

Спектральные и энергетические характеристики импульсного HF/DF-лазера, работающего на смеси $F_2-(H_2 + D_2)-He$

М.А.Азаров, Б.С.Александров, А.В.Арсеньев, В.А.Дроздов, Г.А.Трощиненко

Проведены расчетное и экспериментальное исследования спектральных и энергетических характеристик излучения фотоиницируемого импульсного HF/DF-лазера, работающего на цепном процессе в смеси $F_2:(H_2 + D_2):O_2:He = 3:1:0.3:6.7$ при атмосферном давлении, в зависимости от соотношения исходных концентраций H_2 и D_2 и коэффициента потерь резонатора. Определены оптимальные условия одновременной генерации излучения на молекулах HF и DF в спектральном диапазоне 2.7–4.8 мкм.

Ключевые слова: импульсный химический HF/DF-лазер, цепная реакция, спектр излучения.

1. Введение

В ряде прикладных задач (например, в спектроскопии, при мониторинге газовых и аэрозольных примесей в атмосфере) требуются широкополосные лазерные источники когерентного излучения. Спектр излучения лазера в данном случае должен обеспечивать:

- широкий диапазон длин волн;
- большое число линий генерации внутри этого диапазона;
- равномерное спектральное распределение линий;
- равномерное распределение энергии между линиями.

В качестве таких источников могут применяться импульсные химические лазеры, генерирующие одновременно на нескольких разных колебательно-возбужденных молекулах. К наиболее технологически отработанным и мощным относятся фторводородные лазеры [1–3].

В работах [4, 5] продемонстрирована возможность одновременной генерации в спектральных диапазонах 2.6–3.0 мкм и 3.7–4.1 мкм при использовании электрозарядных лазеров на смесях $SF_6 - HD$, $SF_6 - HD - D_2$ и $SF_6 - H_2 - D_2$. В работе [6] детально исследованы энергетические характеристики электрозарядного лазера на смеси $F_2 - (H_2 + D_2) - SF_6 - O_2 - He$. Однако подробного изучения спектральных характеристик излучения широкополосных лазеров не проводилось.

Цель данной работы заключалась в исследовании кинетики процессов одновременной генерации излучения на переходах колебательно-возбужденных молекул HF(ν) и DF(ν), в определении зависимостей спектральных и энергетических характеристик широкополосного лазера от состава смеси и соотношения начальных концентраций H_2 и D_2 в ней. Эксперименты выполнялись с использованием импульсного фотоиницируемого HF/DF-ла-

зера [7], энергия импульса которого в зависимости от условий эксперимента достигала нескольких килоджоулей. Конечной задачей было определение оптимальных условий работы лазера, при которых энергия импульса наиболее равномерно распределена в спектральном диапазоне 2.7–4.8 мкм.

2. Численное моделирование

Для определения оптимального режима генерации импульсного химического лазера, обеспечивающего получение выходного излучения, удовлетворяющего указанным выше требованиям, было проведено численное моделирование такого лазера. Расчетная модель была близка к подобным моделям, разработанным в [8–10]. Решалась система обыкновенных дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнения, описывающие инициирование цепной химической реакции, химические и релаксационные процессы в газовой среде, формирование спонтанного и вынужденного излучения в оптическом резонаторе, и уравнение для температуры газа в замкнутом объеме, изменяющейся в результате химических и релаксационных процессов. Предполагалось, что активная среда и параметры инициирования цепной химической реакции однородны по всему объему. Также предполагалось, что использование плоскопараллельного резонатора обеспечивало его однородное заполнение излучением. В этом случае в уравнениях независимой переменной является только время процесса.

Энергия и спектр излучения импульсного химического HF/DF-лазера существенно зависят от порога генерации, определяемого параметрами оптического резонатора [11]:

$$K_{th} = -\frac{\ln(R_1 R_2)}{2L},$$

где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения зеркал резонатора; L – длина активной среды. На рис. 1, а, 2 и 3 представлены результаты расчета энергии и спектра излучения импульсного химического лазера на смеси газов состава $F_2:(H_2 + D_2):O_2:He = 3:1:0.3:6.7$ при ее на-

М.А.Азаров, Б.С.Александров, А.В.Арсеньев, В.А.Дроздов, Г.А.Трощиненко. ФГУП «Российский научный центр "Прикладная химия"», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14

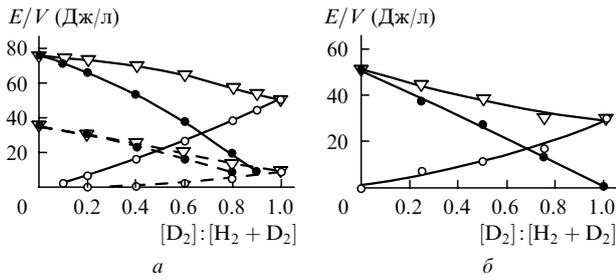


Рис.1. Зависимости удельной энергии излучения на переходах молекул HF (●) и DF (○), а также полной удельной энергии излучения (▽) от соотношения между концентрациями H₂ и D₂ в исходной газовой смеси, полученные при численном моделировании (а) и в эксперименте (б) для $K_{th} = 0.354$ (а) и 0.341 м^{-1} (б) (сплошные кривые) и 2.83 м^{-1} (штриховые кривые).

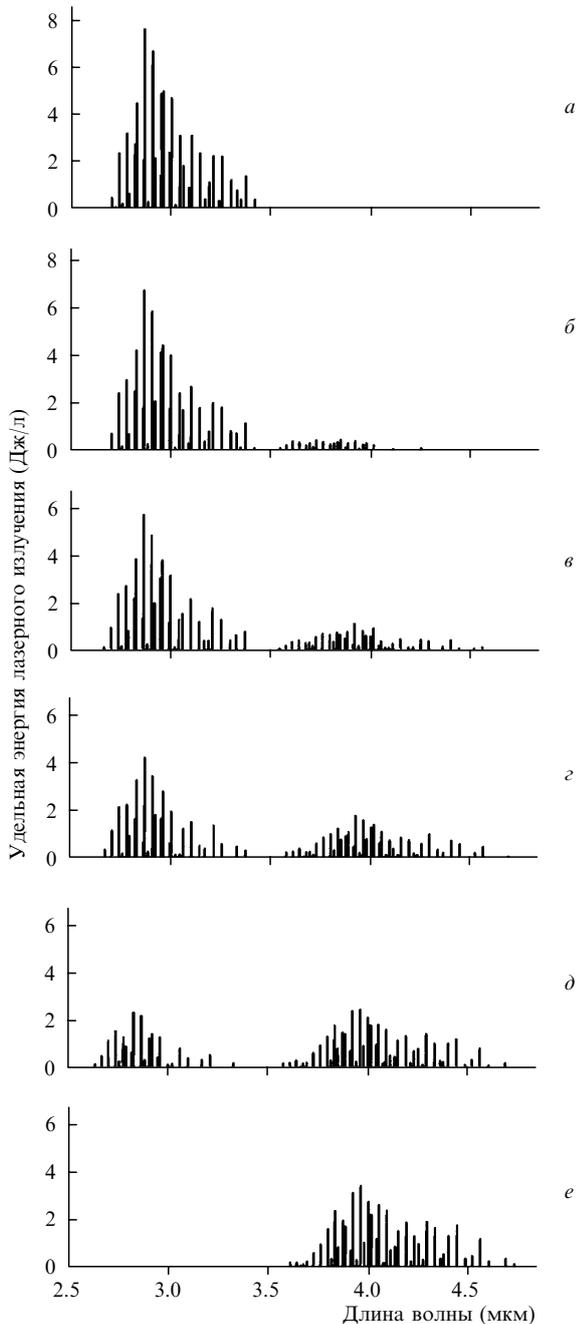


Рис.2. Результаты численного моделирования спектра излучения HF/DF-лазера при соотношениях концентраций $[H_2]:[D_2] = 1:0$ (а), $0.8:0.2$ (б), $0.6:0.4$ (в), $0.4:0.6$ (г), $0.2:0.8$ (д), $0:1$ (е) и $K_{th} = 0.354 \text{ м}^{-1}$.

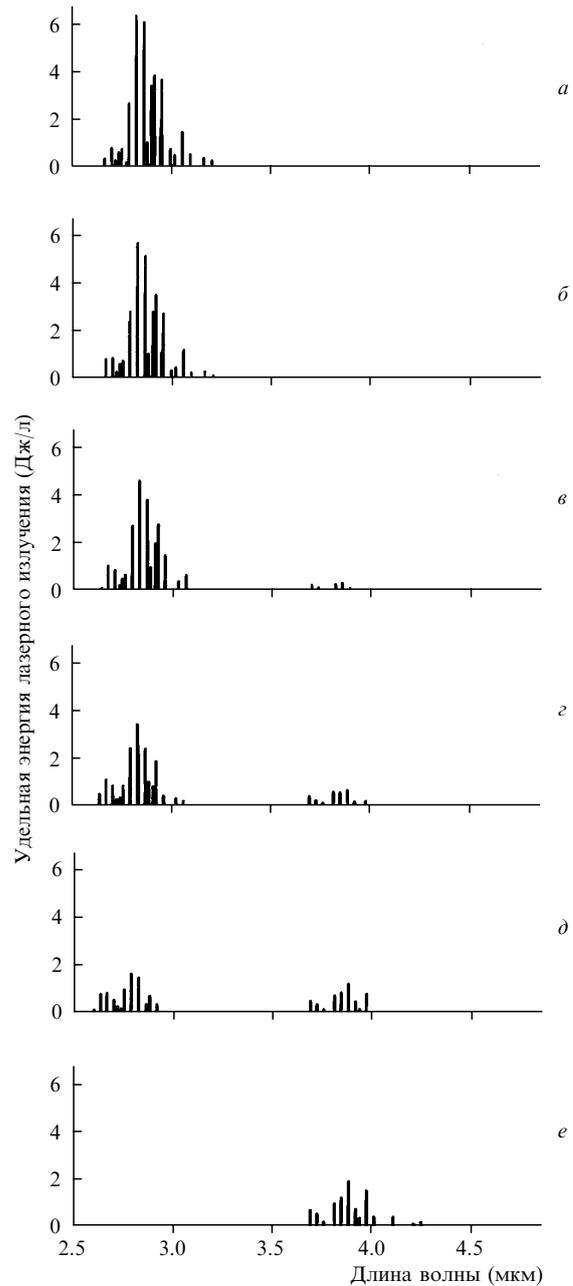
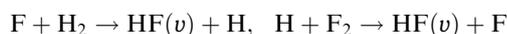


Рис.3. Результаты численного моделирования спектра излучения HF/DF-лазера при тех же, что и для рис.2, соотношениях концентраций $[H_2]$ и $[D_2]$ и $K_{th} = 2.83 \text{ м}^{-1}$.

чальном давлении 0.112 МПа. Параметры активной среды и резонатора, используемые в расчете, соответствуют условиям эксперимента, описанным ниже. В расчете учтено наличие небольшой примеси молекул HF и DF (0.01 от объемной плотности смеси H₂ + D₂) в исходной газовой смеси, которая появляется в реальных условиях эксперимента во время приготовления этой смеси. Предполагалось, что для выходного зеркала из CaF₂ коэффициент отражения $R_1 = 0.06$, а для глухого зеркала $R_2 = 0.98$. Были проведены две серии расчетов: для $K_{th} = 2.83 \text{ м}^{-1}$ ($L = 0.5 \text{ м}$) и $K_{th} = 0.354 \text{ м}^{-1}$ ($L = 4.0 \text{ м}$).

На рис.1,а показано изменение удельной энергии лазерной генерации E/V (излучение на переходах молекул HF, молекул DF и их сумма) в зависимости от изменения соотношения между концентрациями молекул H₂ и D₂ в исходной газовой смеси. Расчетные спектры выходного

излучения приведены на рис.2 ($K_{th} = 0.354 \text{ м}^{-1}$) и рис.3 ($K_{th} = 2.83 \text{ м}^{-1}$). При уменьшении порога генерации увеличивается число участвующих в ней колебательно-вращательных переходов. Для резонатора с $K_{th} = 2.83 \text{ м}^{-1}$ спектр излучения бедный, особенно для молекул DF, у которых коэффициент усиления меньше, чем у молекул HF. Различие коэффициентов усиления объясняется тем, что при условии выделения приблизительно одинакового количества энергии в цепных реакциях



и



эта энергия распределяется в молекулах DF по большему числу отдельных колебательно-вращательных уровней (по сравнению с молекулами HF), а также тем, что коэффициенты Эйнштейна для переходов в P-ветви молекул DF имеют меньшие значения и цепная реакция с участием дейтерия развивается медленнее. В силу этих причин энергия выходного излучения при увеличении K_{th} падает; особенно резко это проявляется для молекул DF. Уменьшение K_{th} дает возможность решить указанные выше проблемы, т. е. получить выходное излучение, распределенное достаточно равномерно в широком спектральном диапазоне.

3. Результаты эксперимента

Экспериментальное исследование проводилось на лазере модульной цилиндрической конструкции с центральным расположением фотолампы при суммарном объеме активной среды 50 л и апертуре пучка 130 мм. Лазерная среда состояла из смеси газов состава $F_2 : (H_2 + D_2) : O_2 : He = 3 : 1 : 0.3 : 6.7$ при суммарном давлении 0.112 МПа. Энергия, запасенная в конденсаторах разрядного контура, составляла 6 кДж [7].

На рис.1,б и 4 представлены экспериментальные зависимости удельной энергии и спектра генерации на молекулах HF и DF от соотношения начальных концентраций молекул H_2 и D_2 . Видно, что при добавлении дейтерия удельная энергия излучения на молекуле DF растет почти линейно и достигает максимума 29 Дж/л при полном замещении водорода. При этом удельная энергия излучения молекул HF падает от 50 Дж/л до нуля.

Наиболее равномерное распределение лазерной энергии в спектре наблюдалось при соотношении $H_2 : D_2 = 1 : 3$. В этом случае основная доля энергии сосредоточена в спектральных диапазонах 2.7–3.25 мкм (42% в 30 спектральных линиях) и 3.7–4.2 мкм (56.5% в 41 линии). В диапазоне 4.3–4.8 мкм генерировало всего 12 спектральных линий с суммарной долей энергии излучения менее 1.5%.

На рис.4,д и е приведены спектры генерации на смеси $F_2 - D_2 - O_2 - He$. Основное различие между этими вариантами эксперимента состояло в том, что во втором случае была проведена тщательная очистка исходной газовой смеси от примеси молекул CO_2 . Очистка приводит к существенному увеличению энергетической эффективности (удельная энергия увеличилась от 29 до 43 Дж/л) и к расширению спектра в его длинноволновой части. Подробно исследование этого эффекта изложено в [12]. В расчете влияние молекул CO_2 не рассматривалось, это следует иметь в виду при сравнении данных на рис.2 и 4.

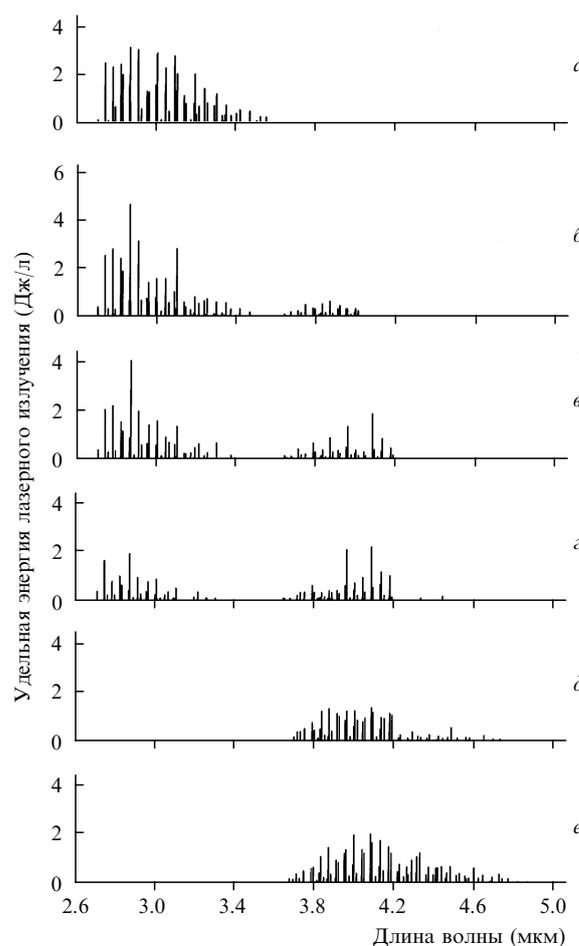


Рис.4. Спектральные зависимости удельной энергии HF/DF-лазера при соотношениях концентраций $[H_2] : [D_2] = 1 : 0$ (а), $3 : 1$ (б), $1 : 1$ (в), $1 : 3$ (г) и $0 : 1$ (д, е), $K_{th} = 0.341 \text{ м}^{-1}$, $[CO_2] = 0.07\%$ (а–д) и $K_{th} = 0.161 \text{ м}^{-1}$, $[CO_2] = 0.01\%$ (е).

Энергетические характеристики, полученные в расчете, существенно превышают результаты экспериментальных измерений. Одна из основных причин этого расхождения – неучет в теоретической модели пространственной неоднородности активной среды [11], вызывающей внутрирезонаторные потери. Другой причиной различия результатов расчета и эксперимента в отношении как распределения энергии между отдельными спектральными линиями, так и полной энергии излучения является неточность приведенных в литературе и используемых в расчете констант скоростей химических и релаксационных процессов в активной среде лазера. Принимая во внимание эти аргументы, можно считать согласование экспериментальных и расчетных данных хорошим.

4. Заключение

В результате проведенных исследований определены условия получения наиболее равномерного распределения энергии в спектре излучения многочастотного лазера. При использовании резонатора с низким коэффициентом потерь (0.34 м^{-1}) получена генерация в широких спектральных диапазонах (2.7–3.3 мкм и 3.6–4.8 мкм). Оптимальным является соотношение между начальными концентрациями H_2 и D_2 , которое изменяется от $1 : 2$ до $1 : 4$ (этот результат получен как в эксперименте, так и

при численном моделировании процесса). При необходимости число спектральных линий и энергию генерации в диапазоне длин волн 4.3–4.9 мкм можно увеличить за счет снижения концентрации CO₂ в активном объеме резонатора, увеличения его добротности и начального содержания D₂ в исходной лазерной смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 1113-2).

1. Батовский О.М., Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Тальрозе В.Л. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 341 (1969).
2. Басов Н.Г., Кулаков Л.В., Маркин Е.П., Никитин А.И., Ораевский А.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 613 (1969).
3. Башкин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г.Басова (М.: Наука, 1982).
4. Kompa K.L., Pimental G.C. *J. Chem. Phys.*, **47**, 857 (1967).
5. Rudko R.I., Drozdowicz Z., Linhares S. *Rev. Sci. Instr.*, **53**, 452 (1982).
6. Великанов С.Д., Елутин А.С., Запольский А.Ф., Конкин Д.В., Куликов С.М., Новиков В.Н., Синецын М.В., Сухарев С.А. *Квантовая электроника*, **18**, 186 (1991).
7. Azarov M.A., Alexandrov B.S., Drozdov V.A., Troshchinenko G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 606 (1997).
8. Буланин М.О., Малых В.Б., Машенджинов В.И., Филиппович Б.С. *Оптика и спектроскопия*, **48**, 94 (1980).
9. Sojka P.E., Kerber R.L. *Appl. Opt.*, **25**, 76 (1986).
10. Кондрашенко А.В., Мищенко Г.М., Севастьянова Т.Г., Урлин В.Д. *Вопросы атомной науки и техники*, № 3, 64 (1988).
11. Азаров М.А., Александров Б.С., Дроздов В.А., Трошиненко Г.А. *Квантовая электроника*, **30**, 30 (2000).
12. Azarov M.A., Drozdov V.A., Troshchinenko G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 606 (1998).