УДК 533.9, 531.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ КИСЛОРОДНОГО И ЙОДСОДЕРЖАЩЕГО ПОТОКОВ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОМ КИСЛОРОД-ЙОДНОМ ЛАЗЕРЕ

А. А. Чукаловский, К. С. Клоповский, Т. В. Рахимова

(НИИЯФ; кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники)

E-mail: tinacious@rambler.ru

Проведен параметрический анализ процентного содержания атомарного кислорода в потоке $O_2:O_2(^1\Delta_g):O$, степени предварительной диссоциации и концентрации молекулярного йода в смеси $I_2:He$ на температурный режим и формирование инверсной населенности на лазерном переходе атомов йода при повышенных давлениях P = 5-10 торр в модельной системе с осесимметричным впрыском смеси $I_2:He$ в возбужденный в ЭРГСК поток кислорода.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования по созданию эффективных электроразрядных генераторов синглетного кислорода^{*)} (ЭРГСК), работающих при повышенных (более 5 торр) давлениях кислорода. Интерес к исследованиям в этом направлении стимулирован тем, что в работе [1] впервые была показана возможность получения непрерывной генерации кислород-йодного лазера (КИЛ), возбуждаемого ЭРГСК, при давлении кислорода около 2 торр и степени возбуждения кислородного потока $Y = [O_2({}^1\Delta_g)] / {[O_2(X^3\Sigma_g)] + [O_2({}^1\Delta_g)]} \approx 16 \div 18\%.$

Использование непрерывного поперечного ВЧ разряда (81 МГц) [2] в качестве ЭРГСК позволило получить рекордные результаты по наработке СК в чистом кислороде: У около 21, 17 и 13% при давлениях кислорода 10, 20 и 30 торр соответственно. Однако, несмотря на увеличение эффективности образования СК с увеличением частоты, наработка СК в самостоятельном разряде сопровождается диссоциацией молекулярного кислорода. Было установлено [3, 4], что повышение вкладываемой в ВЧ разряд мощности приводит к насыщению концентрации СК из-за тушения СК атомарным кислородом $O({}^{3}P)$. Теоретические оценки и модельные расчеты [3] свидетельствуют о том, что существует принципиальное ограничение на степень возбуждения СК около 25% в электрических разрядах. В экспериментах показано, что за счет связывания $O({}^{3}P)$ в гетерогенных [2, 5] и объемных [1] процессах можно снизить тушение $O_2({}^1\Delta_g)$ атомарным кислородом.

Следует отметить, что эффективность использования ЭРГСК в КИЛ определяется возможностью создания в кислородсодержащем потоке степени возбуждения Y, превосходящей пороговое значение содержания Y_{th} [6, 7] для возбуждения генерации

при наименьших энергозатратах. Сопоставление рекордных результатов [2] с пороговыми значениями Y_{th} показало, что инвертирование перехода ${}^{2}P_{1/2} \rightarrow {}^{2}P_{3/2}$ в атоме йода возможно при температурах газа T менее 440, 340 и 260 К при давлении P = 10, 20 и 30 торр соответственно. Необходимо подчеркнуть, что газовая температура среды при смешении молекулярного йода I₂ с потоком возбужденного ЭРГСК кислорода определяется энерговыделением в реакциях разложения йода [6] и тушения СК с участием O(³P) [2, 5]. По этой причине актуальным является детальное изучение кинетики процессов с участием атомарного кислорода при повышенных давлениях возбужденного потока кислорода и оптимизация состава и параметров йодсодержащего газового потока в зоне смешения КИЛ.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования кинетики процессов при подмешивании молекулярного йода в возбужденный в ЭРГСК кислородный поток. Анализ кинетических процессов проведен для модельного устройства, на котором удобно экспериментально исследовать детали кинетики формирования инверсии в атоме йода [6]. Схема модельного устройства представлена на рис. 1. Через кварцевую трубку радиуса *R* прокачивается дозвуковой возбужденный в ЭРГСК поток кислорода. В этот поток через одиночный инжектор осесимметрично впрыскивается смесь



Рис. 1. Схема модельного устройства

^{*)} Синглетным кислородом (СК) принято называть молекулы кислорода в нижнем электронном состоянии ${}^1\Delta_g$.

молекулярного йода с гелием. Анализ проводится при следующих предположениях. Течение газа полагается установившимся, скорость прокачки газа постоянной. Инжекция смеси І2:Не осуществляется через отверстие радиуса R_0 , при давлении P_0 . На первой стадии впрыскиваемая смесь адиабатически расширяется до давления Р, равного давлению кислорода, температуры T_{inj} и радиуса инжекции $R_{\rm ini} > R_0$, на второй — происходит перемешивание потоков за счет радиального тепло- и массопереноса. Математическая модель, которая описывает такое диффузионное перемешивание потоков при постоянном давлении, включает в себя уравнение теплопроводности и систему уравнений непрерывности для компонент смеси: I_2 , I_2 (vib), $I_2(B^3\Pi)$, I*, I, IO, $O_2({}^1\Delta_g)$, $O_2(b{}^1\Sigma_g^+)$, O_2 , $O({}^3P)$, O_3 в цилиндрической симметрии:

$$\begin{aligned} v_{f} \frac{\partial}{\partial z} n_{i} &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-D_{i} \frac{\partial n_{i}}{\partial r} - D_{i}^{T} \frac{n_{i}}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \sum_{i} R_{i}, \\ v_{f} \frac{\partial T}{\partial z} &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{\lambda}{\sum_{i} n_{i} C_{p_{i}}} \frac{\partial T}{\partial r} - \sum_{i} \left(D_{i}^{T} \frac{T}{n_{i}} \frac{\partial n_{i}}{\partial r} \right) \right) = \\ &= \frac{\sum_{i} R_{i} \Delta_{i}}{\sum_{i} n_{i} C_{p_{i}}} \end{aligned}$$

с граничными условиями

$$\begin{split} \left(D_i \frac{\partial n_i}{\partial r} \right)_{r=R} &= -\frac{\gamma_i v_T n_i}{4}, \quad T_{r=R} = T_{\rm st}, \\ (n_i)_{z=0} &= \begin{cases} \eta_i \frac{P}{k_b T_{\rm inj}}, & r < R_{\rm inj} \\ \chi_i \frac{P}{k_b T_{\rm ox}}, & R_{\rm inj} < r < R \end{cases}, \\ T_{z=0} &= \begin{cases} T_{\rm inj}, & r < R_{\rm inj} \\ T_{\rm ox}, & R_{\rm inj} < r < R \end{cases}, \end{split}$$

где n_i — концентрации компонент смеси; T температура газа; С_{рі} — изобарная теплоемкость компонент газовой смеси; R_i и Δ_i — скорости и дефекты химических реакций; v_f — эффективная скорость потока газа; γ_i — вероятность поверхностной реакции с участием *i*-й компоненты смеси на стенке трубки, *v*_T — тепловая скорость частиц; R — радиус кварцевой трубки (2.5 см), $T_{\rm wall}$ температура стенки трубки; P, $T_{\rm ox}$ — давление и температура потока кислорода; $T_{\rm inj}$ и $R_{\rm inj}$ температура и радиус потока І₂:Не после адиабатического расширения; k_b – постоянная Больцмана; χ_i и η_i — мольная доля компонент в потоках кислорода и I₂:Не соответственно, *z* – транспортная координата. Коэффициенты переноса: D_i — диффузии, D_i^T — термодиффузии, λ — теплопроводности рассчитывались в соответствии с процедурой, изложенной в работе [8] с использованием коэффициентов Леннарда-Джонса для каждого из компонент газа из работы [9].

Коэффициент усиления на сверхтонком переходе атома йода ($F = 3 \rightarrow F = 4$) рассчитывался с помощью известного соотношения для коэффициента усиления (поглощения) слабого сигнала — G_{34} (см., напр., [7]):

$$G_{34} = \frac{7}{12} \left(\frac{(\lambda_{34})^2 A_{34}}{8\pi} \right) \times \\ \times \left([I^*(^2P_{1/2})] - \frac{1}{2} [I(^2P_{3/2})] \right) \varphi(\omega_{34}), \quad (1)$$

где λ_{34} , ω_{34} , A_{34} — длина волны, частота и коэффициент Эйнштейна лазерного перехода, $\phi(\omega_{34})$ функция Фойгта.

В модель включена полная система химических реакций для КИЛ с ЭРГСК [6], в том числе и новые реакции тушения I* и $O_2(^1\Delta_g)$ [1, 5]

$$I^* + O \xrightarrow{k_1} I + O + [0.94 \ \Im B],$$

$$k_1 = 3.5 \cdot 10^{-12} \ \mathrm{cm}^3 \mathrm{c}^{-1},$$
(R1)

$$O_2(^1\Delta_g) + O + O_2 \xrightarrow{k_2} O_2 + O + O_2 + [0.98 \ \text{sB}],$$

 $k_2 = 2.5 \cdot 10^{-32} \ \text{cm}^6 \text{c}^{-1}.$ (R2)

Разработанная модель позволяет получать пространственное (r, z) распределение продуктов реакций, температуры среды и коэффициента усиления G. Следует отметить, что в данной модели не рассчитывается поле скоростей при смешивании потоков. Движение смеси вдоль оси z задается с помощью эффективной скорости v_f . Эффективный радиус R_{inj} и температура T_{inj} инжектируемого потока являются параметрами задачи. По этой причине модель является упрощенной квазидвумерной моделью перемешивания двух осесимметричных потоков.

Для тестирования было проведено сравнение результатов, полученных с помощью представленной модели, с экспериментальными результатами измерения G и численными расчетами по полной газодинамической модели BLAZE II [6] для давления кислорода 1.94 торр. Сравнение результатов показало, что при разумном выборе параметров задачи данная модель достаточно неплохо передает основные особенности перемешивания дозвуковых потоков кислорода и смеси I₂:Не. Поэтому с ее помощью можно с минимальными расчетными затратами исследовать кинетику процессов и их влияние на коэффициент усиления и температурный режим с учетом радиальных неоднородностей распределения температуры и концентраций газов.

В настоящей работе проведено численное исследование кинетических процессов для модельного устройства (рис. 1) при давлении кислорода 5 и 10 торр. Варьировалась концентрация атомов O(³*P*), концентрация и степень диссоциации молекулярного йода. Расчеты проводились при содержаниях $O_2({}^1\Delta_g)$, близких к рекордным для ВЧ ЭРГСК [2, 5]. Основная цель работы состояла в определении основных кинетических механизмов формирования инверсной населенности на лазерном переходе и оптимизации параметров смешиваемых потоков.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента усиления и температуры смеси при условиях: P = 5 торр, $T_{ox} = 340$ К, Y = 20%, $\chi(O) = 5\%$, $\eta(I_2) = 1\%$ на оси камеры смешения. Из рисунка видно, что профили коэффициента усиления и температуры смеси вдоль оси z имеют явно выраженный немонотонный характер. Можно заметить, что минимум поглощения и пик температуры при $z = z_1$ коррелируют между собой. При $z = z_2$ имеется локальный минимум профиля температуры, а при $z > z_2$ наблюдается плавное нарастание температуры и падение G(z).



Рис. 2. Распределение коэффициента G и температуры смеси (на оси) по длине зоны смешения. P = 5 торр, $T_{\text{ox}} = 340$ K, Y = 20%, $\chi(\text{O}) = 5\%$, $\eta(\text{I}_2) = 1\%$

Расчеты показали, что на расстояниях $z \leq z_1$ формирование профилей T(z) и G(z) полностью определяется диффузией атомов $O({}^{3}P)$ в поток I_2 :Не и разложением молекулярного йода в быстрых цепных реакциях

 $I_{2}+O \xrightarrow{k_{3}} IO+I+[0.26 \ \Im B], \quad k_{3}=1.4 \cdot 10^{-10} \ \mathrm{cm}^{3}\mathrm{c}^{-1},$ (R3) $IO+O \xrightarrow{k_{4}} O_{2}+I+[3.32 \ \Im B], \quad k_{4}=3.0 \cdot 10^{-11} \ \mathrm{cm}^{3}\mathrm{c}^{-1}.$ (R4)

Суммарное энерговыделение в этих реакциях составляет 3.58 эВ. В результате происходит формирование локального максимума температуры (при $z = z_1$) за счет конкуренции энерговыделения в (R3), (R4) и теплоотвода с оси z (рис. 2). Быстрая наработка атомарного йода в реакциях (R3), (R4) приводит к тому, что коэффициент усиления резко падает и достигает минимума в точке ($z = z_1$), где молекулярный йод практически полностью диссоциирует (рис. 2). Дополнительно разложение I_2 идет в реакциях

$$I_2 + O_2(a^1 \Delta_g) \xrightarrow{k_5} I_2(v) + O_2 + [0.47 \ \Im B], \qquad (R5)$$
$$k_5 = 7 \cdot 10^{-15} \ \mathrm{cm}^3 \mathrm{c}^{-1},$$

$$I_2(v) + O_2(a^1 \Delta_g) \xrightarrow{R_6} 2I + O_2 - [0.046 \ \Im B],$$
 (R6)
 $k_6 = 3 \cdot 10^{-10} \ \mathrm{cm}^3 \mathrm{c}^{-1}.$

Коэффициент диффузии молекул СК в смесь I_2 :Не в 1.5 раза меньше, чем атомов О. Поэтому влияние СК на формирование профилей T(z) и G(z) происходит ниже по потоку ($z > z_1$). Энерговыделение при $z > z_2$ связано с реакциями (R1) и (R7)

$$O_{2}(^{1}\Delta_{g}) + I(^{2}P_{3/2}) \stackrel{k_{7}}{\underset{k_{-7}}{\leftarrow}} O_{2} + I^{*}(^{2}P_{1/2}) + [0.04 \ \Im B],$$

$$k_{7} = 7.8 \cdot 10^{-11} \ \mathrm{cm}^{3}\mathrm{c}^{-1}, \qquad (\mathrm{R7})$$

$$k_{-7} = 1.04 \cdot 10^{-10} \exp(-401.4/T) \ \mathrm{cm}^{3}\mathrm{c}^{-1}.$$

Температура в этой области плавно нарастает. Коэффициент усиления растет за счет передачи возбуждения от СК к I(${}^{2}P_{3/2}$) в реакции (R7). Однако G(z)меньше нуля всюду по оси z. Из соотношения (1) и реакций (R1), (R3) следует

$$G_{34} \sim [I] ([I^*]/[I] - 1/2),$$
(2)
$$[I^*]/[I] = k_7 [O_2(^1\Delta)] / \{k_{-7} [O_2(^3\Sigma)] + k_1 [O] + \dots\}.$$

Сравнивая скорости реакции (R1) и обратной реакции (R7), можно заметить, что при степенях диссоциации [O]/[O₂] < 1 всегда k_1 [O] $\ll k_{-7}$ [O₂]. Например, при условиях расчета рис. 2 k_{-7} [O₂($^{3}\Sigma$)] $\sim 4 \cdot 10^{6} \text{ c}^{-1}$, k_1 [O] $\sim 2.5 \cdot 10^{4} \text{ c}^{-1}$, т.е. частота тушения I* в (R1) составляет всего около 1%. Отсюда следует, что влияние реакции (R1) на соотношение концентраций [I*]/[I] несущественно, поэтому из (2) и (R7) следует

$$[I^*]/[I] \approx 0.75 \frac{Y}{1-Y} \exp(401.4/T).$$
 (3)

Из (3) видно, что $[I^*]/[I]$ определяется только степенью возбуждения кислорода Y и температурой газа. При $z > z_1$ температура газа T > 400 K, $[I^*]/[I] < 1/2$, поэтому G < 0. Кроме того, процесс тушения $O_2({}^1\Delta_g)$ атомарным кислородом в трехтельной реакции (R2) при условиях рис. 2 приводит к снижению до $Y \approx 18\%$ на расстояниях $z \approx 50$ см, что ведет к дополнительному снижению $[I^*]/[I]$.

Из проведенных модельных расчетов следует, что профили коэффициента усиления и температуры газа по оси z, а также точки $(z_1 - z_3)$ (рис. 2) являются характерными для давлений смеси $P \leq 10$ торр. Варьированием параметров смеси можно добиться оптимального состава газа для получения усиления в системе.

В работе [6] при давлениях кислорода менее 2 торр было показано, что снижение температуры

потока кислорода Тох на входе в зону смешения КИЛ приводит к существенному снижению пороговых значений Yth. Это приводит к увеличению коэффициента усиления. Повышение степени предварительной диссоциации йода $D(I_2)$, как будет показано ниже, приводит к дополнительному снижению температуры смеси. Было проведено моделирование влияния степени предварительной диссоциации йода — D(I₂) на формирование инверсии и температурный режим при повышенных давлениях смеси P = 5 торр. На рис. З приведены результаты расчетов температуры T смеси при $\chi(O) = 1\%$, Y = 20%, $\eta(I_2) = 1\%$, $T_{ox} = 240$ К и различных степенях предварительной диссоциации $D(I_2) = 0$, 50% и 100%. За счет предварительной диссоциации I₂ вне зоны смешения (например, в дополнительном электрическом разряде) можно снизить энерговыделение при разложении I2 в реакциях (R3)-(R6) и, следовательно, понизить температуру в зоне смешения. Рис. 3 демонстрирует снижение температуры газа при увеличении степени предварительной диссоциации, что приводит к повышению $[I^*]/[I]$ на расстояниях $z \leq 10$ см. Тогда основным процессом нагревания смеси будет только тушение I* и $O_2({}^1\Delta_g)$ в реакциях (R1), (R2). Из рис. З видно, что происходит выравнивание температур газа при различных степенях D(I₂) на расстояниях $z \ge 10$ см, при этом $[I^*]/[I] \approx 0.53$ для всех трех случаев.





Было проведено исследование влияния процентного содержания атомарного кислорода на формирование инверсии на переходе атома йода с предварительной диссоциацией I_2 . На рис. 4 представлены результаты расчета $[I^*]/[I]$ и температуры смеси при степени диссоциации $D(I_2) = 50\%$, содержании



Рис. 4. Распределение $[I^*]/[I]$ (*a*) и температуры газа (б) (на оси) по длине зоны смешения в зависимости от содержания $\chi(O) = 0.1$, 1, 10% в смеси. P = 5 торр, $T_{ox} = 340$ K, $\eta(I_2) = 1$ %, Y = 20%

 $\chi(O) = 0.1, 1, 10\%, Y = 20\%$, давлении P = 5 торр, $T_{\rm ox}$ =340 К и η (I₂)=1%. Выше было показано, что основным каналом диссоциации йода являются реакции (R3), (R4), а реакции (R1)-(R6) существенным образом влияют на разогрев смеси. Поэтому, с одной стороны, присутствие атомов О в смеси снижает расход СК на разложение I₂ в реакциях (R5), (R6), с другой — концентрация атомарного кислорода в зоне смешения даже в минимальных $\chi(O) \approx 1\%$ количествах (рис. 4, б) приводит к росту температуры смеси за счет энерговыделения в реакции (R1) при тушении I* атомами О. Из рис. 4, *a* видно, что уже при $\chi(O) = 1\%$ тушение I* в реакции (R1) приводит к тому, что пороговое значение инверсии не достигается — $[I^*]/[I] \approx 0.46$. При $\chi(O) = 0.1\%$ эффективность процесса тушения I* в реакции (R1) существенно снижена и температура газа слабо меняется по всей длине зоны смешения (рис. 4, б). При большом содержании О в смеси на динамику синглетного кислорода сильно влияет процесс тушения $O_2(^1\Delta_{\sigma})$ в трехтельной реакции (R2). Это приводит к снижению У по длине зоны смешения, например при $\chi(O) = 10\%$ содержание СК падает в $[O_2({}^1\Delta_g)]/[O_2({}^1\Delta_g)]_0 \approx 0.8$, а содержание СК при этом У ≈ 16% и отношение [I*]/[I] ≈ 0.3 (рис. 4, *a*). Выделение тепла в реакциях (R1), (R2) приводит к сильному разогреву газа. Из рис. 4, б видно, что при $\chi(O) = 10\%$ температура смеси составляет около 520 К на расстояниях $z \approx 50$ см.

Оптимизация содержания I_2 в смеси также приводит к увеличению инверсии. С одной стороны, большое содержание I_2 приводит к сильному выделению тепла при разложении I_2 в реакциях (R3)–(R6), что ведет к увеличению Y_{th} и снижению инверсии при заданном Y. В то же время снижение концентрации I_2 в смеси, а следовательно, и [I] будет приводить к уменьшению коэффициента усиления $G \sim [I]([I^*]/[I] - 0.5)$. Были проведены



Рис. 5. Зависимость $[I^*]/[I]$ от концентрации $[I_2]_0$ в зоне смешения (на оси). P = 5, 10 торр; $T_{\text{ox}} = 240$ К, Y = 20%, $\chi(O) = 0.1$, 1%

Максимальный	коэффициент	усиления	G (на оси)
при различн	юй концентра	ции [I ₂] ₀ в	смеси

	[I ₂] ₀ , см ⁻³	$G_{\rm max},~{\rm cm}^{-1}$		
		$\chi(O) = 0.1\%$	$\chi(O) = 1\%$	
P = 5торр	$4.00 \cdot 10^{14}$	$2.45 \cdot 10^{-4}$	$1.81 \cdot 10^{-4}$	
	$1.00 \cdot 10^{15}$	$3.70 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$	
	$1.51 \cdot 10^{15}$	$4.32 \cdot 10^{-4}$	$2.58 \cdot 10^{-4}$	
	$2.01 \cdot 10^{15}$	$4.35 \cdot 10^{-4}$	$1.89 \cdot 10^{-4}$	
P = 10 торр	$4.03 \cdot 10^{14}$	$1.40 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-5}$	
	$1.21 \cdot 10^{15}$	$1.92 \cdot 10^{-4}$	—	

серии расчетов при варьировании концентрации молекулярного йода для условий P = 5 - 10 торр, $T_{\rm ox} = 240$ К, содержание $\chi({\rm O}) = 0.1$, 1%. На рис. 5 приведены зависимости [I*]/[I] от концентрации [I₂]₀. Видно, что с увеличением [I₂]₀ отношение $[I^*]/[I]$ в смеси падает, например при P = 5 торр, $\chi({\rm O})=1\,\%$ и $[{\rm I}_2]_0=10^{16}~{\rm cm}^{-3}-[{\rm I}^*]/[{\rm I}]\thickapprox 0.28,$ что почти в 2 раза ниже порога инверсии. Понижение $[I_2]_0$ приводит к росту $[I^*]/[I]$ — при P = 10 торр, $\chi(O) = 0.1\%$ и $[I_2]_0 = 4 \cdot 10^{14}$ см⁻³ — $[I^*]/[I] \approx 0.7$ (рис. 5). Снижение $[I_2]_0$ вплоть до ~ 10^{14} см⁻³ ведет к насыщению отношения [I*]/[I] и, следовательно, насыщению инверсии (рис. 5). В таблице приведены значения максимального коэффициента G > 0, рассчитанные на оси трубки, для условий рис. 5. Видно, что при прочих равных условиях получить максимальный коэффициент усиления можно путем оптимизации содержания I2 в смеси. Например, при P = 5 ropp, $\chi(O) = 1\% - G_{max} = 2.67 \cdot 10^{-4}$ cm⁻¹ достигается при $[I_2]_0 = 10^{15}$ см⁻³.

Таким образом, в настоящей работе проведен параметрический анализ влияния основных кинетических процессов на формирование инверсии в атоме йода на основе квазидвумерной диффузионной модели. Модель позволяет получать прогностические оценки влияния вариации параметров смеси на температурный режим и усилительные свойства среды. Проведенный анализ при давлениях смеси P = 5 - 10 торр показывает, что снижение содержания О в смеси и увеличение степени предварительной диссоциации I₂ приводит к увеличению инверсии за счет снижения энерговыделения при разложении I2. При этом основными процессами нагревания смеси являются тушение I* и $O_2(^{l}\Delta_g)$ в реакциях (R1), (R2). Оптимизация концентрации I₂ в смеси ведет к существенному увеличению инверсии. При P = 5-10 торр, $T_{ox} = 240$ К, $\chi({\rm O})=0.1-1\%$ концентрация $[{\rm I}_2]_0pprox 10^{15}$ см $^{-3}$ является оптимальной для получения усиления в системе. В дальнейшем будет построена полная газодинамическая модель смешения потоков. Это позволит проводить модельные исследования в более сложных системах инжекции с учетом реальных условий смешения при давлениях $P \ge 10$ торр.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Российские научные школы» (грант НШ 7101.2006) и РФФИ (грант 06-02-16537).

Литература

- 1. *Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M.* et al. // IEEE J. Quant. Electronics. 2005. **41**, N 2. P. 213.
- Rakhimova T.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V. et al. // Proc. of 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. San Francisco, 5–8 June 2006. P. 3762.
- Proshina O.V., Rakhimova T.V., Braginsky O.V. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. 39. P. 5191.
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. 39. P. 5183.
- Rakhimova T.V., Kovalev A.S., Klopovsky K.S. et al. // Proc. of 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. Toronto, 6–9 June 2005. P. 4918.
- Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M. et al. // IEEE J. Quant. Electronics. 2003. 39, N 9. P. 1150.
- 7. *Юрышев Н.Н.* // Квантовая электроника. 1996. **23**, № 7. С. 583.
- Perin J., Leroy O., Bordage M.C. // Contrib. Plasma Phys. 1996. 36. P. 3.
- 9. *Kushner M.* H2D2XS Database. http://uigelz.ece. iastate.edu.

Поступила в редакцию 30.11.2007