

# Коэффициент усиления активной среды электроразрядного кислород-йодного лазера

Ю. В. Колобянин, Ю. А. Адаменков,  
Б. А. Выскубенко, Л. В. Горячев,  
С. П. Ильин, А. М. Калашник,  
Т. В. Рахимова, Г. С. Рогожников

*Приведены результаты исследования коэффициента усиления активной среды электроразрядного кислород-йодного лазера. Использовался электроразрядный генератор синглетного кислорода на основе СВЧ разряда, работающий на чистом кислороде и его смесях с гелием при парциальном давлении кислорода от 3 до 15 торр. Активная среда формировалась с помощью сопловой решетки эжекторного типа размером 10 × 50 мм. Синглетный кислород подавался через звуковые сопла, а смесь молекулярного йода с азотом или гелием – через конические сверхзвуковые сопла. В результате проведенной оптимизации получен положительный коэффициент усиления активной среды.*

## Введение

В настоящее время электроразрядный метод получения синглетного кислорода (СК) вышел на качественно новый уровень. Достигнуто существенное продвижение в понимании физических процессов, происходящих в электрических разрядах, перспективных для получения СК. Созданы новые методы диагностики низкотемпературной плазмы. Найдены и широко используются катализаторы для уменьшения в разряде вредных примесей, таких, например, как атомарный кислород. В результате характеристики электроразрядных генераторов синглетного кислорода (ЭР ГСК) значительно возросли [1–3]. При использовании высокочастотного (ВЧ) и микроволнового (СВЧ) разрядов был получен положительный коэффициент усиления в активной среде, пригодной для использования в электроразрядном кислород-йодном лазере (ЭР КИЛ) [4, 5]. И наконец, после более чем двадцатипятилетних усилий исследователей всего мира получено лазерное излучение в сверхзвуковом ЭР КИЛ [6].

Целью настоящей работы было дальнейшее совершенствование ЭР ГСК на основе движущегося СВЧ разряда [2] и его использование для получения положительного коэффициента усиления активной лазерной среды в сверхзвуковом ЭР КИЛ.

## 1. Исследование характеристик ЭР ГСК

Эксперименты выполнялись с использованием ЭР ГСК на основе движущегося СВЧ разряда, конструкция которого была подробно описана ранее [2]. В предыдущей работе были исследованы характеристики ЭР ГСК на чистом кислороде и смесях кислорода с гелием ( $O_2:He = 1:(1-2)$ ) при полном давлении газа в разрядной трубке 1–4 торр и скорости газа 30–100 м/с. Были получены максимальные выходы синглетного кислорода: 22 % – для 2 торр чистого кислорода

и 27–30 % – для 2–3 торр смесей  $O_2:He = 1:(1-2)$ . Абсолютные концентрации СК при этом составляли  $(4-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а энергетическая эффективность наработки СК – 5–7 %. Катализаторы для удаления атомарного кислорода из продуктов разряда не использовались.

С точки зрения применения синглетного кислорода в ЭР КИЛ интерес представляют более высокие давления СК. В настоящей работе проведены исследования абсолютной концентрации, выхода и энергетической эффективности наработки СК в движущемся СВЧ разряде в чистом кислороде и его смесях с гелием при парциальном давлении кислорода от 3 до 15 торр. В экспериментах использовалась кварцевая разрядная трубка с внутренним диаметром 8,5 мм, помещенная внутрь коаксиального СВЧ резонатора. Скорость газа в трубке составляла от 50 до 100 м/с. Разрядная трубка за СВЧ резонатором охлаждалась водой. В отличие от предыдущих работ на внутреннюю поверхность разрядной трубки было нанесено покрытие из окиси ртути для удаления атомарного кислорода из газового потока. Измерение характеристик синглетного кислорода проводилось непосредственно в разрядной трубке на расстоянии  $\sim 25$  см от выхода СВЧ резонатора.

Абсолютные концентрации молекул кислорода в состояниях  $a^1\Delta_g$  (0,98 эВ) и  $b^1\Sigma_g^+$  (1,63 эВ) определялись методами эмиссионной спектроскопии. Измерение абсолютной концентрации молекул кислорода в синглетном  $O_2(a^1\Delta_g)$  состоянии проводилось с помощью калиброванного фемтоваттного фотоприемника фирмы New Focus, Inc., модель 2153, и интерференционного фильтра ( $\lambda_0 = 1,27$  мкм,  $\Delta\lambda = 40$  нм).

Мощность излучения на входе в СВЧ резонатор и мощность излучения, отраженная от резонатора, регистрировались с помощью калиброванного ответвителя и ваттметра МЗ-46.

На рис. 1 представлены результаты экспериментов, выполненных

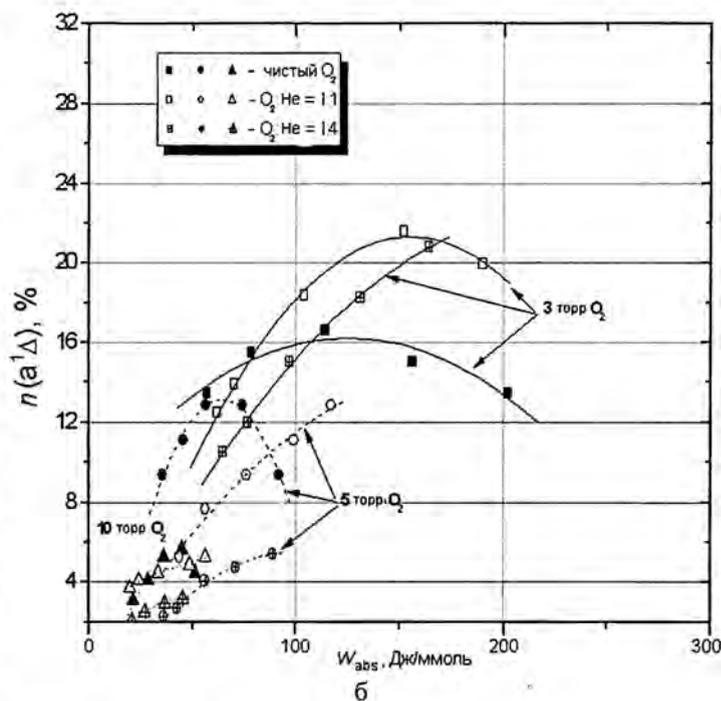
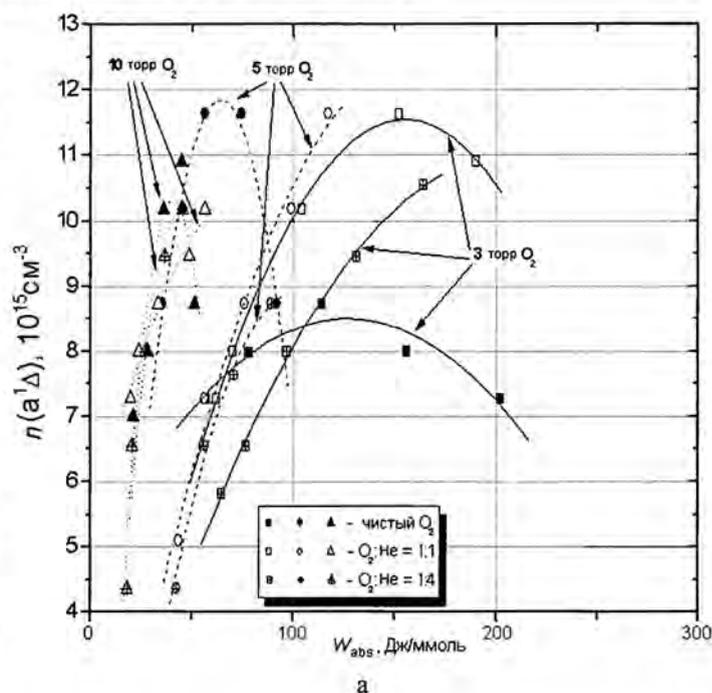


Рис. 1. Зависимости абсолютной концентрации (а) и выхода (б) СК от энерговклада в движущийся СВЧ разряд

с чистым кислородом и на смесях  $O_2:He = 1:1$  и  $1:4$  при парциальных давлениях кислорода от 3 до 10 торр (общее давление газа от 3 до 50 торр).

Из полученных результатов видно, что при одинаковых парциальных давлениях кислорода значения получаемых абсолютных концентраций и выхода СК для смесей с гелием, как правило, выше, а значения энергетической эффективности наработки ниже, чем для чистого кислорода. По совокупности характеристик наиболее предпочтительной оказалась смесь  $O_2:He = 1:1$  при полном давлении 6 торр, для которой максимальная абсолютная концентрация СК составила  $\sim 1,15 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а выход СК  $\sim 22 \%$  при удельном энергокладе около 150 Дж/ммоль. При этом энергетическая эффективность наработки СК составляла  $\sim 12 \%$ . Такая смесь газов и была использована для исследования коэффициента усиления ЭР КИЛ.

## 2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на установке, блок-схема которой изображена на рис. 2. Схема установки подобна схеме химического КИЛ и отличается только использованием ЭР ГСК вместо химического ГСК.

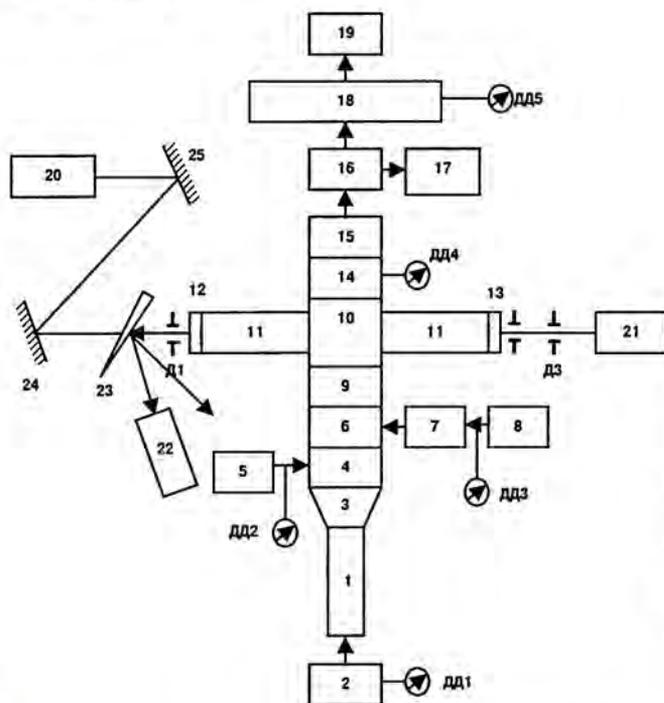


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования ЭР КИЛ: 1 – ЭР ГСК; 2 – система подачи кислорода; 3 – переходник; 4 – инжектор буферного газа; 5 – система подачи буферного газа; 6 – инжектор подачи йода; 7 – йодная кювета; 8 – система подачи газа-носителя; 9 – сопло; 10 – газовый канал; 11 – оптический блок; 12, 13 – зеркала оптического резонатора; 14 – измерительная секция; 15 – диффузор; 16 – йодная ловушка; 17 – система утилизации йода; 18 – вакуумная емкость; 19 – система откачки; 20 – гелий-неоновый лазер; 21 – диодный лазер; 22 – приемник излучения; 23 – клин; 24, 25 – зеркала; Д1–Д3 – диафрагмы; ДД1–ДД5 – датчики давления

Для получения потока активной лазерной среды использовалась эжекторная сопловая решетка (рис. 3), идея которой предложена в работе [7]. Поперечный размер решетки  $10 \times 50 \text{ мм}$ .

Синглетный кислород в смеси с гелием подавался через звуковые сопла, расположенные в три ряда с шагом 4,4 мм. Сопла, расположенные в крайних рядах (24 шт.), имели диаметр критического сечения 0,6 мм, в среднем ряду (12 шт.) – 0,8 мм. Смесь молекулярного йода с газом-носителем (азотом или гелием) подавалась через сверхзвуковые конические сопла (22 шт.) с полууглом расширения  $10^\circ$ , диаметром критического сечения 0,4 мм и выходным диаметром 4,2 мм, расположенные в два ряда и образующие с соплами для подачи синглетного кислорода плотную квадратную упаковку.

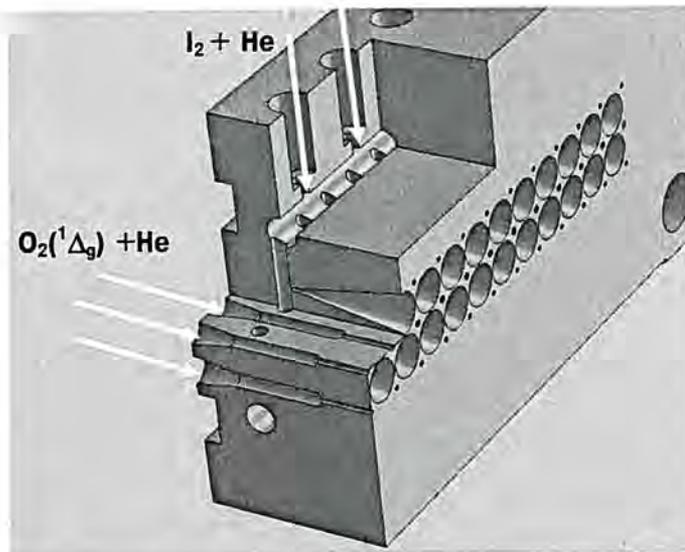


Рис. 3. Эжекторная сопловая решетка, использованная в экспериментах

Для получения газообразного йода использовалась кювета, изготовленная из отрезка кварцевой трубы, внутрь которой помещался лоток с кристаллическим йодом. Пары йода при комнатной температуре захватывались газом-носителем и транспортировались в сопловую решетку. Для предотвращения конденсации йода на элементах конструкции тракт подачи йода и вся установка в целом подогревались до температуры, на 10–20 градусов превышающей комнатную. Для измерения давлений и расходов газа использовались калиброванные датчики давления и дроссельные шайбы известного сечения.

### 3. Методики измерений

Измерение коэффициентов усиления и температуры активной среды было выполнено с использованием метода диодной лазерной спектроскопии высокого разрешения [8]. Методика разработана на основе одномодового перестраиваемого диодного лазера Vortex 6025 фирмы New Focus, Inc. с центральной длиной волны излучения 1315,273 нм и диапазоном перестройки спектра 0,29 нм.

Для точной привязки частоты генерации диодного лазера к частотам электронных переходов атомарного йода была использована горячая йодная кювета, в которой атомарный йод образуется из молекулярного йода за счет термической диссоциации. Степень диссоциации молекулярного йода  $I_2$  определялась температурой и давлением паров йода внутри кюветы и составляла ~ 38 % при температуре в кювете 900 К.

Измерение коэффициента усиления (поглощения) активной газовой среды проводилось с помощью резонаторного метода. В этом методе зондирующее излучение многократно проходит через исследуемую область, претерпевая ослабление или усиление при каждом проходе. В устойчивом резонаторе с коэффициентом отражения зеркал близким к единице из-за большого количества проходов зондирующий луч значительно ослабляется или усиливается, поскольку даже незначительное поглощение или усиление излучения на одном проходе приводит к заметным изменениям мощности излучения, выходящего из резонатора. Значения коэффициентов отражения

зеркал оптического резонатора были предварительно измерены и при доверительной вероятности 90 % составили  $R = 0,9964 \pm 0,0009$  (использовались два одинаковых зеркала).

Коэффициент усиления (поглощения) определялся в центре контура. На рис. 4 в качестве примера приведены зависимости пропускания горячей йодной кюветы и активной среды от длины волны зондирующего лазерного излучения, полученные в эксперименте.

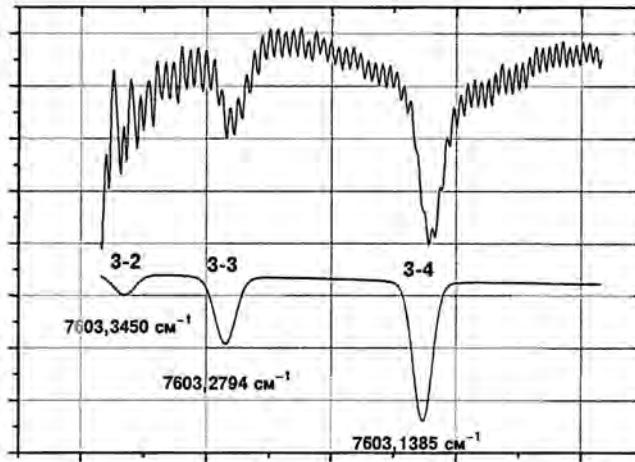


Рис. 4. Зависимости относительного пропускания горячей йодной кюветы (нижний график) и активной среды (верхний график) от длины волны зондирующего лазерного излучения (указаны переходы атомарного йода и соответствующие им волновые числа)

Поскольку в экспериментах давление активной среды в области оптического резонатора не превышало 1 торр, ширина линии усиления (поглощения) атомарного йода определялась преимущественно доплеровским механизмом уширения. Ширина доплеровского контура (в МГц) определялась по формуле

$$W_D = 2\nu_0 \sqrt{2 \ln 2 R \frac{T}{\mu}} 10^{-6} \cong 14,4945 \sqrt{T}. \quad (1)$$

Температура газового потока определялась из измеренной полуширины контура поглощения атомарного йода с использованием формулы (1). Типичные кривые пропускания зондирующего излучения активной средой и пример аппроксимации кривой поглощения функцией Фойхта представлены на рис. 5.

Выражение для коэффициента усиления (поглощения) активной газовой среды ( $m^{-1}$ ) может быть записано в следующем виде:

$$g_{34} = \frac{7}{12} A_{34} \frac{\lambda_0^2}{8\pi} \Phi \Delta N_{34} = \sigma_{34} \left\{ [I^*] - \frac{[I]}{2} \right\}, \quad (2)$$

где  $A_{34} = 5,1 \text{ с}^{-1}$  – коэффициент Эйнштейна для перехода  ${}^2P_{1/2}(F=3) \rightarrow {}^2P_{3/2}(F=4)$  атома йода,  $\lambda_0 = 1,315246 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  – длина волны излучения (поглощения) атома йода на этом переходе;  $\Phi$  – функция Фойхта;  $\sigma_{34}$  – сечение перехода  ${}^2P_{1/2}(F=3) \rightarrow {}^2P_{3/2}(F=4)$  атома йода;  $[I^*] = [I({}^2P_{1/2})]$  – концентрация возбужденного атомарного йода;  $[I] = [I({}^2P_{3/2})]$  – концентрация атомарного йода в основном состоянии.

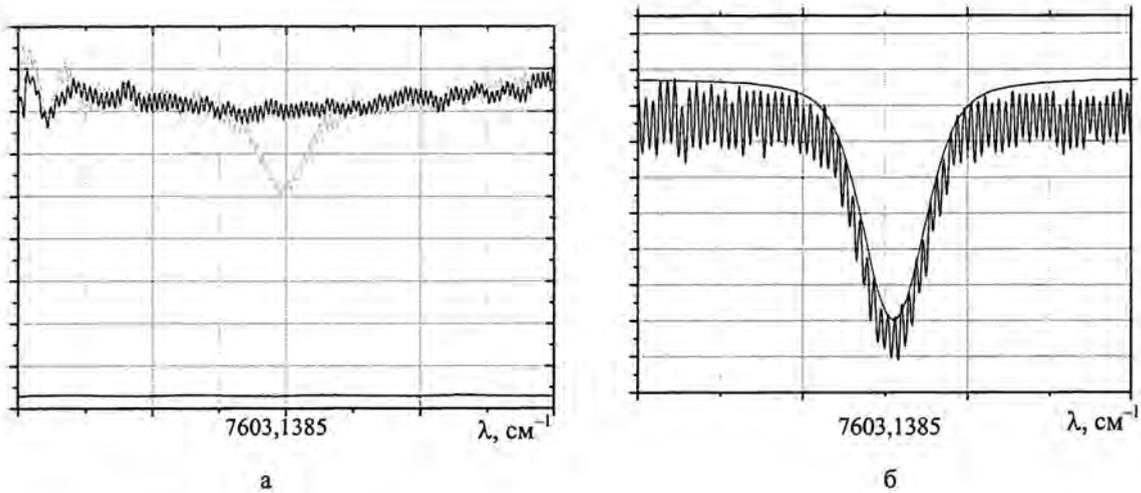


Рис. 5. Типичные кривые относительного пропускания зондирующего излучения активной средой (а) и пример аппроксимации кривой поглощения функцией Фойхта (б)

В случае чисто доплеровского механизма уширения сечение перехода  $\sigma_{34}$  (в  $\text{см}^2$ ) равно:

$$\sigma_{34} = \frac{7}{12} A_{34} \frac{\lambda_0^2}{4\pi^2} \frac{\sqrt{\pi \ln 2}}{W_D} 10^4 \cong \frac{1,332 \cdot 10^{-16}}{\sqrt{T}} \quad (3)$$

Зондируя активную среду излучением перестраиваемого диодного лазера вблизи центральной частоты перехода  ${}^2P_{1/2}(F=3) \rightarrow {}^2P_{3/2}(F=4)$ , можно измерить форму линии и коэффициент усиления (поглощения) среды, а из полуширины линии определить статическую температуру среды. Это позволяет определить  $g_{34}$  и  $\sigma_{34}$ , а затем с помощью формулы (2) разность  $[I^*] - [I]/2$ . Для определения концентраций  $[I^*]$  и  $[I]$  необходимо еще хотя бы одно независимое измерение. Таким измерением может быть определение разности концентраций  $[\Delta I_2] = [I_2]_0 - [I_2]_k = 0,5 \cdot \{[I^*] + [I]\}$  молекулярного йода до и после подачи синглетного кислорода или непосредственное измерение  $[I^*]$ .

Абсолютные концентрации молекулярного йода измерялись абсорбционным методом по поглощению лазерного излучения с длиной волны 543,5 нм. Использовался He-Ne лазер модели 1676 фирмы JDS Uniphase, Inc. Предварительно было измерено сечение поглощения йода на длине волны зондирующего излучения, которое оказалось равным  $(5,65 \pm 0,35) \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ .

Определение концентрации возбужденного атомарного йода  $[I^*]$  проводилось в области оптического резонатора актинометрическим методом. Использованный метод был идентичен актинометрическому методу измерения синглетного дельта-кислорода. Единственное отличие заключалось в том, что перед фотоприемником устанавливался узкополосный интерференционный фильтр с центром полосы пропускания 1,315 мкм и полушириной около 0,010 мкм, позволявший регистрировать излучение атомарного йода и одновременно отсекал спонтанное излучение СК на длине волны 1,268 мкм.

#### 4. Результаты экспериментов и их обсуждение

Проведены измерения коэффициента усиления (поглощения) активной среды электроразрядного КИЛ. В экспериментах использовался ЭР ГСК на основе движущегося СВЧ разряда, описанный выше в разделе 2, работавший на смеси  $O_2:He = 1:1$  при общем давлении 6 торр и расходе около 1 ммоль/с. При удельном энергокладе около 150 Дж/ммоль генератор вырабатывал СК с абсолютной концентрацией  $\sim 1,15 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и выходом  $\sim 22\%$ . В качестве носителя йода использовались как азот, так и гелий. Зондирование активной среды излучением перестраиваемого диодного лазера на переходе  ${}^2P_{1/2}(F=3) \rightarrow {}^2P_{3/2}(F=4)$  атома йода при комнатной температуре носителя йода позволило зарегистрировать только поглощение в среде. В широком диапазоне варьирования концентрации йода коэффициент поглощения среды изменялся от нуля до приблизительно  $10^{-4} \text{ см}^{-1}$ . При использовании в качестве носителя йода гелия с расходом  $\sim 0,3$  ммоль/с, охлажденного до температуры жидкого азота, зарегистрировано как поглощение, так и усиление активной среды, причем усиление наблюдалось в крыльях контура поглощения и составляло  $(4-6) \times 10^{-6} \text{ см}^{-1}$  (см. рис. 6).

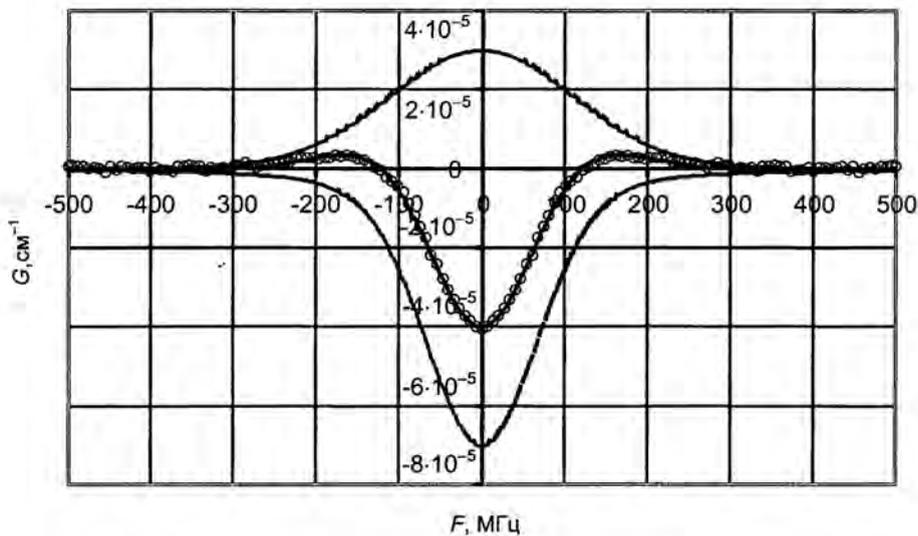


Рис. 6. Сравнение экспериментального и расчетного контуров поглощения и усиления активной среды:  $\circ$  – эксперимент; — — — – расчет (Фойхт 1,  $T = 310 \text{ K}$ ); - - - – расчет (Фойхт 2,  $T = 95 \text{ K}$ ); — — — – Фойхт 1 + Фойхт 2

Полученные результаты можно объяснить особенностями формирования активной среды с помощью использованной в экспериментах эжекторной сопловой решетки. Известно, что высокоскоростные параллельные струи газа низкого давления очень медленно перемешиваются и необходимо достаточно большое расстояние по потоку газа (порядка 100 и более характерных масштабов смешения), чтобы струи хорошо перемешались [9]. В описываемых экспериментах расстояние от среза сопловой решетки до оси оптического резонатора составляло около 60 мм (примерно 15 характерных масштабов смешения), поэтому перемешивание компонентов активной среды было плохим. В результате вдоль оптической оси резонатора можно выделить пять характерных областей: три области – напротив сопел для подачи синглетного кислорода и две области – напротив сопел для подачи йода и газа-носителя. В первых трех областях сосредоточена большая часть синглетного кислорода, а в пограничной зоне смешения присутствуют йод и холодный ге-

лий. Температура газа в этой области близка к комнатной, а концентрация СК согласно проведенным измерениям соответствует выходу СК 18–20 %. Такая среда может быть усиливающей. В других двух областях находятся преимущественно холодный гелий и молекулярный йод, а также небольшое количество СК в пограничной зоне смешения. Практически весь СК в этой области расходуется на диссоциацию молекулярного йода, поэтому эта область, по-видимому, является поглощающей. Проведенные расчеты показали, что "слоеная" активная среда при лазерном зондировании резонаторным методом дает картину, коррелирующую с экспериментальными данными.

На рис. 6 приведены результаты вычислений фойхтовских контуров поглощения и усиления активной среды для условий одного из проведенных экспериментов. Видно, что экспериментальные данные хорошо описываются суммой двух фойхтовских контуров: контура усиления для температуры 310 К и контура поглощения для температуры 95 К. Исходя из полученных результатов можно оценить значения усиления и поглощения активной среды в центре контура, которые соответственно равны  $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и  $-7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ .

## Выводы

1. Проведены исследования абсолютной концентрации, выхода и энергетической эффективности наработки СК в движущемся СВЧ разряде в чистом кислороде и в его смесях с гелием при парциальном давлении кислорода от 3 до 15 торр при использовании окиси ртути для удаления атомарного кислорода из газового потока.

2. Создана экспериментальная установка для исследования ЭР КИЛ, оснащенная современными методиками измерений.

3. Проведены измерения коэффициента усиления (поглощения) активной среды электро-разрядного КИЛ. Показано, что экспериментальные данные хорошо описываются суммой двух фойхтовских контуров: контура усиления для температуры 310 К и контура поглощения для температуры 95 К. Исходя из полученных результатов коэффициенты усиления и поглощения активной среды в центре контура составляют  $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и  $-7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  соответственно.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного научно-технического центра (проект МНТЦ № 1581).

## Список литературы

1. Vasiljeva A. N., Klopovsky K. S., Kovalev A. S. et al. On the possibility of  $\text{O}_2(^1\Delta_g)$  production by a non-self-sustained discharge for oxygen-iodine laser pumping // Journal of Physics D: Applied Physics. 2004. Vol. 37. P. 2455–2468.
2. Savin Yu. V., Goryachev L. V., Adamenkov Yu. A. et al. Singlet oxygen production and quenching mechanisms in traveling microwave discharge // Ibid. P. 3121–3128.

3. Брагинский О. В., Васильева А. Н., Клоповский К. С. и др. Генерация синглетного кислорода для кислород-йодного лазера в высокочастотном разряде // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 1. С. 21–26.
4. Carroll D. L., Verdeyen J. T., King D. M. et al. Path to the Measurement of Positive Gain on the 1315-nm Transition of Atomic Iodine Pumped by  $O_2(a^1\Delta)$  Produced in an Electric Discharge // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2005. Vol. 41, N 2. P. 213–223.
5. Rawlins W. T., Lee S., Kessler W. J., Davis S. J. Observations of gain on the  $I(^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2})$  transition by energy transfer from  $O_2(a^1\Delta)$  generated by a microwave discharge in a subsonic-flow reactor // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86, N 051105-1-3.
6. Carroll D. L., Verdeyen J. T., King D. M., et al. Continuous-wave laser oscillation on the 1315 nm transition of atomic iodine pumped by  $O_2(a^1\Delta)$  produced in an electric discharge // Ibid. N 111104-1-3.
7. Nikolaev V. D. Comparative analysis of the methods of preparing active medium in supersonic COIL // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 3268. P. 157–162.
8. Rawlins W. T., Davis S. J., Lee S. et al. Optical Diagnostics and Kinetics of Discharge-Initiated Oxygen-Iodine Energy Transfer // AIAA Paper 2003-4032, 2003.
9. Yang T. T., Hsia Y. C., Moon L. F., Dickerson R. A. Advanced Mixing Nozzle Concept for COIL // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 3931. P. 116–130.

## **Gain Constant of the Active Medium of Electric-Discharge Oxygen-Iodine Laser**

Yu. V. Kolobyenin, Yu. A. Adamenkov, B. A. Vyskubenko, L. V. Goryachev,  
S. P. Ilyin, A. M. Kalashnik, T. V. Rakhimova, G. S. Rogozhnikov

*Being presented are the results of studies of gain constant characteristic of the active medium of electric-discharge oxygen-iodine laser. The study involved the electric discharge generator of singlet hydrogen based on microwave discharge, operating with pure oxygen or its mixture with helium under partial oxygen pressure of 3 to 15 Torr. The active medium was formed by the ejector-type  $10 \times 50 \text{ mm}^2$  nozzle array. Singlet oxygen was forced through sonic nozzles, whereas the mixture of molecular iodine and nitrogen or helium was fed through conic supersonic nozzles. The above optimization efforts resulted in the positive gain constant for the active medium.*