

Импульсный электроионизационный разряд в кислородсодержащих газовых смесях: электрические характеристики, спектроскопия и выход синглетного кислорода*

Н.П.Вагин, А.А.Ионин, Ю.М.Климачев, А.А.Котков, И.В.Кочетов, А.П.Напартович,
Ю.П.Подмарьков, Л.В.Селезнев, Д.В.Синицын, М.П.Фролов, Г.Д.Хагер, Н.Н.Юрьшев

Экспериментально исследованы электрические и спектроскопические характеристики электроионизационного (ЭИ) разряда в кислороде и кислородсодержащих газовых смесях при давлениях газа до 100 Тор и большом возбуждаемом объеме (~18 л). Показано, что ЭИ разряд в чистом кислороде и его смесях с благородными газами неустойчив и характеризуется малым удельным энерговыделением. При добавлении небольших количеств (~1% – 10%) окиси углерода или водорода в кислород или его смеси с благородными газами устойчивость разряда заметно повышается, а удельный энерговыделитель увеличивается более чем на порядок, достигая ~6.5 кДж·л⁻¹·атм⁻¹ в расчете на молекулярные компоненты газовой смеси. Часть энергии, вкладываемой в ЭИ разряд, идет на возбуждение колебательных уровней молекулярных присадок, что экспериментально продемонстрировал запуск СО-лазера на смеси O₂: Ar: CO = 1:1:0.1. Представлены экспериментальные результаты по спектроскопии электронно-возбужденных состояний кислорода O₂(a¹A_g) и O₂(b¹Σ_g⁺), образующихся в ЭИ разряде. Разработана методика измерения концентрации синглетного кислорода (СК) в состоянии O₂(a¹A_g) в послесвечении импульсного ЭИ разряда путем сравнения с интенсивностью излучения СК заданной концентрации, вырабатываемого в химическом генераторе. Предварительные измерения выхода СК в ЭИ разряде показали, что его значение ~3% для W ~ 1.0 кДж·л⁻¹·атм⁻¹ согласуется с теоретической оценкой. Из теоретического расчета, проведенного для W ~ 6.5 кДж·л⁻¹·атм⁻¹ при фиксированной температуре, следует, что выход СК может составлять ~20%, что превышает значение, необходимое для достижения порога генерации в кислородно-иодном лазере при комнатной температуре.

Ключевые слова: синглетный кислород, несамостоятельный разряд, СО-лазер, кислородно-иодный лазер.

1. Введение

В химических кислородно-иодных лазерах (ХКИЛ) в качестве энергетического донора для излучающего атомарного иода выступает молекула синглетного кислорода (СК) в электронно-возбужденном состоянии O₂(a¹A_g). Нарботка СК в электрическом разряде (см. обзоры [1–3]) позволяет исключить необходимость применения токсичных веществ, которые используются для получения СК в химическом генераторе. В многочисленных публикациях (см., напр., [4–19]) указывалось на возможность создания электроразрядного кислородно-иодного лазера (КИЛ). Подчеркивалось, что для достижения положительного коэффициента усиления излучения в атомарном иоде выход СК

$$Y = \frac{[O_2(a^1A_g)]}{[O_2(a^1A_g)] + [O_2(X^3\Sigma_g^-)]},$$

где [O₂(a¹A_g)] и [O₂(X³Σ_g⁻)] – концентрации СК и кислорода в основном электронном состоянии, должен превышать зависящий от температуры пороговый выход

$$Y_{th} = [1 + 1.5 \exp(402/T)]^{-1},$$

составляющий при комнатной температуре газа 15%. В ряде работ сообщалось о достижении такого и даже большего выхода СК в самостоятельном разряде [7, 12–14]. Вместе с тем малые значения парциального давления кислорода (менее 1 Тор) в экспериментах по исследованию образования СК в самостоятельном разряде не отвечают условиям современных требований к КИЛ, поскольку парциальное давление кислорода должно превышать 10 Тор.

В работах [16–18] отмечалось, что эффективность возбуждения кислорода из основного в синглетное состояние O₂(a¹A_g) зависит от приведенной напряженности поля E/N. Эта зависимость имеет ярко выраженный максимум при напряженности поля E/N ~ 10⁻¹⁶ В·см², характерной для несамостоятельного разряда. В [5, 6, 11] в качестве несамостоятельного разряда для наработки СК экспериментально исследовался электроионизационный (ЭИ) разряд в смесях кислорода с благородными газами, а в [10] – в смесях с азотом. В этих экспериментах удельный энерговыделитель W в расчете на парциальное давление кислорода составил 100 – 200 Дж·л⁻¹ × атм⁻¹. При таких значениях W выход СК не может

*Статья подготовлена по материалам доклада TuR2-11 на конференции «XI Conference on Laser Optics» (30 июня – 4 июля 2003 г., С.-Петербург, Россия).

Н.П.Вагин, А.А.Ионин, Ю.М.Климачев, А.А.Котков, Ю.П.Подмарьков, Л.В.Селезнев, Д.В.Синицын, М.П.Фролов, Н.Н.Юрьшев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; тел./факс: (095) 132 04 25; e-mail: aion@mail.lebedev.ru

И.В.Кочетов, А.П.Напартович. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Троицк, Московская обл.; тел.: (095) 334 04 50; e-mail: apn@trinity.ru

G.D.Hager. Air Force Research Laboratory, Albuquerque, NM, USA

Поступила в редакцию 8 января 2004 г., после доработки – 6 апреля 2004 г.

превышать нескольких процентов. Столь низкие значения W были связаны с нестабильностью разряда в кислородсодержащих газовых смесях даже при небольших объемах разряда (~ 0.1 л).

В работе [20] добавление в газовую смесь молекулярных компонентов позволило увеличить концентрацию свободных электронов в разряде и тем самым повысить стабильность ЭИ разряда. Здесь продолжено исследование электрических характеристик ЭИ разряда в кислородсодержащих газовых смесях, начатое в [20]. При этом цель настоящей работы заключалась в том, чтобы оценить выход СК в ЭИ разряде в отсутствие и при наличии молекулярных присадок. Проведен спектроскопический анализ свечения и послесвечения импульсного ЭИ разряда в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Отработана методика измерения концентрации СК по его люминесценции в послесвечении импульсного ЭИ разряда путем сравнения с интенсивностью излучения СК с заданной концентрацией, вырабатываемого в химическом генераторе СК.

2. ЭИ разряд в кислородсодержащих газовых смесях

Эксперименты по исследованию характеристик электрического разряда в кислородсодержащих газовых смесях проводились на импульсной ЭИ установке с возбуждаемым объемом ~ 18 л [20]. Электрическая проводимость газа в несамостоятельном ЭИ разряде создавалась внешним источником ионизации, в качестве которого применялся электронный пучок с энергией электронов ~ 150 кэВ. Напряжение на ЭИ разряд подавалось с батареи конденсаторов общей ёмкостью C , изменяемой в разных экспериментах от 45 до 370 мкФ. Энергия Q , вкладываемая в ЭИ разряд, определялась путем измерения начального напряжения U_0 и конечного (после импульса) напряжения U_1 на электроразрядном промежутке: $Q = C(U_0^2 - U_1^2)/2$. Длительность импульса ЭИ разряда определялась длительностью электронного пучка, которая в этих экспериментах составляла ~ 100 мкс.

В проведенных экспериментах исследовались свойства импульсного ЭИ разряда в кислородсодержащих газовых смесях. Степень чистоты кислорода составляла 99.999 %. Зависимости W от начальной приведенной напряженности электрического поля E/p электроиониза-

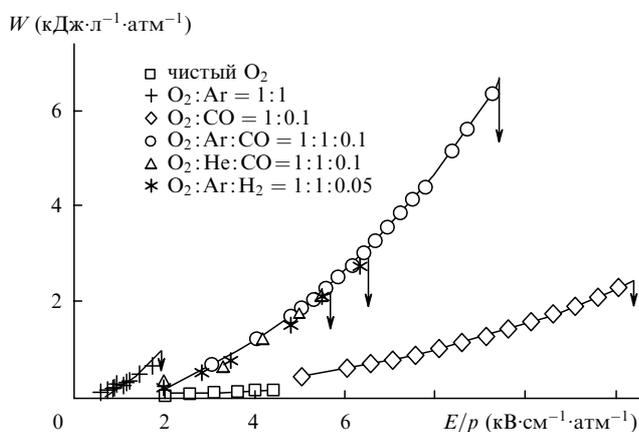


Рис.1. Зависимости удельного энерговклада W в расчете на парциальное давление молекулярных компонентов (O₂, CO или H₂) от параметра E/p при полном давлении газа $p = 30$ Тор; $C = 370$ мкФ.

ционного разряда в различных кислородсодержащих смесях представлены на рис.1. Максимальное значение удельного энерговклада в ЭИ разряд ограничивалось электрическим пробоем межэлектродного промежутка (вертикальные стрелки на рис.1). В чистом кислороде при давлениях от 3 до 100 Тор $W \leq 0.1$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹. Разбавление кислорода аргоном позволило при заданном начальном значении параметра E/p увеличить W в расчете на парциальное давление молекулярных компонентов смеси газов. При этом с увеличением напряженности поля устойчивость ЭИ разряда уменьшалась, что проявлялось в появлении пульсаций во временной динамике импульсов тока. Механизм подобной неустойчивости в аргонсодержащих смесях обсуждался в работе [21]. В эксперименте небольшие (до 10 %) добавки CO или H₂ в газовую смесь увеличили стабильность ЭИ разряда и позволили повысить максимальное значение W [22]. Следует отметить, что ранее в работах [23, 24] добавки CO применялись для стабилизации ЭИ разряда при создании эффективного импульсного N₂O-лазера. В проведенных экспериментах добавление ~ 10 % окиси углерода в чистый кислород привело к увеличению максимального значения W до ~ 2.3 кДж·л⁻¹·атм⁻¹ (рис.1). В газовых смесях состава O₂:He:CO = 1:1:0.1 и O₂:Ar:H₂ = 1:1:0.05 максимальное значение W в расчете на молекулярные компоненты смеси (O₂, CO или H₂) достигало ~ 2 кДж·л⁻¹·атм⁻¹. С точки зрения увеличения максимального значения W следует, по-видимому, использовать газовую смесь O₂:Ar:CO = 1:1:0.1, где был достигнут наибольший энерговклад (~ 6.5 кДж·л⁻¹·атм⁻¹).

3. Теоретические оценки выхода синглетного кислорода в ЭИ разряде

Результаты проведенных экспериментов продемонстрировали, что добавление CO или H₂ позволяет существенно повысить устойчивость ЭИ разряда в кислородсодержащих смесях и достичь большого удельного энерговклада (~ 6.5 кДж·л⁻¹·атм⁻¹) в расчете на молекулярные компоненты смеси в большом (~ 18 л) возбуждаемом объеме. При таком энерговкладе можно надеяться на то, что выход СК превысит Y_{th} для КИЛ. Однако при добавлении молекулярных газов часть вложенной в разряд энергии затрачивается на их возбуждение. Чтобы оценить роль неупругих процессов взаимодействия электронов с добавками CO, H₂ или D₂ и оценить выход СК в ЭИ разряде, было выполнено моделирование кинетических процессов, протекающих в плазме разряда.

За основу была принята кинетическая модель, детально описанная в работе [25], где она использовалась для расчета величины приведенной напряженности электрического поля E/N в положительном столбе самостоятельного разряда в газовой смеси СК:O₂ = 1:1.

Усложнение модели, связанное с учетом молекулярных компонентов CO, H₂ и D₂, кратко описано в работе [20]. В настоящей работе в модель были дополнительно включены процессы возбуждения колебательных уровней молекулярных компонентов, процессы отлипания электронов от ионов O⁻ при столкновениях с молекулами CO, H₂ и D₂, процессы ионизации и рекомбинации, а также возбуждения атомов и молекул под действием пучка электронов. При больших значениях W , достигнутых в экспериментах, функция распределения молекул по колебательным уровням оказывается существенно не-

равновесной. Для описания сильной неравновесности и эффектов ангармонизма молекул в процессах колебательно-колебательного обмена была использована аналитическая модель [26].

Возбуждение колебательных уровней молекулярных присадок может приводить к уменьшению эффективности возбуждения СК. Например, максимальная эффективная (с учетом каскадного возбуждения) доля энергии электронов ($\sim 56\%$), идущая на возбуждение состояния $O_2(a^1A_g)$, уменьшалась до 18% при добавлении 5% CO в смесь $O_2:Ar = 1:1$. При этом оптимальное значение E/N , соответствующее максимальному возбуждению СК, увеличивалось от 0.69×10^{-16} до 2.2×10^{-16} В·см². Это объясняется большим сечением возбуждения колебательных уровней молекулы CO. Поскольку сечения колебательного возбуждения молекул H_2 и D_2 заметно меньше, то добавление 2.5% H_2 или D_2 в смесь $O_2:Ar = 1:1$ не приводит к существенному изменению в балансе энергии электронов. В частности, максимальная эффективная доля энергии электронов, идущая на возбуждение СК, уменьшалась при добавлении 2.5% H_2 или D_2 до 43% и 49% соответственно. При этом оптимальное значение E/N изменялось незначительно.

Для анализа особенностей возбуждения СК в несамостоятельном разряде на рис.2 представлены зависимости выхода СК от вложенной в разряд энергии для разных смесей при давлении 30 Тор и при постоянной температуре газа 300 К, т. е. при условии эффективного охлаждения газа. Импульс тока электронного пучка считался прямоугольным и имел длительность 100 мкс. Величина приведенного электрического поля в расчетах принималась постоянной и соответствовала максимуму эффективного возбуждения СК для каждой смеси газов. Расчетное значение вложенной в разряд энергии варьировалось в численной модели путем изменения тока электронного пучка.

Результаты этих расчетов указывают на преобладание рекомбинационного механизма гибели электронов, что свидетельствует о высокой скорости отлипания электронов в кислородсодержащих газовых смесях с добавкой молекулярных газов. Концентрация СК рассчитывалась для момента времени 200 мкс, наступающего через 100 мкс после окончания импульса ЭИ разряда. Вертикальными линиями на рис.2 показан максимальный энер-

говклад в расчете на парциальное давление молекулярных компонентов смеси, достигнутый в экспериментах для различных газовых смесей. Горизонтальной линией представлено пороговое значение выхода СК ($Y_{th} = 15\%$ при $T = 300$ К). При малых энерговкладах концентрация СК растет линейно, а наклон прямой определяется эффективной долей возбуждения СК. Для смеси $O_2:Ar = 1:1$ максимальный энерговклад, полученный в эксперименте при сохранении устойчивости ЭИ разряда, составил ~ 2 кДж·л⁻¹·атм⁻¹. При таком энерговкладе выход СК значительно меньше Y_{th} . Добавление H_2 в газовую смесь ненамного снижает эффективную долю возбуждения СК, а экспериментально достигнутый энерговклад при этом заметно увеличивается и достигает 2.6 кДж·л⁻¹·атм⁻¹, причем выход СК приближается к Y_{th} . При добавлении CO в газовую смесь устойчивость ЭИ разряда существенно возрастала; это позволило достичь $W = 6.5$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹, что соответствует выходу синглетного кислорода $\sim 20\%$, превышающему Y_{th} .

4. Спектроскопия ЭИ разряда и люминесценция возбужденного кислорода

Для определения концентрации СК наиболее часто (см., напр., [1–3]) измеряют интенсивность люминесценции СК вблизи длины волны $\lambda = 1.27$ мкм перехода $O_2(a^1A_g) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-)$. Однако для расчета концентрации СК по этим данным необходимо знать коэффициент Эйнштейна, значение которого в разных работах может различаться в два раза [27]. Применение такого метода измерения требует довольно точной калибровки ИК детектора, осуществляемой по излучению поверхности черного тела. В реальных же экспериментах измеряется интенсивность объемного источника излучения, что ставит под сомнение точность такой калибровки (см. также [28]).

Для повышения достоверности измерения абсолютной концентрации и выхода СК в наших предварительных экспериментах сравнивались интенсивности излучения СК, полученного в ЭИ разряде и в химическом генераторе с контролируемой концентрацией СК. При этом геометрия объемов возбужденного кислорода и оптическая схема регистрации излучения в обоих случаях были одинаковы. Следует отметить, что при такой калибровке отсутствует необходимость в использовании коэффициента Эйнштейна и в абсолютной калибровке ИК детектора. Такой же метод может быть применен для определения концентрации кислорода в состоянии $O_2(b^1\Sigma_g^+)$. В химическом генераторе она находится из сравнения интенсивностей излучения кислорода в этом состоянии ($\lambda \approx 762$ нм) и излучения на переходе $O_2(a^1A_g) + O_2(a^1A_g) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-) + O_2(X^3\Sigma_g^-)$ с длиной волны $\lambda \approx 634$ нм. Этим методом, например, нами была определена концентрация кислорода в состоянии $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, полученном в самостоятельном импульсном разряде в кислороде ($p = 2.8$ Тор, $U = 15$ кВ, $C = 10$ нФ, $Q_{disch} = 2$ Дж, $V = 0.8$ л), которая в этих экспериментах составила $\sim 10^{14}$ см⁻³.

Состояние кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ играет важную роль в образовании СК в электрическом разряде, поэтому люминесценция в области 762 нм несет информацию о концентрации СК [17]. Исследование люминесценции ЭИ разряда в видимой области спектра было проведено с помощью призмного спектрометра ИСП-51, снабженного ПЗС-линейкой для регистрации спектра. Экспери-

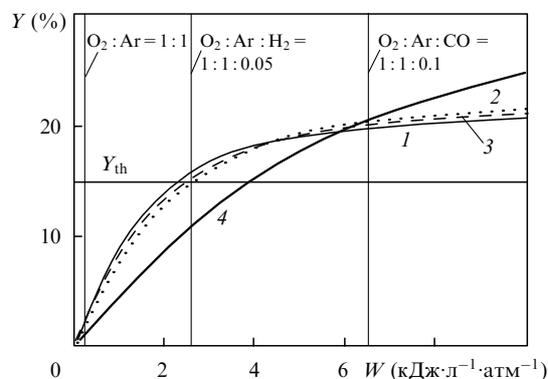


Рис.2. Теоретические зависимости выхода синглетного кислорода Y от удельного энерговклада в расчете на молекулярные компоненты для смесей $O_2:Ar = 1:1$ (1), $O_2:Ar:H_2 = 0.95:1:0.05$ (2), $O_2:Ar:D_2 = 0.95:1:0.05$ (3) и $O_2:Ar:CO = 0.9:1:0.1$ (4). Вертикальными линиями указан максимальный энерговклад, достигнутый экспериментально для смесей O_2-Ar , $O_2-Ar-CO$, O_2-Ar-H_2 . Горизонтальная линия – пороговое значение Y_{th} при $T = 300$ К.

ментально полученный спектр излучения ЭИ разряда и его послесвечения со спектральным разрешением ~ 2 нм представлен на рис.3. На спектрограмме видны *P*- и *R*-ветви перехода $O_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-)$ ($\lambda \approx 762$ нм), люминесценция атомарного кислорода ($\lambda \approx 778$ нм) и спектральная линия на длине волны ~ 589 нм; в работе [29] было сделано предположение, что эта линия является линией люминесценции оксида золота. Эксперименты, проведенные с большим спектральным разрешением, показали, что она представляет собой дублет атомарных линий, идентифицированных нами как линии люминесценции натрия (589.0 и 589.6 нм). Появление натрия в разряде может быть связано с тем, что ранее данная ЭИ установка применялась в качестве CO_2 -лазера, оптика для которого изготавливалась из NaCl и KCl. Действительно, в спектре ЭИ разряда при больших энерговкладах (свыше $1 \text{ кДж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$) наблюдается также дублет калия (766.5 и 769.9 нм) (рис.4,б). Этот дублет перекрывается с *P*-ветвью перехода $O_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-)$ (рис.4,а), что может приводить к ошибкам в измерении интенсивности люминесценции состояния $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, особенно при использовании спектральных фильтров. Тем не менее линии калия не мешают регистрации люминесценции на *R*-ветви перехода $O_2(b^1\Sigma_g^+) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-)$ и атомарной линии кислорода ($\lambda \approx 778$ нм).

Подобный спектр излучения ЭИ разряда и его послесвечения в кислородсодержащих смесях наблюдался и при криогенных температурах ($\sim 100 - 150$ К). Низкие температуры кислородсодержащей газовой смеси интересны с точки зрения уменьшения порогового значения выхода СК ($Y_{th} \sim 1\%$ при $T = 100$ К). Следует отметить, что при криогенных температурах возрастает роль колебательно-колебательного VV-обмена между молекулами CO, содержащимися в газовой смеси. В результате такого обмена происходит заселение большого числа (вплоть до 40) колебательных уровней *V* молекулы CO, на которых появляется люминесценция, а при включении обратной связи может возникнуть генерация лазерного излучения в среднем ($\lambda \sim 5 - 6$ мкм) ИК диапазоне (см., напр., [30]).

Действительно, в наших экспериментах наблюдалась генерация CO-лазера на газовой смеси $O_2:Ar:CO = 1:1:0.1$ при криогенной температуре $T \sim 100$ К. Оптический резонатор этого лазера состоял из полностью отражающего сферического медного и частично отражающего (коэффициент отражения $\sim 50\%$) зеркал. На рис.5 представлены зависимости удельного энергосъема *P* от параметра E/N , полученные для кислородсодержащей газовой смеси $O_2:Ar:CO = 1:1:0.1$ и азотной смеси $N_2:Ar:CO = 1:1:0.1$, типичной для CO-лазера, при плотности $N = 0.08$ Амага (относительная плотность 1 Амага соответствует давлению 1 атм при нормальных

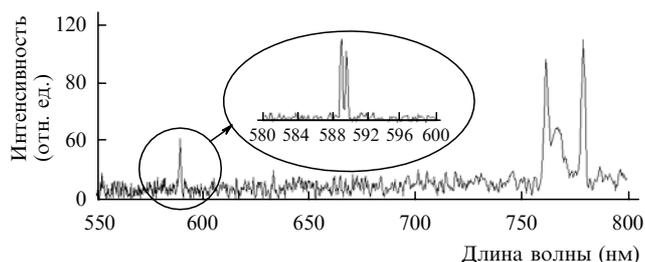


Рис.3. Спектр ЭИ разряда и его послесвечения в видимой области. Газовая смесь $O_2:CO = 1:0.1$, $p = 30$ Тор, $W \sim 1 \text{ кДж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$.

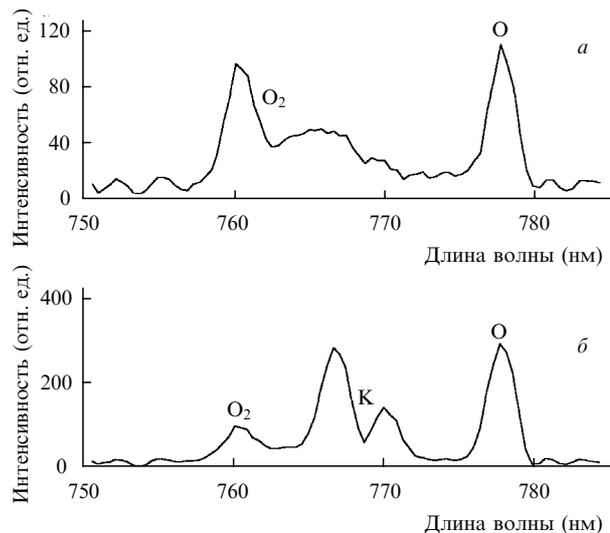


Рис.4. Спектр ЭИ разряда и его послесвечения вблизи длины волны 760 нм. Газовая смесь $O_2:CO = 1:0.1$, $p = 30$ Тор, $W \sim 1$ (а) и $2.3 \text{ кДж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ (б).

условиях). Видно, что для CO-лазера с кислородсодержащей газовой смесью, в отличие от CO-лазера с типичной азотной смесью, наблюдается явно выраженный максимум удельного энергосъема при $E/N \approx 2.2 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Амага}^{-1}$. Уменьшение *P* при дальнейшем росте параметра E/N в лазере с кислородсодержащей газовой смесью может быть связано с увеличением эффективности накачки электронных уровней молекулы кислорода и со снижением эффективности накачки колебательных уровней молекулы CO. Таким образом, исследование генерационных характеристик такого лазера дает информацию о процессах возбуждения кислорода в электрическом разряде.

Люминесценция СК в ЭИ разряде и его послесвечении наблюдалась с помощью дифракционного монохроматора ИКС-31 (спектральное разрешение в экспериментах составило ~ 10 нм) и неохлаждаемого германиевого фотодиода с временем отклика ~ 200 мкс. Временной сигнал люминесценции СК на длине волны 1.27 мкм имел экспоненциальную форму с максимумом на переднем фронте и последующим спадом в течение ~ 10 мс (рис.6). Для анализа спектрально-временных характеристик люминесценции ЭИ разряда амплитуда сигнала измерялась в определенный момент времени на разных длинах волн. Спектральное распределение люминесценции на второй и шестой миллисекундах от начала ЭИ разряда

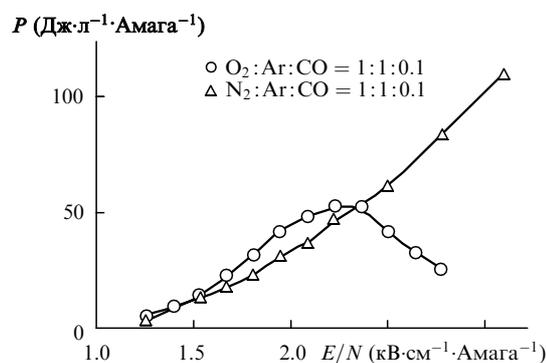


Рис.5. Зависимости удельного энергосъема *P* электроионизационного CO-лазера от параметра E/N при $N = 0.08$ Амага, $T = 100$ К для смесей $O_2:Ar:CO = 1:1:0.1$ и $N_2:Ar:CO = 1:1:0.1$.

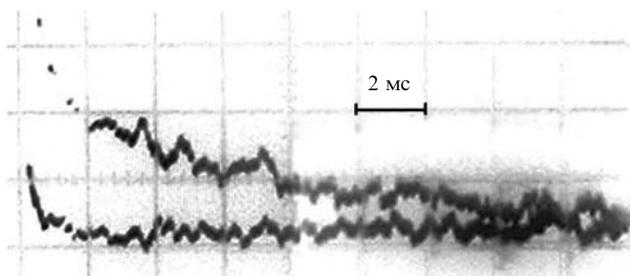


Рис.6. Временное поведение сигнала люминесценции СК на длине волны 1.27 мкм (вверху) и сигнал с фотодетектора без ЭИ разряда при наличии электронного пучка (внизу). Смесь $O_2:He:CO = 1:2:0.01$, $p = 90$ Тор, $T = 300$ К, $W = 0.5$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹.

представлено на рис.7. В обоих случаях ширина спектральной линии на полувысоте составляла ~ 20 нм.

На рис.8 показаны зависимости интенсивности люминесценции СК на второй миллисекунде от значения W для газовых смесей $O_2:CO = 1:0.1$ и $O_2:CO = 1:0.01$ с примерно 10 %-ным и 1 %-ным содержанием окиси углерода. Применение смеси с меньшим содержанием СО приводило к увеличению интенсивности люминесценции СК, что, по всей видимости, связано с увеличением доли энергии, идущей на возбуждение кислорода. Сравнение гелиевой и аргоновой газовых смесей ($O_2:Ar:CO = 1:1:0.01$ и $O_2:He:CO = 1:1:0.01$) показало, что применение гелия позволяет увеличить выход СК почти в два раза. Такой эффект может быть связан с возрастанием роли диффузии и теплопроводности в гелийсодержащем газе и со сглаживанием пространственных градиентов. При этом в аргоновой смеси в течение первых одной-двух миллисекунд наблюдается интенсивная люминесценция, идентифицированная нами как свечение возбужденного аргона ($\lambda = 1.2702$ мкм), что затрудняет наблюдение люминесценции СК.

Таким образом, из проведенных экспериментов следует, что выбор газовой смеси играет важную роль в увеличении энерговыклада и выхода СК. Предварительные измерения выхода СК в ЭИ разряде показали, что для $W \sim 1.0$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹ он составляет $\sim 3\%$. Теоретичес-

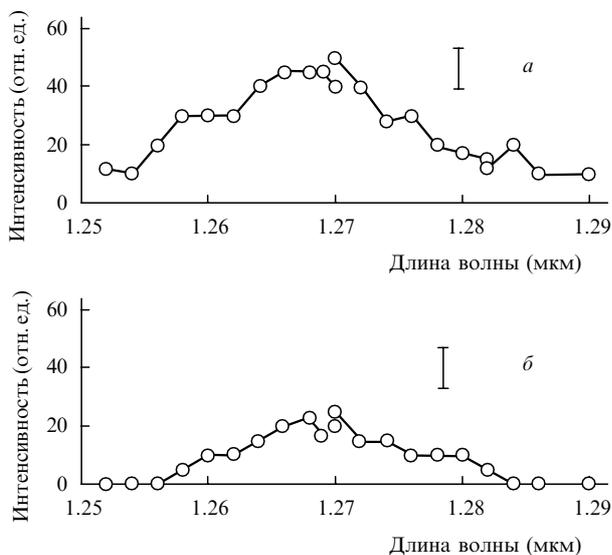


Рис.7. Спектральные характеристики люминесценции СК на второй (а) и шестой (б) миллисекундах от начала ЭИ разряда. Здесь и на рис.8 вертикальный отрезок соответствует погрешности измерения.

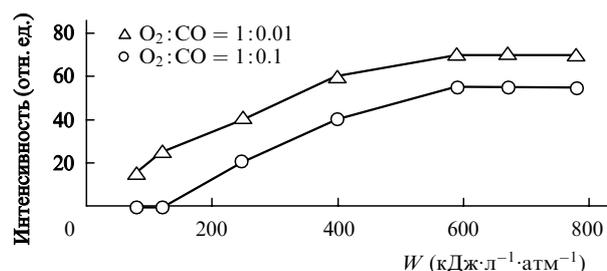


Рис.8. Амплитуды сигнала люминесценции СК на второй миллисекунде от начала ЭИ разряда в зависимости от удельного энерговыклада для смеси $O_2:CO = 1:0.01$ и $O_2:CO = 1:0.1$.

кая модель, в которой учитывалось изменение температуры газа при его возбуждении в ЭИ разряде, предсказала для этих же экспериментальных условий выход СК на уровне 4%–6%, что неплохо согласуется с данными измерения концентрации СК.

5. Заключение

Результаты экспериментального исследования продемонстрировали, что молекулярные добавки (СО или H_2) в чистый или в разбавленный благородным газом кислород позволяют существенно повысить устойчивость ЭИ разряда и достичь высокого удельного энерговыклада при большом объеме возбуждения (~ 18 л). Наибольшее значение W в пересчете на молекулярные компоненты смеси (~ 6.5 кДж·л⁻¹·атм⁻¹) экспериментально получено для газовой смеси $O_2:Ar:CO = 1:1:0.1$ при полном давлении газа 30 Тор. При этом часть энергии, вкладываемой в ЭИ разряд, идет на возбуждение колебательных уровней молекулярных присадок, что было продемонстрировано запуском СО-лазера на смеси $O_2:Ar:CO = 1:1:0.1$.

Анализ экспериментальных результатов по спектроскопии свечения и послесвечения ЭИ разряда в кислородсодержащих газовых смесях в видимой и ближней ИК областях спектра показал, что состав газовой смеси оказывает существенное влияние на выход СК. Была проведена калибровка оптической схемы регистрации люминесценции СК на основе сравнения интенсивностей свечения возбужденного кислорода, полученного в химическом и электрическом генераторах СК. Предварительные измерения выхода СК в ЭИ разряде показали, что для $W \sim 1.0$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹ его значение составляет $\sim 3\%$, что неплохо согласуется с теоретической оценкой. Из теоретического расчета, проведенного для $W \sim 6.5$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹ в предположении постоянства газовой температуры, следует, что выход СК в первом электронно-возбужденном состоянии $O_2(a^1D_g)$ может составить $\sim 20\%$, т.е. превысить его значение, необходимое для достижения порога генерации в кислородно-иодном лазере при комнатной температуре. Большого выхода СК при высокой эффективности его наработки следует ожидать и для других типов несамостоятельного разряда, например для разряда, описанного в работе [16]. Следует отметить, что экспериментальные результаты получены для импульсного режима горения разряда в отсутствие охлаждения газа, необходимого для создания КИЛ с электроразрядным источником СК [18]. Понижение температуры газа облегчит условия создания КИЛ на основе генератора СК, в котором используется несамостоятельный разряд.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-02-17452), AFRL, EOARD, МНТЦ (проект 2415P), Фонда содействия отечественной науке и грантов Президента РФ МК-930.2004.2 и НШ-794.2003.2.

- Wayne R.P. *Adv. Photochemistry*, **7**, 311 (1969).
- Wasserman H.H., Murray R.W. (Eds). *Singlet Oxygen* (New York: Acad. Press, 1979).
- Frimer A.A. (Ed.) *Singlet O₂. Physical-Chemical Aspects* (Boca Raton, Florida: CRC Press Inc., 1985).
- Залесский В. *ЖЭТФ*, **67**, 30 (1974).
- Fournier G., Bonnet J., Pigache D. *J. de Phys. (Colloque C9)*, **41**, 449 (1980).
- Fournier G., Bonnet J., David D., Pigache D. *Proc. XV Intern. Conf. Phenomena in Ionized Gases. Pt. II.* (Minsk, 1981, p.837).
- Black G. Slanger T. *J. Chem. Phys.*, **74**, 6517 (1981).
- Велихов Е.П., Клоповский К.С. и др. *ДАН СССР*, **273**, 600 (1983).
- Васильева А.Н., Гришина И.А., Клоповский К.С., Рахимов А.Т. и др. *Физика плазмы*, **15**, 190 (1989).
- Бляблин А.А., Васильева А.Н., Ковалев А.С., Лопаев Д.В. *Физика плазмы*, **15**, 1012 (1989).
- Васильева А.Н., Гуляев К.С., Ковалев А.С., Лопаев Д.В. *ТВТ*, **29**, 56 (1991).
- Itami S., Nakamura Y., Shinagawa K., Okamura M., Fujii H., et al. *Proc. SPIE Int. Soc Opt. Eng.*, **3889**, 503 (1999).
- Fujii H., Itami S., Schmiedberger J., et al. *Proc. SPIE Int. Soc Opt. Eng.*, **4065**, 818 (2000).
- Schmiedberger J., Hirahara S., Fujii H., et al. *Proc. SPIE Int. Soc Opt. Eng.*, **4184**, 32 (2000).
- Шепеленко А.А., Михеев П.А., Купряев Н.В., Воронов А.И. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **64**, 1259 (2000).
- Hill A. *Proc. Int. Conf. LASERS' 2000.* Corcoran V., Corcoran T. (Eds) (McLean, VA: STS Press, 2001, p.249).
- King D., Carroll D., Laystrom J., Verdeyen J., Sexauer M., Solomon W. *Proc. Int. Conf. LASERS' 2000.* Corcoran V., Corcoran T. (Eds) (McLean, VA: STS Press, 2001, p.265).
- Napartovich A., Deryugin A., Kochetov I. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 1827 (2001).
- Ionin A., Napartovich A., Yuryshv N. *Proc. SPIE Int. Soc Opt. Eng.*, **4631**, 284 (2002); **4760**, 506 (2002).
- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 982 (2003).
- Александров Н., Кочетов И., Мазалов Д. и др. *Физика плазмы*, **18**, 1468 (1992).
- Ионин А.А., Климачев Ю.М., Котков А.А., Кочетов И.В. и др. Патент РФ № 2206495 с приоритетом от 10.04.2002.
- Ионин А.А., Сучков А.Ф., Фролов К.К. *Квантовая электроника*, **15**, 1967 (1988).
- Живухин И., Ионин А., Кельнер М. и др. *Квантовая электроника*, **16**, 1609 (1989).
- Вагин Н.П., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Физика плазмы*, **29**, 211 (2003).
- Гордиец Б., Жданок С. В кн. *Неравновесная колебательная кинетика*. Капителли М. (ред.) (М.: Мир, 1989, с.61).
- Miller H.C., McCord J.E., Choy J., Hager G.D. *J. Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer*, **69**, 305 (2001).
- Duo L., Cui T., Wang Z., Chen W., Yang B., Sang F. *J. Phys. Chem. A*, **105**, 281 (2001).
- Torchin L., Jegou R., Brunet H. *J. Chem. Phys.*, **79**, 2100 (1983).
- Соболев Н.Н., Соковиков В.В. *УФН*, **110**, 191 (1973).