

Самоиницирующий объемный разряд в иодидах, используемый для наработки атомарного иода в импульсных химических кислородно-иодных лазерах

А.А.Белевцев, С.Ю.Казанцев, А.В.Сайфуллин, К.Н.Фирсов

Показано, что объемный самостоятельный разряд (ОСР) в иодидах (C_3H_7I , C_4H_9I), а также в их смесях с SF_6 , N_2 и O_2 при наличии на поверхности катода мелкомасштабных неоднородностей развивается в форме самоиницирующегося объемного разряда (СИОР), т. е. объемного разряда без какой-либо предьонизации, в том числе и в разрядных промежутках с высоким краевым усилением электрического поля. Добавление к иодидам SF_6 или N_2 повышает устойчивость и однородность СИОР, а добавление в эти смеси до 300 % O_2 (по отношению к парциальному давлению иодида) на устойчивость существенно не влияет. Экспериментально промоделирована возможность зажигания СИОР в разрядном объеме 1.5 л. При давлении смеси $C_4H_9I : O_2 : SF_6 = 0.083 : 0.25 : 0.67$, равном 72 Тор, удельный энерговыход в плазму разряда в этой геометрии достигал 130 Дж/л. Сделан вывод о перспективности применения СИОР для получения атомарного иода в импульсном и импульсно-периодическом режимах работы химического кислородно-иодного лазера.

Ключевые слова: импульсный химический кислородно-иодный лазер, самоиницирующийся объемный разряд, электроотрицательные газы, иодиды.

1. Введение

Известно, что импульсный поперечный объемный самостоятельный разряд (ОСР) может эффективно применяться для получения импульсного и импульсно-периодического режимов работы химического кислородно-иодного лазера (КИЛ) [1]. В этих режимах атомарный иод образуется при зажигании ОСР непосредственно в газовой среде лазера, состоящей из смеси синглетного кислорода с каким-либо из иодидов и буферными газами. Данный метод позволяет, в принципе, реализовать частоты следования лазерных импульсов в килогерцевом диапазоне [1], однако его возможности в настоящее время ограничены сложностью осуществления самого ОСР в таких сильно электроотрицательных газах, как иодиды. В первую очередь это связано с трудностью достижения в разрядном промежутке необходимой для развития объемного разряда начальной концентрации электронов из-за их больших потерь в процессе прилипания к молекулам электроотрицательного газа независимо от типа источника ионизирующего излучения, применяемого для предьонизации среды.

Путь к решению проблемы зажигания ОСР в сильно электроотрицательных газах удалось найти в работах [2, 3]. В них было показано, что в рабочих смесях нецепных HF(DF)-лазеров (смеси на основе SF_6) [2], а также в других газовых смесях, содержащих некоторые хлориды и фториды [3], ОСР может реализоваться в форме само-

иницирующегося объемного разряда (СИОР) т. е. объемного разряда без какой-либо предьонизации среды, при нанесении на поверхность катода мелкомасштабных (~ 50 мкм) неоднородностей. Даже в разрядных промежутках с большим краевым усилением электрического поля (плоские электроды с малым радиусом скругления по периметру, $r \ll d, h$, где d – межэлектродное расстояние, h – поперечный размер электрода) СИОР, начинаясь в виде одного или нескольких диффузных каналов в зоне усиления электрического поля на краю промежутка, распространяется в глубь промежутка перпендикулярно направлению поля, занимая всю поверхность катода и обеспечивая близкое к однородному возбуждение активной среды лазера.

Обнаружение объемного разряда такой необычной формы позволило значительно продвинуться в решении проблемы масштабирования нецепных HF(DF)-лазеров и создать установки с рекордными характеристиками при предельных простоте и компактности электродной системы [4]. Результаты [2, 3] свидетельствуют о том, что в большой степени эффект СИОР связан именно с высокой электроотрицательностью хлоридов и фторидов. Поэтому естественный интерес представляло исследование возможности получения такого разряда и в рабочих смесях КИЛ с иодидами в качестве доноров атомарного иода. Однако в [1] подобная попытка закончилась неудачей. Поперечный ОСР в смесях, содержащих иодиды (CH_3I , CF_3I), несмотря на их очень высокую электроотрицательность, удалось осуществить лишь с применением резистивной стабилизации тока через отдельные секции катода, представлявшего собой ряд металлических стержней, нагруженных балластными сопротивлениями.

Целью настоящей работы является поиск условий зажигания ОСР в иодидах и иодидсодержащих газовых смесях именно в форме самоиницирующегося разряда.

А.А.Белевцев. Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13/19

С.Ю.Казанцев, А.В.Сайфуллин, К.Н.Фирсов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

2. Экспериментальная установка

Возможность получения СИОР исследовалась в CH_3I , CF_3I , $n\text{-C}_3\text{H}_7\text{I}$, $\text{изо-C}_3\text{H}_7\text{I}$, $\text{изо-C}_4\text{H}_9\text{I}$, а также в их смесях с SF_6 и N_2 , обычно используемых в качестве буферных газов в КИЛ [1], и в O_2 . Исследования устойчивости ОСР и электрических характеристик газовых смесей (зависимость напряжения в квазистационарной фазе ОСР U_{qs} от pd , где p – давление газа), содержащих иодиды, проводились в разрядном промежутке с плоскими электродами, образованном полированным анодом из алюминия ($\varnothing 2$ см) и катодом ($\varnothing 6$ см), скругленными по периметру (радиус скругления $r = 1$ см). Для нанесения на поверхность катода мелкомасштабных неоднородностей она подвергалась пескоструйной обработке. Межэлектродное расстояние $d = 4 - 6$ см при общем давлении исследуемых газов $p = 5 - 90$ Тор. На разрядный промежуток через индуктивность L разряжался конденсатор емкостью $C = 0.5 - 15$ нФ, заряжаемый до напряжения $U = 16 - 50$ кВ. Для определения границ устойчивости ОСР в координатах энергия – время снималась зависимость предельной запасаемой в конденсаторе энергии $W_{\text{lim}} = CU^2/2$, при которой ОСР еще не переходит в искру, от величины $T = \pi(LC)^{1/2}$, характеризующей длительность тока разряда и определяемой по полупериоду тока короткого замыкания. Очевидно, что чем больше величина предельной энергии при заданной длительности тока, тем выше устойчивость.

В настоящей работе мы также экспериментально моделировали возможность создания широкоапертурных КИЛ с наработкой атомарного иода непосредственно в объеме рабочей среды. С этой целью разряд зажигался в разрядном промежутке, заполненном смесью иодидов с буферными газами SF_6 или N_2 . В смесь также добавлялся O_2 для контроля его влияния на устойчивость и однородность СИОР. Эксперименты выполнялись на лазерной установке, ранее применявшейся для изучения нецепного HF(DF)-лазера в импульсном и импульсно-периодическом режимах работы [5].

Электрическая схема установки приведена на рис.1. Использовались два варианта электродной системы разрядной камеры. В первом варианте разряд зажигался между двумя пластинами с размерами 5×60 см (катод) и 10×80 см (анод), края пластин были скруглены по периметру ($r = 1$ см), межэлектродное расстояние d составляло 5 см. Во втором варианте применялись электроды с профилем Чанга, что обеспечивало однородность

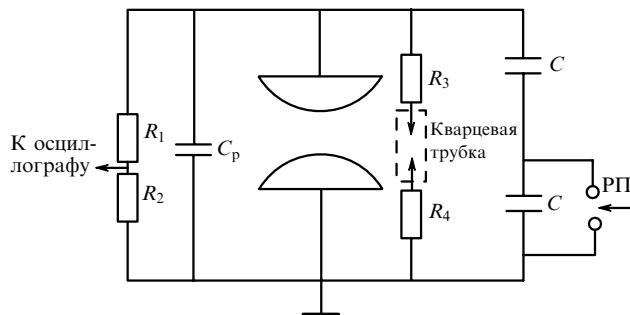


Рис.1. Схема установки для исследования СИОР при зарядном напряжении $U = 35 - 50$ кВ: $C = 100$ нФ; $C_p = 15$ нФ; R_1, R_2 – делитель напряжения; $R_3 = R_4 = 8$ кОм; РП – разрядный промежуток.

электрического поля в промежутке. Поверхность катода в обоих вариантах подвергалась пескоструйной обработке. Полный разрядный объем $V = d \times h \times l = 5 \times 5 \times 60 = 1500$ см³ (1.5 л) в первом варианте и $5 \times 6.3 \times 50 = 1600$ см³ (1.6 л) – во втором. Разрядные промежутки лазерной установки и установки для исследования устойчивости СИОР сбоку подсвечивались слаботочной ($\sim 3\text{A}$) искрой, заключенной в кварцевую оболочку, аналогично тому, как это делалось в [2, 3]. Такая искра принципиально не могла обеспечить объемной фотоионизации среды, но позволяла за счет фотоэффекта на катоде стабилизировать время запаздывания и амплитуду напряжения электрического пробоя промежутка [5].

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Эксперименты, проведенные на установке с плоскими дисковыми электродами, показали, что ОСР в CH_3I и CF_3I удается получить лишь при очень малых энергозатратах. При этом разряд, представлявший собой ряд диффузных каналов, «привязанных» к ярким катодным пятнам, был, в основном, сосредоточен по периметру катода в зоне максимального усиления электрического поля. Исключение составили редкие отдельные каналы, зажигающиеся на плоской части электрода. Добавление CH_3I и CF_3I к SF_6 в условиях, когда в чистом SF_6 СИОР был устойчив, приводило к резкому ухудшению его устойчивости. По-видимому, низкая устойчивость была одной из причин неудачной попытки реализации СИОР в этих иодидах, предпринятой в [1]; на второй причине мы остановимся ниже. В связи с этим применение CH_3I и CF_3I в КИЛ с наработкой атомарного иода в импульсном объеме разряда вряд ли целесообразно.

В том же промежутке с плоскими дисковыми электродами самостоятельный разряд в $n\text{-C}_3\text{H}_7\text{I}$, $\text{изо-C}_3\text{H}_7\text{I}$, $\text{изо-C}_4\text{H}_9\text{I}$, а также в их смесях с SF_6 , N_2 и O_2 , в отличие от CH_3I и CF_3I , имел выраженный объемный характер. Несмотря на высокое краевое усиление электрического поля, определяемое профилем катода, разряд занимал всю плоскую часть поверхности катода и зона усиленного поля на краю промежутка существенно не выделялась. Следовательно, в перечисленных иодидах и иодидсодержащих смесях, как и в ряде других сильно электроотрицательных газов (фториды, хлориды) [3], ОСР развивается в форме самоиницирующегося объемного разряда – ОСР без предыонизации, в том числе и в разрядных промежутках с высоким краевым усилением электрического поля.

Подобно объемному разряду в SF_6 и смесях SF_6 с углеводородами [2–5], СИОР в данном случае представляет собой ряд распределенных по промежутку диффузных каналов, привязанных к ярким катодным пятнам. Перекрываясь, диффузные каналы образуют общее диффузное свечение. На рис.2 приведены типичные осциллограммы СИОР в смеси иодида с SF_6 . Из рис.2 видно, что, как и в других сильно электроотрицательных газах [3], СИОР в данном случае имеет выраженную квазистационарную фазу, проявляющуюся в практическом постоянстве разрядного напряжения при вводе энергии в плазму. Небольшой «горб» на осциллограмме напряжения обусловлен, по-видимому, проявлением характерных для сильно электроотрицательных газов процессов ограничения плотности тока в диффузном канале, которые ста-

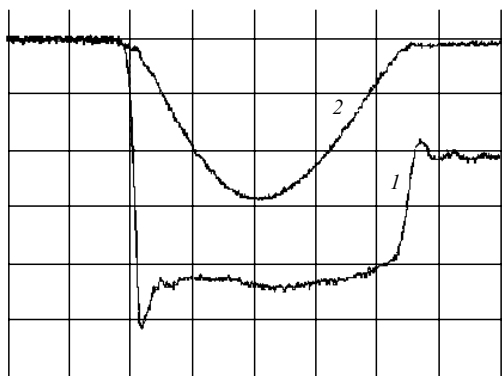


Рис.2. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) СИОР в смеси $C_3H_7I : SF_6 = 1 : 2$ при давлении $p = 33$ Тор.

новятся заметными при достаточно высоких энерговкладах [2, 3]. На рис.3 и 4 представлены зависимости напряжения в квазистационарной фазе СИОР U_{qs} от параметра pd в иодидах и SF_6 (рис.3), а также в хлоридах и фторидах (рис.4), позволяющие ориентироваться при выборе параметров электрических схем для получения объемного разряда в данных газах и в их смесях с другими газами. Эти зависимости хорошо описываются линейной функцией $U_{qs} = A + Bpd$, где константа B для каждого из газов близка к критическому значению приведенной напряженности электрического поля $(E/p)_{cr}$ ($(E/p)_{cr} = 89$ кВ \times см $^{-1}$ ·атм $^{-1}$ для SF_6), при котором уравниваются скорости ионизации и прилипания. Значения B для разных газов, полученные из данных рис.3 и 4, приведены в табл.1.

Из рис.3, 4 и табл.1 следует, что иодиды, за исключением CH_3I , имеют более высокую электрическую прочность (величина U_{qs} близка к статическому пробое), чем SF_6 . Из приведенных данных становится также понятной и вторая принципиальная причина, не позволившая авторам [1] получить ОСР без применения резистивной стабилизации тока: в диапазоне рабочих давлений иодидов и их смесей с буферными газами в [1] U_{qs} не превышало 2 кВ при том, что подаваемое на промежуток напряжение составляло 18 кВ, т. е. было в несколько раз больше максимального значения $2U_{qs}$ [6], при котором режим разряда конденсатора через плазму ОСР еще являлся аperiодическим. Поэтому авторы [1] были

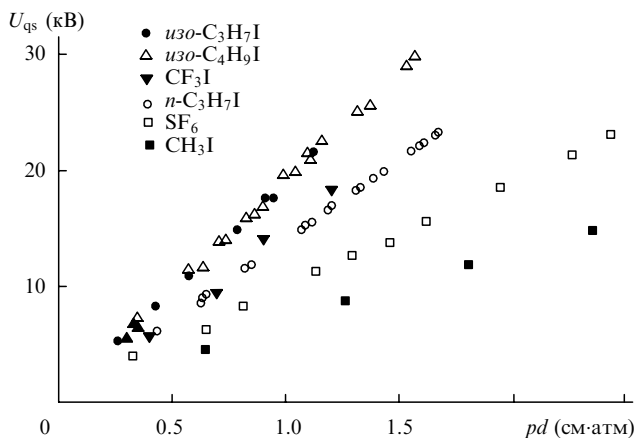


Рис.3. Зависимости напряжения в квазистационарной фазе СИОР U_{qs} от pd в иодидах и SF_6 .

Табл.1. Значения B для сильно электроотрицательных газов.

Соединение	B (кВ·атм $^{-1}$ ·см $^{-1}$)
$n-C_3H_7I$	137
$изо-C_3H_7I$	186
$изо-C_4H_9I$	186
CF_3I	160
$n-C_4H_9I$	180
CH_3I	60
SF_6	91
C_3F_8	81
C_2HCl_3	157
CCl_4	232
CF_4	30.2

правы, надеясь на возможность получения объемного поперечного разряда в рабочих средах КИЛ при переходе к более высоким значениям pd .

На рис.5 представлены зависимости предельного значения W_{lim} от $T = \pi(LC)^{1/2}$ для смесей $n-C_3H_7I$ и $n-C_4H_9I$ с SF_6 , снятые в разрядном промежутке с плоскими дисковыми электродами и характеризующие устойчивость СИОР. Там же для сравнения приведены зависимости W_{lim} от T для SF_6 и смеси SF_6 с C_2H_6 . Как видно из рис.5, устойчивость СИОР в смеси $n-C_3H_7I$ с SF_6 выше, чем в чистом SF_6 , а в смеси $n-C_4H_9I$ с SF_6 даже выше, чем в смеси SF_6 с C_2H_6 .

Следует отметить, что исследованные в настоящей работе иодиды имеют потенциалы ионизации, близкие к потенциалам ионизации тяжелых углеводородов [7], и в смесях с SF_6 они, подобно углеводородам [2], проявляют себя как легкоионизируемые вещества. Характерно также сочетание низкого потенциала ионизации иодидов с их крайне высокой электроотрицательностью, что может в значительной мере определять специфику объемного разряда в этих газах и иодидсодержащих смесях газов. По-видимому, представляет интерес расчет функции распределения электронов по энергии в таких смесях.

Добавление к иодидам SF_6 , воздуха или N_2 приводит к увеличению плотности катодных пятен (а следовательно, и плотности диффузных каналов), что сопровождается значительным повышением устойчивости СИОР и заметным улучшением его однородности. Интересно, что добавление N_2 или воздуха к SF_6 или к смеси SF_6 с C_2H_6 , наоборот, ведет к резкому ухудшению устойчиво-

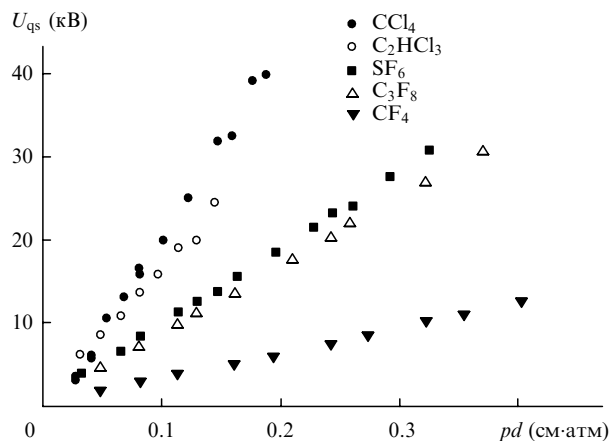


Рис.4. Зависимости напряжения в квазистационарной фазе СИОР U_{qs} от pd в хлоридах и фторидах.

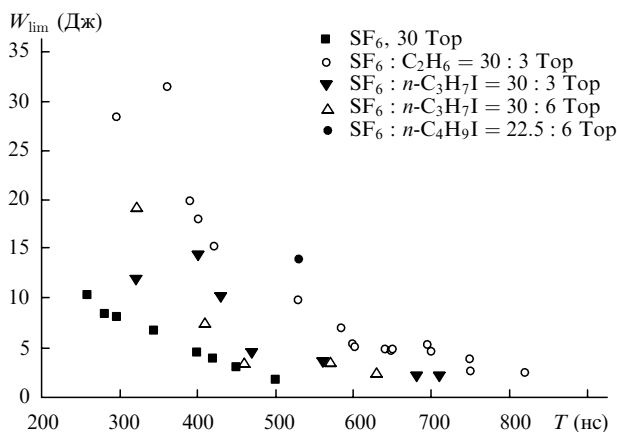


Рис.5. Зависимости предельной величины W_{lim} от T для смесей n - C_3H_7I и n - C_4H_9I с SF_6 , смесей SF_6 с C_2H_6 , а также для SF_6 .

сти СИОР (по-видимому, вследствие процесса ступенчатой ионизации N_2). Этим иодиды существенно отличаются от SF_6 и смесей на его основе.

Добавление к смеси иодидов с SF_6 до 300 % молекулярного кислорода (по отношению к парциальному давлению иодидов) не приводило к заметному ухудшению устойчивости СИОР. Данное обстоятельство позволило провести экспериментальное моделирование возможности получения СИОР в рабочих средах КИЛ в лазерной геометрии разрядного промежутка в широком диапазоне составов смесей и давлений. Условия зажигания СИОР (устойчивость и однородность разряда) в промежутках с большим краевым усилением электрического поля (скругленные по периметру плоские электроды, первый вариант электродной системы) и с однородным полем (электроды Чанга, второй вариант) ничем не различались. Так, удельный энерговыход в плазму разряда в смеси $C_4H_9I : O_2 : SF_6 = 0.083 : 0.25 : 0.67$ при $p = 72$ Тор достигал ~ 130 Дж/л. На рис.6 приведена фотография СИОР в этой смеси, полученная в промежутке с плоской геометрией (первый вариант электродной системы) через выходное окно лазерной камеры. Видно, что по внешнему виду СИОР в иодидсодержащей смеси ничем не отличается от СИОР, получаемого в смесях SF_6 с углеводородами в той же разрядной геометрии [2]. Несмотря на высокое краевое усиление электрического поля в данном варианте электродной системы, катодные пятна, а соответственно и плотность разрядного тока, распределены по поверхности катода так, как это обычно бывает в электродных системах с однородным электрическим полем.

Отметим, что в иодидах и иодидсодержащих смесях

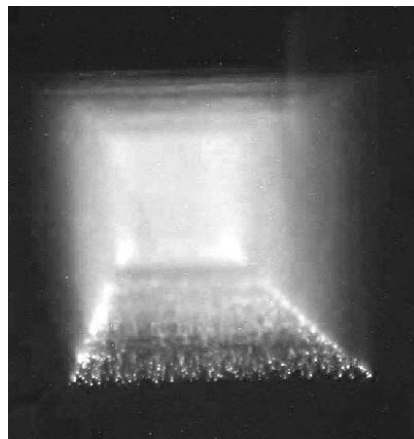


Рис.6. Фотография СИОР в смеси $C_4H_9I : O_2 : SF_6 = 0.083 : 0.25 : 0.67$ при давлении $p = 72$ Тор.

СИОР организуется не сложнее, чем в смесях SF_6 с углеводородами и угледегтеридами. Поэтому здесь, как и в нецепных HF(DF)-лазерах, нет серьезных препятствий для дальнейшего наращивания разрядного объема при практически предельной компактности электродной системы.

4. Заключение

Таким образом, показано, что в C_3H_7I , C_4H_9I , а также в их смесях с SF_6 , N_2 , и O_2 ОСР развивается в форме самоиницирующегося объемного разряда – ОСР без предыонизации, в том числе и в разрядных промежутках с высоким краевым усилением электрического поля. Проведенное нами экспериментальное моделирование в лазерной геометрии разрядного промежутка свидетельствует о перспективности применения СИОР для создания мощных широкоапертурных КИЛ, работающих в импульсном и импульсно-периодическом режимах.

1. Вагин Н.П., Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 127 (2001).
2. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
3. Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Saifulin A.V. *Proc. XXV Int. Conf. ICPIG-2001* (Nagoya, Japan, 2001, v.1, p.255).
4. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **64** (7), 1439 (2000).
5. Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Saifulin A.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 31 (2001).
6. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
7. Luo Y.R.; Pacey P.D. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc.*, **63**, 112 (1992).