

Спектральные характеристики излучения нецепных HF(DF)-лазеров с накачкой объемным разрядом

М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, Н.А. Панченко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Проведено сравнение спектральных параметров излучения нецепных химических лазеров на смесях водорода и дейтерия с SF₆ при возбуждении объемным разрядом с УФ-подсветкой от генераторов с индуктивным накопителем энергии и объемным (диффузным) разрядом, формируемым в неоднородном электрическом поле за счет генерации убегающих электронов. Показано, что высокая однородность формируемых в активной среде лазера разрядов позволяет увеличить число линий генерации. При этом в спектре лазерного излучения появляются интенсивные каскадные переходы, а эффективность генерации на молекулах HF ($\lambda = 2,8 \div 3,2$ мкм) и DF ($3,8 \div 4,2$ мкм) достигает предельных значений. Показано, что объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) в газовых смесях с SF₆, является эффективным способом накачки лазеров на молекулах HF и DF.

Ключевые слова: нецепные химические лазеры, однородный объемный разряд, спектры излучения; non-chain chemical lasers, homogeneous volume discharge, radiation spectra.

Введение

Нецепные химические HF(DF)-лазеры являются эффективными источниками когерентного излучения в ближней инфракрасной области спектра ($\lambda = 2,8 \div 4,2$ мкм) и находят широкое применение в различных областях науки и техники [1, 2]. Данные лазеры более просты, удобны и безопасны в эксплуатации по сравнению с лазерами на цепной реакции, в рабочих средах которых используются такие агрессивные компоненты, как фтор. Для инициирования нецепной реакции в HF(DF)-лазерах применяют объемный самостоятельный разряд или сильноточный пучок электронов.

Большая импульсная мощность излучения в диапазоне длин волн $2,8 \div 3,2$ мкм (HF-лазер) и $3,8 \div 4,2$ мкм (DF-лазер), возможность перестройки временных и спектральных характеристик излучения, работа с большой частотой повторения импульсов, простота и удобство в эксплуатации являются основными достоинствами нецепных электроразрядных HF(DF)-лазеров [3, 4], определяющими сферу их применений.

Спектр генерации нецепного электроразрядного лазера обычно состоит из 10–15 линий [3, 4]. Ряд этих линий попадает в полосы поглощения некоторых распространенных загрязнителей атмосферы, таких как углеводороды, оксиды азота, серы, углерода и т.д., что делает возможным использование HF(DF)-

лазеров для экологического мониторинга атмосферы [2, 5–7]. При этом параметры лидарных комплексов на основе нецепных лазеров в значительной мере определяются спектральным составом и эффективностью источника лазерного излучения, поэтому расширение спектрального состава излучения HF(DF)-лазера является актуальной научной задачей.

В настоящей статье рассмотрены возможности расширения спектрального диапазона и повышения эффективности нецепных электроразрядных HF(DF)-лазеров за счет применения новых методов формирования объемного разряда в смесях на основе SF₆.

Установка и методика измерений

Эксперименты выполнялись с помощью двух лазерных установок, подробно описанных в [8–11]. В первом лазере [8, 9] использовались электроды однородного поля длиной 72 см и искровая подсветка. Активный объем V составлял 300 см³. Объемный разряд формировался генератором с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. Во второй установке с накачкой объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) [10, 11], электроды имели вид лезвий с закругленными торцами. Расстояние между электродами составляло 18 мм, длина разрядной области 28 см при $V = 15$ см³. ОРИПЭЛ формировался генератором наносекундных импульсов РАДАН-220. Энергия, запасаемая в передающей линии генератора, составляла 1,5 Дж, длительность импульса тока разряда в лазерах — 100 и 10 нс соответственно, удельная мощность накачки 45 Дж/л.

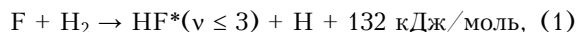
* Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Алексей Николаевич Панченко (alexei@loi.hcei.tsc.ru); Николай Алексеевич Панченко (PanchenkoNA@vtomske.ru).

В экспериментах использовался плоский резонатор, состоящий из алюминиевого зеркала и пластинок из CaF_2 , Ge, КРС-5 или КРС-6. Лазерные импульсы регистрировались фоторезистором ФСГ-22, охлаждаемым жидким азотом. Энергия излучения измерялась калориметром ОРНИР. Напряжение на лазерном промежутке и ток разряда измерялись емкостными и омическими делителями и шунтами. Методика измерений данных сигналов описана в [8–11]. Спектр излучения измерялся монохроматором МДР-12 с решеткой 300 штр./мм и приемником ФСГ-22. Для регистрации электрических сигналов применялся осциллограф TDS-3054В.

Экспериментальные результаты и обсуждение

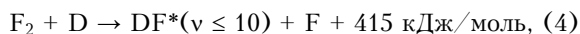
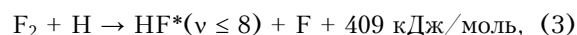
Проведенные ранее исследования показали, что рабочие характеристики нецепных лазеров в значительной степени определяются однородностью объемного разряда, формируемого в рабочей газовой смеси [9].

Инверсия населенностей на P -ветви молекул $\text{HF}(\text{DF})$ в электроразрядном нецепном лазере формируется в «холодных» химических реакциях [12]:



в ходе которых возникают колебательно-возбужденные молекулы с колебательным квантовым числом v до 3 (HF -лазер) и 4 (DF -лазер).

При иницировании нецепного лазера пучком электронов также возможно протекание «горячей» реакции с участием атомов водорода (дейтерия), возникающих в реакциях (1), (2):



что может расширить спектр генерации лазера [13]. Атомы и молекулы фтора образуются в результате диссоциации молекул SF_6 в активной газовой смеси. При этом наибольшая доля химической энергии, выделяющейся в реакциях (1) и (2), идет на заселение колебательных уровней молекул $\text{DF}^*(v)$ с $v = 3$ и молекул $\text{HF}^*(v)$ с $v = 2$. Соответственно, максимальная энергия в нецепных электроразрядных DF -лазерах обычно излучается на P_3 -линиях, а в HF -лазерах – на P_2 -линиях [12].

Как отмечалось выше, обычно спектр нецепного $\text{HF}(\text{DF})$ -лазера содержит примерно 10 или 15 линий. При этом наблюдается значительный разброс между началом импульсов генерации на отдельных линиях. По этой причине интегральный импульс излучения имеет ярко выраженную структуру, состоящую из нескольких пиков [3, 4].

Спектры излучения нецепных лазеров с накачкой от генератора с индуктивным накопителем приведены на рис. 1 и 2. В спектре HF -лазера наблюдалось около 20 линий генерации. Максимальную интенсивность имели линии колебательного перехода

$v(1-0)$. Сначала генерация начиналась на P_2 -линиях, затем через 20–40 нс появлялись P_1 - и P_3 -линии. Время запаздывания появления линий переходов $v(3-2)$ и $v(1-0)$ 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.

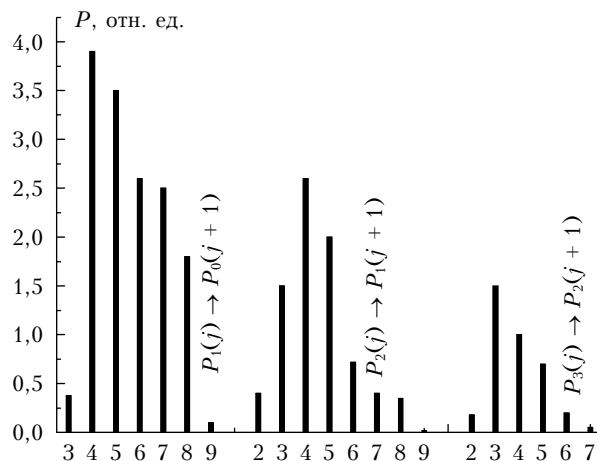


Рис. 1. Относительные интенсивности лазерного излучения на отдельных линиях молекулы HF . Рабочая смесь $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 24 : 3$ мм рт. ст. Накачка от генератора с индуктивным накопителем. В качестве выходного зеркала резонатора используется пластинка из КРС-5

Распределение энергии генерации по колебательным переходам молекул HF составило $Q(P_1) : Q(P_2) : Q(P_3) = 8 : 3 : 1$. Изменение распределения энергии по колебательным полосам связано с появлением в спектре излучения HF -лазера интенсивных каскадных переходов. Данные переходы увеличивают эффективность извлечения энергии из активной среды нецепного химического лазера, поскольку одна возбужденная молекула $\text{HF}^*(v)$ может произвести до 3 фотонов.

В смесях $\text{SF}_6\text{--D}_2$ получено лазерное излучение на четырех колебательных полосах молекулы DF . За счет каскадных переходов максимальную интенсивность имели полосы $v(1-0)$ и $v(2-1)$, а полное число лазерных линий достигало 37. Многочастотный импульс генерации имел один ярко выраженный пик, после которого наблюдался экспоненциальный спад интенсивности излучения.

В данных экспериментах получен предельный внутренний кпд η_{int} (относительно вложенной в активную среду энергии) генерации нецепных лазеров, равный 10% для HF -лазера и 7% для DF -лазера [9].

Увеличение эффективности и числа линий генерации нецепных лазеров однозначно связано с высокой однородностью объемного разряда, которая достигается при использовании подсветки, длительности импульса тока разряда не более 100 нс и удельном энергокладе ≈ 50 Дж/л [9]. Для HF -лазера нарушение однородности объемного разряда ведет к почти двукратному уменьшению числа линий генерации прежде всего за счет исчезновения лазерных переходов

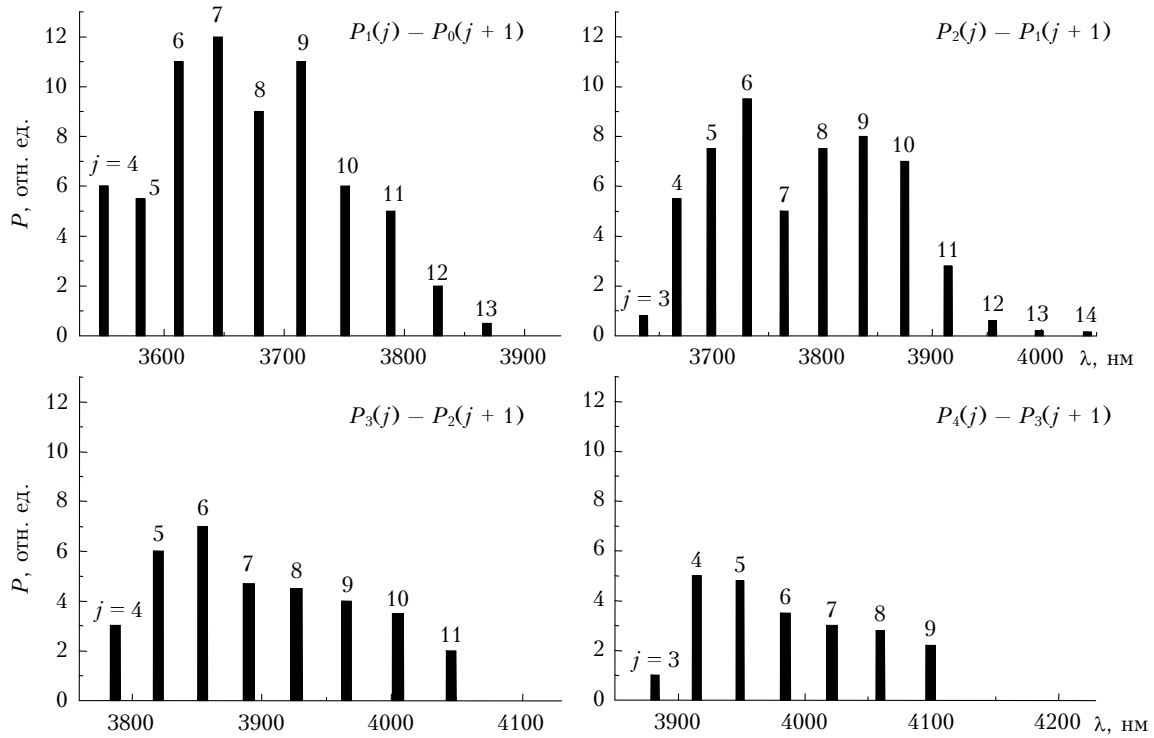


Рис. 2. Спектр генерации DF-лазера. Накачка от генератора с индуктивным накопителем, смесь SF_6 : $D_2 = 36 : 4,5$ мм рт. ст. В качестве выходного зеркала резонатора используется пластинка из KPC-5

с большими вращательными числами j . При этом максимальная доля энергии начинает излучаться в полосе P_2 . Генерация на полосах P_1 и P_3 запаздывает относительно полосы P_2 примерно на 100 нс, что приводит к появлению в интегральном импульсе излучения нескольких пиков, а энергия и кпд генерации падают в несколько раз.

Спектральные характеристики нецепных лазеров с накачкой ОРИПЭЛ приведены на рис. 3. В смесях SF_6 с водородом число линий генерации достигало 16. Распределение энергии излучения по полосам составило $Q(P_1) : Q(P_2) : Q(P_3) = 1 : 0,62 : 0,1$. Максимальная энергия, как и на установке № 1, излучается на полосе P_1 молекулы HF. Число линий генерации DF-лазера достигало 26, а линии полосы P_2 имели максимальную интенсивность. Уменьшение числа линий генерации по сравнению с установкой № 1 [8, 9] можно связать с меньшей длиной разрядной области.

Максимальная энергия излучения на молекулах HF достигала 65 мДж, что соответствовало внутреннему кпд генерации $\eta_{int} \approx 9,3\%$, близкому к предельному. Энергия излучения DF-лазера с накачкой ОРИПЭЛ составила 45 мДж. При этом полученный кпд генерации ($\eta_{int} = 6,5\%$) также близок к предельному для DF-лазера. Интегральный импульс излучения нецепных лазеров с накачкой ОРИПЭЛ имел один пик, а в спектре генерации наблюдались интенсивные каскадные переходы. Пример каскадных переходов приведен на рис. 4. Распределение энергии по линиям этих каскадов составило $P_4(3) : P_3(5) : P_2(6) : P_1(7) = 1 : 4 : 10 : 15$ и $P_4(5) : P_3(6) : P_2(7) : P_1(8) = 0,5 : 1,2 : 2 : 0,9$.

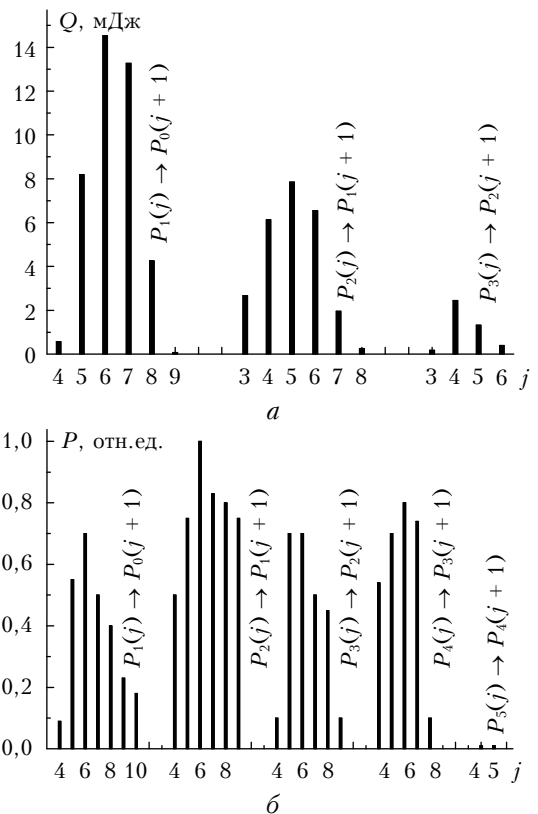


Рис. 3. Распределение энергии (а) и интенсивности (б) излучения нецепного HF- (а) и DF-лазеров (б) по линиям генерации. Накачка ОРИПЭЛ. Смесь SF_6 : $H_2(D_2) = 240 : 30$ мм рт. ст. В качестве выходного зеркала резонатора используются пластинки из CaF_2 (а) и германия (б)

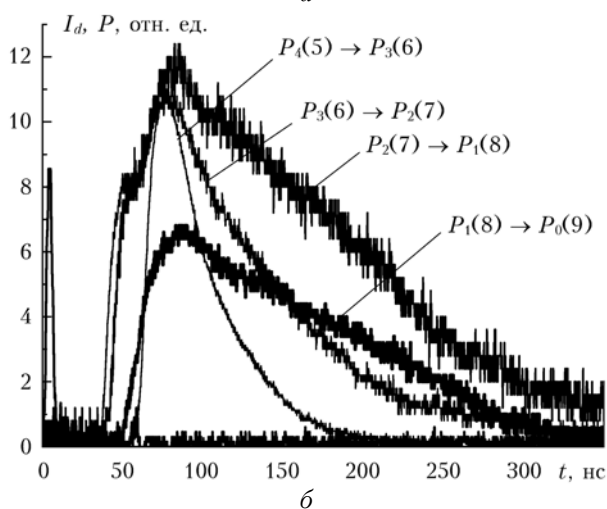
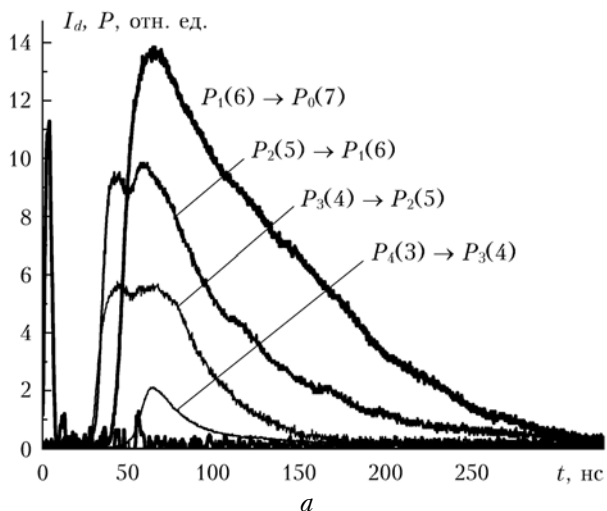


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока разряда I_d и генерации на линиях каскадных переходов DF-лазера с накачкой ОРИПЭЛ. Смесь $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 240 : 30$ мм рт. ст. В качестве выходного зеркала резонатора используется пластинка из германия. Каскад с линии $P_4(3)$ (а) и $P_4(5)$ (б)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой однородности ОРИПЭЛ, который удовлетворяет основным условиям формирования объемного разряда в смесях с SF_6 . При этом за счет мощного импульса накачки генерация на отдельных линиях начиналась через 15–20 нс после пробоя разрядного промежутка с разбросом около 5 нс (см. рис. 4), что снижает потери энергии на достижение порога генерации. Данные факторы обеспечивают высокий кпд нецепного лазера с накачкой ОРИПЭЛ.

Как видно из рис. 3, в спектре генерации DF-лазера с накачкой ОРИПЭЛ наблюдались слабые линии на полосе P_5 с $j = 4$ и 5. Осциллограммы импульсов генерации на данных линиях приведены на рис. 5.

Эти линии появлялись примерно на 50 нс позже остальных линий, а их интенсивность была на 2–3 порядка ниже. Возбужденные молекулы DF^* с колебательным квантовым числом $\nu > 4$ формируются в «горячей» реакции (4), что говорит о высокой концентрации молекулярного фтора в плазме

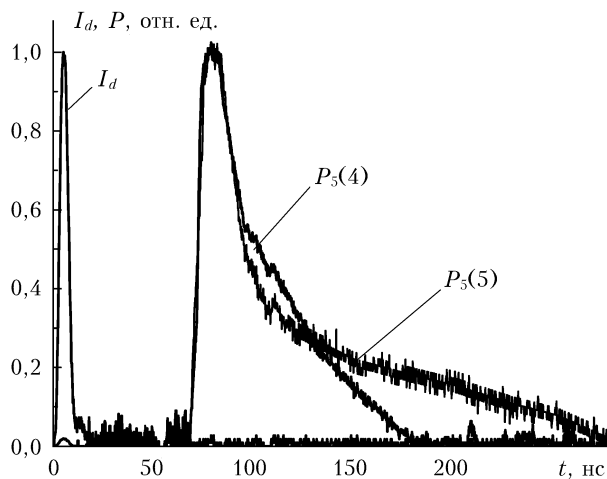


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока разряда и генерации на линиях $P_5(4)$ и $P_5(5)$ DF-лазера с накачкой ОРИПЭЛ. Смесь $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 240 : 30$ мм рт. ст. В качестве выходного зеркала резонатора используется пластинка из германия

ОРИПЭЛ, достаточной для достижения порога генерации. Генерация нецепных лазеров на полосах P_4 – P_6 ранее наблюдалась только при мощной однородной накачке электронным пучком [13]. Вынужденное излучение на данных линиях в объемном разряде получено впервые.

Заключение

Проведены исследования спектрального состава излучения нецепных HF(DF)-лазеров с накачкой объемным самостоятельным разрядом с искровой подсветкой и ОРИПЭЛ. Обнаружено, что число линий генерации в спектре излучения нецепных лазеров возрастает при повышении однородности объемных разрядов накачки, формируемых различными способами. При этом в спектре излучения появляются интенсивные каскадные переходы и достигается предельная эффективность генерации на молекулах HF ($\lambda = 2,8 \div 3,2$ мкм) и DF ($\lambda = 3,8 \div 4,2$ мкм). Показано, что объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин, может использоваться для создания эффективных лазеров на молекулах HF и DF с широким спектром генерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ, НШ-1305.2014.2, и гранта РФФИ № 14-08-00074.

1. Башкин А.С., Игошин В.И., Оравский А.Н., Шеллов В.А. Химические лазеры. М.: Наука, 1982. 400 с.
2. Зуев В.В., Зуев В.Е. Лазерный экологический мониторинг газовых компонент атмосферы. М.: Наука, 1992. 189 с.
3. Гордон Е.Б., Матюшенко В.И., Надхин А.И., Сизов В.Д., Сулеменков И.В. Управление спектральным составом излучения мощного импульсного химического HF-лазера // Хим. физ. 1993. Т. 12, № 10. С. 1359–1363.
4. Баранов В.Ю., Высикайло Ф.И., Демьянов А.В., Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. Параметрические исследования импульсного нецепного HF-лазера // Квант. электрон. 1984. Т. 11, № 6. С. 1173–1178.

5. *Агроскин В.Я., Васильев Г.К., Гурьев В.И.* Многоканальная оптико-акустическая спектроскопия атмосферы на линиях излучения фторводородного лазера // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 10. С. 1344–1348.
6. *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.* Aerosol sounding with a lidar system based on a DF-laser // Appl. Phys. B. 2005. V. 81, N 8. P. 1149–1154.
7. *Креков Г.М., Матвиенко Г.Г.* Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 835–844.
8. *Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* Мощные электроразрядные лазеры на плотных газах с накачкой от генераторов с полупроводниковыми прерывателями тока // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 865–872.
9. *Panchenko A.N., Tarasenko V.F.* Efficient gas lasers pumped by double-discharge circuits with semiconductor opening switch // Progress in Quantum Electron. 2012. V. 36, N 1. P. 143–193.
10. *Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 226–229.
11. *Панченко А.Н., Панченко Н.А., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* Лазеры УФ-, видимого и ИК-диапазонов с накачкой диффузным разрядом, формируемым убегающими электронами // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 857–860.
12. *Химические лазеры* / Под ред. Р. Гросса, Дж. Ботта. М.: Мир, 1980. 583 с.
13. *Ерофеев М.В., Орловский В.М., Скакун В.С., Соcнин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Энергетические, временные и спектральные характеристики нецепного HF-лазера с накачкой планарным пучком электронов и разрядом, инициированным пучком электронов // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 3. С. 232–235.

M.I. Lomaev, A.N. Panchenko, N.A. Panchenko. **Spectral parameters of non-chain HF(DF) laser radiation pumped by volume discharge.**

Spectral parameters of non-chain chemical laser on mixtures of hydrogen and deuterium with SF₆ pumped by a discharge with UV illumination from generator with inductive energy storage and by a diffuse discharge formed in a non-uniform electric field due to preionization by run-away electrons (REP DD) are compared. It is shown that high uniformity of volume discharges formed in the active laser medium allows the increase in the number of laser lines. Therewith intense cascade transitions appear in the laser spectra and lasing efficiency on HF ($\lambda = 2.8 \div 3.2 \mu\text{m}$) and DF molecules ($3.8 \div 4.2 \mu\text{m}$) reaches its ultimate value. It is shown that the volume discharge initiated by run-away electrons (REP DD) in gas mixtures with SF₆ is an efficient pumping method of lasers on HF(DF) molecules.