

На правах рукописи
УДК 535.374

Александров Борис Петрович

Численное моделирование одно- и двухдиапазонных
непрерывных химических лазеров на молекулах HF, DF и HBr

Специальность 01.04.21. – “Лазерная физика”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2009

Работа выполнена в ОАО “НПО Энергомаш имени академика В.П.Глушко”

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
академик РАН **Каторгин Борис Иванович**

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,
доцент **Степанов Александр Александрович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
зав. теоретическим сектором НЦВО РАН
Бирюков Александр Сергеевич;

кандидат физико-математических наук,
зав. лабораторией ФИАН им. П.Н.Лебедева
Юрышев Николай Николаевич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие "Российский научный центр
"Прикладная химия"

Защита состоится 30 марта 2009 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д002.023.03 ФИАН им. П.Н.Лебедева по адресу: 117924, г. Москва, Ленинский пр-т, д.53, главный корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН им. П.Н.Лебедева по адресу: г. Москва, Ленинский пр-т, д.53, главный корпус.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2009 года

Учёный секретарь
диссертационного совета Д002.023.03

 Шиканов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в мире продолжают активные работы по непрерывным химическим лазерам (НХЛ) на галогеноводородах по нескольким программам. В последние годы помимо работ, связанных с традиционными HF(DF)-НХЛ, проводятся интенсивные исследования и разработки по созданию лазеров, излучающих инфракрасное излучение в более широком спектральном диапазоне, в частности, многодиапазонных НХЛ, работающих одновременно на нескольких излучающих молекулах. К этому классу НХЛ относятся рассматриваемые в настоящей работе лазеры с одновременной генерацией излучения на молекулах HF и DF, HF и HBr.

Поскольку многочастотный спектр излучения HF-НХЛ ($\lambda_{\text{HF}} \sim 2.6 \dots 3.1$ мкм), DF-НХЛ ($\lambda_{\text{DF}} \sim 3.7 \dots 4.05$ мкм) и HBr-НХЛ ($\lambda_{\text{HBr}} \sim 4.0 \dots 4.75$ мкм) совпадает со спектром поглощения большинства атмосферных газов (CO_2 , N_2O , NO , SO_2 , HCl , C_3H_8 , HDO , H_2O и других), в том числе продуктов сгорания вредных и отравляющих веществ, то такие лазеры применимы для исследования газового состава атмосферы, а также для дистанционного мониторинга потенциальных очагов загрязнения. Понятно, что использование двухдиапазонных HF-DF и HF-HBr-НХЛ, а также лазеров на обертоновых переходах, расширяет возможности таких диагностических исследований. Кроме этого, с их помощью могут быть получены экспериментальные данные по сравнению прохождения в атмосфере излучений с разной длиной волны в различных регионах на разных высотах, они могут найти широкое применение в научных исследованиях, связанных с воздействием на различные материалы и устройства, в промышленном производстве с применением лазерных технологий.

Одним из вариантов решения задачи создания лазеров с коротковолновым спектром ИК излучения, соответствующего одному из "окон прозрачности" атмосферы, является НХЛ на обертоновых переходах молекулы HF с длиной волны излучения $\lambda_{\text{HF}}^{\text{от}} \sim 1.25 \dots 1.45$ мкм. Двукратное уменьшение длины волны излучения позволяет улучшить прохождение излучения через атмосферу вследствие меньшего поглощения парами воды, снизить вдвое дифракционный предел расходимости излучения ($\sim \lambda$) и увеличить вчетверо яркость в дальней зоне ($\sim \lambda^{-2}$, при одинаковой выходной мощности и апертуре).

Важным этапом решения отмеченных задач является расчётно-теоретическое исследование работы НХЛ. С учётом высокой стоимости стандо-

вых экспериментов огромную роль играет численное моделирование процессов в сверхзвуковых НХЛ, оно является источником детальной информации о протекающих физических процессах, о локальных параметрах в газодинамическом тракте НХЛ, а также средством параметрической оптимизации рабочих параметров для последующей их реализации в эксперименте.

Целью работы является теоретическое исследование усилительных свойств и энергетических параметров

– HF- и DF-НХЛ, а также двухдиапазонного HF-DF-НХЛ с одновременной генерацией на молекулах HF и DF, при использовании сероуглерода в качестве первичного горючего;

– HF-HBr-НХЛ с одновременной генерацией на молекулах HF и HBr;

– HF-НХЛ при генерации на обертоновых переходах.

Объектом исследования являются автономные сверхзвуковые непрерывные химические HF-, DF- и HBr-лазеры с различными вариантами конструкции щелевого соплового блока, работающие на различных топливных композициях.

Предметом исследования являются физико-химические процессы, происходящие в газодинамическом тракте, начиная от камеры сгорания до конца лазерной зоны, а также усилительные свойства активной среды и энергетические параметры одно- и двухдиапазонных HF-, DF- и HBr-НХЛ.

Методом исследования является численный эксперимент посредством разработанных соискателем пакетов программ на основе моделей, описывающих процессы в мелкомасштабных соплах и в активной среде HF-, DF- и HBr-НХЛ.

Научная новизна работы

1. В рамках полной системы уравнений Навье-Стокса выполнено теоретическое исследование усилительных свойств и энергетических параметров однодиапазонных HF-, DF-НХЛ и двухдиапазонного HF-DF-НХЛ при использовании топливной композиции $\text{CS}_2\text{--NF}_3\text{--He}$ в камере сгорания, показавшее, что при использовании сероуглерода вместо традиционного первичного горючего D_2 , (H_2 , C_2H_4)

– коэффициенты усиления слабого сигнала (КУСС) в активной среде HF- и DF-НХЛ в 2–3 раза превышают значения КУСС для соответствующих НХЛ с традиционным горючим;

– максимальные значения мощности достигаются при повышенных давлениях в начале лазерной зоны $p_{\text{res}} \sim 6 \dots 10$ Торр как для HF-, так и для DF-НХЛ (для тра-

диционного горючего оптимальные давления $p_{res} \sim 3...5$ Торр), что существенно облегчает решение задачи выхлопа отработанных газов в окружающую атмосферу.

2. Создана кинетическая модель активной среды HF-HBr-НХЛ, генерирующего излучение одновременно в двух спектральных диапазонах на колебательно-вращательных переходах молекул HF и HBr.

3. В рамках полной системы уравнений Навье-Стокса выполнено теоретическое исследование усилительных и энергетических характеристик двухдиапазонного HF-HBr-НХЛ с топливной композицией (D_2 , F_2 , He) / (H_2 , Br_2), показавшее что максимальная приведённая мощность генерации на молекулах HBr достигается при оптимальном содержании брома во вторичном горючем (водороде) $\sim 2.5\%$.

4. Показано, что в обертоном HF-НХЛ с топливной композицией (D_2 , F_2 , He) в камере сгорания

- максимальные значения коэффициентов усиления слабого сигнала, мощности и удельного энергосъёма при генерации на первом обертоне молекулы HF достигаются на тех же составах топлива в камере сгорания, что и при генерации на основном тоне в диапазоне давлений на срезе соплового блока от 2 до 9 Торр; для исследуемых сопловых блоков оптимальные составы топлива соответствуют коэффициенту избытка фтора $\alpha \sim 1.8$, коэффициентам разбавления гелием $A \sim 8...14$.

- максимальные значения энергосъёма и эффективности преобразования в обертоновую генерацию получены при давлении на срезе соплового блока $p_{res} \sim 2$ Торр для всех составов топлива в камере сгорания.

Практическая значимость работы

Результаты исследований автора использованы в ряде технических предложений ОАО "НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко" по тематике НХЛ.

Работы по одно- и двухдиапазонным HF-DF-НХЛ при использовании сероуглерода в качестве первичного горючего, по двухдиапазонному HF-HBr-НХЛ, по обертоному HF-НХЛ существенно расширяют практические области применения разработанных и проектируемых непрерывных химических лазеров, в частности, для научных исследований, связанных с прохождением многочастотного ИК излучения в атмосфере в различных регионах на разных высотах; дистанционным мониторингом состава атмосферы; воздействием многочастотного излучения на различные материалы и устройства.

Личный вклад соискателя

1. Созданы численные алгоритмы и расчётные программы на основе двумерных численных моделей расчёта параметров HF-, DF- и HBr-НХЛ при работе на

основном тоне и на обертоновых колебаниях, в одно- и двухдиапазонном режимах (в том числе в импульсно-периодическом режиме с модуляцией добротности резонатора), включающие в себя модель расчёта газодинамических параметров потоков в соплах, а также две модели активной среды и энергетических параметров НХЛ – модель, основанная на полной системе уравнений Навье-Стокса и модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса в приближении "узкого канала".

2. Проведено теоретическое исследование усилительных свойств активной среды, энергетических и спектральных характеристик HF и DF-НХЛ и двухдиапазонного HF-DF-НХЛ при использовании сероуглерода в качестве первичного горючего; двухдиапазонного HF-HBr-НХЛ; HF-НХЛ при генерации на обертоновых переходах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В HF- и DF-НХЛ с топливной композиции $\text{CS}_2\text{--NF}_3\text{--He}$ в камере сгорания использование сероуглерода вместо традиционного первичного горючего (D_2 , H_2 , C_2H_4) позволяет получать

- активную среду HF- и DF-НХЛ с коэффициентом усиления слабого сигнала (КУСС), в 2–3 раза превышающем значения КУСС в активной среде соответствующих НХЛ с традиционным горючим;

- максимальные энергетические параметры HF- и DF-НХЛ при повышенных давлениях в начале лазерной зоны $\sim 6 \dots 10$ Торр;

- эффективную одновременную генерацию на молекулах HF и DF; необходимое соотношение мощностей излучения на частотах HF и DF регулируется соотношением количества водорода и дейтерия в потоке вторичного горючего.

2. В двухдиапазонном HF-HBr-НХЛ при использовании топливной композиции (D_2 , F_2 , He) / (H_2 , Br_2)

- максимальная приведённая мощность генерации на молекулах HBr $\sim 20 \text{ Вт/см}^2$ достигается при оптимальном содержании брома во вторичном горючем (водороде) $\sim 2.5\%$;

- использование цилиндрической (секторной) конструкции соплового блока вместо плоской позволяет значительно повысить энергетические характеристики генерации в полосе HBr – при радиусе соплового блока 10 см мощность излучения на молекулах HBr увеличивается в 1.5 раза $\sim 30 \text{ Вт/см}^2$.

3. Для HF-НХЛ на обертоновых переходах с топливной композицией (D_2 , F_2 , He) в камере сгорания

- максимальные значения коэффициентов усиления слабого сигнала, мощности и удельного энергосъёма при генерации на первом обертоне молекулы HF

достигаются на тех же составах топлива в камере сгорания, что и при генерации на основном тоне в диапазоне давлений на срезе соплового блока от 2 до 9 Торр; для исследуемых сопловых блоков оптимальные составы соответствуют коэффициенту избытка фтора $\alpha \sim 1.8$, коэффициентам разбавления гелием $A \sim 8 \dots 14$;

– максимальные значения энергосъёма и эффективности преобразования в обертоновую генерацию достигаются при низком давлении в активной среде $p_{res} \sim 2$ Торр для всех составов топлива в камере сгорания.

Апробация результатов исследования

Результаты исследований, отражённые в диссертации докладывались на отраслевой научно-технической конференции, п. Смолячково Ленинградской обл., апрель, 1995 г.; на 1-ой отраслевой научно-технической конференции "Проблемы создания лазерных систем", г. Радужный, сентябрь, 1996 г.; на IV Харитоновских научных тематических чтениях "Физика лазеров. Взаимодействие лазерного излучения с веществом". г. Саров, 18–21 февраля 2002 г; на международной конференции "International Conference on Lasers, Applications, and Technologies" (LAT-2007), г. Минск, май-июнь, 2007 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и приложения. Общий объём диссертации 139 страниц, работа содержит 3 таблицы, 42 рисунка и список литературы из 214 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели диссертации, приведено краткое содержание глав диссертации. Дан **краткий обзор** литературы по методам расчёта параметров течения в соплах и в зоне смешения струй НХЛ, а также обзор литературы по НХЛ на обертоновых переходах.

В **главе 1** описывается методика численного моделирования параметров течения, усилительных и энергетических свойств НХЛ, которое включает в себя три последовательных этапа – расчёт термодинамически равновесной газовой смеси в камере сгорания, расчёт течения газа в соплах и расчёт параметров НХЛ в области смешения струй в лазерной зоне.

Для расчёта течения в сверхзвуковых соплах НХЛ создана эффективная двумерная модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса в приближении "узкого канала". Выполнено тестовое сравнение с результатами расчета течения в

плоских соплах НХЛ, полученного при решении двумерных уравнений Навье-Стокса. Расхождение локальных параметров составило не более 15%.

Созданы также две модели расчёта параметров активной среды НХЛ для течения многокомпонентной химически реагирующей колебательно неравновесной газовой смеси при наличии резонансного излучения – модель, основанная на полной системе уравнений Навье-Стокса и модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса в приближении "узкого канала".

В обеих моделях для общности рассматривается цилиндрическая конструкция соплового блока. Предполагается ламинарный характер течения, равновесное распределение по вращательным состояниям излучающих молекул. При расчёте лазерной генерации рассматривался плоско-параллельный резонатор Фабри-Перо.

В модели, основанной на полной системе уравнений Навье-Стокса, стационарное течение находится из решения нестационарной системы уравнений методом установления. Газовая смесь состоит из N_c компонентов, включая молекулы в различных колебательных состояниях. Система уравнений Навье-Стокса имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) &= 0; & \frac{\partial \rho V^\alpha}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V} V^\alpha) - (\vec{\nabla} \cdot \mathbf{\mathfrak{E}})^\alpha &= -(\vec{\nabla} p)^\alpha; \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho E \vec{V} + \vec{q}) &= -p \vec{\nabla} \vec{V} + (\mathbf{\mathfrak{E}} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} - \sum_{v=1}^{N_v} g_v I_v; \\ \frac{\partial \rho c_k}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V} c_k) + \vec{\nabla} \vec{j}_k &= \dot{w}_k + \frac{W_k}{N_A} \left(\frac{g_{v+1+l} I_{v+1+l}}{h \nu_{v+1+l}} - \frac{g_v I_v}{h \nu_v} \right), k=1 \dots N_c; \\ p &= \frac{\rho R T}{W}; & W &= \left(\sum_{k=1}^{N_c} \frac{c_k}{W_k} \right)^{-1}; & E &= \sum_k e_k c_k, & e_k &= \int c_{vk}(T) dT + h_{k0} + e_k^{vib}; \\ h_k &= h_{k0} + \int c_{pk} dT + e_k^{vib}; & \vec{q} &= -\lambda \vec{\nabla} T + \sum_{k=1}^{N_c} h_k \vec{j}_k; & \vec{j}_k &= -\frac{\rho}{B_k} \vec{\nabla} c_k + \vec{\delta}_k; \\ \vec{\delta}_k &= \frac{W c_k}{B_k} \sum_{i=1}^{N_c} \left(\frac{1}{W_i D_{ki}} - \frac{1}{W_k D_{kk}} \right) \vec{j}_i + \frac{\rho W c_k}{B_k} \vec{\nabla} \left(\frac{1}{W} \right); & B_k &= \sum_i \frac{W}{W_i} \frac{c_i}{D_{ki}}. \end{aligned}$$

При расчёте генерации излучения используется условие квазистационарной генерации

$$\int_0^{L_g} g_v dz = -0.5 \ln(r_1 r_2).$$

Задача решалась в области $0 \leq z \leq h^*$, $r_0 \leq r \leq r^*$. На плоскостях симметрии $z=0$, $z=h^*$ граничные условия имеют вид $V_z=0$; $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial V_r}{\partial z} = \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial c_k}{\partial z} = 0$. На границе $r=r_0$ задавались профили переменных в выходных сечениях сопел $f(r_0, z, t) = f_{z0}(z)$ для всех переменных задачи f . На границе $r=r^*$ использованы "мягкие" граничные условия $\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} = 0$ для сверхзвукового течения.

Стационарное решение системы уравнений найдено разностным методом с использованием метода расщепления по физическим процессам и пространственным направлениям. Использована разностная схема с неявной аппроксимацией пространственных дифференциальных операторов со вторым порядком точности.

Ранее была, также, создана модель, основанная на параболизированных уравнениях Навье-Стокса в приближении "узкого канала". Ограничением этой модели является пренебрежение поперечным градиентом давления. Для определения диффузионных потоков в многокомпонентной смеси также использованы соотношения Стефана-Максвелла.

Все модели прошли необходимые тесты, выполнены сравнения с результатами расчётов по другим моделям, в том числе созданными в РНЦ "Прикладная химия" (Ротинян М.А., Стрелец М.Х., Шур М.Л и др.). Получено хорошее согласие результатов.

Выполнено сравнение результатов моделирования усилительных свойств активной среды и энергетических характеристик HF- и DF-НХЛ при использовании трёх наиболее известных кинетических моделей: Коэна и Ботта 1977 г. и 1982 г., Манке и Хагера 2001 г. Исследование показало, что:

- рекомендации по кинетике HF-НХЛ из обзора 2001 г. не вносят существенных изменений в результаты расчёта КУСС и энергетики по сравнению с кинетикой 1982 г.;

- наблюдается сильное отличие по результатам моделирования усилительных свойств среды и энергетических параметров HF- и DF-НХЛ кинетического пакета Коэна и Ботта 1976–77 года от пакета 1982 г. Для HF-НХЛ снижение максимального КУСС при замене полного набора констант 1982 г. набором 1977 г. на переходе 1-0 составляет в зависимости от режима и параметров сопловой решётки ~35...60%, на переходе 2-1 от ~30 до ~40%. Для DF-НХЛ снижение максимального КУСС при замене полного набора констант 1982 г. набо-

ром 1977 г. на переходе 2-1 в зависимости от режима и параметров сопловой решётки составляет от ~15 до ~70%, на переходе 3-2 ~55...80%;

– снижение мощности излучения при замене кинетической модели 1982 г. на модель 1977 г. выражается десятками процентов, достигая для HF-НХЛ с некоторыми топливными композициями ~60%, для DF-НХЛ ~75%.

Глава 2 посвящена исследованию энергетических характеристик сверхзвуковых непрерывных HF и DF-НХЛ, использующих горючее CS_2 и окислитель NF_3 в камере сгорания, в том числе двухдиапазонного HF-DF-НХЛ с одновременной генерацией излучения на молекулах HF ($\lambda \sim 2.64 \dots 3.0$ мкм) и DF ($\lambda \sim 3.7 \dots 4.05$ мкм). Формально состав реагентов в камере сгорания записывается в виде $[\text{CS}_2] + 16\alpha/3 [\text{NF}_3] + 8A(\alpha-1)[\text{He}]$, где α – степень избытка окислителя относительно стехиометрического значения, A – степень избытка гелия. Применение в качестве первичного горючего в камере сгорания сероуглерода для реализации двухдиапазонного HF-DF-НХЛ обусловлено тем, что в продуктах сгорания отсутствуют молекулы HF и DF, поглощающие излучение в нижней колебательной полосе и являющиеся сильными релаксантами колебательно-возбуждённых молекул HF* и DF*.

В отличие от топливных композиций с традиционно используемым в НХЛ первичным горючим (D_2 , H_2 , C_2H_4), при сгорании топливной композиции с горючим CS_2 атомарный фтор помимо диссоциации избыточного трифторида азота образуется также в результате того, что при высокой температуре помимо SF_6 в продуктах сгорания присутствуют молекулы SF_5 , SF_4 , SF_3 и SF_2 с высвобождением дополнительного атомарного фтора. Наличие дополнительного атомарного фтора существенно изменяет привычную для традиционных топливных композиций картину распределения мольной доли атомарного фтора x_{F} от α с максимумом при некотором $\alpha_{\text{опт}}$. Для горючего CS_2 оптимум отсутствует, количество F монотонно падает с увеличением α . Таким образом, в отличие от НХЛ с традиционными топливными композициями в НХЛ с первичным горючим CS_2 можно использовать смесь с малыми коэффициентами избытка окислителя α .

Расчёты в области смешения струй выполнены по модели Навье-Стокса с использованием кинетики 1982–2001 г.

Однодиапазонные HF- и DF-НХЛ

Исследование усилительных свойств активной среды и однодиапазонной генерации HF- и DF-НХЛ проведено для шага решётки соплового блока 6 мм. Показано, что значения КУСС достигают больших величин как в случае активной сре-

ды HF-НХЛ $\sim 0.4 \text{ см}^{-1}$, так и DF-НХЛ $\sim 0.07 \text{ см}^{-1}$. Это в 2-3 раза выше значений КУСС для HF- и DF-НХЛ с традиционным первичным горючим (D_2 , H_2 , C_2H_4).

Выполнено исследование однодиапазонного режима генерации излучения при варьировании параметров топливной композиции в диапазоне $\alpha = 1.1 \dots 2.0$, $A = 4 \dots 18$, $R_L = 24 \dots 68$ при изменении давления на срезе соплового блока от 3.5 до 15 Торр. Расчёты проведены для трёхпроходного резонатора Фабри-Перо (суммарная длина активной среды вдоль оптической оси 405 см) с оптимальным значением коэффициента пропускания выходного зеркала $t_{\text{HF}} = t_{\text{DF}} = 0.4$.

Максимальные значения мощности достигаются для обоих генераторов при повышенных по сравнению с лазерами на традиционных топливных композициях давлениях в зоне генерации $p_{\text{res}} \sim 6 \dots 10$ Торр как при генерации на молекулах HF, так и на молекулах DF (на традиционных топливных композициях оптимальные давления лежат в диапазоне $\sim 2 \dots 5$ Торр). Это существенно облегчает решение задачи выхлопа отработанных газов в окружающую атмосферу.

На рис. 1 показаны зависимости приведённой мощности, удельного энергосъёма, длины лазерной зоны и максимальной локальной интенсивности излучения на выходном зеркале резонатора HF-НХЛ от коэффициента избытка окислителя α для давлений на срезе соплового блока $p = 7$ Торр и 9 Торр. В широкой области изменения коэффициента избытка окислителя $\alpha = 1.2 \dots 1.7$ достижимы высокие значения мощности и энергосъёма несмотря на существенную разницу в температуре, молекулярной массе и количестве атомарного фтора в камере сгорания. Это, в отличие от лазеров на традиционных топливных композициях, даёт возможность работать на пониженных расходах окислителя в камере сгорания. Оптимальным по мощности и энергосъёму в HF-НХЛ оказывается диапазон $\alpha = 1.5 \dots 1.7$ с температурой смеси в камере сгорания $T_k = 1250 \dots 1500 \text{ К}$ и молекулярной массой $W_k = 13 \dots 15 \text{ г/моль}$.

В работе показано, что при использовании топливной композиции в камере сгорания $\text{CS}_2\text{--NF}_3\text{--He}$ достижимы высокие значения приведённой мощности излучения. При использовании кинетической модели 1982 г. для сопловой решётки с шагом 6 мм в HF-НХЛ максимальная приведённая мощность $P_{\text{las}} \sim 220 \text{ Вт/см}^2$ при $E_{y0} \sim 170 \text{ Дж/г}$ для режима $\alpha = 1.75$, $A = 10$, $p_{\text{res}} = 9$ Торр (в DF-НХЛ – $P_{\text{las}} \sim 150 \text{ Вт/см}^2$ при $E_{y0} \sim 110 \text{ Дж/г}$); максимальный удельный энергосъём получен при низком давлении $p_{\text{res}} = 3.2$ Торр: для HF-НХЛ $E_{\text{max}} \sim 350 \text{ Дж/г}$ при $P_{\text{las}} \sim 120 \text{ Вт/см}^2$ для режима $\alpha = 1.5$, $A = 10$, (в DF-НХЛ – $E_{\text{max}} \sim 285 \text{ Дж/г}$ при $P_{\text{las}} \sim 105 \text{ Вт/см}^2$ для топлива $\alpha = 1.5$, $A = 12$).

При переходе с первичного горючего D_2 на сероуглерод ожидается увеличение расчётной приведённой мощности HF-НХЛ на ~60% при использовании кинетики 1982 г. и на ~20% при использовании кинетики 1977 г.

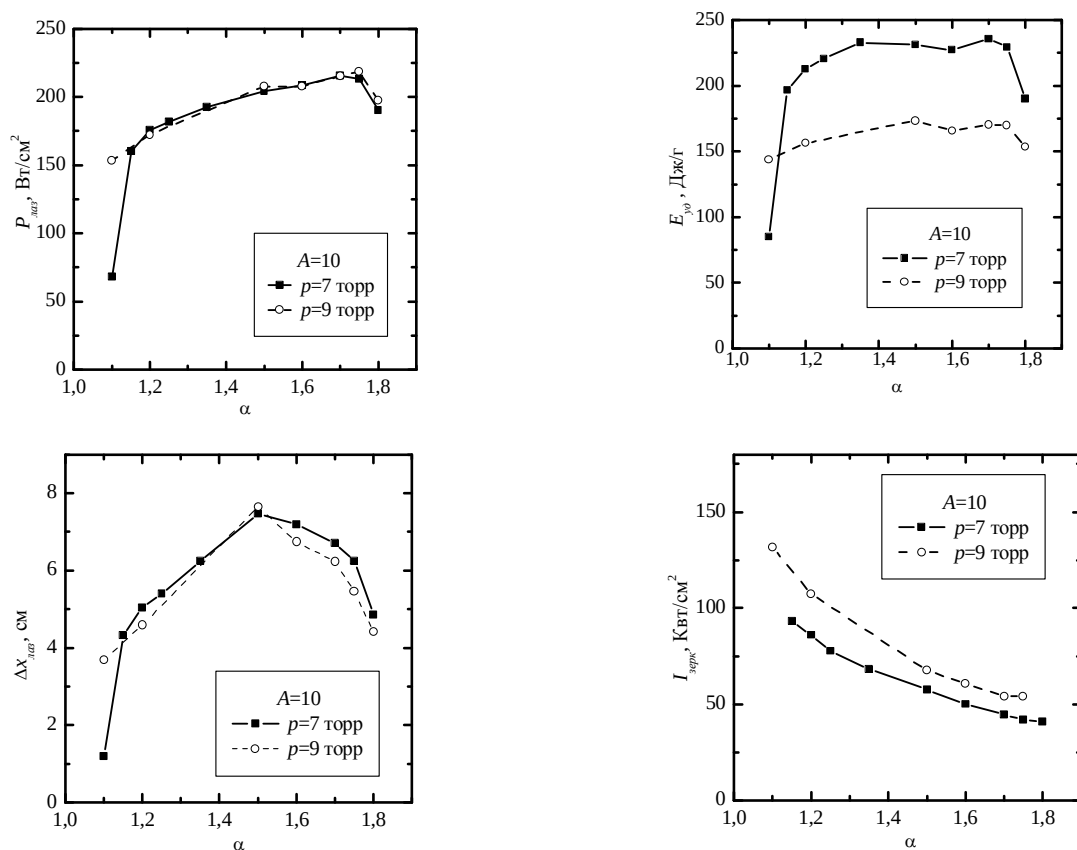


Рис. 1. Зависимости приведённой мощности P_{las} , удельного энергосъёма $E_{уд}$, длины лазерной зоны $\Delta x_{лаз}$ и максимальной локальной интенсивности излучения на зеркале резонатора $I_{зерк}$ от α для HF-НХЛ. $A=10$; $p_k=7$ и 9 Торр

Двухдиапазонный HF-DF-НХЛ

Исследовалась возможность получения одновременной генерации излучения в двух спектральных диапазонах на молекулах HF и DF в НХЛ, использующем смесь H_2+D_2 в качестве вторичного горючего. Расчёт генерации излучения HF-DF-НХЛ проводился для шага решетки соплового блока 7.5 мм. Расчёты проведены для активной среды длиной 80 см. Коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора выбран средним $t=20\%$ между оптимальными расчётными значениями для генерации на молекулах HF и DF (предполагалось, что параметры зеркал одинаковы для диапазонов частот излучения молекул HF и DF).

Состав топлива можно представить условной формулой: $\{[CS_2] + 16\alpha/3[NF_3] + 8A(\alpha-1)[He]\}/8R_L(\alpha-1) \cdot \{(1-\psi_{H_2})[D_2] + \psi_{H_2}[H_2]\}$, где ψ_{H_2} – относительное содержание молекул H_2 в смеси с D_2 ($0 \leq \psi_{H_2} \leq 1$). Для изучения влияния соотношения

H_2 : D_2 во вторичном горючем на параметры двухдиапазонной генерации выбран состав в камере сгорания, близкий к оптимальному по мощности однодиапазонной генерации $\alpha = 1.5$, $A = 12$, $p_{res} = 7$ Торр.

На рис. 2 показаны зависимости от мольного содержания дейтерия во вторичном потоке приведённой мощности излучения на молекулах HF и на DF, а также удельного энергосъёма с грамма топлива и с грамма фтора для газодинамического режима $\alpha = 1.5$, $A = 12$, $p_{res} = 7$ Торр. Суммарные мощность и энергосъём убывают от величины мощности излучения на молекулах HF $P_{las} \sim 130$ Вт/см², полученной при использовании в качестве вторичного горючего H_2 , до мощности DF излучения $P_{las} = 80$ Вт/см² при использовании только горючего D_2 .

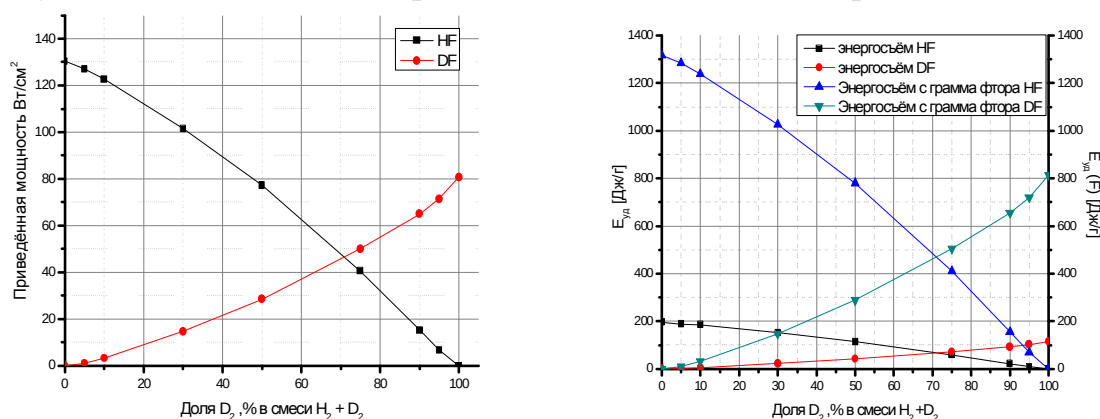


Рис. 2. Зависимость приведённой мощности P_{las} , удельного энергосъёма с грамма топливной смеси $E_{уд}$ и с грамма фтора $E_{Fуд}$ от соотношения H_2 и D_2 во вторичном горючем. $\alpha = 1.5$, $\psi = 12$; $p = 7$ Торр.

Таким образом, использование в НХЛ сероуглерода в качестве первичного горючего позволяет получать эффективную одновременную генерацию излучения на молекулах HF и DF.

В главе 3 выполнено теоретическое исследование двухдиапазонного сверхзвукового HF-НВr-НХЛ с одновременной генерацией на молекулах HF и НВr. Интерес к химическому НВr-лазеру обусловлен тем, что его излучение попадает в "окно прозрачности" атмосферы $\lambda \sim 4.2$ мкм. Для получения одновременной генерации излучения на молекулах HF и НВr выбрана схема с использованием традиционного HF-НХЛ, в котором во вторичное горючее к молекулярному водороду добавлялись молекулы Br_2 .

Создана кинетическая модель активной среды HF-НВr-НХЛ. Выполнено тестирование модели лазера путём сравнения с экспериментом Миллера и др., где исследовался малоразмерный лабораторный сверхзвуковой HF-НВr-лазер.

Получено хорошее согласие результатов по мощности излучения и по оптимальному разбавлению вторичного горючего бромом.

На основе полной системы уравнений Навье-Стокса выполнено моделирование HF-HBr-НХЛ с шагом щелевой сопловой решётки 7 мм. Использовалась топливная композиция $[D_2] + \alpha[F_2] + A(\alpha-1)[He]/R_L(\alpha-1)\{(1-\psi_{Br_2})[H_2] + \psi_{Br_2}[Br_2]\}$ при $\alpha=1.4$, $A=10$, $R_L=35$, приведённого расхода окислительного потока $0.36 \text{ г/см}^2/\text{с}$, статического давления у среза соплового блока $p \sim 5 \text{ Торр}$.

Добавление брома во вторичное горючее приводит к сильному повышению температуры в силу цепного характера протекающих экзотермических реакций. Это приводит для режимов с разбавлением $\psi_{Br_2} > 0.03$ к образованию прямого скачка уплотнения, в котором достигается максимальная температура $\sim 2000 \text{ К}$ (без брома температура в потоке не превышает 900 К).

Усилительные свойства среды на частотах HBr существенно слабее, чем на частотах HF вследствие малости коэффициентов Эйнштейна и в силу малой концентрации колебательно возбуждённых молекул HBr*. Для состава газа в камере сгорания $\alpha=1.4$, $A=10$ при $p_{res} = 5 \text{ Торр}$ максимальные значения КУСС на HBr достигаются при разбавлениях вторичного горючего бромом $\psi_{Br_2} \sim 0.02 \dots 0.04$. При увеличении разбавления выше 4% усилительные свойства HBr-лазера заметно ухудшаются вследствие сильного тепловыделения и утяжеления потока. При оптимальном мольном содержании брома во вторичном горючем $\sim 2.5\%$ максимальный по среде усреднённый поперёк потока коэффициент усиления слабого сигнала (КУСС) на HBr составляет $\sim 0.015 \text{ см}^{-1}$ в полосе P_3 при длине зоны усиления $\sim 10 \text{ см}$ (максимальный КУСС на частотах HF $\sim 0.11 \text{ см}^{-1}$).

Повышение температуры в лазерной зоне при добавлении брома во вторичное горючее снижает КУСС и укорачивает зону усиления на частотах HF. Так, при 4%-ном разбавлении вторичного потока бромом максимальный усреднённый КУСС снижается с $\langle g_{\max}^{\text{HF}} \rangle \sim 0.11 \text{ см}^{-1}$ (без разбавления) до $\langle g_{\max}^{\text{HF}} \rangle \sim 0.09 \text{ см}^{-1}$.

Исследовался режим генерации для плоского соплового блока с длиной активной среды $L_a = 50 \text{ см}$. Параметры зеркал резонатора выбраны близкими к оптимальным для достижения максимальной мощности генерации на HBr: коэффициент отражения глухого зеркала $r_1 = 0.99$, коэффициент пропускания выходного зеркала $t_2 = 0.07$, коэффициент потерь на выходном зеркале 0.5%. Предполагалось, что такие зеркала для одновременной генерации могут быть изготовлены с использованием технологии нанесения многослойных диэлектрических покрытий.

На рис. 3 в качестве примера показано спектральное распределение мощности выходного излучения для $\psi_{\text{Br}_2}=0.04$. Спектр излучения на частотах молекулы НВr гораздо богаче, чем на частотах HF, генерация наблюдается в линиях $P_1(3...8)$, $P_2(4...11)$, $P_3(4...12)$ и $P_4(5...10)$ (генерация на HF – в линиях $P_1(7...12)$, $P_2(7...11)$, $P_3(7...8)$).

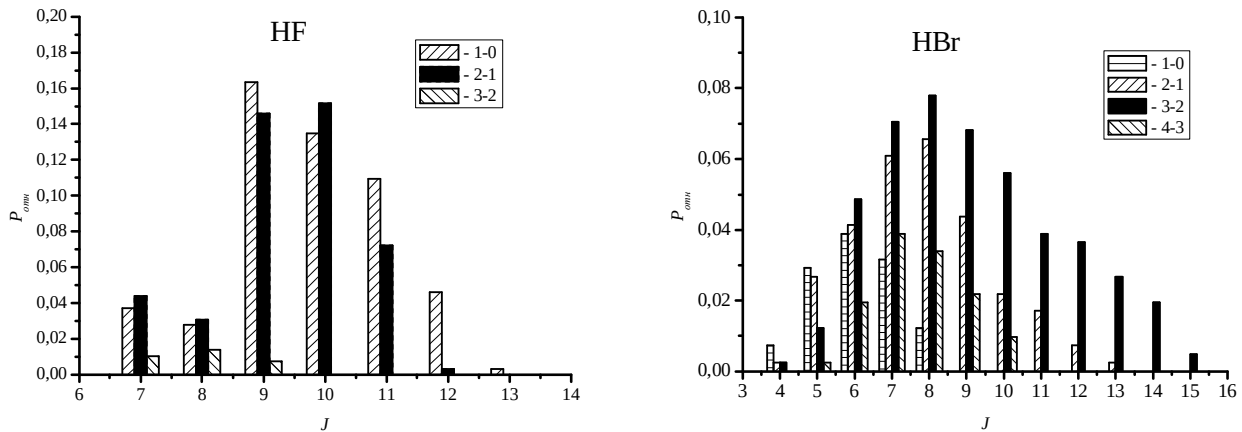


Рис. 3. Спектральное распределение излучения в колебательных полосах молекул HF и HBr для 4%-ного разбавления бромом

На рис. 4 показаны зависимости суммарной приведённой мощности и длины лазерной зоны Δx_{las} на частотах HF и HBr от коэффициента разбавления вторичного горючего бромом. Приведенная мощность излучения на HBr достаточно слабо зависит от ψ_{Br_2} в диапазоне 0.01...0.04, максимальное значение $\sim 20 \text{ Вт/см}^2$ достигается при $\psi_{\text{Br}_2} \approx 0.025$, при этом длина зоны генерации $\sim 15 \text{ см}$ (мощность в полосе HF для режима без разбавления бромом $P_{las}^{\text{HF}} \sim 105 \text{ Вт/см}^2$). Зона генерации в полосах HBr существенно протяжённее, чем у HF-лазера, вследствие более слабой релаксации колебательно возбуждённых молекул HBr(v).

Переход от плоской конструкции соплового блока к цилиндрической (секторной) позволяет снизить давление и температуру в активной среде, что благоприятно сказывается на энергетических свойствах лазера.

На рис. 5 для 2%-ного и 5%-ного разбавления приведены суммарная приведённая мощность и длина лазерной зоны Δx_{las} на частотах HF и HBr в зависимости от кривизны соплового блока $1/r_0$. Мощность излучения на частотах HF растёт почти пропорционально кривизне соплового блока независимо от коэффициента разбавления ψ_{Br_2} . Мощность же на HBr имеет максимум при некоторой кривизне блока, который смещается в сторону меньших r_0 при увеличении разбавления ψ_{Br_2} . При радиусе соплового блока $r_0 = 10 \text{ см}$ для количества брома

$\psi_{Br_2} = 5\%$ мощность излучения увеличивается приблизительно в 1.5 раза в обоих спектральных диапазонах по сравнению с плоским сопловым блоком, на HBr приведённая мощность достигает $\sim 30 \text{ Вт/см}^2$.

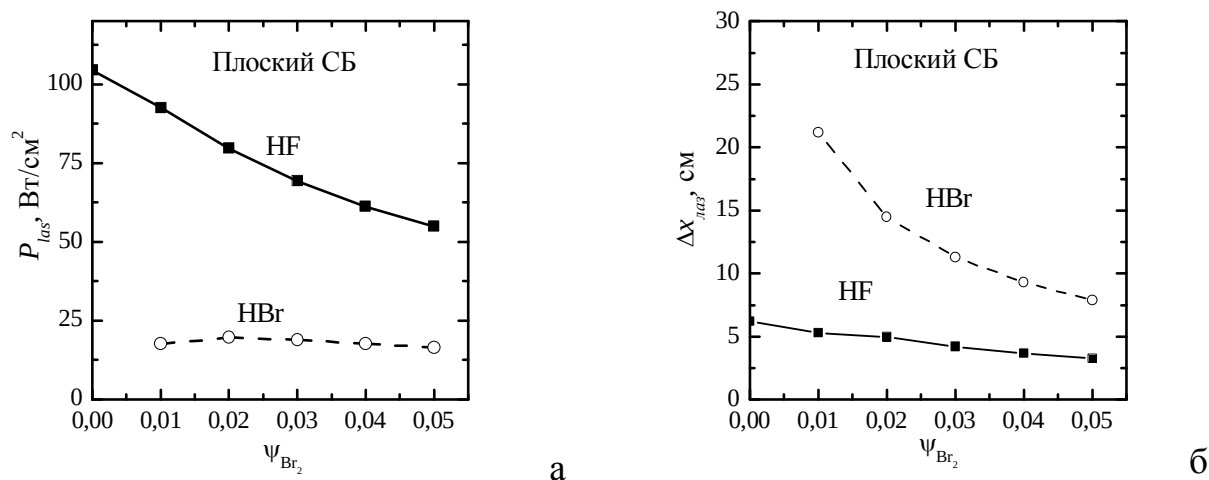


Рис. 4. Зависимость от степени разбавления ψ_{Br_2} приведённой мощности излучения P_{las} (а) и длины лазерной зоны Δx_{las} (б) на частотах HF и HBr

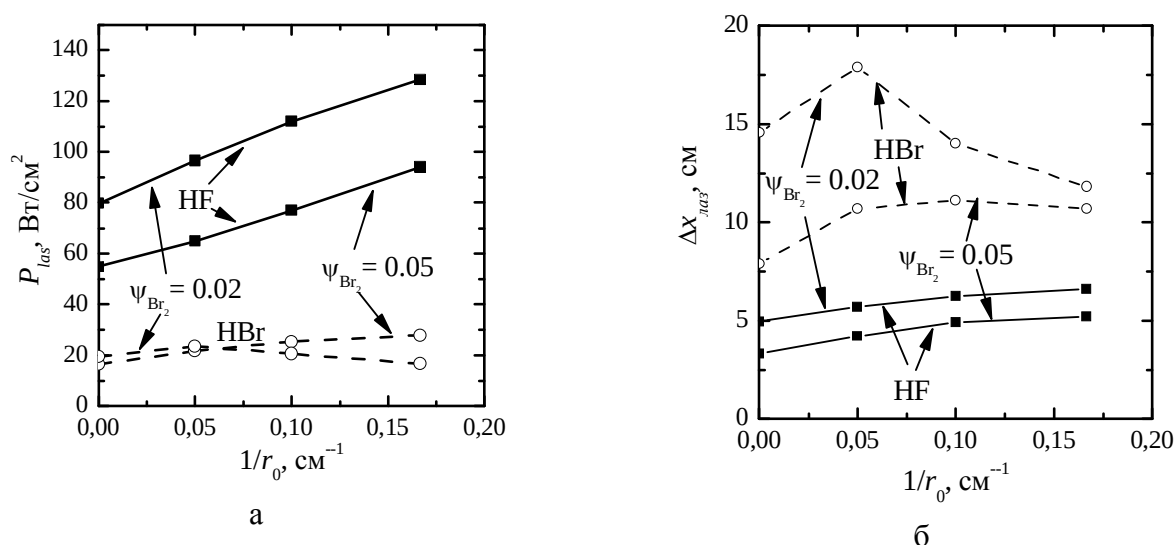


Рис. 5. Зависимость приведённой мощности (а) и длины лазерной зоны (б) от кривизны соплового блока для $\psi_{Br_2} = 2\%$ и $\psi_{Br_2} = 5\%$

Длина зоны генерации на HBr имеет максимум при некотором радиусе соплового блока. При больших радиусах соплового блока зона генерации и мощность падают вследствие сильного разряжения потока и, соответственно, малости КУСС в зоне активного образования молекул HBr. Зона генерации на молекулах HF с увеличением кривизны растёт не очень сильно по сравнению с HBr.

Глава 4 посвящена теоретическому сравнению параметров генерации на основном тоне и на обертоновых колебаниях в сверхзвуковом непрерывном HF-лазере с плоской конструкцией щелевого соплового блока. Двукратное уменьшение длины волны излучения при переходе от традиционного HF-НХЛ к обертоновому лазеру даёт ряд преимуществ: улучшение прохождения излучения в атмосфере вследствие меньшего поглощения парами воды; снижение вдвое дифракционного предела расходимости излучения ($\sim \lambda$), увеличения вчетверо яркости в дальней зоне ($\sim \lambda^{-2}$, при равной выходной мощности и апертуре), более сильное поглощение излучения на поверхности металлов.

При исследовании HF-НХЛЮТ расчёты течения в соплах и в зоне генерации проведены по двумерной модели "узкого канала". За основу взят "щелевой" сопловой блок, разработанный в НПО "Энергомаш". Сопловая решётка имеет размер вдоль оси резонатора $L_a = 40$ см. Шаг решетки варьировался от 4 мм до 7.5 мм, соотношение выходных сечений сопел окислителя и горючего 3:1, степень расширения окислительных сопел 17.

Исследовалась традиционная топливная композиция HF-лазера $\{[D_2] + \alpha[F_2] + A(\alpha-1)[He] / R_L(\alpha-1)[H_2]\}$. Рассматривались различные варианты состава топлива в камере сгорания: $\alpha=1.4...1.8$, $A=10...17$ при статическом давлении на срезе соплового блока $p_{res} \sim 2...9$ Торр.

Усилительные свойства активной среды

Исследование показало, что КУСС на обертоновых переходах в 70...80 раз ниже, чем на основном тоне. Максимальные значения получены для шага решётки 4 мм при низких давлениях $p_{res} \sim 2$ Торр для топлива в камере сгорания $\alpha=1.8$, $A=17$ $-g_{2-0}^{max} \sim 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, $g_{3-1}^{max} \sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ (при кинетике 1982 г.). На основных переходах максимальные значения КУСС получены для этого же газодинамического режима: в полосе $P_1 - g_{1-0}^{max} \sim 0.23 \text{ см}^{-1}$, в полосе $P_2 - g_{2-1}^{max} \sim 0.28 \text{ см}^{-1}$. Слабые усилительные свойства активной среды на обертоне делают необходимым использование резонаторной оптики с высоким коэффициентом отражения, обеспечивающим низкое значение порогового коэффициента усиления на частотах обертона.

Поведение КУСС в зависимости от режимных параметров очень похоже для основного тона и для обертона. Максимальные значения КУСС на основном тоне и на обертоне достигаются при одинаковых составах топлива $\alpha=1.8$, $A=10...14$ для всех шагов решётки щелевого соплового блока. Это легко объяснимо – если достигается сильная инверсия на основных переходах, то и на обертон-

ных переходах инверсия будет сильной, так как накачка в холодной реакции происходит в основном на уровни $v=2, 3, 4$.

Зависимость КУСС от коэффициента разбавления гелием A достаточно слабая при $A < 17$. При больших разбавлениях $A > 17$ КУСС резко спадает ввиду уменьшения количества активных центров.

С уменьшением шага решётки значения КУСС растут по величине, а зона усиления укорачивается в связи с интенсификацией перемешивания струй. Переход от шага решётки 7 мм к шагу 4 мм повышает КУСС примерно в 2 раза во всех колебательных полосах.

Полученные данные по коэффициенту усиления хорошо согласуются с экспериментальными данными российских и американских авторов.

Энергетические характеристики HF-НХЛ

При исследовании параметров генерации в HF-НХЛОТ полагалось, что резонатор Фабри-Перо имеет идеальные селективные зеркала, так что генерация на основном тоне полностью подавлена и не оказывает влияния на обертоновую генерацию. В расчётах HF-НХЛ рассматривался однопроходный резонатор с длиной активной среды $L_a = 40$ см, потери в зеркалах на основном тоне $a_1 = a_2 = 1\%$, в обертонном лазере $a_1 = a_2 = 0.1\%$. Получены оптимальные коэффициенты пропускания выходного зеркала в основном тоне $t_2 = 0.15$ и на обертоне $t_2 = 0.07$. Основные расчёты проведены для соплового блока с шагом решётки 7 мм.

В большинстве расчетов отмечена генерация на обертоновых переходах в линиях $P_{2-0}(3...7)$, $P_{3-1}(4...6)$, на основном тоне – на переходах $P_1(4...10)$, $P_2(4...10)$, $P_3(5...9)$. На рис. 6 показано спектральное распределение мощности выходного излучения (в отн. ед.) для сопловой решётки с шагом 7 мм в основных и обертоновых полосах для газодинамического режима $\alpha = 1.8$, $A = 14$, $p_{res} = 5$ Торр. Полученный спектр генерации на обертоне хорошо согласуется с экспериментами, проведёнными в РНЦ “Прикладная химия”, где в разных работах наблюдались линии $P_{2-0}(3...6)$, $P_{2-0}(4...6)$, $P_{2-0}(5...7)$, а также с работами американских исследователей (Duncan W. et al), проведёнными на HF-НХЛ с сопловым блоком типа NYLTE, в которых спектр обертоновой генерации состоял из 4–5 линий с пиком мощности при $J = 6$ и 7.

Оптимальным давлением с точки зрения достижения максимальной мощности на основном тоне практически для всех расходных параметров оказался диапазон $p_{res} \sim 5...6$ Торр. Влияние массового расхода на мощность обертоновой генерации несколько отличается от картины для основного тона – наблюдается снижение мощности с увеличением давления, наиболее предпочтительными

практически для всех составов газа являются низкие давления $p_{res} \sim 2$ Торр. Это подтверждается экспериментальными данными, полученными в РНЦ “Прикладная химия”, где наблюдалось падение мощности оберточной генерации с увеличением массового расхода реагентов через генератор атомарного фтора. Аналогичные результаты получены в экспериментах и американскими авторами в HF-НХЛОТ с сопловым блоком типа NYLTE.

Длина зоны генерации на оберточке монотонно уменьшается с ростом давления для всех газодинамических режимов. При увеличении давления от 2 до 9 Торр длина оберточной генерации монотонно уменьшается с ~ 4.0 см до ~ 1.2 см.

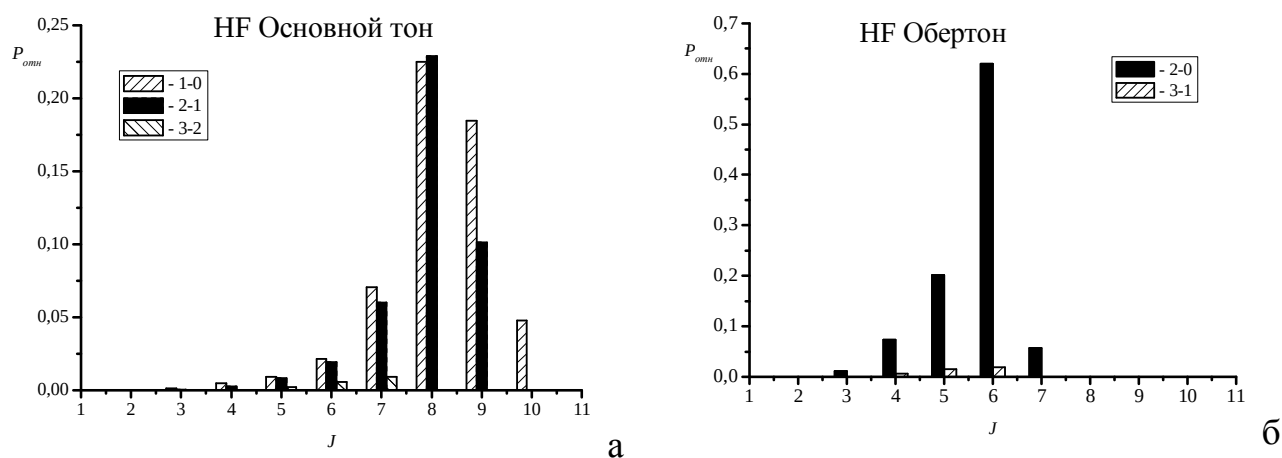


Рис. 6. Спектральное распределение излучения HF на основных (а) и оберточных (б) колебательно-вращательных переходах. $d = 7$ мм, $\alpha = 1.8$, $A = 14$, $p_{res} = 5$ Торр

Эффективность преобразования в оберточную генерацию в области оптимальных по мощности расходов для основного тона минимальна, и резко возрастает при уменьшении давления в среде, т.е. в области максимальной мощности оберточной генерации. При давлении в активной среде $p_{res} \sim 2$ Торр эффективность преобразования η достигает $\sim 50\%$. Такая величина эффективности преобразования была получена в эксперименте, проведенном в РНЦ “Прикладная химия”.

Поведение мощности и удельного энергосъема в зависимости от α и A для основного тона и обертона очень похоже. В рассмотренных вариантах HF-НХЛО оптимальные значения состава топлива в камере сгорания для достижения максимальной мощности в основном тоне и оберточке одинаковы $\alpha = 1.8$, $A = 8 \dots 14$ для диапазона давлений на срезе соплового блока от 2 до 9 Торр. Этот результат согласуется со многими экспериментами, в которых оптимальные режимы для основного тона и обертона также совпадают (напр. Duncan W. et al, 1992 г.; Carroll D.L. et al, 2002 г.).

В HF-НХЛ с шагом соплового блока $d = 7$ мм для состава топлива $\alpha = 1.8$, $A = 8$ максимальная приведённая мощность на обертоном составила $P_{las} \sim 35$ Вт/см², удельный энергосъём $E_{y0} \sim 190$ Дж/г при давлении $p_{res} = 2$ Торр, эффективность преобразования в обертоновую генерацию $\eta \sim 50\%$.

Проведено исследование зависимости энергетики HF-НХЛОТ от шага решетки d . С увеличением шага решётки d энергетические показатели монотонно падают для всех режимов. При уменьшении шага решётки с 7 мм до 4 мм мощность HF-НХЛОТ для режима $\alpha = 1.8$, $A = 17$, $p_{res} = 5$ Торр возрастает в 2.2 раза с 25 до 55 Вт/см². При давлении в среде ~ 2 Торр эффективность преобразования в обертоновую генерацию возрастает с 37% до 46%.

Основные результаты работы

1. Созданы численные модели расчёта параметров активной среды и энергетических характеристик НХЛ с плоской и кольцевой конфигурацией соплового блока в одно- и двухдиапазонном режиме генерации излучения в основных и обертоновых колебательных полосах молекул HF, DF и HBr.

2. В рамках полной системы уравнений Навье-Стокса выполнено теоретическое исследование усилительных свойств и энергетических параметров однодиапазонных HF-, DF-НХЛ и двухдиапазонного HF-DF-НХЛ при использовании топливной композиции в камере сгорания CS₂-NF₃-He. Показано, что при использовании сероуглерода в качестве первичного горючего

- коэффициенты усиления слабого сигнала (КУСС) в активной среде HF-НХЛ и DF-НХЛ в 2-3 раза превышают значения КУСС для традиционного первичного горючего (D₂, H₂, C₂H₄);

- в широкой области изменения коэффициента избытка трифторида азота $\alpha \sim 1.2 \dots 1.7$ достижимы высокие значения мощности и энергосъёма;

- максимальные значения мощности достигаются при повышенных (по сравнению с лазерами на традиционных топливных композициях) давлениях в начале лазерной зоны $p_{res} \sim 6 \dots 10$ Торр как для HF-НХЛ, так и для DF-НХЛ, что существенно облегчает решение задачи выхлопа отработанных газов в окружающую атмосферу (для традиционного горючего оптимальные давления $p_{res} \sim 3 \dots 5$ Торр);

- показана возможность получения эффективной одновременной генерации излучения на молекулах HF и DF.

3. Создана кинетическая модель активной среды HF-HBr-НХЛ, генерирующего излучение одновременно в двух спектральных диапазонах на колебательно-вращательных переходах молекул HF и HBr.

4. В рамках полной системы уравнений Навье-Стокса выполнено исследование энергетических характеристик двухдиапазонного HF-HBr-НХЛ с топливной композицией (D_2, F_2, He) / (H_2, Br_2). Показано, что

- усилительные свойства среды на частотах HBr значительно слабее, чем на частотах HF; при оптимальном мольном содержании брома во вторичном горючем ~2.5% максимальный по среде усреднённый поперёк потока КУСС составляет $\sim 0.015 \text{ см}^{-1}$ в полосе P_3 при длине зоны усиления $\sim 15 \text{ см}$ (максимальный КУСС на частотах HF $\sim 0.11 \text{ см}^{-1}$);

- в спектре генерации на частотах HBr наблюдаются линии $P_1(3...8)$, $P_2(4...11)$, $P_3(4...12)$ и $P_4(5...10)$;

- максимальная приведённая мощность генерации на молекулах HBr $P_{las}^{HBr} \sim 20 \text{ Вт/см}^2$ достигается при оптимальном содержании брома во вторичном горючем (водороде) ~2.5% (приведённая мощность в полосе HF для режима без разбавления бромом $P_{las}^{HF} \sim 105 \text{ Вт/см}^2$);

- переход от плоской конструкции соплового блока к цилиндрической (секторной) позволяет значительно повысить энергетические характеристики генерации в полосе HBr; так, при радиусе соплового блока $r_0 = 10 \text{ см}$ приведённая мощность излучения на молекулах HBr увеличивается в 1.5 раза по сравнению с плоским сопловым блоком, достигая значения $P_{las}^{HBr} \sim 30 \text{ Вт/см}^2$ для 5%-ного разбавления вторичного горючего бромом.

5. Выполнено теоретическое исследование усилительных свойств и энергетических параметров HF-НХЛ на обертоновых переходах ($\lambda_{HF}^{OT} \sim 1.25...1.45 \text{ мкм}$) для топливной композиции (D_2-F_2-He)/ H_2 . Показано, что

- коэффициент усиления слабого сигнала (КУСС) на первом обертоне в активной среде HF-НХЛ в 70...80 раз ниже, чем на основном тоне;

- максимальные значения коэффициентов усиления слабого сигнала, мощности и удельного энергосъёма при генерации на первом обертоне молекулы HF достигаются при тех же составах топлива в камере сгорания, что и при генерации на основном тоне в диапазоне давлений на срезе соплового блока от 2 до 9 Торр; для исследуемых в данной работе сопловых блоков оптимальные составы соответствуют коэффициенту избытка фтора $\alpha \sim 1.8$, коэффициентам разбавления гелием $A \sim 8...14$;

– максимальные значения энергосъёма и эффективности преобразования в обертоновую генерацию достигаются при низком давлении в активной среде $p_{res} \sim 2$ Торр практически для всех составов топливной композиции в камере сгорания;

– в HF-НХЛОТ с шагом сопловой решётки 7 мм получены максимальные значения приведённой мощности $P_{las} \sim 35$ Вт/см², удельного энергосъёма $E_{yd} \sim 190$ Дж/г, эффективности преобразования в обертоновую генерацию $\sim 50\%$ для состава топлива $\alpha=1.8$, $A=8$, $R_L=18$;

– уменьшение шага решётки с 7 мм до 4 мм приводит к возрастанию КУСС вдвое, мощности генерации – в 2.2 раза, эффективности преобразования в обертоновую генерацию на 25%.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

1. Александров Б.П., Второва Н.Е., Исаева Л.Д., Щеглов В.А. Непрерывный сверхзвуковой химический лазер на первом оберitone молекулы HF // Квантовая электроника. 1994. Т.21. №5. СС.409–413.

2. Александров Б.П., Степанов А.А., Щеглов В.А. Энергетические возможности импульсно-периодического режима работы сверхзвукового непрерывного HF-лазера // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. №6. СС.490–494.

3. Александров Б.П., Степанов А.А., Щеглов В.А. Модель расчета течения газа в мелкомасштабных соплах непрерывных химических лазеров // Квантовая электроника. 1997. Т.24. №2. СС.163–168.

4. Александров Б.П., Степанов А.А. Численная модель двухчастотного химического лазера непрерывного действия на молекулах HF и HBr // Труды НПО Энергомаш. М: – 2001. Т.19. СС.318-334.

5. Александров Б.П., Башкин А.С., Безноздрев В.Н. Особенности оптической схемы установок на основе DF-НХЛ // Материалы IV Харитоновских научных тематических чтений “Физика лазеров. Взаимодействие лазерного излучения с веществом”. 2002. Саров. 18–21 февраля.

6. Александров Б.П., Башкин А.С., Безноздрев В.Н. Оптимизация основных параметров оптической схемы лазерных установок на основе DF-НХЛ с различной мощностью излучения // Труды НПО Энергомаш. М: 2002. №20. СС.312–331.

7. Александров Б.П., Башкин А.С., Безноздрев В.Н. К вопросу о выборе путей достижения высокой направленности излучения лазерной установки на основе крупноразмерного HF(DF)-НХЛ // Труды НПО Энергомаш. М: 2004. Т.22. СС.256–277.

8. Александров Б.П., Степанов А.А. Численная модель HF-НХЛ с трёхструйным сопловым блоком // Труды НПО Энергомаш. М: 2004. Т.22. СС.278–294.

9. Александров Б.П., Степанов А.А. Сравнение наиболее известных кинетических моделей по их влиянию на расчётные параметры HF (DF)-НХЛ // Труды НПО Энергомаш. М: 2005. т.23. СС. 332–351.
10. Александров Б.П., Безноздрев В.Н., Парфеньев М.В. и др. Энергетические возможности двухчастотного HF-DF-НХЛ с одновременной генерацией излучения на молекулах HF и DF // Труды НПО Энергомаш. М: 2007. Т.25, СС.423–434.
11. Александров Б.П., Степанов А.А. Исследование HF(DF)-НХЛ при разбавлении вторичного горючего инертными газами на основе полной системы уравнений Навье-Стокса // Труды НПО Энергомаш. М: 2007. Т.25. СС.435–448.
12. Aleksandrov B.P., Stepanov A.A. Numerical Simulation of Double-Band cw HF-HBr Chemical Laser // Proc. of SPIE. 2007. V.6735. P.6735-09.
13. Aleksandrov B.P., Stepanov A.A. Comparison of Well-Known Kinetic Models by the cw HF and DF Chemical Lasers Numerical Simulation // Proc. of SPIE. 2007. V.6735. P.6735-0A.
14. Александров Б.П., Каторгин Б.И., Степанов А.А. Моделирование двухдиапазонного непрерывного химического лазера на молекулах HF и HBr // Квантовая электроника. 2008. Т.38. №10. СС.903-908.
15. Александров Б.П., Каторгин Б.И., Степанов А.А. О путях повышения энергетических параметров HF-HBr-НХЛ // Труды НПО Энергомаш. М: 2008. Т.26. СС.271–281.
16. Александров Б.П., Степанов А.А. Энергетические возможности HF- и DF-НХЛ при использовании в качестве горючего сероуглерода // Труды НПО Энергомаш. М: 2008. Т.26. СС.298–313.