

Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки

С.Д.Великанов, С.Г.Гаранин, А.П.Домажиров, В.М.Ефанов, М.В.Ефанов, С.Ю.Казанцев, Б.Е.Кодола, Ю.Н.Комаров, И.Г.Кононов, С.В.Подлесных, А.А.Сивачев, К.Н.Фирсов, В.В.Щуров, П.М.Ярин

Показана возможность создания мощных нецепных электроразрядных HF-лазеров с полностью твердотельными источниками накачки. Максимальная энергия, запасаемая в конденсаторах источника накачки на основе твердотельных ФИД-ключей, составляла 990 Дж при напряжении холостого хода 240 кВ. На смеси SF₆ с водородом получена энергия излучения 30 Дж в импульсе при электрическом КПД порядка 3 %.

Ключевые слова: нецепной HF-лазер, твердотельные ключи, ФИД-ключи, объемный самостоятельный разряд.

В настоящее время для возбуждения активных сред импульсных и импульсно-периодических газовых лазеров широко применяется объемный самостоятельный разряд (ОСР) [1–3]. Время, в течение которого разряд существует в форме ОСР, крайне ограничено из-за развития плазменных неустойчивостей [3, 4]. Поэтому для получения максимально однородного ОСР и достижения оптимальных условий возбуждения среды необходимо выполнить жесткие требования к параметрам высоковольтного импульса, формируемого генератором накачки лазера. Это требования по длительности переднего фронта и амплитуде напряжения, а также по амплитуде и предельной длительности разрядного тока. Важным параметром, определяющим возможности приложений импульсно-периодических лазеров, является и ресурс работы элементов генератора накачки. Предельная длительность импульса тока, задаваемая временем развития плазменной неустойчивости [2, 4], зависит от состава рабочей смеси, удельного энерговыклада в плазму разряда и мер, принимаемых для подавления плазменной неустойчивости. Однако даже в нецепных HF(DF)-лазерах, где ОСР реализуется достаточно просто [5] (по сравнению, например, с эксимерными лазерами [6]), длительность токового импульса не должно превышать нескольких сотен наносекунд [7]. Возможности достижения столь малых длительностей ввода электрической энергии в газоразрядную плазму при больших разрядных напряжениях и токах во многом определяются характеристиками коммутирующих устройств, используемых в гене-

раторе накачки. Именно проблема коммутаторов, в том числе ресурса их работы, является одним из главных факторов, сдерживающих развитие мощных электроразрядных лазеров и сужающих сферу их приложений. При коммутируемой электрической энергии до нескольких десятков джоулей и импульсном напряжении на выходе генератора до 100 кВ для формирования импульса накачки в импульсно-периодических лазерах с успехом используются относительно низковольтные твердотельные ключи в комбинации с повышающими трансформаторами [6], биполярные транзисторы с изолированным затвором [8] и тиратроны [9]. Сформированный при включении коммутатора высоковольтный импульс обычно укорачивается магнитными системами сжатия с целью достижения требуемых для зажигания ОСР параметров [6, 8]. По очевидным причинам, не требующим комментариев, эти методы не пригодны в случае, если для накачки лазера необходимо сформировать импульс с электрической энергией в несколько килоджоулей, напряжением в сотни киловольт и током в сотни килоампер, как, например, при инициировании химической реакции в мощных электроразрядных HF(DF)-лазерах [5, 7, 10, 11]. В подобных лазерных системах коммутация обычно осуществляется газонаполненными разрядниками [10, 11], что при переходе к частотному режиму функционирования сопровождается рядом проблем, связанных с недостаточным ресурсом работы коммутаторов даже при использовании самых современных разработок разрядников [12] и безнакальных тиратронов [13]. Поэтому представляется актуальным поиск новых принципов коммутации, желательного на базе твердотельных ключей, с целью создания надежных генераторов накачки для мощных электроразрядных лазеров.

В настоящей работе приведены первые результаты исследований возможности создания мощного нецепного электроразрядного HF-лазера с генератором накачки на основе твердотельных ФИД-ключей (FID-switches) [14].

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис.1. ОСР зажегся между двумя одинаковыми диэлектрическими электродами, профиль рабочей поверхности которых рассчитывался в соответ-

С.Д.Великанов, С.Г.Гаранин, А.П.Домажиров, Б.Е.Кодола, Ю.Н.Комаров, А.А.Сивачев, В.В.Щуров. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: velikanov@otd13.vniief.ru, adom@pisem.net, hvadim45@mail.ru

В.М.Ефанов, М.В.Ефанов, П.М.Ярин. ЗАО НПО «Фид-Техника», Россия, 195220 С.-Петербург, ул. Гжатская, 27; e-mail: vlad@fidtech.com, mike@fidtech.com

С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.В.Подлесных, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kazan@kapella.gpi.ru, k_firsov@rambler.ru

Поступила в редакцию 5 марта 2010 г., после доработки – 16 апреля 2010 г.

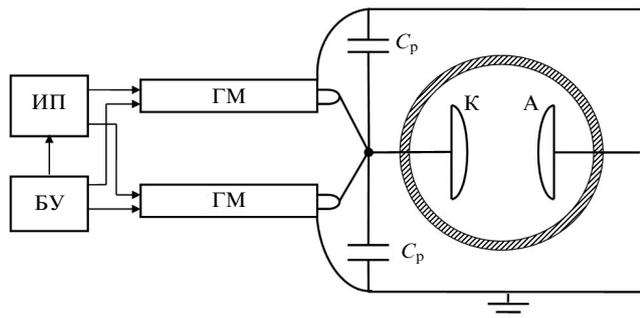


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
 А – анод; К – катод; ИП – источник питания; БУ – блок управления;
 ГМ – генераторный модуль; C_p – обостряющий конденсатор емкостью 7.5 нФ.

ствии с рекомендациями Степперча [15]. Поверхность катода была подвергнута пескоструйной обработке для нанесения на нее мелкомасштабных неоднородностей, облегчающих развитие ОСР в форме самоиницирующегося объемного разряда [16]. Размеры разрядной зоны составляли $10 \times 11 \times 80$ см (межэлектродное расстояние 10 см). Следует обратить внимание на то, что в описываемой установке отсутствуют какие бы то ни было источники иницирования ОСР. Увеличение энергии генерации малогабаритных НФ-лазеров с малой длительностью разрядного тока (менее 150 нс) [17, 18], наблюдаемое при использовании УФ или рентгеновской подсветки промежутка, обусловлено, как показано в [19], исключительно стабилизацией времени запаздывания и амплитуды напряжения электрического пробоя промежутка, а также выравниванием за счет фотоэффекта на катоде распределения плотности тока по поверхности катода. При больших разрядных промежутках и, следовательно, достаточно больших длительностях разрядного тока в иницировании ОСР в смесях газов на основе SF_6 , в частности в рабочих средах НФ-лазеров, нет необходимости. В таких условиях ОСР развивается в форме самоиницирующегося объемного разряда, в том числе и в промежутках с высоким краевым усилением электрического поля, при наличии на поверхности катода мелкомасштабных неоднородностей [5, 7, 16, 20]. Электроды размещались в центре цилиндрической диэлектрической камеры длиной 120 см с внутренним диаметром 50 см. Резонатор лазера был образован зеркалом из алюминия с радиусом кривизны $R = 20$ м и плоскопараллельной пластиной из BaF_2 , размещенными непосредственно на торцах разрядной камеры. Энергия излучения лазера измерялась с помощью матрицы калориметров типа Е-60, установленной в прямом лазерном пучке. Форма импульса излучения лазера контролировалась фотоприемником PD3-10.6. Рабочими средами служили смеси газов $SF_6 : C_2H_6 = 20 : 1$ и $SF_6 : H_2 = 9 : 1$.

Генератор накачки лазера, разработанный и изготовленный НПО «ФИД-Техника» (Санкт-Петербург), состоит из трех основных блоков: источника первичного питания (ИП) со средней мощностью 25 кВт, блока управления (БУ) и импульсного высоковольтного генератора накачки, в свою очередь состоящего из четырех генераторных модулей (ГМ), которые подключаются параллельно к электродам разрядного промежутка (см. рис.1, для простоты показаны лишь два модуля).

Генераторные модули выполнены по схеме генератора Аркадьева – Маркса на основе малоиндуктивных кон-

денсаторов с полипропиленовой изоляцией (удельная плотность запасаемой энергии до 0.1 Дж/см³) и твердотельных ФИД-ключей с временем переключения не более 1 нс [14]. Временная нестабильность включения ГМ по отношению к внешнему запуску не превышает 0.2 нс и не изменяется при изменении напряжения на выходе ГМ от 100 до 240 кВ. Запуск ГМ осуществляется импульсом напряжения положительной полярности с амплитудой 50 В и длительностью 100 нс. Суммарное собственное сопротивление ФИД-ключей при рабочем напряжении 240 кВ и токе ~ 10 кА в одном ГМ составляет не более 1 Ом. Ресурс безотказной работы ФИД-ключей в таком режиме превышает 10^9 имп. Собственное волновое сопротивление каждого из четырех ГМ равно ~ 11 Ом при емкости в ударе $C_0 = 8.6$ нФ. ГМ размещались в заполняемых трансформаторным маслом металлических контейнерах с габаритами $125 \times 35 \times 14$ см.

Максимальная запасаемая в конденсаторах генератора накачки электрическая энергия составляла 990 Дж при максимальном выходном напряжении 240 кВ и максимальном допустимом токе (в режиме короткого замыкания) 80 кА. Генератор накачки рассчитан на долговременную работу при частоте следования разрядных импульсов до 25 Гц. Настоящая серия экспериментов выполнялась в режиме однократных импульсов, поскольку используемая здесь разрядная камера не позволяла осуществлять быструю смену рабочей смеси в разрядном промежутке.

В процессе экспериментов напряжение на разрядном промежутке и разрядный ток контролировались с помощью резистивного делителя напряжения и малоиндуктивных шунтов соответственно (на рис.1 не показаны). Шунты включались в разрывы токоведущих земляных шин. С целью уменьшения длительности разрядного тока в исследуемой системе была предусмотрена установка малоиндуктивных обостряющих конденсаторов C_p емкостью 7.5 нФ, подключаемых параллельно разрядному промежутку. Суммарная емкость обостряющих конденсаторов составляла 30 нФ.

На рис.2,а приведены осциллограммы напряжения и тока ОСР в смеси $SF_6 - C_2H_6$ при суммарном давлении 85 Тор и выходном напряжении 240 кВ, снятые в случае прямого нагружения ГМ на разрядный промежуток, без подключения обостряющих конденсаторов. Видно, что в этом режиме длительность разрядного тока превышает 400 нс из-за большой индуктивности разрядного контура (около 800 нГн вместе с собственной индуктивностью ГМ). При таких длительностях тока разряд в водородсодержащей смеси неустойчив. Согласно расчету по осциллограммам напряжения и тока, введенная в плазму ОСР энергия составляет $\sim 70\%$ от энергии, запасенной в конденсаторах ГМ. Учитывая низкое собственное сопротивление ФИД-ключей, можно полагать, что основные потери энергии в разрядном контуре обусловлены недостаточной добротностью используемых здесь конденсаторов.

Подключение к промежутку обостряющих конденсаторов позволило получить ОСР в смеси $SF_6 - H_2$ во всем исследованном диапазоне изменения выходного напряжения ГМ, вплоть до максимального значения 240 кВ. На рис.2,б представлены типичные осциллограммы напряжения на промежутке и осциллограммы разрядного тока, снятые в схеме с обостряющими конденсаторами. Видно, что по сравнению со схемой прямого нагружения

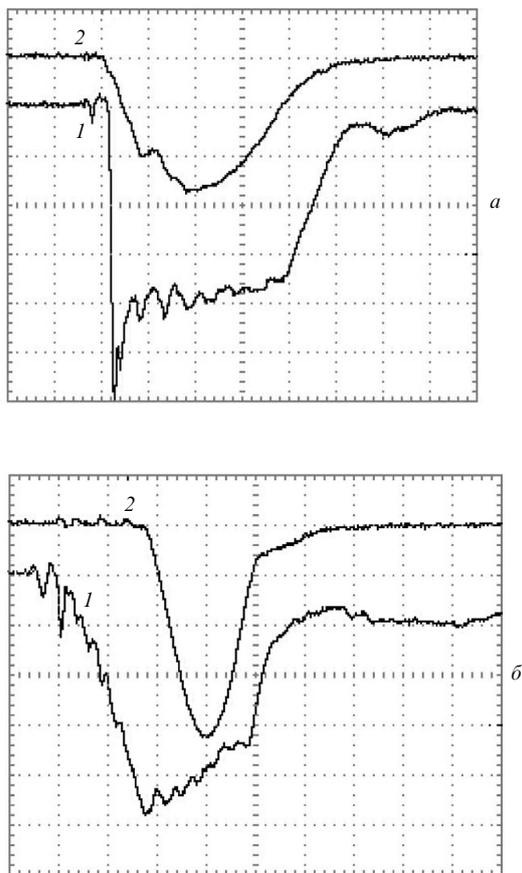


Рис.2. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке (1) и тока ОСР (2) при выходном напряжении генератора 240 кВ в случае прямого нагружения генератора на разрядный промежуток, смесь SF₆:C₂H₆ = 20:1 при давлении 85 Тор (а) и при использовании схемы с подключением обостряющих конденсаторов, смесь SF₆:H₂ = 9:1 при давлении 88 Тор (б). Напряжение 24.8 кВ/дел., ток 8.4 кА/дел., развертка 100 нс/дел.

ГМ на промежуток длительность тока уменьшилась приблизительно в два раза. На рис.3 для иллюстрации однородности накачки приведена фотография ОСР в смеси

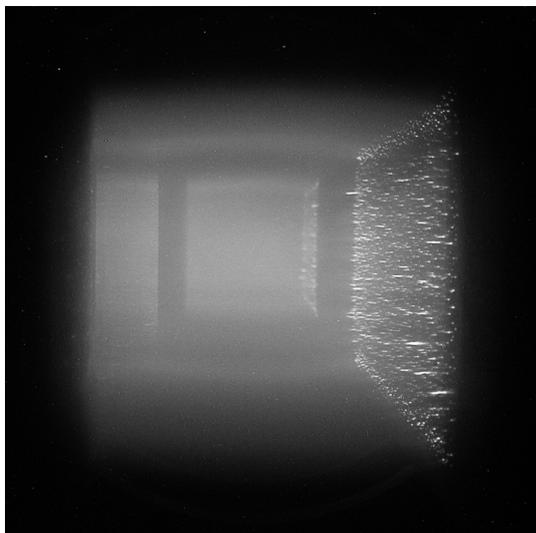


Рис.3. Фотография ОСР в смеси SF₆:H₂ = 9:1 при давлении 88 Тор и выходном напряжении 240 кВ.

SF₆ – H₂ при выходном напряжении ГМ 240 кВ и использовании в схеме обостряющих конденсаторов.

Максимальная энергия генерации лазера на смеси SF₆ – H₂ составила 30 Дж при электрическом КПД порядка 3 %. На смеси SF₆ – C₂H₆ получена энергия 28 Дж при КПД около 2.8 %. Импульс генерации имел типичную для нецепных HF-лазеров колоколообразную форму, длительность импульса по половине амплитуды составляла 140 нс.

Обращает на себя внимание тот факт, что в настоящих экспериментах КПД лазера на смеси SF₆ – H₂ оказался выше, чем на смеси SF₆ – C₂H₆. Подобная ситуация обычно наблюдается при низких удельных вкладах электрической энергии в плазму разряда и коротких токовых импульсах (см., напр., [17, 21]; в настоящих экспериментах удельный энерговклад также не превышал 90 Дж/л при длительности токового импульса в смеси SF₆ с водородом ~250 нс). В этих условиях ОСР в водородсодержащих смесях устойчив. При этом, как установлено в [21], эффективность образования атомарного фтора в них выше, чем в смесях SF₆ с этаном. При больших энерговкладах и длительностях токового импульса ОСР в водородсодержащих смесях теряет устойчивость, и происходит естественное снижение КПД по сравнению с КПД лазера на смесях SF₆ с углеводородами [5, 7, 21], где запас устойчивости ОСР в координатах энерговклад – длительность токового импульса значительно больше [7, 20].

Таким образом, нами продемонстрирована работоспособность мощного импульсного нецепного HF-лазера с полностью твердотельным генератором накачки на основе ФИД-ключей. Полученные результаты позволяют рассчитывать на возможность использования этого генератора и в импульсно-периодическом режиме функционирования лазера, что станет предметом дальнейших исследований. В заключение отметим, что генераторы накачки на основе твердотельных ФИД-ключей могут с успехом использоваться не только в HF-лазерах, но и во множестве газоразрядных лазеров на других активных средах [6, 8, 9].

Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 08-08-00242, 09-02-00475).

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Газовые и плазменные лазеры (М.: Физматлит, 2005, т. XI-4).
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника (М.: Наука, 2004).
3. Осипов В.В. УФН, **170**, 225 (2000).
4. Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахимов А.Т. Физические явления в газоразрядной плазме (М.: Наука, 1995).
5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Газовые и плазменные лазеры (М.: Физматлит, 2005, т. XI-4, с. 761).
6. Basting D. et al (Eds). *Excimer Laser Technology* (Gottingen: Lambda Physik AG, 2001).
7. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Изв. РАН. Сер. физич., **64**, 1439 (2000).
8. Варгапетов 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).
9. Borisov V., Khristoforov O., Kirykhin Yu., Vinokhodov A., Demin A., Eltzov A. *Журнал SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 348 (2001).
10. 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., Подавалов А.М., Селемир В.Д., Урлин В.Д., Фролов Ю.Н., Циберев В.П. Квантовая электроника, **30**, 225 (2000).
11. 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**, 290 (2001).
12. Горностай-Польский С.А., Гришин А.В., Балябин М.Г., Жильцов А.В. *Сильноточный газонаполненный разрядник*. Патент РФ № 2241288 с приоритетом от 20.10.2003.
 13. Бочков В.Д., Болотов А.В., Гейман В.Г., Ландль Н.В., Ивашов Р.В., Королёв Ю.Д., Франц О.Б., Шемякин И.А. *Изв. РАН. Сер. Физич.*, **67**, 1286 (2003).
 14. FID GmbH. <http://www.fidtech.com>.
 15. Stappaerts E.A. *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 1018 (1982).
 16. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
 17. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 320 (2004).
 18. Lacour V., Pasquiers S., Postel C., Puech V. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, **72**, 289 (2001).
 19. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **34**, 111 (2004).
 20. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 123 (1998).
 21. Richeboeuf L., Pasquiers S., Legentil M., Puech V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **31**, 373 (1998).