

О механизме темнового разложения донора иода в активной среде импульсного химического кислородно-иодного лазера

Т.Л.Андреева, С.В.Кузнецова, А.И.Маслов, В.Н.Сорокин

Предложена схема, описывающая темновое разложение иодида – донора иода, а также релаксацию синглетного кислорода в активной среде импульсного химического кислородно-иодного лазера (КИЛ), содержащей хлор. Показано, что для типичных составов активных сред импульсных КИЛ, использующих в качестве донора иода молекулы CH_3I , уже на стадии заполнения активного объема развивается разветвленная цепная реакция разложения CH_3I , сопровождающаяся эффективной диссипацией синглетного кислорода. В активных средах с CF_3I в качестве донора аналогичная цепная реакция тормозится гибелью радикалов CF_3 при рекомбинации с кислородом. Достаточно хорошее совпадение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными подтверждает справедливость установленного механизма. Цепное разложение алкилиодидов, сопровождающееся лавинным образованием атомов иода, представляет собой новый способ эффективной химической наработки иода для химического КИЛ.

Ключевые слова: кислородно-иодный лазер, синглетный кислород, цепная реакция.

За двадцать с лишним лет, прошедших с момента запуска в 1978 г. [1] химического кислородно-иодного лазера (КИЛ), достигнуты существенные успехи в различных направлениях исследования этой системы, как научных, так и инженерно-технологических. Многолетние усилия ученых многих стран привели к созданию непрерывных лазеров, которые по своим характеристикам не уступают лазерам других типов, а иногда и превосходят их (см., напр., [2]). Импульсный и импульсно-периодический режимы работы химического КИЛ позволяют значительно расширить области его использования. К ним, в частности, относятся технологические применения, исследование нелинейных процессов и т. д. Естественно, что при реализации импульсного режима ставится задача достижения большой импульсной мощности лазерного излучения при сохранении эффективности и высоких энергетических характеристик, присущих непрерывному режиму работы КИЛ [2].

Одним из наиболее привлекательных и наиболее разработанных способов реализации импульсного режима работы КИЛ является предложенный в [3] способ импульсной (мгновенной) объемной наработки иода. В этом случае активный объем заполняется в отсутствие иода (атомарного и молекулярного), а после его заполнения импульсно и равномерно по объему создается требуемая концентрация атомов иода. Это достигается добавлением в поток синглетного кислорода (СК) иодсодержащих молекул, не реагирующих химически с СК, и последующим импульсным воздействием на среду, приводящим к объемной наработке атомарного иода.

Импульсный режим работы КИЛ с мгновенной объемной наработкой иода впервые реализован в [4]. В качестве доноров атомарного иода использовались молекулы алкилиодидов (CH_3I , $\text{C}_3\text{H}_7\text{I}$ и т. д.) и перфторалкилиодидов (CF_3I , $\text{C}_3\text{F}_7\text{I}$ и т. д.), а в качестве способа иницирования – импульсный фотолиз указанных молекул. Фотолиз этих иодидов широко изучался в связи с исследованием фотодиссоционных иодных лазеров (в том числе и в нашей лаборатории). Практическая реализация импульсного режима КИЛ и последующие работы в этом направлении продемонстрировали перспективность использования такого режима для различных научных и технологических применений. Однако эти исследования выявили также ряд научных и технических проблем, возникающих при использовании различных доноров иода.

Дело в том, что в генераторе СК хлор утилизируется не полностью и его непрореагировавшая часть попадает в поток СК. При этом концентрация хлора может составлять до 10 % концентрации кислорода. Исследования влияния хлора на выходную энергию импульсного КИЛ, выполненные в [5], показали, что добавка в поток СК и CF_3I значительного количества ($\sim 1.6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$) хлора приводит к снижению лазерной энергии всего на 20 %, в то время как при использовании в качестве донора молекул CH_3I при концентрации хлора, почти на порядок меньшей ($\sim 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$), происходит срыв генерации.

В работе [6] при исследовании импульсного КИЛ высокого давления с молекулами CH_3I в качестве донора иода наблюдалась интенсивная люминесценция атомов иода без внешнего иницирования среды и в ряде случаев – спонтанная лазерная генерация. Это свидетельствовало о заметной диссоциации молекул CH_3I в результате неустановленных химических реакций, протекающих в процессе транспортировки газовых компонентов активной среды к активному объему. Для иллюстрации влияния хлора и вида донора иода на выходные характеристики лазера в табл. 1 приведены основные параметры активных сред импульсных КИЛ, исследованных в [5, 6].

В настоящей работе мы предлагаем схему реакций, которая объясняет наблюдаемые экспериментально осо-

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 22 апреля 2002 г.

Табл.1. Состав активных сред импульсных КИЛ по данным работ [5, 6].

[O ₂] (10 ¹⁶ см ⁻³)	[CH ₃ I] (10 ¹⁶ см ⁻³)	[CF ₃ I] (10 ¹⁶ см ⁻³)	[Cl ₂] (10 ¹⁶ см ⁻³)	E (Дж)	Литература
4	1.3	–	0	1.6	[5]
4	1.3	–	2	0	[5]
4	–	1.3	0	1.25	[5]
4	–	1.3	1.6	1.0	[5]
70–120	30–60	–	7–10	Интенсивная люминесценция атомов I(² P _{1/2}); спонтанная генерация	[6]

П р и м е ч а н и е: E – энергия лазерного излучения.

бенности поведения активных сред импульсных КИЛ, использующих в качестве доноров иода молекулы CF₃I и CH₃I.

При неполной утилизации хлора активная среда импульсного КИЛ содержит молекулы O₂ (¹Δ), O₂ (³Σ), Cl₂, RI (CH₃I, CF₃I). Активная среда содержит обычно и буферный газ, но при инициировании иодида RI с помощью импульсного фотолиза молекулы буфера химически инертны и их присутствие в нашей схеме учитываться не будет. Поскольку энергии связей атомов в молекулах RI, O₂ и Cl₂ велики (не менее 50 ккал/моль [7]), прямые молекулярные реакции между ними в активной среде КИЛ при температуре T ~ 300 К, которые могли бы привести к разложению RI, практически исключены из-за больших энергетических барьеров.

Это соображение подтверждается экспериментально. Так, в работе [8] показано, что не происходит прямого разложения Cl₂ и RI синглетным кислородом. Темновая реакция Cl₂ с RI также не идет со сколько-нибудь заметной скоростью. Наши исследования такой системы [9] показали, что после хранения в течение месяца смеси Cl₂–CF₃I в защищенных от света стеклянных баллонах со специальными бесшумными кранами не наблюдалось разложения иодида. Продуктами такого разложения являются молекулы ICl и I₂, предельно малые концентрации которых контролировались методом иодометрического титрования с существенно большей чувствительностью, чем чувствительность оптических абсорбционных методов.

Таким образом, ясно, что для разложения любой из молекул в газовой среде импульсного КИЛ необходимо присутствие в ней химически активных частиц. Этими

частицами могут быть радикалы R и атомы иода и хлора. Среди них только атомы хлора способны разрушить молекулы RI в реакции



Константа скорости этой реакции k₁ определена нами для молекулы CF₃I при T ~ 300 К [10]. Она достаточно велика (см. табл.2), так что характерное время разрушения молекул CF₃I в реакции (1) для типичных составов активных сред импульсного КИЛ составляет менее 10⁻⁴ с. Это время меньше характерного времени транспортировки газовой среды к активному объему лазера. Поскольку энергия связи R–I слабо зависит от вида радикала [7], константы k₁ для молекул CF₃I и CH₃I также не должны сильно различаться. Реакция (1) сопровождается реакцией, приводящей к гибели радикалов R с образованием перекисного радикала RO₂,



и реакцией, воспроизводящей активные частицы – атомы хлора,

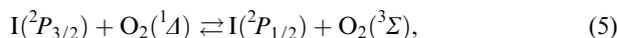
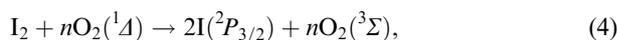


Совокупность реакций (1)–(3) – это неразветвленная цепная реакция разложения RI, инициируемая атомами хлора, причем (3) – реакция продолжения цепи, а (2) – реакция обрыва цепи. Как отмечено выше, появление свободных атомов хлора в темновых молекулярных реакциях маловероятно. Эти атомы появляются в активной

Табл.2. Константы скоростей реакций (1)–(3), (8), (9) при T ~ 300 К.

R	k ₁ (см ³ /с)	k ₂ (см ³ /с)	k ₃ (см ³ /с)	k ₈ (см ³ /с)	k ₉ (см ³ /с)
CF ₃	10 ⁻¹² [10]	1.8 × 10 ⁻¹² ([N ₂] = 3.3 × 10 ¹⁷ см ⁻³) [19] 8 × 10 ⁻¹³ ([N ₂] = 1.1 × 10 ¹⁷ см ⁻³) [19]	1.1 × 10 ⁻¹³ [9]	4.5 × 10 ⁻¹¹ [15]	2.5 × 10 ⁻¹¹ [15]
C ₂ F ₅				10 ⁻¹⁰ (при k ₉ = 8.8 × 10 ⁻¹¹ см ³ /с) [16] 6 × 10 ⁻¹⁰ (k ₈ ^{max}) (при k ₉ = 0) [16] 0 (при k ₉ = 1.2 × 10 ⁻¹⁰ см ³ /с) [16]	8.5 × 10 ⁻¹¹ (при k ₈ = 10 ⁻¹⁰ см ³ /с) [16] 0 (при k ₈ = 6 × 10 ⁻¹⁰ см ³ /с) [16] 1.2 × 10 ⁻¹⁰ (k ₉ ^{max}) (при k ₈ = 0) [16]
CH ₃	~10 ⁻¹²	1.6 × 10 ⁻¹³ ([SF ₆] = 3.3 × 10 ¹⁷ см ⁻³) [20] 5 × 10 ⁻¹⁴ ([SF ₆] = 1.1 × 10 ¹⁷ см ⁻³) [20]	1.5 × 10 ⁻¹² [21] 1.8 × 10 ⁻¹² [22]		

среде импульсного КИЛ в результате следующих реакций:



Необходимым условием протекания реакций (4)–(7) является присутствие в газовой среде молекул иода. Хорошо известно, что органические и фторорганические иодиды содержат примеси молекулярного иода, причем в случае фторорганических иодидов, у которых температуры кипения выше, чем у алкилиодидов, содержание иода существенно ниже, чем у алкилиодидов. Наш многолетний опыт работы с перфторалкилиодидами показал, что добиться высокой степени очистки иодидов можно только с использованием специальных стеклянных ректификационных колонок с насадками из активированного угля и металлической (например, вольфрамовой) стружки. Лишь в этом случае нам удавалось достичь содержания иода во фторорганических иодидах не более 10^{-5} от концентрации иодида. Простая, пусть и многократная, вакуумная дистилляция при низких температурах не позволяет достичь столь же высоких степеней очистки от иода, особенно менее летучих алкилиодидов.

Таким образом, в иодиде (доноре иода) изначально присутствует небольшая примесь молекул иода, которые диссоциируют на атомы в среде синглетного кислорода в соответствии с брутто-процессом (4), являющимся источником атомов иода в непрерывном КИЛ. Механизм диссоциации (4), несмотря на многочисленные исследования (см., напр., [11–14]) не установлен, и в настоящее время нет модели, которая количественно описывает диссоциацию иода синглетным кислородом в различных экспериментальных условиях. Тем не менее оценки показывают, что характерное время диссоциации иода уже при концентрациях $[\text{O}_2(^1\text{A})] \sim 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ очень мало ($\sim 10^{-5} \text{ с}$).

Образование атомов иода в процессе (4) сопровождается столь же быстрым их возбуждением в процессе (5). Таким образом, уже при смешении иодида RI с синглетным кислородом происходит превращение «примесного» молекулярного иода в возбужденные атомы иода, которые реагируют с молекулами хлора в реакции (6). Именно реакция (6) является источником первичных атомов хлора в активной среде импульсного КИЛ и именно она инициирует цепную реакцию (1)–(3) разложения иодида RI.

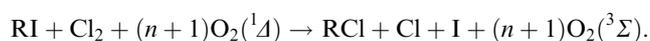
Разложение RI сопровождается расходом молекул хлора и накоплением молекул ICl. Возбужденные атомы иода очень эффективно взаимодействуют с молекулами ICl в реакции (7), причем $k_7/k_6 \sim 10^3$ (см. табл.3). При таком соотношении констант уже при небольшом разложении Cl_2 канал (7) успешно конкурирует с каналом (6). Отметим, что из-за высокой эффективности процессов (4) и (5) в последовательности реакций (7), (4), (5) из одной активной частицы $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ образуются сразу три активные частицы: два возбужденных атома иода $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ и атом хлора. Образование молекул иода в реакции (7) ускоряет расходование синглетного кислорода в процес-

Табл.3. Константы скоростей реакций (4)–(7) при $T \sim 300 \text{ К}$.

k_4 (см ⁶ /с)	k_5 (см ³ /с)	k_{-5} (см ³ /с)	k_6 (см ³ /с)	k_7 (см ³ /с)
6×10^{-29} [12]	7.6×10^{-11} [23]	2.7×10^{-11} [23]	2×10^{-14} [24]	2.4×10^{-11} [27]
			8×10^{-15} [25]	2.3×10^{-11} [26]
				3.3×10^{-11} [24]

сах (4) и (5). В свою очередь, образующиеся в реакции (7) атомы хлора ускоряют разрушение RI и снова воспроизводят молекулы ICl. Очевидно, что совокупность реакций (1)–(5), (7) – это разветвленная цепная реакция разложения RI, сопровождающаяся эффективной релаксацией синглетного кислорода.

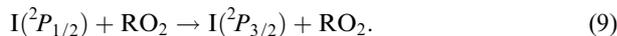
Расходование исходных продуктов и образование активных частиц можно представить в виде брутто-процесса



Из этого уравнения видно, что при разложении одной молекулы иодида расходуется $n+1$ молекула синглетного кислорода. Скорость релаксации синглетного кислорода (процессы (4) и (5)) определяется количеством молекулярного иода, образующегося в данной системе только в реакции (7), эффективность которой, в свою очередь, определяется эффективностью разложения иодида RI в реакции (1). Только эта реакция является источником атомов (и молекул) иода в системе, а малая примесь иода в исходном иодиде лишь инициирует цепную реакцию (1)–(3).

Характер протекания реакций (1)–(3) объясняет наблюдаемые различия в поведении активных сред импульсных КИЛ, использующих в качестве донора иода молекулы CH_3I и CF_3I . Определяющим здесь является соотношение скоростей реакций продолжения цепи (3) и обрыва цепи (2) для радикалов CH_3 и CF_3 , поскольку константы k_1 для обоих радикалов, как сказано выше, практически одинаковы. Ясно, что при уменьшении отношения k_3/k_2 эффективность разложения молекул RI уменьшается. В соответствии с данными табл.2 отношение k_3/k_2 в зависимости от состава активной среды импульсного КИЛ составляет 10–30 для радикала CH_3 и ~ 0.1 для радикала CF_3 . Столь большое различие отношений k_3/k_2 для двух радикалов свидетельствует о том, что при прочих равных условиях разложение CH_3I должно быть существенно большим, чем разложение CF_3I , что и наблюдается в экспериментах [5, 8].

Количественные и качественные различия в эффективности разложения CH_3I и CF_3I , а также в эффективности диссипации энергии синглетного кислорода продемонстрировали численные расчеты кинетики темновых реакций в системе RI (CH_3I , CF_3I)– Cl_2 – $\text{O}_2(^1\text{A})$ – $\text{O}_2(^3\Sigma)$ – I_2 , проведенные для типичных составов активных сред импульсных КИЛ, используемых в работах [5, 6] (см. табл.1). При этом варьировались концентрации примеси молекулярного иода в исходном иодиде. Помимо реакций (1)–(7) в схему процессов, протекающих в рассматриваемой системе, включены процессы тушения возбужденных молекул кислорода и атомов иода перекисными радикалами RO_2 :



Эти процессы были введены в рассмотрение в работе [15] для объяснения различий в выходных энергиях импульсного КИЛ при использовании в качестве доноров иода алкилиодидов и перфторалкилиодидов в системах, свободных от хлора. В [15] даны оценки констант скоростей k_8 и k_9 (см. табл.2). Позднее нами [16] была разработана методика, дающая возможность по заданной одной из констант k_8 или k_9 определять другую. Эта методика была использована в [16] для исследования реакции (8), (9) с участием радикалов $\text{C}_2\text{F}_5\text{O}_2$. При этом по крайней мере одна из констант (либо задаваемая, либо определяемая) оказывалась очень большой: примерно 10^{-10} см³/с (см. табл.2).

Нет оснований предполагать, что константы k_8 и k_9 для радикалов CF_3O_2 и CH_3O_2 могут существенно отличаться от соответствующих констант для радикалов $\text{C}_2\text{F}_5\text{O}_2$. Тем не менее в настоящей работе при численных расчетах константы k_8 и k_9 варьировались для получения наилучшего качественного согласия результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными. При расчетах учитывались также реакции рекомбинации радикалов R с атомами иода и хлора и друг с другом, реакции перекисных радикалов RO_2 друг с другом, а также с радикалами R и атомами иода и хлора, реакции атомов хлора с молекулами иода и ICl , процессы тушения возбужденных атомов иода и молекул синглетного кислорода. Константы скоростей всех этих процессов для $T \sim 300$ К были взяты из литературных данных, а также из наших предыдущих работ [16–18]. Подробно схема рассмотренных процессов будет проанализирована в нашей следующей публикации. Здесь же отметим, что в первом приближении только процессы (1)–(9) определяют темновое разложение донора RI и диссипацию энергии синглетного кислорода в активной среде импульсного КИЛ.

На рис.1–5 представлены зависимости от времени концентраций молекул $\text{O}_2(^1\Delta)$ и ICl , атомов $\text{I}(^2P_{1/2})$ и радикалов RO_2 , полученные в результате численного решения системы дифференциальных уравнений, соответствующих реакциям (1)–(9), а также еще почти двадцати

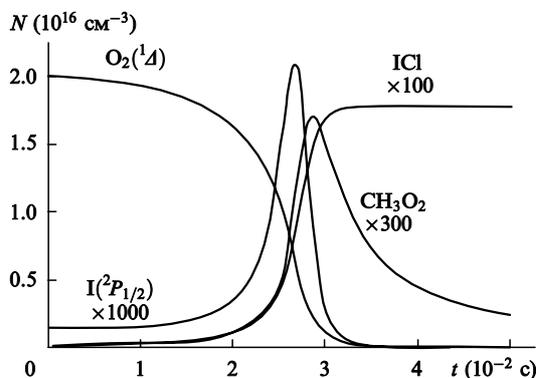


Рис.1. Зависимости от времени концентраций $\text{O}_2(^1\Delta)$, $\text{I}(^2P_{1/2})$, ICl и CH_3O_2 , рассчитанные для активной среды импульсного КИЛ [5] ($[\text{CH}_3\text{I}]_0 = 1.3 \times 10^{16}$ см⁻³, $[\text{O}_2(^1\Delta)]_0 = 2 \times 10^{16}$ см⁻³, $[\text{O}_2(^3\Sigma)]_0 = 2 \times 10^{16}$ см⁻³, $[\text{Cl}_2]_0 = 2 \times 10^{15}$ см⁻³, $[\text{I}_2]_0 = 10^{12}$ см⁻³). Константы скоростей реакций (1)–(9) взяты из табл.2, 3 ($k_8 = 10^{-10}$ см³/с, $k_9 = 8.5 \times 10^{-11}$ см³/с).

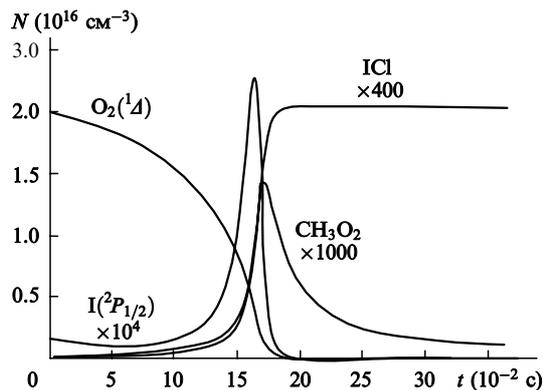


Рис.2. Зависимости от времени концентраций $\text{O}_2(^1\Delta)$, $\text{I}(^2P_{1/2})$, ICl и CH_3O_2 , рассчитанные для активной среды того же состава, что и на рис.1, но при $[\text{I}_2]_0 = 10^{11}$ см⁻³.

упомянутым выше реакциям. В качестве начальных условий задавались концентрации RI , Cl_2 , $\text{O}_2(^1\Delta)$, $\text{O}_2(^3\Sigma)$ и примеси иода I_2 для составов активных сред импульсных КИЛ, приведенных в табл.1. Рост температуры в результате протекания реакций не учитывался.

На рис.1–3 видно развитие цепного процесса (1)–(5), (7) разложения CH_3I . Как это и следует из качественного анализа схемы реакций (1)–(9), появление «пика» концентрации возбужденных атомов иода совпадает по времени с лавинной наработкой $\text{I}(^2P_{1/2})$, ICl и RO_2 и быстрой гибелью синглетного кислорода. Во всех трех случаях конечная концентрация молекул ICl существенно (до двух порядков величины) превышает концентрацию примеси иода в исходном иодиде, что характеризует эффективность цепного процесса разложения RI . Количество примеси иода в исходном иодиде определяет (при прочих равных условиях) характерное время развития цепного процесса и практически совпадающее с ним время жизни синглетного кислорода. Из рис.1 и 2 видно, что при уменьшении концентрации примеси иода с 10^{12} до 10^{11} см⁻³ это время увеличивается с ~ 30 до ~ 175 мс.

На рис.4 и 5 представлены результаты расчета для смесей кислорода, хлора и CF_3I . Содержание кислорода, иодида и примесей иода такое же, как и для условий рис.1 и 2, но в смеси с CF_3I содержание хлора в 8 раз больше, чем в смеси с CH_3I . Тем не менее, как видно из рис.4 и 5, в этом случае не происходит химической наработки ато-

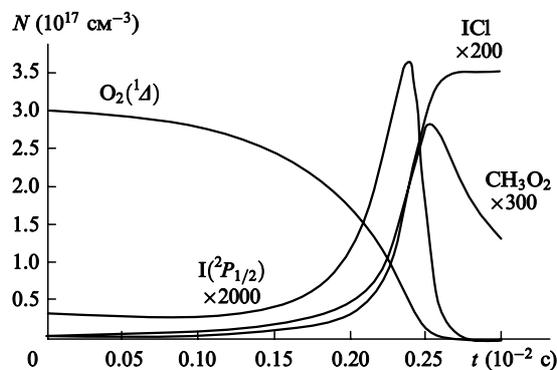


Рис.3. Зависимости от времени концентраций $\text{O}_2(^1\Delta)$, $\text{I}(^2P_{1/2})$, ICl и CH_3O_2 , рассчитанные для активной среды импульсного КИЛ [6] ($[\text{CH}_3\text{I}]_0 = 3 \times 10^{17}$ см⁻³, $[\text{O}_2(^1\Delta)]_0 = 3 \times 10^{17}$ см⁻³, $[\text{O}_2(^3\Sigma)]_0 = 3 \times 10^{17}$ см⁻³, $[\text{Cl}_2]_0 = 6 \times 10^{16}$ см⁻³, $[\text{I}_2]_0 = 10^{13}$ см⁻³). Константы скоростей реакций (1)–(9) взяты из табл.2, 3 ($k_8 = 10^{-11}$ см³/с, $k_9 = 9 \times 10^{-11}$ см³/с).

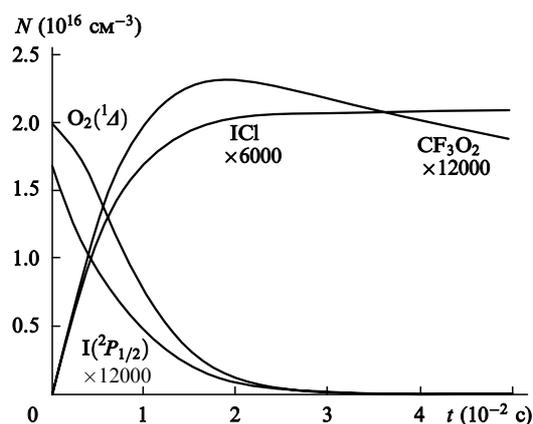


Рис.4. Зависимости от времени концентраций $O_2(^1\Delta)$, $I(^2P_{1/2})$, ICl и CF_3O_2 , рассчитанные для активной среды импульсного КИЛ [5] ($[CF_3I]_0 = 1.3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $[O_2(^1\Delta)]_0 = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $[O_2(^3\Sigma)]_0 = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $[Cl_2]_0 = 1.6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $[I_2]_0 = 10^{12} \text{ см}^{-3}$). Константы скоростей реакций (1)–(9) взяты из табл.2, 3 ($k_8 = 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, $k_9 = 8.5 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$).

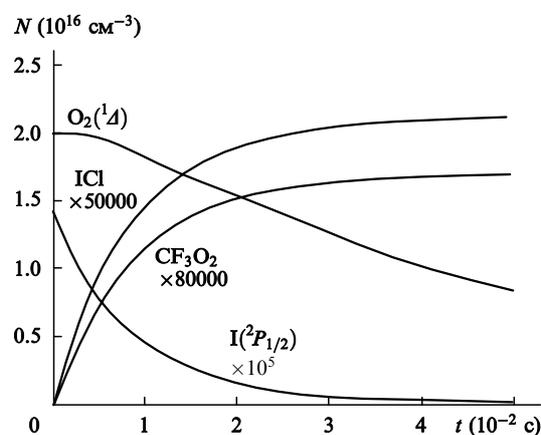


Рис.5. Зависимости от времени концентраций $O_2(^1\Delta)$, $I(^2P_{1/2})$, ICl и CF_3O_2 , рассчитанные для активной среды того же состава, что и на рис.4, но при $[I_2]_0 = 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

мов $I(^2P_{1/2})$, т. е. не развивается реакция (7): количество образовавшихся молекул ICl отвечает содержанию примеси иода в исходной смеси в соответствии с последовательным протеканием процессов (4)–(6), (1)–(3).

Обратим внимание на поведение концентраций $O_2(^1\Delta)$ на рис.4 и 5. Видно, что время жизни синглетного кислорода зависит от содержания иода в исходной смеси. При уменьшении концентрации иода с 10^{12} до 10^{11} см^{-3} это время увеличивается примерно в 5 раз. Столь сильное влияние очень малой примеси иода на релаксацию синглетного кислорода обусловлено образованием в результате последовательного протекания реакций (4)–(6), (1), (2) перекисных радикалов CF_3O_2 , являющихся эффективными «тушителями» синглетного кислорода.

В заключение сформулируем основные результаты работы. Совокупность реакций (1)–(9) определяет темновое разложение иодида RI в активной среде импульсного химического КИЛ, содержащей молекулярный хлор. Эта схема реакций хорошо качественно и, где возможно подобное сравнение, количественно описывает имеющи-

еся экспериментальные данные. В рамках установленного механизма находят объяснение различия в работе импульсных КИЛ, использующих в качестве донора иода молекулы CH_3I и CF_3I . Поскольку более сложные алкилиодиды и перфторалкилиодиды по своей реакционной способности в процессах (1)–(3) мало отличаются от CH_3I и CF_3I соответственно, то всё изложенное в настоящей работе относительно этих простейших молекул относится и к более сложным молекулам соответствующего гомологического ряда.

Цепной механизм (1)–(5), (7) разложения алкилиодидов сопровождается лавинным образованием возбужденных атомов иода (см. рис.1–3). Это позволяет рассмотреть совокупность реакций (1)–(7) как новый способ эффективной химической наработки атомов иода для химического КИЛ.

Авторы выражают признательность Н.Н.Юрьшеву за полезные консультации и обсуждения. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 02-02-17169) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант № 00-15-96586).

- McDermott W.E., Pchelkin N.R., Benard D.J., Bousek R.R. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 469 (1978).
- Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 583 (1996).
- Басов Н.Г., Крюков П.Г., Юрьшев Н.Н. *Препринт ФИАН № 54* (М., 1985).
- Басов Н.Г., Вагин Н.П. и др. *Квантовая электроника*, **11**, 1893 (1984).
- Вагин Н.П., Золотарев В.А. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 840 (1991).
- Suzuki K., Minoshima K., Sugimoto D., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 124 (2001).
- Kerr J.A. In: *CRC Handbook of chemistry and physics*. Ed. by D.R.Lide, 76th edn. (Boca Raton: CRC, 1995, 1996, pp. 9-51–9-69).
- Вагин Н.П., Крюков П.Г., Пазюк В.С., Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **15**, 1785 (1988).
- Кузнецова С.В., Маслов А.И. *Химия высоких энергий*, **13**, 448 (1979).
- Кузнецова С.В., Маслов А.И. *Химическая физика*, **6**, 1554 (1987).
- Arnold S.J., Finlayson N., Ogryzlo E.A. *J. Chem. Phys.*, **44**, 2529 (1966).
- Hays G.N., Fisk G.A. *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 3 (1983).
- Muller D.F., Young R.H., Houston P.L., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 404 (1981).
- Heidner R.F. III, Gardner C.E., et al. *J. Phys. Chem.*, **87**, 2348 (1983).
- Вагин Н.П., Золотарев В.А. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 33 (1991).
- Андреева Т.Л., Кузнецова С.В., Маслов А.И., Сорокин В.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 511 (1997).
- Андреева Т.Л., Кузнецова С.В., Маслов А.И., Собельман И.И. *Труды ФИАН*, **125**, 179 (1980).
- Кузнецова С.В., Маслов А.И. *Квантовая электроника*, **16**, 980 (1989).
- Forst W., Caralp F. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, **87**, 2307 (1991).
- Kaiser E.W. *J. Phys. Chem.*, **97**, 11681 (1993).
- Kovalenko L.J., Leone S.R. *J. Chem. Phys.*, **80**, 3656 (1984).
- Timonen R.S., Gutman D. *J. Phys. Chem.*, **90**, 2987 (1986).
- Derwent R.G., Thrush B.A. *Faraday Discuss. Chem. Soc.*, **53**, 162 (1972).
- Burrows M.D. *J. Chem. Phys.*, **81**, 3546 (1984).
- Hall G.E., Arepalli S., Houston P.L., Wiesenfeld J.R. *J. Chem. Phys.*, **82**, 2590 (1985).
- Hofman H., Leone S.R. *J. Chem. Phys.*, **69**, 641 (1978).
- Deakin J.J., Husain D. *J. Photochem.*, **1**, 353 (1972).