

Импульсный химический HF-лазер с большим разрядным промежутком

М.А.Азаров, Е.А.Климук, К.А.Кутумов, Г.А.Трощиненко, Б.Лакур

Исследованы характеристики излучения электроразрядного импульсного химического HF-лазера с шириной разрядного промежутка 10 см. Разряд был стабилизирован слоем полупроводниковой сегнетокерамики, нанесённой на плоские металлические электроды. Удельная энергия и технический КПД лазера, работающего на нецепной реакции в смеси $SF_6 - H_2$, составили 3 Дж/л и 3.4 %, а на цепной реакции в смеси $F_2 - O_2 - SF_6 - H_2$ они были равны 25 Дж/л и 26 % соответственно.

Ключевые слова: импульсный химический лазер, барьерный разряд, разрядный промежуток, цепная и нецепная химические реакции, удельная энергия излучения, технический КПД.

1. Введение

К настоящему времени исследования в области электроразрядных импульсных химических лазеров (ИХЛ) были связаны с решением проблемы эффективной стабилизации разряда с целью получения высоких удельных характеристик. Актуальной является задача создания цепного (работающего на цепной реакции) HF(DF)-ИХЛ с большим разрядным промежутком (РП), который может эффективно работать в импульсно-периодическом режиме.

Современные ИХЛ, работающие с фотопредыонизацией смеси $SF_6 - H_2$, с РП шириной 2–4 см [1–3] имеют высокие энергетические характеристики: удельный энергосъём $E/V \leq 10$ Дж/л и технический КПД $\eta \leq 5.5\%$. Характеристики ИХЛ с большой апертурой (10 см и более) и активным объёмом более 10 л [4, 5] заметно ниже. В импульсно-периодическом режиме они снижаются еще на 10 % – 15 % [2, 5]. В отдельных случаях [5] при работе импульсно-периодического химического лазера (ИПХЛ) с большим РП (12 см) имело место неполное (~65 %) инициирование активного объёма. По данным работы [6] это приводит к снижению эффективности и неустойчивой работе лазера, что является нежелательным, а во многих случаях недопустимым явлением при использовании лазера в различных технических приложениях.

В работе [7] при использовании самостоятельного объёмного разряда были получены рекордные энергетические характеристики нецепного ИХЛ с РП шириной до 27 см: общая энергия до 407 Дж, $E/V \leq 6.7$ Дж/л, $\eta \leq 4.3\%$. Однако работа данного технического устройства в

импульсно-периодическом режиме в условиях возникающей в потоке неоднородности плотности лазерной среды даже при небольших РП не была продемонстрирована.

На наш взгляд, использование в широкоапертурных цепных и нецепных ИПХЛ барьерных электродов, стабилизирующих электроразряд, более предпочтительно, т.к. не требуется юстировки электродов и применения устройств предыонизации в лазерной камере, отсутствует наработка фторидов металлов, нет контактов фторной лазерной среды с металлическим электродом.

Ранее нами была продемонстрирована эффективная работа инициируемого барьерным разрядом HF(DF)-ИХЛ с активной областью размером $4 \times 4.5 \times 37$ см (ширина РП 4 см) [8]. При использовании фторсодержащих лазерных смесей были получены $E/V \leq 40$ Дж/л и $\eta \leq 68\%$. В небольшом, также инициируемом барьерным разрядом HF/DF-ИПХЛ размером $1.4 \times 3.3 \times 12$ см (ширина РП 1.4 см) на фторсодержащих смесях была получена эффективная и надёжная генерация при частоте следования импульсов до 50 Гц.

Цель настоящей работы состояла в получении экспериментальных данных, подтверждающих возможность создания широкоапертурных нецепных и цепных HF(DF)-ИПХЛ, инициируемых барьерным разрядом.

2. Экспериментальная аппаратура и методы контроля

Лазерная разрядная камера (РК) с РП шириной 10 см была разработана для проведения исследований HF(DF)-лазера, работающего как на нецепной, так и на цепной реакции с использованием фторсодержащих смесей. С этой целью внутри капролактанового корпуса РК были установлены боковые фторопластовые панели для защиты стенок от воздействия агрессивных продуктов. Плоские электроды размером 4.4×11 см изготовлены из алюминия и покрыты слоем полупроводниковой сегнетокерамики толщиной 8 мм. Крышки из нержавеющей стали с узлами подачи окислительной и горючей смесей размещались в верхней и нижней частях РК. Фторсодержащая газовая смесь ($F_2 - O_2 - SF_6$) подавалась сверху,

М.А.Азаров, Е.А.Климук, К.А.Кутумов, Г.А.Трощиненко. ФГУП "РНИИ «Прикладная химия»", Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14; e-mail: gtrosh@GT4631.spb.edu

В. Lacour. Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, Université de Paris Sud, 91405, Orsay, France; e-mail: bernard.lacour@lpgp.u-psud.fr

Поступила в редакцию 13 апреля 2004 г., после доработки – 23 июля 2004 г.

а водород – снизу, через распределенный ввод (крышку с перфорацией), для ускорения перемешивания смеси горючего с окислителем. Для вывода лазерного излучения использовались окна из CaF_2 .

Генератор импульсных напряжений (ГИН) состоял из двух симметричных блоков, расположенных на боковых поверхностях РК. Каждый блок включал в себя два конденсатора ёмкостью 9.5 нФ и разрядник. Коммутация ГИНа на РП осуществлялась в момент подачи на разрядник поджигающего импульса от специального генератора. При коммутации зарядное напряжение ГИНа учетверялось на ударной ёмкости $C_g = 2.38$ нФ. Зарядное устройство ГИНа обеспечивало максимальное напряжение 45 кВ, при этом запасённая энергия достигала 38.5 Дж.

Сигналы импульсного тока и напряжения разряда регистрировались на осциллографе 6ЛОР-04. Исследование лазерных характеристик проводилось при трёх зарядных напряжениях: 35, 41.5 и 45 кВ. Резонатор лазера состоял из плоского алюминиевого зеркала (коэффициент отражения $r = 0.96$) и полупрозрачного зеркала с диэлектрическим покрытием ($r = 0.335$ на $\lambda \approx 2.9$ мкм). Энергия лазерного пучка регистрировалась калориметром ИМО-2, расположенным на расстоянии 4 м от окна реактора. Расчёт лазерной энергии на выходе РК осуществлялся по методике, развитой в [9], с использованием данных, полученных при регистрации спектра лазерного излучения. Система регистрации спектра состояла из зеркального клина, сферического зеркала, дифракционной решётки и экрана из светочувствительной фотобумаги.

3. Результаты и их обсуждение

Характерные осциллограммы импульсов тока и напряжения на РП приведены на рис.1.

Метод определения полного энерговклада в разряд W базировался на предположении о постоянстве напряжения на РП за время протекания тока разряда. Расчёт W проводился по формуле

$$W = \int U_d i dt = U_d C_g (U_g - U_t), \quad (1)$$

где U_d – напряжение на РП; i – ток разряда; U_g – выходное напряжение ГИНа; C_g – ударная ёмкость ГИНа; U_t – остаточное напряжение на ёмкостях ГИНа. В эксперименте (рис.1) наблюдается отклонение U_d от среднего значения

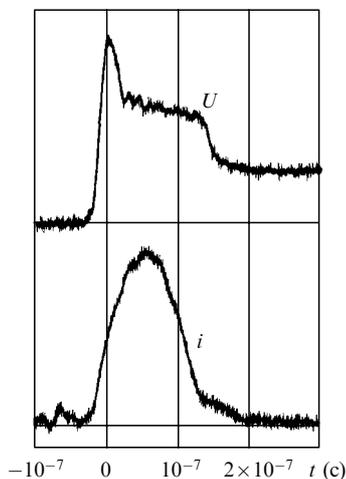


Рис.1. Осциллограммы импульсов тока i и напряжения U .

не более чем на 15%. Как показали многочисленные расчеты, метод, основанный на предположении о постоянстве U_d , является менее трудоёмким по сравнению с методом точного интегрирования и не даёт существенной погрешности.

Напряжение U_d рассчитывалось по формуле

$$U_d = (E_{os}/p)pD, \quad (2)$$

где E_{os} – напряжённость электрического поля в момент пробоя; p – давление газа; D – ширина РП. В расчете использовались ранее полученные экспериментальные данные [10] по напряжённости электрического поля в момент пробоя ($E_{os}/p \approx 86$ кВ·кПа $^{-1}$ ·м $^{-1}$ для смеси состава $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 9:1$ и 80 кВ·кПа $^{-1}$ ·м $^{-1}$ для смеси состава $\text{SF}_6:\text{F}_2:\text{H}_2 = 15:5:1$).

Первоначально были проведены исследования характеристик нецепного ИХЛ, работающего на смесях состава $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 9:1$. Результаты исследования зависимости энергии излучения лазера от давления смеси при двух значениях зарядного напряжения представлены на рис.2. С ростом зарядного напряжения от 35 до 41.5 кВ наблюдается увеличение энергии во всем диапазоне давлений и сдвиг максимумов энергии в сторону больших давлений (от 7 до 9 кПа). Как показали расчеты по формуле (1), максимумам лазерной энергии соответствует максимальный коэффициент передачи энергии от ГИНа в разряд – 0.7–0.75. Зависимость удельной энергии лазера от удельного энерговклада в разряд показана на рис.3. Линейный характер этой зависимости при постоянстве технического КПД свидетельствует о возможности дальнейшего роста удельного энергоудельного при росте удельного энерговклада.

Аналогичные зависимости были получены для цепного ИХЛ, работающего на фторсодержащих смесях. Исследования проводились в широком диапазоне измене-

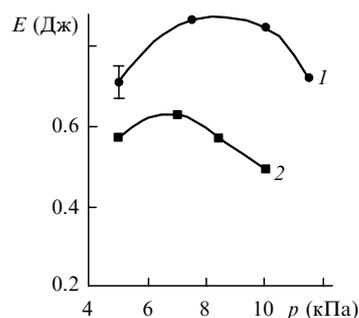


Рис.2. Зависимость энергии лазера E от давления p для смеси состава $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 9:1$ при зарядном напряжении 41.5 (1) и 35 кВ (2).

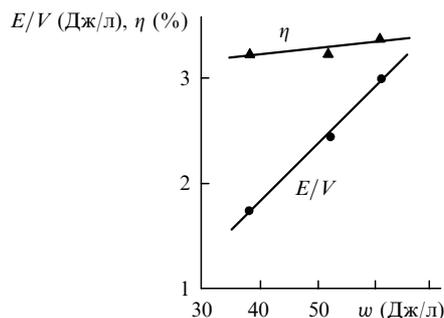


Рис.3. Зависимость удельной энергии лазера E/V и КПД η от удельного энерговклада в разряд w для смеси состава $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 9:1$.

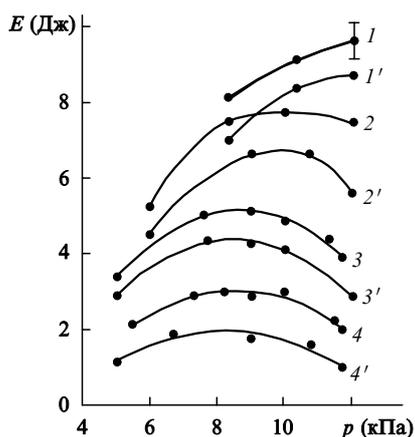


Рис.4. Зависимости энергии лазера E от давления p для смеси $F_2-H_2-O_2-SF_6$ при соотношении активных компонентов $F_2:H_2=3:1$, концентрации фтора 45% (1, 1'), 35% (2, 2'), 25% (3, 3') и 11% (4, 4') и зарядном напряжении 41.5 (1–4) и 35 кВ (1'–4').

ния концентраций активных компонентов при их оптимальном соотношении $F_2:H_2=3:1$ и двух значениях зарядного напряжения – 35 и 41.5 кВ (рис.4). Максимальный удельный энергосъём с активной среды HF-ИХЛ (25 Дж/л) был достигнут при концентрации фтора 45%, суммарном давлении 12 кПа и зарядном напряжении 41.5 кВ. В этих экспериментах использовалось отношение концентраций $[O_2]/[F_2]$, равное 3% и 6%. Заметного влияния на энергию лазера указанное изменение концентрации кислорода в смеси не оказывало.

Зависимость удельной энергии ИХЛ от концентрации фтора при зарядном напряжении 41.5 кВ и суммарном давлении смеси 12 кПа показана на рис.5. Линейный рост удельной энергии излучения HF-ИХЛ от 7 до 25 Дж/л наблюдался при изменении концентрации фтора от 10% до 45%. При концентрации фтора более 40% имела место заметная нестабильность энергетических характеристик ИХЛ, связанная, по-видимому, с увеличением скорости темновой реакции F_2 и H_2 и наработки HF во время составления и перемешивания смеси. Зависимость удельной энергии ИХЛ от удельного энерговклада в разряд при концентрации фтора 25% (в области стабильной работы лазера) представлена на рис.6. Как и для нецепного лазера, полученная зависимость даёт основание считать, что при изменении параметров ГИНа имеется возможность дальнейшего роста удельной энергии лазера.

Во всех экспериментах стабильная и надёжная работа барьерного разряда наблюдалась при суммарном давлении

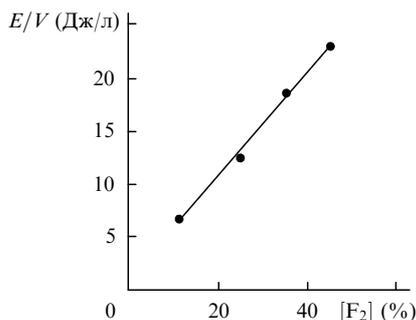


Рис.5. Зависимость удельной энергии лазера от концентрации фтора в смеси при соотношении активных компонентов $F_2:H_2=3:1$ и удельном энерговкладе в разряд $w=53$ Дж/л.

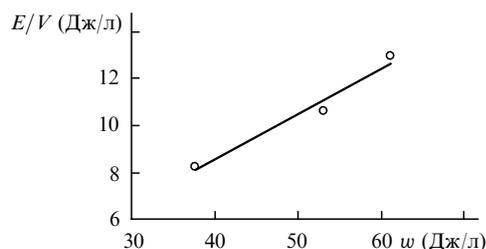


Рис.6. Зависимость удельной энергии лазера от удельного энерговклада в разряд при $p=9$ кПа для смеси состава $F_2:H_2:O_2:SF_6=25:5:1.5:68.5\%$.

нии смеси до 12–13 кПа. Косвенным доказательством хорошей однородности разряда в диапазоне давлений до 12–13 кПа является однородность засветки светочувствительной бумаги лазерным излучением. Фотография экрана из фотобумаги, расположенной в ближней зоне пучка лазерного излучения, при экспонировании с плотностью энергии немного выше предела её чувствительности (0.15–0.2 Дж/см²) представлена на рис.7. При дальнейшем росте суммарного давления возникала контракция, что находило свое отражение в появлении неоднородности засветки фотобумаги.

Сравнительный анализ удельных энергетических характеристик ИХЛ, полученных в одинаковых условиях по составу и давлению газовой смеси, удельному энерговкладу в разряд и длине активной среды, но при разных ширинах РП (1.4 см [8] и 10 см) указывает на их заметный рост (~20%) при увеличении РП. Вероятно, наблюдаемый эффект по аналогии с работой [3] связан с улучшением однородности разряда, что позволяет надеяться на возможность дальнейшего увеличения РП без снижения эффективности генерации лазера.

Спектры излучения HF-ИХЛ, работающих на цепной и нецепной реакциях, представлены на рис.8. Полученное распределение энергии в спектре излучения нецепного лазера полностью соответствует общим представлениям о генерации излучения лазера этого типа на переходах «низких» полос 1–0, 2–1, 3–2 между колебательными уровнями, накачиваемыми в процессе «холодной» химической реакции F и H_2 . В спектре цепного лазера хотя и наблюдаются линии «высоких» полос 4–3 и 5–4, колебательные уровни которых накачиваются «горячей» реакцией H и F_2 , однако их вклад в суммарную лазерную энергию незначителен, несмотря на то что на возбуждение высоких колебательных уровней тратится большая часть химической энергии.

На первый взгляд, полученное распределение энергии в спектре излучения цепного лазера противоречит экспериментально наблюдаемому значительному росту (поч-

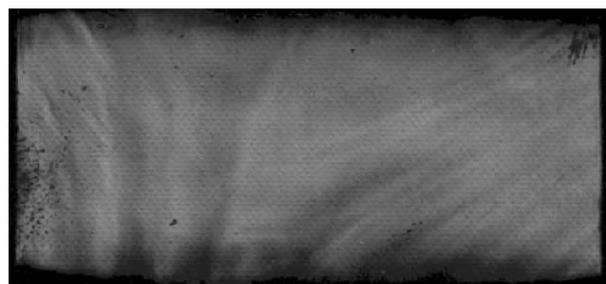


Рис.7. Отпечаток лазерного импульса на фоточувствительной бумаге.

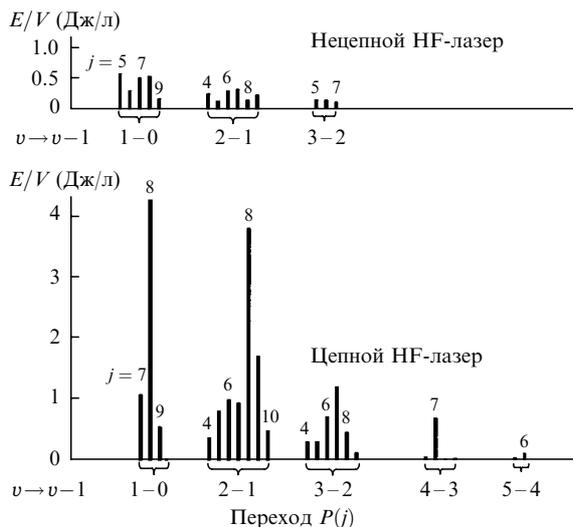


Рис.8. Спектры излучения нецепного и цепного HF-лазеров.

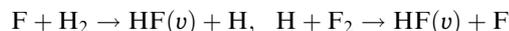
ти на порядок) общей энергии генерации цепного лазера по сравнению с нецепным. Причина этого кажущегося несоответствия кроется в существенном различии констант скоростей «холодной» и «горячей» реакций и, как следствие этого, в существенно более низком коэффициенте усиления для слабых спектральных линий «высоких» полос по отношению к «низким». В связи с этим основным каналом передачи колебательной энергии с высоких уровней возбуждения молекулы HF на более низкие являются безызлучательные процессы колебательной релаксации с частичным переходом колебательной энергии в поступательную. Очевидно, что применение более высокочастотного резонатора и увеличение длины активной среды позволит увеличить эффективность цепного лазера.

4. Заключение

Применение барьерного разряда для инициирования HF-ИХЛ с большим РП (10 см) показало высокую надёжность его работы, обеспечило стабильность выходных лазерных параметров и высокие энергетические характеристики цепного химического лазера по сравнению

с нецепным. Были получены удельная энергия 3 и 25 Дж/л и технический КПД 3.4 % и 26 % для нецепного и цепного лазеров соответственно при относительно низких удельных энергозатратах (до 60 Дж/л).

Таким образом, использование цепной химической реакции



в электроразрядном лазере привело к почти десятикратному росту удельных характеристик ИХЛ как при малом (1.4 см), так и при большом (10 см) РП.

Способ инициирования ИХЛ барьерным разрядом не требует юстировки электродов и применения устройств предыонизации в лазерной камере и обеспечивает отсутствие контакта фторной лазерной среды с металлическим электродом. Применение полупроводниковой керамики в качестве составной части электродов обеспечивает большую долговечность их работы в агрессивной среде. В связи с этим барьерный разряд может быть использован при создании цепного химического импульсно-периодического HF(DF)-лазера с шириной РП 10 см, а возможно, и более.

Авторы благодарят CILAS (Compagnie Industrielle des Lasers, France) за финансовую поддержку.

1. Richeboeuf L., Pasquiers S., Doussiet F., Legentil M., Postel C., Puech V. *Appl. Phys. B*, **68**, 45 (1999).
2. Brunet H., Marbru M., Voignier F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 388 (1995).
3. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 1035 (2001).
4. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 213 (1997).
5. Аксенов Ю.Н., Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 290 (2001).
6. Cassady F.E. *AIAA Paper*, № 83-1682 (1983).
7. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **64**, 1439 (2000).
8. Kutumov C.A., Klimuk E.A., Troshchchenko G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 601 (1998).
9. Азаров М.А., Александров Б.С., Дроздов В.А., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **30**, 30 (2000).
10. Климук Е.А., Кутумов К.А., Трошиненко Г.А. В кн.: *Сборник научных трудов НПО* (Л.: ГИПХ, 1989, с. 207–213).