

Эффективный химический кислородно-иодный лазер с высоким полным давлением активной среды

М.В.Загидуллин*, В.Д.Николаев*, М.И.Свистун*, Н.А.Хватов*, Г.Д.Хэйгер**, Т.Дж.Мадден**

Предложена и проверена новая концепция получения высокого полного давления активной среды химического кислородно-иодного лазера (КИЛ). Сопловой блок лазера состоит из чередующихся вертикальных рядов цилиндрических сопел для получения высоконапорных сверхзвуковых струй азота, плоских щелевых сопел для потока кислорода $O_2(^1\Delta)$ и вертикальных рядов цилиндрических сопел для инжекции смеси $N_2 - I_2$ между первыми двумя потоками. При молярном расходе хлора 39.2 ммоль/с выходная мощность составила 700 Вт, а химическая эффективность – 19.7%. Использование предложенного эжекторного соплового блока для получения активной среды в сочетании с установкой сверхзвукового диффузора позволяет значительно упростить систему выброса отработанной активной среды КИЛ.

Ключевые слова: кислородно-иодный лазер, синглетный кислород, эжектор, сверхзвуковое течение.

Введение

Увеличение давления торможения газового потока в резонаторе газодинамических и химических лазеров важно для эффективного выхлопа отработанного лазерного газа в атмосферу [1]. При этом оно не должно сопровождаться существенным падением мощности и эффективности лазерной системы. Данная проблема особенно актуальна для кислородно-иодного лазера (КИЛ) из-за относительно низкого давления в генераторе синглетного кислорода (ГСК).

Полное давление в КИЛ было увеличено до 100 мм рт. ст. при высоком разбавлении кислорода гелием (1:6) в лазере Verti-COIL, работающем с дисковым генератором $O_2(^1\Delta)$ [2]. Однако высокая плотность газа в реакционной зоне ГСК вызывает удаление большого количества аэрозоля раствора и тем самым ограничивает возможности достижения высокого полного давления.

Новый способ приготовления активной среды высокого давления был предложен в [3, 4]. Сопловой блок состоит из конических сопел для потока смеси $N_2 - I_2$ и щелевых или цилиндрических сопел для потока $O_2(^1\Delta)$. Конические сопла создают сверхзвуковой поток $N_2 - I_2$, а кислородные сопла – поток кислорода со звуковой скоростью и давлением порядка 10 мм рт. ст. Однако такая схема также содержит внутренние противоречия.

Действительно, для получения высокого полного давления при статическом давлении ~ 10 мм рт. ст. необходимо генерировать поток $N_2 - I_2$ с большой сверхзвуковой скоростью. Газодинамическое понижение температуры потока $N_2 - I_2$ приводит к конденсации молекулярного иода в соплах. Этот недостаток может быть устранен в сопловом блоке, который генерирует поток чис-

того N_2 с высокой степенью расширения, а поток $N_2 - I_2$ – с малой степенью расширения.

Таким образом, новый сопловой блок состоит из сопел трех типов, предназначенных соответственно для высоконапорного потока чистого азота и низконапорных потоков $O_2(^1\Delta)$ и смеси $N_2 - I_2$. Такой сопловой блок работает по принципу газового эжектора, в котором происходит смешение низконапорных потоков $O_2(^1\Delta)$ и $N_2 - I_2$ с высоконапорным потоком азота.

Цель настоящей работы состояла в демонстрации работоспособности нового соплового блока для КИЛ.

1. Описание КИЛ с сопловым блоком нового типа

Схема КИЛ с эжекторным сопловым блоком представлена на рис.1. КИЛ состоял из струйного ГСК, со-

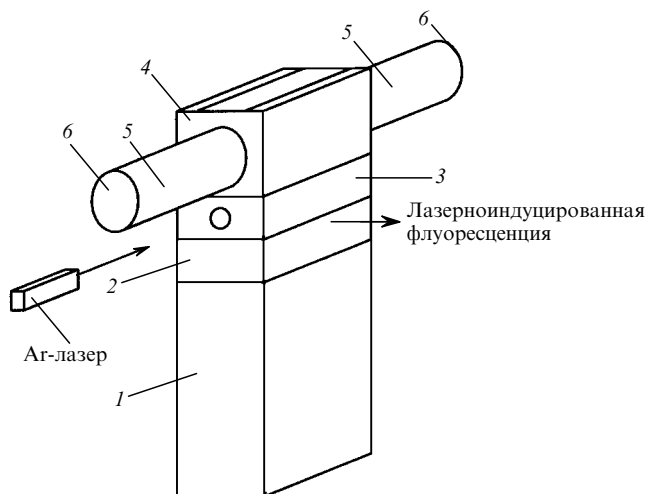


Рис.1. Схема КИЛ:
1 – струйный генератор синглетного кислорода; 2 – сопловой блок; 3 – смешительная камера; 4 – активная часть резонатора; 5 – туннели; 6 – зеркала оптического резонатора.

*Самарский филиал Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221

**Air Force Research Laboratories, Kirtland AFB, NM, 87117, USA

плового блока, смесительной камеры и оптического резонатора. Струйный ГСК вертикального типа детально описан в работе [5]. Начальный поперечный размер смесительной камеры равнялся 50 мм вдоль оптической оси и 15 мм – по высоте, а угол между стенками смесительной камеры и осью потока составлял 2° . Газовый поток из смесительной камеры поступал в активную часть резонатора КИЛ.

Оптический резонатор образован двумя зеркалами с радиусом кривизны 5 м, расположенными на расстоянии 63 см друг от друга. Длина активной части резонатора по потоку равнялась 45 мм. Для предотвращения конденсации паров иода на зеркалах и вытеснения застойных зон из туннелей со стороны зеркал подавался поток азота. Смесительная камера и оптический резонатор изготовлены из плексигласа, что позволяло визуально наблюдать зону смешения газовых потоков.

Сегмент эжекторного соплового блока показан на рис.2. Кислород втекал в камеру смешения через 7 плоских щелей высотой 15 мм и шириной 2.5 мм, расположенных в сопловом блоке с периодом 6.5 мм. Высоконапорный азот (первичный) втекал в смесительную камеру через 56 цилиндрических каналов диаметром 1 мм, расположенных в 8 рядах. Смесь вторичного азота с парами иода, нагретая до 70°C , инжестировалась в камеру смешения через 240 отверстий диаметром 0.5 мм, просверленных в 14 тонкостенных никелевых трубках, расположенных между кислородными и азотными соплами. Газовые струи из каждого массива сопел свободно расширяются и смешиваются в смесительной камере. Работа такой сопловой решетки происходит по принципу сверхзвукового газового эжектора [6], в смесительной камере которого полное давление может существенно превышать полное давление в ГСК.

Откачка активной среды осуществлялась механическим насосом АВЗ-125. Для создания на короткое время большей объемной скорости прокачки газовой среды открывалась бочка объемом 4 м^3 , которая предварительно откачивалась до давления ниже 1 мм рт. ст. Во время пуска лазера измерялись давление p_1 в ГСК, а также давления перед кислородными соплами p_2 , в резонаторе p_3 , в

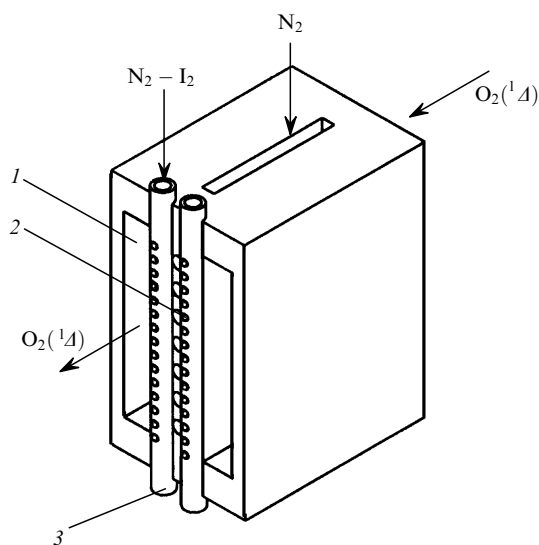


Рис.2. Сегмент эжекторного соплового блока: 1 – щели для кислорода; 2 – цилиндрические отверстия для первичного азота; 3 – перфорированные трубки для смеси $\text{N}_2 - \text{I}_2$.

трубке полного давления p_4 . Отверстие для измерения давления p_3 расположено под оптической осью в геометрическом центре активной части резонатора. Конец трубки полного давления находился в центре выхлопного отверстия из резонатора и на расстоянии 2.25 см от оптической оси. Число Маха M потока в резонаторе оценивалось с помощью соотношения $p_4/p_3 = 166.7 \times M^7 / (7M^2 - 1)^{2.5}$, а полное давление p^* газового потока в резонаторе – с помощью соотношения $p^* = (1 + 0.2M^2)^{3.5} p_3$ [6]. Полагалось, что полная выходная мощность лазера $W = W_1(T_1 + T_2)/T_1$, а его химическая эффективность $\eta_c = W/(M_{\text{Cl}} \cdot 90.4 \text{ Дж/ммоль})$, где W_1 – измеренная мощность излучения, выходящего через зеркало с максимальным пропусканием T_1 ; T_2 – коэффициент пропускания второго зеркала; M_{Cl} – расход хлора (в ммоль/с).

2. Предварительные газодинамические испытания соплового блока

Первоначально испытания эжекторного соплового блока для КИЛ состояли в определении параметров газового потока в области резонатора при напуске инертных газов с номинальными расходами. «Холодные» напуски проводились при расходе комнатного воздуха 40 ммоль/с через ГСК (без подачи щелочного раствора перекиси водорода) и расстоянии между срезами соплового блока и оптической осью 64 мм. При отсутствии расхода первичного и вторичного азота ($M_{\text{NP}} = 0, M_{\text{NS}} = 0$) давление перед кислородными соплами $p_2 = 17$ мм рт. ст. При $M_{\text{NP}} = 500$ ммоль/с и $M_{\text{NS}} = 0$ давление p_2 возросло до 27 мм рт. ст. Одновременно были зафиксированы давления $p_3 = 8$ мм рт. ст., $p_4 = 87$ мм рт. ст. Давление первичного азота перед соплами при этом составляло около 1.9 атм.

Свободное расширение струй азота с высоким начальным давлением сопровождается их ускорением до сверхзвуковых скоростей. Падение давления азота с 1.9 атм до 8 мм рт. ст. в области расширения азотных струй сопровождается возникновением сильных ударных волн и уменьшением полного давления. При увеличении расхода вторичного азота до 11 ммоль/с были получены давления $p_3 = 9.3$ мм рт. ст. и $p_4 = 92$ мм рт. ст., откуда следует, что $M = 2.7$. Указанные газодинамические параметры реализуются в результате смешения и взаимодействия всех трех потоков. Из этих данных можно получить оценку абсолютной скорости потока в смесительной камере: $U \approx 600$ м/с. Дополнительная подача азота с расходом 15 ммоль/с через каждый туннель для зеркал привела к росту p_3 до 10.4 мм рт. ст., а p_4 – до 111 мм рт. ст. Увеличение давления p_2 с 17 до 27 мм рт. ст. объясняется запариванием потока воздуха через кислородные сопла расширяющимися сверхзвуковыми струями первичного азота. Критическое сечение для воздушного потока из кислородных щелей реализуется на некотором расстоянии от них, и его поперечное сечение меньше, чем геометрическое поперечное сечение щелей для кислорода.

Таким образом, в камере смешения на некотором расстоянии от соплового блока кислородный поток будет иметь скорость, равную «местной» скорости звука. Увеличение статического давления p_3 и восстановленного давления p_4 при продуве азота через туннели для зеркал объясняется возникновением в основном сверхзвуковом потоке последовательности слабых косых скачков уплот-

нения. Вышеприведенные «холодные» испытания продемонстрировали возможность формирования высоконапорного сверхзвукового потока в области резонатора с помощью эжекторного соплового блока с простой геометрией сопел.

3. Оценка эффективности смешения потоков

Вторым этапом исследований газового потока, формируемого эжекторным сопловым блоком, являлось качественное наблюдение эффективности смешения трех потоков в смесительной камере. Основная задача состояла в определении расстояния от соплового блока, на котором образуется сравнительно однородное распределение концентрации иода вдоль оптической оси. Для наблюдения этого распределения в камере смешения использовался метод лазерноиндуцированной флуоресценции (ЛИФ).

В данном методе излучение аргонового лазера ($\lambda = 5145 \text{ \AA}$) возбуждает молекулы иода в состояние B^3P , а затем возбужденные молекулы иода переизлучают свет в желтой области спектра [7], визуализируя тем самым распределение молекулярного иода.

Визуализация осуществлялась в специально изготовленной смесительной камере, снабженной окнами для ввода излучения аргонового лазера и регистрации ЛИФ в направлении, перпендикулярном одновременно к оси потока и к лучу аргонового лазера (см. рис.1). Пучок излучения аргонового лазера диаметром 3 мм направлялся перпендикулярно потоку и центрировался посередине между стенками смесительной камеры. ЛИФ регистрировалась на пленку «Kodak» через оптический фильтр, обрезающий рассеянное излучение аргонового лазера. Картина распределения молекулярного иода регистрировалась в условиях, близких к условиям в лазерных экспериментах.

Поток синглетного кислорода $O_2(^1\Delta)$ из ГСК в этих экспериментах был заменен на поток азота. Расходы первичного и вторичного азота через кислородные сопла изменялись в пределах 200–400 и 20–40 ммоль/с соответственно. В этих условиях число Маха потока менялось в пределах 1.7–2, а давление p_3 – в пределах 10–20 мм рт. ст. Более низкие числа Маха и более высокие статические давления p_3 объясняются большим влиянием пограничных слоев в канале постоянного сечения.

На расстоянии 50–60 мм от соплового блока распределение интенсивности визуально наблюдаемой ЛИФ было практически равномерным вдоль оптической оси для вышеприведенных условий. Для конкретных условий ($M_{NP} = 400$ ммоль/с, $M_{NS} = 40$ ммоль/с, расход азота через кислородные сопла 40 ммоль/с) картина ЛИФ представлена на рис.3. Таким образом, для данного соплового блока концентрация молекулярного иода достаточно равномерно распределяется вдоль оптической оси в области, находящейся на расстоянии 50–60 мм от источника (т. е. за время $\sim 10^{-4}$ с).

Это позволило предположить, что и в лазерных экспериментах иодная составляющая потока будет перемешиваться на таких же расстояниях от соплового блока. Так как инъекция паров иода происходит в области между струями первичного азота и $O_2(^1\Delta)$, то можно ожидать быстрого турбулентного перемешивания всех трех потоков, истекающих из соплового блока. Высокая скорость смешения потоков объясняется наличием больших

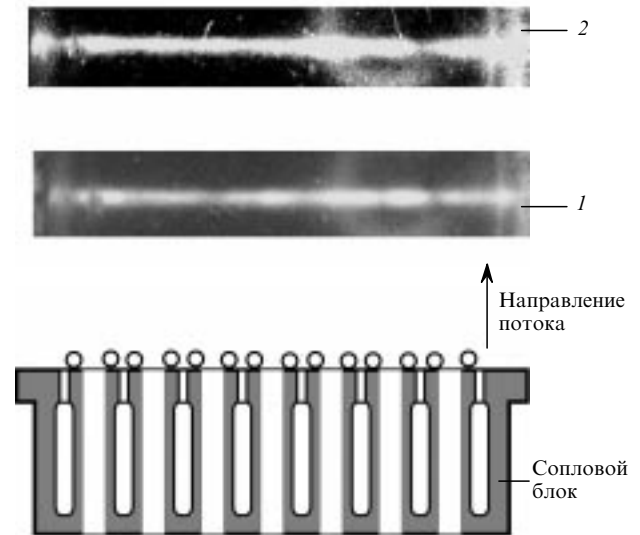


Рис.3. Картина ЛИФ в смесительной камере на расстоянии от соплового блока 37 (1) и 62 мм (2).

начальных тангенциальных разрывов в газодинамических параметрах смешиваемых потоков.

4. Лазерные эксперименты с эжекторным сопловым блоком

Несмотря на достижение высоких чисел Маха в смесительной камере и быстрое перемешивание потоков, остается открытым вопрос об эффективности диссоциации молекулярного иода и эффективности преобразования энергии, запасенной в $O_2(^1\Delta)$, в излучение. Действительно, сильное газодинамическое охлаждение смеси может вызвать преждевременную конденсацию молекулярного иода, а быстрое смешение – падение локальных концентраций $O_2(^1\Delta)$ и I_2 и скорости диссоциации I_2 . Все это может вести к низким коэффициенту усиления и эффективности лазера. Ответы на эти вопросы должны были дать непосредственно лазерные эксперименты.

Лазерные эксперименты с эжекторным сопловым блоком проводились при следующих условиях: расход хлора через ГСК 39.2 ммоль/с, расход первичного азота 400 ммоль/с, расход вторичного азота 40 ммоль/с и расход азота через каждый туннель для зеркал 20 ммоль/с. Первоначальное расстояние между сопловым блоком и оптической осью было равно 89 мм. При нулевом расходе иода ($M_1 = 0$) $p_2 = 28.5$ мм рт. ст., $p_3 = 7.8$ мм рт. ст., $p_4 = 97$ мм рт. ст. С ростом расхода иода и интенсификацией химических процессов в активной среде давление p_3 росло, а p_4 уменьшалось.

Максимальная мощность была достигнута при расходе иода $M_1 \sim 0.68$ ммоль/с. Для коэффициентов пропускания зеркал $T_1 = 0.94\%$ и $T_2 = 0$ она составила 603 Вт, что соответствует химической эффективности $\eta_c = 17\%$. При этом давление p_3 выросло до 11.9 мм рт. ст., а давление p_4 упало до 81 мм рт. ст. Отличие этих давлений от давлений, полученных при нулевом расходе иода, видимо, связано с тепловыделением в газовом потоке.

Одновременно проводилась видеозапись люминесценции в зоне смешения. Было обнаружено, что яркая желтая люминесценция от молекулярного иода заканчивалась на расстоянии 50–60 мм от соплового блока. Люминесценция молекулярного иода в зоне его интенсивной

Табл. 1. Результаты испытаний сверхзвукового КИЛ с эжекторной сопловой решеткой.

Номер пуска	p_2 (мм рт. ст.)	p_3 (мм рт. ст.)	p_4 (мм рт. ст.)	M	p^* (мм рт. ст.)	M_1 (ммоль/с)	T_1 (%)	T_2 (%)	W (Вт)	η_c (%)
1	32.8	9.47	98.3	2.9	300	0	0	0	0	0
2	32.4	10.7	102	2.62	214	0.54	0.94	0.18	604	17.0
3	32.4	10.9	102	2.62	227	0.65	0.94	0.18	660	18.6
4	32.6	11	101	2.6	220	0.68	0.94	0.18	673	18.9
5	33	11.2	101	2.57	211	0.73	0.94	0.18	643	18.1
6	32.5	10.9	100	2.6	218	0.74	0.94	0.18	700	19.7
7	32.5	11.3	100	2.55	210	0.85	0.94	0.18	657	18.5
8	32.9	11.4	100	2.5	200	0.74	0.94	0	598	16.8
9	33	11.3	102	2.55	205	0.76	1	0	618	17.4
10	32.5	11.4	101	2.5	200	0.75	1.3	0	563	15.8
11	32.7	11.4	102	2.55	207	0.75	1.7	0	565	15.9
12	33	11.4	102	2.55	207	0.77	1.7	0.94	489	13.7
13	33	11.3	103	2.55	205	0.77	1.7	1.3	405	11.4
14	32.9	11.1	101	2.55	204	0.76	1.7	1.7	0	0

диссоциации на атомы, вызванная возбуждением молекулярного иода в состоянии $V^3\Pi$ при столкновениях с $O_2(^1\Delta)$, $O_2(^1\Sigma)$ и атомами иода $I(^2P_{1/2})$ [8], является индикатором активности этого процесса. Таким образом, активная диссоциация молекулярного иода в указанных условиях происходит на тех же расстояниях, что и смешение потока $O_2(^1\Delta)$ с потоком $N_2 - I_2$.

В связи с этим в дальнейшем расстояние между сопловой решеткой и оптической осью было установлено равным 64 мм. На таком расстоянии ожидалось меньшие потери $O_2(^1\Delta)$ при его тушении и меньшие потери атомарного иода при его конденсации. Результаты экспериментов представлены в табл. 1. Максимальная мощность 700 Вт при химической эффективности 19.7% была достигнута в пуске № 6. Она несколько меньше, чем максимальная мощность 798 Вт химического лазера со щелевым соплом при том же расходе хлора через идентичный ГСК [5] и разбавлении активной среды азотом, имеющим комнатную температуру.

5. Обсуждение результатов

Для химического КИЛ предложен, разработан и испытан новый метод приготовления активной среды с высоким полным давлением. Сопловой блок, реализующий этот метод, состоит из сопел трех типов. Щелевые сопла предназначены для получения потока $O_2(^1\Delta)$ с числом Маха $M \sim 1$, цилиндрические сопла – для создания высоконапорного потока азота, а расположенные между ними мелкогабаритные сопла – для инъекции потока $N_2 - I_2$ со сравнительно малым числом Маха. Предварительные «холодные» испытания показали, что такой эжекторный сопловой блок с простой геометрией сопел позволяет создать сверхзвуковую активную среду, в которой полное давление существенно превышает давление кислорода в ГСК. Наблюдения ЛИФ молекулярного иода и его люминесценции в присутствии $O_2(^1\Delta)$ показали, что полное перемешивание потоков и окончание диссоциации иода наступают практически одновременно на расстоянии 50–60 мм от соплового блока при скорости газа ~ 600 м/с.

Качественно картина физико-химических процессов в начале зоны смешения, видимо, выглядит следующим образом. Струя $O_2(^1\Delta)$ вытекает из щелей в смешительную камеру при давлении выше критического, равного

примерно $p_2/2 \approx 15$ мм рт. ст. При этом она сразу начинает контактировать со смесью $N_2 - I_2$. Расширяющаяся струя первичного высоконапорного азота поворачивает струи $N_2 - I_2$ в сторону кислородного потока и сжимает их.

В неперемешанном потоке $N_2 - I_2$ локальная концентрация паров иода $[I_2]_0 \approx [I_2]_1(M_{NS} + M_{NP} + M_{Cl})/M_{NS}$ (где $[I_2]_1$ – концентрация иода в полностью перемешанном потоке). Так как $(M_{NS} + M_{NP} + M_{Cl})/M_{NS} \approx 10 \gg 1$, то концентрация молекулярного иода в начале зоны смешения потока $N_2 - I_2$ с кислородным потоком значительно выше его средней концентрации. В области контакта этих двух потоков происходит быстрая диссоциация молекулярного иода. За счет сильных тангенциальных разрывов в газодинамических параметрах происходит турбулентное перемешивание трех потоков и их газодинамическое охлаждение за счет высоконапорного потока азота.

По-видимому, создается такая кинетическая и газодинамическая ситуация, при которой диссоциация иода отслеживает смешение, т. е. по мере смешения потоков и уменьшения локальных концентраций иода и кислорода диссоциация замедляется. В полностью перемешанном потоке диссоциация иода за время пролета смеси через резонатор уже практически прекращается. Очевидно, что в этих условиях следует ожидать неполной диссоциации молекулярного иода. Оптимизация данного процесса требует дальнейших исследований.

В КИЛ с эжекторным сопловым блоком при длине активной зоны в резонаторе 5 см были достигнуты максимальная выходная мощность 700 Вт и химическая эффективность 19.7%. При этом давление в резонаторе составило 10.9 мм рт. ст., а на выходе из резонатора – 100 мм рт. ст. Для указанных давлений число Маха потока в резонаторе $M = 2.6$. Рассчитанное по этим данным полное давление потока в резонаторе $p^* = 218$ мм рт. ст. Возможно такой расчет дает несколько завышенные значения M и p^* , т. к. неизвестно, насколько поддув азота из туннелей резонатора сказывается на структуре основного потока.

Использование эжекторного соплового блока для получения активной среды в сочетании с установкой сверхзвукового диффузора позволяет значительно упростить систему выброса отработанной активной среды КИЛ. Высокая степень разбавления активной среды азотом

(1:11) и низкое относительное тепловыделение создают благоприятные условия для работы сверхзвукового диффузора.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Европейского офиса по аэрокосмическим исследованиям и разработкам (EOARD) (контракт F61775-99-WE032) и Американского фонда гражданских исследований и разработок (CRDF) (грант RPO-696).

1. *Химические лазеры*. Под ред. Р.Гросса, Дж.Ботта (М., Мир, 1980).
2. Rittenhouse T.L., Phipps S.P., Helms C.A., Truesdell K.A. *Proc. SPIE*, **2702**, 333 (1996).
3. Nikolaev V.D. *Proc.SPIE*, **3268**, 157 (1998).
4. Аязов В.Н., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Сафонов В.С. *Квантовая электроника*, **24**, 491 (1997).
5. Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **30**, 161 (2000).
6. Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика* (М., Наука, 1976, с.146).
7. Rapagnani N.L., Davis S.J. *AIAA J.*, **17**, 1402 (1979).
8. Heidner R.F., Gardner C.E., Segal G.I., El-Sayed T.M. *J.Phys. Chem.*, **87**, 2348 (1983).