

Влияние температуры газа на характеристики объемного самостоятельного разряда в рабочих смесях импульсно-периодических КИЛ

В.И.Аксинин, С.А.Анциферов, С.Д.Великанов, С.Ю.Казанцев, В.В.Калиновский, В.В.Коновалов, И.Г.Кононов, В.Н.Михалкин, С.В.Подлесных, И.В.Севрюгин, К.Н.Фирсов

Исследовано влияние температуры газа на характеристики объемного самостоятельного разряда в рабочих смесях химического кислородно-иодного лазера с импульсной электроразрядной наработкой атомов иода. Рабочие смеси лазера моделировались в экспериментах смесями воздуха с иодидом C_2H_5I . Установлено, что нагрев смеси сопровождается ростом напряжения на плазме разряда и снижением разрядного тока. При изменении температуры смеси с содержанием иодида $\sim 2.7\%$ и начальным давлением $p = 12$ Тор от $22^\circ C$ до $96^\circ C$ наблюдалось уменьшение амплитуды тока на $\sim 12\%$ и увеличение напряжения в момент времени, соответствующий максимуму тока, на $\sim 22\%$. Регистрируемое изменение разрядных характеристик объясняется ростом скорости прилипания электронов к колебательно-возбужденным молекулам иодида с ростом температуры.

Ключевые слова: химический кислородно-иодный лазер, объемный самостоятельный разряд, приведенная критическая напряженность электрического поля.

В последние годы к разработке и исследованиям химических импульсно-периодических кислородно-иодных лазеров (ИП КИЛ) с наработкой атомарного иода в объемном самостоятельном разряде (ОСР) проявляется повышенный интерес [1–6]. Это вызвано значительно более широкой областью возможных применений лазеров данного типа по сравнению с традиционными непрерывными кислородно-иодными лазерами (КИЛ) [1]. Однако физика ОСР в рабочих смесях ИП КИЛ исследована не достаточно полно. Типичные газовые смеси ИП КИЛ с наработкой атомарного иода в ОСР содержат сильно электроотрицательный компонент иодид (CH_3I или C_2H_5I), синглетный кислород Δ^1O_2 , кислород в основном состоянии и буферный газ, как правило N_2 . В работе [7] установлено, что величина критического приведенного электрического поля $(E/p)_{cr}$ (E – напряженность поля, p – давление) для синглетного кислорода меньше, чем для кислорода, находящегося в основном состоянии. Там же была разработана численная модель разряда в синглетном кислороде, адекватно описывающая экспериментальные данные. В соответствии с [7] следует ожидать, что напряжение на плазме ОСР в КИЛ будет зависеть от содержания Δ^1O_2 в смеси, при этом изменение напряжения горения при изменении содержания Δ^1O_2 описывается закономерностями, установленными в [4], однако влияние температуры газа на параметр $(E/p)_{cr}$ для рабочих смесей ИП КИЛ ранее не изучалось. В [8, 9] было показано, что уве-

личение температуры газовых смесей, содержащих сильно электроотрицательный компонент SF_6 , приводит к увеличению скорости прилипания электронов к колебательно-возбужденным молекулам SF_6 и, следовательно, к росту величины $(E/p)_{cr}$. По аналогии можно ожидать, что в стандартных смесях ИП КИЛ с сильно электроотрицательным компонентом (иодидом) также будет наблюдаться увеличение параметра $(E/p)_{cr}$ с увеличением температуры, сопровождающееся соответствующими изменениями тока и напряжения ОСР.

В настоящей работе исследуется влияние температуры газа на характеристики ОСР в рабочих смесях КИЛ. Основной причиной проведения описываемых ниже измерений служат экспериментально наблюдаемые и рассмотренные в [5] эффекты монотонного уменьшения разрядного тока и роста напряжения в течение времени работы ИП КИЛ (пуски продолжительностью до 1 мин при частоте следования импульсов 20 Гц). Исследуемое здесь влияние температуры смеси на напряжение и ток разряда является одним из возможных вариантов интерпретации наблюдаемого в эксперименте изменения разрядных характеристик. Причины нагрева смеси (если он действительно происходит) в настоящее время не ясны.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. ОСР зажигался в геометрии игла (катод) – плоскость (анод) при межэлектродном расстоянии $d = 5$ см. На промежуток через индуктивность $L = 3.2$ мкГн разряжался конденсатор емкостью $C = 8$ нФ. Electroды размещались в герметичной кварцевой трубке диаметром 5 см, заполняемой смесью газов. Исследования проводились в газовых смесях C_2H_5I : воздух = 1 : 36 – 1 : 10 с общим давлением 12 Тор (при температуре $22^\circ C$). Эти газовые смеси имитировали рабочую смесь ИП КИЛ. Предварительные эксперименты на установке, подробно описанной в [5], показали, что замена синглетного кислорода Δ^1O_2 в смеси на невозбужденный кислород незначительно влияет на основные характеристики ОСР, за исключением некото-

В.И.Аксинин, С.Ю.Казанцев, И.Г.Кононов, С.В.Подлесных, К.Н.Фирсов. Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: k_firsov@rambler.ru
С.А.Анциферов, С.Д.Великанов, В.В.Калиновский, В.В.Коновалов, В.Н.Михалкин, И.В.Севрюгин. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: kalinovsky@otd13.vniief.ru

Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г., после доработки – 6 ноября 2013 г.

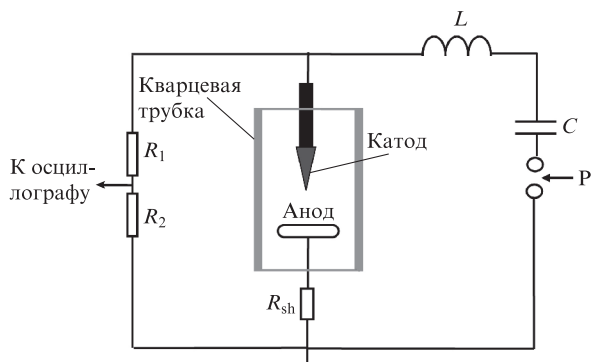


Рис.1. Схема экспериментальной установки: P – разрядник; R_1 , R_2 – делитель напряжения; R_{sh} – токовый шунт; $C = 8$ нФ; $L = 3.2$ мкГн.

рого изменения амплитуд тока и напряжения, в то время как параметры устойчивости и однородности ОСР остаются неизменными. Поэтому можно ожидать, что моделирование влияния температуры на характеристики ОСР в смеси иодида с воздухом даст адекватное представление о влиянии этого параметра на характеристики ОСР в реальных смесях ИП КИЛ.

Зарядное напряжение конденсатора в схеме на рис.1 варьировалось в пределах 6–10 кВ. Электрический пробой промежутка инициировался искрой с наружной стороны кварцевой камеры, что позволило свести разброс времен пробоя к ± 10 нс. Заметим, что сведение разброса времен пробоя промежутка к минимуму очень важно для получения воспроизводимости разрядных характеристик от импульса к импульсу в условиях относительно малых емкости конденсатора и зарядного напряжения. Искра зажигалась одновременно с подачей импульса запуска на разрядник. Ток ОСР и напряжение на промежутке контролировались калиброванными шунтом и делителем напряжения соответственно. Разрядная камера отсекалась от вакуумного тракта после напуска в нее смеси и нагревалась потоком горячего воздуха (до максимальной температуры 150 °С). Изменение температуры смеси контролировалось по изменению давления в камере. Полагалось, что нагрев стенок камеры до 100 °С не приводит к заметной диссоциации компонентов смеси.

Предварительные эксперименты показали, что при малых содержаниях иодида в смеси и температуре, близкой к комнатной, напряжение горения ОСР и разрядный ток близки к напряжению горения и току в воздухе с тем же давлением. Значения параметра E/p в максимуме тока, полученные без учета катодного падения потенциала, для воздуха и газовой смеси C_2H_5I : воздух = 1:36 при температуре 22 °С составляют соответственно 28.1 и 28.5 кВ \times см⁻¹·атм⁻¹. В данном случае катодное падение потенциала определить по зависимостям напряжения на плазме в максимуме тока U от pd , как это делалось в [8], не удается из-за большого вклада в потери электронов в плазме электрон-ионной рекомбинации. Таким образом, при комнатной температуре характеристики разряда в смесях с низким содержанием сильно электроотрицательного компонента определяются в основном характеристиками воздуха, хотя при содержании иодида в смеси свыше 10% увеличение параметра E/p из-за прилипания электронов к молекулам сильно электроотрицательного газа становится уже заметным (при тех же давлении и температуре параметр E/p превышает 29.4 кВ·см⁻¹·атм⁻¹).

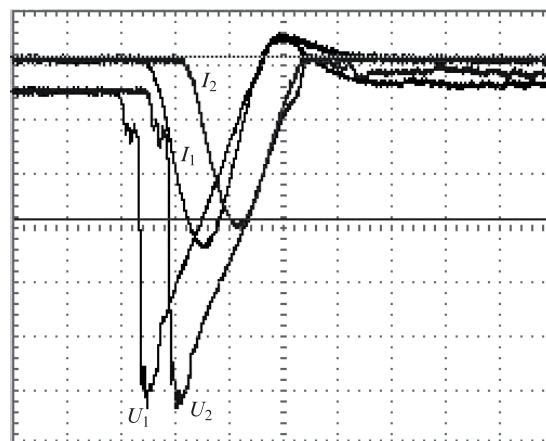


Рис.2. Осциллограммы напряжения и тока ОСР в газовой смеси C_2H_5I : воздух = 1:36 с общим давлением $p = 12$ Тор при температуре 22 °С (U_1 , I_1) и 95 °С (U_2 , I_2). Напряжение – 1.04 кВ/дел., ток – 68 А/дел., развертка – 250 нс/дел.

Ситуация кардинально изменяется при нагреве смеси. Во всех исследованных смесях наблюдалось увеличение напряжения горения разряда и уменьшение разрядного тока с увеличением температуры. На рис.2 приведены в качестве примера осциллограммы напряжения и тока ОСР в смеси C_2H_5I : воздух = 1:36 с начальным давлением $p = 12$ Тор (при температуре 22 °С), снятые при комнатной температуре и при нагреве смеси до 96 °С. Из рис.2 видно, что даже относительно небольшой нагрев смеси приводит к заметному уменьшению тока разряда (на $\sim 12\%$) при одновременном увеличении напряжения в максимуме тока на $\sim 22\%$, в то время как при таком же нагреве воздуха напряжение и ток практически не меняются. Несовпадение относительных изменений тока и напряжения при нагреве в данном случае обусловлено тем, что для смесей, в которых потери электронов в плазме ОСР в большой степени определяются вкладом процесса электрон-ионной рекомбинации (скорость потерь электронов βn_e^2 , где β – коэффициент электрон-ионной рекомбинации, а n_e – концентрация электронов), положение максимума тока относительно осциллограммы напряжения сильно зависит от n_e , а следовательно, и от самого разрядного тока. Значительный рост напряжения горения ОСР при относительно небольшом увеличении температуры, по-видимому, связан с ростом потерь электронов в процессе их прилипания к колебательно-возбужденным молекулам иодида. Этот рост превышает снижение рекомбинационных потерь электронов, обусловленное температурной зависимостью коэффициента рекомбинации: $\beta \propto T^{-1}$ [10], где T – температура в градусах Кельвина. При остывании смеси до комнатной температуры ток и напряжение возвращаются к прежним значениям. Интересно, что влияние температуры на характеристики ОСР уменьшается при увеличении содержания сильно электроотрицательного газа в смеси. Так, при нагреве смеси C_2H_5I : воздух = 1:10 с начальным давлением 12 Тор до 100 °С амплитуда разрядного тока уменьшалась не более чем на 3%–4%.

Наблюдаемое в эксперименте различие влияний нагрева на разрядные характеристики смесей с малым и большим содержанием иодида можно на качественном уровне интерпретировать следующим образом. При малых добавках иодида распределение электронов по энер-

гиям определяется преимущественно их столкновениями с молекулами буферного газа, в данном случае в основном N_2 . Рост напряжения с увеличением температуры газа при этом может быть обусловлен исключительно ростом скорости прилипания электронов (увеличением потерь электронов) к молекулам иодида, причем именно в результате термического возбуждения колебательных уровней иодида, поскольку состояние молекул N_2 с увеличением температуры на 100 К остается практически неизменным. При значительном содержании иодида в смеси влияние этого компонента сказывается главным образом на деформации энергетического спектра свободных электронов вследствие дополнительного увеличения потерь энергии электронов при неупругих столкновениях с молекулами. Незначительный рост потерь электронов в результате их прилипания к термически колебательно-возбужденным молекулам иодида на этом фоне мало заметен, что, собственно, непосредственно и наблюдается в эксперименте.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что температура газа может оказывать заметное влияние на электрические характеристики ОСР в рабочих смесях ИП КИЛ, особенно в случае малого содержания иодида в смеси. Вопрос о том, какие именно процессы могут приводить к нагреву смеси, в настоящее время остается открытым. Вероятно, таким процессом может являться релаксация синглетного кислорода при его взаимодействии с водой непосредственно на выходе из реактора.

Работа поддержана грантом РФФИ № 12-08-00321.

1. Вагин Н.П., Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **31** (2), 127 (2001).
2. Kochetov I.V., Napartovich A.P., Vagin N.P., Yuryshv N.N. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 055201 (2009).
3. Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Подлесных С.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **40** (5), 397 (2010).
4. Kochetov I.V., Napartovich A.P., Vagin N.P., Yuryshv N.N. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 355204 (2011).
5. Великанов С.Д., Горелов В.Г., Гостев И.В., Калиновский В.В., Комиссаров И.А., Коновалов В.В., Михалкин В.Н., Николаев В.Д., Севрюгин И.В., Смирнов А.В., Соболев Р.Е., Шорников Л.Н. *Труды Междунар. конф. «Х Харитоновские тематические научные чтения. Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии»* (Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2008, с. 311–316).
6. Velikanov S.D., Kazantsev S.Y., Kalinovskiy V.V., Kononov I.G., Mikhalkin V.N., Podlesnyh S.V., Sevryugin I.V., Firsov K.N. *Techn. progr. 14-th Int. Conf. on Laser Optics «LO-2010»* (St. Petersburg, Russia, 2010, TuR2-p11, p. 69).
7. Вагин Н.П., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Кочетов И.В., Напартович А.П., Синицын Д.В., Юрьшев Н.Н. *Физика плазмы*, **29** (3), 236 (2003).
8. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. *Appl. Phys. B*, **82**, 455 (2006).
9. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **37** (10), 985 (2007).
10. Елецкий А.В. В сб.: *Химия плазмы*. Под ред. Б.М.Смирнова (М.: Атомиздат, 1982, т. 9, с. 151).