V. D. Bulaev, V. S. Gusev, S. Yu. Kazantsev, I. G. Kononov, S. L. Lysenko, Yu. B. Morozov, A. N. Poznyshev, K. N. Firsov,
Kvantovaya Elektronika, 2010, Volume 40, Number 7, 615–618

https://www.mathnet.ru/eng/qe14323

PACS 42.55.Ks; 42.60.Jf; 42.60.Lh

Электроразрядный импульсно-периодический HF-лазер с большой энергией излучения

В.Д.Булаев, В.С.Гусев, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.Л.Лысенко, Ю.Б.Морозов, А.Н.Познышев, К.Н.Фирсов

Разработан и исследован мощный нецепной электроразрядный импульсно-периодический HF-лазер на смесях SF_6 с углеводородами. Получена энергия генерации в импульсе $W_g = 67$ Дж при частоте следования импульсов 20 Гц.

***Ключевые слова**: HF-лазер, объемный самостоятельный разряд, мощный импульсно-периодический лазер.*

1. Введение

В последние годы разработке и изучению импульсных и импульсно-периодических нецепных HF(DF)-лазеров с инициированием химической реакции объемным самостоятельным разрядом (ОСР) уделяется большое внимание [1 – 12]. Интерес к этим системам обусловлен широким спектром их возможных практических применений, в частности в качестве источников мощного когерентного излучения в лидарах для экологического мониторинга атмосферы [2, 13, 14]. В настоящее время нецепные электроразрядные HF(DF)-лазеры являются единственными экологически безопасными источниками с высокими пиковой и средней мощностями генерации при близкой к дифракционному пределу расходимости лазерного пучка в практически важной области спектра $\lambda = 2.6 - 4.2$ мкм. Такие источники представляют несомненный интерес не только для мониторинга атмосферы, но и для проведения ряда физических экспериментов по взаимодействию ИК излучения с жидкостями и газами [15 – 17], а также для оптической накачки других газовых лазеров ИК диапазона [18].

До 1995 г. выходная энергия нецепных лазеров, инициируемых ОСР, едва превышала 10 Дж. Большинство исследователей объясняли это трудностью осуществления самого ОСР в смесях газов на основе SF_6, использующегося в нецепных HF(DF)-лазерах в качестве донора атомарного фтора. Однако для эффективных применений, например в лидарах, необходимо было увеличить энергию лазера в импульсе по крайней мере до нескольких десятков джоулей [2]. Так, энергия генерации цепного DF-лазера в лидаре, позволяющем измерять концентрации аэрозолей на расстояниях до 15 км, составляет 100 Дж [19].

Обнаружение эффекта самоинициирующегося объемного разряда в сильно электроотрицательных газах [3, 4] дало возможность увеличить энергию генерации импульсных нецепных лазеров более чем на порядок. Были получены энергия HF-лазера 400 Дж и энергия DF-лазера 320 Дж при электрическом КПД соответственно 4.3 % и 3.4 % [5], показана также возможность дальнейшего масштабирования импульсных нецепных лазеров.

Успехи в области разработки и создания импульсно-периодических нецепных электроразрядных HF(DF)-лазеров с большой энергией излучения в отдельном импульсе оказались не столь значительными. По-видимому, это связано с рядом технических проблем коммутации больших энергий при работе в частотном режиме, а также с трудностью обеспечения высокой скорости смены рабочей смеси в разрядных промежутках с большими размерами при наличии в газовом тракте фильтров для поглощения HF(DF) [20]. В [7] энергия генерации HF-лазера составила 20 Дж при частоте следования импульсов 12 Гц. ОСР инициировался распределенным барьерным разрядом, располагавшимся под плоским сеточным электродом. Поверхность второго электрода имела профиль, обеспечивающий однородность электрического поля в разрядном промежутке. В [8] получена энергия генерации HF-лазера 16 Дж при частоте следования импульсов до 100 Гц. Для стабилизации ОСР авторы этой работы применяли катод на основе анизотропно-резистивного материала. В [2] был создан DF-лазер с энергией излучения 40 Дж и частотой следования импульсов 10 Гц. Лазер состоял из трех однотипных разрядных модулей. Зажигание ОСР в модулях осуществлялось секционированным источником накачки с общей системой синхронизации. Электроды модулей были выполнены в виде набора лезвий, что, по мнению авторов [1], позволяло повысить устойчивость ОСР. Таким образом, в упомянутых работах для достижения устойчивости ОСР в импульсно-периодических HF(DF)-лазерах с достаточно высокими выходными характеристиками и соответственно с большой запасаемой электрической энергией применялись специальные меры по его стабилизации: подсветка разрядного промежутка, использование однородного электрического поля [7], анизотропно-резистивного катода [8], модульной конструкции и профилированных лезвийных электродов [1, 2].

Целью настоящей работы являлось исследование возможности достижения большой энергии излучения в

В.Д.Булаев, В.С.Гусев, С.Л.Лысенко, А.Н.Познышев. ФГУП «Государственный научно-исследовательский испытательный лазерный центр (полигон) РФ "Радуга" им. И.С.Косьминова», Россия, Владимирская обл., 600910 Радужный, а/я 771
С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: k_firsov@rambler.ru

Поступила в редакцию 2 марта 2010 г., после доработки – 28 мая 2010 г.

импульсно-периодическом режиме генерации нецепного электроразрядного HF-лазера со сплошными металлическими электродами в отсутствие дополнительных мер по стабилизации ОСР.

2. Экспериментальная установка

Разрядный промежуток лазера был образован двумя одинаковыми плоскими электродами из дюралюминия, скругленными по периметру ($r = 2$ см). Размер плоской части поверхности электродов составлял 15×100 см. Межэлектродное расстояние d могло варьироваться в пределах $10 - 20$ см, эксперименты проводились при $d = 15$ см. Электрод, служивший катодом, был подвергнут пескоструйной обработке с целью образования на его поверхности мелкомасштабных (~ 50 мкм) неоднородностей, что, как показано в работе [4], облегчает развитие самоинициирующегося объемного разряда. Электроды размещались в стеклоэпоксидной трубе длиной 250 см с внутренним диаметром 80 см симметрично относительно ее оси. Рабочими средами лазера служили смеси $SF_6:C_2H_6 = 20:1$, $SF_6:C_3H_8(C_4H_{10}) = 30:1$ и $SF_6:H_2 = 9:1$ с общим давлением 45 – 75 Тор. Смена рабочей среды в разрядном объеме обеспечивалась за счет циркуляции газа в замкнутом контуре. Для этого применялся специальный вентиляторный блок, аналогичный описанному в [8]. Газовая смесь продувалась вдоль оси разрядной камеры, скорость потока в зоне разряда составляла 40 м/с.

Резонатор лазера был образован медным зеркалом с радиусом кривизны $R = 20$ м и плоскопараллельной пластиной из KCl. Зеркало устанавливалось в юстировочном узле, соединенном с разрядной камерой сильфоном. Плоскопараллельная пластина крепилась непосредственно на торце разрядной камеры. Энергия излучения лазера (в режиме одиночного импульса) измерялась с помощью матрицы (размером 18×18 см) калориметров типа Е-60, устанавливавшейся в прямом лазерном пучке на расстоянии 1 м от выходного окна разрядной камеры.

Импульсный высоковольтный генератор, служащий для формирования ОСР, состоял из четырех одинаковых секций, подключенных параллельно к электродам разрядного промежутка медными шинами. Секции размещались в едином металлическом корпусе, заполненном SF_6 при атмосферном давлении. Электрическая схема секции высоковольтного генератора приведена на рис.1. Генератор собран по схеме Фитча на малоиндуктивных конденсаторах марки КМК-100-50 с емкостью $C = 50$ нФ и номинальным напряжением 100 кВ. Управляемые разрядники УР [21] наполнялись смесью $SF_6:N_2 = 1:10$ с избыточным давлением до 6 атм. Устройство разрядников позволяло осуществлять непрерывную работу лазера в течение 60 с при частоте следования разрядных импульсов 20 Гц без замены в них газа. Зарядное напряжение U_{ch} в экспериментах варьировалось в пределах 50 – 75 кВ. Экспериментально подбираемая индуктивность L_1 служила для согласования контура переворота напряжения на конденсаторе C с разрядным контуром. Резистивный делитель позволял контролировать импульсное напряжение на разрядном промежутке. Через пояс Роговского ПР проходила часть токоведущей шины. Такой метод контроля при большой ширине токоведущей шины (~ 1 м) не дает возможности точно измерять разрядный ток, но позволяет определять временное положение его

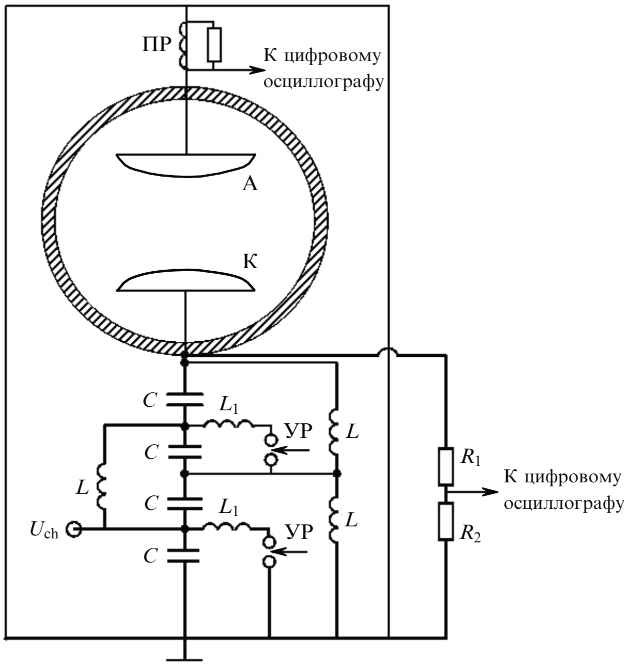

Рис.1. Электрическая схема одной из четырех секций высоковольтного генератора:
ПР – пояс Роговского; А – анод; К – катод; УР – разрядник; L, L_1 – индуктивности; C – конденсатор; R_1, R_2 – резисторы высоковольтного делителя напряжения; U_{ch} – зарядное напряжение.

максимума. Система синхронизации обеспечивает одновременный (с точностью ± 10 нс) запуск восьми разрядников высоковольтного генератора.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

После согласования контура переворота напряжения на конденсаторе в генераторе Фитча с разрядным контуром устойчивый ОСР в смесях SF_6 с углеводородами был получен во всем диапазоне изменения $U_{ch} = 50 - 75$ кВ при частоте следования разрядных импульсов до 20 Гц. Возможности дальнейшего увеличения частоты следования ограничивались скоростью смены рабочей среды в разрядном промежутке. На рис.2 приведена фотография ОСР в смеси $SF_6 - C_2H_6$ при максимальном зарядном напряжении $U_{ch} = 75$ кВ, иллюстрирующая однородность самоинициирующегося объемного разряда

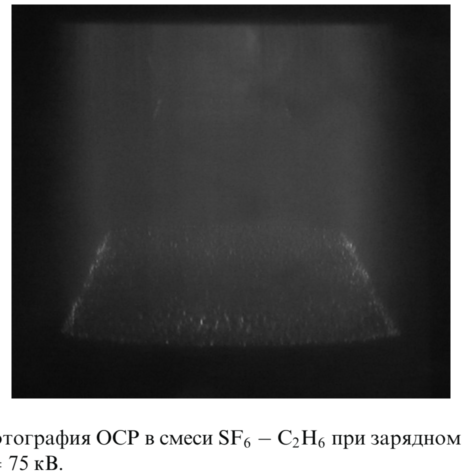

Рис.2. Фотография ОСР в смеси $SF_6 - C_2H_6$ при зарядном напряжении $U_{ch} = 75$ кВ.

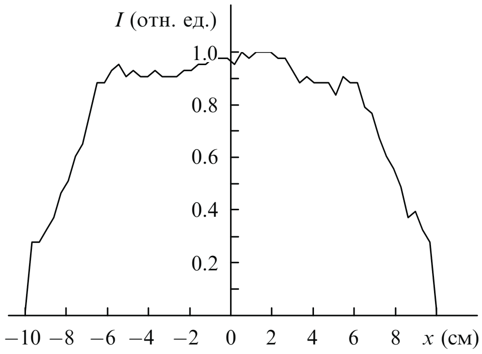

Рис.3. Распределение интенсивности I свечения разрядной плазмы по координате в плоскости, параллельной поверхностям электродов.

при большом краевом усилении электрического поля, характерном для применяемых здесь разрядных промежутков. На рис.3 представлено распределение интенсивности свечения разрядной плазмы по координате в параллельной поверхностям электродов плоскости, полученное в результате обработки фотографии на рис.2. Это распределение качественно отражает распределение по промежутку вложенной электрической энергии. Из рис.3 видно, что, несмотря на краевое усиление электрического поля, максимум энерговклада достигается в центральной зоне промежутка. На это также указывает распределение плотности катодных пятен по поверхности катода (см. рис.2).

На рис.4 приведены типичные осциллограммы напряжения на разрядном промежутке и разрядного тока при зажигании ОСР в смеси $SF_6 - C_2H_6$. Несмотря на заметное искажение реальной формы импульса напряжения индуктивной составляющей (обусловленное тем, что делитель по причинам технического характера подключен к разрядному промежутку через участки токоведущих шин) и искажение формы импульса тока (по причинам, указаннымя выше), данные осциллограммы позволяют с достаточной точностью оценить длительность разрядного тока: $\tau \approx 320$ нс. При такой относительно большой длительности ввода электрической энергии в плазму разряда в смесях SF_6 с водородом ОСР был устойчив лишь при $U_{ch} \leqslant 60$ кВ. В смесях же SF_6 с углеводородами, как следует из приведенных выше экспериментальных данных, ОСР реализовался во всем диапазоне изменения U_{ch} без каких бы то ни было дополнительных мер по его стабилизации как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме работы HF-лазера.

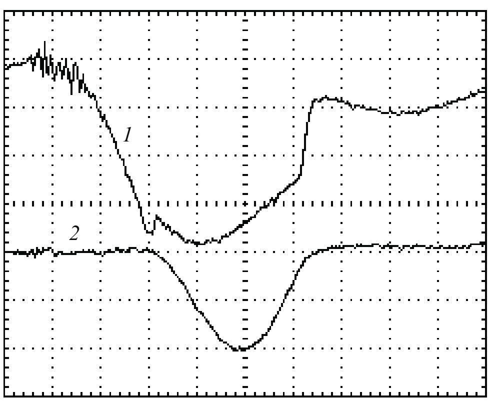

Рис.4. Типичные осциллограммы напряжения (*1*) и тока (*2*) ОСР. Развертка 100 нс/дел.

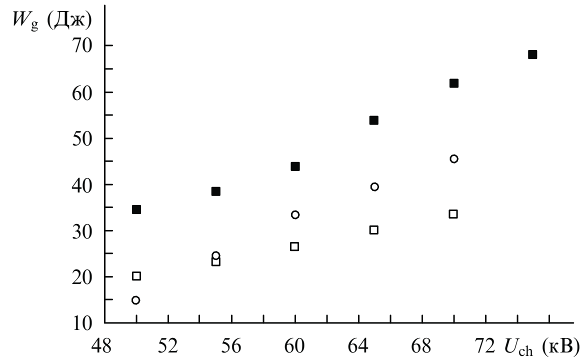

Рис.5. Зависимости энергии генерации HF-лазера W_g от U_{ch} для смесей SF_6 с различными водородосодержащими молекулами: $SF_6:C_2H_6 = 20:1$ (■), $SF_6:C_3H_8 = 30:1$ (○) и $SF_6:H_2 = 10:1$ (□).

На рис.5 показаны зависимости энергии генерации HF-лазера W_g от U_{ch} при использовании разных водородосодержащих молекул. При получении этих зависимостей давление смесей изменялось в соответствии с изменением зарядного напряжения для согласования сопротивления плазменной нагрузки с волновым сопротивлением разрядного контура. Видно, что максимальная энергия генерации $W_g = 67$ Дж достигается при использовании смеси $SF_6 - C_2H_6$ и $U_{ch} = 75$ кВ, что соответствует электрическому КПД (по энергии, запасаемой в конденсаторах) $\sim 3\,\%$. Низкий КПД лазера на смесях SF_6 с водородом обусловлен, по-видимому, неоднородностью объемного энерговклада из-за относительно большой длительности разрядного тока. Отметим также, что полученный в настоящей работе КПД ниже, чем в [5], при близких характеристиках разрядного промежутка и одинаковых составах смеси. Видимо, данный факт можно связать с большими потерями электрической энергии в схемах на основе схемы генератора Фитча. В импульсно-периодическом режиме работы лазера энергия генерации в отдельном импульсе не зависела от частоты следования импульсов при частотах до 20 Гц, поскольку вентиляторный блок обеспечивал по меньшей мере двукратную смену рабочей смеси между импульсами. Это подтверждается измерениями суммарной энергии излучения серии импульсов при кратковременных (1 с) запусках установки. Импульс лазерного излучения имел типичную для нецепных электроразрядных HF-лазеров форму (см. [15, 16, 22] и приведенные там ссылки), его длительность на полувысоте составляла ~ 150 нс, генерация начиналась вблизи максимума тока.

4. Заключение

Таким образом, нами разработан и исследован мощный нецепной электроразрядный импульсно-периодический HF-лазер. Показана возможность реализации ОСР в смесях SF_6 с углеводородами в разрядном промежутке с высоким краевым усилением электрического поля без дополнительных мер стабилизации разряда как в импульсном, так и в импульсно-периодическом режиме. Получена энергия генерации лазера $W_g = 67$ Дж при частоте следования импульсов 20 Гц. Заметим, что для получения генерации DF-лазера в качестве донора дейтерия могут быть использованы молекулы C_6D_{12}. Устойчивость ОСР в смесях SF_6 с угледейтеридами, как известно, не хуже, чем в смесях с углеводородами, а энергия генерации DF-лазера при одинаковых энерговкладах в плазму разряда составляет ~0.8 от энергии генерации HF-лазера [22].

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

1. 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** (3), 225 (2000).
2. 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).
3. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Y., Oreshkin V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 374 (1998).
4. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30** (3), 207 (2000).
5. Белевцев А.А., Фирсов К.Н. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Том XI-4* (М.: Физматлит, 2005, с. 761 – 763).
6. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 215205 (2009).
7. Lacour B., Gagnol C., Priget P., Puech V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 334 (1998).
8. Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. *Квантовая электроника*, **31** (3), 218 (2001).
9. Bychkov Yu., Gortchakov S., Lacour B., Pasquiers S., Puech V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 380 (2003).
10. Tarasenko V.F., Panchenko A.N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6101**, 61011P (2006).
11. Азаров М.А., Климук Е.А., Кутумов К.А., Трощиненко Г.А., Лакур Б. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1023 (2004).
12. Velikanov S.D., Evdokimov P.A., Zapol'sky A.F., Kodola B.E., Sokolov D.V., Chernopyatov V.Y., Yakovlev E.D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7131**, 71310V (2008).
13. Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **25** (10), 925 (1998).
14. O'Connor S.J., Waluslay H.L., Pasley J.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3493**, 255 (1998).
15. Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Samokhin A.A. *Laser Phys.*, **17** (6), 834 (2007).
16. Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Пашинин П.П., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **39** (2), 179 (2009).
17. Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Коссый И.А., Тарасова Н.М., Фирсов К.Н. *Физика плазмы*, **35** (3), 281 (2009).
18. Burtsev A.P., Burtseva I.G., Mashendzhinov V.I., Sudarikov V.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5479**, 174 (2004).
19. Agroskin V.Y., Bravy B.G., Chernyshev Y.A., Kashtanov S.A., Kirianov V.I., Makarov E.F., Papin V.G., Sotnichenko S.A., Vasiliev G.K. *Appl. Phys. B*, **81** (8), 1149 (2005).
20. Буцыкин 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).
21. Горностай-Польский С.А., Гришин А.В., Балябин М.Г., Жильцов А.В. Патент РФ № 2241288. Приоритет от 20.01.2003.
22. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24** (3), 213 (1997).