

## Краткие сообщения

04;07;12

### Спектральные характеристики дугового разряда киллогерцового диапазона в потоке аргона атмосферного давления

© И.В. Осипова,<sup>1,2</sup> Н.Г. Внукова,<sup>1</sup> Г.Н. Чурилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
660036 Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Красноярский государственный технический университет,  
660074 Красноярск, Россия  
e-mail: churilov@iph.krasn.ru

(Поступило в Редакцию 7 марта 2006 г. В окончательной редакции 4 сентября 2006 г.)

Приведены результаты исследований дугового разряда переменного тока (44 kHz) в струе аргона при атмосферном давлении между двумя медными электродами. Один электрод — это водоохлаждаемый стержень с осевым отверстием для введения аргона, а второй — виток трубки, плоскость которой перпендикулярна оси центрального электрода. Исследованы спектры излучения аргона. Приведены характерные типы профилей, зависимости интенсивности спектральных линий от расстояния до торца центрального электрода. Для диапазона длин волн от 245 до 370 nm идентифицированы и приведены все наблюдающиеся переходы.

PACS: 52.80.Mg

#### Введение

Спектральные исследования, которые интенсивно велись в прошлом, имели основополагающее значение как в фундаментальных, так и в прикладных науках. Многим обязана спектроскопии атомов и молекул квантовая механика. Из прикладных достижений наиболее значимы лазерные технологии и эмиссионная спектроскопия. О плазменном состоянии вещества можно судить в основном по анализу спектров излучения или поглощения. В последнее время спектроскопия вновь стала одним из самых актуальных направлений в физике. Для этого есть несколько причин. Плазменный метод получения наноматериалов требует контроля параметров плазмы, который эффективно осуществляется спектральными методами. В результате развития электроники появилась новая элементная база, диодные матрицы и линейки, близкие по своим свойствам к фотоэлементам, но позволяющие получить спектральную информацию в сотни раз быстрее. Современная силовая электроника также получила новую полупроводниковую элементную базу, позволившую создать доступные и дешевые генераторы токов высокой частоты (10–400 kHz). Генерация плазмы в этом частотном диапазоне больше не является проблемой, соответственно появились возможности для ее исследования.

В литературе представлена информация о разрядах постоянного и переменного тока, в которых образуется неравновесная плазма [1,2]. Эти работы стимулируются поиском возможностей для создания эффективно работающих лазеров. Часто для решения технологических задач необходимо получение равновесной, отлич-

чающейся высоким теплосодержанием, плазмы. Обычно такая плазма получается посредством дугового разряда. В эмиссионной спектроскопии до сих пор применяется дуга с графитовыми электродами. Однако в этом случае молекулярный спектр циана закрывает практически весь видимый диапазон излучения. В случае применения водоохлаждаемых металлических электродов из-за их интенсивного разрушения плазма дуги сильно загрязнена. Это нежелательно в тех случаях, когда необходима плазма, не загрязненная материалами примесей, например, для целей медицины, плазмохимии, эмиссионной спектроскопии и т.д. Основная причина высокого уровня эрозии заключается в недостаточно эффективном охлаждении поверхности металла, на которой возникают катодные пятна. Механизм образования катодных пятен таков, что при использовании переменного тока можно избежать формирования одного постоянного катодного пятна, в отличие от случаев постоянного тока и тока промышленной частоты. Известно, что время объединения малых катодных пятен в одно большое составляет  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  s [3]. При токе частотой 44 kHz время существования нескольких катодных пятен на поверхности медного электрода составляет порядка  $10^{-5}$  s. Таким образом, в процессе разряда большую часть времени ток имеет несколько катодных привязок, существующих одновременно, что улучшает теплообмен и значительно снижает эрозию электродов.

Результаты исследования плазмы дуговых разрядов постоянного тока, тока промышленной частоты, а также радиочастотного диапазона изложены во многих статьях и монографиях. Однако диапазон  $10^3$ – $10^5$  Hz не исследован [3]. Настоящая работа содержит результа-

ты исследования эрозии электродов и спектральных характеристик дугового разряда, возбуждаемого между водоохлаждаемыми медными электродами на частоте 44 kHz в потоке аргона при атмосферном давлении.

## Экспериментальная часть

Исследовались спектральные характеристики плазмы, возбуждаемой дуговым разрядом на частоте 44 kHz в потоке аргона атмосферного давления. Разряд осуществлялся между электродом, выполненным в виде витка медной трубки, и медным электродом с осевым отверстием, через которое подавался поток аргона [4]. Регистрация спектров излучения проводилась при следующих параметрах: ток — 13 А, напряжение на электродах — 120 В.

Получение спектральной информации осуществлялось по методике, описанной ранее [5]. Спектры регистрировались на фотопленку, далее сканировались и оцифровывались. Яркость излучения источника света соответствовала такой освещенности, которая лежала в области линейной части характеристической кривой почернения для применяемой фотопленки. Исследования проводились в диапазоне от 245 до 370 nm. С использованием значений длин волн меди и железа, которые присутствуют в плазме разряда вследствие эрозии электродов, была рассчитана вся шкала данного диапазона. Это послужило основой для идентификации спектральных линий аргона.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены линии аргона для диапазона от 245 до 370 nm и их относительная интенсивность. В таблице представлено распределение по интенсивностям спектральных переходов в процентном соотношении, характеризующееся отношением суммарной относительной интенсивности всех спектральных линий определенного перехода к общей интенсивности всех спектральных линий аргона данного диапазона. Как видно из таблицы, наиболее интенсивные переходы:  $4p-4d$ ,  $4s-6p$ ,  $4p-5d$ ,  $3d-5f$ ,  $3d-4f$ . В рассматриваемом диапазоне длин волн отличительной особенностью нашего разряда является присутствие излучения, соответствующего переходам между различными уровнями. Осуществляются переходы как на низший —  $4s$ , так и на промежуточные уровни  $4p$ ,  $5d$ . Совершенно иная ситуация в случае тлеющего и радиочастотного разрядов. Интенсивность переходов с высших уровней на низшие для этих разрядов преобладает [2].

Нами были построены профили зависимости интенсивности всех спектральных линий аргона в исследуемом диапазоне от расстояния до торца центрального электрода. Анализ этих зависимостей показал, что имеются три характерные типа профилей (рис. 2).

Относительная интенсивность спектральных переходов

| Переход  | Относительная интенсивность, % |
|----------|--------------------------------|
| $3d-4p$  | 0.64                           |
| $3d-5p$  | 4.37                           |
| $3d-6p$  | 2.34                           |
| $3d-4f$  | 6.67                           |
| $3d-5f$  | 6.69                           |
| $3d-6f$  | 1.28                           |
| $4s-4p$  | 3.07                           |
| $4s-6p$  | 18.92                          |
| $4s-7p$  | 1.67                           |
| $4s-8p$  | 4.5                            |
| $4s-9p$  | 2.76                           |
| $4s-10p$ | 0.68                           |
| $4s-11p$ | 2.57                           |
| $4s-13p$ | 0.52                           |
| $4s-4f$  | 3.23                           |
| $4s-6f$  | 0.59                           |
| $4s-7f$  | 0.46                           |
| $4s-8f$  | 2.55                           |
| $4p-6s$  | 1.11                           |
| $4p-4d$  | 24.57                          |
| $4p-5d$  | 7.27                           |
| $4p-6d$  | 0.38                           |
| $4d-5f$  | 1.02                           |
| $4d-7f$  | 2.11                           |

Оценка эрозии плазменного генератора была произведена экстраполяцией зависимости интенсивности линии меди 510.554 nm от ее концентрации в плазме. Были приготовлены эталоны с процентным содержанием меди от 0.1 до 0.00001% в графитовой матрице, и была получена прямолинейная концентрационная зависимость. Исследования показали, что за время 160 s при токе 13 А и частоте 44 kHz масса испарившегося материала с поверхности катода составила  $2 \cdot 10^{-11}$  kg. Это соответствует величине эрозии электродов —  $10^{-14}$  kg/С.

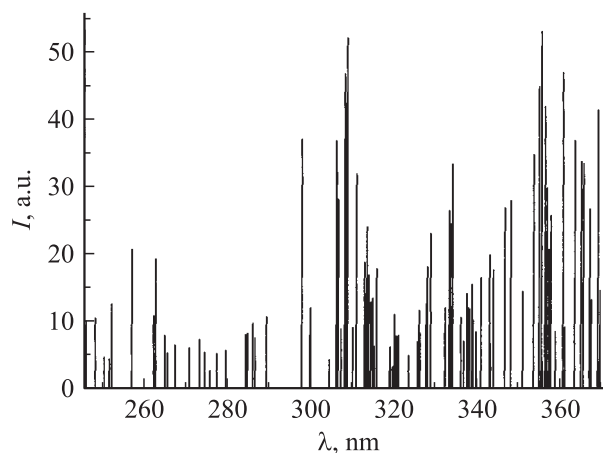
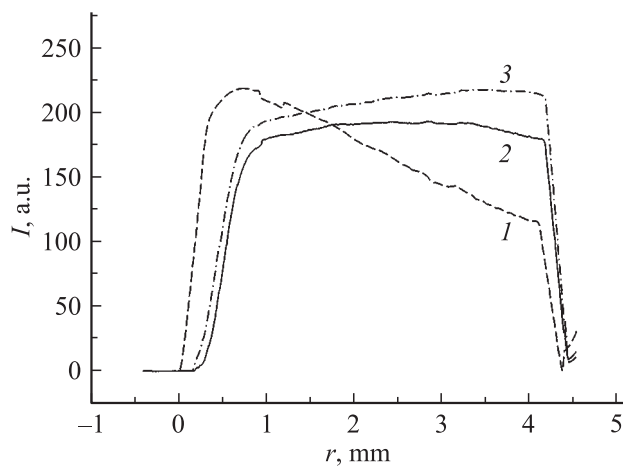


Рис. 1. Линии аргона в спектре излучения дугового разряда переменного тока (44 kHz) и их относительная интенсивность.



**Рис. 2.** Профили спектральных линий аргона: 1 — спектральная линия  $\lambda = 328.170$  nm соответствует переходу  $4p-4d$ ; 2 —  $\lambda = 356.766$  соответствует  $4s-6p$ ; 3 —  $\lambda = 356.329$  соответствует  $4s-6p$ .  $r$  — расстояние до торца центрального электрода.

## Заключение

Суммируя все приведенные результаты, можно сказать, что плазма разряда на частоте 44 kHz, при токе 13 А отличается низким содержанием материала электродов, незначительным изменением интенсивности линии по длине разряда, присутствием излучения, соответствующего переходам между различными уровнями. Такой разряд можно рекомендовать для использования в аналитике, в качестве источника света для эмиссионной спектроскопии, плазмохимии и медицины.

В дальнейшем планируется провести исследования в более широком диапазоне, как частоты питающего разряда тока, так и длин волн спектра излучения плазмы.

Работа выполнена при частичной поддержке СО РАН (Лаврентьевский конкурс молодежных проектов СО РАН, 2006).

## Список литературы

- [1] Bogaerts A., Gigbels R. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. N 1. P. 121–136.
- [2] Bogaerts A., Gigbels R. // Spectrochimica Acta B. 2000. Vol. 55. P. 263–278.
- [3] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [4] Суковатый А.Г., Чурилов Г.Н., Мальцева С.С. // ПТЭ. 1998. № 5. С. 137.
- [5] Сыченко Д.П., Внукова Н.Г., Лопатин В.А. и др. // ПТЭ. 2004. № 4. С. 76–79.