

Лазер на кристалле ZnSe:Fe^{2+} с накачкой излучением нецепного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре

С.Д.Великанов, В.П.Данилов, Н.Г.Захаров, Н.Н.Ильичев,
С.Ю.Казанцев, В.П.Калинушкин, И.Г.Кононов, А.С.Насибов,
М.И.Студеникин, П.П.Пашинин, К.Н.Фирсов, П.В.Шапкин, В.В.Щуров

Исследованы характеристики ZnSe:Fe^{2+} -лазера в схеме с поперечной накачкой кристалла излучением нецепного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре. Легирование кристалла ZnSe ионами Fe^{2+} производилось одновременно через две грани методом диффузии в условиях термодинамического равновесия. Установлено, что импульс излучения ZnSe:Fe^{2+} лазера промодулирован короткими пачками (3–7 нс по полувысоте при низких уровнях накачки), причем количество пачек в импульсе уменьшается, а глубина модуляции растет при приближении энергии накачки к пороговому значению сверху. Получена импульсная энергия генерации 30.6 мДж при длительности импульса по полувысоте ~125 нс (при высоких уровнях накачки), обсуждаются возможности дальнейшего увеличения энергии ZnSe:Fe^{2+} -лазера с накачкой излучением нецепного HF-лазера.

Ключевые слова: лазер на кристалле ZnSe:Fe^{2+} , нецепной HF-лазер, поперечная оптическая накачка.

1. Введение

Мощное лазерное излучение в спектральном диапазоне 3–5 мкм представляет значительный интерес для научных исследований и ряда технических приложений, что стимулирует интенсивные поиск и изучение перспективных материалов для создания в этом диапазоне мощных и компактных лазеров. Особое внимание уделяется кристаллу ZnSe , легированному ионами Fe^{2+} , при накачке которого излучением Er:YAG -лазера в [1] впервые наблюдалась генерация с длиной волны излучения $\lambda = 4.0\text{--}4.5$ мкм в интервале температур кристалла 15–180 К. Дальнейшие исследования с короткими импульсами накачки (в режиме модуляции добротности) [2] показали возможность получения генерации на этом материале в диапазоне длин волн 3.9–4.8 мкм и при комнатной температуре. В недавней работе [3], при использовании в качестве источника накачки Er:YAG -лазера в режиме свободной генерации (выходная энергия лазера до 8 Дж, полная длительность импульса накачки ~650 мкс, импульс промодулирован короткими пачками с длительностью по полувысоте 0.3–0.5 мкс), также наблюдалась генерация на ZnSe:Fe^{2+} при комнатной температуре, но эффективность лазера была низкой из-за малого времени жизни верхнего лазерного уровня (360 нс при температу-

ре 292 К (см. [3] и цитируемую в ней литературу). При выходной энергии ZnSe:Fe^{2+} -лазера 42 мДж эффективность по поглощенной в кристалле энергии накачки в [3] составила всего 0.9%. В [4] сообщалось о достижении при комнатной температуре суперлюминесцентного режима излучения кристалла ZnSe:Fe^{2+} с длиной волны 4.6–4.7 мкм в схеме с поперечной лазерной накачкой. Выходная энергия излучения в [4] составила приблизительно 1 мДж при энергии падающего на кристалл излучения накачки 15 мДж. Особенностью материала, позволившей добиться таких характеристик, было то, что в процессе легирования ZnSe ионами Fe^{2+} диффузионным методом примесь концентрировалась в узкой приповерхностной зоне кристалла. Такое распределение активных ионов позволило эффективно использовать излучение накачки и одновременно получить очень высокий коэффициент усиления. Обзор исследований в области лазеров на кристаллах, легированных Fe^{2+} , можно найти в [5].

Энергия генерации лазеров на ZnSe:Fe^{2+} при комнатной температуре в большой степени ограничивается низкой выходной энергией использующихся для накачки твердотельных лазеров, работающих с целью получения короткого светового импульса в режиме модулированной добротности (лазеры на YAG:Er и YSGG:Er:Cr с длиной волны 2.92 и 2.8 мкм соответственно). Так, например, в [6], где при комнатной температуре была достигнута самая высокая в настоящее время энергия излучения ZnSe:Fe^{2+} -лазера (3.6 мДж) с накачкой коротким световым импульсом, максимальная энергия применявшегося для накачки Er:Cr:YSGG -лазера в режиме модулированной добротности не превышала 35 мДж.

Нецепные электроразрядные HF-лазеры, спектр излучения которых (2.6–3.1 мкм) полностью попадает в область поглощения ионов Fe^{2+} в кристалле ZnSe , при длительности светового импульса ~150 нс имеют практически неограниченную энергию генерации с точки зрения рассматриваемых здесь применений и могут работать с большой частотой следования импульсов (см. [7–9] и цитируемую в них литературу). Поэтому несомненный ин-

С.Д.Великанов, Н.Г.Захаров, В.В.Щуров. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: velikanov@otd13.vniief.ru, Nikitagz@rambler.ru, shvadim45@mail.ru
В.П.Данилов, Н.Н.Ильичев, С.Ю.Казанцев, В.П.Калинушкин, И.Г.Кононов, М.И.Студеникин, П.П.Пашинин, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kazan@kapella.gpi.ru, kononov@kapella.gpi.ru, k_firsov@rambler.ru
А.С.Насибов, П.В.Шапкин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, ГСП-1, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 14 ноября 2013 г., после доработки – 13 декабря 2013 г.

интерес представляет исследование характеристик лазера на кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при его накачке излучением HF-лазера, что и являлось целью настоящей работы. Основные усилия были направлены на демонстрацию возможностей масштабирования описанного в [4] лазерного излучателя на кристалле, легированном диффузионным методом, в сторону увеличения выходной энергии.

2. Экспериментальная установка

Как и в [4], примесь Fe^{2+} вводилась в ZnSe методом диффузии в условиях термодинамического равновесия [10] одновременно через две грани кристалла. Толщина обогащенного ионами Fe^{2+} приповерхностного слоя составляла ~ 100 мкм, концентрация ионов в слое достигала $\sim 10^{20}$ см $^{-3}$ [4]. Грани, через которые осуществлялось легирование кристалла, подвергались полировке, с обеих сторон снимались слои материала приблизительно одинаковой толщины. Пропускание используемых кристаллов в направлении, перпендикулярном к грани, на длинах волн излучения HF-лазера составляло 6%–20%. Оно определялось поглощением двумя легированными слоями и отражением излучения от двух непросветленных граней кристалла.

В экспериментах использовались четыре образца кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$, отличавшиеся главным образом размерами. Размеры грани образцов, через которую в кристалл вводилось излучение накачки, и размеры зоны облучения приведены в табл.1. Толщина образцов составляла ~ 1 мм (образец №4 был вырезан из образца №2 после случайного разрушения последнего). Торцы образцов, перпендикулярные длинной стороне зоны облучения (через них выводилось излучение $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера), скалывались так, чтобы быть практически параллельными друг другу. Никакой дополнительной обработки торцов после скалывания не проводилось. Большая часть измерений выполнялась с использованием образца №1. Остальные образцы служили в основном для демонстрации возможности достижения больших энергий излучения E_{las} и эффективности η $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера с накачкой излучением нецепного HF-лазера. Предварительно был измерен порог разрушения поверхности образца излучением накачки (использовались тестовые образцы, сходные с образцами, параметры которых приведены в табл.1). Порог разрушения соответствовал плотности энергии накачки $E_p^{\text{th}} \approx 1$ Дж/см 2 , поэтому в экспериментах плотность энергии накачки E_p не превышала 0.9 Дж/см 2 . Схема эксперимента представлена на рис.1.

Поперечная накачка кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ осуществлялась нецепным электроразрядным HF-лазером, характеристики которого подробно описаны в [11, 12]. Максимальная энергия излучения лазера составляла 5 Дж. Излучение ослаблялось калиброванными фильтрами Φ . Для контроля формы и энергии импульса накачки

Табл.1.

Номер образца	Размеры образца (мм)	Размеры зоны облучения (мм)
1	13×9	12×8
2	25×11	20×7
3	17×11	17×7
4	12×11	12×7, 12×2.5

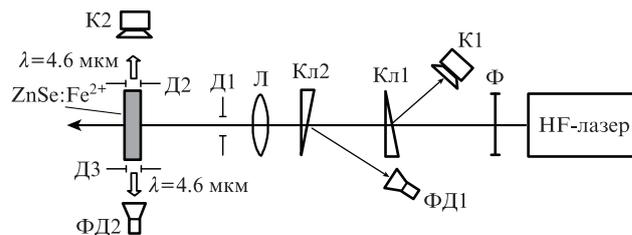


Рис.1. Схема эксперимента:

Кл1, Кл2 – клинья из BaF_2 ; ФД1, ФД2 – фотоприемники; Д1 – Д3 – прямоугольные диафрагмы; К1, К2 – calorиметры; Φ – калиброванный светофильтр; Л – сферическая линза; $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ – накачиваемый кристалл.

часть пучка лазера ответвлялась клиньями Кл1 и Кл2 из BaF_2 на фотоприемник ФД1 (Vigo-system Ltd) с временным разрешением ~ 1 нс и на calorиметр К1 (Gentec-EO) соответственно. Прошедший через клинья пучок сжимался сферической линзой Л до диаметра ~ 25 мм на расстоянии 1 см от поверхности кристалла $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ и обрезался прямоугольной диафрагмой Д1 так, чтобы его размеры на поверхности образца соответствовали размерам зоны облучения, указанным в табл.1. Соотношение величин энергии HF-лазера перед диафрагмой Д1 и на поверхности образца определялось в отдельном эксперименте. Для этого вместо образца устанавливался calorиметр. Форма и энергия импульса генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера контролировались фотоприемником ФД2 (Vigo-system Ltd) с временным разрешением ~ 1 нс и calorиметром К2 (Molelectron). Предварительные измерения показали, что через оба торца кристалла выводятся импульсы излучения $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера с одинаковой энергией, временные структуры импульсов также не отличаются друг от друга. Это позволяет одновременно регистрировать форму и энергию импульса без дополнительных ответвляющих оптических клиньев (рис.1). Прямоугольные диафрагмы Д2 и Д3 на рис.1 служат для предотвращения попадания на фотоприемник и calorиметр рассеянного излучения накачки. Сигналы с фотоприемников подавались на цифровой осциллограф с полосой пропускания 500 МГц.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис.2 приведена зависимость энергии генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера E_{las} от энергии падающей на кристалл накачки E_p , снятая на образце №1. Видно, что зависимость носит типичный для лазерной генерации пороговый характер. Максимальная величина E_{las} составила

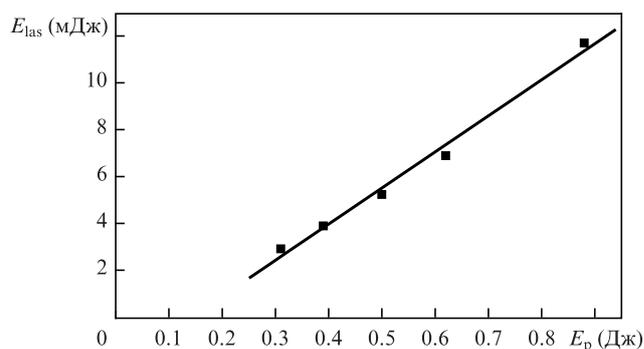


Рис.2. Зависимость энергии генерации $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ -лазера от энергии накачки для образца №1.

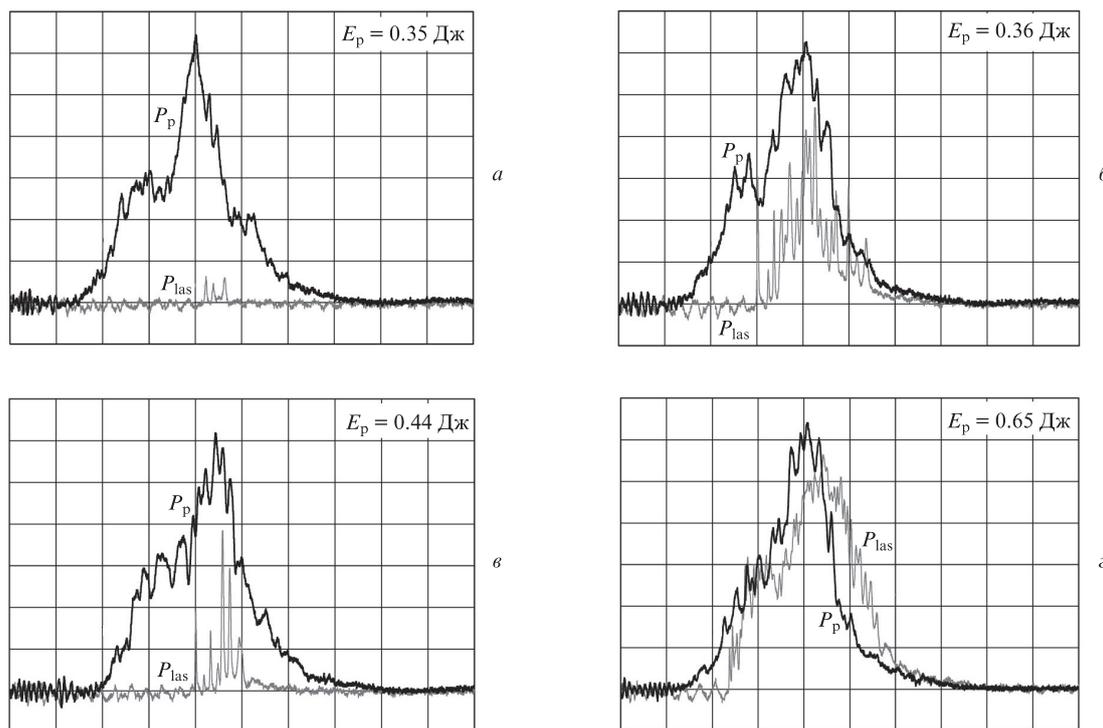


Рис.3. Осциллограммы импульсов излучения ZnSe: Fe²⁺-лазера P_{las} и лазера накачки P_p при энергиях накачки 0.35 (а), 0.36 (б), 0.44 (в) и 0.65 Дж (г). Развертка 50 нс/дел., образец № 1.

11.7 мДж. Поскольку через второй торец кристалла выводится импульс с такой же энергией, суммарная энергия генерации составляет $2E_{las} = 23.4$ мДж.

На рис.3 представлены осциллограммы импульсов генерации ZnSe: Fe²⁺- и HF-лазеров (P_{las} и P_p соответственно), снятые при разных энергиях накачки. Видно, что световые импульсы промодулированы короткими пичками. Длительность отдельного пичка (по полувысоте) в импульсе генерации вблизи порога составляет 3–7 нс. При высоком уровне накачки (рис.3,г), когда пичковая структура не слишком выражена, длительность импульса ZnSe: Fe²⁺-лазера по полувысоте составляет ~125 нс. Анализ осциллограмм показывает, что пички на импульсе ZnSe: Fe²⁺-лазера никак не связаны с пичками на импульсе накачки. Временная структура импульса накачки хаотически меняется от выстрела к выстрелу, при том что энергия HF-лазера воспроизводится с точностью не хуже 5%.

Природа пичковой структуры импульса накачки связана с неодновременностью развития генерации на разных переходах молекулы HF, в том числе с каскадным характером генерации [13]. Для накачки кристалла ZnSe: Fe²⁺ изменение во времени в течение импульса спектрального состава излучения накачки большого значения не имеет, поскольку коэффициенты поглощения излучения ионами Fe²⁺ близки для всех генерируемых в импульсе линий [4]. Поэтому воспроизводимость временной структуры импульса ZnSe: Fe²⁺-лазера оказывается лучше, чем лазера накачки. Как видно из рис. 3, количество пичков в импульсе генерации ZnSe: Fe²⁺-лазера и глубина модуляции импульса зависят от энергии накачки. С приближением к порогу генерации сверху количество пичков уменьшается, а глубина модуляции растет. Подобная временная форма импульса (со значительно большей длительностью пичков) наблюдается в импульсных твердотельных лазерах, работающих в режиме сво-

бодной генерации (см., напр., [3]). Из рис.3 также видно, что импульс ZnSe: Fe²⁺-лазера задержан относительно импульса накачки. Зависимость времени этой задержки Θ от энергии накачки приведена на рис.4. Естественно, что задержка уменьшается с увеличением энергии накачки.

В табл.2 для разных образцов указаны максимальные значения энергии излучения E_{las}^{max} и эффективности ZnSe: Fe²⁺-лазера $\eta^{max} = 2E_{las}^{max}/E_p^{max}$ (E_p^{max} – максималь-

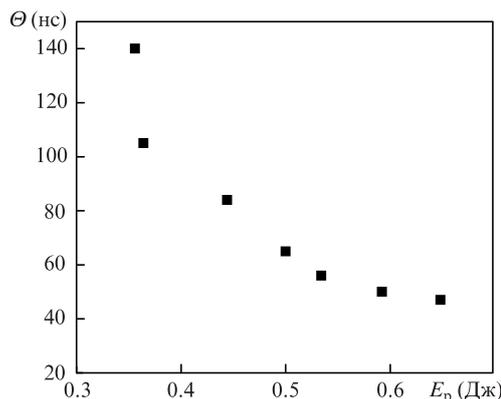


Рис.4. Зависимость времени задержки Θ импульса генерации ZnSe: Fe²⁺-лазера относительно импульса накачки от энергии накачки E_p для образца № 1.

Табл.2.

Номер образца	E_{las}^{max} (мДж)	η^{max} (%)
1	11.7	2.9
2	15.3	3.1
3	14.8	3.9
4	14.0	4.7

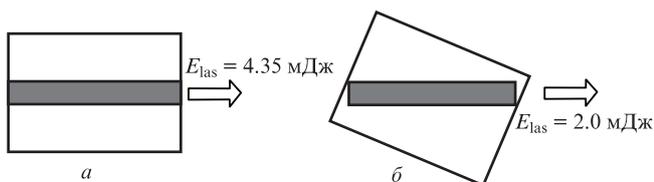


Рис.5. Кристалл ZnSe:Fe^{2+} в обычном положении относительно пучка накачки (а) и при его повороте на 45° вокруг оси пучка накачки (б). Образец № 4, ширина зоны облучения 2.5 мм, плотность энергии накачки 0.62 Дж/см².

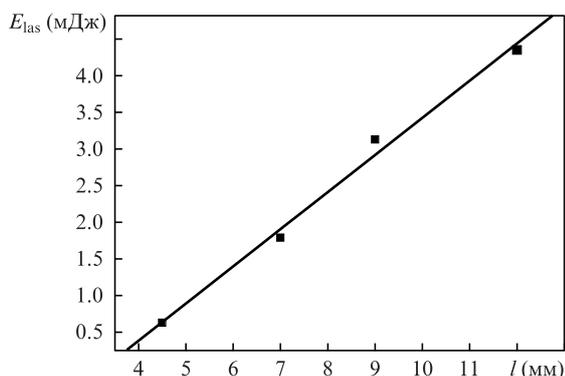


Рис.6. Зависимость энергии генерации ZnSe:Fe^{2+} -лазера E_{las} от длины зоны облучения l для образца № 4; ширина зоны облучения 2.5 мм, плотность энергии накачки 0.62 Дж/см².

ная в эксперименте энергия накачки, при которой достигается максимальная эффективность в случае линейной (как на рис. 2) зависимости энергии излучения ZnSe:Fe^{2+} -лазера от энергии накачки). Наибольшее значение $E_{\text{las}}^{\text{max}} = 15.3$ мДж было получено на образце №2. Обращает на себя внимание разброс значений η для разных образцов. Самое высокое значение ($\eta^{\text{max}} = 4.7\%$) было достигнуто на наиболее коротком образце №4 при сравнимой с остальными образцами выходной энергии лазера. Можно полагать, что в значительной мере это связано с параллельностью торцов кристалла, которые в данном случае могут играть роль зеркал резонатора лазера (параллельность трудно контролировать при ручном скалывании торцов кристалла).

Данное предположение проверялось следующим образом. Ширина зоны облучения образца №4 была уменьшена до 2.5 мм. При одинаковой энергии накачки измерялись значения E_{las} в обычном положении образца (рис.5,а) и при его повороте приблизительно на 45° вокруг оси пучка накачки (рис.5,б). Такой поворот образца привел к более чем двукратному уменьшению E_{las} . На рис.6 приведена зависимость энергии излучения ZnSe:Fe^{2+} -лазера (образец №4) от длины облучаемой зоны l при плотности энергии накачки 0.62 Дж/см² и ширине облучаемой зоны 2.5 мм. Зависимость носит линейный характер, порог генерации достигается при $l \approx 3.8$ мм.

4. Заключение

Исследованы характеристики ZnSe:Fe^{2+} -лазера в схеме с поперечной накачкой кристалла излучением нецепного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре. Примесь Fe^{2+} вводилась в кристалл ZnSe методом диффузии в условиях термодинамического равновесия одновременно через две грани, концентрация ионов

Fe^{2+} в приповерхностных слоях толщиной ~ 100 мкм составляла $\sim 10^{20}$ см⁻³. Установлено, что импульс излучения ZnSe:Fe^{2+} -лазера имеет выраженную пиковую структуру. Количество пиков в импульсе уменьшается, а глубина модуляции импульса увеличивается при уменьшении энергии накачки. Получена суммарная энергия генерации ZnSe:Fe^{2+} -лазера 30.6 мДж, что почти на порядок превышает максимальное значение (3.6 мДж [6]), полученное при использовании для накачки при комнатной температуре твердотельного лазера с модулированной добротностью.

Следует также отметить, что при накачке кристаллов ZnSe:Fe^{2+} с объемным легированием ионами Fe^{2+} (см., напр., [3, 5, 6, 14, 15]) излучением нецепных HF-лазеров энергия генерации в спектральном диапазоне 4.6–4.7 мкм будет определяться лишь размерами образцов. В случае образцов, легированных методом диффузии, с тонким приповерхностным слоем примеси получение больших энергий генерации также возможно путем простого увеличения поверхности кристалла, через которую проводится диффузия примеси и через которую затем осуществляется оптическая накачка.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №12-08-00321, 13-02-01073а, 12-02-00641а, 12-02-00465а, 13-02-12181 офи-м) и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-368.2012.2.

- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24** (23), 1720 (1999).
- Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Badikov V.V. *Opt. Express*, **13** (26), 10608 (2005).
- 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).
- Ильичев Н.Н., Данилов В.П., Калинушкин В.П., Студеникин М.И., Шапкин П.В., Насибов А.С. *Квантовая электроника*, **38** (2), 95 (2008).
- Mirov S.B., Fedorov V.V., Martyshkin D.V., Moskalev I.S., Mirov M.S., Gapontsev V.P. *Opt. Mater. Express*, **1** (5), 898 (2011).
- Myoung NoSoung, Martyshkin D.V., Fedorov V.V., Mirov S.B. *Opt. Lett.*, **36** (1), 94 (2011).
- Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24** (3), 213 (1997).
- Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Ефанов Е.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).
- 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).
- Il'ichev N.N., Shapkin P.V., Kulevsky L.A., Gulyamova E.S., Nasibov A.S. *Laser Phys.*, **17**, 130 (2007).
- Andreev S.N., Il'ichev N.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kulevskii L.A., Pashinin P.P. *Laser Phys.*, **17** (8), 1041 (2007).
- Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Пашинин П.П., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **39** (2), 179 (2009).
- Баранов В.Ю., Высикайло Ф.И., Демьянов А.В., Кочетов И.В., Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. *Квантовая электроника*, **10** (10), 2075 (1983).
- Doroshenko M.T., Jelinkova H., Koranda P., Sulc J., Basiev T.T., Osiko V.V., Komar V.K., Gerasimenko A.S., Puzikov V.M., Badikov V.V., Badikov D.V. *Laser Phys. Lett.*, **7** (1), 39 (2010).
- 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).