

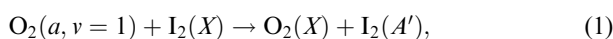
Распределение молекул O₂ по колебательным уровням на выходе генератора синглетного кислорода

В.Н.Аязов, С.Ю.Пичугин, В.С.Сафонов, Н.И.Уфимцев

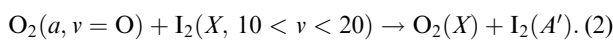
Получены простые формулы для нахождения населенностей колебательных уровней синглетного кислорода, генерируемого химическим способом в газожидкостном генераторе. Скорость убыли колебательной энергии кислорода лимитируется обменом между его первым колебательным уровнем и изгибной модой молекулы воды. Показано, что населенности молекул синглетного кислорода на втором и третьем колебательных уровнях сравнимы с населенностью кислорода в электронно-возбужденном состоянии $b^1\Sigma_g^+$. Обоснована возможность образования электронно-возбужденного иода в реакции $O_2(a^1\Delta_g, v=2) + I_2(X) \rightarrow O_2(\tilde{X}^3\Sigma_g^-) + I_2(A^3\Pi_u)$, который может являться промежуточным состоянием в процессе диссоциации иода в среде синглетного кислорода.

Ключевые слова: синглетный кислород, колебательная кинетика, диссоциация иода.

В работе [1] регистрировались спектры излучения димолы кислорода на выходе химического генератора синглетного кислорода (ГСК). Сравнение интенсивностей полос излучения на длинах волн $\lambda = 579$ и 634 нм показало, что населенность кислорода на первом колебательном уровне существенно неравновесна. Колебательно-возбужденный синглетный кислород (СК) может играть важную роль в формировании активной среды кислородно-иодного лазера, в особенности в процессе диссоциации I₂ [2, 3], механизм которой остается до конца не ясен. В последних публикациях [3, 4] приводятся ряд доводов в пользу того, что промежуточным состоянием при диссоциации иода является его электронно-возбужденное состояние I₂(A³Π_{2u}). В [3] предполагалось, что заселение данного состояния осуществляется в реакции

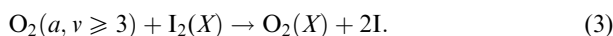


а в [4] – в реакции



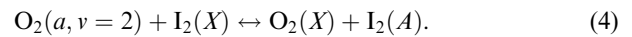
Здесь и далее O₂(X), O₂(a), O₂(b) – молекула кислорода в электронных состояниях X³Σ_g⁻, a¹Δ_g и b¹Σ_g⁺; I₂(X); I₂(A'), I₂(A) – молекула иода в электронных состояниях X¹Σ_g⁺, A'³Π_{2u}, A³Π_{1u}.

Колебательно-возбужденный СК с $v > 1$ также может быть вовлечен в диссоциацию I₂. Например, в [5] предполагается, что иод распадается в процессе



Обратим внимание на то, что энергии возбуждения состояний O₂(a, v = 2) и I₂(A) практически равны – 10823

и 10847 см⁻¹ соответственно. Можно предположить, что между этими состояниями происходит резонансный ЕЕ-обмен энергией в процессе

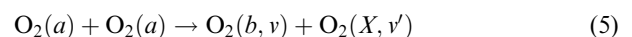


Присутствие I₂(A) в ходе диссоциации иода наблюдалось в [6]. Данное электронно-возбужденное состояние также может являться промежуточным состоянием при диссоциации иода в среде СК.

Таким образом, процессы с участием колебательно-возбужденного СК могут оказаться доминирующими при распаде молекулярного иода, поэтому представляет несомненный интерес нахождение населенностей колебательных состояний O₂(a, v) в процессе формирования среды кислородно-иодного лазера. Данная работа посвящена исследованию распределения молекул кислорода по колебательным уровням на выходе ГСК.

Газовая смесь на выходе ГСК состоит из кислорода, непрореагировавшего в генераторе хлора Cl₂, буферного газа (N₂, Ar или He), паров воды H₂O и перекиси водорода H₂O₂. Колебательная кинетика в данной газовой среде определяется, в основном, процессами с участием молекул O₂ и H₂O [3]. Будем предполагать, что из ГСК выходит смесь только двух газов – кислорода и паров воды с характерными концентрациями $N_O \approx 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³ и $N_w \approx 10^{15} - 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³ соответственно. Кислород может находиться в одном из электронных состояний X³Σ_g⁻, a¹Δ_g и b¹Σ_g⁺ с концентрациями N_X, N_a, N_b , причем доля электронно-возбужденного синглетного кислорода O₂(a) во всей массе кислорода может быть существенной: $\eta_A = N_a/N_O \approx 0.4 - 1$, где $N_O = N_X + N_a + N_b$.

Релаксация СК в реакции пуллинга



происходит с характерным временем $\tau_A = (K_5 N_a)^{-1} \approx 0.01 - 0.1$ с, где K₅ – константа скорости реакции (5). Такое время жизни позволяет транспортировать СК с незначительными потерями на относительно большие

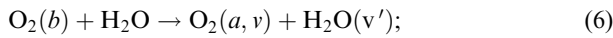
Самарский филиал Физического института им П.Н.Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: asu@fian.smr.ru; web site: http://www.fian.smr.ru

Табл.1. Константы скоростей реакций в O₂ – H₂O-среде.

Константа скорости K_i (см ³ /с)	Литература
$K_5 = 2 \cdot 10^{-17}$	[7]
$K_6 = 6.7 \cdot 10^{-12}$	[8]
$K_7 = 10^{-12}$	[9, 10]
$K_8 = 1.7 \cdot 10^{-11}$	[11]
$K_9^O = 2 \cdot 10^{-18}$	[12]
$K_9^W = 10^{-16}$	[13]
$K_{10} = 3 \cdot 10^{-13}$	[3, 14]
$K_{11} = 5 \cdot 10^{-11}$	[15]

расстояния. Численные значения используемых констант скоростей реакций приведены в табл.1.

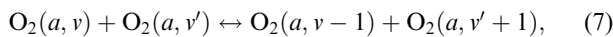
Образующийся в реакции (5) электронно-возбужденный кислород O₂(*b*) тушится при столкновениях с молекулами воды:



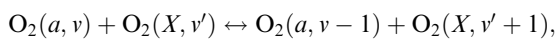
характерное время тушения $\tau_6 = (K_6 N_w)^{-1} \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ с. За это же время устанавливается его стационарная концентрация N_b в газовом потоке. Доля O₂(*b*) в общей массе кислорода $\eta_b = N_b/N_O$ незначительна и с хорошей точностью находится из баланса скоростей его наработки в реакции (5) и убыли в реакции (6): $\eta_b = K_5 \eta_A^2 / (K_6 \eta_w) \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ (см. табл.1 и рис.1), где $\eta_w = N_w/N_O$.

Заселение колебательных уровней кислорода на выходе ГСК осуществляется в процессах дезактивации электронной энергии (5) и (6). В реакции (5) кислород образуется, в основном, на втором колебательном уровне [16]. О распределении колебательной энергии в продуктах реакции (6) известно мало. В [17] приведена вероятность колебательного возбуждения H₂O(001), равная 0,1. По-видимому, основная часть выделяющейся в реакции энергии поступает на возбуждение колебательных уровней кислорода вплоть до $v = 3$.

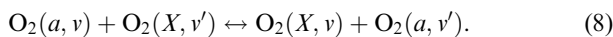
Перераспределение колебательных квантов между колебательными уровнями СК происходит в ходе VV'-обмена,



а между электронными состояниями – в ходе VV'-обмена,

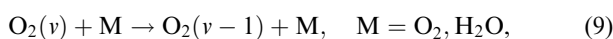


и в ходе EE-обмена,



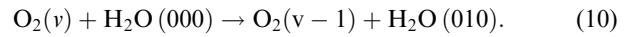
Характерное время установления колебательного распределения в кислороде $\tau_{VV} = (K_7 N_O)^{-1} \approx 10^{-6} - 10^{-5}$ с, что намного меньше характерного времени релаксации СК.

Отличительной особенностью кислородной среды является низкая скорость VT-релаксации (см. табл.1)

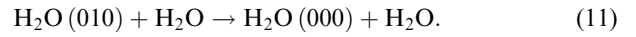


с характерным временем $\tau_{VT} = (K_9^W N_w + K_9^O N_O)^{-1} \approx 0.1 - 1$ с. Передача колебательной энергии O₂ в тепловую осуществляется преимущественно следующим обра-

зом [3]. На первом этапе кислород передает колебательные кванты молекулам воды в процессе



На втором этапе колебательная энергия передается в поступательные степени свободы в процессе



Экспериментально установлено [2], что доля колебательно-возбужденного кислорода на первом колебательном уровне на выходе ГСК не превышает нескольких процентов. Населенность кислорода на уровнях $v \geq 2$ еще меньше, чем на первом уровне, т.е. $\eta_i = N_i/N_O \ll 1$ ($i = 1, 2, \dots$), где N_i – концентрация кислорода на i -м колебательном уровне. Учтем также, что $\tau_{VT} \gg \tau_{VV}$, $\eta_w \ll \eta_O$. Тогда в процессе VV- и VV'-обмена колебательные кванты переходят на первый колебательный уровень кислорода практически без потерь. Поскольку концентрация кислорода на первом колебательном уровне N_1 существенно превышает концентрацию на вышестоящих уровнях, то процесс (10) дает существенный вклад в убыль колебательных квантов кислорода только для первого уровня.

В квазиравновесных условиях концентрации молекул кислорода на первом колебательном уровне и молекул H₂O(010) можно найти из баланса скоростей образования и исчезновения этих молекул в предположении быстрого установления распределения колебательной энергии для всех трех электронных состояний кислорода:

$$nK_5 N_a^2 - K_{10} N_1 N_w + K_{10} N_{w1} N_O \exp(\Delta E/kT) - N_1 (K_9^O N_O + K_9^W N_w) + (K_9^O N_O^2 + K_9^W N_O N_w) \exp(-E_1/kT) = 0, \quad (12)$$

$$K_{10} N_1 N_w - K_{10} N_{w1} N_O \exp(\Delta E/kT) + mK_5 N_a^2 - K_{11} N_w N_{w1} + K_{11} N_w^2 \exp(-E_w/kT) = 0. \quad (13)$$

Здесь N_{w1} – концентрация молекул H₂O(010); $\Delta E = E_w - E_1$; E_w и E_1 – энергии колебательного уровня H₂O(010) и первого уровня O₂; n – суммарное число колебательных квантов O₂, образующихся в реакциях (5), (6); m – среднее число колебательных квантов на изгибной моде молекулы воды, возбуждаемых в реакции (6); K_9^M и K_{10} – константы скоростей процессов (9) и (10) для $v = 1$. Так как $\tau_A \gg \tau_6$, скорость дезактивации электронной энергии лимитируется процессом (5). В уравнении (13) учтено, что VV-обмен между валентными и изгибной модами H₂O происходит намного быстрее VT-релаксации валентных мод [3, 15].

При дезактивации электронной энергии в реакции (6) могут непосредственно возникать колебательно-возбужденные молекулы СК на колебательном уровне вплоть до $v = 3$. Оценки показывают, что колебательно-возбужденный кислород с $v = 2, 3$ может принимать активное участие в формировании активной среды кислородно-иодного лазера, если его доля в общей массе кислорода $\eta_i \geq 10^{-5}$. Концентрацию молекул кислорода на упомянутых уровнях найдем из балансных уравнений, аналогичных (12) и (13):

$$\begin{aligned} \gamma_2 K_5 N_a^2 + K_{1,1} N_1^2 + K_{3,0} N_3 N_O \\ - K_{2,0} N_2 N_O - K_{2,1} N_2 N_1 = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\gamma_3 K_5 N_a^2 + K_{2,1} N_2 N_1 - K_{3,0} N_3 N_O = 0, \quad (15)$$

где γ_i – сумма вероятностей возбуждения i -го колебательного уровня O_2 в процессах (5) и (6); K_{ij} – константы скоростей VV-обмена [18]. Первые члены в уравнениях (14), (15) описывают скорость накачки соответствующего уровня в процессах (5) и (6), остальные – одноквантовые обмены между колебательными уровнями кислорода. В уравнениях (14), (15) учтены только наиболее существенные процессы. Если скорость накачки i -го уровня в процессах (5) и (6) намного меньше скорости VV-обмена (первый член в уравнениях (14), (15) много меньше остальных), устанавливается хорошо известное триноровское распределение молекул кислорода по колебательным уровням [18]:

$$N_n = N_O \exp(-\theta n) \exp(-E_n/kT), \quad (16)$$

где E_n – энергия n -го колебательного уровня молекулы O_2 ; параметр θ не зависит от номера уровня и может быть выражен через населенность первого колебательного уровня: $\theta = \ln(N_O/N_1) - E_1/kT$. Населенность первого уровня N_1 находится из уравнений (12) и (13).

Рассмотрим характерные параметры газовой среды, которые реализуются на выходе ГСК, а именно: $\eta_A = 0.4 - 1$ и $\eta_w = 0.01 - 0.1$. Случай $\eta_w \ll 0.01$ рассмотрен в [5]. Прямых измерений константы скорости процесса (10) не проводилось. Оценки, выполненные в [3], дали $K_{10} \approx 3 \cdot 10^{-13}$ см³/с, что совпадает с расчетным значением, приведенным в [14]. При $K_{10} \geq 10^{-14}$ см³/с последним и предпоследним членами в уравнении (12) можно пренебречь. Переходя к долям компонентов, находим из (12), (13)

$$\eta_1 = n \frac{K_5 \eta_A^2}{K_{10} \eta_w} + (n+m) \frac{K_5 \eta_A^2}{K_{11} \eta_w^2} \exp(\Delta E/kT) + \exp(-E_1/kT), \quad (17)$$

$$\eta_{w1} = (n+m) \frac{K_5 \eta_A^2}{K_{11} \eta_w} + \eta_w \exp(-E_w/kT), \quad (18)$$

где $\eta_{w1} = N_{w1}/N_O$.

Учитывая, что $K_{1,1} \cong K_{2,0}$ и $K_{2,1} \cong K_{3,0}$, находим из (14), (15) относительную населенность молекул кислорода на втором и третьем колебательных уровнях:

$$\eta_2 = \eta_1^2 + (\gamma_2 + \gamma_3) K_5 \eta_A^2 / K_{1,1}, \quad \eta_3 = \eta_1 \eta_2 + \gamma_3 K_5 \eta_A^2 / K_{2,1}. \quad (19)$$

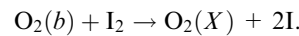
Нас интересует прежде всего колебательная населенность СК. Относительную населенность СК на i -м колебательном уровне $\eta_{Ai} = N_{Ai}/N_O$ можно найти из общей относительной населенности η_i в предположении быстрого ЕЕ-обмена в процессе (8):

$$\eta_{Ai} = \frac{\eta_i}{(1/\eta_A - 1) \exp(-\Delta E_i/kT) + 1}, \quad (20)$$

где ΔE_i – разность энергий i -го колебательного уровня молекулы O_2 в состояниях $^3\Sigma$ и 1A .

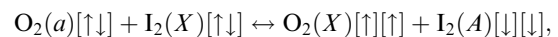
Как следует из выражения (17), при рассматриваемых здесь составах среды и $K_{10} \gg 3 \cdot 10^{-13}$ см³/с передача энергии из колебательного резервуара в тепловой будет лимитироваться процессом (11) и колебательная населенность кислорода несколько уменьшится. С другой стороны, если $K_{10} \leq 3 \cdot 10^{-13}$ см³/с, дезактивация колебательной энергии лимитируется процессом (10). Из (17)–(20) следует, что относительная населенность колебательных уровней кислорода определяется только составом среды и константами скоростей процессов и не зависит от давления среды. Доля колебательно-возбужденного кислорода на первом уровне на выходе ГСК достигает нескольких процентов. Так, например, для $\eta_A = 0.8$, $\eta_w = 0.01$, $K_{10} = 3 \cdot 10^{-13}$ см³/с и $T = 300$ К ($n = 4$, $m = 0.2$) доля колебательно-возбужденного кислорода $\eta_1 = 4.5\%$, а для $K_{10} = 3 \cdot 10^{-12}$ см³/с $\eta_1 = 2.6\%$. Хотя константа скорости K_{10} во втором случае увеличена на порядок, η_1 уменьшилась только в 1.7 раза.

В состоянии $^1\Sigma$ доля кислорода $\eta_b = N_b/N_O$ в газовой среде незначительна и с хорошей точностью определяется из условия стационарности протекания процессов (5) и (6) (см. рис.1). Долгое время считалось, что I_2 диссоциирует при столкновении с электронно-возбужденным кислородом $O_2(^1\Sigma)$ в процессе с константой, близкой к константе газокинетического процесса ($2 \cdot 10^{-10}$ см³/с) [19]:



Прямые измерения константы скорости показали, что она значительно ниже, чем $4 \cdot 10^{-12}$ см³/с [20]. Несмотря на это данный процесс с газокинетической константой довольно хорошо описывает некоторые наблюдаемые экспериментально темпы диссоциации в кислородно-иодном лазере. Авторы работы [6] считают это случайным совпадением.

К настоящему времени продолжают обсуждаться несколько механизмов диссоциации I_2 [3, 4]. Каждый из рассматриваемых в литературе каналов вносит свой вклад в процесс диссоциации. Основная проблема в том, какой из этих каналов является доминирующим. Мы предлагаем к рассмотрению еще один возможный канал диссоциации иода и попытаемся его обосновать. Предполагается, что промежуточным состоянием в процессе диссоциации является электронно-возбужденное состояние иода $I_2(A)$, которое заселяется при столкновениях с колебательно-возбужденным синглетным кислородом $O_2(a, v = 2)$, – процесс (4). Скорость ЕЕ-обмена сильно зависит от дефекта энергий возбуждения сталкивающихся партнеров [21, 22]. В данном случае дефект энергии составляет всего 24 см⁻¹, поэтому процесс заселения $I_2(A)$ может быть достаточно быстрым. Перенос электронной энергии между рассматриваемыми молекулами разрешен только при условии сохранения полного спина системы (правило Вигнера). Действительно, процесс (4) проходит с сохранением суммарного спина электронов по следующей схеме [22]:



где квадратные скобки обозначают орбиты: спаренные электроны изображены двумя противоположно направленными стрелками, а неспаренные – одной стрелкой. Передача энергии возбуждения обусловлена в данном

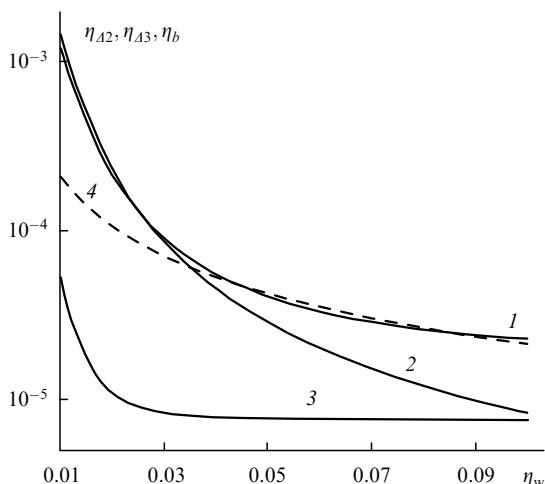


Рис.1. Зависимости долей колебательно-возбужденного СК на втором уровне η_{A2} (1, 2) и на третьем уровне η_{A3} (3), а также электронно-возбужденного кислорода $O_2(b)$ η_b (4) от доли воды η_w ; 1, 3 – расчет по формулам (17)–(20) при $\eta_A = 0.75$, $\gamma_2 + \gamma_3 = 2$ и $T = 300$ К, 2 – расчет по триноровскому распределению.

процессе электронно-обменным переносом. Таким образом, незначительная разница в энергиях возбуждения молекул кислорода и иода и сохранение полного спина электронов могут обусловить высокую скорость обмена энергией в процессе (4). Результаты экспериментальных работ [4, 6, 23] также свидетельствуют о быстром обмене электронной энергией.

Используя соотношения (16)–(20), найдем населенности СК на втором и третьем уровнях и сравним их с населенностью электронно-возбужденного состояния $O_2(b)$ η_b при $\eta_A = 0.75$, $\gamma_2 + \gamma_3 = 2$ и $T = 300$ К. На рис.1 представлены зависимости долей колебательно-возбужденного кислорода $O_2(a, v = 2)$ и электронно-возбужденного кислорода $O_2(b)$ от η_w . Видно, что на выходе ГСК населенности этих двух компонент имеют один порядок. При таких концентрациях $O_2(a, v = 2)$ процесс (4) с константой скорости $K_4 > 10^{-11}$ см³/с может обеспечить наблюдаемые в экспериментах темпы диссоциации иода.

При доле воды в кислороде $\eta_w < 0.04$ доли колебательно-возбужденного СК на $v = 2$, найденные из триноровского распределения (рис.1, кривая 2) и из формул (17)–(20) (кривая 1), совпадают. Таким образом, при данных составах среды накачка не влияет на вид стационарного колебательного распределения, которое с хорошей точностью описывается триноровским распределением.

Если возбуждение на третий колебательный уровень молекул кислорода в процессах (5) и (6) осуществляется соответственно с вероятностями 0 и 1 ($\gamma_2 = 1, \gamma_3 = 1$), то для рассматриваемых здесь составов среды накачка всегда превалирует над поступлением колебательных квантов с нижележащих уровней. В этом случае, как видно из рис.1, доля молекул СК на уровне $v = 3$ (кривая 3) намного меньше, чем на уровне $v = 2$, и для $\eta_w > 0.03$ она практически не зависит от доли воды в кислороде. Если же константа скорости процесса (3) близка к газокинетической, то влияние этого процесса на диссоциацию иода может оказаться существенным, особенно при $\eta_w \leq 0.01$ [5]. Отметим, что концентрация кислорода на уровнях $v > 3$ существенно ниже, чем на рассмотренных здесь уровнях, поэтому их вклад в формирование активной среды можно не учитывать.

Таким образом, населенность кислорода на выходе ГСК является существенно неравновесной. Убыль энергии из колебательного резервуара происходит в ходе VV-обмена с молекулами воды, а поскольку концентрация кислорода на первом колебательном уровне существенно превышает концентрацию на более высоких уровнях, то процесс (10) дает существенный вклад в убыль колебательных квантов из кислорода только для первого уровня.

Скорость колебательно-поступательного VT-обмена с компонентами среды намного меньше характерных скоростей остальных процессов и не влияет на стационарное распределение колебательной энергии по уровням. Скорость накачки колебательных уровней кислорода при дезактивации электронной энергии в некоторых случаях выше, чем скорость их заселения с нижележащих уровней. В этом случае относительные населенности нижних колебательных уровней СК η_{Ai} находятся из формулы

$$\eta_{Ai} = \frac{\eta_i}{(1/\eta_A - 1) \exp(-\Delta E_i/kT) + 1}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где

$$\eta_1 = n \frac{K_5 \eta_A^2}{K_{10} \eta_w} + (n + m) \frac{K_5 \eta_A^2}{K_{11} \eta_w^2} \exp \frac{\Delta E}{kT} + \exp \left(- \frac{E_1}{kT} \right);$$

$$\eta_2 = \eta_1^2 + \frac{(\gamma_2 + \gamma_3) K_5 \eta_A^2}{K_{1,1}};$$

$$\eta_3 = \eta_1 \eta_2 + \frac{\gamma_3 K_5 \eta_A^2}{K_{2,1}}.$$

Если накачка осуществляется на уровне с $v \leq 2$, то при доле воды в газовом потоке $\eta_w < 0.04$ населенности уровней с хорошей точностью находятся из триноровского распределения.

Концентрация СК с $v = 2$ соизмерима с концентрацией электронно-возбужденного кислорода $O_2(b)$, который долгое время рассматривался в качестве кандидата на роль «партнера», вызывающего диссоциацию иода. Электронно-возбужденное состояние иода $A^3\Pi_{1u}$ может являться промежуточным состоянием при диссоциации I₂. Процесс (4) может обеспечить наблюдаемые в экспериментах темпы диссоциации иода, если константа его скорости $K_4 > 10^{-11}$ см³/с.

1. Аязов В.Н., Николаев В.Д., Свистун М.И., Уфимцев Н.И. *Квантовая электроника*, **28**, 212 (1999).
2. Аязов В.Н., Игошин В.И., Куприянов Н.Л. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 1-2, 24 (1992).
3. Аязов В.Н., Сафонов В.С., Уфимцев Н.И. *Квантовая электроника*, **30**, 687 (2000).
4. Komissarov A.V., Goncharov V., Heaven M.C. *Proc. SPIE*, **4184**, 7 (2001).
5. Бирюков А.С., Щеглов В.А. *Квантовая электроника*, **13**, 510 (1986).
6. Heidner R.F. III, Gardner C.E., Segal G.I., El-Sayed T.M. *J.Phys.Chem.*, **87**, 2348 (1983).
7. Derwent R.G., Thrush B.A. *Trans.Farad.Soc.*, **67**, 2036 (1971).
8. Aviles R.G., Muller D.F., Houston P.L. *Appl.Phys.Letts*, **37**, 358 (1980).
9. Collins R.J., Husain D. *J. Photochem.*, **1**, 481 (1972).
10. Bloemink H.I., Copeland R.A., Slander T.G. *J.Chem.Phys.*, **109**, 4237 (1998).
11. Jones I.T.N, Bayes K.D. *J.Chem.Phys.*, **57**, 1003 (1972).
12. Parker J.G., Ritke D.N. *J.Chem.Phys.*, **59**, 3713 (1973).
13. Британ А.Б., Старик А.М. *ЖПМТФ*, **4**, 41 (1980).

14. Teylor R.L., Bitterman S. *Rev.Mod.Phys.*, **41**, 26 (1969).
15. Finzi J., Novis F.E., Panfilov V.N., Hess P., Moore C.B. *J.Chem. Phys.*, **67**, 4053 (1977).
16. Schurath U. *J.Photochem.*, **4**, 215 (1975).
17. Frimer A.A. *Singlet O₂* (Florida, Boca Raton, CRC Press Inc., 1985, v.1, p.175).
18. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. *Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры* (М., Наука, 1980, с.512).
19. Derwent R.G., Thrush B.A. *J.Chem.Soc.Far.Trans. II*, **68**, 720 (1972).
20. Muller D.F., Young R.H., Houston P.L., Wiesenfeld J.R. *Appl. Phys.Chem.*, **38**, 404 (1981).
21. Бамфорд К., Типпер К. *Возбужденные частицы в химической кинетике* (М., Мир, 1973).
22. Теренин А.Н. *Фотоника молекул красителей* (Л., Наука, 1967).
23. Bohling R., Becker A.C., Minaev V.F., Seranski K., Schurath U. *Chem.Phys.*, **142**, 445 (1990).