

УДК 541.13.661.669

ФОТОИНИЦИИРУЕМЫЙ ЦЕПНОЙ ПРОЦЕСС В ВОЗДУХЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЭКСИПЛЕКСОВ АЗОТА И КИСЛОРОДА

© 2022 г. В. Г. Федотов^а, *, Н. Г. Федотов^а, Е. Я. Федотова^а

^аФедеральный центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: vgfedotov47@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 05.05.2022 г.

Принята к публикации 10.05.2022 г.

Впервые обнаружен факт возбуждения в воздухе стимулированного излучения синего, зеленого и красного цветов при облучении воздушной смеси при атмосферном давлении светом видимого диапазона длин волн. Данное явление наблюдается только при достаточно интенсивном облучении внутри реактора со светоотражающими стенками и предположительно объясняется образованием эксиплексов $O(^1S)-N_2$, $O_2(A^3\Sigma)-N_2$, $O_2(^1\Delta)-O_2(^1\Delta)$ и их стимулированным излучением. В описанных условиях в воздухе наблюдали лазерную генерацию синего, зеленого и красного цветов. Предложен механизм цепной фотохимической реакции, объясняющий наблюдаемые явления.

Ключевые слова: фотоиницирование, атмосферный воздух, стимулированное излучение, лазерная генерация, цепная реакция, эксиплексы, димольные комплексы, синглетный кислород

DOI: 10.31857/S0023119322050035

ВВЕДЕНИЕ

Немного к истории вопроса: работа [1] посвящена описанию нового явления: импульсный электрический разряд в атмосферном воздухе при напряжении в 40 раз меньше пробойного вызывает свечение воздуха с лавинообразным нарастанием интенсивности, что можно объяснить только протеканием в воздушной смеси цепной химической реакции, приводящей к люминесценции. В дальнейшем мы показали [2], что подобный результат может быть получен при импульсном фотоиницировании, если использовать реактор со светоотражающими стенками для уменьшения гибели фотонов внутри реактора. В таком случае очевидно, что оптические фотоны выступают в роли активных центров, ведущих цепную реакцию; эта ситуация отмечена впервые в истории изучения цепных реакций и описана нами в [3]. Непрерывную хемилюминесценцию в воздухе при атмосферном давлении наблюдали при непрерывном УФ-облучении воздушной смеси [4].

В настоящей работе показано, что облучение воздуха непрерывным светом видимого диапазона длин волн внутри реактора со светоотражающими стенками порождает стимулированное излучение зеленого, синего и красного цветов; на этой же смеси, применяя оптический резонатор, получили лазерную генерацию в указанных выше диапазонах длин волн. Такая многоцветная лазерная генерация наблюдалась нами и ранее —

при инициировании импульсным электрическим разрядом [5] и непрерывным УФ-облучением [4].

Как отмечено выше, наблюдаемые явления можно связать только с протеканием цепной фотохимической реакции в облучаемой воздушной смеси. Однако образование устойчивых продуктов в ходе химической реакции в воздухе, которая приводит к хемилюминесценции, должно обязательно сопровождаться расходом кислорода и, как следствие, затуханием фото процесса. В нашем случае, вопреки ожиданиям, интенсивность наблюдаемой хемилюминесценции никак не зависела от времени, пока продолжалось фотоиницирование [4]. Также не обнаружено было признаков появления окислов азота в реакционной смеси. Единственным объяснением подобной ситуации могло бы послужить предположение об образовании неустойчивых продуктов реакции, не сопровождаемое расходом реагентов. В частности, таким процессом может быть образование эксиплексов, которые распадаются на исходные молекулы сразу после акта излучения.

Судя по спектрам наблюдаемой нами хемилюминесценции, в реакционной смеси действительно образуются эксиплексы: квазиконтинуум в зеленой области принадлежит эксиплексу $N_2-O(^1S)$, известному из литературных данных [6, 7]. Синий квазиконтинуум, также обнаруженный в [4], можно предположительно отнести к эксиплексу $N_2-O_2(A^3\Sigma)$. Такой продукт вполне возможен,

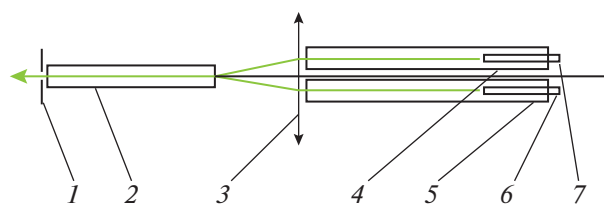


Рис. 1. Эскиз экспериментальной установки для съемки спектра фотоиницированной люминесценции воздуха. Обозначения: 1 – щель спектрального прибора; 2, 4, 5 – труба из хромированной стали диаметром 25 мм, длиной 800 мм (трубы 4 и 5) и 450 мм (труба 2); 3 – линза диаметром 75 мм, фокусное расстояние 120 мм; 6, 7 – автомобильные ксеноновые лампы. Зеленым цветом показан ход лучей исследуемого излучения.

поскольку УФ-излучение, применявшееся для инициирования в этой работе, приводит к образованию молекул $O_2(A^3\Sigma)$ с энергией 4.3 эВ; столкновения в воздухе столь энергичных молекул с молекулами азота способны привести к образованию эксиплексов. Вместе с тем, то же самое состояние $O_2(A^3\Sigma)$ можно получить с помощью двухфотонного поглощения видимого излучения столкновительными димольными комплексами синглетного кислорода [8–10].

В работах [9, 10] высокая концентрация димольных комплексов кислорода достигалась за счет повышенного давления газовой смеси; однако разумно ожидать, что рост концентрации возбужденных димольных комплексов, например, $O_2(^1\Delta)-O_2(^1\Delta)$, возможен и при атмосферном давлении – за счет фотохимического процесса, включающего образование, излучение и распад эксиплексов $O(^1S)-N_2$ [11], на присутствие которых в облучаемом атмосферном воздухе указывает полученный нами спектр. Концентрация возбужденных димольных комплексов кислорода прямо зависит от их времени жизни; в реакторе с отражающими стенками процесс излучения этих комплексов перестает быть процессом их гибели, поскольку испущенные фотоны возвращаются в систему и перепоглощаются. Описанная ситуация должна приводить к росту концентрации возбужденных димольных комплексов кислорода в реакторе.

Согласно [8], двухфотонное поглощение столкновительными димольными комплексами кислорода происходит на длинах волн 476, 575, 630 нм. Первые два пика совпадают с теми, что получены нами [4] для фотоиницируемой хемилюминесценции воздуха, поэтому можно ожидать, что эта хемилюминесценция поглощается димольными комплексами кислорода, приводя к появлению молекул $O_2(A^3\Sigma)$, в свою очередь, ответственных за возникновение синей, зеленой и красной хемилюминесценции. Такая положительная обрат-

ная связь могла бы обеспечить цепной механизм процесса, приводящего к излучению. Однако в литературе нет данных о цепных химических реакциях, не сопровождающихся образованием устойчивых продуктов. В связи с этим, в данной работе мы поставили себе целью исследовать свойства люминесценции, возбуждаемой в воздухе видимым излучением в непрерывном режиме. Кроме того, распад эксиплексов в результате излучения способствует инверсии населенностей на оптических переходах указанных возбужденных комплексов, и это представляет практический интерес для получения лазерной генерации.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для фотовозбуждения воздуха применяли автомобильные ксеноновые лампы непрерывного действия H1(5000K) (параметры лампы и ее спектр можно найти в интернете [12]). Две трубы из хромированной стали диаметром 25 мм и длиной 800 мм располагали рядом (трубы 4 и 5 на рис. 1). Хромированная сталь в качестве материала для реактора была выбрана из-за ее высокой отражающей способности. Нужно отметить, что использование реакторов из пластмассовых труб, оклеенных изнутри фольгой, приводило к тем же результатам.

Свет ксеноновой лампы вызывает свечение воздуха вблизи лампы. Это свечение имеет свойство распространяться в пространстве при определенных условиях, одним из которых выступает присутствие отражающих стенок реактора [3]. В результате на выходе из другого конца трубы мы имеем свечение воздуха с примесью света возбуждающей лампы. Чтобы избавиться от этой примеси, оказалось достаточно поставить линзу для фокусировки пучков света: свет лампы рассеянный, он не фокусируется в зоне наблюдения (вблизи фокальной плоскости линзы). При этом, если свечение воздуха создает параллельные лучи (то есть, демонстрирует свойства стимулированного излучения), они должны фокусироваться линзой в ее фокальной плоскости; сам факт фокусировки доказывает параллельность лучей. Еще одним доказательством того, что выходящий из труб свет не связан со свечением ламп, было бы исследование спектра данного света и сравнение его со спектром ксеноновой лампы. Это было сделано (см. ниже). Итак, дальние от ламп торцы труб располагали вплотную к поверхности стеклянной собирающей линзы диаметром 75 мм с фокусным расстоянием 120 мм (см. рис. 1). Как и ожидалось, излучение воздуха из труб представляло собой параллельные световые пучки, поэтому они сливались в одно круглое световое пятно на экране вблизи фокальной плоскости линзы (рис. 2). Здесь устанавливали еще одну трубу (труба 2 на рис. 1) из хромированной стали того же диаметра

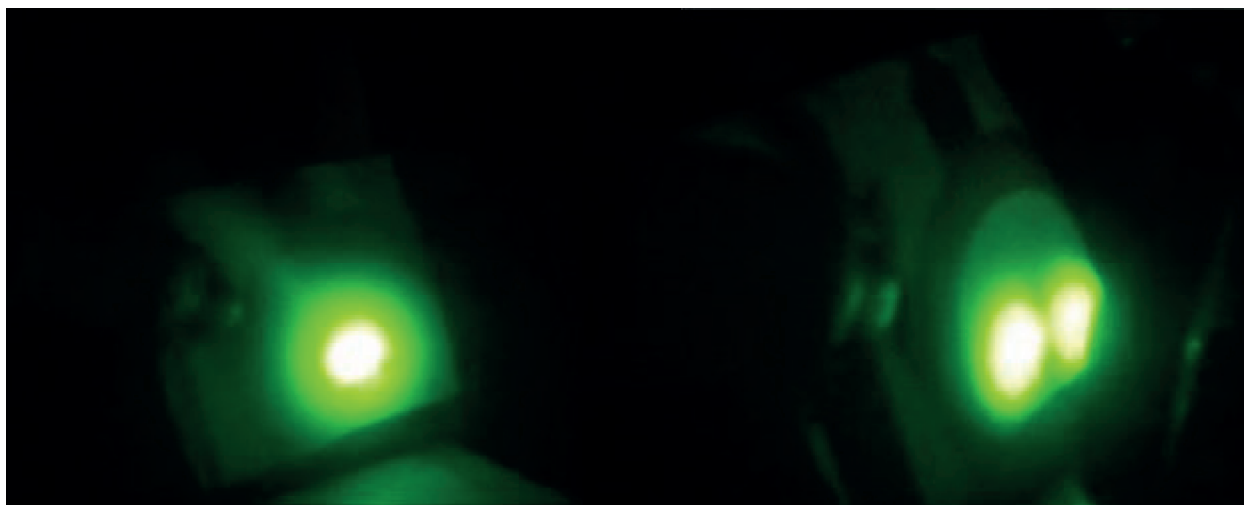


Рис. 2. Фото световых пятен, создаваемых исследуемым излучением вблизи фокальной плоскости линзы (в левой части рисунка) и в нескольких сантиметрах от фокальной плоскости (в правой части рисунка).

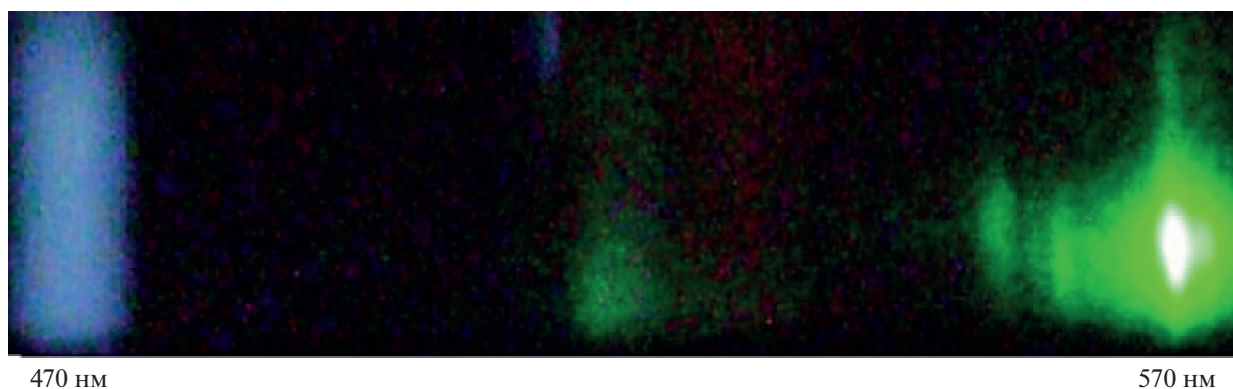


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции воздуха в сине-зеленой области внутри труб со светоотражающими стенками.

и длиной 450 мм. Таким образом, излучение воздуха из обеих труб попадало в третью трубу, а из нее – на щель спектрографа. Излучение ламп, не поглощенное воздухом внутри труб 4 и 5, рассеивалось в пространстве левее линзы, не попадая внутрь трубы 2 (рис. 1). Такая ситуация позволила получить спектр излучения воздуха внутри труб 4 и 5 (рис. 3), не осложненный излучением самих ламп.

В качестве спектрографа был взят прибор ИСП-51 с репликой дифракционной решетки 600 штрихов/мм вместо призмы. Для регистрации спектров использовали цифровую фотокамеру Sony DSC-650. Этой же фотокамерой фотографировали световые пятна на белом экране, который можно было устанавливать на разных расстояниях от линзы (рис. 2).

Для наблюдения лазерной генерации в исследуемой воздушной смеси на выходной конец от-

дельной трубы-реактора длиной 2 м ставили различного рода зеркала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектр и природа излучения воздуха из реактора

Еще раз отметим, что излучение воздуха из труб 4 и 5 состоит из параллельных лучей, которые собираются в световые пятна диаметром 1–3 мм в фокальной плоскости линзы. При этом световые пучки из двух труб формируют одно круглое пятно (рис. 2), и это само по себе указывает на стимулированное излучение, когда все испущенные фотоны имеют одно общее направление.

Как и в условиях работы [4], не обнаружено признаков химической деградации смеси: ни интенсивность люминесценции, ни ее спектр не изменялись со временем в ходе фотоиницирова-

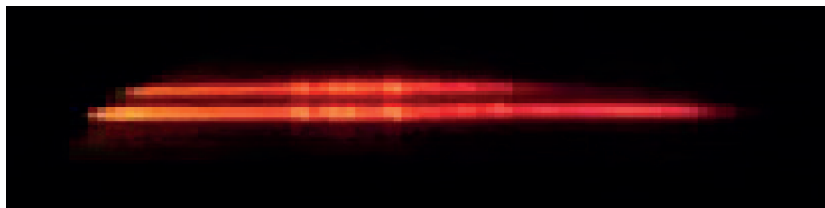


Рис. 4. Спектр фотолуминесценции воздуха в области 630 нм внутри труб со светоотражающими стенками.



Рис. 5. Кадр видеозаписи излучения из продольной прорези в трубе, заполненной излучением воздуха. Источник света (упомянутая выше ксеноновая лампа) расположен справа от прорези, помещенной на фото. Видно, что интенсивность излучения падает вдвое на длине порядка 10 см. Отсюда следует, что на длине трубы 80 см из спектра излучения ксеноновой лампы исчезает весь свет, попадающий в полосы поглощения димольных комплексов кислорода. Интенсивность света с указанными свойствами можно оценить величиной 0.025 от мощности лампы, что в случае применения лампы мощностью 35 Вт составляет примерно 1 Вт.

ния; также не выявлено признаков образования оксидов азота.

Возбуждаемый ксеноновыми лампами спектр излучения воздуха содержит три квазиконтинуума в синей, зеленой и красной частях видимого диапазона длин волн (рис. 3, 4). Два из этих квазиконтинуумов (в синей и зеленой областях спектра) уже были обнаружены ранее при облучении воздуха УФ-излучением [4].

О поглощении излучения внутри трубы

Для визуальной оценки происходящего в реакторе брали отдельную трубу из хромированной стали диаметром 25 мм, длиной 3 м, и в ней на расстоянии 2 м от того торца трубы, где была установлена ксеноновая лампа, прорезали щель шириной 4 мм и длиной 180 мм. Воздух в трубе инициировали ксеноновой лампой; регистрация излучения из щели велась при помощи видеозаписи, при этом оптическую ось объектива фотокамеры располагали перпендикулярно к оси трубы.

Заметим, что, прорезав щель в реакторе, мы тем самым позволили фотонам частично покидать реактор, и это существенно изменило ситуа-

цию в реакционной смеси. Если без щели интенсивность излучения из открытого конца трубы не зависела от длины трубы в диапазоне 0.3–5 м, судя по яркости светового пятна на выходе трубы, то с щелью отчетливо видно затухание излучения по мере удаления от источника света (рис. 5); яркость светового пятна на выходе из трубы также уменьшилась приблизительно в 2 раза. Когда щель закрывали фольгой, яркость пятна восстанавливалась.

Приведенные результаты еще раз подтверждают роль светоотражающих стенок реактора в развитии процесса стимулированного излучения и показывают наличие поглощения видимого света активированной воздушной смесью. Свет, наблюдаемый на выходе из трубы, очевидно, представляет собой продукт нескольких процессов, включающих первичное поглощение света лампы, возбуждение цепной реакции в воздухе, излучение возбужденных молекул, поглощение излученного света и повторное (многократно повторяющееся) возбуждение люминесценции.

Из рис. 5 можно видеть, что интенсивность излучения внутри трубы падает вдвое на длине по-

рядка 10 см. Поскольку фотокамера была расположена перпендикулярно оси трубы, то регистрировалось только такое излучение, которое также выходило из щели в перпендикулярном направлении. В отсутствие щели эти фотоны возвращались бы в систему и участвовали в повторяющихся процессах поглощения и образования излучающих эксиплексов — до тех пор, пока не произойдет акт стимулированного излучения вдоль оси трубы; в результате этого акта фотон вылетает из торца трубы. Сам факт выхода фотона из щели в перпендикулярном направлении очевидным образом связан с прещесствующим поглощением воздушной смесью излучения, распространяющегося вдоль трубы. Таким способом, при помощи щели, мы фактически визуализировали процесс поглощения излучения активированной воздушной смесью. В работающее здесь излучение попадает как свет ксеноновой лампы в определенном участке спектра (то есть, пик вблизи 578 нм, поглощаемый димольными комплексами кислорода), так и собственное излучение эксиплексов.

Даже если не учитывать, что фактическое поглощение больше, чем наблюдаемое с помощью узкой щели, по данным рис. 5 можно заключить, что на длине трубы 80 см из спектра излучения ксеноновой лампы исчезает весь свет, попадающий в полосы поглощения димольных комплексов кислорода. В принципе, из этих данных можно оценить ту часть мощности лампы, которая поглощается димольными комплексами внутри трубы. Учтем, что световой к.п.д. газоразрядных ламп обычно находится на уровне 20–25% от их электрической мощности; перекрытие спектра излучения лампы и спектра поглощения димольных комплексов кислорода составляет не более 10% [8, 13]. Отсюда следует, что внутри трубы длиной 80 см активированным воздухом поглощается около 2% энергии, потребляемой лампой, что составляет 0.7 Вт при электрической мощности лампы 35 Вт. Для сравнения заметим, что мощность полученной нами лазерной генерации (смотри ниже) составляла величину порядка 1 мВт.

Здесь уместно сделать некоторые замечания. Исходя из того, что поглощение в воздухе зависит от концентрации димольных комплексов синглетного кислорода [8], мы должны заключить, что в результате освещения воздуха ксеноновой лампой внутри хромированной трубы возникает высокая концентрация синглетного кислорода. Кроме того, в таких условиях для объяснения наблюдаемой независимости интенсивности излучения из трубы от длины трубы необходимо предположить, что поглощение фотонов внутри трубы полностью компенсируется их стимулированным испусканием вдоль трубы.

Наблюдение лазерной генерации из реакторов с отражающими стенками

Одной из целей настоящей работы было исследование возможности получения фотохимически инициируемой непрерывной лазерной генерации на атмосферном воздухе и поиск оптимальных условий для ее наблюдения. Предпосылкой этих поисков выступили свидетельства о наличии стимулированного излучения из реактора с воздушной смесью при непрерывном облучении видимым светом, наблюдаемые в настоящей работе. Сам факт наблюдения лазерной генерации в этих условиях послужил бы дополнительным доказательством того, что излучение, исходящее из реактора в наших условиях, является именно стимулированным, что в свою очередь, с необходимостью ведет к сделанным ниже выводам о механизме фотопроцессов в исследуемой воздушной смеси.

Закрыв “излучающий” торец хромированной трубы куском алюминиевой фольги с проколотым в ней отверстием, мы наблюдали лазерную генерацию из указанного отверстия. О том, что это именно лазерная генерация, свидетельствовала малая расходимость светового луча: размер и форма светового пятна на белом экране, удаленном от отверстия на 15 см, повторяли размер и форму самого этого отверстия.

Удалось наблюдать лазерную генерацию также из реактора диаметром 100 мм, изготовленного из пластмассовой трубы, оклеенной изнутри алюминиевой фольгой. Для возбуждения лазерной генерации использовали такую же ксеноновую лампу, что и в описанных выше опытах. Отметим, что применение иных источников видимого света (бездрессельные ртутные лампы ДРВ 160, синие и белые светодиоды) в тех же реакторах не приводило к лазерной генерации. Ранее в работе [5] мы сообщали о наблюдении лазерной генерации синего, зеленого и красного цветов, инициированной в воздухе импульсным электрическим разрядом вблизи ферритовой поверхности. В работе [4] также наблюдали лазерную генерацию бело-голубого света, но при непрерывном инициировании воздуха УФ-излучением.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

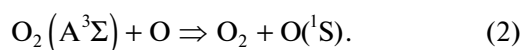
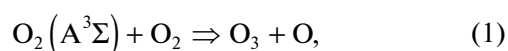
Зеленый квазиконтинуум в спектре на рис. 3 принадлежит эксиплексу $N_2-O(^1S)$ [6, 7]. Синий квазиконтинуум предположительно можно отнести к эксиплексу $N_2-O_2(A^3\Sigma_u^+)$. Оба указанных выше эксиплекса после излучения распадаются. В результате излучения и распада $N_2-O(^1S)$ появляется метастабильный атом $O(^1D)$, излучающий на длине волны 630 нм [6]. Однако судьба этих атомов определяется столкновениями с молеку-

лами кислорода, в результате которых образуется чаще всего молекулярный синглетный кислород $O_2(^1\Sigma)$ [7]. Красный квазиконтинуум на рис. 4 можно предположительно связать с излучением димольных комплексов $O_2(^1\Delta)-O_2(^1\Delta)$. Рекомбинация $O + NO + M \Rightarrow NO_2 + M$ также приводит к излучению в красной области спектра [11], однако такую возможность следует отвергнуть на основании различий между спектром на рис. 4 и спектром излучения двуокиси азота, описанном в [11]: согласно этим данным этот спектр представляет собой континуум с максимумом при 600 нм. В отличие от этого в спектре на рис. 4 на длине волны 600 нм обнаруживается не максимум, но коротковолновая граница континуума.

В опубликованной работе [1] сообщали о наблюдении иного спектра излучения воздуха при воздействии на него импульсом электрического разряда вблизи ферритовой поверхности: тогда были обнаружены полосы молекул $NO(B^2\Pi)$. Различие в спектрах излучения связано с применением светоотражающих стенок реактора. В условиях работы [4] и в данном исследовании доминирующим процессом для всех эксиплексов было стимулированное излучение, а в условиях работы [1] преобладал распад эксиплексов, приводящий к $NO(B^2\Pi)$.

Таким образом, в условиях данной работы подтверждено фотохимическое возбуждение излучения из воздушной среды при атмосферном давлении во всех областях спектра, существенных для возбуждения молекул $O_2(A^3\Sigma)$, в соответствии с данными [8]. При этом обнаружено, что внутри реактора с отражающими стенками (алюминиевая фольга, хромированная сталь) коэффициент поглощения на порядки больше, чем на открытом воздухе вследствие накопления в ходе облучения значительных концентраций димольных комплексов синглетного кислорода. Такой вывод согласуется с полученным спектром (рис. 3). Действительно, эксиплекс $N_2-O_2(A^3\Sigma_u^+)$ несет на себе энергию, превышающую 4.3 эВ. После испускания синего фотона, энергия которого составляет 2.63 эВ, на комплексе остается еще 1.67 эВ. Этой энергии достаточно для того, чтобы в результате распада этого комплекса получился синглетный кислород. Время жизни молекул синглетного кислорода внутри реактора с отражающими стенками не менее 7 с [13], что позволяет накопить заметные его концентрации.

Для объяснения появления атомов $O(^1S)$ можно предложить следующие реакции:



Появление озона вызывает интенсивное поглощение в полосе Чаппуса в области 440–850 нм [6], в которую попадает все обнаруженное в данной работе излучение, это должно увеличить выход атомов O и скорость реакции (2). Именно с этим можно связать преобладание зеленого излучения комплексов $N_2-O(^1S)$ над излучением других излучателей, обнаруженных в спектрах (рис. 3, 4). Фотолиз озона с выходом, близким к 1, приводит к образованию синглетного кислорода (и димольных комплексов синглетного кислорода), что, в свою очередь, усиливает поглощение излучения и скорость цепной фотохимической реакции.

Применение реактора из хромированной стали заставляет вспомнить об образовании излучающих комплексов кислорода с металлами на стенке реактора [14], однако в обсуждаемых опытах не обнаружен вклад указанного процесса в наблюдаемое стимулированное излучение: в противном случае на экране (рис. 2) должны были бы появиться световые пятна в виде колец. Если же адсорбированные комплексы излучают спонтанно, то это излучение, так же как излучение ксеноновой лампы, не внесло бы вклада ни в полученные спектры (рис. 3, 4), ни в картину световых пятен на экране (рис. 2), ни в лазерную генерацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1) В согласии с результатами диссертации И.В. Багрова [8] освещение воздуха излучением видимого диапазона приводит к фотохимическим последствиям в виде образования атомов кислорода $O(^1S)$ и молекул $O_2(A^3\Sigma_u^+)$.

2) За этим следует образование эксиплексов, излучающих в тех областях длин волн, в которых поглощают димольные комплексы кислорода и озон.

3) Развивается цепная реакция.

4) В результате положительной обратной связи излучение эксиплексов усиливается, особенно в условиях реактора со светоотражающими стенками. Распад эксиплексов приводит к накоплению синглетного кислорода. Это способствует росту поглощения излучения димольными комплексами синглетного кислорода и дальнейшему росту скорости цепной реакции.

5) Формирование инверсии населенностей на оптических переходах эксиплексов приводит к появлению стимулированного излучения и лазерной генерации, что представляет практический интерес для создания эффективных фотохимических лазеров на воздушной смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов В.Г., Федотова Е.Я. // Химическая Физика. 2015. Т. 34. № 3. С. 44. <https://doi.org/10.7868/S0207401X15030048>
2. Fedotov V.G., Fedotova E.Y. // Biomed. J. For Scient. & Techn. Res. 2019. V. 19. № 4. P. 14445. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.19.003328>
3. Fedotov V.G. // Biomed. J. for Scient. & Techn. Res. 2019. V. 16. № 3. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.16.002861>
4. Федотов В.Г., Федотова Е.Я. Сборник трудов XXVI ежегодной конференции ФИЦ ХФ РАН. Секция “Динамика химических и биологических процессов”. Москва, 2021. С. 138–141.
5. Fedotov V.G., Fedotova E.Y. // researchgate.net/publication/323421915_Multicolor_Laser_Generation_Resulting_from_a_Chain_Reaction_of_Atmospheric_Nitrogen_Oxidation_initiated_by_an_Electric_Discharge
6. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. Перевод с англ. М.: “Мир”, 1981. С. 189.
7. Black G., Sharpless R.L., Slanger T.G. // J. Chem. Phys. 1975. V. 63. P. 4546.
8. Багров И.В. Дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м.н. ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 2016.
9. Cooper P.D., Johnson R., Quickenden T.I. // Planetary and Space Science. 2003. V. 51. P. 183.
10. Гуринович Г.П. // Журн. Прикл. Спектроскопии. 1991. Т. 54. № 3. С. 403.
11. Fateev A.A., Fink E.H., Pravilov A.M. // Meas. Sci. Technol. 1999. V. 10. P. 182.
12. <https://www.drive2.ru/b/4062246863888413809/>
13. Hasegawa K., Yamada K., Sasase R., Miyazaki R. // Chem. Phys. Lett. 2008. V. 457(4). P. 312. <https://doi.org/10.1016/cplett.2008.04.031>
14. Kimura J. Conference: Bioluminescence and Chemiluminescence – Progress and Perspectives. 13-th International Symposium 2004, Pacifico Yokohama, Japan. https://doi.org/10.1142/9789812702203_0034