## ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ОБЪЕМНЫХ РАЗРЯДОВ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А.,

Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али

*Даггосуниверситет, Россия,* [*Vali\_60@mail.ru*](mailto:Vali_60@mail.ru)

Комплекс исследований в инертных газах (*Не*, *Ar*) атмосферного давления позволил выявить ряд особенностей горения, присущих этим газам в зависимости от условий инициирования разряда. Было показано, что в процессе перехода от объемного разряда (ОР) к искровому существуют следующие фазы развития: ОР, ОР с катодными пятнами (КП), ОР с КП и привязанными к ним диффузными каналами, контрагированный искровой канал, сильноточный диффузный режим (СДР) [1-3]. Исследуя оптическое излучение ОР при высоких давлениях в (*Не*, *Ar*) обнаружены в спектре прикатодной плазмы спектральные линии паров материала электродов, формируемых в разряде в процессе распыления материала катода [1,4].

Поэтому практический интерес представляет исследование различных характеристик плазмы объемных и контрагированных разрядов, сам процесс перехода ОР в СДР и исследование спектрального состава излучения приэлектродной плазмы в (*Не*, *Ar*) в режиме распыления материала электродов.

Диагностика раз­ряда включала регистрацию разрядного тока и напряже­ния на плазменном канале с применением цифровых осциллографов типа Tektronix, фотографирование интегрального свечения разряда, а так же фотографирование пространственно-временных картин свечения промежутка с применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР-2). Панорамный спектр разряда регистрировался с помощью автоматизированного комплекса монохроматор-спектрограф (MS-3504i). В некоторых экспериментах использовалась система щелей, позволяющая регистрировать с помощью ФЭУ свечение из различных областей разрядного промежутка.

Переход разряда от объемной стадии к канальной ис­следовался в промежутке с площадью разряда s=12 см2 и расстояния между электродами *d =* 1 см, давление газа менялось в пределах 1-5 атм, напряжение пробоя – от статического пробойного до сотни процентов перенапряжений.

В *Не* при атмосферном давлении при малых внешних полях (*Е*0<6 кВ/см) горит однородный ОР (рис.1, фото 1), а развитие незавершенных анодонаправленных плазменных каналов, привязанных к КП с высокой проводимостью начиналось при плотности тока ~ 40 А/см2 (рис.1, фото 2-3). При этом в межэлектродном пространстве еще сохранялась хорошая однородность плаз­мы разряда. Увеличение плотности тока до 60 А/см2 (рис.1, фото 4-5) ведет к дальнейшему продвижению незавершен­ных анодонаправленных каналов. При плотности тока более 100 А/см2 проис­ходит прорастание вдоль диффузного канала искрового канала (рис.1, фото 6), что проявляется в виде второго резкого спада напряжения в конце импульса (см. рис.2, время *t3*), обусловленного ростом проводимости в искровом канале.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1(3 кВ) | 2(6 кВ) | 3(10 кВ) |
| C:\Users\FizikFak\Desktop\Экспер_данные_с_пом_МS_3504i_2013_год\Оптика\1-3.jpg | C:\Users\FizikFak\Desktop\Экспер_данные_с_пом_МS_3504i_2013_год\Оптика\1-4.jpg | C:\Users\FizikFak\Desktop\Экспер_данные_с_пом_МS_3504i_2013_год\Оптика\1-10.jpg |
| 4(11 кВ) | 5(12 кВ) | 6(13 кВ) |
| C:\Users\FizikFak\Desktop\Экспер_данные_с_пом_МS_3504i_2013_год\Оптика\1-11.jpg | C:\Users\FizikFak\Desktop\Экспер_данные_с_пом_МS_3504i_2013_год\Оптика\1-12.jpg | C:\Users\FizikFak\Desktop\Экспер_данные_с_пом_МS_3504i_2013_год\Оптика\1-13.jpg |

Рис.1. Интегральные картины свечения промежутка в *Не* при различных напряжениях на промежутке (р=1 атм, d = 1см).

Для выяснения влияния давления газа на однородность и устойчивость ОР были выполнены исследования при более высоких давлениях. При увеличении давления газа в промежутке разряд расконтрагируется и горит однородно при полях *Е0/p* ≤ *Е*кр/*p* = 7,5 кВ/см атм. При полях *Е0/p*> *Е*кр/*p* наблю­дается большая плотность КП, из которых начинается формирование незавершенных каналов, а столб разряда имеет высокую степень однородности.

Время существования объемной фазы разряда можно определить, синхронизируя электрические характеристики с пространственно-временными картинами свечения промежутка, снятыми ЭОПом (ФЭР-2) в режиме щелевой развертки.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рис.2. Характерная осциллограмма тока и напряжения на промежутке в *Не* (*U0* = 9 кВ, *р* = 3 атм, *d* = 1 см).  Здесь, времена: τсп1 = t2 – t1 – время коммутации (время формирования) объемного разряда; τст = t3 – t2 – время однородного горения разряда (длительность объемной фазы); t3 – начало контракции ОР в искровой канал. |

На рис.3 представлены фотографии щелевой развертки (в динамическом режиме работы ЭОП типа ФЭР-2) совместно с импульсом напряжения. Как следует из рис.3 к моменту времени *t*3 на катоде зажигается КП, которое на пространственно-временных картинах разворачивается в виде яркой дорожки. КП отделено от столба разряда некоторым темным пространством и из КП прорастает искровой канал. Зависимость тока разряда от време­ни имеет характерную форму с двумя максимумами, со­ответствующими объемной и канальной стадиям горе­ния разряда [3].

Длительность ОР уменьшается с ростом плотности тока разряда и при перенапряжениях в промежутке выше 300% ОР переходит в СДР. Например, в таблице 1. приведены измеренные значения средней плотности тока плазмы СДР в аргоне (рис.4) к моменту времени *t*=150 нс от начала резкого роста тока. Необходимым условием зажигания СДР является достаточно сильная предварительная ионизация и соответственно создание столба

|  |  |
| --- | --- |
|  | слабопроводящей плазмы.  Длительность горения сильноточного диффузного разряда в *Ar* и *He* составляет ~10-6с. В согласованном режиме питания СДР горит при постоянном напряжении и плотности тока. Электрическое поле в столбе разряда ~103 В/см. Особенностью СДР является невысокое напряжение горения, при котором ударная ионизация не может обеспечить поддержание проводимости столба плазмы. |
| Рис.3. Фотография щелевой развертки в разряде Не с импульсом напряжения при U0=10кВ (d=1см, р=1 атм, 1 мм =4,3 нс, катод - снизу). |

Таблица 1.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *E*0, кВ/см | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 23 |
| *j*, 103 A/см2 | 2 | 2,7 | 3,1 | 3,5 | 3,8 | 4,2 |

|  |  |
| --- | --- |
|  | Рис. 4. Интегральные во времени фотографии свечения разряда в аргоне с предварительной иониза-цией (*d*=3 мм, *p*=3 атм). |
| 1 2 3 4 |  |

В работе выполнены также исследования по изучению закономерностей формирования спектра оптического излучения самостоятельного ОР в *He* при различных энерговкладах в разряд. Наиболее интенсивные линии исследуемого газа (*Hе*) и материала вещества электродов (*Fe*) для трех значений прикладываемого поля были опубликованы в работе [4].

Для сравнения на рис.5 приведен панорамный спектр разряда в диапазоне спектра (360-400 нм) для двух значений прикладываемого к промежутку поля. Из рис.5 следует, что с увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые линии исследуемого газа и материала катода, хотя внешний вид разряда еще характеризуется однородным свечением (рис.1, фото 1-2). При энерговкладе в разряд 0,3 Дж на катоде зажигается одно катодное пятно с интенсивностью немного отличающийся от ОР.

Анализ 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 3-5) (перенапряжение W ≥ 100%) в исследуемом разряде дополнительно зажигаются спектральные линии исследуемого газа (*Не*) и (*Fe*) представленные в табл.2.

|  |  |
| --- | --- |
| 1м.emf | 2.emf |

Рис.5. Панорамный спектр в *Не* при различных начальных энерговкладах

в разряд (а - *U0*=6 кВ, б - *U0* =12 кВ).

Таблица 2.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| U0≥6 кВ | Fe, нм | 354.012 | 633.68 | 673.317 | 843.96 |
| He, нм | 501.568 | 667.815 |  |  |

При напряжениях пробоя *U0*≥ 12 кВ (перенапряжение *W* ≥ 300%) промежуток перекрывается диффузными каналами и происходит контракция ОР в искровой канал (см. рис.1, фото 6). При этом дополнительно зажигаются в разряде только спектральные линии *Fe*: 399.739 нм; 404.58 нм. В режиме СДР резко возрастает число спектральных линий материала вещества электродов, связанных с взрывными процессами на катоде и образуется катодная плазма с линиями *Fe* (см. табл.3), а также зажигается новая линия атома *Не* (492.19 нм).

Таблица 3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Fe, нм | 391.36 | 394.81 | 396.61 | 419.56 | 750.73 | 843.96 | 862.61 | 868.86 | 871.03 | 894.52 | 925.83 |

Таким образом, выполненные исследования показывают, что особенности возбуждения спектральных линий материала катода (Fe) и исследуемого газа зависят от диаграммы энергетических уровней этих элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания №2644.

**Литература**

1. Курбанисмаилов В.С., Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. //*Прикладная физика.* 2004. №3. С.41-46.
2. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А. //*ТВТ*.1995. **Т33.** №3. С.346-350.
3. 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.
4. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А. //В сб.: Тезисы докл. XLI Межд. конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2014. С.317.