

Об эффективности лазера на смеси $H_2 - SF_6$ при иницировании химических реакций потоком электронов

М.В.Ерофеев, В.М.Орловский, В.С.Скакун, Э.А.Соснин, В.Ф.Тарасенко

Исследованы спектральные и амплитудно-временные характеристики HF-лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, иницируемой радиально сходящимся и планарным пучками электронов. Проанализированы основные каналы образования колебательно-возбужденных молекул HF. Подтверждено, что высокие КПД (~10%) нецепного HF-лазера могут достигаться только за счет одновременного образования атомарного и молекулярного фтора при воздействии электронного пучка на рабочую смесь и участия молекулярного фтора в создании инверсии. Показано, что лазерный импульс имеет сложный спектрально-временной состав, обусловленный последовательной генерацией Р-линий и перекрытием во время импульса излучения как вращательных линий одной и той же колебательной полосы, так и отдельных колебательных полос.

Ключевые слова: HF-лазер, эффективность генерации, накачка пучком электронов.

Введение

Использование потока электронов при иницировании цепных и нецепных химических реакций во фторородородных лазерах позволяет возбуждать большие объемы активной среды и получать значительные энергии и (или) эффективности излучения [1–8]. Наибольшие КПД и энергии излучения достигаются в химических лазерах с накачкой цепными реакциями. Однако при реальном применении фторородородных лазеров требуются их высокие энергетические характеристики в режиме отдельных импульсов. Также необходимы безопасность и удобства эксплуатации этих лазеров, а в некоторых случаях и возможность работы в импульсно-периодическом режиме. С этой точки зрения более перспективны нецепные лазеры на смеси SF_6 с водородом, дейтерием или их соединениями при условии достижения в них достаточно высоких КПД (10% и более). О реализации столь высоких КПД генерации при накачке пучком электронов смеси $H_2 - SF_6$ сообщалось в работах [3, 4, 8], а их достижение в нецепном HF-лазере объяснялось в [4, 8] участием молекулярного фтора в создании инверсии. Доказательством этого предположения должно служить наличие в спектре генерации молекулы HF колебательных переходов с $v \geq 4$ и получение импульсов генерации достаточно большой длительности (превышающей длительность импульса накачки).

В данной работе приводятся результаты исследования фторородородных лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, иницируемой радиально сходящимся и планарным потоками электронов, и анализируется влияние этих характеристик на эффективность генерации. Работа является продолжением исследований, описанных в [7, 8].

1. Экспериментальные установки и методики измерений

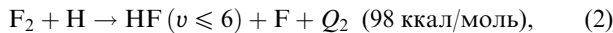
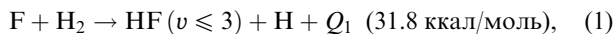
В экспериментах использовались две установки. В установке 1 с активным объемом ~30 л применялось возбуждение радиально сходящимся потоком электронов, полученные на ней энергетические и временные характеристики излучения HF-лазера, а также параметры импульса накачки описаны в работах [7, 8].

Установка 2 ранее использовалась для исследования широкополосного излучения и была аналогична описанной в [9]. Ускоритель позволял формировать поток электронов со следующими параметрами: сечение 42×1.5 см, плотность тока 2.5 А/см², длительность импульса тока на полувисоте 50 нс и энергия электронов после фольги 155 кэВ. Резонатор лазера охватывал только часть газового объема лазерной камеры, имел диаметр 2.5 см и был образован сферическим медным зеркалом с радиусом кривизны 2.5 м и плоскопараллельной пластиной из КРС-5 с отражением в области 3 мкм порядка 33%. Для определения энергии излучения использовались калориметры ИМО-2Н или ИКТ-1Н. Временные характеристики импульса излучения регистрировались охлаждаемым жидким азотом фотоприемником ФСГ-22-3А2 или фотоприемником ФП-1 (область спектральной чувствительности составляла 1.5–11 мкм). Сигнал с фотоприемников подавался на осциллограф С8-14. Спектральные характеристики излучения исследовались с помощью монохроматора МДР-12, в котором в качестве дисперсионного элемента использовалась отражательная дифракционная решетка 300 штр./мм (обратная линейная дисперсия составляла 9.6 нм/мм).

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

В [4, 8] было показано, что на эффективность HF-лазера с накачкой пучком электронов влияет образование не только атомарного, но и молекулярного фтора.

Обе частицы образуются при инъекции электронного пучка в рабочую смесь за счет диссоциации молекул SF_6 . Образование колебательно-возбужденных молекул HF в этом случае может происходить в результате двух основных процессов:



где Q_i ($i = 1, 2$) – энергия, выделившаяся в результате химической реакции. В этом случае образование инверсии можно представить следующим образом [4, 8]. Поскольку удельная скорость реакции (1) в 5.5 раза выше скорости реакции (2) и реакция (2) протекает после наработки достаточного числа атомов водорода, то на первом этапе образуется инверсная населенность молекул HF с $v \leq 3$. Это и приводит к появлению генерации на колебательных переходах с $v \leq 3$. На втором этапе реализуется реакция (2) и достигается инверсная населенность молекул HF, в том числе и на более высоких колебательных переходах ($4 \leq v \leq 6$). Кроме того, образовавшийся во второй реакции атомарный фтор снова может участвовать в создании инверсии на переходах с $v \leq 3$ (см. реакцию (1)). Таким образом, в рабочей смеси могут иметь место короткие цепочки, приводящие к увеличению эффективности HF-лазера, а в спектре генерации в этом случае должны присутствовать колебательные переходы с $v = 4 - 6$. При этом длительность импульса излучения должна превышать длительность импульса пучка электронов.

Распределение интенсивности по спектру для лазерной смеси состава $SF_6:H_2 = 7:1$ приведено на рис.1. Для трех исследованных давлений генерация наблюдалась на переходах с $v > 3$. При более высоких давлениях (0.82 и 0.344 атм) генерация регистрировалась на всех шести

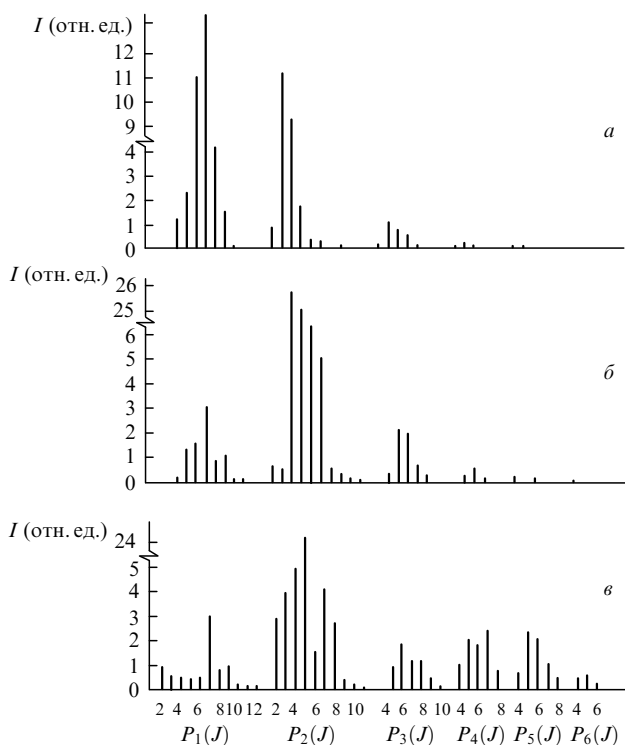


Рис.1. Распределения интенсивности по спектру генерации при давлении лазерной смеси $SF_6:H_2 = 7:1$, равном 0.096 (а), 0.344 (б) и 0.82 атм (в), полученные на установке 2.

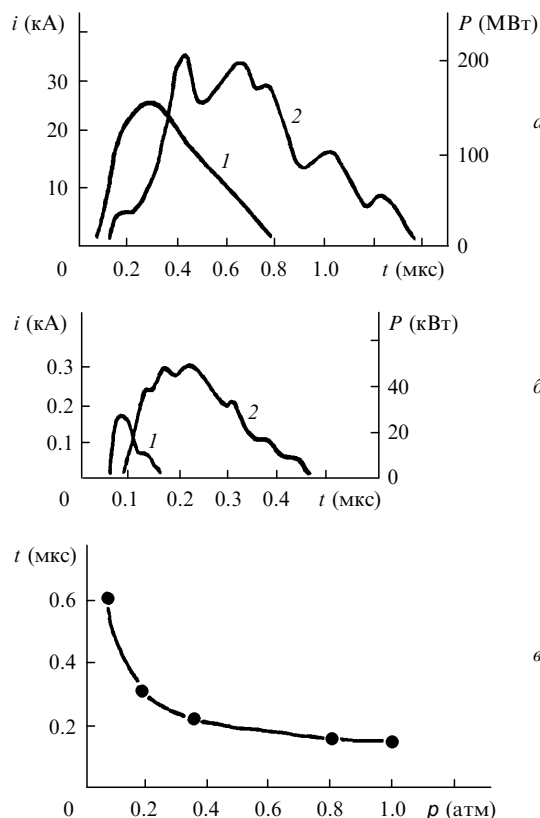


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока пучка i (1) и импульсов генерации P (2) при накачке смеси $SF_6:H_2 = 7:1$ радиально сходящимся (а) и планарным (б) пучками электронов при давлении 0.45 (а) и 0.344 атм (б), а также зависимость длительности импульса излучения t , полученная на установке 2, от давления той же смеси (в).

переходах P -ветви ($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$), а максимальная энергия соответствовала переходу P_2 . Полученные спектры излучения очень хорошо совпадают со спектром излучения цепного HF-лазера на смеси H_2-F_2 [10]. Уменьшение давления до 0.096 атм приводило к генерации на переходах P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 (генерация на переходах с $v > 3$ также присутствовала) и смещению максимума генерации на переход P_1 . Это свидетельствует об участии молекулярного фтора в создании инверсии HF-лазера.

Временные и спектрально-временные характеристики HF-лазера исследовались как для суммарного лазерного излучения, так и для отдельных линий в диапазоне давлений 0.1–1 атм для лазерной смеси состава $SF_6:H_2 = 7:1$. На рис.2,а приведены импульс тока пучка и импульс лазерного излучения, полученные на установке с накачкой радиально сходящимся потоком электронов. Порог генерации достигался спустя 40 нс после инъекции тока пучка электронов, а длительность импульса излучения существенно превышала длительность импульса накачки и имела сложную пиковую структуру. Это, по-видимому, также связано с тем, что в генерации участвуют различные колебательные переходы, в том числе и с $v > 3$, на которых генерация имеет большие времена запаздывания.

На рис.2,б показаны импульсы тока пучка и генерации, полученные на установке с накачкой планарным пучком электронов. Видно, что эти импульсы имеют подобную структуру. Зависимость длительности импульса излучения на полувысоте от давления приведена на рис.2,в. Рост давления увеличивает удельные энергокла-

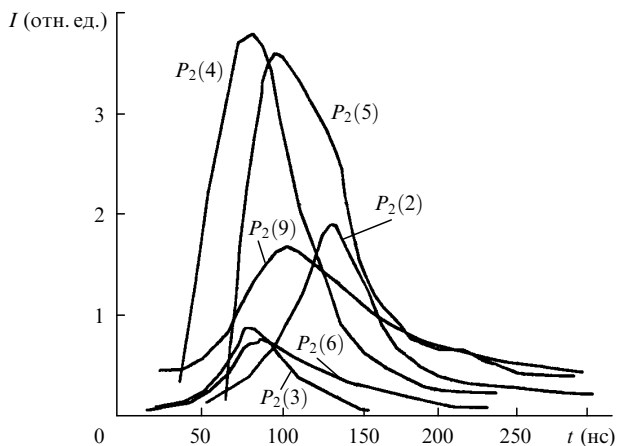


Рис.3. Временной ход интенсивности отдельных линий перехода P_2 при давлении смеси $\text{SF}_6\text{:H}_2 = 7:1$, равном 0.344 атм (установка 2).

ды в рабочую смесь и скорости протекания химических реакций, что и приводит к уменьшению длительности импульса излучения, однако и при давлении 1 атм она превышала длительность импульса накачки. Так, при изменении давления смеси от 1 до 0.1 атм длительность импульса лазерного излучения изменялась от 150 до 600 нс, а время запаздывания лазерного излучения относительно начала воздействия на газовую среду потока электронов – от 20 до 97 нс.

Очередность появления генерации на отдельных колебательных переходах следующая: $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_6$. Вначале лазерное излучение фиксировалось на наиболее интенсивных линиях переходов, а линии переходов P_4 , P_5 и P_6 регистрировались только во второй половине импульса излучения. На рис.3 приведены временные зависимости интенсивности генерации отдельных линий, зафиксированных на переходах полосы P_2 для давления 0.344 атм. Видно, что генерация на переходах P_2 с большим вращательным числом J наблюдается одновременно с генерацией на переходах с малым J , что говорит о существенной неравновесности распределения энергии молекул по вращательным уровням.

Согласно [4, 8] предельный КПД нецепного HF-лазера при участии в образовании инверсии только атомарного фтора не может превышать 9% и определяется соотношением $\eta = 0.88 \cdot 10^{-2} h\nu$, где $h\nu = 10.2$ ккал/моль. В настоящей работе на установке с накачкой радиально сходящимся пучком электронов мы получили КПД генерации более 10%. О возможности получения КПД излучения нецепного HF-лазера 10% и более сообщалось в работах [3, 4, 8], что доказывает участие молекулярного фтора в создании инверсии в нецепном HF-лазере.

Отметим важное преимущество применения для накачки HF-лазера радиально сходящегося пучка электронов. Как известно, на эффективность фтороводородных лазеров с накачкой планарным потоком электронов существенное влияние оказывает электрическое поле наведенного объемного заряда. Для радиально сходящегося потока электронов (установка 1) энергия, вложенная в газ

и измеренная по скачку давления [7], примерно равна энергии, полученной в результате расчета [7] методом Монте-Карло (без учета влияния объемного заряда) по программе, описанной в [11], во всем диапазоне давлений 0.25–1.25 атм рабочей смеси состава $\text{H}_2\text{:SF}_6 = 1:8$.

С другой стороны, как показали измерения, электрическое поле и плотность энергии излучения в центре лазерной камеры диаметром 20 см и на расстоянии 4.5 см от боковой стенки во время инжекции электронного пучка (при давлении смеси 0.45 атм) различаются не более чем на 15%. Тогда реализация высоких энергий генерации [7, 8] при достаточно равномерном распределении энергии излучения по сечению выходного пучка, а также хорошее согласие результатов расчетов вкладываемой в газ энергии с экспериментальными данными показывают, что установки с радиально сходящейся геометрией инжекции электронных пучков в рабочую смесь являются наиболее оптимальными для получения высоких энергий и эффективностей излучения нецепных HF(DF)-лазеров и формирования лазерных пучков высокого качества. По-видимому, в такой геометрии электрическое поле образовавшегося объемного разряда отрицательных ионов существенно меньше, чем при инжекции электронов с одной или двух сторон, из-за быстрого разряда на цилиндрическую стенку лазерной камеры.

1. *Химические лазеры*. Под ред. Р.Гросса, Дж.Ботта (М., Мир, 1980).
2. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г.Басова (М., Наука, 1982).
3. Башкин А.С., Ораевский А.Н., Томашов В.П. *Квантовая электроника*, **1**, 169 (1977).
4. Хапов Ю.И. *Канд. дис.* (Ин-т теоретической и прикладной механики СО АН СССР, Новосибирск, 1982).
5. Великанов С.Д., Силицин М.В., Урлин В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 25 (1996).
6. Castaud M., Bouesc J., Autric M. *Proc. SPIE*, **3092**, 585 (1996).
7. Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 781 (1997).
8. Орловский В.М., Пономаренко А.Г., Соснин Э.А. и др. *ЖТФ*, **69**, 76 (1999).
9. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 7 (1993).
10. Азаров М.А., Игошин В.И., Пичугин С.Ю., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **29**, 21 (1999).
11. Bugaew A.S., Koval N.N., Lomaev M.I. et al. *Laser and Particle Beams*, **12**, 633 (1994).

M.V.Erofeev, V.M.Orlovskii, V.S.Skakun, E.A.Sosnin, V.F.Tarasenko.
Efficiency of an $\text{H}_2 - \text{SF}_6$ laser with electron-beam initiation of chemical reactions.

The spectral and amplitude–time characteristics of HF lasers pumped by a nonchain chemical reaction and initiated by radially convergent and planar electron beams were investigated. The principal channels leading to the formation of vibrationally excited HF molecules were analysed. It was confirmed that high efficiencies ($\sim 10\%$) of a nonchain HF laser may be attained only as a result of the simultaneous formation of atomic and molecular fluorine when the active mixture is acted upon by an electron beam and of the participation of molecular fluorine in population inversion. It was shown that a laser pulse has a complex spectral–temporal profile caused by the successive generation of P -lines and the overlap during the radiation pulse of both the rotational lines of the same vibrational band and of individual vibrational bands.