

Мощный импульсно-периодический HF(DF)-лазер с твердотельным генератором накачки

С.Д.Великанов, А.П.Домажиров, Н.А.Зарецкий, С.Ю.Казанцев,
И.Г.Кононов, А.А.Кромин, С.В.Подлесных, А.А.Сивачев, К.Н.Фирсов,
С.В.Харитонов, В.С.Цыкин, В.В.Щуров, И.М.Юткин

Продемонстрирована работа импульсно-периодического электроразрядного HF(DF)-лазера с полностью твердотельным генератором накачки на основе ФИД-ключей. Энергия, запасаемая в конденсаторах генератора накачки, составляла 880 Дж при напряжении холостого хода 240 кВ и частоте следования разрядных импульсов 25 Гц. Получены удельные съемы энергии излучения 3.8 Дж/л для HF-лазера и 3.4 Дж/л для DF-лазера. Прогнозируются возможности дальнейшего увеличения выходных параметров лазера.

Ключевые слова: импульсно-периодический лазер, электроразрядный HF(DF)-лазер, твердотельные ключи, ФИД-ключи.

1. Введение

В последние годы разработке и исследованиям электроразрядных HF(DF)-лазеров уделялось значительное внимание [1–18]. Интерес к этим системам обусловлен широким диапазоном их возможных применений, в частности в качестве мощных источников излучения в лидарах для мониторинга атмосферы [2, 13, 19]. Электроразрядные HF(DF)-лазеры являются экологически безопасными источниками с высокими пиковой и средней мощностями генерации при близкой к дифракционной расходимости лазерного пучка в практически важной спектральной области $\lambda = 2.6\text{--}4.2$ мкм. Они представляют несомненный интерес не только для мониторинга атмосферы, но и для исследований взаимодействия ИК излучения с жидкостями и газами [20–24], а также для оптической накачки твердотельных [25–29] и газовых [30] лазеров ИК диапазона.

Максимальные на сегодняшний день энергии излучения импульсных электроразрядных HF-лазера (400 Дж) и DF-лазера (320 Дж) получены в [18]. В области разработки и создания импульсно-периодических электроразрядных HF(DF)-лазеров с большой энергией излучения в отдельном импульсе в последние годы также отмечаются значительные успехи. Авторами [6] сообщалось о получении энергии импульса генерации HF-лазера 20 Дж при частоте следования импульсов 12 Гц. Объемный самостоятельный разряд (ОСР) в рабочей среде лазера инициировался излучением распределенного барьерного разряда.

С.Д.Великанов, А.П.Домажиров, Н.А.Зарецкий, А.А.Кромин, А.А.Сивачев, С.В.Харитонов, В.С.Цыкин, В.В.Щуров, И.М.Юткин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр» – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37

С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.В.Подлесных. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: k_firsov@rambler.ru

Поступила в редакцию 22 июня 2015 г.

В [7] получена энергия импульса генерации HF-лазера 16 Дж при частоте следования импульсов до 100 Гц. Для стабилизации ОСР применялся катод на основе анизотропно-резистивного материала. Авторами [2] создан DF-лазер с энергией импульса 40 Дж и частотой следования импульсов 10 Гц. Electroды лазера представляли собой набор лезвий, последовательно с которыми устанавливались индуктивности для повышения устойчивости ОСР [1]. В [15] достигнута энергия импульса генерации HF-лазера 67 Дж при частоте следования импульсов 20 Гц. ОСР зажигался в промежутке со сплошными металлическими электродами, никаких дополнительных мер для его стабилизации не предпринималось.

Возможности дальнейшего увеличения генерационных параметров импульсно-периодических HF(DF)-лазеров (как, впрочем, и других газоразрядных лазеров) ограничены рядом технических проблем коммутации больших энергий при работе в частотном режиме, а также сложностью обеспечения необходимой скорости газового потока в разрядных промежутках с большими размерами при наличии в газовом тракте фильтров для поглощения HF(DF) [31]. Как правило, в генераторах накачки мощных лазеров [2, 6, 7, 15, 18] применяются газоразрядные коммутаторы (в основном разрядники). Ограниченный ресурс их работы является одним из главных факторов, сдерживающих развитие и сужающих область применения электроразрядных лазеров даже в случае использования современных разрядников [32] и безнакальных тиратронов [33]. Поэтому представляется актуальным поиск альтернативных методов коммутации, предпочтительно на базе твердотельных ключей, обеспечивающих большой ресурс работы генератора.

При коммутируемой электрической энергии до нескольких десятков джоулей и выходном напряжении генератора до 100 кВ для формирования импульса накачки в импульсно-периодических газовых лазерах с успехом используются относительно низковольтные твердотельные ключи в комбинации с повышающими трансформаторами [34], биполярные транзисторы с изолированным затвором [35] и тиратроны [36]. Сформированный при включении коммутатора высоковольтный импульс обычно укорачивается магнитными системами сжатия с целью

достижения требуемых для зажигания ОСР параметров [34, 36]. Применяются также схемы формирования высоковольтного импульса, в которых одновременно используются газоразрядный коммутатор и полупроводниковый прерыватель тока (SOS-диоды) в индуктивном накопителе [37]. Очевидно, что возможности применения этих методов для формирования импульсов с электрической энергией килоджоульного уровня, напряжением свыше 100 кВ и током до сотен килоампер, необходимых для накачки импульсно-периодических HF(DF)-лазеров с большой энергией излучения в импульсе, ограничены.

В работе [17] впервые сообщалось о создании мощного импульсного HF-лазера с полностью твердотельным генератором накачки на основе ФИД-ключей [38]. Электрическая энергия, запасаемая в конденсаторах генератора, достигала примерно 1 кДж при напряжении холостого хода 240 кВ. Цель настоящей работы – исследование мощного импульсно-периодического HF(DF)-лазера с полностью твердотельным генератором накачки.

2. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис.1. ОСР зажигался между двумя одинаковыми диоралюминиевыми электродами с межэлектродным расстоянием 13 см. Никаких специальных мер для инициирования или стабилизации разряда не предпринималось. Резонатор лазера был образован плоским зеркалом из Al и плоскопараллельной пластиной из CaF₂. Энергия излучения измерялась пироэлектрической измерительной головкой Coherent J-50 MB-HE. Форма импульса излучения контролировалась фотоприемником фирмы Vigo-system Ltd с временным разрешением около 1 нс.

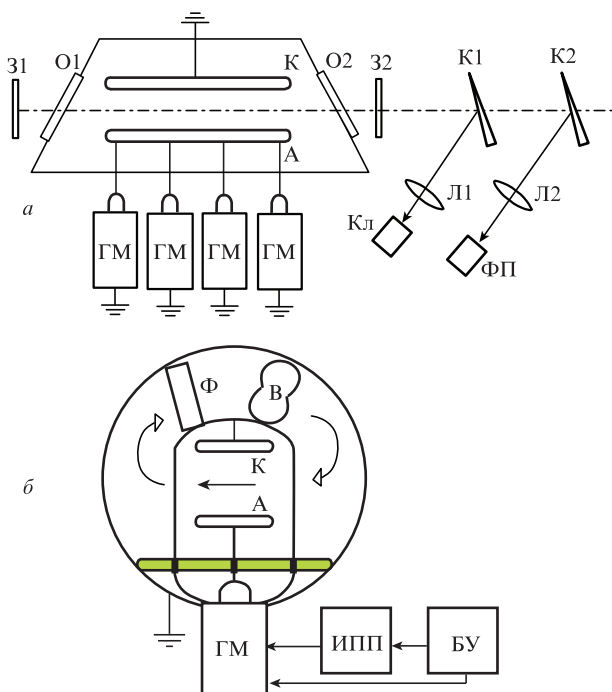


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки (а) и схема подключения генераторного модуля (ГМ) к электродам (б): 31, 32 – зеркала резонатора; O1, O2 – просветленные окна из CaF₂; K1, K2 – клинья из CaF₂; Л1, Л2 – линзы; Кл – калориметр; ФП – фотоприемник; К – катод; А – анод; Ф – фильтр; В – блок вентиляторов; ИПП – источник первичного питания; БУ – блок управления.

Рабочими средами служили смеси газов SF₆-H₂ и SF₆-D₂ при давлении $p = 0.07-0.1$ атм. Прокачка газовой смеси через разрядную зону осуществлялась блоком вентиляторов. Для утилизации отработанных молекул HF(DF) в газодинамическом тракте были установлены кассеты с фильтрами.

Генератор накачки лазера (рис.1), разработанный и изготовленный ЗАО НПО «Фид-Техника», состоял из трех основных блоков: источника первичного питания AC \Rightarrow DC со средней мощностью 25 кВт; блока управления; импульсного высоковольтного генератора накачки, состоящего, в свою очередь, из четырех генераторных модулей (ГМ), которые подключались параллельно к электродам разрядного промежутка, как показано на рис.1,а. На рис.1,б приведена схема подключения отдельного ГМ. Модуль подключался через высоковольтные вводы в диэлектрической крышке разрядной камеры. Внутри камеры подключение к аноду осуществлялось несколькими медными проводниками таким образом, чтобы обеспечить минимальную индуктивность подводов при их прозрачности для газового потока.

Генераторные модули были выполнены по схеме 54-каскадного генератора Аркадьева–Маркса (в генераторе, использовавшемся в [17], было 80 каскадов) на основе твердотельных ФИД-ключей, имеющих время переключения не более 1 нс [38]. Внешняя нестабильность включения ГМ по отношению к внешнему запуску не превышала 0.2 нс при изменении напряжения на выходе ГМ в диапазоне 100–240 кВ. Запуск ГМ осуществлялся импульсом напряжения с амплитудой 50 В и длительностью 100 нс. Суммарное собственное сопротивление ФИД-ключей при рабочем напряжении 240 кВ и токе около 10 кА в одном ГМ не превышает 1 Ом. Ключи в таком режиме имеют ресурс работы более 10⁹ импульсов. Емкость в ударе каждого из четырех ГМ составляла 7.6 нФ. Как и в [17], ГМ размещались в заполняемых трансформаторным маслом металлических контейнерах с габаритами 125 × 35 × 14 см. Обостряющие конденсаторы, подключаемые параллельно разрядному промежутку для уменьшения длительности импульса тока, в отличие от [17], в данном варианте лазера не использовались. Уменьшение числа каскадов в ГМ позволило снизить индуктивность разрядного контура так, что устойчивый ОСР в смесях SF₆-H₂ и SF₆-D₂ мог быть реализован при прямом подключении генератора накачки к электродам.

Максимальная электрическая энергия, запасаемая в конденсаторах генератора накачки, составляла 880 Дж при максимальном выходном напряжении 240 кВ и максимальном допустимом токе (в режиме короткого замыкания) 80 кА. Генератор накачки был рассчитан на долговременную работу при частоте следования разрядных импульсов до 25 Гц.

В процессе экспериментов контролировались напряжение на разрядном промежутке U и разрядный ток I с помощью калиброванных резистивного делителя напряжения и малоиндуктивного шунта соответственно (на рис.1 не показаны). Шунт устанавливался в разрыв токоведущей земляной шины.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.2 приведена фотография ОСР в разрядной камере, снятая при работе установки в режиме однократ-

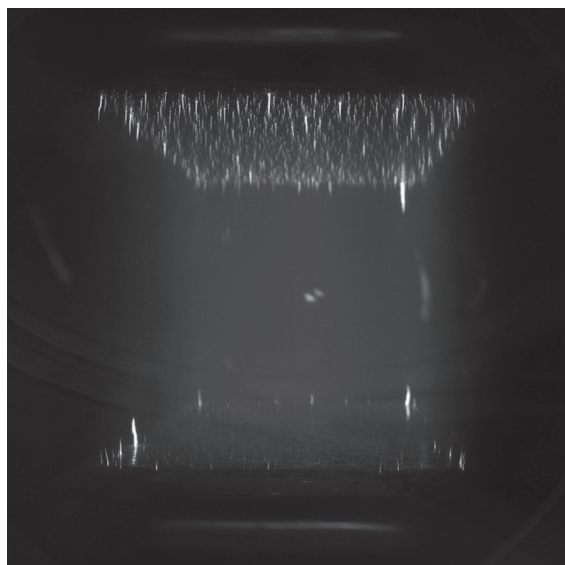


Рис.2. Фотография области ОСП при напряжении холостого хода ГМ $U_g = 240$ кВ и давлении смеси SF_6-H_2 $p = 0.09$ атм. Вверху – катод, внизу – анод.

ных импульсов на смеси SF_6-H_2 с давлением $p = 0.09$ атм. Видно, что ОСП имеет достаточно однородную структуру, за исключением отдельных незавершенных плазменных каналов, длина которых не превышает 2 см. Вид ОСП в импульсно-периодическом режиме функционирования лазера (визуальное наблюдение) не отличался существенно от показанного на рис.2, поскольку скорость газового потока была достаточной для многократной смены газа в зоне разряда между импульсами при частоте их следования 25 Гц.

На рис.3 приведены осциллограммы напряжения на разрядном промежутке U , тока через промежуток I и импульса генерации лазера P при напряжении холостого хода ГМ $U_g = 240$ кВ и давлении смеси SF_6-H_2 $p = 0.09$ атм. Высокочастотные колебания на осциллограммах напряжения и тока обусловлены присутствием в цепи паразитных емкостей (в самом ГМ и, в основном, в зонах подключения ГМ к высоковольтным вводам в камеру). Из-за наличия паразитной емкости удлиняется также фронт нарастания напряжения на промежутке, а шунт регистрирует ток зарядки паразитной емкости одновременно с началом импульса напряжения (в начальной фазе осциллограмма тока на рис.3 искажена электрической наводкой). Длительности разрядного тока по уровню 0.1 и импульса генерации лазера по уровню 0.5 от амплитудных значений составляют около 290 и 180 нс соответственно.

При $U_g = 240$ кВ, давлении смеси $p = 0.09$ атм и оптимизации соотношения концентраций компонентов [17] удельный съем энергии лазерного излучения W_{sp} составил 3.8 Дж/л для HF-лазера и 3.4 Дж/л для DF-лазера.

В настоящей серии экспериментов на установке отсутствовала система, которая должна компенсировать убыль исходных компонентов смеси, диссоциирующих в плазме объемного разряда. Поэтому при использовании смесей $SF_6-H_2(D_2)$ с оптимальным по энергии излучения лазера соотношением концентраций компонентов [17] при частоте следования разрядных импульсов 25 Гц производились лишь кратковременные пуски лазера (до 10 с), т.к. энергия генерации быстро снижалась с увеличением количества импульсов из-за роста отношения концентра-

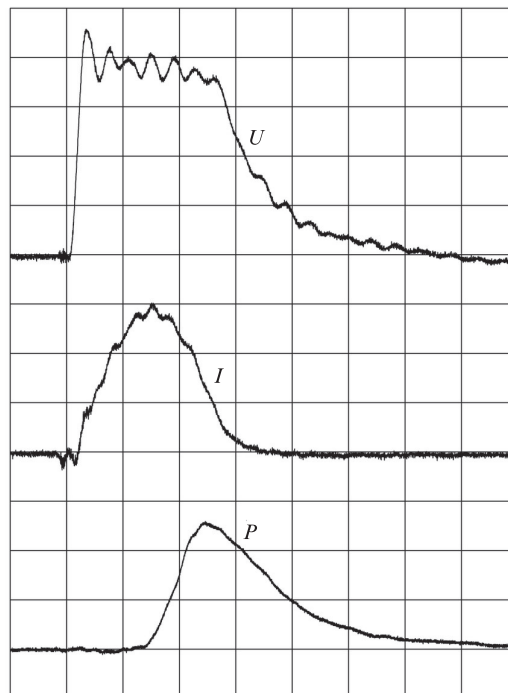


Рис.3. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке U , тока через промежуток I и импульса генерации лазера P при $U_g = 240$ кВ и давлении смеси SF_6-H_2 $p = 0.09$ атм. Масштаб по вертикальной оси составляет 27 кВ/дел. для U , 15 кА/дел. для I , а P дано в относительных единицах, развертка – 100 нс/дел.

ции SF_6 к концентрации $H_2(D_2)$ и соответствующего ухода этой величины от оптимального значения. Пуски лазера продолжительностью до 90 с осуществлялись при использовании смесей с повышенным содержанием $H_2(D_2)$. На рис.4 для иллюстрации приведены зависимости энергии излучения лазера W от номера разрядного импульса N для смесей с повышенным содержанием D_2 при частоте следования импульсов 25 Гц. Как видно из рис.4, энергия генерации сначала увеличивается с ростом N , что связано с приближением отношения концентраций компонентов смеси к оптимальному значению по мере их диссоциации. Резкий спад энергии при больших N обусловлен рассогласованием генератора накачки с плазменной нагрузкой из-за уменьшения напряжения горения ОСП, вызванного уменьшением содержания SF_6 в смеси с одновременным накоплением менее электроотрицательных продуктов его диссоциации.

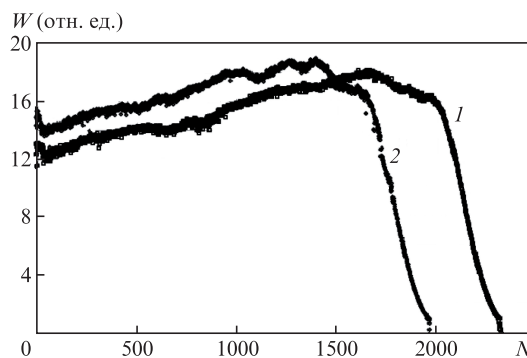


Рис.4. Зависимости энергии излучения лазера W от номера разрядного импульса N для смесей с повышенным содержанием D_2 при частоте следования импульсов 25 Гц и давлении смесей $p = 0.1$ атм.: $SF_6:D_2 = 7.5:2.5$, $U_g = 225$ кВ (1) и $SF_6:D_2 = 7:3$, $U_g = 240$ кВ.

В заключение отметим, что модульная структура генератора накачки позволяет увеличивать энергию излучения импульсно-периодического лазера за счет простого увеличения числа подключаемых ГМ при соответствующем увеличении объема разрядной зоны.

4. Заключение

Таким образом, нами впервые продемонстрирована работа мощного импульсно-периодического электроразрядного HF(DF)-лазера с полностью твердотельным генератором накачки. Представляется перспективным применение таких генераторов и для накачки других типов электроразрядных лазеров.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.М.Ефанову, М.В.Ефанову и П.М.Ярину за разработку твердотельного генератора накачки и плодотворное обсуждение результатов экспериментов.

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-02-06005 и 15-08-02562.

- Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д., Воронов С.Л., Воронин В.В., Запольский А.Ф., Золотов М.И., Кириллов Г.А., Мищенко Г.М., Подалов А.М., Селемир В.Д., Урлин В.Д., Фролов Ю.Н., Циберев В.П. *Квантовая электроника*, **30** (3), 225 (2000).
- Аксенов Ю.Н., Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д., Воронов С.Л., Воронин В.В., Запольский А.Ф., Кириллов Г.А., Коваленко О.И., Лазаренко В.И., Мисько В.М., Муругов В.М., Селемир В.Д., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н., Циберев В.П. *Квантовая электроника*, **31** (4), 290 (2001).
- Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Oreshkin V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 374 (1998).
- Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30** (3), 207 (2000).
- Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 215205 (2009).
- Lacour B., Gagnol C., Priget P., Puech V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 334 (1998).
- Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. *Квантовая электроника*, **31** (3), 218 (2001).
- Bychkov Yu., Gortchakov S., Lacour B., Pasquiers S., Puech V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 380 (2003).
- Tarasenko V.F., Panchenko A.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6101**, 61011P (2006).
- Азаров М.А., Климук Е.А., Кутумов К.А., Трошиненко Г.А., Лакур Б. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1023 (2004).
- Velikanov S.D., Evdokimov P.A., Zapol'sky A.F., Kodola B.E., Sokolov D.V., Cernopyatov V.Y., Yakovlev E.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7131**, 71310V (2008).
- Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **25** (10), 925 (1998).
- Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Podlesnykh S.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 505202 (2011).
- Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Лебедев А.А., Подлесных С.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **41** (8), 703 (2011).
- 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).
- Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40** (6), 484 (2010).
- 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).
- Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Saifulin A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 31 (2002).
- O'Connor S.J., Waluslay H.L., Pasley J.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3493**, 255 (1998).
- Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Samokhin A.A. *Laser Phys.*, **17** (6), 834 (2007).
- Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Пашинин П.П., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **39** (2), 179 (2009).
- 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).
- Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Косый И.А., Тарасова Н.М., Фирсов К.Н. *Физика плазмы*, **35** (3), 281 (2009).
- Artem'ev K.V., Kazantsev S.Yu., Kononov N.G., Kossyi I.A., Malykh N.I., Popov N.A., Tarasova N.M., Filimonova E.A., Firsov K.N. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **46** (5), 055201 (2013).
- 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).
- 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).
- Гавришук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **44** (6), 505 (2014).
- Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 085001 (2014).
- 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).
- Burtsev A.P., Burtseva I.G., Mashendzhinov V.I., Sudarikov V.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5479**, 174 (2004).
- Буцький И.Л., Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Кодола Б.Е., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **31** (11), 957 (2001).
- Горноста́й-Польский С.А., Гришин А.В., Бальябин М.Г., Жильцов А.В. Патент РФ № 2241288. Приоритет от 20.01.2003.
- Бочков В.Д., Болотов А.В., Гейман В.Г., Ландль Н.В., Ивашов Р.В., Королёв Ю.Д., Франц О.Б., Шемакин И.А. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **67**, 1286 (2003).
- Basting D. et al (Eds). *Excimer Laser Technology* (Gottingen, Lambda Physik AG, 2001).
- Вартапетов С.К., Грязнов О.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **39**, 714 (2009).
- Borisov V., Khristoforov O., Kirykhin Yu., Vinokhodov A., Demin A., Eltzov A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 348 (2001).
- Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33** (5), 401 (2003).
- FID GmbH. <http://www.fidtech.com>.