

Электроразрядный импульсный HF/DF-лазер на цепной реакции $F_2 + H_2(D_2)$ с активным объемом 4.2 л

Е.А.Климук, К.А.Кутумов, Г.А.Трошиненко

Исследованы характеристики импульсного химического HF/DF-лазера с активным объемом $10 \times 10.5 \times 40$ см и разрядным промежутком 10 см. Иницирование нецепной и цепной химических реакций в активном объеме лазера с газовыми смесями $SF_6 - H_2(D_2)$ и $SF_6 - F_2 - O_2 - H_2(D_2)$ соответственно производилось барьерным разрядом. Стабилизация разряда обеспечивалась электродами, изготовленными из полупроводниковой сегнетокерамики. В результате экспериментальных исследований на «нецепной» смеси были получены: максимальная энергия излучения HF-лазера $E_{max} = 15$ Дж, удельная энергия $E/V = 3.6$ Дж/л, рассчитанный по запасенной энергии технический КПД $\eta_t = 4.3\%$; на «цепной» смеси – $E_{max} = 130$ Дж, $E/V = 31$ Дж/л, $\eta_t = 37\%$. На DF-лазере наблюдалось снижение характеристик лазера на $\sim 35\%$ для «нецепной» и на $\sim 50\%$ для «цепной» смеси соответственно.

Ключевые слова: химический импульсный HF/DF-лазер, нецепная и цепная реакции, барьерный разряд, разрядный промежуток, удельный энергосъем.

1. Введение

Масштабирование электроразрядных химических HF/DF-лазеров связано с решением задачи стабилизации разряда в больших объемах электроотрицательных газов, таких как SF_6 , NF_3 , F_2 .

Стабилизация разряда в лазерах с большим (свыше 10 см) разрядным промежутком (РП) и большим активным объемом проводилась с применением лезвийных электродов [1], путем предьонизации газовой среды электронным пучком [2] и с использованием электродов, подвергнутых пескоструйной обработке поверхности для образования микровыступов [3]. Авторами работы [3] были получены рекордные характеристики импульсного химического HF-лазера (ИХЛ), работающего на «нецепных» смесях: энергия излучения $E \approx 407$ Дж, удельная энергия $E/V \leq 6.7$ Дж/л, технический КПД $\eta_t \leq 4.3\%$. В ряде работ этих же авторов исследован механизм образования неоднородностей в разряде, определены условия эффективного применения предьонизации ультрафиолетовым и мягким рентгеновским излучением и сделан вывод о том, что в широкоапертурных лазерах с большим РП применять предьонизацию нет необходимости [3–5].

Перечисленные способы стабилизации разряда имеют свои преимущества и недостатки с точки зрения требований однородности разряда, энергетической эффективности и возможности реализации импульсно-периодического режима работы лазера. В импульсно-периодическом режиме неоднородности могут накапливаться и развиваться от импульса к импульсу, что в случае применения лезвийных электродов может привести к непол-

ному иницированию активного объема и ухудшению лазерных характеристик [6]. Эффект заметного ухудшения характеристик при переходе на импульсно-периодический режим работы наблюдался в случае нецепного лазера, работающего с фотопредьонизацией [7].

Импульсные и импульсно-периодические HF/DF-лазеры, иницируемые барьерным электрическим разрядом, показали эффективную работу при частоте следования импульсов до 50 Гц [8] и ширине разрядного промежутка 10 см [9]. Применение полупроводниковых барьеров для стабилизации разряда обеспечивало его однородность и, следовательно, хорошую воспроизводимость лазерных характеристик. Система иницирования лазера отличалась принципиальной простотой и надежностью. Однако до сих пор с использованием барьерного разряда реализованы лазерные устройства с относительно малым активным объемом – 50 см³ [8] и 440 см³ [9, 10]. На «цепных» смесях стабильная работа лазера наблюдалась при содержании фтора в смеси до 35%, при этом были получены $E/V \leq 20$ Дж/л и $\eta_t \leq 22\%$; однородность разряда контролировалась по отпечаткам излучения на светочувствительной бумаге. Для лазерного устройства с составными барьерными электродами и большим на порядок активным объемом такая оценка однородности разряда не является достаточной.

По нашему мнению, исследование характеристик нецепного и цепного HF/DF-лазеров с большим объемом активной среды и сравнение их характеристик с полученными ранее [9] представляет интерес. В настоящей работе представлены результаты исследования характеристик химического HF/DF-лазера при масштабировании активного объема до 4.2 л и разрядного промежутка до 10 см. Полученные данные являются результатом первого этапа исследований, направленных на создание импульсно-периодических химических лазеров на цепной реакции $F_2 + H_2$ с большим разрядным промежутком.

Е.А.Климук, К.А.Кутумов, Г.А.Трошиненко. ФГУП "РНИЦ «Прикладная химия», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14; e-mail: gtroshchinenko@rscas.spb.ru

2. Экспериментальная аппаратура и средства контроля

Импульсный химический HF/DF-лазер включает в себя разрядную камеру (РК), разрядный контур с генератором импульсных напряжений (ГИН), систему газобеспечения и нейтрализации токсичных газов, а также зеркала резонатора и оптическую систему измерений лазерных характеристик.

РК состоит из диэлектрического корпуса со встроенными панелями барьерных электродов и флюоритовыми окнами для вывода излучения из активного объема. Каждый барьерный электрод образован рядом керамических пластин, покрытых изнутри токопроводящим слоем и скрепленных в единое целое на общем металлическом электроде. Барьерные электроды имеют активную площадь 10.5×40 см. На внутреннюю поверхность РК нанесено покрытие, защищающее от воздействия агрессивной газовой среды.

ГИН построен по схеме двухступенчатого генератора Маркса. Четыре конденсатора емкостью по 87 нФ при параллельном включении заряжаются зарядным устройством до максимального напряжения 45 кВ. Последовательное включение конденсаторов производится подачей поджигающего импульса на газонаполненные разрядники и коммутацией импульса напряжения 180 кВ на разрядный объем РК.

Максимальная запасенная энергия в конденсаторах ГИНа составила ~ 350 Дж. В ряде экспериментов в схему ГИНа включались два дополнительных конденсатора, в результате чего энергозапас увеличивался на 30%. Импульсы тока и напряжения разряда регистрировались с помощью цифрового осциллографа TDS-3012, энерговклад в разряд определялся по методу, изложенному в работе [9]. Максимальный энерговклад в разряд в двух случаях компоновки ГИНа равнялся ~ 230 и ~ 300 Дж соответственно. Энергия излучения лазера измерялась калориметрами ИМО-2 и ТПИ-2М.1, расположенными на расстоянии ~ 4 м от выходного окна РК.

Резонатор лазера состоял из плоских зеркал – глухого алюминиевого и полупрозрачного с коэффициентом отражения ~ 0.3 в исследуемом диапазоне длин волн. Форма импульса излучения лазера регистрировалась Au-Ge-датчиком и записывалась цифровым осциллографом.

В процессе исследований варьировались давление и состав газовой смеси в РК, а также энерговклад в разряд (изменением как емкости конденсаторов ГИНа, так и зарядного напряжения).

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Лазер на «нецепной» смеси

Исследования характеристик нецепного импульсного химического HF/DF-лазера проводились на смесях состава $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 9:1$ и $\text{SF}_6:\text{D}_2 = 7:1$. Варьировались давление смеси в РК (от 3.5 до 13 кПа) и энерговклад в разряд путем изменения зарядного напряжения ГИНа (30, 40 и 45 кВ).

Максимум зависимости лазерной энергии от давления соответствует минимальным потерям энергии ГИНа при коэффициенте передачи энергии в разряд 0.65–0.67. Максимальная энергия излучения HF-лазера ($E = 15$ Дж)

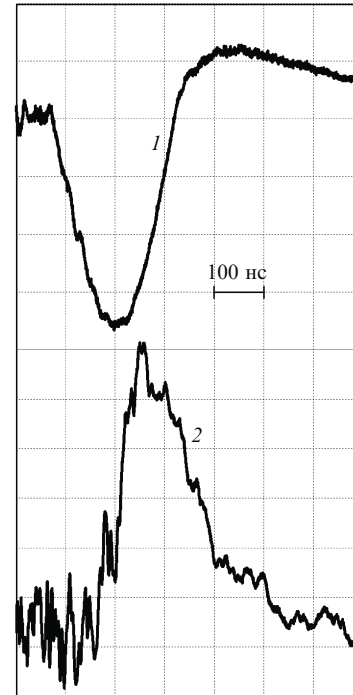


Рис.1. Осциллограммы импульса тока разряда (1) и импульса излучения (2) нецепного импульсного химического HF-лазера.

была получена при давлении $p = 8.5 - 9.5$ кПа и энерговкладе в разряд $W = 53$ Дж/л, максимальная энергия DF-лазера ($E = 9.5$ Дж) была достигнута при тех же условиях. В случае $p > 11.5$ кПа наблюдалась контракция разряда, сопровождавшаяся заметным уменьшением лазерной энергии. Осциллограммы импульса тока разряда и излучения нецепного HF/DF-лазера показаны на рис. 1, 2. Видно, что длительность лазерных импульсов на полувысоте близка к длительности импульса тока или немного превышает ее.

В диапазоне изменения энерговклада в разряд 25–53 Дж/л наблюдался линейный рост энергии излучения лазера при неизменных значениях технического КПД (отношение энергии оптического излучения к электрической энергии, запасенной в конденсаторах) 4.1% и 2.8% для молекул HF и DF соответственно. Включение дополни-

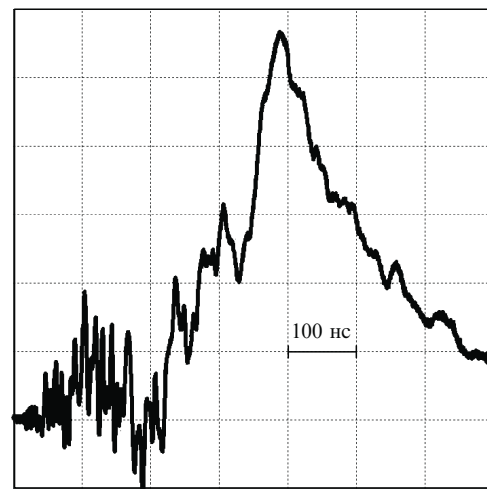


Рис.2. Осциллограмма импульса излучения нецепного импульсного химического DF-лазера.

тельных емкостей в схему ГИНа привело к росту энергии излучения HF/DF-лазера на $\sim 25\%$, при этом длительность импульса тока разряда увеличилась с 220 до 250 нс, а предельное давление, при котором появлялась контракция разряда, снизилось до 9–10 кПа.

Пропорциональный рост энергии излучения нецепного лазера с ростом энерговклада в барьерный разряд наблюдался и ранее на малоразмерном образце [9]. Линейная зависимость энергии излучения от энерговклада в барьерный разряд, визуальные наблюдения и фотографирование разряда в видимом свете, а также регистрация отпечатков излучения лазера на светочувствительной бумаге являются косвенным свидетельством однородности разряда. Оценка однородности разряда проводилась также с помощью установки симметричных масок с апертурой ~ 1.5 см на окнах камеры в пяти точках, в которых неоднородность плотности тока разряда предполагалась наибольшей: в четырех углах и в геометрическом центре. Анализ величин энергии излучения, полученных в этих локальных зонах, показал, что различия между ними не превышают точности измерений ($\pm(7\% - 8\%)$). Очевидно, что с увеличением активного объема на порядок однородность разряда не ухудшилась, тогда как удельная энергия в сходных условиях возросла на $\sim 25\%$. Таким образом, увеличение энерговклада в разряд является эффективным способом повышения энергии излучения нецепного лазера при соблюдении условий отсутствия контракции барьерного разряда.

3.2. Лазер на «цепной» смеси

Исследование зависимостей характеристик цепного импульсного химического HF/DF-лазера от давления и содержания активных компонентов смесей $SF_6 - F_2 - O_2 - H_2(D_2)$ проводилось при их оптимальном соотношении $F_2 : H_2(D_2) = (2.5 - 3.5) : 1$, при неизменном во всех экспериментах отношении концентраций кислорода и фтора 7% и энергозапасе ГИНа 350 Дж.

Как видно из рис.3, с ростом давления энергии излучения лазера до $p \sim 12.5$ кПа, и при большем давлении появляется устойчивая контракция разряда, приводящая к сильному снижению энергии лазера. Интерес представляют энергетические характе-

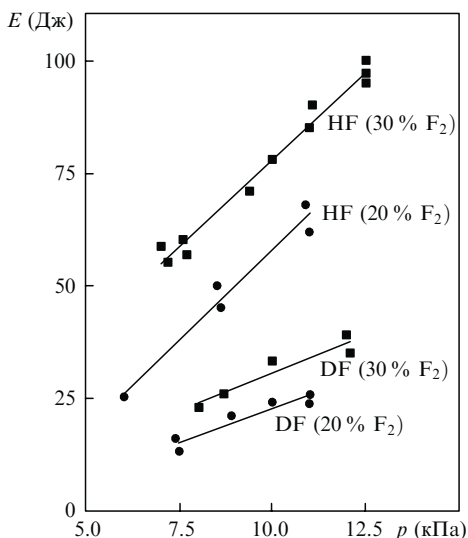


Рис.3. Зависимости энергии излучения цепного импульсного химического HF/DF-лазера от давления смеси $F_2 : H_2(D_2) \approx (2.5 - 3.5) : 1$.

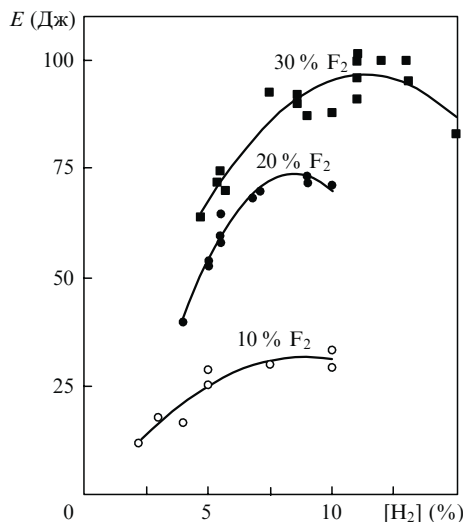


Рис.4. Зависимости энергии излучения цепного импульсного химического HF-лазера от концентрации H_2 в смеси при $p = 11 - 12.5$ кПа (■), 10–11 кПа (●) и 10 кПа (○).

ристики лазера, работающего на смеси с относительно небольшим содержанием активных компонентов и малой скоростью распространения пламени, которую можно применять в импульсно-периодическом режиме работы лазера, используя поток газа через резонатор, скорость которого больше скорости горения смеси (так называемая частотная смесь) [8, 10].

Зависимости энергии излучения лазера от содержания водорода в смеси представлены на рис.4. Заметен довольно сильный рост энергии импульса излучения с увеличением содержания водорода в смеси до 8%–12% (содержание фтора в смеси 10%–30%). При дальнейшем увеличении содержания водорода энергия излучения лазера изменяется незначительно. Такой характер зависимости можно объяснить ростом скорости «холодной» реакции при увеличении содержания водорода с последующей стабилизацией энергии излучения при больших начальных концентрациях, что является следствием относительно небольшого выгорания водорода до срыва генерации в наших условиях.

Для «частотных» смесей с содержанием фтора 20%–30% и водорода 5%–7%, скорость распространения пламени в которых не превышает 2–3 м/с [8], в импульсном режиме получены удельный энергозатрат 15–20 Дж/л и технический КПД 17%–22%.

Полученные зависимости энергии излучения HF-лазера от концентрации фтора имеют линейный характер (рис.5). Замена алюминиевого зеркала резонатора медным привела к росту энергии на 15%–20% за счет более высокого качества поверхности медного зеркала. Аналогичная зависимость, полученная для цепного импульсного химического DF-лазера, показала, что в этом случае наблюдается снижение выходных энергий на 50% по сравнению с выходными энергиями HF-лазера. Максимальная энергия HF-лазера составила 130 Дж. Параметры, определяющие эффективность преобразования запасенной энергии химической реакции в излучение, а именно $E/V = 31$ Дж/л и $\eta_t = 37\%$, в ~ 1.5 раза выше результатов, полученных на малоразмерном устройстве в сходных условиях [9]. На рис.6 и 7 показаны осциллограммы импульсов излучения импульсных химических HF- и DF-лазеров, полученные в одних и тех же условиях. Видно,

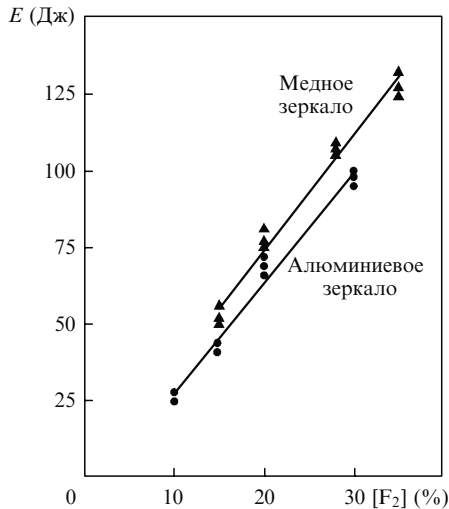


Рис.5. Зависимости энергии излучения цепного импульсного химического HF-лазера от концентрации F_2 в смеси $F_2:H_2 \approx (2.5-3.5):1$.

что импульс излучения HF-лазера заметно (150 нс на полувысоте) короче импульса излучения DF-лазера, возможно из-за того, что скорости реакций фтора с водородом заметно больше скоростей реакций фтора с дейтерием.

Влияние энерговклада в разряд на энергию излучения цепного лазера исследовалось двумя способами: варьированием зарядного напряжения ГИНа от 30 до 45 кВ и подключением в схему ГИНа двух дополнительных конденсаторов. Во всех экспериментах использовалась фторводородная (дейтериевая) смесь состава $F_2:O_2:SF_6:H_2(D_2) = 28:2:62:8$ при давлении ~ 7.6 кПа, при котором обеспечивался пробой разрядного промежутка во всем диапазоне напряжений, прикладываемых к электродам РК. Результаты проведенного исследования показаны на рис.8, из которого видно, что зависимость энергии HF-лазера имеет тенденцию к насыщению при удельном вкладе энергии в разряд более 50–60 Дж/л, тогда как в случае DF-лазера с ростом энерговклада в разряд наблюдается рост энергии, близкий к линейному. В электроразрядном импульсном химическом HF/DF-лазере удельный запас химической энергии смеси почти

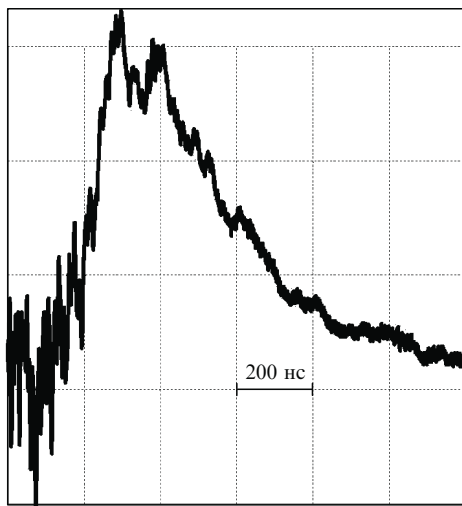


Рис.6. Оциллограмма импульса излучения цепного импульсного химического HF-лазера.

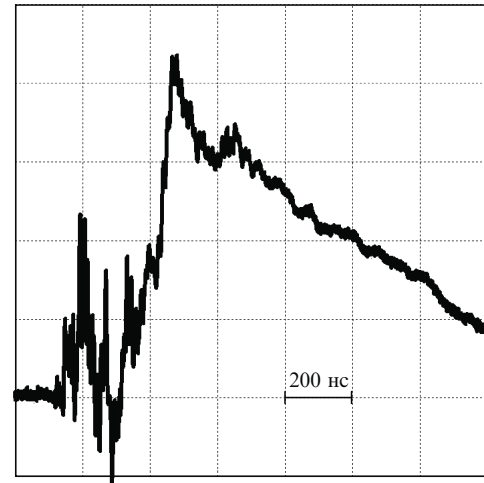


Рис.7. Оциллограмма импульса излучения цепного импульсного химического DF-лазера.

на порядок меньше энергосаза ИХЛ с иницированием фотолампой или электронным пучком, которые работают при атмосферном давлении [11, 12]. При сравнимом удельном энергосъеме для перечисленных типов лазеров это свидетельствует об относительно высоком химическом КПД электроразрядного импульсного химического HF-лазера. Возможным способом повышения технического КПД цепного HF/DF-лазера может быть повышение добротности резонатора с одновременным снижением энерговклада в разряд. Ожидаемое увеличение КПД, по-видимому, в большей степени должно иметь место для DF-лазера.

Способом улучшения характеристик импульсного химического HF/DF-лазера представляется увеличение давления активной среды, о чем свидетельствует сильная зависимость энергии излучения лазера от давления (см. рис.3). При этом важной является необходимость повышения предельного давления, при котором возникает контракция разряда, приводящая к сильному снижению энергии излучения лазера. Эффективным способом увеличения предельного давления является применение «короткоимпульсного» разрядного контура. Действительно, снижение длительности разрядного импуль-

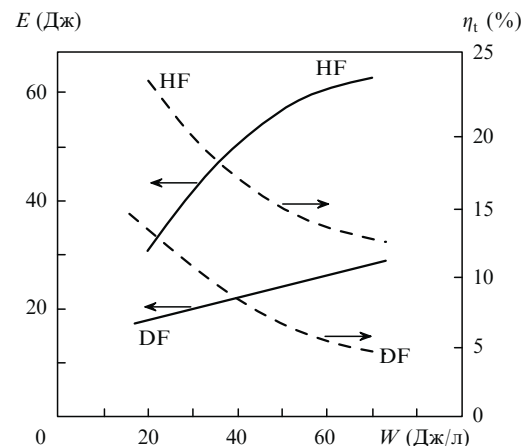


Рис.8. Зависимости энергии излучения E и технического КПД η_t цепных импульсных химических HF/DF-лазеров от удельного энерговклада в разряд W для смеси $F_2:O_2:SF_6:H_2(D_2) = 28:2:62:8$ при $p = 7.6$ кПа.

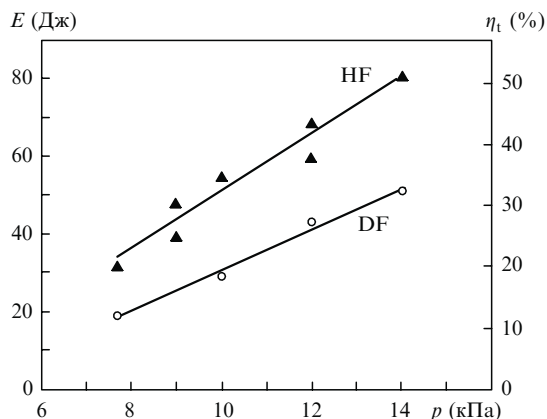


Рис. 9. Зависимости энергии излучения и технического КПД цепных импульсных химических HF/DF-лазеров от давления для смеси $F_2:O_2:SF_6:H_2(D_2) = 30:2:60:8$ при длительности импульса тока разряда 140 нс.

са до 50–70 нс приводило к росту предельного давления появления контракции барьерного разряда в SF_6 до 20–25 кПа [13]. В то же время в наших условиях искусственное увеличение длительности импульса тока с 220 до 400 нс за счет повышения индуктивности контура вызывало снижение предельного давления появления контракции разряда в SF_6 с 10 до 6 кПа.

Для уменьшения длительности импульса тока разряда была проведена замена конденсаторов ГИНа конденсаторами с меньшей (6.9 нФ) емкостью и энергозапасом 132 Дж при $U_{ch} = 45$ кВ. Длительность импульса тока с применением нового контура снизилась до 140 нс, что позволило повысить давление, при котором возникает контракция разряда, до 15–16 кПа. В новых условиях была проведена серия экспериментов и получены зависимости энергии излучения цепных импульсных химических HF/DF-лазеров от давления смеси состава $F_2:O_2:SF_6:H_2(D_2) = 30:2:60:8$ (рис. 9). В резонаторе DF-лазера было установлено полупрозрачное зеркало с коэффициентом отражения $r = 0.5$ (для $\lambda = 4$ мкм) и тем самым была повышена добротность резонатора. В этих условиях также наблюдался линейный рост энергии излучения HF- и DF-лазеров с увеличением давления. Наилучшие характеристики цепного импульсного химического HF-лазера: $E/V = 20$ Дж/л, $\eta_t = 52\%$; цепного DF-лазера: $E/V = 12.0$ Дж/л, $\eta_t = 30\%$. Для импульсного химического DF-лазера с повышением добротности резонатора увеличение энергии более заметно, что выражается в росте соотношения E_{DF}/E_{HF} с 0.5 до 0.57. Дальнейшее повышение добротности резонатора DF-лазера (установка зеркал с $r = 0.75$) не привело к заметному росту энергии. Увеличение давления смеси с целью повышения энергии HF/DF-лазеров представляется целесообразным при отсутствии контракции разряда.

4. Заключение

Исследованы характеристики широкоапертурного импульсного химического HF/DF-лазера с разрядным

промежутком 10 см и активным объемом 4.2 л. Иницирование нецепной и цепной реакций разрядом на основе барьерных электродов, изготовленных из полупроводниковой сегнетокерамики, обеспечило эффективную и надежную работу этого лазера при увеличении активного объема с 0.44 л [9] до 4.2 л и длины активной среды в четыре раза. При этом в сходных условиях наблюдался рост удельных характеристик на «нецепной» смеси на $\sim 25\%$, на «цепной» смеси – на $\sim 50\%$, что примерно соответствует результатам расчетов, полученных ранее с помощью теоретической модели процессов, которые протекают в активной среде импульсного химического HF-лазера [10]. Для HF-лазера на «нецепной» смеси получены: максимальная энергия излучения $E_{max} = 15$ Дж, удельная максимальная энергия излучения $E/V = 3.6$ Дж/л, технический КПД $\eta_t = 4.3\%$; на «цепной» смеси $E = 130$ Дж, $E/V = 31$ Дж/л, $\eta_t = 37\%$. Для DF-лазера на «нецепной» смеси $E/V = 2.3$ Дж/л, $\eta_t = 2.7\%$, а на «цепной» смеси максимальные энергии уменьшились по сравнению с энергиями HF-лазера на 50%. Повышение энерговыклада в разряд с 53 до 72 Дж/л не привело к заметному увеличению энергии излучения цепного HF-лазера, тогда как при работе на молекуле DF энергия излучения выросла на 20%–25%.

Были реализованы способы повышения технического КПД путем снижения энерговыклада в разряд, сокращения длительности импульса тока, увеличения давления рабочей смеси и увеличения добротности резонатора (DF-лазер). После проведения серии экспериментов максимальное значение η_t составило 52% для HF-лазера и $\sim 30\%$ для DF-лазера.

Полученные результаты являются основой для прогнозирования и оптимизации характеристик мощных импульсных и импульсно-периодических химических HF/DF-лазеров.

1. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 225 (1997).
2. Ерофеев М.В., Орловский В.М., Скакун В.С. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 486 (2000).
3. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 123 (1997).
4. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Фирсов К.Н. и др. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **64**, 1439 (2000).
5. Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5120**, 529 (2002).
6. Аксенов Ю.Н., Борисов В.П., Великанов С.Д. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 290 (2001).
7. Brunet H., Marbu M., Voignier F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 388 (1995).
8. Kutumov K.A., Klimuk E.A., Troschinenko G.A., *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 601 (1998).
9. Климук Е.А., Кутумов К.А., Трощиненко Г.А., Лакур Б. *Квантовая электроника*, **34**, 1023 (2004).
10. Александров Б.С., Климук Е.А., Кутумов К.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 805 (2005).
11. Азаров М.А., Александров Б.С., Дроздов В.А., Трощиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **30**, 30 (2000).
12. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 119 (1996).
13. Спичкин Г.Л. *ЖТФ*, **59**, 1923 (1986).