

Непрерывный химический кислородно-иодный лазер мощностью 12 кВт

А.С.Борейшо, В.М.Мальков, А.В.Савин, Д.Н.Васильев,
И.М.Евдокимов, А.В.Трилис, С.Ю.Страхов

Разработан и испытан непрерывный химический кислородно-иодный лазер мощностью 12 кВт с оригинальным генератором синглетного кислорода струйного типа. Представлены экспериментальные и численные методики, применяемые для диагностики и математического моделирования процессов в активной среде лазера, а также некоторые результаты расчетного и экспериментального исследований.

Ключевые слова: химический кислородно-иодный лазер, генератор синглетного кислорода струйного типа, численное моделирование газовых течений, активной среды, неустойчивого резонатора.

1. Введение

На сегодняшний день химический кислородно-иодный лазер (ХКИЛ) является одним из наиболее перспективных типов лазеров для различных практических применений. Несмотря на значительное количество работ, посвященных ХКИЛ [1, 2], проблема создания эффективного и надежно работающего лазера, обладающего большой мощностью и высокой направленностью излучения, стоит еще достаточно остро. Решение этой проблемы связано с поиском оптимальных технических решений при разработке системы подготовки активной среды, оптического резонатора, системы восстановления давления и т. д. В данной работе описан экспериментальный 12-киловаттный ХКИЛ, основные параметры и характеристики которого оптимизировались на основе численного моделирования всех основных систем.

В разработанном непрерывном ХКИЛ [3] (рис.1) используется генератор синглетного кислорода (ГСК) струйного типа [1], в качестве разбавителя применяется азот, иод инжектируется в трансзвуковой области соплового блока.

2. Выбор рабочих параметров ХКИЛ

2.1. Приготовление активной среды и формирование усиления

Процесс приготовления активной среды кислородно-иодного лазера во многом определяется смешением первичного потока, содержащего синглетный кислород, и вторичного потока, содержащего молекулярный иод [2]. Скорость смешения при прочих равных условиях определяется геометрией иодного инжектора, параметром проникновения $P = (\rho v^2)_2 / (\rho v^2)_1$ (индексы 1 и 2 обозначают первичный и вторичный потоки соответственно, ρ – плотность, v – скорость потока) и числом Рейнольдса $Re_1 = (\rho v d / \mu)_1$, где μ – динамическая вязкость, d – диа-

метр отверстия инжектора. Для изучения процесса смешения проведено численное моделирование течения в используемой конфигурации иодного инжектора. Трехмерные нестационарные уравнения Навье – Стокса решались в расчетном объеме, который представляет собой элемент симметрии соплового аппарата ХКИЛ. Поскольку в данном случае сопловой аппарат состоит из набора плоских сопел, то элементом симметрии является зона, ограниченная с одной стороны поверхностью сопловой лопатки, а с другой – плоскостью симметрии сопла. Расчеты проведены с использованием программы VICON-C, детали расчетного метода можно найти в [4]. Для описания газозольных химических процессов использовалась кинетическая схема, включающая 34 реакции и 12 компонентов газовой смеси [5 – 7].

Параметры первичного потока таковы: полное давление перед соплами 25 Тор, степень разбавления первичным азотом $D = [N_2] / ([O_2(^1\Delta)] + [O_2(^3\Sigma)] + [Cl_2]) = 2$,

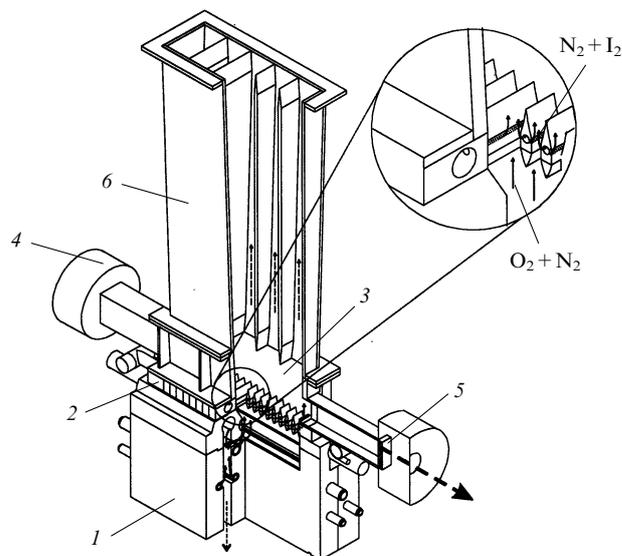


Рис.1. Схема ХКИЛ:
1 – ГСК; 2 – сопловой блок; 3 – лазерная камера; 4 – резонатор; 5 – зеркало; 6 – диффузор.

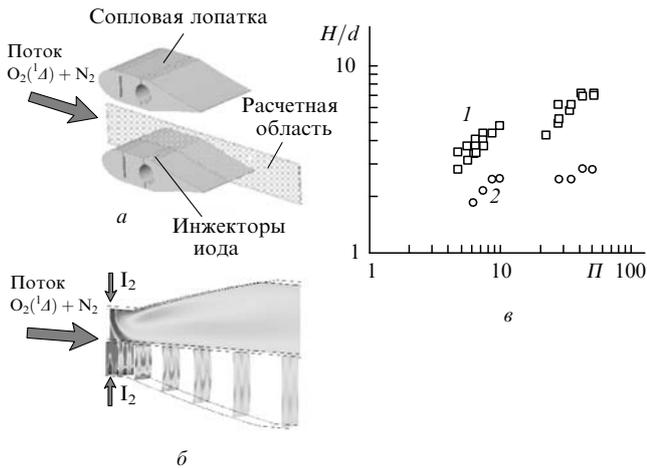


Рис.2. Схематическое изображение протекания потока через одно из отверстий двухрядного инжектора (*a*), картина смешения (*б*) и зависимость глубины проникновения струй вторичного потока от параметра проникновения (Π) (1 – первый ряд инжектора, 2 – второй).

выход синглетного кислорода $Y = 0.6$, степень усвоения хлора $U = 0.95$, содержание паров воды $w = [\text{H}_2\text{O}]/([\text{O}_2(^1\Delta)] + [\text{O}_2(^3\Sigma)] + [\text{Cl}_2]) = 0.15$ (в квадратных скобках указаны молярные концентрации соответствующих компонентов); относительный расход иода $t = M(\text{I}_2)/(M(\text{O}_2(^1\Delta)) + M(\text{O}_2(^3\Sigma)) + M(\text{Cl}_2)) = 0.02$ (M – молярные расходы соответствующих компонентов).

На рис.2,*б* показана характерная картина смешения, полученная для двухрядного иодного инжектора с шахматным расположением отверстий, аналогичного описанному в [8], и параметра проникновения $\Pi = 30$. Параметры инжектора были выбраны на основе предварительных расчетов. Интенсивность серого цвета, используемого для визуализации смешения на рис.2,*б*, определяется массовой концентрацией паров воды, поскольку они содержатся только в первичном потоке и их количество не изменяется в химических реакциях. В верхней части потока (расчетная область рис.2,*a*) показано распределение концентрации в вертикальной плоскости, направленной вдоль потока и проходящей через ось одного из инжектирующих отверстий, в нижней – аналогичные распределения в поперечных плоскостях, ориентированных перпендикулярно потоку.

На рис.2,*в* представлена зависимость относительной глубины проникновения H/d струй первого и второго рядов двухрядного инжектора с шахматным расположением отверстий (H – абсолютная глубина проникновения струи в поток) от параметра проникновения Π . Видно, что закономерности движения струй первого и второго рядов качественно различаются.

Неоднородности картины смешения в сопле создают неоднородности усиления в зоне резонатора. При использовании инжектора с шахматным расположением отверстий на малых расстояниях от среза сопла образуется бимодальная структура, типичная для случая «недопроникновения». На рис.3 кривыми 1, 2 показаны зависимости коэффициента усиления слабого сигнала от поперечных координат при разных относительных расстояниях x/d от среза сопла (x – абсолютное расстояние) для такого инжектора при $\Pi = 6$.

В случае использования однорядного инжектора с оптимально подобранными параметрами инжектирующих

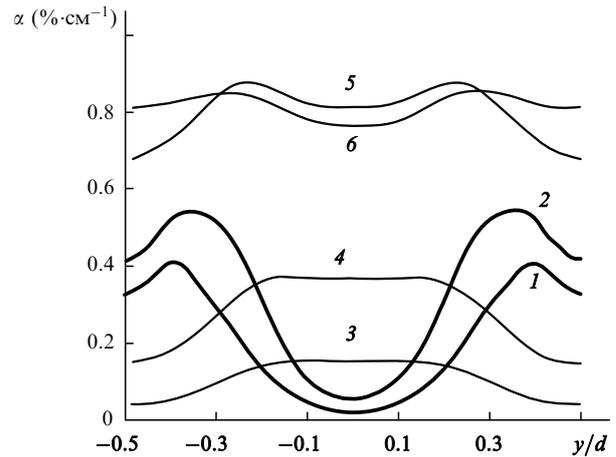


Рис.3. Распределение коэффициента усиления слабого сигнала α поперек потока для двухрядного инжектора с шахматным расположением отверстий при $\Pi = 6$, $\text{Re}_1 = 3.5 \times 10^3$ (1, 2) и для однорядного инжектора при $\Pi = 30$, $\text{Re}_1 = 1.7 \times 10^3$ (3–6); $x/d = 1.5$ (1, 3), 3 (2, 4), 6 (5) и 9 (6).

отверстий в определенном диапазоне расстояний от среза сопла образуется активная среда с равномерным и достаточно высоким усилением. Это также видно из рис.3, где кривыми 3–6 представлены зависимости усиления для такого инжектора при $\Pi = 30$.

2.2. Генерация излучения в устойчивом резонаторе

Для моделирования рабочего процесса, происходящего в устойчивом резонаторе, используются одномерная модель активной среды и нульмерная модель оптического поля. Предполагается, что в режиме генерации при большой внутрирезонаторной интенсивности можно ограничиться простейшей кинетической схемой, включающей накачку, тушение атомов иода водой и вынужденное излучение. Давление, температура и скорость среды считаются одинаковыми во всем объеме резонатора. В отличие от [9] применяется модель поля с плотностью фотонов, равномерной по поперечным по отношению к оптической оси координатам. Эта модель более соответствует действительности в случае устойчивого резонатора, чем модель резонатора Фабри–Перо. Задавая плотность фотонов и интегрируя кинетические уравнения, получаем распределение параметров среды вдоль потока.

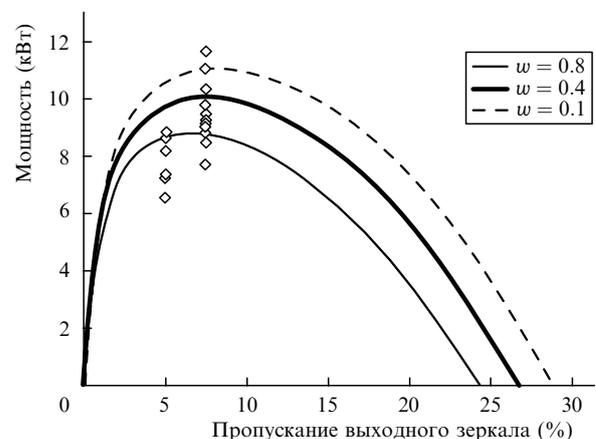


Рис.4. Зависимости выходной мощности излучения от пропускания выходного зеркала при разных концентрациях воды w (точки – данные эксперимента при расходе иода 7–11 ммоль/с).

На рис.4 показаны расчетные зависимости выходной мощности от пропускания зеркала для устойчивого резонатора с апертурой 6 × 6 см и длиной усиления 36 см. Разброс точек, соответствующих результатам экспериментов, определяется варьированием расхода иода. Наименьший расход иода составляет 7 ммоль/с, наибольший – 11 ммоль/с. Параметры активной среды, характерные для работы лазера с устойчивым резонатором, таковы: статическое давление $p = 3.5$ Тор, число Маха $M = 1.6$. Для учета неравномерного распределения усиления в направлении оптической оси введен коэффициент неравномерности

$$\eta = \frac{1}{g_{\max}L} \int_0^L g(x)dx,$$

где $g(x)$, g_{\max} – распределение коэффициента усиления слабого сигнала вдоль оптической оси и его максимальное значение соответственно; L – длина среды. По результатам вычислительного моделирования смещения характерное значение коэффициента $\eta = 0.7$.

Оптимальное пропускание выходного зеркала при длине активной среды 36 см составляет 5% – 10%. Как видно из рис.4, содержание паров воды существенно влияет на мощность генерации.

2.3. Генерация излучения в неустойчивом резонаторе

В данном случае используется конфокальный телескопический резонатор положительной ветви с симметричной прямоугольной апертурой 60 × 30 мм, при этом большая сторона апертуры направлена вдоль потока. Резонатор выполнен по трехпроходной (z -образной) схеме (рис.5). Плоскость, в которой лежит z -образная ось резонатора, ориентирована перпендикулярно потоку.

Энергетический расчет неустойчивого резонатора в геометрическом приближении позволил определить оптимальные число проходов в активной среде и коэффициент увеличения, а также оценить энергетическую эффективность неустойчивого резонатора. Расчет в дифракционном приближении позволил оценить чувствительность резонатора к разбюстировкам и неоднородностям активной среды, определить требования к качеству

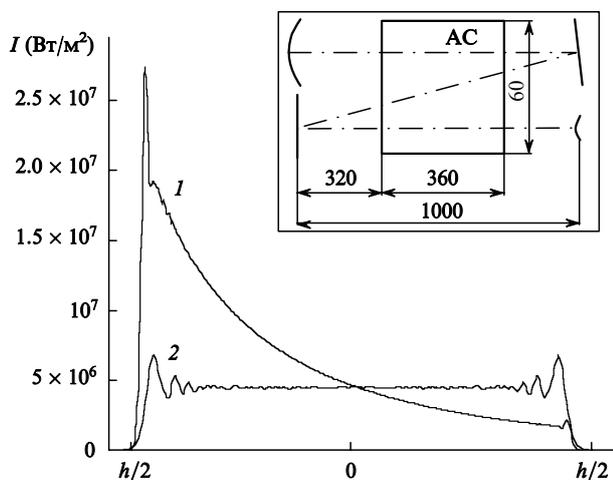


Рис.5. Распределение интенсивности перед выходным зеркалом резонатора ($\eta = 1$) в плоскостях, проходящих через ось резонатора параллельно (1) и перпендикулярно (2) направлению потока ($h = 60$ и 30 мм – соответствующие размеры апертуры, AC – активная среда; геометрические размеры установки на врезке даны в миллиметрах).

зеркал, уточнить результаты геометрического расчета (в плане нахождения оптимального увеличения), а также получить распределение интенсивности излучения в апертуре лазера и в дальней зоне.

Для расчета неустойчивого резонатора в дифракционном приближении использовался метод фазовых экранов. Коэффициент усиления среды в присутствии излучения определялся по одномерной модели активной среды (так же, как и в предыдущем разделе). Сферические зеркала заменялись квадратичными фазовыми корректорами. Решение параболического волнового уравнения проводилось спектральным методом с использованием алгоритма двумерного быстрого преобразования Фурье. Детали вычислительного метода можно найти в [10].

На рис.5 показано расчетное распределение интенсивности излучения в выходной апертуре (перед выходным зеркалом резонатора). Расчеты проводились при параметрах среды, характерных для режима работы с неустойчивым резонатором: $M = 0.8$, $p = 8$ Тор, $D = 4$, $t = 0.02$, $w = 0.15$. Коэффициент увеличения резонатора был равен 1.3. Как видно из рис.5, распределение интенсивности имеет выраженную неоднородность вниз по потоку, что связано с механизмом возбуждения активной среды.

3. Экспериментальная установка

В рассматриваемом кислородно-иодном лазере используется оригинальный химический ГСК струйного типа, в качестве разбавителя применяется азот, иод инжектируется в транзвуковой области соплового блока, а давление отработанной активной среды восстанавливается в сверхзвуковом диффузоре.

Общий вид ХКИЛ представлен на фото (рис.6). Его

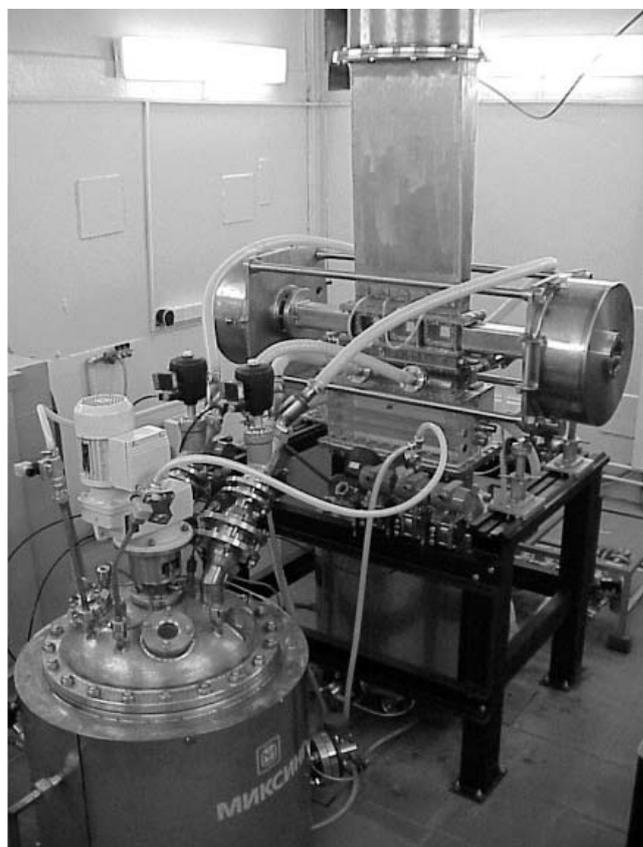


Рис.6. Общий вид лазера.

проектные параметры таковы: размеры активной среды $60 \times 60 \times 360$ мм, время работы 10 с, расход хлора 550 ммоль/с, расход азота 1100 ммоль/с (первичный) и 550 ммоль/с (вторичный), расход иода 7 ммоль/с, температура щелочного раствора перекиси водорода от -15 до -20 °С, расход щелочного раствора перекиси водорода 10 л/с, выход синглетного кислорода не менее 60 %, утилизация хлора не менее 90 %, число Маха активной среды $M = 2$ (с устойчивым резонатором).

ГСК состоит из двух симметричных реакционных камер, в которые подается чистый хлор. Первичный азот подводится на выходе реакционных камер через двухступенчатый инжектор, позволяющий регулировать давление в реакционных камерах генератора путем варьирования расходов азота через ступени. Конструкция инжектора выбрана по результатам численного моделирования таким образом, чтобы максимально ускорить смешение с первичным буферным газом и обеспечить равномерность концентрации кислорода на входе в сопло. Смешение кислородного потока с первичным азотом непосредственно на выходе из реакционной зоны и компактность канала транспортировки кислорода к сопловому блоку позволяют снизить потери синглетного кислорода (параметр $P\tau = 0.15$, где P – давление, τ – эффективное время пребывания в зоне смешения).

Прозрачность выходного зеркала устойчивого резонатора варьируется в диапазоне 5 % – 10 %. Увеличение неустойчивого резонатора составляет 1.3.

Инжекция иода осуществляется в критическом сечении сопла через два ряда отверстий, расположенных в шахматном порядке. Температура соплового блока поддерживается автоматически с точностью ± 0.5 °. Система приготовления и подачи щелочного раствора перекиси водорода вытеснительного типа оснащена системой контроля и управления температурой. Работа системы подачи иода основана на принципе испарения кристаллического иода. Поддержание температуры ее элементов осуществляется отдельным контроллером.

Установка работает с выхлопом в вакуумную емкость, и в нее входит сверхзвуковой диффузор. Конструктивно диффузор выполнен в виде профилированного канала, форма которого учитывает характер тепловыделения в потоке.

Система управления и сбора данных имеет трехуровневую иерархическую структуру и позволяет осуществлять управление параметрами рабочих процессов и их регистрацию во всех подсистемах лазерной установки как во время пуска, так и на всех стадиях подготовки. Система оснащена 82 каналами измерения и управления. Опрос измерительных каналов во время проведения пуска осуществляется с частотой 100 Гц.

Оценка выхода синглетного кислорода основана на измерении уровня спонтанного излучения на длине волны 1.268 мкм. При давлении в реакционной зоне ГСК 30–35 Тор $Y \approx 0.6$. Степень утилизации хлора U измеряется путем определения поглощения остаточным хлором излучения ртутной лампы в УФ диапазоне. Измерения показали, что при расходе хлора 400–550 ммоль/с $U \approx 0.95$. Измерение расхода иода производится по поглощению излучения с длиной волны около 500 нм. Коэффициент усиления активной среды определяется при помощи полупроводникового лазера с непрерывно перестраиваемой частотой. Длина волны полупроводникового лазера равна 1.315 мкм, ширина линии – 5 МГц, диа-

пазон перестройки частоты – 3 ГГц. Измеренный коэффициент усиления составляет 0.4 м^{-1} .

4. Результаты экспериментов

В экспериментах с устойчивым резонатором максимально достигнутая мощность излучения 12 кВт реализуется при расходе хлора 450 ммоль/с, расходе иода 8 ммоль/с и пропускании выходного зеркала 7.5 %. Это соответствует химической эффективности 29 %.

Статическое давление в резонаторной полости в рабочем режиме составляет 4.0 Тор, давление в трубке Питто – 15.5 Тор. Это соответствует числу Маха $M = 1.7$. Во время эксперимента давление в вакуумной емкости растет, а в резонаторной полости остается постоянным. Следовательно, в газодинамическом канале лазера реализуется полностью сверхзвуковой режим. Диффузор обеспечивает независимость давления в резонаторной полости от давления в вакуумной системе.

При определенном уровне противодействия, который зависит от конструкции диффузора, режим сверхзвукового течения в резонаторной полости начинает разрушаться – в этот момент начинает расти статическое давление. Физически это происходит из-за того, что зона псевдоскачка [11] смещается по каналу к сопловому блоку. Когда псевдоскачок входит в резонаторную полость, статическое давление начинает расти, а сверхзвуковой режим разрушается.

Исследование распределения статического давления вдоль диффузора показало, что совместное действие газодинамического торможения в косых скачках уплотнения и торможения из-за подвода тепла приводит к тому, что псевдоскачок становится существенно короче обычного псевдоскачка [11], вызванного газодинамическим торможением потока в канале без теплоподвода. Длина псевдоскачка и степень восстановления давления в сверхзвуковом диффузоре определяются конкретными параметрами физических процессов в лазере: степенью разбавления лазерной смеси, химической эффективностью и т. д. Таким образом, использование стандартной методики расчета диффузора [11] в случае диффузора ХКИЛ невозможно.

Эксперименты по исследованию влияния расхода иода на мощность лазерного излучения показали, что максимальная мощность достигается при расходе иода 9–11 ммоль/с, что составляет ~ 2 % расхода хлора.

В экспериментах с неустойчивым резонатором, схема которого описана выше, также обеспечивается устойчивая генерация излучения. Максимальная достигнутая мощность составила 2.6 кВт.

5. Заключение

Таким образом, нами разработан и испытан сверхзвуковой ХКИЛ с оригинальным ГСК струйного типа, на котором получена мощность 12 кВт с устойчивым резонатором и достигнута химическая эффективность 29 %. Сопловой блок низкого давления и сверхзвуковой диффузор обеспечивают сверхзвуковой режим течения при наличии интенсивного поля генерации в резонаторной полости. Трехуровневая система управления и сбора данных осуществляет эффективное управление процессом работы лазера и измерение основных лазерных параметров. Проведены эксперименты с неустойчивым ре-

зонатором. Разработана методика комплексного математического моделирования процессов смешения, активации рабочего тела и формирования излучения в оптическом резонаторе ХКИЛ. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало удовлетворительное согласование и адекватность методик математического моделирования.

При расчетно-экспериментальном исследовании были определены основные закономерности процессов смешения, активации среды и работы системы восстановления давления ХКИЛ, а также проанализированы особенности работы оптического резонатора.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность М.В.Загидуллину и В.Д.Николаеву за полезные рекомендации, В.Л.Мошкову – за обсуждение результатов и участие в экспериментах, А.С.Качкину, В.А.Володенко, А.С.Сиченко, Д.И.Горюнову и С.Я.Чакчиру – за разработку и реализацию системы управления и сбора данных; мы благодарим также других сотрудников, участвовавших в подготовке и проведении экспериментов.

1. Загидуллин М.В., Куров А.Ю., Куприянов Н.Л., Николаев В.Д., Свистун М.И., Ерасов Н.В. *Квантовая электроника*, **18**, 826 (1991).
2. Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 583 (1996).
3. Борейшо А.С., Мальков В.М., Савин А.В., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Трилис А.В., Страхов С.Ю. В сб. *Аннотации докладов Междунар. конф. IV Харитоновские чтения: Физика лазеров. Взаимодействие излучения с веществом* (Саров, 2002, с. 27).
4. Savin A.V., Ignatiev A.A., Fedotov A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 410 (2000).
5. Komissarov A.V., Goncharov V., Heaven M.C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 7 (2000).
6. Carrol D. L. *AIAA J.*, **33** (8), 1454 (1995).
7. Churassy S., Bouvier A.J., Erba B., Stera M. *J. Phys., Sec. 3*, **4** (10), 2013 (1994).
8. Zagidullin M.V., Nikolaev V.D., Khvatov N.A., Svistun M.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 246 (1998).
9. Hager G.D., Helms C.A., Truesdell K.A., Plummer D., Erkkila J., Crowell P. A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **32** (9), 1525 (1996).
10. Sigman A.E., Sziklas E.A. *Appl. Opt.*, **14**, 1874 (1975).
11. Ktalkherman M.G., Malkov V.M., Ruban N.A. *AIAA Paper* № 90 – 1512 (1990).