

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ХИМИЧЕСКИЙ HF(DF)-ЛАЗЕР

© 2021 г. В. Я. Агроскин^а, Б. Г. Бравый^а, Г. К. Васильев^а, В. И. Гурьев^а,
С. А. Каштанов^а, Е. Ф. Макаров^{а,*}, С. А. Сотниченко^а, Ю. А. Чернышев^{а,**}

^а Институт проблем химической физики РАН

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., просп. Академика Семенова, 1

*e-mail: makarov@icp.ac.ru

**e-mail: chern@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 15.06.2021 г.

Предложен рабочий процесс HF(DF)-лазера, в котором полностью исключена откачка реактора. Рабочий процесс состоит из следующих этапов: 1) вытеснение инертным газом продуктов реакции, образовавшихся в результате инициирования рабочей смеси, 2) последующее вытеснение инертного газа рабочей смесью. Конструктивное решение для системы напуска газов в реактор – через кольцевую щель на одном из его концов – позволяет минимизировать расход инертного газа, вытесняющего продукты реакции после инициирования рабочей смеси. Количество остаточного HF(DF) в реакторе практически не влияет на энергию генерации в следующем цикле. Экспериментально показано, что технология с вытеснением не приводит к снижению энергии генерации по сравнению с технологией, использующей откачку, но значительно (на ~2 порядка) сокращает продолжительность рабочего цикла HF(DF)-лазера.

DOI: 10.31857/S003281622106001X

1. ВВЕДЕНИЕ

Рабочая смесь химического HF(DF)-лазера, помимо основных реагентов F₂ и H₂(D₂), содержит O₂, необходимый для ее стабилизации, и инертный газ-разбавитель (обычно He). Оптимальной является смесь с соотношением количеств F₂ и H₂(D₂), равным 3:1, и количеств O₂ и F₂, равным 1:5. В итоге рабочая смесь имеет состав 0.15F₂ + 0.03O₂ + 0.05H₂(D₂) + 0.77He. Стандартный рабочий цикл импульсного химического HF(DF)-лазера включает в себя следующие этапы: 1) приготовление рабочей смеси в предварительно откачанном реакторе и ее инициирование, 2) откачку продуктов реакции через фильтр, поглощающий агрессивные газы, – HF(DF) и остаточный F₂. Достоинство такого цикла – возможность работать при произвольном давлении рабочей смеси в реакторе, недостатки – длительный напуск рабочей смеси из-за необходимости предпринимать различного рода предосторожности в силу разветвленно-цепного механизма реакции F₂ с H₂(D₂) [1] и длительная откачка реактора от продуктов, образовавшихся после инициирования рабочей смеси (около 10 мин). В результате промежуток времени между двумя последовательными импульсами составляет ≥10 мин.

Решению проблемы быстрого и безопасного приготовления фтороводородных смесей посвящены наши работы [1, 2]. В работе [1] обоснована технология быстрого (в секундном диапазоне) приготовления рабочих смесей при одновременном напуске реагентов в реактор. Известно, что реакция F₂ с H₂(D₂) протекает по механизму с энергетическим разветвлением, вследствие чего приготовление смесей может сопровождаться вхождением в область самовоспламенения. Для устранения самовоспламенения напускаемой в реактор смеси в начальный период предложено предварительно заполнять реактор некоторым количеством инертного газа. Величина минимального давления инертного газа, при котором напускаемая смесь не воспламеняется, зависит от рода инертного газа, состава смеси, скорости напуска и т.п. и требует экспериментального определения. Для быстрого и безопасного приготовления смесей предложено использовать конструкцию смесителя, состоящую из системы капилляров, плотно упакованных в цилиндрический канал. Смесь, содержащая H₂(D₂), подается через капилляры, смесь, содержащая F₂, – через промежутки между капиллярами. В работе [2] описывается конструкция компактного капил-

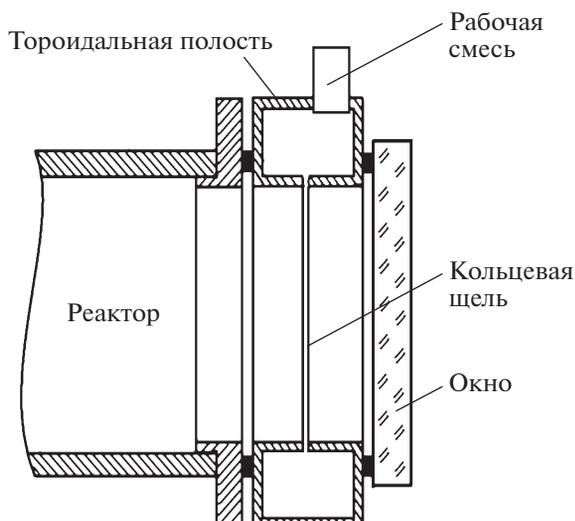


Рис. 1. Устройство для напуска газов через кольцевую щель.

лярного смесителя, обеспечивающего эффективное смешение газов, с суммарной производительностью до $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$.

В настоящей работе предлагается исключить из рабочего цикла еще один продолжительный этап — откачку продуктов реакции. Вместо откачки продуктов предлагается вытеснять их из реактора инертным газом. Это в принципе позволит значительно сократить продолжительность рабочего цикла химического лазера. В этой технологии напускаемая рабочая смесь вытесняет из реактора газ, оставшийся в нем от предыдущего цикла, затем, после инициирования смеси, инертный газ вытесняет образовавшиеся после взрыва продукты. Если вытеснение происходит в окружающую атмосферу (через фильтр, поглощающий агрессивные газы), то давление вытесняющих газов должно быть не ниже атмосферного.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В опытах с вытеснением использовали два варианта напуска газов в реактор: 1) напуск через канал диаметром 1 см, расположенный под углом 45° к оси реактора, и 2) напуск через кольцевую (по диаметру реактора) щель шириной 0.35 мм.

Выходное отверстие канала, равно как и кольцевая щель, размещались вблизи конца реактора. Площади поперечного сечения канала и кольцевой щели были примерно одинаковыми — 0.79 и 0.72 см^2 соответственно. В обоих вариантах напуска — с использованием канала либо щели — газ из реактора вытеснялся через боковое отверстие диаметром 1 см, расположенное на противоположном конце.

Вариант с напуском через кольцевую щель схематически представлен на рис. 1. В этом варианте рабочая смесь через подводящую трубку сначала подается в распределительную тороидальную полость, из которой затем через кольцевую щель вытекает в реактор.

2.1. Вытеснение из реактора инертного газа рабочей смесью

В опытах использовали химический DF-лазер с реактором из тефлона длиной 120 см и объемом 4 л. Смесь инициировали импульсными лампами с общей запасенной энергией 440 Дж. Энергия лазерного излучения составляла 20 Дж. Упрощенная схема напускной установки приведена на рис. 2. Она включает в себя три независимые магистрали для подачи соответственно смесей $0.3\text{F}_2 + 0.06\text{O}_2 + 0.64\text{He}$ и $0.1\text{D}_2 + 0.9\text{He}$, а также чистого He. Установка содержит смеситель *СМ*, электромагнитные клапаны $\mathcal{ЭК}_1 - \mathcal{ЭК}_4$ и систему регулировки расходов напускаемых газов [2] (на рисунке не показана). Рабочая смесь образуется в результате соединения смесей $0.3\text{F}_2 + 0.06\text{O}_2 + 0.64\text{He}$ и $0.1\text{H}_2(\text{D}_2) + 0.9\text{He}$ при равном их расходе. Гелиевая магистраль используется для вытеснения продуктов из реактора. Электромагнитные клапаны служат для быстрого включения и отключения потоков соответствующих газов. Для приготовления рабочей смеси использовали смеситель с суммарной производительностью $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$ [2]. При одновременном открытии электромагнитных клапанов $\mathcal{ЭК}_1$, $\mathcal{ЭК}_2$ и $\mathcal{ЭК}_4$ образующаяся в смесителе рабочая смесь вытесняет через клапан $\mathcal{ЭК}_4$ предварительно напущенный в откачанный реактор гелий. В ходе вытеснения давление в реакторе остается неизменным и равным 1 атм. Длительность вытеснения варьируется от 2 с (однократное вытеснение) до 3 с (полуторакратное вытеснение) с сохранением постоянной объемной скорости напуска, равной $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$. Здесь и далее под кратностью вытеснения понимается отношение использованного объема вытесняющего газа к объему реактора.

В опытах проводили сравнение лазерной генерации для смесей, приготовленных по технологии с вытеснением, и смесей, приготовленных по стандартной, обычно используемой нами технологии. Согласно этой технологии, в откачанный реактор предварительно напускают гелий до давления 0.1 атм с последующим напуском рабочей смеси до общего давления 1 атм со скоростью $2 \text{ л} \cdot \text{атм/с}$. Как отмечалось, предварительное заполнение реактора гелием предотвращает самовоспламенение рабочей смеси в начальный момент напуска [1], пока давление в реакторе невелико. Предварительно напущенный гелий вытесняется далее при напуске смеси в присоединенный к реактору

добавочный объем. Если v_0 , v – соответственно добавочный объем и объем лазера, P_0 , P – начальное и конечное давление газа, то $v_0/v = P_0/(P - P_0)$. При $v = 4$ л, $P_0 = 0.1$ атм, $P = 1$ атм добавочный объем v_0 будет равен ~ 0.44 л.

В опытах с вытеснением определяли плотность лазерной генерации в джоулях на квадратный сантиметр в зависимости от кратности вытеснения из реактора гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$ из смесителя и исходя из конструктивных особенностей устройств напуска газов в реактор. Результаты, полученные в опытах, выполненных по стандартной технологии и с вытеснением, приведены ниже (каждый результат усреднялся по 3–5 опытам):

– стандартная технология напуска рабочей смеси	0.46 Дж/см ²
– 1-кратное вытеснение гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$, напуск смеси через канал	0.53 Дж/см ²
– 1.5-кратное вытеснение гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$, напуск смеси через канал	0.65 Дж/см ²
– 1-кратное вытеснение гелия смесью $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$, напуск смеси через кольцевую щель	0.59 Дж/см ²

Анализ данных показывает, что при использовании технологии с вытеснением энергия генерации в целом выше. Росту энергии генерации также способствуют увеличение кратности промывки реактора рабочей смесью и использование напуска смеси через кольцевую щель. Отметим, что все сказанное в равной степени относится к химическому HF-лазеру.

2.2. Вытеснение из реактора продуктов реакции инертным газом

В продуктах взрыва стандартной рабочей смеси $0.15F_2 + 0.03O_2 + 0.05D_2 + 0.77He$ содержится 10% DF. Проблемы, возникающие при использовании технологии вытеснения для удаления продуктов, значительно сложнее. Это связано с тем, что даже небольшое количество DF, остающееся после промывки реактора инертным газом, способно эффективно снижать генерацию в последующем цикле за счет внесения дополнительных потерь вследствие поглощения лазерного излучения молекулами DF.

Об эффективности вытеснения DF судили по величине энергии лазерной генерации, достигаемой в опытах, в зависимости от кратности вытеснения продуктов и способа ввода вытесняющего газа в реактор.

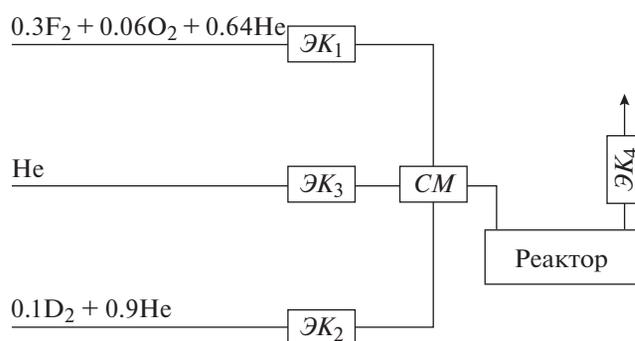


Рис. 2. Упрощенная схема напускной установки. СМ – смеситель; ЭК₁–ЭК₄ – электромагнитные клапаны.

Лазерную генерацию в опытах соотносили с генерацией в “стандартном” опыте. В откачанный реактор напускали He до давления 1 атм, затем вытесняли его рабочей смесью. Рабочую смесь инициировали и регистрировали энергию генерации. Этот опыт считали стандартным. После его проведения сначала вытесняли образовавшиеся продукты He, затем новой порцией рабочей смеси вытесняли He с возможной примесью DF, инициировали рабочую смесь, измеряли энергию генерации и сравнивали ее с генерацией в предыдущем опыте. Результаты опытов представлены ниже.

Вытеснение продуктов при подаче He через канал, Дж/см²:

– стандартный опыт	0.56
– 3-кратное вытеснение продуктов гелием	0
– 10-кратное вытеснение продуктов гелием	0

Вытеснение продуктов при подаче He через кольцевую щель, Дж/см²:

– стандартный опыт	0.54
– 1.4-кратное вытеснение продуктов гелием	0.48
– 2.8-кратное вытеснение продуктов гелием	0.49
– 4.2-кратное вытеснение продуктов гелием	0.58

Согласно полученным данным, даже 10-кратное вытеснение продуктов при подаче He через канал не приводило к генерации в последующем опыте. В то же время использование кольцевой щели решило проблему. Требуемая кратность вытеснения при этом была невелика – вполне достаточно 1.4-кратного вытеснения.

Объяснение полученных результатов состоит в следующем. Напускной канал и реактор имеют заметно различающиеся диаметры, поэтому их сочленение приводит к внезапному расширению потока. При входе в реактор возникает струйное течение со свободной границей, расширяющейся в направлении движения струи. Скорость струи, вытекающей из канала, составляет около 25 м/с. Достигая стенки, струя последовательно отража-

ется от нее до тех пор, пока ширина струи не сравняется с диаметром реактора. Далее течение газа происходит с фиксированной внешней границей. На участке, где струя расширяется до размеров реактора, между стенкой и границей струи устанавливается сложное вихревое движение. Имеет место образование застойных зон с турбулентным обменом массы между струей гелия и окружающим газом – продуктами взрыва смеси в предыдущем опыте. В застойных зонах в поток гелия может подмешиваться значительное количество неподвижного газа из реактора. В результате вытеснение продуктов происходит не поступающим гелием, а смесью гелия с продуктами взрыва, что может приводить к увеличению концентрации остаточного DF.

В случае использования кольцевой щели вытекающий из нее гелий создает газовую “завесу”. Эта “завеса” при движении по направлению к другому концу реактора создает своеобразную “пробку” из инертного газа, вытесняющую продукты подобно поршню. При временах заполнения реактора 2 с, как в опытах, диффузионное размытие фронта “пробки” невелико, и конфигурация “пробки” сохраняется в течение всего времени заполнения реактора. Это объясняет высокую эффективность вытеснения продуктов при использовании кольцевой щели.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о возможности реализации рабочего процесса HF(DF)-ла-

зера, в котором полностью исключен процесс откачки реактора без потерь в энергии генерации. Процесс состоит из двух этапов: 1) вытеснение инертным газом продуктов реакции, образовавшихся в результате инициирования рабочей смеси, 2) последующее вытеснение инертного газа рабочей смесью. Продолжительность каждого этапа зависит от объемной скорости напуска газов в реактор и объема реактора. На лазерной установке с реактором длиной 120 см и объемом 4 л со смесителем производительностью 2 л·атм/с и энергией генерации в импульсе 20 Дж достигнута продолжительность рабочего цикла, равная примерно 5 с. Это примерно на 2 порядка меньше, чем продолжительность цикла с откачкой. Если вытеснение происходит в атмосферу, то рабочее давление в реакторе должно быть не меньше атмосферного.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке задания АААА-А19-119070790003-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Чернышев Ю.А.* // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 3. С. 9.
2. *Агроскин В.Я., Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гурьев В.И., Каштанов С.А., Макаров Е.Ф., Сотниченко С.А., Чернышев Ю.А.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 94. <https://doi.org/10.1134/S0032816218060010>