_____ ЛАЗЕРНАЯ __ ПЛАЗМА

УДК 533.9.01

ПРОТОТИП ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ГАЗОПРОТОЧНОГО КИСЛОРОД-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА: 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ СРЕДЫ, СФОРМИРОВАННОЙ В ГАЗОПРОТОЧНОМ ЩЕЛЕВОМ ВЧ-РАЗРЯДЕ В СМЕСЯХ О₂ : He : CF₃I

© 2020 г. Н. П. Вагин^{*a*}, А. А. Ионин^{*a*}, А. Ю. Козлов^{*a*}, И. В. Кочетов^{*a*, *b*}, А. П. Напартович^{*a*, *b*}, О. А. Рулев^{*a*}, Д. В. Синицын^{*a*}, *, **, Н. Н. Юрышев^{*a*}

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Россия
*e-mail: dvsmailru@mail.ru
**e-mail: sinicyndv@lebedev.ru
Поступила в редакцию 21.04.2020 г.
После доработки 18.05.2020 г.
Принята к публикации 20.05.2020 г.

Проведен расчетный анализ возможности достижения генерации в газопроточном электроразрядном кислород-йодном лазере при его возбуждении поперечным щелевым ВЧ-разрядом для различных условий прохождения компонентов газовой смеси $CF_3I : O_2 : He$ по газовому тракту: в дозвуковом потоке без охлаждения стенок канала и с охлаждением различных участков стенок канала до 100 К. Для этого в модель были добавлены реакции с участием йодида CF_3I и уравнение баланса фотонов. При этом предполагалось, что активная среда формировалась двумя способами: 1) все компоненты газовой смеси одновременно проходили через зону ВЧ-возбуждения; 2) кислород и гелий проходили через зону ВЧ-разряда, а йодид-содержащий компонент (смесь $CF_3I : He$) вводился через инжектор, расположенный ниже по потоку газа от зоны разряда. Расчеты показали принципиальную возможность достижения режима лазерной генерации в реализуемых на экспериментальном стенде условиях.

Ключевые слова: электроразрядный кислород-йодный лазер, газопроточный щелевой ВЧ-разряд, модель активной среды

DOI: 10.31857/S0367292120110086

1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования [1–10], проведенные за последнее время, показали, что нарабатывать синглетный кислород (СК) – кислород в электронно-возбужденном состоянии $O_2(a^1\Delta_0)$, необходимый для работы кислород-йодного лазера (КИЛ), можно не только в традиционных химических генераторах, но и в электрических разрялах самого разного типа. Основная проблема при этом заключается в том, что при типичном, относительно невысоком выходе СК У ~ 10-15% (У отношение концентрации СК к суммарной концентрации кислорода), газовый поток на выходе из электроразрядного генератора СК, как правило, имеет высокую температуру (обычно 400-600 К), требующую для выполнения пороговых условий генерации в кислородно-йодном лазере повышенное содержание СК (для T = 300 К пороговый выход СК У_{пор} = 15%). Одной из возможностей преодоления этого обстоятельства при построении экспериментальных стендов является использование сверхзвукового охлаждения возбужденного газового потока [1, 3, 10–12], при этом в работе [12] была получена выходная мощность стационарной генерации около 500 Вт.

В наших работах [13, 14] предложен и реализован иной подход к построению электроразрядного КИЛ (ЭКИЛ): все необходимые элементы установки спроектированы нами в щелевой поперечной по отношению к потоку газа геометрии. Такой способ имеет ряд преимуществ: 1) ширина всего газового тракта выбрана достаточно большой (28 см), что позволит впоследствии использовать менее плотные зеркала лазерного резонатора; 2) поперечные электроды щелевого ВЧ-разряда сделаны охлаждаемыми, что позволяет уже в процессе возбуждения эффективно охлаждать газовую смесь за счет диффузии (межэлектродный зазор 3 мм); 3) возможность использования в экспериментах расположенного непосредственно за зоной возбуждения инжектора йода (или газовой смеси, содержащей йодид) сводят к минимуму потери СК на пути от ВЧ-разряда до зоны смешения и области генерации. Предложенный подход к построению газопроточного ЭКИЛ ранее не использовался.

Выполнены первые эксперименты по оптической диагностике газовой смеси. создаваемой различными способами с использованием возбуждения в газопроточном щелевом ВЧ-разряде, когда все ее компоненты – кислород, гелий и йодид (CF₃I или CH₃I) в различных пропорциях – одновременно проходили зону ВЧ-возбуждения, или когда к возбужденной в ВЧ-разряде смеси О2 : Не ниже по потоку подмешивался йодид-содержащий компонент. В различных точках газового тракта ниже по потоку от разрядной зоны измерены зависимости от вкладываемой в ВЧ-разряд мощности величины поглощения на переходе $I({}^{2}P_{3/2}) \rightarrow I^{*}({}^{2}P_{1/2})$ и интенсивностей люминесценции из состояний $I^*({}^2P_{1/2})$ и $O_2(a^1\Delta_g)$ (длины волн 1.315 и 1.27 мкм, соответственно). Результаты этих экспериментов использованы для верификации расчетной модели. в настоящей работе не представлены и будут опубликованы позднее.

В настоящей работе разработанная нами ранее кинетическая модель [13–17], включающая описание самостоятельного и электроионизационного разрядов в смесях, обогащенных СК, и модифицированная для расчетов характеристик проточного криогенного ВЧ-разряда в молекулярном кислороде и его смесях с Не, подверглась дальнейшей верификации. При этом решалась задача получения возможности моделирования лазерных характеристик в реальных экспериментальных условиях.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Ранее нами была разработана кинетическая модель, включающая описание самостоятельного и электроионизационного разрядов в смесях, обогашенных синглетным кислородом [15]. Впоследствии она была расширена для учета влияния молекул NO и NO₂ [16] и модифицирована для расчетов характеристик проточного ВЧ-разряда в молекулярном кислороде [13] и его смесях с гелием [13]. В настоящей работе указанная модель обобщается с учетом процессов, связанных с подмешиванием в газовый поток молекул иодида CF₃I (или CH₃I). Процессы, связанные с молекулой CF₃I и её производными, и уравнение баланса фотонов взяты из работы [17]. Соотношение долей возбужденного атома йода и невозбужденного, при его диссоциации электронами плазмы соответствует рекомендациям работы [18].

Таблица 1. Ключевые плазмохимические реакции

	•	x ·
N⁰	Реакция	Примечание
1	$O_2 + e \leftrightarrow O_2(a^1\Delta_g) + e$	
2	$O_2 + e \leftrightarrow O + O + e$	
3	$O_2 + e \leftrightarrow O(^1D) + O + e$	
4	$CF_3I + e \rightarrow CF_3 + I + e$	a)
5	$CF_3I + e \rightarrow CF_3 + I^* + e$	a)
6	$CF_3I + O \leftrightarrow CF_3 + IO$	б)
7	$IO + O \leftrightarrow O_2 + I$	б)
8	$\mathrm{I} + \mathrm{I}_{\mathrm{wall}} \leftrightarrow \mathrm{I}_2$	
9	$O_2(a^1\Delta_g) + I \leftrightarrow O_2 + I^*$	
10	$I^* \rightarrow I + \hbar \omega$	

^{а)} Реакция ключевая в случае, когда йодид проходит через зону разряда. ^{б)} Реакция ключевая в случае, когда йодид подмешивается в послесвечении разряда.

Все плазмохимические реакции, используемые в модели, приведены в цитируемых работах и настоящей статье. Тем не менее, для удобства читателей мы приводим в табл. 1 ключевые плазмохимические реакции.

При моделировании использовалось приближение газовой пробки – эволюция компонентов плазмы при движении по каналу рассчитывалась как их эволюция во времени. В различных расчетных сериях скорость движения газа считалась 15 или 30 м/с. Давление газовой смеси по потоку газа считалось постоянным. Температура газа на входе в разрядную камеру задавалась равной 300 К. Учитывался теплоотвод через стенки разрядной камеры (через ВЧ-электроды) и газового канала. Температура стенок разрядной камеры и газового канала считалась заданной. Используемый приближенный подход описан в работе [14]. Если осуществлялся дополнительный теплоотвод через одну нижнюю стенку канала, то использовался приближенный подход: член в уравнении для температуры [14], учитывающий уход тепла через стенку канала умножался на 0.5. При расчетах режимов инжектирования йодид-содержащего компонента в возбужденный поток О₂ : Не использовалась модель идеального мгновенного смешения - считалось, что сразу после подмешивания йодида его концентрация мгновенно и равномерно распределяется по сечению канала. Как показано в экспериментальной [19] и расчетной [20] работах, процесс реального смешения несколько отличается от мгновенного - в наших экспериментальных условиях на протяжении некоторого времени наблюдается струйная структура газового потока непосредственно за инжектором йодида. Учет процесса реального смешения выходит за рамки данной работы.

При моделировании ВЧ-разряда (частота ВЧполя составляла 40 МГц, как в экспериментах) пренебрегалось приэлектродными слоями. Величина приведенного электрического поля в плазме определялась равенством скоростей процессов образования и гибели электронов. Совместно с кинетическими уравнениями решались уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям и уравнения для внешней электрической цепи. Используемая в расчетах модельная электрическая цепь состояла из разрядного промежутка и последовательно с ним соединенных источника постоянного напряжения и балластного сопротивления. Величины напряжения источника питания и балластного сопротивления определялись из условия равенства расчетной мощности, вкладываемой в разряд постоянного тока, и измеряемой в экспериментах мощности ВЧ-разряда. Возможность использования такого приближения обоснована в работе [21].

Рекомбинацией атомов кислорода и релаксацией СК на поверхности электродов пренебрегалось. Для учета гибели атомов йода в основном и возбужденном состояниях на стенках канала в кинетические уравнения добавлены члены:

$$\frac{dN_I}{dt} = \dots - \frac{N_I}{\tau_{diff} + \tau_{wall}},\tag{1}$$

$$\frac{dN_{I^*}}{dt} = \dots - \frac{N_{I^*}}{\tau_{diff} + \tau_{wall}},\tag{2}$$

где N_I и N_{I^*} — плотности концентраций атомов йода в основном и возбужденном состояниях; $\tau_{diff} = \frac{\Lambda^2}{D}$ и $\tau_{wall} = \frac{4V}{S} \frac{1}{\gamma \langle u_{th} \rangle}$ где V и S — объем и площадь поверхности канала, Λ — характерная диффузионная длина, γ — вероятность гетерогенной рекомбинации атомов йода, $\langle u_{th} \rangle$ — средняя тепловая скорость атомов йода, D — коэффициент диффузии атомов йода в газовой смеси. Счита-

лось, что коэффициент диффузии и вероятность гетерогенной рекомбинации для атомов йода в основном и возбужденном состоянии одинаковы.

В случае узкого щелевидного канала $\tau_{diff} = \frac{d^2}{\pi^2 D}$ и

 $\tau_{wall} = \frac{2d}{\gamma \langle u_{th} \rangle}$, где d – высота щели. В табл. 2 приве-

дены значения τ_{diff} и τ_{wall} для различных величин ү для давления 16.5 Торр и d = 0.3 см, $\tau_{diff} = 4.9 \times 10^{-4}$ с.

Для расчета интенсивности лазерного излучения на переходе $I^*({}^2P_{1/2}) \rightarrow I({}^2P_{3/2})$ использова-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 11 2020

Таблица 2. Зависимость частоты ухода возбужденных и невозбужденных атомов йода на стенки разрядной камеры и канала от вероятности гетерогенной рекомбинации

γ	τ _{wall} , c	$\frac{1}{\tau_{diff} + \tau_{wall}}, c^{-1}$
1	2.7×10^{-5}	1.9×10^{3}
0.1	2.7×10^{-4}	1.3×10^{3}
0.03	9.0×10^{-4}	7.1×10^{2}
0.01	2.7×10^{-3}	3.1×10^{2}
0.001	2.7×10^{-2}	3.6×10^{1}

лись следующие уравнения баланса для фотонов в резонаторе:

$$\frac{dI_L}{dt} = c(g - \Gamma)I_L + \frac{L_R \Omega \hbar \omega}{4\pi} N_{I^*} A, \qquad (3)$$

где I_L – интенсивность лазерного излучения; g – коэффициент усиления активной среды; c – скорость света; L_R – длина резонатора; Ω – апертура выходного зеркала; Γ – потери резонатора; A = 5 c^{-1} – коэффициент Эйнштейна на рассматриваемом переходе [22]; $\hbar \omega$ – величина кванта этого перехода.

Коэффициент усиления на этом переходе рассчитывался по формуле

$$g = \sigma \left(N_{I^*} - \frac{N_I}{2} \right), \tag{4}$$

где $\sigma = 7.58 \times 10^{-18} \text{ см}^2$ [18].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

3.1. Одновременная наработка СК и атомов йода в зоне разряда в трёхкомпонентной смеси

В первой серии расчетно-теоретического исследования был проведен анализ возможности получения генерации в дозвуковом потоке газовой смеси CF₃I: O₂: Не (или CH₃I: O₂: Не) при ее возбуждении ВЧ-разрядом при температурах стенок канала 300 и 100 К. Рассматривалась газовая смесь O₂: He = 1: 1 с добавлением йодида от 0.05 до 0.25%, давление газовой смеси полагалось — 15 Торр.

Сразу следует оговориться, что в реальных условиях имеющегося экспериментального стенда поддержание температуры стенок всего канала на уровне 100 К практически нереализуемо. Поэтому расчеты для криогенной температуры стенок всего канала носят оценочный характер и предназначены для выяснения направлений дальнейшей модификации экспериментальной установки.



Рис. 1. Расчетная динамика концентраций атомарных компонентов йода при возбуждении смесей CF₃I : : He = 1 : 20 (а) и CH₃I : He = 1 : 20 (б). 1 - [I]; $2 - [I^*]$; $3 - [I] + [I^*]$; $4 - \Delta N = [I]/2 - [I^*]$. P = 7.5 Topp, $P_{BY} = 500$ Вт.

3.1.1. Предварительные расчеты наработки атомарного йода. При расчетах в модель были добавлены процессы рекомбинации атомов йода в объеме и на стенках электродов:

$$I + I + He \Rightarrow I_2 + He, \quad 3.80 \times 10^{-33} \text{ cm}^6/\text{c} [23], (5)$$

 $I + I + I_2 \Rightarrow I_2 + I_2, \quad 9.98 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{c [23]}, \ \ (6)$

$$I + I_{Wall} \Rightarrow I_2,$$
 см. табл. 1, (7)

На рис. 1 представлена расчетная динамика концентрации возбужденных и невозбужденных атомов йода при прохождении зоны ВЧ-возбуждения бескислородной смеси (CF₃I или CH₃I) : : Не = 1 : 20. В зоне разряда основным каналом наработки атомарного йода является процесс диссоциации CF₃I (или CH₃I) электронами плазмы. После выхода газовой смеси из зоны разряда (момент времени ~2 мс для скорости потока 15 м/с) концентрация атомарного йода с использованием в качестве донора CF₃I меняется незначительно (рис. 1а). Для бескислородной газовой смеси CH₃I : Не, константа тушения возбужденного атомарного йода исходным йодидом CH₃I $(\sim 2.8 \times 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с})$ существенно больше, чем в аналогичной ситуации для смеси с CF₃I (~3.5 × $\times 10^{-17}$ см³/с) [24], и концентрация компоненты I* быстро падает до нуля (рис. 1б).

Таким образом, предварительные расчеты динамики концентраций продуктов диссоциации йодидов при прохождении зоны ВЧ-возбуждения смеси (CF₃I или CH₃I) : He = 1 : 20 показали, что



Рис. 2. Динамика КУСС. Сплошная линия – температура стенок по всей длине канала 100 К, пунктирная – 300 К. О₂ : He = 1 : 1, концентрация CF₃I – 0.25% от полного давления смеси, $P_{BY} = 500$ Вт, P = 15 Торр.

использование CF_3I в качестве донора атомарного йода в этом случае существенно выгоднее (см. рис. 1). По этой причине большинство дальнейших расчетов (и экспериментов) проводилось для йодида CF_3I .

3.1.2. Коэффициент усиления слабого сигнала и мощность лазерного излучения при одновременной наработке СК и атомов йода. Для условий, близких к экспериментальным из [14], проведено моделирование различных параметров потока газоразрядной плазмы. Высота щелевого канала на всем его протяжении в расчетах была равна 3 мм. Считалось, что скорость потока газа постоянна и составляет 30 м/с (время пролета газа через зону ВЧ-разряда 1 мс). Мощность ВЧ-разряда в расчетах принималась $P_{\rm BY} \sim 500$ Вт (~21 Вт/см³) – как и в реальных экспериментах. Полагалось, что все компоненты газовой смеси (O₂, He, CF₃I) поступают в газовый тракт и проходят зону возбуждения одновременно.

Динамика коэффициента усиления слабого сигнала (КУСС) показана на рис. 2, где сплошная линия соответствует температуре стенок по всей длине канала включая зону возбуждения ~100 К, а пунктирная ~300 К. Видно, что при выбранном значении мощности ВЧ-разряда КУСС достигает положительного значения лишь при криогенном охлаждении стенок канала по всей его длине.

На рис. 3 представлена динамика КУСС для различных начальных концентраций йодида. Максимальный КУСС – 1.3×10^{-2} см⁻¹ достигается на временах ~4.4 мс при концентрации CF₃I 0.25%. Заметим, что разряд заканчивается на вре-



Рис. 3. Динамика КУСС для различных начальных концентраций йодида. Температура стенок по всей длине канала 100 К. Концентрация CF_3I (в % от полного давления смеси): I - 0.05; 2 - 0.07; 3 - 0.1; 4 - 0.25. Остальные условия соответствуют рис. 2.

мени 1 мс, а максимум коэффициента усиления достигается в послесвечении, когда газ достаточно охлаждается через стенки щелевого канала.

На рис. 4 приведена расчетная динамика мощности генерации кислород-йодного лазера для различных начальных концентраций йодида. При расчетах длина активной среды полагалась 28 см (соответствует параметру экспериментальной установки [14]), прозрачность лазерного резонатора была принята на уровне ~25% (потери лазерного резонатора ~0.005 см⁻¹). Значения КПД для различных начальных концентраций йодида приведены в табл. 3. КПД определялся как отношение мощности лазерной генерации к мощности, вложенной в ВЧ-разряде.

В отличие от максимума усиления, который наблюдается при начальной концентрации йодида 0.25%, максимум генерации наблюдается при меньшей концентрации йодида (0.07%). Это объясняется тем, что энергия излучения определяется энергией, запасенной в СК. При концентрации йодида 0.25% генерация возникает в момент времени 2.8 мс, когда температура газа 163 К. При уменьшении концентрации йодида до 0.07% генерация возникает позже, при 4 мс, когда газ уже охладился до 118 К и пороговая концентрация СК существенно понизилась. При дальнейшем уменьшении начальной концентрации йодида коэффициент усиления падает из-за меньшей концентрации образующегося в разряде атомарного йода.



Рис. 4. Динамика мощности генерации для различных начальных концентраций йодида. Потери резонатора 0.005 см⁻¹. Остальные условия соответствуют рис. 3.

Следует отметить, что обеспечить криогенное охлаждение всего газового тракта в рамках имеющегося экспериментального стенда, к сожалению, не представляется возможным. Кроме этого, несмотря на то, что такой режим формирования активной среды, когда все компоненты газовой смеси одновременно проходят зону ВЧвозбуждения, технологически проще (йодный инжектор вообще не нужен) и теория предсказывает в этих условиях возможность достижения положительного усиления, предварительные эксперименты показали, что при прохождении йодид-содержащей газовой смеси через зону ВЧвозбуждения, при мощностях, вкладываемых в разряд, ~500-700 Вт (оптимальных для достижения максимума выхода СК [14]), наблюдалось интенсивное оседание молекулярного йода на рабочих поверхностях ВЧ-электродов, которое приводило к сильным изменениям параметров ВЧразряда. Более того, оптическая диагностика активной среды показала, что при повторном запуске установки в режиме, когда по газовому тракту движется смесь только О₂: Не (без йодида), происходит повторное выбивание атомов йода с поверхности электродов в газовый поток, и нет возможности учесть этот процесс ни в экспериментальных измерениях, ни в расчетной модели.

Таблица 3. Зависимость расчетного КПД от начальной концентрации йодида

CF ₃ I, %	0.25	0.1	0.07	0.05
КПД, %	0.08	1.44	2.0	0.4



Рис. 5. Расчетно-экспериментальная геометрия. *1* – зона ВЧ-возбуждения, *2* – диэлектрический щелевой канал, *3* – дополнительный криогенный теплообменник, *4* – зона оптической диагностики.

3.2. Наработка СК в разряде и подмешивание йодида ниже по потоку газа

По приведенным выше причинам следующие серии расчетов были выполнены для варианта с инжектированием йодид-содержащего газового компонента в возбужденную смесь O_2 : Не практически сразу за зоной ВЧ-разряда ниже по потоку газа. В этой схеме образования СК и атомарного кислорода происходит в ВЧ-разряде. Далее, после подмешивания смеси иодида и гелием, в результате химических реакций с участием атомарного кислорода, происходит образование атомарного йода.

3.2.1. Коэффициент усиления слабого сигнала при наработке СК в разряде с дальнейшим подмешиванием йодида. Расчетные параметры газового потока и ВЧ-возбуждения максимально соответствовали реализуемым на экспериментальном стенде условиям. Размер ВЧ-электродов вдоль потока составлял 30 мм, что при скорости потока $V = V_{\rm max}/2 = 15$ м/с соответствовало времени пролета 2 мс. Соотношение парциальных давлений O₂: Не в газовом тракте составляло 1:1 при полном давлении 15 Торр. Инжектор йодсодержащего компонента (CF₃I: Не при парциальном давлении 3.75 Торр) располагался в 15 мм от ВЧ-электродов ниже по потоку газа (пролетное время от зоны ВЧ-возбуждения, как и в эксперименте, бралось ~1 мс). Мощность непрерывного ВЧ-разряда варьировалась в интервале 100-1000 Вт. В отличие от первой серии расчетов, выполненных для "идеальных" условий криогенного охлаждения стенок газового тракта по всей его длине, здесь рассматривались более реалистичные параметры газового потока: а) температуры стенок и газа фиксированы и составляют 300 К; б) в одну из стенок газового тракта (5 мм после инжектора) встроен дополнительный криогенный теплообменник (расчетная геометрия представлена на рис. 5) и в расчете учитывается теплообмен со стенками газового тракта, находящимися при различных температурах. Эта расчетная геометрия была наиболее близка к реализуемым в экспериментах условиям.



Рис. 6. Зависимость поглощения *K* на переходе $I({}^{2}P_{3/2}) \rightarrow I^{*}({}^{2}P_{1/2})$ от вкладываемой в ВЧ-разряд мощности для различных значений ү. $1 - \gamma = 1; 2 - 0.3; 3 - 0.1; 4 - 0.01$. Смесь O_2 : He = 1 : 1 (P = 15 Topp) – через ВЧ-разряд, смесь CF₃I : He = 1 : 250 (P = 3.7 Topp) – через инжектор. V = 15 м/с, $T_{wall} = 300$ К (везде), зона наблюдения – 4-я мс. Сплошные линии – расчет, маркеры – эксперимент.

Для сопоставления расчетных данных с экспериментально измеряемыми величинами далее в числе прочих параметров рассчитывалось поглощение на переходе $I({}^{2}P_{3/2}) \rightarrow I^{*}({}^{2}P_{1/2})$:

$$K = (1 - e^{2gL}) \cdot 100\%, \tag{8}$$

где L = 28 см - длина активной среды поперек газового потока. Множитель 2 в показателе степениэкспоненты соответствует двойному проходупробного луча по активной среде, как в эксперименте.

В работе [25] была проведена оценка верхней границы величины вероятности рекомбинации атомов йода у на поверхности никеля, нержавеющей стали, плексигласа и тефлона. Величина вероятности гетерогенной рекомбинации оказалась меньше чем, 10^{-5} . В настоящей работе было проведено моделирование с различными значениями величины γ. Наилучшее согласие расчетных и измеренных коэффициентов поглощения на длине волны 1.315 мкм в зависимости от мощности ВЧ-разряда достигается при $\gamma \sim 10^{-1}$ (рис. 6). Расхождение расчета и эксперимента при энерговкладах Р_{вч} ниже 300 Вт связано, вероятно, с потерей устойчивости разряда в эксперименте (уменьшается площадь заполнения электродной системы разрядной плазмой).

Такое сильное отличие в определении параметра γ может объясняться, тем, что в нашем случае диссоциация йодида происходит не электро-



Рис. 7. Динамика концентраций ряда компонент плазмы: $[O_2(a^{1}\Delta_g)] - I$, [O] - 2, $[CF_3I] - 3$, [I] - 4, $[I^*] - 5$ и [IO] - 6. Смесь O_2 : He = 1 : 1 (P = 15 Topp) – через BЧ-разряд (P_{Bq} = 880 BT), смесь CF_3I : He = 1 : 50 (P = 3.7 Topp) – через инжектор (в момент времени ~3.1 мс). V = 15 м/с, γ = 0.1. На врезке – то же самое с увеличением разрешения по оси времени.

нами плазмы, как в [25], а за счет цепочки химических реакций:

$$RI + O \rightarrow IO + R,$$
 (9)

$$IO + O \rightarrow I + O_2$$
, где $R = CH_3$ или CF_3 . (10)

Эти объемные реакции, по-видимому, могут происходить и на поверхности канала, а их константы могут быть значительно больше, чем для атомарного йода. Заметим, что на диэлектрической поверхности щелевого канала вниз по потоку могут образовываться фтор-(водород-)углеродные пленки, на поверхности которых могут протекать не только реакции, подобные (9) и (10), но реакции с атомарным и синглетным кислородом. Для проверки этого требуются дополнительные исследования, выходящие за рамки данной работы.

На рис. 7 показана динамика наиболее важных компонент $O_2(a^1\Delta_g)$, O, CF₃I, IO, I и I* при мощности разряда 888 Вт. В разряде нарабатывается $O_2(a^1\Delta_g)$ и атомарный кислород. При подмешивании молекул CF₃I начинается цепочка быстрых реакций (9) и (10), в результате которых образуются атомы I. Так как концентрация молекул CF₃I заметно меньше концентрации атомов O, то концентрация иодида падает быстро — в два раза за 5 мкс (вставка на рис. 7). Возбуждение с син-



Рис. 8. Динамика температуры газового потока для различных значений $P_{\text{B}\text{H}}$: 1 - 135 Br; 2 - 257 Br; 3 - 484 Br; 4 - 888 Br. Смесь O_2 : He = 1 : 1, P = 13 Торр (через ВЧ-разряд), CF₃I : He = 1 : 250, P = 3.4 Торр (через инжектор), $T_{wall} = 300 \text{ K}$ (везде), V = 15 м/c, $\gamma = 0.1$.

глетного кислорода передается молекулам йода и медленно релаксирует.

Расчеты выполнялись для различных ВЧ-мощностей, вкладываемых в газовый поток O_2 : Не (от 200 до 900 Вт) и для различных концентраций йодида в инжектируемом компоненте CF_3I : Не (от 1: 50 до 1: 400). На рис. 8 представлена зависимость температуры газового потока от пролетного времени для температуры стенок газового канала 300 К на всем его протяжении при различных мощностях ВЧ-возбуждения. Графики этих зависимостей для различных соотношений CF_3I : Не практически совпадают.

Из рис. 8 видно, что температура газового потока непосредственно за инжектором (момент времени 0.003 с) повышается незначительно (на 50–60 K) по отношению к начальной температуре газа (300 K) даже при максимальных мощностях ВЧ-возбуждения благодаря эффективному диффузионному теплообмену со стенками газового тракта.

Для условий рис. 8 на рис. 9 представлены расчетные зависимости поглощения K от пролетного времени для различных соотношений CF_3I : Не в инжектируемом компоненте (температура стенок канала равна 300 K по всей его длине).

Рисунок 9 показывает, что в расчетных условиях даже без дополнительного охлаждения (криогенный теплообменник (см. поз. 3 на рис. 5) не задействован) при энерговкладах в ВЧ-разряд порядка 900 Вт возможно появление отрицательного поглощения (усиления) на переходе $I(^2P_{3/2}) \rightarrow I^*(^2P_{1/2}).$



Рис. 9. Зависимости поглощения *K* от пролетного времени для различных мощностей ВЧ-разряда (Обозначения кривых соответствуют рис. 8). CF₃I : He = 1 : 50 (a), 1 : 250 (б), 1 : 400 (в) (P = 3.4 Торр через инжектор). Смесь O₂ : He = = 1 : 1 (P = 13 Торр через ВЧ-разряд), T_{wall} = 300 K (везде), V = 15 м/с, γ = 0.1.



Рис. 10. Зависимости температуры газа от пролетного времени для различных концентраций инжектируемого йодида CF_3I : He = 1 : 50 (a), 1 : 250 (b), 1 : 400 (b). T_{wall} = 300 K везде, кроме криогенного теплообменника, где T = 100 K. Остальные условия и обозначения соответствуют рис. 9.



Рис. 11. Зависимости поглощения *K* на переходе $I({}^{2}P_{3/2}) \rightarrow I^{*}({}^{2}P_{1/2})$ от пролетного времени для различных концентраций инжектируемого йодида CF₃I : He = 1 : 50 (a), 1 : 250 (б), 1 : 400 (в). Остальные условия и обозначения соответствуют рис. 10.

На следующем этапе расчетов температура дополнительного криогенного теплообменника задавалась равной 100 К. На рис. 10 и 11 показаны расчетные зависимости температуры газа и поглощения *К* на переходе $I({}^{2}P_{3/2}) \rightarrow I^{*}({}^{2}P_{1/2})$, соответственно, от пролетного времени для различных мощностей ВЧ-разряда и концентраций инжектируемого йодида. Из рис. 10а—в видно, что температура газовой смеси к концу ее прохождения криогенного теплообменника (момент времени ~5 мс) при средних мощностях ВЧ-разряда (300—500 Вт) не превышает ~200—230 К. Даже при максимальной рассмотренной ВЧ-мощности (~900 Вт) в этой точке газового тракта температура не поднимается выше 250—270 К при начальной ее величине

300 К. Есть небольшие различия в динамике температуры для разных концентраций йодида в инжектируемом компоненте во временном интервале от инжектора до начала теплообменника (3– 3.3 мс). Эти различия достигают ~50 К в момент инжекции и сглаживаются к моменту выхода газа из зоны криогенного теплообменника. Рост температуры связан с тем, что в результате цепочки реакций (9)–(10) происходит тепловыделение, уменьшающееся с уменьшением концентрации йодида.

Анализ рис. 11а-в и рис. 9а-в показывает, что:

1) при высокой начальной концентрации йодида (CF₃I : He = 1 : 50) в инжектируемом компоненте (рис. 11а) количество нарабатываемого в ВЧ-разряде атомарного кислорода достаточно для диссоциации большого количества йодида, однако, синглетного кислорода не хватает для перевода значительного количества образовавшегося атомарного йода в возбужденное состояние;

2) с увеличением вкладываемой в ВЧ-разряд мощности баланс нарабатываемого атомарного и синглетного кислорода смещается в сторону последнего и относительное количество возбужденного атомарного йода увеличивается, что приводит к уменьшению поглощения активной среды;

3) при малых начальных концентрациях йодида (CF₃I : He = 1 : 250–1 : 400) в инжектируемом компоненте (рис. 116, в происходит почти полная его диссоциация, и атомарного йода получается существенно меньше, чем в случае более высокой концентрации CF₃I;

4) однако, разность концентраций атомарного невозбужденного и возбужденного йода (с учетом вырождения $\Delta N = [I]/2 - [I^*]$), определяющая коэффициент поглощения (усиления), становится меньше;

5) из рис. 11а-в видно, что при максимальных значениях вкладываемой в ВЧ-разряд мощности (~900 Вт) практически во всех случаях в активной среде на переходе $I({}^{2}P_{3/2}) \rightarrow I^{*}({}^{2}P_{1/2})$ наблюдается отрицательное поглощение (усиление);

6) по сравнению с неохлаждаемым газовым трактом (рис. 9), дополнительный криогенный теплообменник позволяет в некоторых ситуациях увеличить величину достижимого усиления как минимум вдвое и удлинить время существования заметного положительного усиления (сравни рис. 9а-в и рис. 11а-в).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование показало, что предложенная схема лазера (небольшое расстояние между электродами и узкий канал) позволяет обеспечить эффективное охлаждение активной среды. Сопоставление с экспериментальными результатами

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 11 2020

по поглощению на длине волны 1.315 мкм показало наличие процессов гетерогенной гибели атомов йода (небольшое расстояние между электродами, к сожалению, также приводит к увеличению скорости гетерогенной гибели атомов йода) на электродах и стенках канала, что ухудшает лазерные характеристики. Отметим, что необычность предложенного экспериментального подхода к реализации нехимического газопроточного ЭКИЛ с возбуждением кислородсодержащей смеси в поперечном щелевом ВЧ-разряде и подмешиванием к ней йодид-содержащей компоненты ниже по потоку газа ставит дополнительные задачи при моделировании, несмотря на то, что в целом теоретические представления о процессах, происходящих в активной среде ЭКИЛ. достаточно развиты. Требуется совместное решение уравнений газодинамики, электроразрядной плазмохимии, гомогенной и гетерогенной химии, ИТ.Л.

С одной стороны, расчеты, по-видимому, дают несколько излишне оптимистические прогнозы, поскольку точный учет реальных экспериментальных условий по-прежнему сложно реализовать при моделировании. Так, например, процесс смешения газовых компонентов при инжектировании йодида рассматривается как мгновенный и однородный, в то время как в экспериментах наблюдается довольно протяженный участок газового потока со струйной структурой. Также, дальнейшей верификации требует учет взаимодействия всех компонентов газового потока со стенками газового тракта, поскольку большинство констант таких гетерогенных процессов неизвестны с достаточной достоверностью или отсутствуют в литературе.

С другой стороны, проведенные в рамках настоящего исследования серии расчетов и последовательная верификация модели с учетом условий реальных экспериментов показали, что предложенный подход к реализации ЭКИЛ вполне оправдан и может, в конечном итоге, привести к созданию газопроточного кислород-йодного лазера с возбуждением поперечным щелевым ВЧ-разрядом.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., Zimmerman J.W., Laystrom J.K., Woodard B.S., Richardson N., Kittell K., Kushner M.J., Solomon W.C. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 1320. https://doi.org/10.1063/1.1784519
- 2. Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., Zimmerman J.W., Laystrom J.K., Woodard B.S., Benavides G.F., Kittel K., Stafford D.S., Kushner M.J., Solomon W.C. //

Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 111104. https://doi.org/10.1063/1.1883317

- Benavides G.F., Zimmerman J.W., Woodard B.S., Carroll D.L., Verdeyen J.T., Field T.H., Palla A.D., Solomon W.C. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 041116. https://doi.org/10.1063/1.2839323
- Carroll D.L., Verdeyen J.T., Benavides G.F., Palla A.D., Field T.H., Zimmerman J.W., Woodard B.S., Solomon W.C. // Proc. 39th Plasmadynamics and Lasers Conference, Seattle, 2008. AIAA Paper 2008-4008.
- Zimmerman J.W., Woodard B.S., Benavides G.F., Carroll D.L., Verdeyen J.T., Palla A.D., Solomon W.C. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 241115. https://doi.org/10.1063/1.2948860
- Zimmerman J.W., Woodard B.S., Verdeyen J.T., Carroll D.L., Field T.H., Benavides G.F., Solomon W.C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 195209. https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/19/195209
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Mankelevich Yu.A., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T., Vasilieva A.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 5183. https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/24/014
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T., Vasilieva A.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 6571. https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/21/017
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T., Vasilieva A.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 172008. https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/17/172008
- Benavides G.F., Zimmerman J.W., Woodard B.S., Carroll D.L., Verdeyen J.T., Field T.H., Palla A.D., Solomon W.C. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 041116. https://doi.org/10.1063/1.2839323
- Carroll D.L., Benavides G.F., Zimmerman J.W., Woodard B.S., Palla A.D., Day M.T., Verdeyen J.T., Solomon W.C. // Proc. High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications V, San Francisco, 2011 / Ed. by S.J. Davis, M.C. Heaven, J.T. Schriempf // Proc. SPIE. 2011. V. 7915. P. 791502. https://doi.org/10.1117/12.879336.
- Carroll D.L., Benavides G.F., Zimmerman J.W., Woodard B.S., Palla A.D., Verdeyen J.T., Solomon W.C. // Proc. High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications VI, San Francisco, 2012 / Ed. by S.J. Davis, M.C. Heaven, J.T. Schriempf // Proc.

SPIE. 2012. V. 8238. P. 823803. https://doi.org/10.1117/12.912893.

- Ионин А.А., Климачев Ю.М., Кочетов И.В., Напартович А.П., Рулев О.А., Селезнев Л.В., Синицын Д.В. Препринт ФИАН им. П.Н. Лебедева № 14. М.: ФИАН, 2009.
- 14. Вагин Н.П., Ионин А.А., Кочетов И.В., Напартович А.П., Синицын Д.В., Юрышев Н.Н. // Физика плазмы. 2017. Т. 43(3). С. 267. https://doi.org/10.7868/S0367292117030155
- Ionin A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Yuryshev N.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R25. https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/2/R01
- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Rulev O.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Vagin N.P., Yuryshev N.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 015201. https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/1/015201
- Kochetov I.V., Napartovich A.P., Vagin N.P., Yuryshev N.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 055201. https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/055201
- Vagin N.P., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Yuryshev N.N. // Quuantum Electron. 2013. V. 43. P. 610– 615.
 - https://doi.org/10.1070/QE2013v043n07ABEH015078
- 19. Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., Woodard B.S., Skorski L.W., Zimmerman J.W., Solomon W.C. // IEEE J. Quantum Electronics. 2003. V. 39. № 9. P. 1150. https://doi.org/10.1109/JQE.2003.816091
- Chukalovsky A.A., Rakhimova T.V., Klopovsky K.S., Mankelevich Y.A., Proshina O.V. // Plasma Physics Reports. 2011. V. 37. P. 251–262. https://doi.org/10.1134/S1063780X11020024
- Mikheyev P.A., Ufimtsev N.I., Demyanov A.V., Kochetov I.V., Azyazov V.N., Napartovich A.P. // Plasma Sources Sci. Technol. 2010. V. 19. P. 025017. https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/2/025017
- 22. *Бредерлов Г., Филл Э., Вите К.* Мощный йодный лазер. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 23. *Baulch D.L., Duxbury J.M., Grant S.J., Montague D.C.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1981. V. 10. P. 1.
- Gu Z.N., Young A.T., Houston P.L. // International Journal of Chemical Kinetics, 1984. V. 16. P. 669–677. https://doi.org/10.1002/kin.550160605
- 25. Торбин А.П., Михеев П.А., Азязов В.Н. // Физика и электроника, 2013. Т. 15. С. 133–135.