

Спектральные характеристики нецепных электроразрядных HF- и DF-лазеров в эффективных режимах возбуждения

А.Н.Панченко, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко

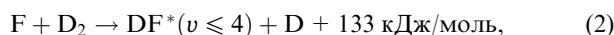
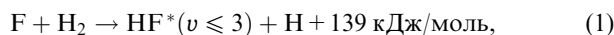
Проведены исследования спектральных характеристик излучения эффективных нецепных химических HF- и DF-лазеров. Обнаружено, что спектры генерации нецепных лазеров в режиме высоких КПД существенно расширяются. В случае HF-лазера получено около 30 линий генерации и реализована каскадная генерация на трех колебательных переходах молекулы HF $v(3-2) \rightarrow v(2-1) \rightarrow v(1-0)$ на ряде вращательных линий. Показано, что развитие неоднородностей разряда существенно обедняет спектр нецепных химических лазеров. При возбуждении смеси SF₆-D₂ генератором с индуктивным накопителем получено около 40 линий генерации на четырех колебательных переходах молекулы DF и реализована также каскадная генерация $v(4-3) \rightarrow v(3-2) \rightarrow v(2-1) \rightarrow v(1-0)$ на ряде вращательных линий. Разработаны нецепные электроразрядные HF- и DF-лазеры с полным КПД до 6 % и внутренним КПД до 10 % при накачке от емкостных и индуктивных генераторов.

Ключевые слова: нецепные HF- и DF-лазеры, спектр излучения, каскадная генерация.

1. Введение

В последнее время большой интерес вызывают исследования нецепных электроразрядных HF- и DF-лазеров и разряды в смесях на основе SF₆ [1–7]. Однако основная часть опубликованных работ направлена на изучение влияния различных экспериментальных факторов на энергетику и эффективность данных лазеров. При этом данных по спектральному составу излучения HF-лазеров в различных режимах возбуждения явно недостаточно, а данные по спектрам DF-лазеров практически отсутствуют, тогда как для понимания процессов, происходящих в рабочих смесях нецепных химических лазеров, большое значение имеют исследования спектральных характеристик лазерного излучения.

Известно, что инверсия населенностей в нецепных лазерах формируется в результате экзотермических химических реакций [8]



где v – колебательный уровень молекулы HF или DF, заселяемый в данной химической реакции. Атомарный фтор образуется при диссоциации SF₆ в электрическом разряде. При этом наибольшая доля химической энергии идет на заселение колебательных уровней молекул HF с $v = 2$ [9] и молекул DF с $v = 3$ [8].

В спектрах излучения HF-лазеров наблюдаются переходы с трех возбужденных колебательных уровней (P_3 -, P_2 - и P_1 -переходы). Число отдельных линий генерации

может варьироваться в широких пределах. При увеличении добротности резонатора можно получить до 20 лазерных линий [10]. В лазере с активной длиной 2 м при давлении смеси менее 10 Тор получено около 30 линий генерации [11]. Однако энергия излучения и эффективность такого лазера были крайне низкими. В основном спектр нецепного HF-лазера состоит из 10–15 линий, а большая часть энергии излучается на переходе P_2 [10, 12–16]. При этом наблюдается значительный разброс времени начала генерации на различных колебательно-вращательных переходах, а интегральный импульс лазерного излучения имеет сложную пиковую структуру.

В [17] наблюдалась генерация на трех линиях перехода P_4 при использовании высокодобротного резонатора и накачке продольным разрядом длиной 2 м смесей фреонов с дейтерием. В смесях SF₆-D₂, возбуждаемых поперечным разрядом, генерация на переходе P_4 реализована только при низких потерях в резонаторе [18], при уменьшении добротности получена генерация только на P_3 -, P_2 - и P_1 -переходах. Число зарегистрированных колебательно-вращательных линий генерации достигало 15–27 [18, 19]. При этом значительная доля энергии может излучаться при каскадных переходах [20], а результирующий импульс генерации подобно импульсу HF-лазера имеет два и более пиков.

Ранее нами были реализованы эффективные режимы возбуждения нецепных HF-лазеров, обеспечивающие внутренний КПД до 10 % [20, 21]. Цель данной работы – подробные исследования спектральных характеристик эффективных HF- и DF-лазеров при различных режимах инициирования самостоятельным разрядом.

2. Экспериментальная аппаратура и методики

Электроразрядный лазер, используемый в экспериментах, имел активную длину 72 см при межэлектродном зазоре между профилированными полированными электродами из нержавеющей стали 3.8 см и подробно описан

А.Н.Панченко, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 11 июля 2003 г., после доработки – 11 ноября 2003 г.

в [22]. Резонатор лазера был образован плоским алюминиевым зеркалом и выходной пластинкой из КРС-5 или КРС-6. Для накачки использовались индуктивный и емкостной накопители энергии. Индуктивный накопитель обеспечивал длительность тока разряда около 100 нс, энерговклад 15–100 Дж/л и внутренний КПД HF- и DF-лазеров до 10 % и 7 % соответственно. Величина емкостного накопителя C_0 была равна 70 или 13 нФ. В первом случае длительность тока разряда и энерговклад составляли 200 нс и 10–150 Дж/л, во втором – 100 нс и 10–50 Дж/л. Генераторы накачки обеспечивали полный КПД HF- и DF-лазеров соответственно до 6 % и 5 % при внутреннем КПД до 10 % и 7 %. Лазерные характеристики исследовались в смесях состава $SF_6 : H_2(D_2) = 8 : 1$ при давлениях до 70 Тор. Энергия излучения измерялась калориметрами ИКТ-1Н или ОРНН с измерительной головкой FL-250A-EX, а мощность и форма импульса излучения – приемником ФСГ-22, охлаждаемым жидким азотом. Спектральные характеристики излучения определялись монохроматором МДР-12 и приемником ФСГ-22. Амплитудно-временные характеристики разряда регистрировались с помощью делителей напряжения, поясов Роговского и шунтов. Электрические сигналы подавались на осциллографы TDS-220 или TDS-224.

3. Спектры генерации HF- и DF-лазеров в режимах с высокими КПД

На рис.1 приведен спектр генерации HF-лазера при накачке от емкостного накопителя с $C_0 = 13$ нФ, удельном энерговкладе 25 Дж/л и полном КПД лазера 6 %. Получена 21 линия генерации. Максимальную интенсивность имели линии колебательного перехода $\nu(1-0)$. Сначала генерация начиналась на P_2 -линиях, затем через 20–40 нс появлялись P_1 - и P_3 -линии. Время запаздывания появления линий переходов $\nu(3-2)$ и $\nu(2-1)$ несколько возрастает с увеличением вращательного квантового числа j . Возрастает также и длительность импульсов излучения на каждом переходе. Затем генерация продолжается одновременно на всех колебательно-вращательных переходах. Интенсивность многочастотного импульса генерации увеличивается в течение импульса накачки, после чего наблюдается экспоненциальный спад

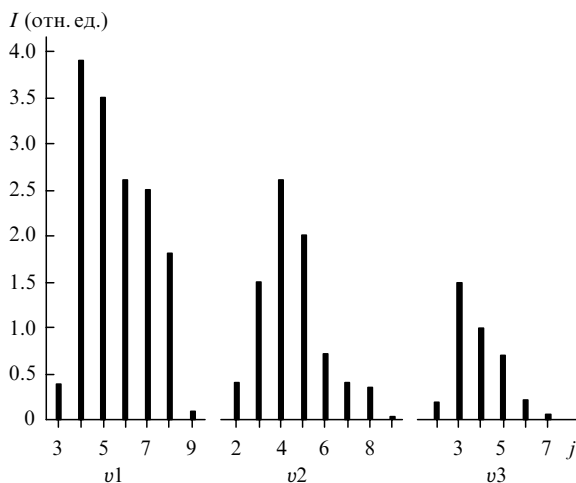


Рис.1. Относительные интенсивности линий генерации в спектре HF-лазера при полном КПД 6 %. Смесь состава $SF_6 : H_2 = 24 : 3$ Тор, накачка от емкостного накопителя, $C_0 = 13$ нФ, зарядное напряжение $U_0 = 30$ кВ, удельный энерговклад $E_{in} = 25$ Дж/л.

интенсивности излучения длительностью более 1500 нс при длительности импульса на полувысоте 300 нс. В случае DF-лазера импульс излучения имеет такую же форму, а его полная длительность больше примерно на 0,5 мкс. Полученные результаты для HF-лазера приведены на рис.2.

Распределение энергии генерации по колебательным переходам имеет вид $Q(P_1) : Q(P_2) : Q(P_3) = 7 : 3 : 1$. При этом примерно 60 % энергии излучалось на двух линиях – $P_1(7)$ и $P_1(8)$. Полученное распределение энергии сильно отличается от данных работ [9–10, 12–16] и может быть связано с интенсивными каскадными переходами, которые увеличивают эффективность излучения энергии из активной среды нецепного химического лазера (см. [20] и рис.2). Видно, что линии перехода с уровня $P_3(j-1)$ начинаются вблизи максимума линии перехода с уровня $P_2(j)$, а при появлении генерации на колебательном переходе P_1 начинается рост интенсивности излучения на P_2 -линиях. В каскадах, оканчивающихся на самых интен-

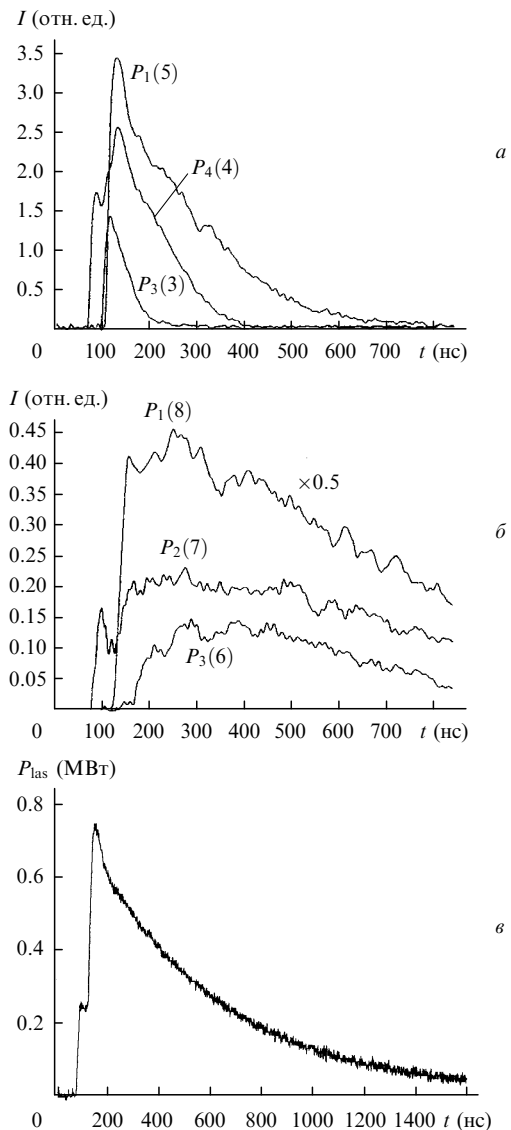


Рис.2. Каскадные переходы $P_3(3) \rightarrow P_2(4) \rightarrow P_1(5)$ (а) и $P_3(6) \rightarrow P_2(7) \rightarrow P_1(8)$ (б) в спектре HF-лазера, а также многочастотный импульс лазерного излучения (в) в режиме эффективного возбуждения смеси состава $SF_6 : H_2 = 24 : 3$ Тор от емкостного накопителя при $C_0 = 13$ нФ, $U_0 = 30$ кВ. Момент пробоя лазерного промежутка соответствует времени $t = 0$.

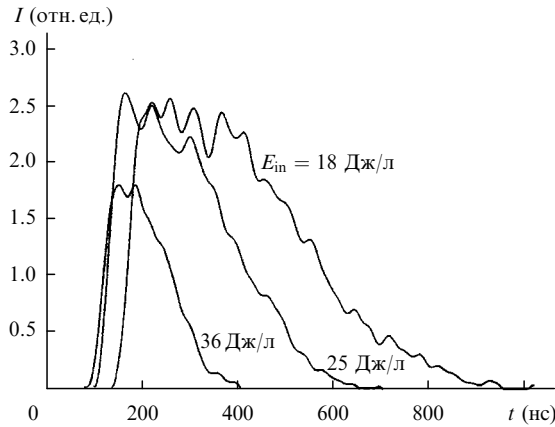


Рис.3. Зависимости формы импульса излучения на переходе с уровня $P_1(6)$ от вложенной в активную среду энергии E_{in} . Смесь состава $SF_6:H_2 = 24:3$ Тор, накачка от емкостного накопителя при $C_0 = 13$ нФ.

сивных линиях перехода $v(1-0)$, излучается более 85 % энергии.

На рис.3 приведены осциллограммы импульсов генерации с уровня $P_1(6)$ при различных энергиях возбуждения для $C_0 = 13$ нФ. Видно, что при увеличении вложенной в активную среду HF-лазера энергии длительность генерации на данном переходе уменьшается. Относительная энергия генерации на этом переходе при удельной энергии накачки 36, 25 и 18 Дж/л составила 0.18, 0.65 и 1 соответственно. Подобное поведение импульса излучения наблюдалось и на других колебательно-вращательных переходах при $j < 6$. Уменьшалась также и общая длительность импульса излучения. При этом энергия излучения увеличивалась, а спектр генерации расширялся за счет появления линий с большим j . Увеличение энергии, рассеянной в газе, приводит к увеличению коэффициента усиления на различных переходах и, следовательно, к уменьшению длительности излучения за счет быстрого снятия инверсии. Уменьшение энергии накачки (менее 25 Дж/л) вызывало значительный разброс времени начала генерации на различных переходах, эффективность лазера падала, а в интегральном импульсе лазерного излучения начинала появляться пиковая структура.

На рис.4 показан спектр генерации HF-лазера, полученный при эффективной накачке от емкостного накопи-

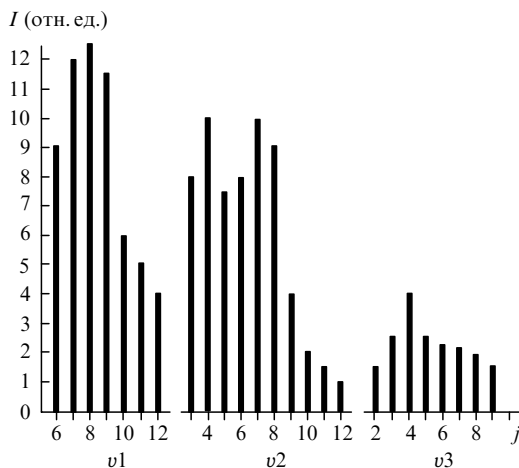


Рис.4. Спектр генерации HF-лазера при эффективной накачке от емкостного накопителя, $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $E_{in} = 90$ Дж/л. Смесь состава $SF_6:H_2 = 36:4.5$ Тор.

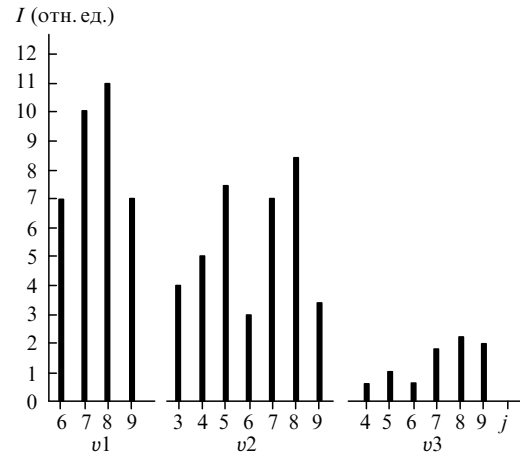


Рис.5. Спектр генерации HF-лазера, полученный при нарушении однородности разряда. Накачка от емкостного накопителя. $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $E_{in} = 90$ Дж/л. Смесь состава $SF_6:H_2 = 36:4.5$ Тор.

теля с $C_0 = 70$ нФ и удельном энергокладе 90 Дж/л. Энергия генерации при этом составила 1.3 Дж, а полный КПД лазера достиг 4 %. По сравнению со случаем $C_0 = 13$ нФ число линий генерации увеличилось до 25, прежде всего за счет появления интенсивных линий с вращательными квантовыми числами $j \geq 9$. В то же время линии генерации на переходе $v(1-0)$ с $j \leq 5$ исчезают, что можно связать с ростом газовой температуры при увеличении энергоклада и заселением вращательных уровней основного состояния молекулы HF [23]. Близкий этому спектр генерации HF-лазера наблюдался в [24] при иницировании смеси SF_6-H_2 пучком электронов, обеспечивающим высокие однородность накачки и КПД генерации, и энергокладе 120 Дж/л. При эффективной накачке HF-лазера от индуктивного накопителя получено до 30 линий генерации [22].

Для исследования влияния однородности разряда на спектральные характеристики лазера один из профилированных электродов был заменен на полукруглый электрод с радиусом 20 мм. Подобная замена привела к потере однородности разряда уже через 80 нс после пробоя лазерного промежутка. Момент контрагирования определялся по резкому нарастанию тока разряда и падению напряжения на лазерном промежутке. При этом энергия излучения уменьшилась до 0.25 Дж при неизменной удельной энергии накачки. Спектр генерации, полученный в данных условиях, приведен на рис.5. Нарушение однородности разряда однозначно ведет к уменьшению числа линий генерации, прежде всего за счет исчезновения лазерных переходов с $j > 9$. При этом в полосе $v1$ остается всего четыре линии, сильно падают интенсивности линий в полосе $v3$, а максимальная доля энергии начинает излучаться в полосе $v2$. Генерация в полосах $v1$ и $v3$ запаздывает относительно генерации в полосе $v2$ на 80 – 100 нс, что приводит к появлению в интегральном импульсе излучения двух пиков (рис.6). Это сопровождается уменьшением длительности импульса излучения примерно в два раза, что связано с исчезновением в спектре генерации линий с большими вращательными квантовыми числами j , которые имели максимальную длительность.

На рис.7 приведен спектр DF-лазера при эффективной накачке от индуктивного накопителя, а на рис.8 показано поведение во времени отдельных линий генерации молекул DF. Энергия излучения в данном режиме возбужде-

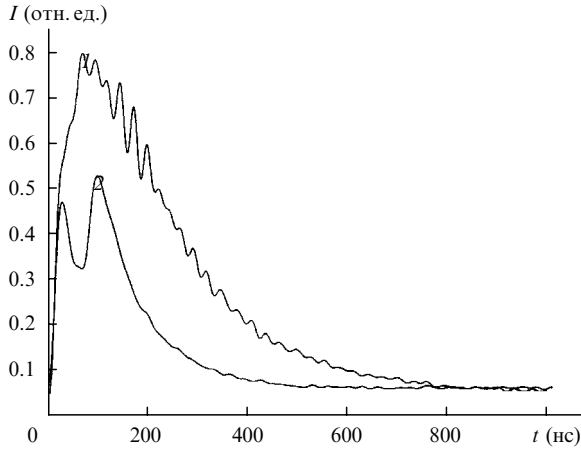


Рис.6. Интегральные импульсы излучения HF-лазера в эффективном режиме возбуждения (1) и при нарушении однородности разряда (2). Накачка от емкостного накопителя, $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $E_{in} = 90$ Дж/л. Смесь состава $SF_6 : H_2 = 36 : 4.5$ Тор.

ния составила 0.7 Дж, внутренний КПД достигал 6.5%. Получено лазерное излучение на четырех колебательных полосах молекулы DF. Максимальную интенсивность имели полосы ν_1 и ν_2 , а полное число лазерных линий равнялось 37. В [18] при близких параметрах импульса накачки, активных длинах лазера и резонатора и наличии неоднородностей разряда число отдельных линий генерации DF-лазера не превышало 27. Порог лазерной генерации сначала достигался на линиях полосы ν_3 , затем через 20–80 нс появлялось излучение на других полосах и наблюдалась одновременная генерация на всех 37 линиях. Время запаздывания появления отдельных линий несколько возрастало при увеличении вращательного квантового числа j . Максимальная длительность генерации на отдельных линиях достигала 1500 нс при $j = 9 - 10$, а затем несколько снижалась. Интегральный лазерный импульс имел один пик и был близок по форме к импульсу HF-лазера, изображенному на рис.2,в.

Как и в случае HF-лазера [20], наблюдается взаимовлияние ряда колебательно-вращательных переходов (каскадная генерация $P_4(j) \rightarrow P_3(j+1) \rightarrow P_2(j+2) \rightarrow P_1(j+3)$). Формы импульсов излучения при каскадной генера-

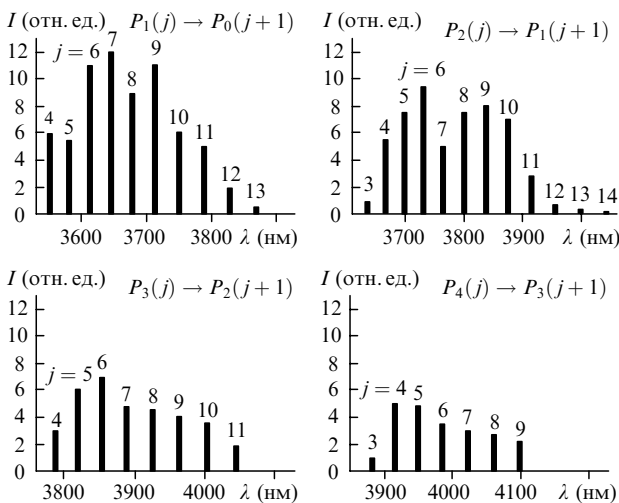


Рис.7. Спектр генерации DF-лазера для различных переходов при эффективной накачке от индуктивного накопителя. $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $E_{in} = 45$ Дж/л. Смесь состава $SF_6 : H_2 = 36 : 4.5$ Тор.

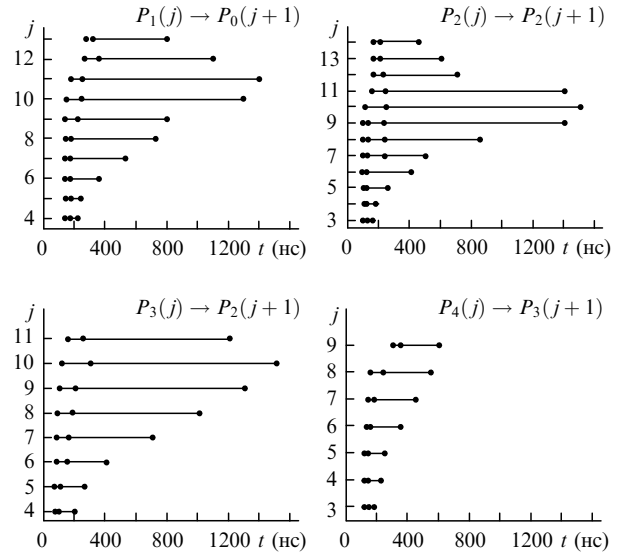


Рис.8. Поведение во времени лазерных переходов DF-лазера при эффективной накачке от индуктивного накопителя. $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $E_{in} = 45$ Дж/л. Смесь состава $SF_6 : H_2 = 36 : 4.5$ Тор. Точками обозначены начало, максимумы интенсивности и конец генерации на отдельных линиях. Момент времени $t = 0$ соответствует пробую лазерного промежутка.

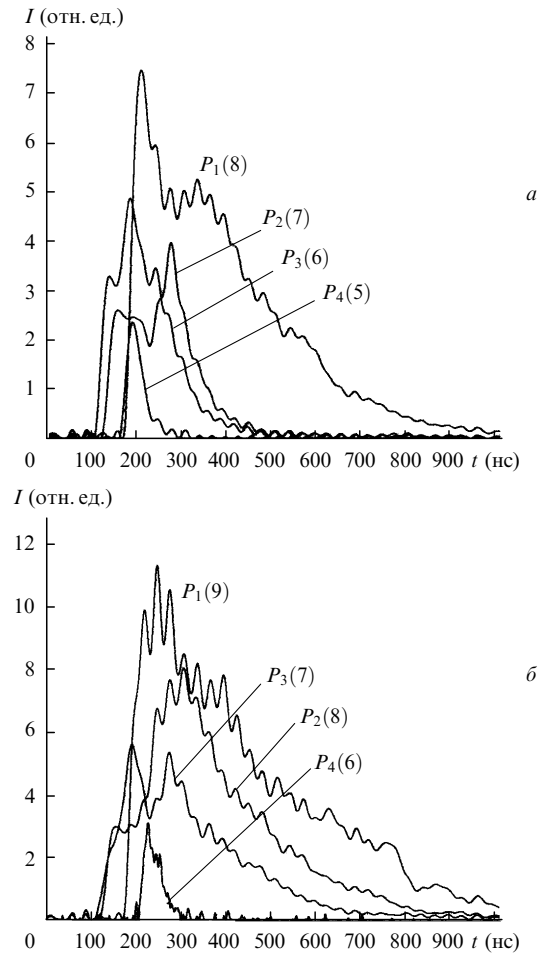


Рис.9. Каскадные переходы $P_4(5) \rightarrow P_3(6) \rightarrow P_2(7) \rightarrow P_1(8)$ (а) и $P_4(6) \rightarrow P_3(7) \rightarrow P_2(8) \rightarrow P_1(9)$ (б) в спектре DF-лазера в режиме эффективного возбуждения смеси состава $SF_6 : D_2 = 36 : 4.5$ Тор от индуктивного накопителя при $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $E_{in} = 45$ Дж/л. Момент пробоя лазерного промежутка соответствует времени $t = 0$.

ции приведены на рис.9. Видно, что генерация на линиях полосы ν_4 начинается вблизи максимума интенсивности соответствующих линий полосы ν_3 . Это может быть связано с малой долей химической энергии, идущей на образование возбужденных молекул DF^* ($\nu = 4$), и инверсия на линиях полосы ν_4 может появляться только при возникновении генерации на связанных линиях полосы ν_3 [8, 10]. Кроме того, линии в полосах ν_3 и ν_2 могли иметь второй пик вблизи максимума генерации на связанной линии соответственно в полосах ν_2 и ν_1 .

4. Выводы

Исследованы спектральные характеристики излучения химических HF- и DF-лазеров в эффективных режимах возбуждения при удельной энергии накачки 20–100 Дж/л. Показано, что спектры генерации нецепных лазеров в режиме высоких КПД существенно расширяются. В случае HF-лазера получена одновременная генерация на 30 колебательно-вращательных переходах трех колебательных полос. Реализована каскадная генерация на колебательных переходах $\nu(3-2) \rightarrow \nu(2-1) \rightarrow \nu(1-0)$ молекулы HF на ряде вращательных линий. При этом в каскадах может излучаться более 85 % энергии.

Обнаружено, что при нарушении однородности разряда число линий генерации уменьшается, наблюдается большой разброс времени начала генерации на отдельных линиях, а энергия излучения падает в несколько раз. Контракция разряда также вызывает уменьшение длительности импульса многочастотной лазерной генерации и приводит к формированию его пиковой формы.

При возбуждении индуктивным генератором смеси SF_6-D_2 получено около 40 линий генерации на четырех колебательных переходах молекулы DF при $j < 11-14$ и реализована также каскадная генерация $\nu(4-3) \rightarrow \nu(3-2) \rightarrow \nu(2-1) \rightarrow \nu(1-0)$ на ряде вращательных линий.

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующее заключение. Устойчивый объемный разряд, формируемый в смесях $SF_6-H_2(D_2)$ за счет интенсивной предьонизации и однородного электрического поля в лазерном промежутке, обеспечивает высокую однородность активной среды нецепного HF(DF)-лазера, что приводит к одновременной генерации на 30–40 колебательно-вращательных переходах при вращатель-

ном квантовом числе $j \geq 10$. Возникающие при этом интенсивные каскадные переходы увеличивают эффективность извлечения энергии из активной среды нецепного химического лазера и повышают его КПД.

Разработаны нецепные электроразрядные HF- и DF-лазеры с полным КПД до 6 % и 5 % и внутренним КПД до 10 % и 7 % соответственно при накачке от емкостных и индуктивных генераторов.

1. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **24**, 457 (1997).
2. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 11 (1997).
3. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 225 (2000).
4. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 629 (2001).
5. Lascour V., Pasquiers S., Postel S., Puech V. *Appl. Phys. B*, **72**, 45 (2001).
6. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 1035 (2001).
7. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 95 (2002).
8. *Химические лазеры*. Под редакцией Р.Гросса и Дж.Ботта (М.: Мир, 1980).
9. Manke II G.C., Hager G.D. *J. of Physical and Chemical Reference Data*, **30**, 713 (2001).
10. Jacobson T.V., Kimbell G.H., Snelling D.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **9**, 496 (1973).
11. Pummer H., Kompa K.L. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 355 (1974).
12. Voignier F., Gastaud M. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 649 (1972).
13. Wlodarczyk G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 768 (1978).
14. Баранов В.Ю., Высикайло Ф.И., Демьянов А.В., Малыга Д.Д. *Квантовая электроника*, **11**, 1173 (1984).
15. Горюнов Ф.Г., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. *Квантовая электроника*, **21**, 1148 (1994).
16. Serafitinidis A.A., Papadopoulos D.N., Courdakakis G. *Opt. Commun.*, **206**, 379 (2002).
17. Deutch T.F. *Appl. Phys. Lett.*, **10**, 234 (1967).
18. Deca V.M., Dyer P.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **14**, 661 (1978).
19. Brink D.J., Hasson V. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **13**, 553 (1980).
20. Osche G.R. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 29 (1977).
21. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **73**, 136 (2003).
22. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **33**, 401 (2003).
23. Obaga M., Fujoka T. *Appl. Phys. Lett.*, **25**, 656 (1974).
24. Аболинцев В.А., Недосеев Г.Л., Русанов В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **16**, 218 (1989).