

# О возможности получения в автономном непрерывном химическом лазере одновременной генерации излучения в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF

А.С.Башкин, Л.В.Гуров, Б.И.Каторгин, С.Н.Петрова, Д.В.Полиновский

*Приведены результаты сравнительного теоретического анализа эффективностей различных топливных композиций, используемых в камере сгорания автономного непрерывного химического HF–DF-лазера для получения высоких удельных энергетических параметров при одновременной генерации излучения в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF. Показана принципиальная возможность создания зеркал с коэффициентом отражения свыше 99 % одновременно для двух указанных спектральных диапазонов.*

**Ключевые слова:** генератор активной среды, непрерывный химический HF–DF-лазер, двухдиапазонный лазер, многослойные диэлектрические зеркала, топливная композиция.

## 1. Введение

Непрерывные химические лазеры (НХЛ) обычно генерируют излучение в каком-либо одном спектральном диапазоне, зависящем от состава топливной композиции и, следовательно, от используемой колебательно-возбуждённой молекулы (HF, DF, HCl, HBr, CO<sub>2</sub>) [1]. Поскольку для ряда применений определённый интерес представляет получение одновременной генерации в нескольких спектральных диапазонах, в литературе сообщалось о расчётно-теоретических исследованиях возможности получения генерации одновременно в двух разных спектральных диапазонах на различных парах молекул: HF–HCl [2], HF–HBr [3], DF–CO<sub>2</sub> [4]. В настоящей работе на основе расчёта процессов, происходящих в камере сгорания и в активной зоне лазера, с учётом их взаимосвязи проанализирована возможность получения эффективной генерации в автономном HF–DF-НХЛ одновременно в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF.

С помощью такого лазера могут быть получены экспериментальные данные по прохождению излучения с различными длинами волн в одинаковых климатических и погодных условиях в разных регионах над морем, в приземных и высотных слоях атмосферы, а также в ближнем космическом пространстве (об особенностях прохождения излучения различных лазеров через атмосферу, в том числе HF- и DF-НХЛ, см., напр., [5, 6]). Эти данные могут быть использованы для лазерной локации и связи. Есть сообщения об экспериментах по получению таких данных для приземных [7] и космических трасс [8] с использованием однодиапазонных HF- или DF-НХЛ. Поскольку спектры многочастотного излучения HF- и DF-НХЛ

совпадают со спектрами поглощения большинства атмосферных газов (в их число входят CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, SO<sub>2</sub>, HCl, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, HDO, H<sub>2</sub>O, HF и др. [9, 10]), то это делает перспективным использование указанных НХЛ для исследования газового состава атмосферы. Сообщалось о практическом применении HF- и DF-НХЛ для дистанционного газового анализа отдельных примесей с целью контроля окружающей среды. Так, в [11] с помощью HF-НХЛ с высокой чувствительностью (0.2 мг/м<sup>3</sup>) была измерена концентрация примеси HF в выхлопных газах, возникающих при производстве алюминия. В [12] приведены сведения о применении DF-НХЛ для определения концентрации молекул HCl в атмосфере.

В принципе с этой же целью могут быть использованы и импульсно-периодические HF(DF)-лазеры с разрядной накачкой (см., напр., [13], где с помощью данных лазеров была измерена концентрация различных углеводородов в атмосфере). Однако такие лазеры требуют использования довольно мощного разрядного источника питания, а их средняя мощность излучения в настоящее время существенно уступает мощности излучения автономных НХЛ, не требующих электрического питания. К тому же для НХЛ намного легче решаются вопросы увеличения их размеров и мощности выходного излучения. Поэтому при достаточно больших дальностях зондирования может оказаться целесообразным использование HF(DF)-НХЛ, работающего в импульсно-периодическом режиме.

Таким образом, возможности использования HF- и DF-НХЛ могли бы быть расширены при получении генерации на одной установке не в одном, а одновременно в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF. К сожалению, добиться этого отнюдь не просто. Для получения в зоне лазерной генерации колебательно-возбуждённых молекул HF или DF к потоку, содержащему атомарный фтор и истекающему из камеры сгорания в зону генерации, в качестве вторичного горючего должен подмешиваться на срезе сопловой решетки H<sub>2</sub> или D<sub>2</sub>. Однако для получения атомарного фтора в качестве первичного горючего обычно также используется H<sub>2</sub> или D<sub>2</sub>, в результате чего в истекающем из камеры сгорания по-

А.С.Башкин, Л.В.Гуров, Б.И.Каторгин, С.Н.Петрова. Открытое акционерное общество «НПО "Энергомаш" им. акад. В.П.Глушко», Россия, Московская обл., 141400 Химки, ул. Бурденко, 1; e-mail: energo@online.ru

Д.В.Полиновский. Московский авиационный институт (государственный технический университет), Россия, 125871 Москва, Волоколамское ш., 4

Поступила в редакцию 23 ноября 2007 г., после доработки – 20 февраля 2008 г.

токе помимо атомарного фтора содержатся в большом количестве невозбуждённые молекулы HF или DF. Поэтому обычно коэффициент поглощения излучения этими молекулами в колебательной полосе  $\nu = 0 \rightarrow \nu = 1$  превышает коэффициент усиления, что может снизить мощность генерации более чем в два раза. Чтобы избежать такой ситуации, в однодиапазонных HF- и DF-НХЛ используются разные первичное и вторичное горючие: например,  $D_2$  – первичное горючее,  $H_2$  – вторичное или наоборот.

В двухдиапазонном HF–DF-НХЛ в качестве вторичного горючего должны применяться и  $H_2$ , и  $D_2$ . В этом случае для снижения поглощения на переходе  $\nu = 0 \rightarrow \nu = 1$  необходимо использовать в камере сгорания альтернативные топливные композиции (ТК), в продуктах сгорания которых содержание невозбуждённых молекул HF и DF было бы минимально возможным при оптимальном содержании атомарного фтора.

## 2. Подбор оптимальной топливной композиции в камере сгорания

Топливная композиция, используемая в генераторе активной среды (ГАС) автономных HF- и DF-НХЛ, включает в себя фторсодержащий окислитель, первичное и вторичное горючие, а также разбавитель. В данной работе в качестве окислителя рассмотрены трифторид азота ( $NF_3$ ) и молекулярный фтор ( $F_2$ ), а в качестве разбавителя – гелий. По совокупности эксплуатационных характеристик  $NF_3$  превосходит все остальные окислители [14], но по энергетическим характеристикам при использовании в однодиапазонных HF- и DF-НХЛ он проигрывает (на 20 % – 25 %) наиболее эффективному из них – молекулярному фтору.

Первичным горючим могут служить различные вещества. В выполненных ранее расчётных и экспериментальных работах по исследованию однодиапазонных HF- и DF-НХЛ помимо  $H_2$  и  $D_2$  уже использовался ряд других

газов и жидкостей [14–16]:  $CO$ ,  $CS_2$  для HF-НХЛ и  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $CS_2$  для DF-НХЛ. В настоящей работе проведен сравнительный теоретический анализ эффективности использования указанных выше первичных горючих для получения двухдиапазонной генерации.

Методика подбора оптимального состава ТК в камере сгорания изложена в работе [16]. В ней показано, что в HF- и DF-НХЛ со щелевой сопловой решёткой при использовании в камере сгорания различных ТК зависимость такого важного параметра, как удельный энергоём (мощность лазерного излучения, отнесённая к суммарному массовому расходу компонентов), от относительного мольного содержания атомарного фтора  $\chi_F$  в потоке окислительного газа из камеры сгорания имеет широкий максимум, причём в диапазоне  $\chi_F = 0.09 - 0.166$  удельный энергоём изменяется очень незначительно (в пределах  $\pm 5\%$ ). Согласно [16] максимальный удельный энергоём при вариации большого числа начальных условий достигается при  $\chi_F^{opt} = 0.118$ , в связи с чем это значение было выбрано для проведения дальнейших расчётов. Уменьшение содержания молекул HF(DF) в окислительном газе при заданной мольной доле атомарного фтора  $\chi_F^{opt} = 0.118$  помимо использования альтернативных первичных горючих может быть также достигнуто понижением температуры продуктов сгорания. При этом для обеспечения достаточно высокой степени диссоциации фторсодержащего окислителя (более 97 %) температура газа в камере сгорания должна быть не ниже 1600 К.

В табл.1 представлены результаты термодинамических расчётов основных параметров обычной ТК (т.е. ТК на основе  $H_2$  или  $D_2$  в качестве первичного горючего) и альтернативных ТК в камере сгорания, выполненных для определения оптимального химического состава, удовлетворяющего приведённым выше условиям. Из табл.1 видно, что наиболее благоприятным для получения двухдиапазонной генерации на молекулах HF и DF является использование ТК на основе  $CO$  и  $CS_2$ , в продуктах сгорания которых отсутствуют молекулы HF или DF в ос-

Табл.1. Основные параметры оптимизированных обычных и альтернативных (в скобках) ТК, обеспечивающих в камере сгорания степень диссоциации фтора 97% при мольной доле атомарного фтора 0.118.

Вариант	Состав ТК	Мольная доля HF или DF	Мольная доля других продуктов	Молекулярная масса смеси (г/моль)
1	$H_2 : NF_3 : He = 1 : 1.1 : 6.7$	0.19	–	10.1
	$H_2 : F_2 : He = 1 : 1.9 : 11$	(0.139)	–	(8.1)
2	$D_2 : NF_3 : He = 1 : 1.1 : 6.7$	0.190	–	10.2
	$D_2 : F_2 : He = 1 : 1.9 : 11$	(0.138)	–	(8.2)
3	$H_2S : NF_3 : He = 1 : 3.9 : 21$	0.068	$SF_6 - 0.034$	13.3
	$H_2S : F_2 : He = 1 : 6.6 : 35$	(0.046)	$(SF_6 - 0.022)$	(9.9)
4	$C_2H_2 : NF_3 : He = 1 : 5.3 : 36$	0.042	$CF_4 - 0.042$	11.3
	$C_2H_2 : F_2 : He = 1 : 9.1 : 35$	(0.030)	$(CF_4 - 0.030)$	(8.8)
5	$C_2H_4 : NF_3 : He = 1 : 6.2 : 39$	0.074	$CF_4 - 0.037$	11.5
	$C_2H_4 : F_2 : He = 1 : 11 : 62$	(0.052)	$(CF_4 - 0.026)$	(8.9)
6	$CO : NF_3 : He = 1 : 1.9 : 9.2$	0	$CF_4 - 0.076$ $O_2 - 0.037$	15.0
	$CO : F_2 : He = 1 : 3.2 : 16$	(0)	$(CF_4 - 0.050$ $O_2 - 0.025)$	(10.7)
7	$CS_2 : NF_3 : He = 1 : 7.6 : 43$	0	$CF_4 - 0.018$ $SF_6 - 0.035$	13.9
	$CS_2 : F_2 : He = 1 : 13 : 74$	(0)	$(CF_4 - 0.012$ $SF_6 - 0.023)$	(10.1)

новном состоянии. Среди водородсодержащих топлив наилучшие результаты получены для ТК на основе ацетилена: при её использовании мольная доля молекул HF ( $\chi_{\text{HF}}$ ) примерно в 4.5 раза меньше, чем при использовании ТК на основе водорода.

Другим важным параметром, характеризующим ТК в камере сгорания, является её средняя молекулярная масса, с ростом которой растёт массовый расход топлива через сопловой блок и снижается удельный энергосъём в лазере. Из табл.1 видно, что минимальной молекулярной массой обладают ТК на основе  $\text{H}_2$  и  $\text{D}_2$ , а максимальной – ТК на основе  $\text{CO}$  и  $\text{CS}_2$ . Следует отметить, что использование в качестве окислителя трифторида азота вместо молекулярного фтора значительно ухудшает свойства ТК. Так, для ТК на основе  $\text{C}_2\text{H}_2$  при замене  $\text{NF}_3$  на  $\text{F}_2$  в камере сгорания мольная доля HF уменьшается в 1.4 раза, а молекулярная масса ТК – в 1.3 раза (табл.1, вариант 4).

### 3. Краткое описание модели расчётов энергетических характеристик HF – DF-НХЛ

При расчётах течения газов в соплах окислительного газа и вторичного горючего использовались следующие параметры: шаг решётки 6 мм, высота сечения сопел окислителя на срезе решётки 3.4 мм, степень расширения 17, высота сечения сопел вторичного горючего на срезе решётки 1.6 мм, степень расширения 22. Температура стенок сопел задавалась равной 400 К, температура торможения вторичного горючего – 300 К. Течение газа через сопло рассчитывалось с помощью программы Ansys CFX 5.7, решающей данную задачу на основе полной системы уравнений Навье – Стокса.

Ввиду большого объёма вычислений в программе расчётов параметров активной среды применялась двумерная математическая модель сверхзвукового HF – DF-НХЛ, базирующаяся на системе уравнений Навье – Стокса, записанных в приближении узкого канала для многокомпонентных газовых смесей при наличии неравновесных физико-химических процессов в активной среде, включая многокомпонентную диффузию, неравновесные химические реакции и процессы VV-обмена и VT-релаксации, а также лазерную генерацию. Использование приближения узкого канала мы считаем оправданным также ввиду того, что наша задача заключалась в сравнении энергетических характеристик двухдиапазонного HF – DF-НХЛ для различных первичных горючих в камере сгорания, а не в их точном определении.

При переходе к модели узкого канала профили скорости и температуры потоков в выходном сечении сопловой решётки брались из результатов расчётов по программе Ansys CFX 5.7, а давления принимались равными давлениям на осях потоков. Все расчёты были выполнены при давлении 5 мм рт. ст. на срезе сопловой решётки путём подбора соответствующих массовых расходов компонентов.

В расчётах предполагалось, что процессы переноса имеют ламинарный характер. Диффузионные потоки описывались законом Фика. Для вычисления коэффициентов переноса использовались полуэмпирические формулы из работы [17]. В целях упрощения расчётов энергетических характеристик лазера в программе использовалась модель резонатора Фабри – Перо. При разработке программы был применён методический подход, изложен-

ный в [17]. В программе использовался набор констант скоростей химических и релаксационных процессов, протекающих в зоне лазерной генерации, взятый из работы [18].

Данная программа позволяет рассчитывать коэффициенты усиления слабого сигнала и интенсивности излучения на колебательно-вращательных переходах Р-ветви молекул HF и DF. Тестирование разработанной нами программы было проведено путём сравнения полученных распределений по потоку газовой смеси максимальных по вращательному квантовому числу коэффициентов усиления слабого сигнала, усреднённых по периоду сопловой решётки, с аналогичными расчётными распределениями из работы [19], которое показало, что распределения практически совпадают.

### 4. Анализ возможности получения высоких коэффициентов зеркального отражения одновременно в двух частотных диапазонах генерации HF – DF-НХЛ

Добиться высокого коэффициента отражения излучения на одной длине волны  $\lambda$  или в узкой полосе можно нанесением диэлектрических покрытий с толщинами плёнок  $\lambda/4$ . Однако заранее не было очевидно, что можно подобрать толщины плёнок, обеспечивающие высокий коэффициент отражения излучения (более 99 %) при приемлемом числе слоёв одновременно в двух достаточно далеко отстоящих друг от друга широких спектральных диапазонах.

Для расчётов коэффициентов отражения слоистых сред, состоящих из тонких однородных непоглощающих плёнок, мы воспользовались известной методикой, изложенной в работе [20]. Все расчёты для выбранных материалов диэлектрических слоёв и подложки проводились в два этапа. Сначала рассчитывались коэффициенты отражения для центральных длин волн каждого из спектральных диапазонов (по отдельности для  $\lambda = 2.8$  и  $3.8$  мкм) при варьировании толщин слоёв с шагом  $2 \times 10^{-9}$  м. При обработке полученных результатов программой отбирались значения толщин, обеспечивающие высокие и одновременно близкие для обеих длин волн коэффициенты отражения многослойного покрытия.

Перебором большого числа возможных комбинаций материалов с низкими ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{ThF}_4$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ) и высокими ( $\text{ZnSe}$ ,  $\text{CdTe}$ ) коэффициентами преломления подбирались пары материалов диэлектрических покрытий, обеспечивающие получение коэффициентов отражения свыше 99 % одновременно на длинах волн 2.8 и 3.8 мкм при минимальном количестве слоёв. В качестве материала прозрачной подложки был взят кремний (Si), поскольку имеется ряд сообщений о его использовании при изготовлении диэлектрических зеркал для HF(DF)-НХЛ (см., напр., [21]). Для металлических зеркал было выбрано покрытие из серебра (Ag), поскольку такое покрытие применялось в ряде экспериментальных работ [22, 23]. Для примера в табл.2 приведены результаты расчётов для пар  $\text{ThF}_4$  –  $\text{CdTe}$  и  $\text{ThF}_4$  –  $\text{ZnSe}$ , показывающие, что для достижения поставленной цели достаточно нанести от 13 до 21 слоя на кремниевую подложку (с учетом верхнего защитного слоя  $\text{ThF}_4$  толщиной 0.1 мкм). Эти пары материалов были выбраны на основании результатов экспериментов [22, 23] по разработке многослойных диэлектрических покрытий на их

Табл.2. Коэффициенты отражения зеркал (в процентах) на длинах волн 2.8 и 3.8 мкм при нормальном падении излучения.

Вариант	Структура многослойного покрытия с защитным слоем ThF <sub>4</sub>	Материал подложки	Число пар слоев <i>N</i>					
			2	3	5	6	8	10
1	(ThF <sub>4</sub> –ZnSe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Si	–	–	–	–	–	99.1
2	(ThF <sub>4</sub> –CdTe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Si	–	–	–	99.3	99.8	99.9
3	(ThF <sub>4</sub> –ZnSe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Ag	99.0	99.4	99.8	–	–	–
4	(ThF <sub>4</sub> –CdTe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Ag	99.3	99.7	99.9	–	–	–

основе с коэффициентом отражения до 99.9 % для DF-НХЛ и 99.88 % для CO<sub>2</sub>-лазера. Указанные материалы покрытий прозрачны также и в диапазоне генерации HF-НХЛ. Видно, что даже незначительное уменьшение показателя преломления *n* при замене одного из компонентов пары (на  $\lambda = 2.8$  мкм имеем  $n = 2.69$  для CdTe и  $n = 2.44$  для ZnSe) приводит к росту необходимого числа слоёв покрытия. Меньшее число слоёв, естественно, требуется для зеркал на металлической подложке с покрытием из серебра (5–7 слоёв).

На втором этапе расчётов вычислялись коэффициенты отражения на различных длинах волн для двух спектральных диапазонов генерации HF–DF-НХЛ (2.64–3.0 мкм и 3.7–4.05 мкм), позволяющие скорректировать соотношения толщин диэлектрических слоёв так, чтобы высокие коэффициенты отражения обеспечивались бы во всём требуемом диапазоне длин волн. В качестве примера на рис.1 представлена зависимость коэффициента отражения зеркала от длины волны в диапазонах генерации на молекулах HF и DF при использовании трёх пар слоёв ThF<sub>4</sub>–CdTe (с верхним защитным слоем ThF<sub>4</sub>), нанесённых на металлическую подложку с покрытием из серебра. Из рис.1 видно, что отражающие свойства данного зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием вполне удовлетворительны во всем требуемом диапазоне длин волн. Аналогичные зависимости расчётных коэффициентов отражения от длины волны были получены и для многослойных диэлектрических покрытий на кремниевой подложке. Для этих покрытий только на ко-

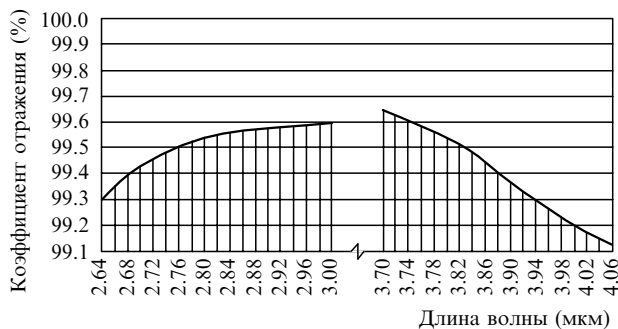


Рис.1. Зависимость расчётных коэффициентов отражения от длины волны при использовании трёх пар слоёв ThF<sub>4</sub>–CdTe (с верхним защитным слоем ThF<sub>4</sub>), нанесённых на металлическую подложку с покрытием из серебра, при нормальном падении излучения.

ротковолновом крае диапазона генерации HF-НХЛ (2.64 мкм) наблюдалось небольшое снижение коэффициента отражения (на 1 %–2 %). Однако вклад излучения указанного диапазона в мощность излучения НХЛ обычно довольно мал.

В некоторых случаях зеркала располагаются так, что излучение падает на их поверхность не по нормали, а под некоторым углом к ней. Такая ситуация может возникнуть при необходимости изменить направление распространения излучения, например в измерительных системах или при использовании многопроходного резонатора. Приведём для сравнения результаты расчёта толщины покрытий зеркал при падении излучения под углом 45° к нормали к поверхности зеркал резонатора (табл.3).

Из табл.3 видно, что задача получения коэффициентов отражения свыше 99 % одновременно для двух спектральных диапазонов вполне решается и в случае падения излучения под углом к нормали к поверхности зеркала. При этом число слоёв диэлектрических покрытий, необходимое для получения высоких коэффициентов отражения, даже немного меньше, чем в случае нормального падения излучения.

## 5. Расчёт энергетических параметров различных вариантов HF–DF-НХЛ

Обычно HF(DF)-НХЛ характеризуются такими энергетическими параметрами, как удельный энергоём и приведённая мощность излучения (мощность излучения лазера, отнесённая к площади среза сопловой решётки). Сравнение этих параметров было проведено для двух вариантов формирования активной среды в двухдиапазонном HF–DF-НХЛ (рис.2), когда в качестве вторичного горючего в одну часть ГАС (первый модуль ГАС) подаётся H<sub>2</sub>, а в другую часть (второй модуль ГАС) – D<sub>2</sub> (рис.2,а) или когда в качестве вторичного горючего в оба модуля подаётся смесь H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub> (рис.2,б). В расчётах длина активной среды в каждом модуле выбиралась равной 50 см, чтобы полная длина активной среды в направлении оптической оси резонатора была одинаковой в обоих вариантах (100 см). Коэффициент отражения глухого зеркала резонатора был принят согласно [20] равным 99.4 %, а выходного зеркала – 90 % при коэффициенте поглощения на каждом из зеркал 0.6 %. Составы ТК в камере сгорания указаны в табл.1.

Табл.3. Коэффициенты отражения (в процентах) на длинах волн 2.8 и 3.8 мкм при падении излучения под углом 45° к нормали к поверхности зеркала.

Вариант	Структура многослойного покрытия с защитным слоем ThF <sub>4</sub>	Материал подложки	Число пар слоев <i>N</i>					
			2	3	4	5	6	7
1	(ThF <sub>4</sub> –ZnSe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Si	–	–	–	98.7	99.4	99.7
2	(ThF <sub>4</sub> –CdTe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Si	–	–	99.1	99.7	99.9	–
3	(ThF <sub>4</sub> –ZnSe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Ag	99.5	99.8	99.9	–	–	–
4	(ThF <sub>4</sub> –CdTe) <i>N</i> + ThF <sub>4</sub>	Ag	99.7	99.9	–	–	–	–

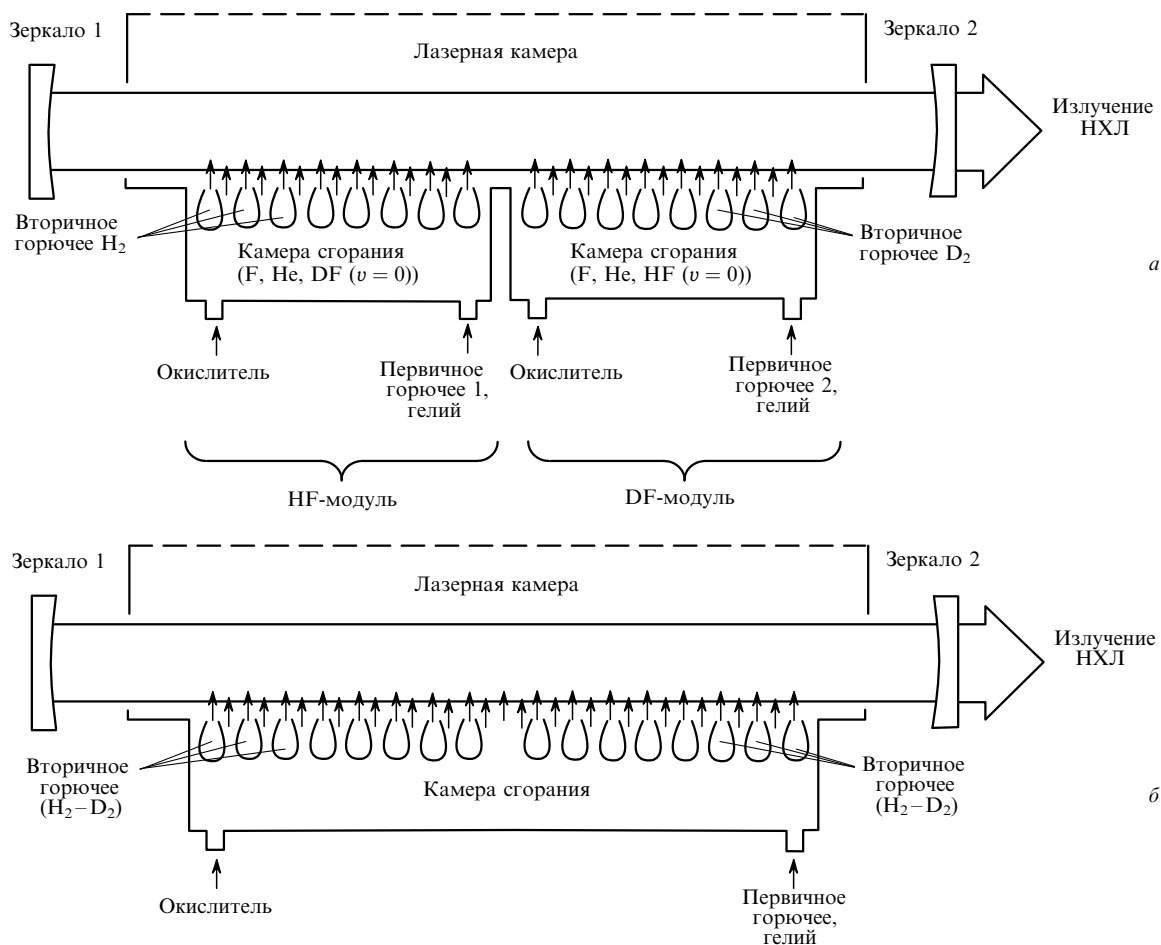


Рис.2. Возможные схемы лазера с одновременной генерацией на молекулах HF и DF при использовании двух независимых модулей HF- и DF-ГАС (а) и одного сдвоенного модуля HF/DF-ГАС (б).

Для дальнейшего сравнения характеристик двухдиапазонного лазера на основе двух отдельных модулей (рис.2,а) была проведена серия расчётов характеристик лазера с длиной активной среды 50 см и генерацией излучения только в одном спектральном диапазоне на молекулах HF или DF (табл.4). Наиболее высокие удельные параметры генерации даёт ТК в камере сгорания на основе  $CS_2$  (табл.4, варианты 6, 12), обладающая наименьшими скоростями колебательно-поступательной релаксации благодаря отсутствию молекул-релаксантов HF в потоке окислительного газа. Имеющая схожие релаксационные свойства ТК на основе CO незначительно усту-

пает ТК на основе  $CS_2$ . При использовании водородсодержащих первичных горючих в режиме генерации на молекулах DF (варианты 7–10) наиболее эффективна ТК на основе ацетилена. В случае же HF-НХЛ альтернативные ТК на основе водородсодержащих первичных горючих (варианты 3–4) уступают по удельным параметрам обычной ТК (вариант 1), за исключением варианта с первичным горючим  $C_2H_2$  (вариант 2). Это можно объяснить в четыре раза меньшей концентрацией невозбуждённых молекул HF в камере сгорания по сравнению с концентрацией невозбуждённых молекул DF в случае использования обычной ТК (см. варианты 2 и 4 в табл.1).

Табл.4. Энергетические параметры однодиапазонной генерации при использовании одного модуля ГАС с длиной активной среды 50 см.

Вариант	Первичное горючее	Окислитель	Вторичное горючее	Приведённая мощность (Вт/см <sup>2</sup> )	Удельный энергоём (Дж/г)
1	D <sub>2</sub>			85 (111)	128 (173)
2	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>			84 (122)	131 (194)
3	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>			44 (84)	68 (134)
4	H <sub>2</sub> S	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	H <sub>2</sub>	48 (96)	74 (152)
5	CO			147 (186)	217 (282)
6	CS <sub>2</sub>			156 (192)	235 (302)
7	H <sub>2</sub>			75 (93)	100 (127)
8	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>			106 (128)	145 (178)
9	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>			95 (119)	128 (165)
10	H <sub>2</sub> S	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	D <sub>2</sub>	92 (126)	126 (174)
11	CO			98 (127)	128 (168)
12	CS <sub>2</sub>			109 (137)	144 (188)

Табл.5. Энергетические параметры двухдиапазонной генерации на молекулах HF и DF при использовании двух независимых модулей ГАС (HF- и DF-модулей). Полная длина активной среды 100 см.

Вариант	Окислитель	Первичное горючее	Вторичное горючее	Приведённая мощность каждого модуля (Вт/см <sup>2</sup> )	Удельный энерго-съем каждого модуля (Дж/г)	Средняя приведённая мощность каждого модуля (Вт/см <sup>2</sup> )	Суммарный удельный энерго-съем (Дж/г)
1	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	D <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	32 (42) 54 (72)	46 (62) 78 (104)	43 (57)	62 (83)
2	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	64 (103) 98 (117)	92 (150) 144 (176)	81 (110)	118 (163)
3	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	34 (61) 88 (109)	49 (90) 127 (162)	61 (85)	88 (126)
4	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	CO	H <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	147 (186) 98 (127)	204 (270) 142 (180)	123 (157)	173 (225)
5	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	CS <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	156 (192) 109 (137)	224 (280) 156 (210)	133 (165)	190 (245)

Отметим, что при замене окислителя NF<sub>3</sub> на F<sub>2</sub> энергетические параметры НХЛ возрастают. Особенно заметно увеличение параметров генерации при использовании в HF-НХЛ водородсодержащих ТК, поскольку переход от NF<sub>3</sub> к F<sub>2</sub> не только улучшает релаксационные свойства ТК и снижает её молекулярную массу, но и уменьшает поглощение излучения невозбуждёнными молекулами HF.

Сравнить эффективности различных комбинаций ТК при получении одновременной генерации на молекулах HF и DF в случае использования двух независимых модулей ГАС (HF- и DF-модулей (рис.2,а)) можно на основании результатов расчётов, приведенных в табл.5, где в варианте 1 обычные первичное и вторичное горючие в каждом из двух модулей различны, в вариантах 2–5 альтернативные первичные горючие одинаковы в каждом модуле, вторичным горючим в одном модуле является H<sub>2</sub>, а в другом – D<sub>2</sub>. Очевидно, что ТК на основе CO и CS<sub>2</sub> свободны от негативного влияния поглощения излучения в полосе  $\nu = 1 \rightarrow \nu \rightarrow 0$  невозбуждёнными молекулами HF или DF, истекающими из камеры сгорания, поэтому при генерации в двух диапазонах одновременно эти ТК имеют наилучшие удельные характеристики. При использовании водородсодержащих ТК их эффективность уменьшается с ростом концентрации молекул HF в истекающих из камеры сгорания продуктах. Так, наихудшие результаты получены при использовании обычных ТК в обоих ГАС (табл.5, вариант 1): мощность падает примерно в два раза по сравнению с мощностью при генерации только в одном диапазоне (табл.4, варианты 1, 7). Предпочтительнее использовать в обоих ГАС альтернативные первичные горючие, особенно ацетилен (табл.5, вариант 2), т. к. в этом случае вызванные поглощением потери компенсируются за счет пониженных скоростей колебательно-поступательной релаксации ТК, и параметры одновременной генерации в двух спектральных диа-

пазонах не уступают параметрам генерации в одном диапазоне.

Ещё лучшие результаты по одновременной генерации в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF могут быть получены при использовании сдвоенного модуля HF/DF-ГАС (рис.2,б), когда в оба модуля в качестве вторичного горючего подаётся смесь H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub> (табл.6). Для сравнения с результатами, приведёнными в табл.5, в табл.6 в качестве первичного горючего оставлен ацетилен, поскольку он имеет наивысшие энергетические характеристики среди всех водородсодержащих первичных горючих. Видно, что в данном случае удельные энергетические параметры увеличиваются на 15%–25%. Это можно объяснить тем, что при использовании в качестве вторичного горючего смеси H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub> усиление излучения наблюдается по всей длине активной среды, а не на половине её, как в случае схемы с двумя независимыми ГАС (рис.2,а). Например, произведение коэффициента усиления и длины активной среды для молекулы HF в случае использования смеси H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub> в сдвоенном ГАС на 40% больше, чем при использовании схемы с двумя независимыми ГАС. Таким образом, для получения эффективной генерации одновременно на молекулах HF и DF предпочтительнее оказывается подача в качестве вторичного горючего смеси H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub>.

Из результатов, представленных в табл.6, можно сделать вывод, что при использовании в качестве окислителя F<sub>2</sub> замена первичного горючего CS<sub>2</sub> на C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> приводит к снижению энергетических характеристик на ~30%, а при использовании NF<sub>3</sub> – к ещё более значительному их снижению (на ~40%).

Использование смеси H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub> в качестве вторичного горючего даёт интересную возможность изменять отношение мощностей в диапазонах генерации на молекулах HF и DF, варьируя отношение [H<sub>2</sub>]/[D<sub>2</sub>] (рис.3). При этом для ТК в камере сгорания C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>–NF<sub>3</sub>–He суммарная

Табл.6. Энергетические параметры двухдиапазонной генерации на молекулах HF и DF при использовании сдвоенного модуля HF/DF-ГАС, когда вторичным горючим служит смесь H<sub>2</sub>–D<sub>2</sub>. Длина активной среды 100 см.

Вариант	Первичное горючее	Окислитель	Вторичное горючее	Приведённая мощность (Вт/см <sup>2</sup> )		Удельный энерго-съем (Дж/г)	
				2.64–3.0 мкм	3.7–4.05 мкм	2.64–3.0 мкм	3.7–4.05 мкм
1	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	H <sub>2</sub> :D <sub>2</sub> = 1:1	49 (77)	46 (57)	70 (111)	65 (83)
2	CS <sub>2</sub> (CS <sub>2</sub> )	NF <sub>3</sub> (F <sub>2</sub> )	H <sub>2</sub> :D <sub>2</sub> = 1:1	112 (140)	48 (57)	154 (200)	66 (82)

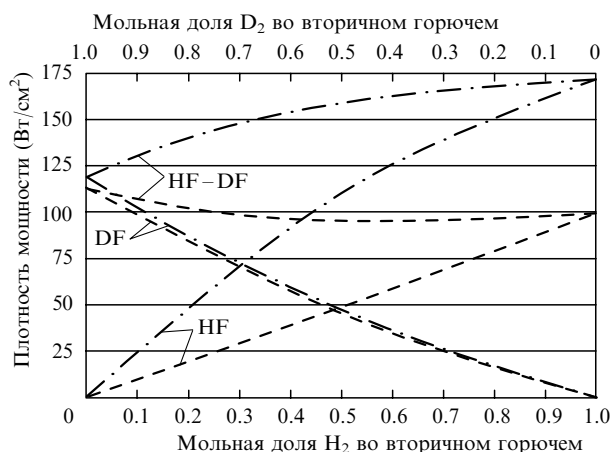


Рис.3. Зависимости плотности мощности излучения при генерации на молекулах HF и DF от мольной доли  $H_2$  и  $D_2$  во вторичном горючем в схеме со сдвоенным модулем ГАС (рис.2,б) при использовании ТК  $C_2H_2-NF_3-He$  (штриховые кривые) и  $CS_2-NF_3-He$  (штрих-пунктирные кривые). Длина активной среды 100 см.

мощность генерации несколько уменьшается с ростом отношения  $[H_2]/[D_2]$ , а мощность генерации только на молекулах DF превышает мощность генерации только на молекулах HF из-за наличия возбуждённых молекул HF в потоке окислительного газа при использовании  $C_2H_2$  как первичного горючего. Примерно равные мощности генерации в обоих диапазонах можно получить в этом случае при мольном составе вторичного горючего  $H_2:D_2 \approx 1:1$ . При использовании  $CS_2$  в качестве первичного горючего (рис.3) суммарная мощность генерации, наоборот, возрастает с ростом отношения  $[H_2]/[D_2]$ , а мощность генерации только на молекулах DF меньше, чем при генерации только на молекулах HF ввиду отсутствия возбуждённых молекул HF.

## 6. Выводы

1. При использовании водородсодержащих первичных горючих переход от обычной ТК на основе  $H_2$  или  $D_2$  к альтернативной ТК на основе  $C_2H_2$  позволяет в 4–5 раз снизить концентрацию сильно поглощающих продуктов, истекающих из камеры сгорания, что может обеспечить эффективную одновременную генерацию в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF, особенно при использовании в качестве вторичного горючего смеси  $H_2-D_2$ . При этом удельные энергетические параметры не уступают параметрам генерации на обычной ТК в одном спектральном диапазоне.

2. Более высокие расчётные энергетические параметры генерации в двухдиапазонном HF–DF-НХЛ получены при использовании в камере сгорания в качестве первичного горючего CO и  $CS_2$ , что обусловлено полным отсутствием молекул HF или DF, вызывающих дополнительное поглощение излучения, в потоке окислительного газа, истекающего из этой камеры.

3. При использовании в двухдиапазонном HF–DF-НХЛ (вторичное горючее – смесь  $H_2-D_2$ ) в качестве

окислителя  $F_2$  замена первичного горючего  $CS_2$  на  $C_2H_2$  приводит к снижению энергетических характеристик на  $\sim 30\%$ , а при использовании  $NF_3$  – к ещё более значительному снижению (на  $\sim 40\%$ ).

4. При использовании в качестве вторичного горючего смеси  $H_2-D_2$  появляется возможность регулировать в широких пределах на одной и той же лазерной установке отношение мощностей излучения в диапазонах генерации на молекулах HF и DF путём варьирования отношения  $[H_2]/[D_2]$ .

5. Показана принципиальная возможность получения высоких коэффициентов зеркального отражения (более 99%) одновременно для двух далеко отстоящих друг от друга спектральных диапазонов генерации на молекулах HF и DF при использовании многослойных диэлектрических покрытий, например на основе пар  $ThF_4-ZnSe$  и  $ThF_4-CdTe$  (с верхним защитным слоем  $ThF_4$ ), нанесённых на кремниевую подложку или металлическую подложку с покрытием из серебра.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 06-08-01335-а).

1. Башкин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. *Химические лазеры* (М.: Наука, 1980).
2. Степанов А.А., Шиканов В.Л., Щеглов В.А. *Квантовая электроника*, **8** (4), 765 (1981).
3. Александров Б.П., Степанов А.А. В сб.: *Труды НПО «Энергомаш»* (М., 2001, т. 19, с. 318–334).
4. Мартыщенко В.В., Степанов А.А. В сб.: *Труды НПО «Энергомаш»* (М., 2006, т. 24, с. 315–328).
5. Gebhardt F.G. *Appl. Opt.*, **15** (6), 1479 (1976).
6. Башкин А.С., Безноздрев В.Н. В сб.: *Труды НПО «Энергомаш»* (М., 2002, т. 20, с. 300–311).
7. Watkins W.R., White K.O. *Appl. Opt.*, **15** (5), 1114 (1976).
8. King S.R. *Appl. Opt.*, **15** (5), 1116 (1976).
9. Зуев В.Е. *Распространение видимых и ИК волн в атмосфере* (М.: Сов. радио, 1970).
10. *Распространение лазерного пучка в атмосфере*. Под ред. Д.Стробека (М.: Мир, 1981).
11. Toenniben A. et al. *Appl. Opt.*, **18** (6), 297 (1979).
12. Krüger G. *Appl. Opt.*, **18** (15), 281 (1979).
13. Великанов С.Д., Фролов Ю.Н., Сильков С.Н. и др. *Квантовая электроника*, **24** (3), 279 (1997).
14. Roback R., Lynds L. *AIAA Paper* № 74–1142 (1974).
15. Voignier F., Regnier P. *J. Phys.*, **41** (11), C9-45 (1980).
16. Федоров И.А. *Непрерывные химические лазеры на рабочих молекулах фтористого водорода и фтористого дейтерия. Учебное пособие* (С.-Петербург: Изд-во Балтийского госуд. техн. ун-та, 1994, кн.1).
17. Каторгин Б.И., Степанов А.А., Щеглов В.А. *Основы кинетики, газодинамики и оптики неравновесных сред* (М.: Изд-во МАИ, 2002, т. 2).
18. Cohen N.J., Bott J.F. *Review of Rate Data for Reactions of Interest in HF and DF Lasers TR-0083(3603)-2* (El Segundo, Cal., USA, The Aerospace Corporation, 1982).
19. Александров Б.П., Степанов А.А. В сб.: *Труды НПО «Энергомаш»* (М., 2005, т. 23, с. 332–351).
20. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1970).
21. Гросс Р., Ботт Дж. *Химические лазеры* (М.: Мир, 1980).
22. Wilson L.E. *J. Phys.*, **41** (11), C9-1 (1980).
23. Braunstein M. *Low-Absorption Coating Technology. Final Report AD0917927* (Maliby, Cal., USA, Hughes Research Laboratories, 1974).