

УДК 537.521

Оптическое излучение импульсного объемного разряда в Не высокого давления

В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, Г.Б. Рагимханов, М.А. Арсланбеков,
Х.М. Абакарова, Али Рафид Аббас Али

Экспериментально исследованы электрические, пространственно-временные и спектральные характеристики объемного разряда (ОР) и переход разряда из стадии объемного горения в канальную стадию. Показано, что в стадии формирования разряда при плоских электродах с радиусом кривизны $R = 30$ см возникают катодные пятна полусферической формы. Однородность разряда повышается с увеличением плотности катодных пятен и давления газа в промежутке. Изучены особенности спектра излучения исследуемого газа и спектра материала вещества электродов при различных начальных условиях, а именно в режиме однородного горения ОР, в режиме перехода ОР в искровой канал и в режиме перехода ОР в сильноточный диффузный режим (СДР).

PACS: 52.25.— b, 52.70.— m, 52.80.Tn

Ключевые слова: объемный разряд, диффузный канал, оптическое излучение, контракция, искровой канал, катодное пятно

Введение

Объемные электрические разряды в инертных газах широко используются для накачки газовых лазеров. В частности, газ Не выступает в качестве буферного газа во многих средах газовых лазеров [1]. В свою очередь, дальнейшее повышение энергетических характеристик газовых лазеров достигается совершенствованием способов накачки и оптимизацией условий возбуждения. Задача оптимизации накачки состоит в получении необходимых электрических характеристик плазмы разряда при сохранении ее пространственной однородности за время длительности импульса накачки.

Неустойчивость разряда вызывает нарушение его однородности и приводит к переходу разряда из стадии объемного горения в канальную стадию (контрагированный разряд) [2].

Физические механизмы, ведущие к неустойчивости разряда, являются самыми различными.

Курбанисмаилов Вали Сулейманович, декан, профессор.

Омаров Омар Алиевич, зав. кафедрой, профессор.

Рагимханов Гаджимирза Балагланович, доцент.

Арсланбеков Магомедгабибула Абдурахманович,

старший научный сотрудник.

Абакарова Халимат Магомедовна, аспирант.

Али Рафид Аббас Али, аспирант.

Дагестанский государственный университет.

Россия, 367025, г. Махачкала, ул. М.Гаджиева, 43а,

Тел.: (8-872-2) 56-21-22.

E-mail: Vali_60@mail.ru, gb-g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2014 г.

© Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Аббас Али А.Р., 2014

Задача усложняется тем, что в разных газах и смесях газов имеют место различные физические процессы, вызывающие неустойчивость разряда [3, 4].

С другой стороны, при достаточно больших перенапряжениях дальнейшие закономерности развития объемного разряда и всего газоразрядного процесса отличается от закономерностей классических форм разрядов, а именно, развитие объемного разряда затормаживается на промежуточной стадии в виде диффузных каналов, которые перекрывают промежуток. В дальнейшем диффузные каналы, сливаясь, образуют однородный столб разряда высокой проводимости, т.н. сильноточный диффузный разряд (СДР) [1–4].

Несмотря на внешнее сходство (объемное однородное свечение), свойства разряда в объемной фазе и при СДР имеют существенное различие. Речь идет, по существу, о двух разных формах объемного протекания тока. Общее этих разрядов заключается в том, что результаты, полученные в них, можно использовать при решении проблемы создания активной среды газовых лазеров. Необычность СДР заключается в том, что в отличие от объемного разряда (ОР), в нем фактически отсутствует контракция.

В работах [5, 6], исследуя оптическое излучение объемных разрядов при высоких давлениях в воздухе, обнаружены в спектре прикатодной плазмы спектральные линии атомов материала электродов. Причем в лазерах на парах металлов [7, 8] для ввода паров металла в зону разряда используются различные специальные методы, связанные

с дополнительными энергозатратами и сложными техническими конструкциями. В то же время следует отметить, что для инертных газов роль таких примесей могут играть, в частности, пары металлов, формируемых в разряде в процессе распыления материала электродов [9–12]. Такие примеси могут существенно изменить динамику развития разряда, влияя на кинетику процессов как в приэлектродных областях, так и в объеме промежутка.

Поэтому практический интерес представляет экспериментальное исследование электрических, пространственно-временных и спектральных характеристик плазмы объемных и контрагированных разрядов. Важно изучение самого процесса перехода объемного разряда в СДР, а также развитие плазменного факела, исследование спектрального состава излучения приэлектродной плазмы в He атмосферного давления в широком диапазоне изменений начальных условий, в т. ч. в режиме распыления материала электродов. Именно этим задачам и посвящена данная статья.

Экспериментальная установка и методы исследования

Экспериментальная установка и методы исследования подробно описаны в работах [13–15]. Отметим, что в экспериментах диагностика разряда включала регистрацию разрядного тока и напряжения на плазменном канале с применением цифровых осциллографов типа Актаком и Tektronix, фотографирование интегрального свечения разряда, а также фотографирование пространственно-временных картин свечения промежутка с применением фотоэлектронного регистратора ФЭР-2, спектральных измерений с применением современных средств диагностики высокого разрешения при различных начальных условиях инициирования разряда.

Для выявления наиболее ярких спектральных линий, возбуждаемых в разряде, регистрировался панорамный спектр как с помощью автоматизированного комплекса монохроматор-спектрограф MS-3504i, так и с помощью спектрографа со скрещенной дисперсией СТЭ-1. Спектр излучения прикатодной плазмы регистрировался монохроматором с дифракционной решеткой МДПС-3 с дисперсией 0,2–0,3 нм/мм.

В некоторых экспериментах использовалась система щелей, позволяющая регистрировать с помощью фотоумножителя временной ход свечения из различных областей разрядного промежутка.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Переход разряда от объемной стадии к канальной исследовался в промежутке с площадью разряда $s = 12 \text{ см}^2$ и расстояния между электродами $d = 1 \text{ см}$, давление газа менялось в пределах 1–5 атм., напряжение пробоя — от статического пробойного до 100%-перенапряжения.

В газе He при атмосферном давлении при малых внешних полях ($E_0 < E_{кр} = 6 \text{ кВ/см}$) горит однородный объемный разряд (рис. 1, фото 1), а развитие незавершенных анодонаправленных каналов, привязанных к катодным пятнам с высокой проводимостью (плазменных каналов), начиналось при плотности тока $\sim 40 \text{ А/см}^2$ (рис. 1, фото 2). При этом в межэлектродном пространстве еще сохранялась хорошая однородность плазмы разряда. Увеличение плотности тока до 60 А/см^2 (рис. 1, фото 3) ведет к дальнейшему продвижению незавершенных анодонаправленных каналов. При плотности тока более 100 А/см^2 происходит перекрытие разрядного промежутка плазменным каналом (рис. 1, фото 4), что проявляется в виде второго резкого спада напряжения в конце импульса (см. рис. 2, время t_3), обусловленного ростом проводимости в искровом канале.

Для выяснения влияния давления газа на однородность и устойчивость объемного разряда были выполнены исследования при более высоких давлениях.

На рис. 3 а, б показаны фотографии интегрального свечения разряда в He при давлениях $p = 2 \text{ атм.}$ и $p = 3 \text{ атм.}$, соответственно. При увеличении давления газа в промежутке (уменьшение отношения E/p) разряд расконтрагируется и горит однородно при полях $E_0/p \leq E_{кр}/p = 7,5 \text{ кВ/ (см} \cdot \text{атм.)}$ При полях $E_0/p > E_{кр}/p$ наблюдается большая плотность катодных пятен, из которых начинается формирование незавершенных каналов, а столб разряда имеет высокую степень однородности. Закономерности горения разряда сохраняются и при высоких давлениях.

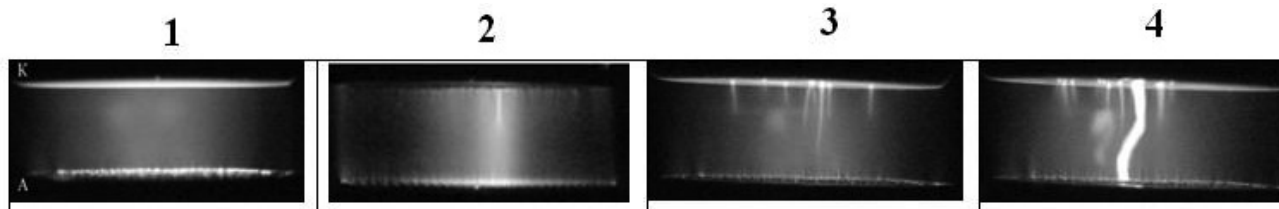


Рис. 1. Фотографии стадий развития разряда.

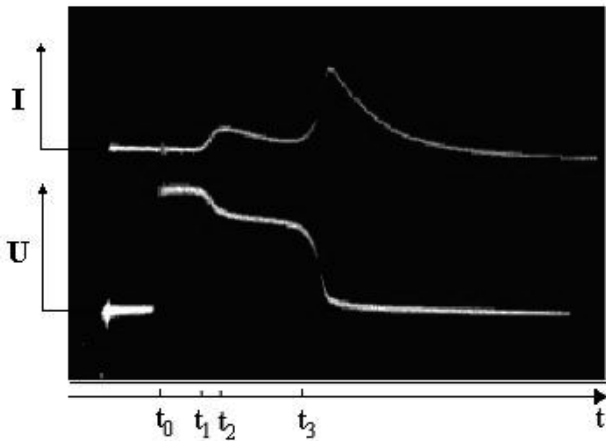


Рис. 2. Осциллограммы процесса

В согласованном режиме накачки реализован удельный энерговклад $\sim 0,1$ Дж/см³, являющийся максимальным для данного газа в стадии однородного горения. Длительность при сохранении однородности разряда можно было регулировать путем уменьшения плотности тока или увеличением давления газа в промежутке.

Длительность ступени ($\tau_{cm} = t_3 - t_2$) с ростом давления существенно сокращается. При давлении газа в промежутке, равном 5 атм., ступень на импульсе напряжения практически не разрешается. В этом случае длительность объемного разряда определяется временем коммутации разрядного тока, при этом импульс напряжения на разрядном промежутке гладко спадает до дугового значения.

Время существования объемной фазы разряда можно определить, проводя синхронизацию электрических характеристик с пространственно-временными картинками свечения промежутка, снятых ЭОП (ФЭР-2) в режиме щелевой развертки.

Синхронизация картин свечения разряда с током или напряжением с точностью до 2–3 нс осуществлялась подачей импульса тока (или напряже-

ния) на отклоняющие пластины ЭОП (УМИ-92) синхронно с разверткой свечения разряда. При этом учитывался сдвиг по времени между световым и электрическим сигналами.

На рис. 4 представлены фотографии щелевой развертки (в динамическом режиме работы ЭОП типа ФЭР-2) как совместно с импульсом напряжения (4, а), так и без него (4, б, в). Масштаб развертки 1 мм = 4,3 нс (длина экрана ЭОП = 70 мм).

В момент времени t_3 начинается процесс прорастания искрового канала (начало контракции). Как видно из рис. 4, б, в, к моменту времени t_3 на катоде зажигается катодное пятно, которое на пространственно-временных картинках разворачивается в виде яркой дорожки. Катодное пятно отделено от столба разряда некоторым темным пространством.

Таким образом, картины свечения промежутка, снятые с пространственным (рис.1, рис.3) и временным (рис. 4) разрешениями позволяют, с одной стороны, проследить за пространственно-временной динамикой развития разряда, а с другой, — определить длительности характерных стадий импульсного пробоя в гелии атмосферного давления.

С ростом давления газа в промежутке длительность однородного горения ОР уменьшается. Уменьшение длительности горения ОР с ростом давления связано с некомпенсированным ростом ионизационных процессов по отношению к рекомбинационным. Увеличение давления газа приводит к увеличению напряжения на столбе разряда (напряжение горения ОР) [16]. Это, в свою очередь, приводит к росту ионизационных процессов как за счет ударной ионизации (что обусловлено сильной зависимостью коэффициента α от E_0), так и за счет ступенчатой ионизации. В конечном итоге, бурный некомпенсированный рост концентрации электронов приводит к росту

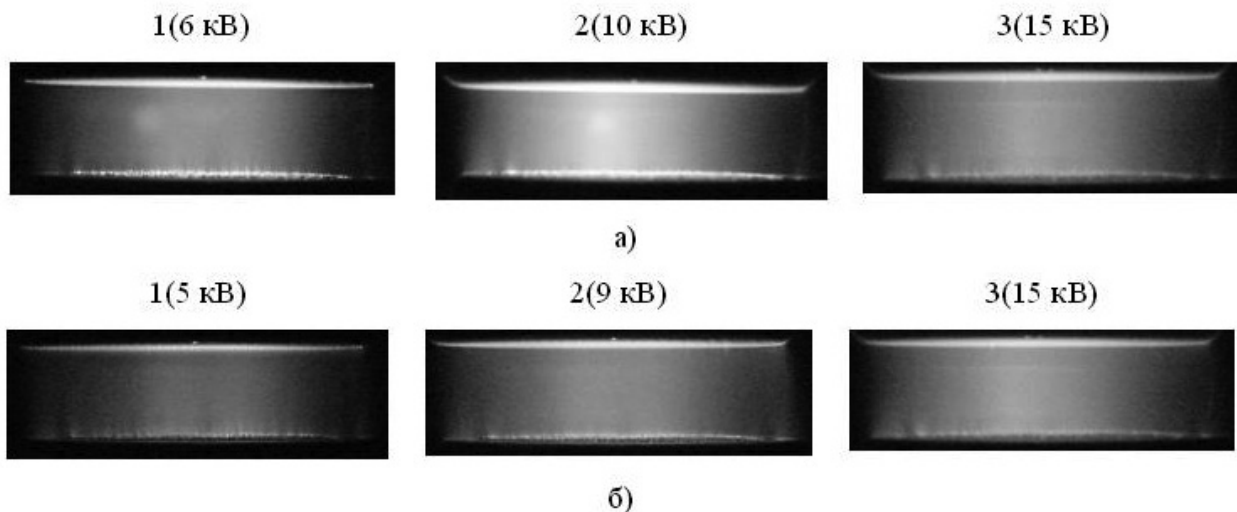


Рис. 3. Фотографии интегрального свечения разряда при давлениях 2 атм. (а) и 3 атм. (б).

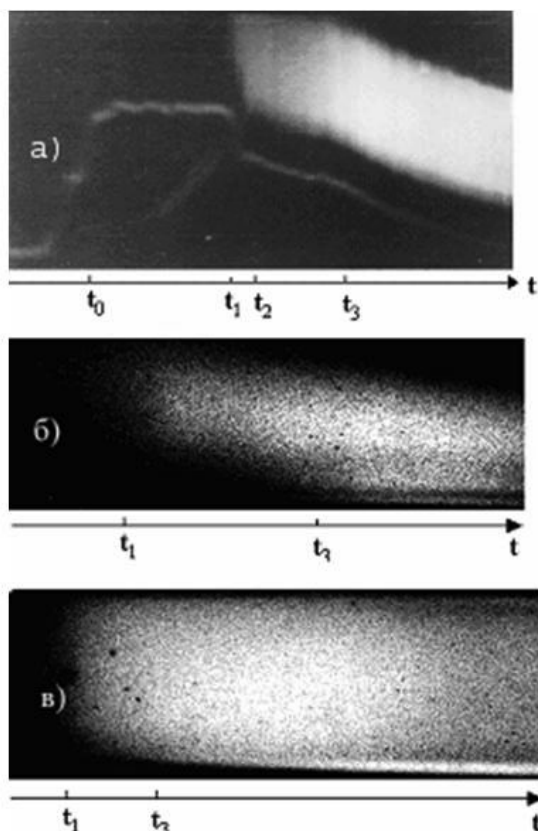


Рис. 4. Фотографии щелевой разветки: а — совместно с импульсом напряжения; б — без импульса напряжения

проводимости и спаду напряжения до дугового значения (см. рис. 2, время t_3), после чего разряд переходит в рекомбинационный режим и гаснет.

Временное разграничение объемной и канальной стадий горения разряда хорошо видно на осциллограммах импульсов тока разряда или напряжения на плазменном канале. Зависимость тока разряда от времени имеет характерную форму с двумя максимумами, соответствующими объемной и канальной стадиям горения разряда [11, 12]. Длительность однородного горения объемного разряда уменьшается с ростом величины прикладываемого поля и плотности тока разряда [11].

На объемной стадии горения разряда сохраняется напряжение $U_2 = \text{const}$, которое не зависит от величины прикладываемого поля и определяется давлением газа в промежутке. С ростом давления возрастает напряжение горения ОР, значение U_2 которого соответствует минимальному напряжению пробоя при данном произведении давления газа на длину промежутка (pd) [11, 16].

Для получения безыскрового режима горения ОР необходимо, чтобы за время τ_2 обеспечивалось полное рассеяние энергии накопительного элемента ($C = 1,5 \times 10^{-8}$ Ф) в плазме [17]. При зажигании ОР в He это требование достигается при выполнении условия $U_0 = 2U_2$ ($U_2 \approx 3000$ В — напряжение горения ОР при $p = 1$ атм., $d = 1$ см).

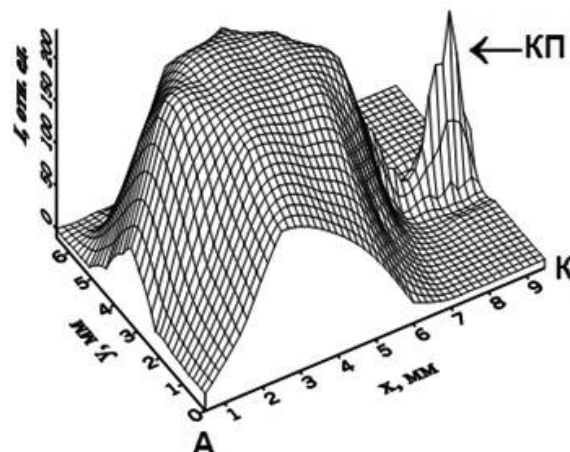


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения в разрядном промежутке.

Анализ таких измерений показывает, что естественным механизмом контракции объемного разряда в He является то, что искровой канал инициируется неустойчивостями, развивающимися в приэлектродных областях [17–19]. Именно они определяют привязку узких диффузных каналов и вызывают сам процесс перехода от ОР к искровому.

Так, на рис. 5 приведена картина распределения интенсивности излучения в промежутке как вдоль поля, так и поперек электродов. Из него явно следует, что процесс контракции определяется приэлектродными явлениями. Здесь x — координата, меняющаяся вдоль поля; y — поперек поля.

С другой стороны, основная энергия вводится в разряд на квазистационарной стадии. Тогда для объемной плотности энергии можно написать следующие соотношения:

$$W = P\tau_2 / V = IU\tau_2 / sd = jU\tau_2 / d,$$

где τ_2 — длительность объемной стадии разряда, j — плотность тока.

Энергия, введенная в газ до образования искрового канала, возрастает при увеличении подводимой в разряд мощности, хотя длительность горения t_r экспоненциально уменьшается с ростом прикладываемого поля [11]. А объемный разряд контрагируется в искровой канал при критических плотностях тока $j \geq j_{\text{кр}} \approx 40$ А/см² и предельных удельных энерговкладах 0,1–0,2 Дж/см³ [18].

Для разряда в He при увеличении перенапряжения в промежутке до 300% (напряжение статистического пробоя $U_{\text{ст}} = 3$ кВ при $p = 1$ атм., $d = 1$ см) в плазме разряда возникает большое число плазменных каналов, имеющих сравнительно большой диаметр. При высоких перенапряжениях ($U_0 \geq 12$ кВ) происходит переход ОР в необычный режим горения, а именно, сильноточный диффуз-

ный режим (СДР) с высокой проводимостью, в котором практически отсутствует контракция [1–4, 20, 21].

Механизм возникновения СДР является в следующем: при полях $E_0 > E_{кр} = 12$ кВ/см наблюдается большая плотность катодных пятен, из которых начинается формирование незавершенных каналов, а столб разряда имеет высокую степень однородности. Как уже было отмечено, с ростом пробойного напряжения число катодных пятен увеличивается, и средняя плотность тока оказывается меньшей, чем в случае одиночного канала. Развитие разряда затормаживается на промежуточной стадии в виде диффузных каналов с яркими катодными пятнами. Диффузные каналы, сливаясь, образуют однородный столб плазмы высокой проводимости (сильноточный диффузный разряд).

Необходимым условием зажигания сильноточного диффузного разряда является достаточно сильная предварительная ионизация и, соответственно, создание столба слабопроводящей плаз-

мы. В этом случае диффузные каналы равномерно покрывают поверхность электродов. Длительность горения сильноточного диффузного разряда составляет $\sim 10^{-6}$ с.

В согласованном режиме питания СДР горит при постоянном напряжении и плотности тока. Электрическое поле в столбе разряда $\sim 10^3$ В/см. Особенностью сильноточного диффузного разряда является невысокое напряжение горения, при котором ударная ионизация не может обеспечить поддержание проводимости столба плазмы.

С другой стороны, регистрация спектров оптического излучения разряда с временным разрешением позволяет проследить за интенсивностью отдельных спектральных линий, возбуждаемых в разряде, определить распределение концентрации возбужденных и метастабильных атомов по энергетическим уровням и т.д.

В работе нами выполнены исследования по изучению закономерностей формирования спектра оптического излучения самостоятельного объ-

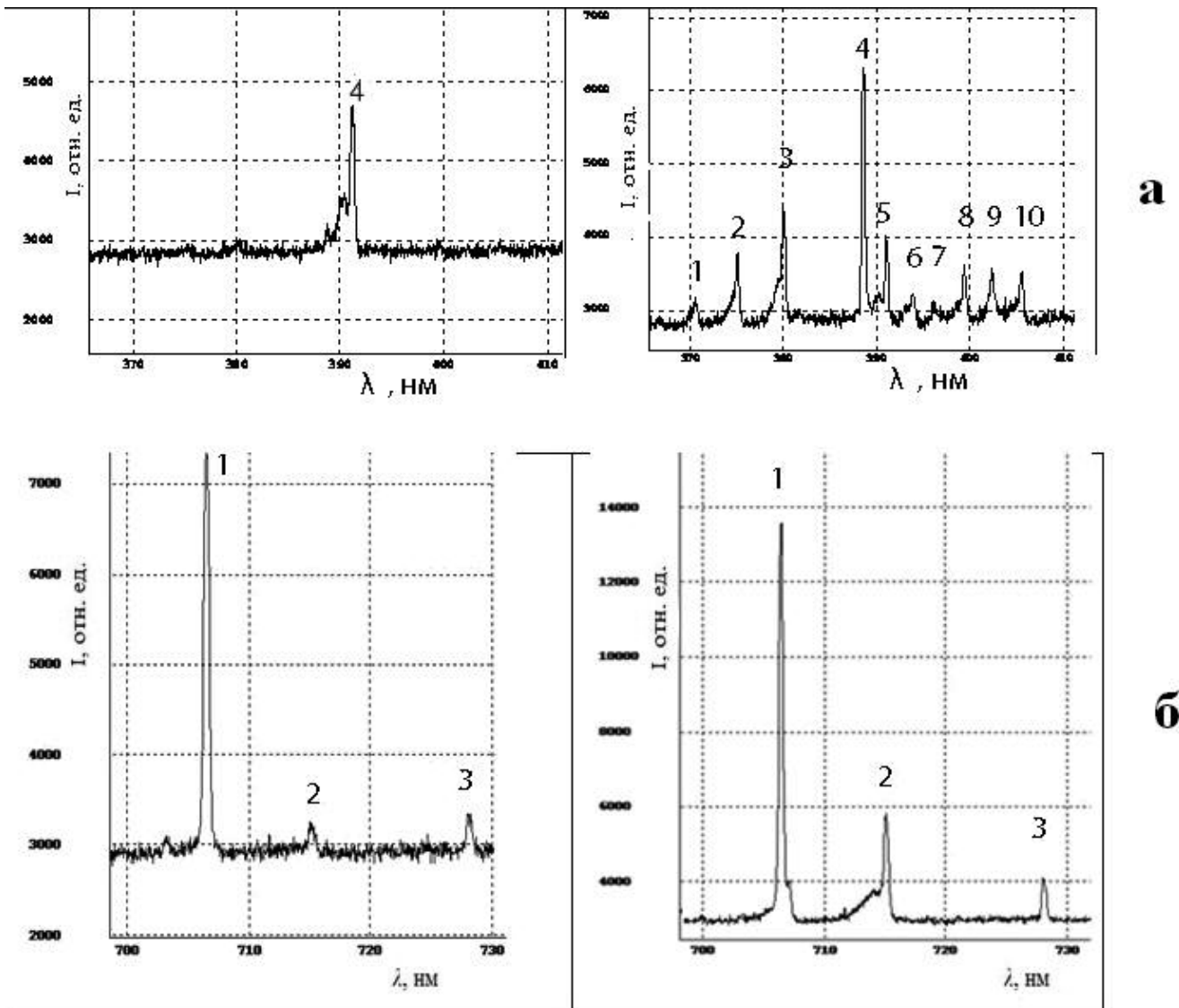


Рис. 6. Панорамный спектр разряда для двух значений прикладываемого к промежутку поля.

емного разряда в гелии при различных энергокладах в разряд (в режиме однородного горения, ОР с катодными пятнами и привязанными к ним диффузными каналами, контрагированный разряд и СДР). Наиболее интенсивные спектральные линии исследуемого газа (He) и материала вещества электродов (Fe), возбуждаемых в разряде, исследовались с помощью автоматизированного

комплекса монохроматор — спектрограф MS-3504i.

Наиболее интенсивные линии исследуемого газа (He) и материала вещества электродов (Fe) для трех значений прикладываемого поля, при которых наблюдаются различные режимы горения импульсного разряда в He, представлены в табл. 1.

Таблица 1

$U_0 = 3$ кВ	He, нм	381.96	388.86	471.3	587.56	640.64	667.81	706.52	728.14
		781.62							
$U_0 = 6$ кВ	He, нм	381.96	388.86	471.3	587.56	640.64	656.02	667.82	706.52
		728.14	781.62						
$U_0 = 12$ кВ	He, нм	381.96	388.86	403.23	447.15	471.41	492.19	501.56	587.56
		640.64	656.02	667.82	706.52	728.14	781.62		
	Fe, нм	337.08	354.01	358.95	375.82	391.36	394.81	396.61	399.74
		404.58	419.56	428.54	487.21	633.68	673.32	714.53	750.73
		778.06	843.96	862.61	868.86	871.03	894.52	925.83	

Для сравнения на рис. 6, а, б приведен панорамный спектр разряда для двух значений прикладываемого к промежутку поля, соответственно, в области спектра (360—400 нм) и (700—730 нм). Из этого рис следует, что с увеличением энергоклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа и материала вещества электродов. Например, при $U_0 = 3$ кВ энергоклад в разряд составляет 0,0675 Дж, при этом разрядный промежуток представляет собой столб однородной плазмы высокой проводимости (см. рис.1, фото 1—4). При этом в разряде возбуждаются в основном атомарные линии He (см. табл. 1).

При увеличении энергоклада увеличиваются количество спектральных линий, возбуждаемых в разряде, а также зажигаются отдельные спектральные линии материала вещества катода, хотя внешний вид разряда еще характеризуется однородным свечением (рис. 1, фото 2). При энергокладе в разряд 0,27 Дж на катоде зажигается одно катодное пятно с интенсивностью, немного отличающийся от столба объемного разряда.

Анализ табл. 1 и всего панорамного спектра спонтанного излучения материала вещества катода и исследуемого газа показывает, что исследуемый спектр имеет свои особенности. В частности, при возникновении на поверхности катода катодных пятен и диффузных каналов (см. рис.1, фото 3) при напряжениях пробоя $U_0 > 6$ кВ (перенапряжение $\geq 100\%$) в исследуемом разряде дополнительно зажигаются спектральные линии материала электродов — катода (Fe) и исследуемого газа (He), представленные в табл. 2.

Таблица 2

6 кВ < U_0 < 10 кВ				
Fe, нм	354.012	633.68	659,33	843.96
He, нм	501,568			

При напряжениях пробоя $10 \text{ кВ} \leq U_0 < 12 \text{ кВ}$ (перенапряжение от 230 до 300%) промежуток перекрывается диффузными каналами и происходит контракция ОР в искровой канал (см. рис.1, фото 4). При этом дополнительно зажигаются в разряде только спектральные линии материала вещества катода Fe, а именно, 399.74 нм; 404.58 нм.

В режиме СДР ($U_0 > 12$ кВ) резко возрастает число спектральных линий материала вещества электродов, связанных с взрывными процессами на катоде (катодные пятна) и образуется катодная плазма с интенсивным спектром новых линий материала вещества электродов и исследуемого газа

При напряжении $U_0 = 12$ кВ удельный энергоклад в разряд составляет величину $\sim 0,1$ Дж/см³ и является максимальным для данного газа (He) в стадии однородного горения. При увеличении накопительной энергии конденсатора до 0,1 Дж в плазме разряда возникает большое число плазменных каналов (рис. 1, кадр 3), имеющих сравнительно большой диаметр ($\sim 0,1$ см). Временное разграничение объемной и канальной стадий горения разряда хорошо видно на осциллограммах импульсов тока разряда и напряжения на плазменном канале (см. рис. 2 — время t3).

Рассмотрим теперь отличительные особенности формирования спектра оптического излучения исследуемого разряда в различных областях спектра.

В области спектра 370–410 нм в зависимости от энерговклада в разряд возбуждаются линии исследуемого газа (He) и материала электродов — катода (Fe), представленные в табл. 3.

В области спектра 400–700 нм возбуждаются линии исследуемого газа (He) и материала электродов — катода (Fe), представленные в табл. 4.

Таблица 3

He, нм	U0=6 кВ	381, 96	388, 86				
	U0 = 12 кВ	381,96	388,86	403,23			
Fe, нм	U0 = 12 кВ	375,8	391,36	394,8	396,6	399,74	404,58

Таблица 4

He, нм	U0=6 кВ	587,5	640,6	656,1	667,8	706,52				
	U0=12 кВ	403,2	447,1	471,4	492,19	501,56	587,56	640,6	667,8	706,5
Fe, нм	U0=6 кВ	428,54	633,68	673,3	714,5					
	U0=12 кВ	404,58	419,56	428,54	487,21	633,68	673,32	714,53		

В области спектра 700–730 нм при $U_0 = 6$ кВ и при $U_0 = 12$ кВ спектр разряда не меняется и возбуждаются спектральные линии He (706,52; 728,135) и Fe (714,53 нм), а других линий нет. Можно предположить, что в диапазоне спектра 700–730 нм энерговклад в разряд не влияет на формирование спектральных линий (He, Fe), т.е. изменение спектра не происходит. Однако относительная интенсивность свечения указанных линий He и Fe в области 700–730 нм при $U_0 = 12$ кВ возрастает почти в 2 раза по сравнению с относительной интенсивностью при $U_0 = 6$ кВ.

Результаты исследования показывает, что спектр излучения линий материала электродов формируется и при малых энерговкладах, когда разрядный промежуток представляет собой столб однородной плазмы. Это позволяет предположить, что линии паров материала электродов формируется не только при взрывных процессах на катоде, но и при эмиссии или эрозии электродов.

Таким образом, из представленных результатов становится ясной последовательность происходящих событий: возникновение катодных пятен в начальной стадии разряда, развитие незавершенных аноднаправленных каналов, прорастание искрового канала вдоль диффузного канала и рост проводимости в них, а также переход ОР в СДР.

Заключение

Приведем основные результаты данной работы:

В условиях сильной предварительной ионизации рабочей среды разряд в широком диапазоне начальных напряжений имеет объемную форму протекания тока, длительность которой уменьшается с ростом начального напряжения и давления газа в промежутке. При предельных удельных энерговкладах $\approx 0,1$ Дж/см³ и критических плотностях тока $j_{кр} \geq 40$ А/см² разряд контрагируется в искровой канал.

Экспериментально показано, что с формированием объемного разряда напряжение горения U_r при различных значениях E/p стремится к такому значению, при котором U_r/pd остается постоянным. При этом ионизационная способность электрона $\eta = \alpha/E_0$ максимальна и оптимальны условия для размножения электронов. Обнаружено, что величина отношения E/p в плазме ОР не зависит от величины начального напряжения на промежутке и при $p = 1$ атм. составляет ≈ 4 В/(см×Торр). Падение напряжения на плазме ОР, в основном, определяется давлением газа и увеличивается по мере его роста.

Изучен временной характер формирования и развития спектрального состава излучения самостоятельного объемного разряда в гелии и выявлены наиболее интенсивные атомарные и ионные спектральные линии, возбуждаемые в разряде. Показано, что на стадии объемного горения интенсивности этих линий слабо зависят от прикладываемого поля и преимущественно определяются давлением газа.

В согласованном режиме накачки реализован удельный энерговклад $\sim 0,1$ Дж/см³, являющийся максимальным для данного газа в стадии однородного горения. Увеличить длительность сохранения однородности горения разряда было возможно только путем уменьшения плотности тока.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ «Юг России» 12–02–96505 и в рамках Госзадания № 2644.

Литература

1. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А., и др. Объемные разряды, применяемые для накачки эксимерных лазеров. В кн.: Лазерные системы. — Новосибирск: Наука, 1980. С. 14–29.
2. Козырев А.В., Королев Ю.Д., Месяц Г.А., и др. // ЖТФ. 1981. Т.51. Вып. 9. С. 1817

3. Колчин К.И., Прозоров Е.Ф., Ульянов К.Н., и др. Сильноточный объемный разряд со спитцеровской проводимостью. / V Всесоюзная конференция по физике газового разряда: Тез. докл. Омск, 1990. Ч.1. С. 113–114.
4. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. // Прикладная физика. 2003. № 4. С. 20
5. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 195.
6. Курбанов Э.Д. и др. // Проблемы энергетики. 2006. № 3–4
7. Бохан П.А., Закреевский Д.Э. // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 4. С. 25
8. Жуков В.В., Кучерев В.С., Латуш Е.Л. и др. // Квантовая электроника. 1977. Т. 4. № 6. С. 1257
9. Курбанисмаилов В.С., Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., и др. Импульсный разряд в парогазовых смесях гелия высокого давления. / XXX Всероссийская конференция по физике плазмы и УТС: Тез. докл. Звенигород, 2003. С.124.
10. Курбанисмаилов В.С., Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., и др. Особенности формирования спектра излучения паров материала электродов в объемном разряде гелия. / VI International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL-2003. Tomsk, 2003.
11. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Абакарова Х.М., и др. // Вестник ДГУ. 2013. № 6. С. 38
12. Курбанисмаилов В.С., Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., и др. // Прикладная физика. 2004. № 3. С. 41
13. Kurbanismailov V.S., Omarov O.A., Arslanbekov M.A., et al. // Plasma Physics Reports. 2012. V. 38, No. 1. P. 22
14. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., и др. // Вестник ДГУ. 2012. № 6. С. 5
15. Kurbanismailov V.S., Omarov O.A., Ragimkhanov G.B., et al. // Plasma Physics Reports. 2011. V. 37. No. 13. P. 1166
16. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. // Вестник ДГУ. 1997. № 1. С.32
17. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя. — М.: Наука, 1991.
18. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. // ТВТ. 1995. Т. 33. № 3. С.346
19. Омаров О.А., Курбанисмаилов В.С., Ашурбеков Н.А., и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2006. № 4. С. 45
20. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 21. С. 1121.
21. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. и др. // Известия вузов. Физика. 1978. № 7. С. 72

The optical radiation of pulse volume in the He of high pressure

V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov,
M. A. Arslanbekov, Kh. M. Abakarova, and A. R. Abbas Ali

Dagestan State University

43a M.Gadzhiev str., Makhachkala, 367025, Russia,

E-mail: Vali_60@mail.ru

Received May 12, 2014

The electrical, space-temporal and spectral characteristics of the volume discharge (VD) and the transition from the stage of the volume combustion to the channel stage are experimentally studied. Under high overvoltage plasma torches are formed over them, adding of which creates a volume plasma post of high conductive discharge (HCD — high current diffuse mode). Homogeneity of the discharge increases with the raise of cathode spots density and the gas pressure in the gap. The features of the emission spectrum of the test gas and the spectrum of the electrode material for different initial conditions are studied, namely VD homogeneous combustion mode, in VD transition in the spark channel mode, in the transition of VD into HCD mode.

PACS: 52.25.— b, 52.70.— m, 52.80.Tn

Keywords: volume discharge, diffuse channel, optical radiation, contraction, spark channel, cathode spot.

References

1. Yu. I. Bychkov, Yu. D. Korolev, G. A. Mesyats, et al., in *Laser Systems* (Nauka, Novosibirsk, 1980), pp. 14–29 [in Russian].
2. A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, G. A. Mesyats, et al., *Tech. Phys.* **51**, 1817 (1981).
3. K. I. Kolchin, E. F. Prozorov, K. N. Ul'yanov, et al., in *Proceedings of the V All-Russian Conference on Gas Discharge Physics* (Omsk, Russia, 1990), Part 1, pp. 113–114.
4. V. S. Kurbanismailov and O. A. Omarov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 20 (2003).
5. L. P. Babich, T. V. Loiko, L. V. Tarasova, et al., *Tech. Phys.* **47**, 195 (1977).
6. E. D. Kurbanov et al., *Problemy Energetiki*, No. 3–4, (2006).

7. P. A. Bokhan and D. E. Zakreevskii, *Tech. Phys.* **67**, 25 (1007).
8. V. V. Zhukov, V. S. Kucherev, E. L. Latush, et al., *Quant. Electron.* **4**, 1257 (1977).
9. V. S. Kurbanismaiлов, N. A. Ashurbekov, O. A. Omarov, et al., in *Proceedings of the XXX Intern. Conference on Plasma Physics (Zvenigorod, Russia, 2003)*, p.124.
10. V. S. Kurbanismaiлов, N. A. Ashurbekov, O. A. Omarov, et al., in *Proceedings of the VI International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers — AMPL-2003 (Tomsk, Russia, 2003)*.
11. V. S. Kurbanismaiлов, Kh. M. Abakarova, O. A. Omarov, et al., *Vestnik Dagestan. Gos. Univ.*, No. 6, 38 (2013).
12. V. S. Kurbanismaiлов, N. A. Ashurbekov, O. A. Omarov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 41 (2004).
13. V. S. Kurbanismaiлов, M. A. Arslanbekov, O. A. Omarov, et al., *Plasma Physics Reports* **38**, 22 (2012).
14. V. S. Kurbanismaiлов, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov, et al., *Vestnik Dagestan. Gos. Univ.*, No. 6, 5 (2012).
15. V. S. Kurbanismaiлов, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov, et al., *Plasma Physics Reports* **37**, 1166 (2011).
16. V. S. Kurbanismaiлов and O. A. Omarov, *Vestnik Dagestan. Gos. Univ.*, No. 1, 32 (1997).
17. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Pulse Discharge Physics* (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
18. V. S. Kurbanismaiлов and O. A. Omarov, *High. Temp.* **33**, 346 (1995).
19. O. A. Omarov, V. S. Kurbanismaiлов, N. A. Ashurbekov, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Natural Sciences*, No. 4, 45 (2006).
20. Yu. I. Bychkov, Yu. D. Korolev, G. A. Mesyats, et al., *Tech. Phys. Lett.* **3**, 1121 (1977).
21. Yu. I. Bychkov, Yu. D. Korolev, G. A. Mesyats, et al., *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Fizika*, No. 7, 72 (1978).