

07;10;12

Эффективность химического лазера на смеси SF₆-H₂ с накачкой электронным пучком

© В.М. Орловский¹, А.Г. Пономаренко², Э.А. Соснин¹, В.Ф. Тарасенко¹, Ю.И. Хапов²¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия² Институт лазерной физики СО РАН,
634090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 8 июля 1997 г. В окончательной редакции 20 января 1998 г.)

Приведены результаты исследований HF лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой радиально сходящимся и планарным пучком электронов. Анализируются основные каналы образования колебательно-возбужденных молекул HF. Измерено распределение плотности энергии излучения в выходном пучке широкоапертурного лазера. В смеси SF₆ : H₂ = 8 : 1 при давлении 1.1 atm с активного объема ~ 30 l получена энергия излучения ~ 200 J при эффективности относительно вложенной энергии ~ 11%. Показано, что добавки буферных газов неона или аргона улучшают однородность распределения энергии излучения в выходном пучке HF лазера, накачиваемого нецепной химической реакцией и инициируемой пучком электронов, а также увеличивают энергию излучения.

Введение

В последнее время значительно возрос интерес к изучению химических HF и DF лазеров [1–8], в том числе и с накачкой нецепными химическими реакциями [2,6–8]. Это обусловлено новыми возможностями использования лазеров с высокими энергетическими характеристиками в ИК области спектра. Для инициирования химических реакций применяются электронные пучки, разряды, оптическое излучение и другие способы. Максимальные импульсные и удельные энергии излучения получены для HF лазеров (длина волны излучения $\lambda \approx 2.6\text{--}3.2 \mu\text{m}$) с накачкой цепными реакциями. Однако для многих практических приложений наиболее подходят химические HF и DF лазеры с накачкой нецепными реакциями, которые, хотя и имеют существенно более низкие энергетические характеристики, но просты и безопасны при эксплуатации. Основные результаты по исследованию химических лазеров, полученные до 1982 г., обобщены в монографиях [9,10] и частично в диссертации [11]. Однако вопрос о максимальных КПД HF и DF лазеров, накачиваемых нецепными химическими реакциями, остается открытым.

В настоящей работе приведены результаты исследований эффективности HF лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой электронным пучком. Данная работа является продолжением исследований, проведенных ранее в [7,11].

Экспериментальные установки и методики

В экспериментах использовались две установки. Первая состояла из ускорителя электронов, который формировал ленточный электронный пучок с геометрическими размерами $3 \times 20 \text{ cm}$ длительностью ~ 15 ns на полувысоте, энергией электронов до 150 keV, током до 6.5 kA, и

лазерной камеры с возбуждаемым объемом 124 cm³ [11]. При изменении зарядового напряжения энергия пучка электронов, вкладываемая в рабочую смесь, могла изменяться от 4 до 16 J. Импульсы напряжения на вакуумном диоде, тока в вакуумном диоде и тока в лазерной камере для этой установки приведены на рис. 1. Вторая установка представляла собой компактный широкоапертурный лазер с активным объемом ~ 30 l, на котором ранее была получена энергия излучения ~ 100 J на молекулах XeCl* ($\lambda = 308 \text{ nm}$) и KrF* ($\lambda = 249 \text{ nm}$) [12], а также ~ 115 J в смеси SF₆-H₂ [7]. Ускоритель электронов с вакуумной изоляцией, формирующий радиально сходящийся электронный пучок от четырех катодов из выпускаемого промышленностью материала бархата, подобного лазера подробно описан в [13]. В настоящей работе применялся модернизированный вариант установки [7]. В отличие от [12,13] генератор импульсных напряжений (ГИН) располагался горизонтально, это позволило установить оптическую ось лазерной камеры на высоте 80 cm. Основные результаты, приведенные в настоящей работе, получены при зарядном напряжении девятиступенчатого генератора импульсных напряжений 80 kV, напряжении на вакуумном диоде ~ 400 kV, токе пучка в лазерной камере ~ 26 kA и длительности импульса тока пучка ~ 400 ns. Энергия, вкладываемая электронным пучком в оптимальную рабочую смесь SF₆ : H₂ = 8 : 1 при давлениях, равных или более 0.7 atm, и зарядном напряжении 80 kV, составляла ~ 1.7 kJ. Импульсы напряжения на вакуумном диоде, тока в вакуумном диоде и тока в лазерной камере приведены на рис. 1. Активный объем лазерной камеры имел длину ~ 100 cm и диаметр 20 cm. Для обоих ускорителей электронов данных лазеров характерно изменение энергии электронов и тока пучка в течение импульса накачки. Рабочие смеси, состоящие из водорода и SF₆, готовились в лазерных камерах. В ряде экспериментов применялись тройные

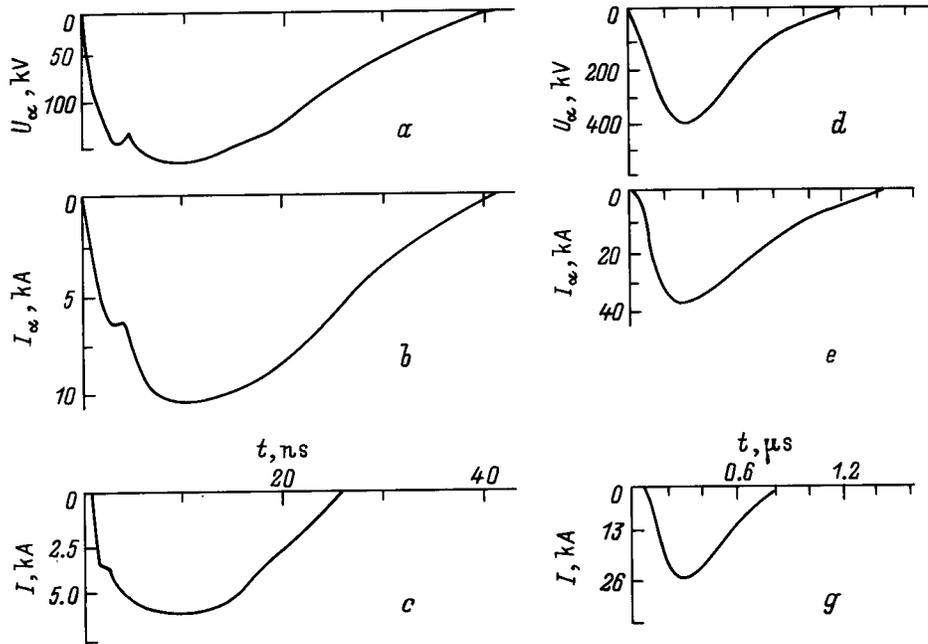


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения на вакуумном диоде (*a, d*), тока в вакуумном диоде (*b, e*) и в лазерной камере (*c, g*): *a, b, c* — лазер с планарным электронным пучком; *d, e, g* — лазер с радиально сходящимся пучком.

смеси с добавками аргона или неона. Использовались несколько типов резонаторов. В качестве "глухих" зеркал применялись плоские и вогнутые сферические зеркала с золотым покрытием или с алюминиевым; в качестве выходных — плоскопараллельные пластины из BaF_2 , $NaCl$, КРС-5 и КРС-6 с отражением в области $\sim 3 \mu m$ соответственно 7, 9, 33 и 27%.

Для определения энергии излучения использовались калориметры ИМО-2, устанавливаемые в различных точках выходного лазерного пучка. Обычно энергия излучения для смеси измерялась при первом включении ускорителя. На широкоапертурном лазере измерения проводились одновременно из различных областей двумя калориметрами ИМО-2, что позволяло более быстро определять распределение плотности лазерной энергии по сечению выходного пучка. Временные характеристики импульса излучения регистрировались приемником ФП-1, сигнал с которого подавался на осциллограф С8-14. Вложенная в рабочую смесь энергия электронного пучка определялась по методикам, описанным в [6,11].

Результаты и их обсуждение

Лазер с планарным электронным пучком позволял более легко изменять экспериментальные условия и при этом расход рабочих газов был минимальным. Поэтому были проведены подробные исследования параметров лазерного излучения в различных условиях на первой установке, а затем в наиболее интересных режимах эти исследования были повторены на широкоапертурном

лазере. Основные результаты иллюстрируют рис. 2–4. На рис. 2 приведены зависимости энергии излучения в импульсе от давления оптимальной смеси при различных энергиях электронного пучка. С увеличением давления величина энергии излучения возрастает, достигает максимальной величины при некотором оптимальном давлении, а затем падает. Подобные зависимости были получены и в других работах [9,10,14]. Величина

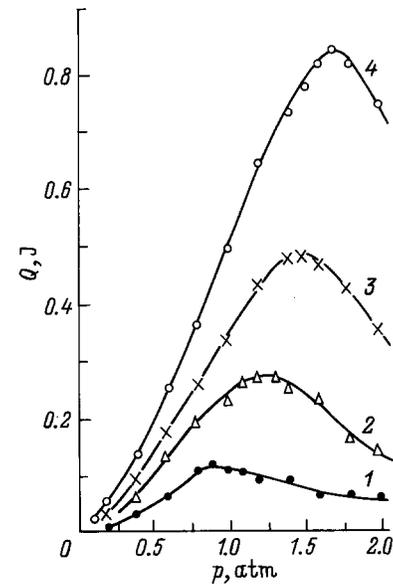


Рис. 2. Зависимость энергии излучения от давления смеси $SF_6 : H_2 = 8 : 1$ при различных энергиях пучка электронов, J: 1 — 4, 2 — 7.1, 3 — 10.3, 4 — 16.2. Установка 1.

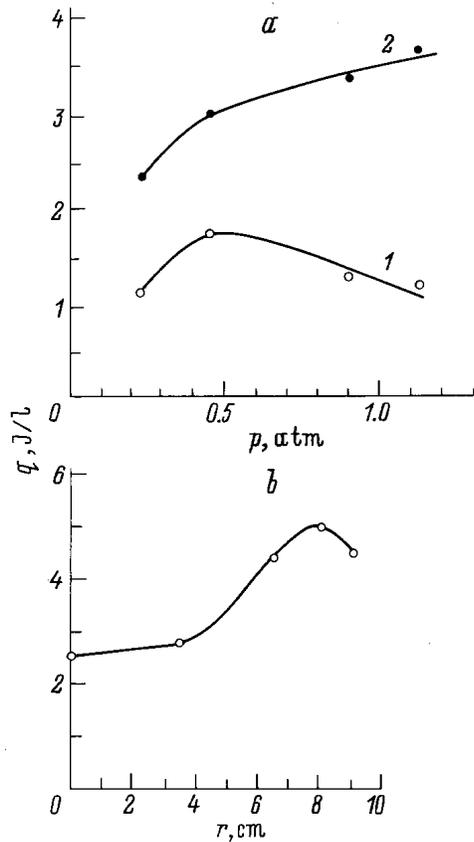


Рис. 3. Зависимости удельной энергии лазерного излучения на оси лазерной камеры (1) и у фольги (2) от давления (а) и от радиуса лазерной камеры (б). Установка 2, смесь $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 8 : 1$.

оптимального давления зависит от парциального состава смеси и энергии электронов. С увеличением энергии электронов и парциального содержания водорода (менее плотная смесь) положение максимума смещается в сторону больших давлений. Кроме того, энергетические характеристики излучения зависят от состава рабочей смеси. При уменьшении парциального давления водорода в смеси относительно оптимального соотношения $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 8 : 1$ наблюдается быстрое уменьшение энергии излучения и эффективности, тогда как увеличение содержания водорода приводит к плавному снижению этих характеристик излучения. Отметим также, что оптимальное давление оптимальной смеси отличается для различных областей активного объема и этот эффект особенно заметен в широкоапертурных лазерах. Давление, при котором достигается максимальная удельная энергия лазерного излучения из малой части активного объема (в этом случае можно не учитывать неоднородность энерговклада по сечению лазерной камеры), определяется, с одной стороны, ростом скоростей химических реакций при увеличении давления в исследованном интервале, что приводит к повышению оптимального давления, а с другой стороны, к увеличению скорости

столкновительной дезактивации молекул HF, что вначале приводит к уменьшению КПД, а затем и энергии излучения. Зависимости, приведенные на рис. 2, были получены при измерении полной энергии излучения со всей активной области, охватываемой резонатором. На рис. 3, а приведены зависимости удельной энергии излучения от давления рабочей смеси, полученные на установке 2 при измерениях на оси лазерной камеры и на расстоянии 8 см от оси (2 см от фольги). Видно, что оптимальное давление смеси в центре выходного пучка составило 0.45 atm, а на расстоянии 2 см от фольги при давлении 1.1 atm оптимум еще не был достигнут. На рис. 3, б приведено распределение удельной энергии излучения по радиусу лазерной камеры широкоапертурного лазера при установке оптимального резонатора (зеркало с золотым покрытием и плоскопараллельная пластинка из КРС-5) и давлении смеси 0.45 atm. Максимум и характер зависимости удельной энергии излучения от радиуса лазерной камеры от давления смеси при смене резонатора не изменились. Удельная энергия излучения при давлении смеси 0.45 atm составляла у фольги ~ 5 J/l, в центре лазерной камеры ~ 2.6 J/l, а полная энергия излучения равнялась ~ 115 J. Эффективность генерации относительно вложенной в газ пучком электронов энер-

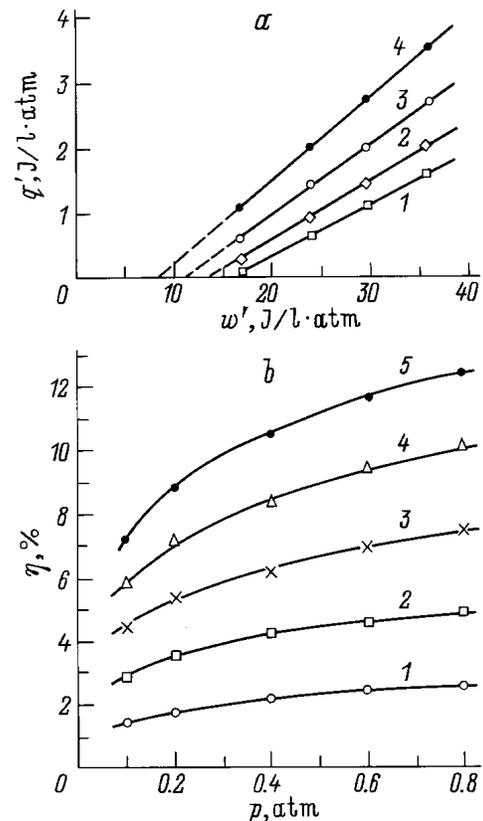


Рис. 4. Зависимости удельной энергии лазерного излучения от удельной энергии накачки (а) и зависимость КПД лазера от давления при постоянных отношениях пороговой удельной энергии накачки к вложенной (б). Установка 1, смеси $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 8 : 1$.

гии в этих условиях составила $\sim 8\%$. При увеличении давления смеси неоднородность распределения плотности энергии излучения по сечению выходного пучка возрастала (рис. 3, *a*), но при этом также возрастали полная энергия излучения и эффективность, которые составили соответственно ~ 200 J и 11% при давлении 1.1 atm.

На рис. 4, *a* приведены зависимости удельной энергии излучения от удельной энергии накачки при давлениях 0.1 (кривая 1), 0.2 (кривая 2), 0.4 (кривая 3) и 0.8 atm (кривая 4). Как удельная энергия излучения, так и удельная энергия накачки были нормированы на единицу давления. В области давлений от 0.1 до 0.8 atm, начиная с некоторой пороговой величины, наблюдается линейный рост удельной энергии излучения.

На рис. 4, *b* приведена зависимость эффективности генерации от давления для различных соотношений между пороговой удельной энергией накачки w_{th} (для достижения генерации с линейной зависимостью от энергозклада, рис. 4, *a*) и удельной энергией накачки w , вкладываемой в рабочую смесь: 1 — $w_{th}/w = 0.8$, 2 — 0.6, 3 — 0.4, 4 — 0.2, 5 — 0. Видно, что с ростом давления газа при постоянном соотношении w_{th}/w эффективность лазера монотонно увеличивается. При вкладываемой энергии намного превышающей пороговую величину (кривая 5), получаем зависимость для предельных КПД. Таким образом, исследование энергетических характеристик HF-лазера на смеси SF₆-H₂ показало, что при иницировании химической реакции мощным электронным пучком КПД лазера возрастает как с увеличением давления смеси (до 1–1.5 atm), так и удельной энергии, вкладываемой электронным пучком. Максимальные КПД, полученные на обеих установках, составили $\sim 11\%$.

Измерения формы импульса генерации на установке 2 показали, что в оптимальных условиях он запаздывает относительно импульса тока на время ~ 40 ns и его длительность составляет на полувысоте ~ 500 ns. Мощность излучения при этом может превышать 200 MW. В таблице приведены значения интегрального коэффициента усиления для первой установки. Коэффициент усиления определялся по зависимостям энергии излучения от длины активной области, которые снимались при установке только одного "глухого" зеркала с отражением на лазерной длине волны 100%. Наибольшая величина интегрального коэффициента усиления в данных условиях составила 11.6%.

Зависимость величины интегрального коэффициента усиления α от состава и давления смеси

Смесь H ₂ : SF ₆	<i>P</i> , atm	α , %/cm
1 : 8	0.8	5.8
1 : 8	1.0	7.5
1 : 8	1.4	11.6
1 : 10	1.0	6.2

Были также проведены эксперименты по влиянию добавок неона или аргона на энергию излучения HF лазера (установка 2). К смеси SF₆: H₂ = 8 : 1 при давлении 0.45 atm добавляли 0.5 atm неона или аргона. При равных давлениях двойных и тройных смесей (0.95 atm) наблюдалось увеличение энергии излучения для тройных смесей на 30% на оси лазерной камеры и на 10% в области у фольги. Это позволяло улучшить однородность распределения энергии излучения в выходном пучке широкоапертурного лазера, что важно при формировании лазерных пучков с малой расходимостью излучения. Снижение энергии излучения во втором импульсе при работе на одной порции тройной смеси также уменьшалось и составило $\sim 35\%$ вместо $\sim 50\%$, наблюдаемых в двойной смеси. Для выяснения природы обоих эффектов необходимы дополнительные исследования.

Эффективность лазера на смеси SF₆-H₂

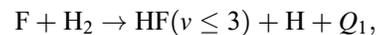
Проанализируем некоторые особенности кинетического механизма реакций в лазере на смеси SF₆-H₂. Обычно считается, что при поглощении энергии от внешнего источника в рабочей смеси происходит диссоциация молекул SF₆ на SF₅ и F. Мы предполагаем, что образование в результате химических реакций колебательно-возбужденных молекул HF может происходить в результате двух основных процессов [11].

1. При сравнительно малых энергиях электронов (~ 3.5 eV) образуется атомарный фтор в реакции диссоциации



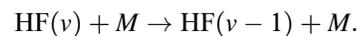
где Q — энергия диссоциации, равная примерно 75 kcal/mol.

Далее фтор взаимодействует с водородом и в результате эндотермической реакции создается инверсия

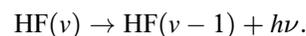


где Q_1 — энергия, выделившаяся в результате химической реакции, которая равна 31.8 kcal/mol; v — номер колебательного уровня.

В результате столкновительной дезактивации частицами M распад возбужденных молекул HF (v) может происходить безызлучательно



Спонтанное и стимулированное излучение может проходить каскадным образом



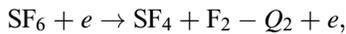
Если сделать следующие допущения: а) реакция диссоциации происходит за короткое время, т.е. в момент времени $t = 0$, когда начинается химическая реакция, в активном объеме имеется определенная концентрация атомов фтора (N_F); б) реакциями столкновительной дезактивации пренебрегаем; в) стимулированное излучение

начинается после окончания химической реакции, т.е. концентрация $N_F \approx N_{HF}$, то предельный КПД можно определить из соотношения [11]

$$\eta = 0.88 \cdot 10^{-2} h\nu. \quad (1)$$

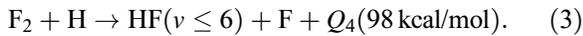
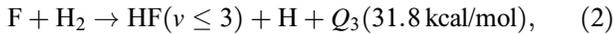
Отметим, что вышеописанные допущения более справедливы для лазера, накачиваемого электронным пучком малой длительности, а при длительности импульса накачки ~ 100 ns и более химические реакции будут идти одновременно со стимулированным излучением. Подставив численное значение $h\nu = 10.2$ kcal/mol в выражение (1), находим эффективность преобразования энергии расходуемой на диссоциацию молекул SF_6 , в энергию излучения. Получаем $\eta = 0.09$. Если учесть при этом, что доля лазерного излучения во всем излучении молекул HF меньше 100% (для эксиплексных лазеров эта доля обычно составляет $\sim 50\%$), то КПД генерации должен быть меньше 9%. Между тем в экспериментальной работе [14] сообщалось о получении КПД $\sim 11\%$ и в нашей работе для обеих установок максимальные КПД составили также $\sim 11\%$.

2. Если диссоциация молекул SF_6 производится электронами с энергией, превышающей 5 eV, то в результате такого взаимодействия может образоваться молекулярный фтор с затратами энергии 105 kcal/mol [15]



где Q_2 — энергия, выделившаяся в результате химической реакции.

Таким образом, образуется химически активная смесь, в которой возможны реакции



Кинетический механизм реакций в этом случае существенно отличается. Упрощенно его можно представить следующим образом. Молекулы HF образуются в два этапа. Поскольку удельная скорость реакции (2) значительно (5.5 раз) выше, чем реакции (3) [16], а реакция (3) протекает после наработки достаточного количества атомов водорода, то на первом этапе атомы фтора вступают в реакцию с молекулярным водородом, образуя инверсную населенность молекул HF ($v \leq 3$), что быстро приводит к возникновению генерации, а на втором этапе реализуется цепная реакция по схемам (2) и (3). Однако скорость образования молекул HF определяется теперь в основном более медленной реакцией (3). Отметим, что в некоторых условиях при накачке электронным пучком [17] наблюдались два импульса генерации, что также подтверждает присутствие обеих процессов. При участии двух процессов в образовании молекул HF оценка дает следующее выражение для максимальной энергии излучения [11]:

$$q_m = h\nu \{[(1-m)E/75](\sum v k_v - 1.5) + (mE/105)\sum v k_v\}, \quad (4)$$

где m — часть полной энергии E , затрачиваемой на ионизацию молекул SF_6 ; k_v — константы скоростей химических реакций; v — номер колебательного уровня; mE ($m \leq 1$) идет на образование молекулярного фтора, а остальная энергия $(1-m)E$ расходуется на образование атомарного фтора.

Подставляя нормированные значения удельных констант скорости химической реакции k_v [18] получим

$$q_m = 10^{-2} E(9 + 12.5m). \quad (5)$$

Поделив выражение (5) на величину энергии, затраченной на диссоциацию молекул $SF_6(E)$, получим выражение для максимально возможного КПД лазера на смеси SF_6-H_2 $\eta = 10^{-2}(9 + 12.5m)$. Параметр m определяет ту часть энергии электронного пучка, которая расходуется на диссоциацию SF_6 с образованием молекулярного фтора. Таким образом, если в смеси SF_6-H_2 при иницировании химической реакции создаются условия, при которых молекулы SF_6 могут диссоциировать с образованием атомарного и молекулярного фтора, можно получить увеличение энергии излучения и КПД лазера. Как мы уже отмечали, на обеих установках был реализован КПД $\sim 11\%$, что можно объяснить, например, одновременной наработкой атомарного и молекулярного фтора в рабочей смеси. Для получения такого КПД при доле лазерного излучения относительно всего излучения на лазерных переходах $\sim 100\%$ величина параметра m должна составлять 0.2. По-видимому, этот параметр должен быть несколько выше, так как при оценке не учитывались различного рода потери. Если сравнить данные результаты с КПД относительно вложенной энергии, получаемым при накачке самостоятельным разрядом [8,11], различие составляет не менее двух раз. Можно предположить, что при накачке самостоятельным разрядом и одинаковых энерговкладах концентрация электронов с энергией более 5 eV существенно меньше, чем при накачке электронным пучком. В дальнейшем мы планируем продолжить исследование основных процессов, влияющих на эффективность изучения лазера на смеси SF_6-H_2 .

Заключение

В работе проведены исследования HF лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, иницируемой радиальносноходящимся и планарным пучком электронов. Проанализированы основные каналы образования колебательно-возбужденных молекул HF. Предполагается, что высокие КПД нецепного HF лазера достигаются за счет одновременного образования атомарного и молекулярного фтора при воздействии электронного пучка на рабочую смесь. При накачке самостоятельным разрядом, по-видимому, наработка молекулярного фтора существенно меньше, что снижает КПД электроразрядных лазеров в два и более раза. Измерено распределение

плотности энергии излучения в выходном пучке широкоапертурного лазера. В смеси $SF_6 : H_2 = 8 : 1$ при давлении 1.1 atm с активного объема ~ 301 получена энергия излучения ~ 200 J при эффективности относительно вложенной энергии $\sim 11\%$. Показано, что добавки буферных газов неона или аргона улучшают однородность распределения энергии излучения в выходном пучке HF лазера, накачиваемого нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов, а также увеличивают энергию излучения.

Авторы благодарят А.Н. Панченко, А.М. Ефремова, Э.Н. Абдуллина и А.В. Феденеву за помощь в проведении экспериментов на установке 2.

Список литературы

- [1] Галаев И.И., Конкин С.В., Латышев А.Д. и др. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 3. С. 217–221.
- [2] Gastaud M., Bouesc J., Autric M. // Proc. 11th Intern. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conf. Edinburgh. 1996. Vol. 3092. P. 585–588.
- [3] Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.В. и др. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 2. С. 119–124.
- [4] Башкин А.С., Борейко А.С., Лебачев В.В. и др. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. С. 428–432.
- [5] Александров Б.П., Степанов А.А., Щеглов В.А. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 6. С. 490–494.
- [6] Великанов С.В., Запольский Н.Ф., Флоров Ю.Н. // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 1. С. 11–14.
- [7] Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 5. С. 58–65.
- [8] Ломаев М.И., Понченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 6. С. 499–500.
- [9] Химические лазеры / Под ред. Р. Гросса, Дж. Ботта. М.: Мир, 1980. 832 с.
- [10] Химические лазеры / Под ред. Н.Г. Басова. М.: Наука, 1982. 400 с.
- [11] Хапов Ю.И. Канд. дис. Новосибирск, 1982. 187 с.
- [12] Абдуллин Э.Н., Горбачев В.И., Ефремов А.М. и др. // Квантовая электрон. 1993. Т. 20. № 7. С. 652–656.
- [13] Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М. и др. // ПТЭ. 1993. № 5. С. 138–141.
- [14] Башкин А.С., Ораевский А.Н., Томашов В.П. // Квантовая электрон. 1977. Т. 1. № 7. С. 169–171.
- [15] Гуревич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н. и др. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: Наука, 1974. 391 с.
- [16] Kerber R.L., Whittier J.S. // Appl. Opt. 1976. Vol. 15. N 10. P. 2358–2366.
- [17] Gross R.W.F., Wesner F. // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. N 10. P. 559–561.
- [18] Wilkins R.L.J. // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 57. N 2. P. 912–917.