гц. Для некоторых приложений представляет также интерес функционирование Fe:ZnSe-лазера при меньших (10 – 20 Гц) частотах следования импульсов, но с энергией в отдельном импульсе ~1 Дж. Такие уровни энергии в импульсе при комнатной температуре реализуются на монокристаллических и поликристаллических активных элементах с большими поперечными размерами [16, 23], необходимые параметры накачки в импульсно-периодическом режиме можно легко обеспечить мощными HF-лазерами, описанными в [27, 28]. В связи с этим целью настоящей работы является исследование возможности достижения большой средней мощности генерации с высокой энергией в отдельном импульсе в условиях возбуждения Fe:ZnSe-лазера излучением импульсно-периодического HF-лазера при комнатной температуре.

С.Д.Великанов, Н.А.Зарецкий, А.В.Захряпа, А.А.Манешкин, Е.В.Салтыков, Р.С.Чуваткин, И.М.Юткин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: velikanov@otd13.vniief.ru
Е.М.Гаврищук, В.Б.Иконников. Институт химии высококачественных веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: gavr@ihps.nnov.ru
С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, Д.А.Машковский, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: k_firsov@rambler.ru

2. Экспериментальная установка

Поликристаллический активный элемент Fe:ZnSe-лазера имел форму диска диаметром 64 мм и толщиной 4 мм. Технология его изготовления не отличалась от технологии изготовления активных элементов с большими поперечными размерами, подробно рассматривавшейся ранее в [23]. Из предварительно выращенной методом химического газозащитного осаждения поликристаллической пластины ZnSe по методике, описанной в [30], вырезался диск, на плоские полированные поверхности которого методом электронно-лучевого испарения наносились тонкие (~1 мкм) пленки железа. Легирование кристалла ионами железа проводилось в процессе его высокотемпературной газостатической обработки в атмосфере аргона при давлении 100 МПа и температуре 1270 °С в течение 126 ч. С целью уменьшения загрязняющего действия материала аппаратуры и снижения скорости массопереноса, обусловленного сублимацией, образец при газостатической обработке помещался в контейнер из высококачественного графита. Особенности процессов, протекающих при высокотемпературной газостатической обработке поликристаллов халькогенидов цинка, подробно проанализированы в [31]. После легирования кристалл был отполирован, угол между полированными поверхностями не превышал 30°. В соответствии с результатами работы [23], в которой двухстороннее легирование образцов с большими поперечными размерами также осуществлялось в процессе горячего изостатического прессования, концентрацию ионов железа на поверхности используемого в настоящей работе кристалла можно оценить вели-

чиной $(7-9) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при глубине легирования $\sim 1.5 \text{ мм}$ (по уровню 0.1). При оценке учитывалось время, в течение которого образец подвергался газостатической обработке. Диаметр активного элемента позволяет работать с большими размерами пятна излучения накачки на его поверхности (т. е. при больших энергиях накачки) без угрозы развития поперечной паразитной генерации [23, 32]. В предварительных экспериментах было установлено, что при использовании в качестве активного элемента описанного выше образца паразитная генерация не развивается при размерах пятна накачки на поверхности до 16 мм.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Резонатор Fe:ZnSe-лазера длиной 120 мм был образован вогнутым медным зеркалом 31 с радиусом кривизны 1 м и плоским выходным зеркалом 32, имевшим коэффициент отражения 60% в диапазоне длин волн $\lambda = 3.9 - 4.8 \text{ мкм}$. Активный элемент возбуждался излучением нецепного электроразрядного HF-лазера, описанного в [28]. Пучок этого лазера, ослабляемый набором светофильтров, обрезался диафрагмой диаметром 80 мм и фокусировался на поверхность активного элемента сферической линзой Л с фокусным расстоянием 1 м в пятно эллиптической формы с размерами осей $a \times b = 14 \times 16 \text{ мм}$ (90% энергии падающего на поверхность излучения). Угол падения излучения накачки на поверхность кристалла составлял $\sim 20^\circ$. Кристалл устанавливался так, чтобы одна из его полированных граней была перпендикулярна оптической оси резонатора. Величины энергии падающего на образец излучения HF-лазера, прошедшего через образец излучения и излучения Fe:ZnSe-лазера измерялись калориметрами К1–К3 с пирозлектрически-

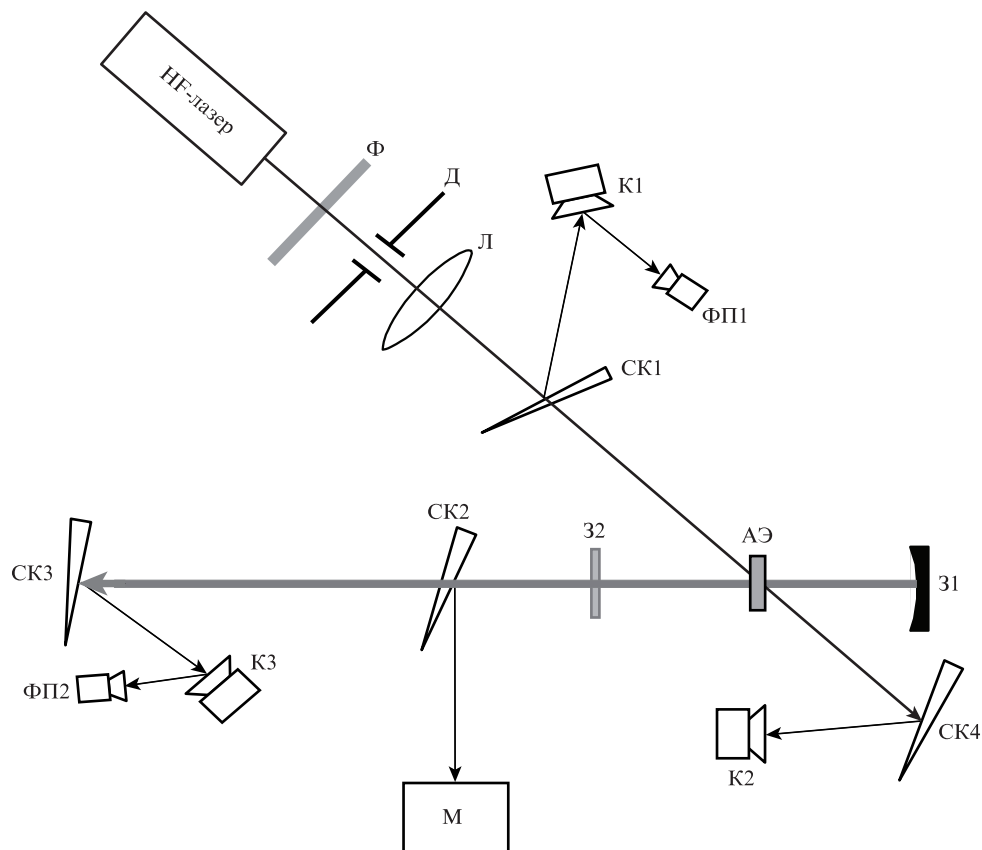


Рис.1. Схема эксперимента: Ф – набор светофильтров; Д – диафрагма диаметром 80 мм; Л – линза; СК1–СК4 – светоделительные клинья из CaF₂; К1–К3 – калориметры; АЭ – активный элемент (кристалл Fe:ZnSe); 31, 32 – зеркала резонатора Fe:ZnSe-лазера; М – монохроматор с линейкой пирозлектрических приемников на выходе.

ми измерительными головками COHERENT J-50MB-HE. Контроль форм импульсов излучения Fe:ZnSe- и HF-лазеров осуществлялся фотоприемниками ФП1 и ФП2 (Vigo-system Ltd) с временным разрешением ~ 1 нс. Фотоприемники регистрировали излучение, рассеиваемое приемными площадками соответствующих калориметров. Спектры генерации Fe:ZnSe-лазера снимались с помощью монохроматора MS 2004 (SOLAR TII). На выходе монохроматора была установлена линейка пироэлектрических приемников HPL-256-500 (HEIMANN Sensor), состоящая из 256 элементов при длине приемной части 12.8 мм.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Моноимпульсный режим генерации

На рис.2 приведена зависимость энергии генерации Fe:ZnSe-лазера от падающей на кристалл энергии накачки, снятая в моноимпульсном режиме работы HF-лазера. Коэффициент пропускания кристалла на длинах волн накачки в условиях генерации Fe:ZnSe-лазера при энергии HF-лазера более 1.8 Дж (плотность падающей на кристалл энергии свыше 1 Дж/см^2) составлял $\sim 19\%$. Как видно из рис.2, максимальная энергия генерации достигает 1.67 Дж. Эффективности по падающей на кристалл и поглощенной в кристалле энергии накачки составляют при этом 27% и 43% соответственно. Достигнутая здесь энергия генерации (1.67 Дж) превышает максимальную энергию (1.43 Дж), полученную ранее в [23] при комнатной температуре активных элементов с большими поперечными размерами. Однако в процессе настоящих экспериментов было обнаружено, что при энергии накачки свыше 4.5 Дж после нескольких импульсов (пять и более) на выходной по отношению к падающему пучку поверхности кристалла проявляются заметные повреждения. Разрушение поверхности фиксировалось лишь при наличии генерации Fe:ZnSe-лазера. Если резонатор перекрывался непрозрачным экраном, поверхность не разрушалась даже при максимальной в описываемых экспериментах энергии накачки 6.2 Дж (плотность энергии накачки $\sim 3.5 \text{ Дж/см}^2$).

На рис.3 приведены формы импульсов генерации Fe:ZnSe- и HF-лазеров, снятые в моноимпульсном режиме накачки при падающей на кристалл энергии ~ 4 Дж. Как видно из рисунка, длительность импульса излучения

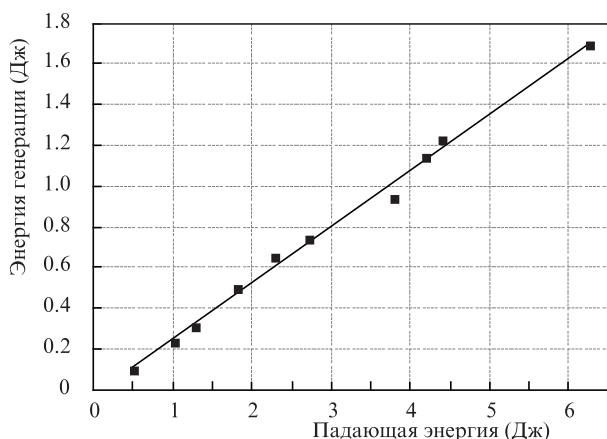


Рис.2. Зависимость энергии генерации Fe:ZnSe-лазера от падающей на кристалл энергии накачки.

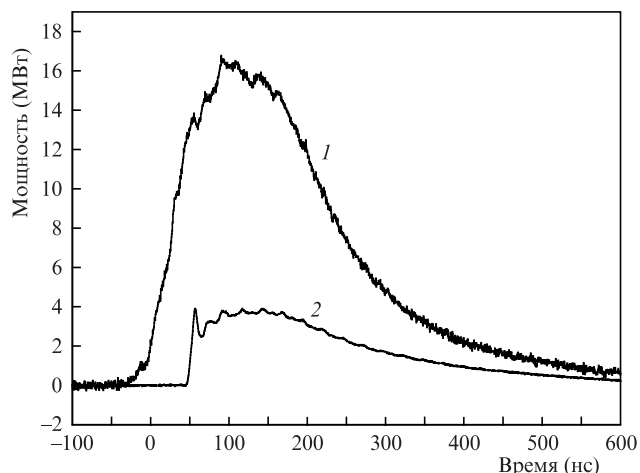


Рис.3. Импульсы генерации HF- (1) и Fe:ZnSe- (2) лазеров. Падающая на кристалл энергия накачки равна 4 Дж.

HF-лазера по полувысоте составляет ~ 210 нс. Импульс Fe:ZnSe-лазера имеет короткий и мощный передний пик, типичный для условий высоких плотностей энергии накачки [18]. При работе в частотном режиме формы импульсов хорошо воспроизводились.

На рис.4 показан спектр излучения Fe:ZnSe-лазера, усредненный по 10 импульсам. Видно, что лазер, в основном, генерирует в области длин волн $\lambda > 4300$ нм. На длинах волн $\lambda < 4200$ нм генерация практически не видна (в масштабе рисунка). Для исследования спектрально-временных характеристик излучения лазера в этой области приходилось использовать чувствительный фотоприемник, устанавливаемый за выходной щелью монохроматора. Такая же ситуация наблюдалась ранее в [11] при регистрации спектров Fe:ZnSe-лазера линейкой пироэлектрических приемников. Анализ осциллограмм импульсов излучения лазера, снятых с помощью фотоприемника на разных длинах волн (за выходной щелью монохроматора устанавливался фотоприемник ФП2), также подтвердил выявленную ранее в [11] зависимость формы импульса от длины волны. В области $\lambda < 4200$ нм импульс имеет форму короткого пика с длительностью по полувысоте ~ 7 нс и низкой в целом энергией, поэтому его обнаружение пироэлектрическими приемниками затруднено. При длинах волн $\lambda \geq 4350$ нм к пику добавляется «хвост», длительность и амплитуда которого растут относительно пика с увеличением длины волны.

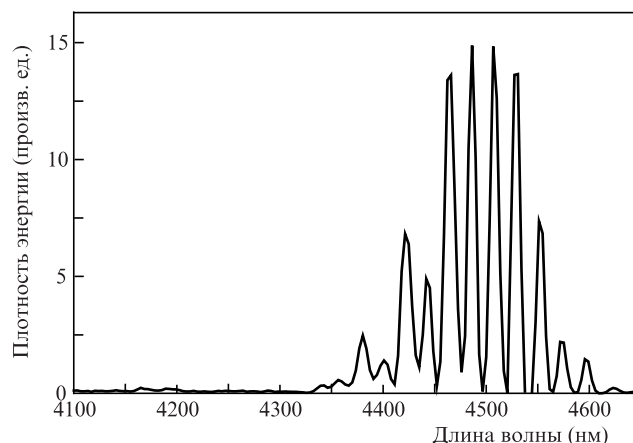


Рис.4. Спектр генерации Fe:ZnSe-лазера (усреднение по 10 импульсам). Падающая на кристалл энергия накачки равна 4 Дж.

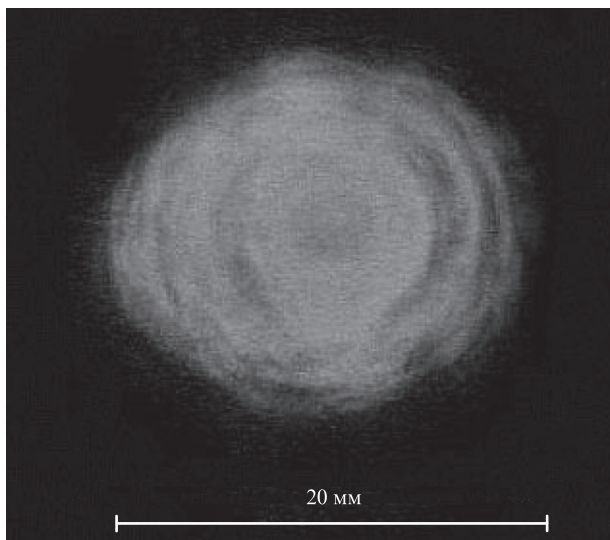


Рис.5. Отпечаток пучка излучения Fe:ZnSe-лазера на термобумаге.

На рис.5 приведена фотография отпечатка пучка излучения Fe:ZnSe-лазера на термобумаге, полученного на расстоянии 30 см от выходного зеркала резонатора. Как и пучок накачки, пучок генерации имеет в сечении эллиптическую форму. На отпечатке видна заметная неоднородность распределения плотности энергии генерации по пятну. Очевидно, что при больших размерах пятна накачки (геометрия дискового лазера) для получения более качественных пучков необходима разработка специальных неустойчивых резонаторов.

3.2. Импульсно-периодический режим генерации Fe:ZnSe-лазера

Исследования характеристик Fe:ZnSe-лазера в импульсно-периодическом режиме проводились при энергии накачки в импульсе не более 4.2 Дж с целью предотвращения разрушения поверхности активного элемента. HF-лазер работал в режиме коротких серий (1 – 2 с) при частоте следования импульсов 10 – 20 Гц. На рис.6 приведены зависимости падающей на кристалл энергии HF-лазера, прошедшей через кристалл энергии и энергии ге-

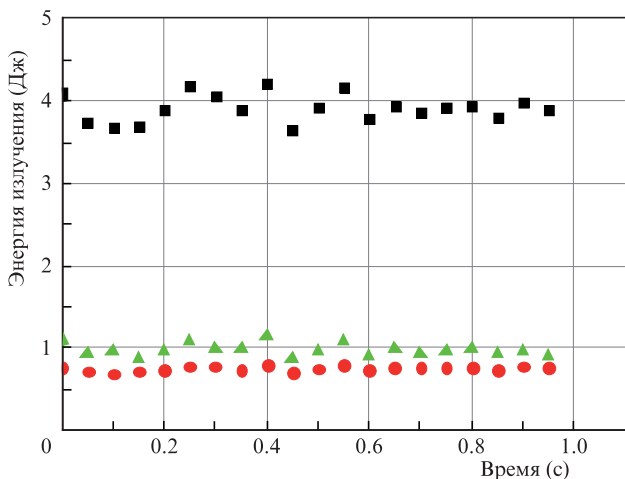


Рис.6. Зависимости падающей на кристалл энергии HF-лазера (■), энергии генерации Fe:ZnSe-лазера (▲) и прошедшей через кристалл энергии накачки (●) от времени при частоте следования импульсов 20 Гц.

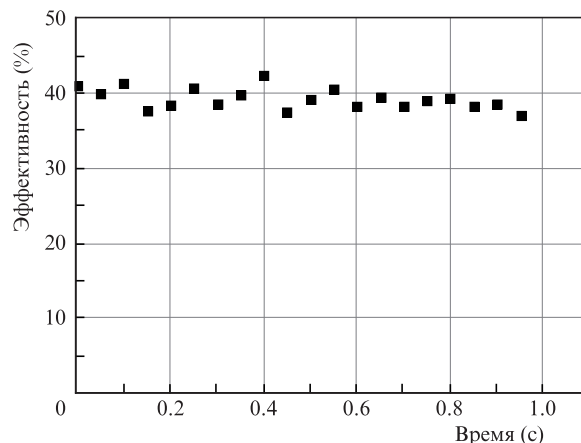


Рис.7. Зависимость эффективности Fe:ZnSe-лазера по поглощенной энергии от времени в серии импульсов продолжительностью 1 с; частота следования импульсов 20 Гц.

нерации Fe:ZnSe-лазера от времени при частоте следования импульсов 20 Гц (продолжительность серии 1 с). На рис.7 представлена зависимость эффективности Fe:ZnSe-лазера по поглощенной в кристалле энергии от времени в этих же условиях. Как видно из рис.6 и 7, энергия генерации Fe:ZnSe-лазера в импульсе близка к 1 Дж на протяжении всей серии, средняя мощность генерации Fe:ZnSe-лазера за серию составляет ~ 20 Вт при эффективности по падающей на кристалл и поглощенной в кристалле мощности $\sim 25\%$ и $\sim 40\%$ соответственно.

При частоте следования импульсов 10 Гц средняя мощность излучения составляла ~ 10 Вт с такими же значениями эффективностями. Дальнейшее увеличение средней мощности Fe:ZnSe-лазера может быть достигнуто посредством увеличения частоты следования импульсов. Большие поперечные размеры поликристаллов, легированных ионами железа по описанной в [23] технологии, позволяют при увеличении частоты следования импульсов применять метод «вращающегося дискового активного элемента» (см., напр., [21] и ссылки в этой работе) с целью снижения влияния перегрева кристалла на характеристики лазера. Авторами [21] благодаря этому методу получена рекордная средняя мощность лазера на Cr:ZnSe при комнатной температуре. Очевидно, что такой же метод применим и в случае Fe:ZnSe-лазера на поликристаллах больших диаметров.

4. Заключение

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность достижения большой средней мощности излучения Fe:ZnSe-лазера с высокой энергией в отдельном импульсе при комнатной температуре активного элемента. Насколько нам известно, полученная средняя мощность излучения 20 Вт является в настоящее время наибольшей для лазеров в спектральном диапазоне $\lambda = 4 - 5$ мкм, генерирующих при комнатной температуре. Дальнейшее увеличение средней мощности возможно посредством увеличения частоты следования импульсов и применения метода «вращающегося дискового активного элемента».

Работа поддержана грантом РФФ № 15-13-10028 в части разработки технологии и изготовления образцов Fe:ZnSe, а также грантами РФФИ № 15-02-06005 и № 15-08-02562 в части разработки экспериментальных методик и проведения лазерных исследований.

1. Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24** (23), 1720 (1999).
2. Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Vadikov V.V. *Opt. Express*, **13** (26), 10608 (2005).
3. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **36** (4), 299 (2006).
4. Ильичев Н.Н., Данилов В.П., Калинушкин В.П., Студеникин М.И., Шапкин П.В., Насибов А.С. *Квантовая электроника*, **38** (2), 95 (2008).
5. Doroshenko M.E., Jelinkova N., Koranda P., Sulc J., Basiev T.T., Osiko V.V., Komar V.K., Gerasimenko A.S., Puzikov V.M., Vadikov V.V., Badikov D.V. *Laser Phys. Lett.*, **7** (1), **39** (2010).
6. Myoung NoSoung, Martyshkin D.V., Fedorov V.V., Mirov S.B. *Opt. Lett.*, **36** (1), 94 (2011).
7. Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyshkin D.V., Moskalev I.S., Mirov M.S., Vasilyev S.V. *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **21** (1), 1601719 (2015).
8. Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г., Ильичев Н.Н., Казанцев С.Ю., Калинушкин В.П., Кононов И.Г., Насибов А.С., Студеникин М.И., Пашинин П.П., Фирсов К.Н., Шапкин П.В., Щуров В.В. *Квантовая электроника*, **44** (2), 141 (2014).
9. Гавришук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **44** (6), 505 (2014).
10. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11** (8), 085001 (2014).
11. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Maneshkin A.A., Mishchenko G.M., Nefedov S.M., Rodin S.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 125004 (2014).
12. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Крохин О.Н., Манешкин А.А., Подмарьков Ю.П., Савинова С.А., Скасырский Я.К., Фролов М.П., Чуваткин Р.С., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **45** (1), 1 (2015).
13. Kozlovsky V.I., Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Landman A.I., Martovitsky V.P., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Skasyrsky Ya.K., Voronov A.A. *Phys. Status Sol. B*, **247** (6), 1553 (2010).
14. Evans J.W., Berry P.A., Schepler K.L. *Opt. Lett.*, **37** (23), 5021 (2012).
15. Myoung NoSoung, Fedorov V.V., Mirov S.B., Wenger L.E. *J. Luminescence*, **132** (3), 600 (2012).
16. Firsov K.N., Frolov M.P., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Korostelin Yu.V., Maneshkin A.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. *Laser Phys. Lett.*, **13** (1), 015002 (2016).
17. Акимов В.А., Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **37** (11), 1071 (2007).
18. Гавришук Е.М., Иконников В.Б., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Савин Д.В., Тимофеева Н.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **45** (9), 823 (2015).
19. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Коростелин Ю.В., Манешкин А.А., Фирсов К.Н., Фролов М.П., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **46** (1), 11 (2016).
20. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. *Laser Phys. Lett.*, **13** (5), 055002 (2016).
21. Mirov S.B., Fedorov V., Martyshkin D., Moskalev I., Mirov M., Vasilyev S. *Advanced Solid State Lasers Conf.* (Berlin, Germany, 2015, AW4A.1).
22. Kozlovsky V.I., Korostelin Y.V., Podmar'kov Y.P., Skasyrsky Ya.K., Frolov M.P. *J. Phys. Conf. Ser.*, **740**, 012006 (2016).
23. Dormidonov A.E., Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. *Appl. Phys. B*, **122** (8), 211 (2016).
24. Potemkin F.V., Migal E.A., Pushkin A.V., Sirotkin A.A., Kozlovsky V.I., Korostelin Yu.V., Podmar'kov Yu.P., Firsov V.V., Frolov M.P., Gordienko V.M. *Laser Phys. Lett.*, **13** (12), 125403 (2016).
25. Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Mislavskii V.V., Podmar'kov Yu.P., Savinova S.A., Skasyrsky Ya.K. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 125001 (2013).
26. Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Ефанов В.М., Ефанов М.В., Казанцев С.Ю., Кодола Б.Е., Комаров Ю.Н., Кононов И.Г., Подлесных С.В., Сивачев А.А., Фирсов К.Н., Щуров В.В., Ярин П.М. *Квантовая электроника*, **40** (5), 393 (2010).
27. Булаев В.Д., Гусев В.С., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Лысенко С.Л., Морозов Ю.Б., Познышев А.Н., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40** (7), 615 (2010).
28. Великанов С.Д., Домажиров А.П., Зарецкий Н.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Кромин А.А., Подлесных С.В., Сивачев А.А., Фирсов К.Н., Харитонов С.В., Цыкин В.С., Щуров В.В., Юткин И.М. *Квантовая электроника*, **45** (11), 989 (2015).
29. Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Samokhin A.A. *Laser Phys.*, **17** (6), 834 (2007).
30. Gavrishchuk E.M. *Inorganic Mater.*, **39** (9), 883 (2003).
31. Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Savin D.V. *Inorganic Mater.*, **50** (3), 222 (2014).
32. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. *Laser Phys. Lett.*, **13** (6), 065003 (2016).