

УДК 537.533.9,537.563.22,537.525.99

## Газовый разряд низкого давления с убегающими электронами как источник рентгеновского излучения

В.О. Пономаренко, Г.Н. Толмачев

*Проведено прямое экспериментальное исследование спектров рентгеновского излучения из газового разряда с убегающими электронами в атмосфере Ar без мишени, а также с V-мишенью в атмосфере O<sub>2</sub>. Показано, что энергетическое распределение рентгеновского излучения из такого газового разряда качественно можно описать в рамках теории рентгенофлуоресцентного анализа.*

PACS: 52.38.Ph

*Ключевые слова:* рентгеновское излучение, газовый разряд, убегающие электроны, спектр.

### Введение

В газовых разрядах с убегающими электронами происходит формирование пучков электронов, энергия которых определяется приложенным напряжением. Такие пучки должны формировать в зоне разряда (в газе, от металлических и диэлектрических элементов разрядной камеры) рентгеновское излучение, энергия которого зависит от быстрой части функции распределения электронов по энергиям. В таких разрядах в атмосфере O<sub>2</sub> обнаружен механизм послойного роста наноразмерных пленок [1] активных материалов с высоким структурным совершенством [2], который до настоящего времени не ясен. Эти пленки позволяют создавать принципиально новые типы устройств функциональной микроэлектроники [3–4]. Можно ожидать, что определенную роль в механизме послойного роста играет формирующееся в разряде с убегающими электронами рентгеновское излучение.

Поэтому исследование спектров рентгеновского излучения в разряде с убегающими электронами в атмосфере кислорода является весьма интересной и актуальной задачей.

В работах [5, 6] представлены данные об энергетическом распределении электронов и квантах рентгеновского излучения при диффузном наносекундном разряде с убегающими электронами в воздухе при атмосферном давлении. В работе [7] описано применение спектрометрического комплекса аппаратуры для рентгеновской диагностики плазмы импульсных установок, а так же представлены данные о динамике изменения интенсивности рентгеновского излучения в микропинчевом разряде. Тем не менее, представленные данные не дают полной информации о природе рентгеновского излучения в разряде, а именно, отсутствуют данные о вкладах в исследуемые спектры характеристической и тормозной компонент. Природа характеристического и тормозного рентгеновского излучения различна: характеристическое излучение определяется строением атома, а тормозное – возникает при торможении заряженных частиц (например, электронов) в веществе [8]. Поэтому исследование характеристического и тормозного вкладов в спектр рентгеновского излучения позволит лучше понимать механизмы процессов, которые происходят в газовом разряде. Эта работа служит продолжением работы [9], в которой мы представили

**Пономаренко Валерий Олегович**, научный сотрудник.

**Толмачев Геннадий Николаевич**, заведующий отделом.

Южный Научный Центр РАН.

Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: (863) 243-38-58, (863) 219-87-61

E-mail: v-o.pon@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 28 ноября 2012 г.*

© Пономаренко В.О., Толмачев Г.Н., 2013

рентгеновские спектры из газового разряда при низком давлении Хе без мишени, а так же с V-мишенью при низком давлении  $O_2$ .

Цель данной работы – с помощью энергодисперсионной системы регистрации провести прямое исследование спектра рентгеновского излучения из газоразрядной камеры при низком давлении Ag без мишени, а также установить зависимость формы спектров рентгеновского излучения из газоразрядной камеры от приложенного напряжения при низком давлении  $O_2$  с V-мишенью. Предполагается доказать, что форму, спектральный состав и интенсивность рентгеновского излучения из газового разряда качественно можно описать в рамках теории рентгенофлуоресцентного анализа [10].

### Экспериментальная часть

Исследование спектров рентгеновского излучения из газового разряда проводилось по схеме, описанной ранее в работе [9]. На рис. 1, а (треугольники, квадраты и круги) представлены характерные экспериментальные спектры рентгеновского излучения из газового разряда от V-мишени в атмосфере  $O_2$  при подводимом напряжении 5,5, 6,5 и 7,5 кВ. В этих спектрах присутствуют тормозная и характеристическая компоненты. Тормозная компонента обусловлена торможением электронов разряда в  $O_2$  и материале мишени, характеристическая – материалом мишени. Характеристическое излучение соответствует линиям ванадия:  $V K_\alpha$  и  $V K_\beta$ .

Теоретическое описание экспериментальных спектров проводилось на основе выражения для интенсивности непрерывного спектра рентгеновского излучения [10] с учетом присутствия флуоресцентных линий:

$$I(E) = (I(E)_{K_\alpha} + I(E)_{K_\beta} + C \cdot Z \cdot (E_0 - E) \cdot e^{-(\mu_1 \cdot l_1 + \mu_2 \cdot l_2 + \mu_3 \cdot l_3)}) \quad (1)$$

где  $I(E)$  – интенсивность рентгеновского излучения в зависимости от энергии,  $I(E)_{K_\alpha}$  – интенсивность  $K_\alpha$ -линии V,  $I(E)_{K_\beta}$  – интенсивность  $K_\beta$ -линии V,  $C$  – экспериментальная константа,  $Z$  – атомный номер материала анода,  $E_0$  – подводимое напряжение,  $\mu_1$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения в воздухе,  $\mu_2$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения в Ве,  $\mu_3$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения в Al,  $l_1$  – расстояние, которое рентгеновское излучение проходит в воздухе,  $l_2$  – расстояние, которое рентгеновское излучение проходит в Ве,  $l_3$  – расстояние, которое рентгеновское излучение проходит в Al. На рис. 1, а (сплошные линии) представлены рассчитанные спектры рентгеновского излучения. Форма флуоресцентной линией описывается гауссовой линией, соотношения между интенсивностями  $K_\alpha$  и  $K_\beta$ -линий V хорошо известны [11]. После обработки экспериментального спектра, убрав из формулы (1) экспоненту, отвечающую за ослабление, можно восстановить первоначаль-

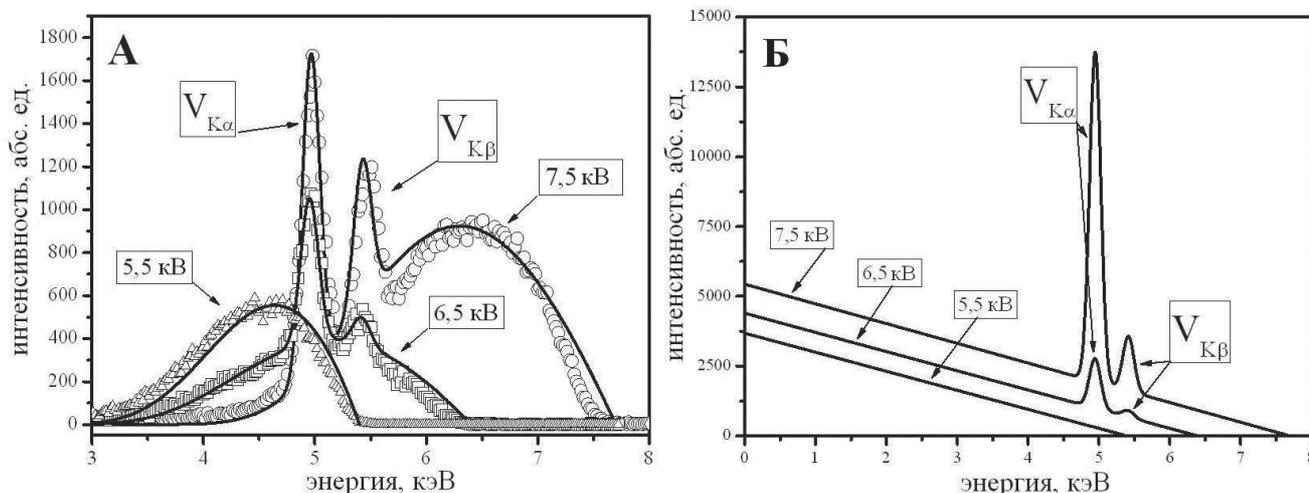


Рис. 1. Рентгеновские спектры: а – экспериментальные (треугольники, квадраты и круги) и расчетный (сплошная линия) спектры рентгеновского излучения из газового разряда; б – восстановленные первоначальные спектры рентгеновского излучения в газовом разряде; мишень – V, газ –  $O_2$ , напряжение – 5,5, 6,5 и 7,5 кВ, ток – 15 мА, давление  $p - (3,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  Торр.

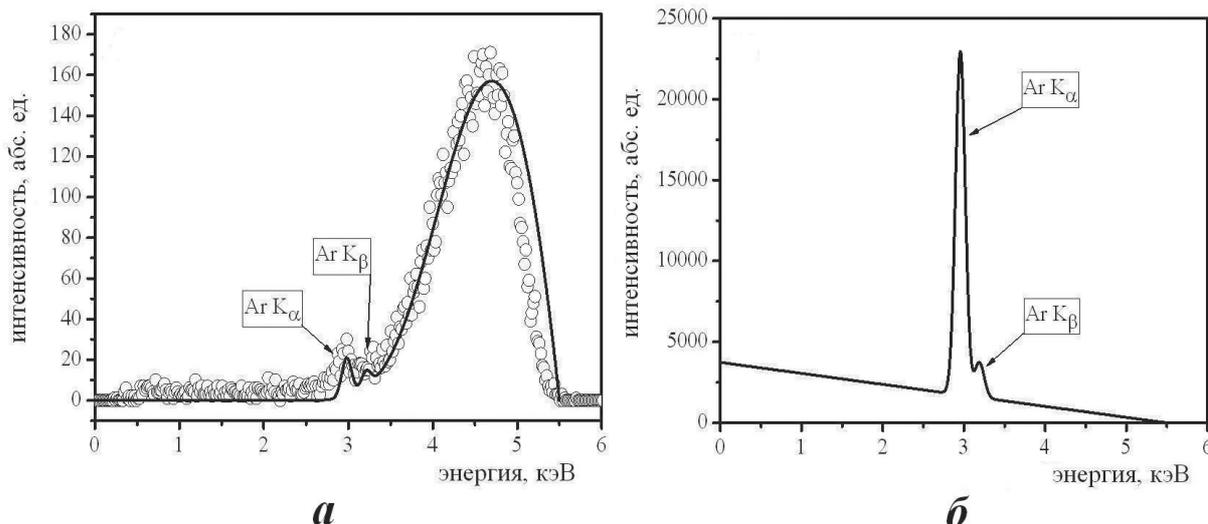


Рис. 2. Рентгеновские спектры: а – экспериментальный (кружки) и расчетный (сплошная линия) спектры рентгеновского излучения из газового разряда; б – восстановленный первоначальный спектр рентгеновского излучения в газовом разряде; газ – Ar, напряжение – 5,5 кВ, давление  $p - (3,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  Торр.

ный спектр, который формируется в разряде (рис. 1, б).

Для исследования рентгеновского спектра из газового разряда, вклад в который дает только газ, заполняющий объем камеры, мы выбрали Ar. Выбор обусловлен тем, что характеристические линии этого газа лежат в удобном для нас диапазоне энергий:  $Ar K_{\alpha} = 2,95$  кэВ,  $Ar K_{\beta} = 3,19$  кэВ. В этом случае, чтобы исключить вклад мишени в регистрируемый спектр, ее выводили из зоны регистрации.

На рис. 2, а представлен характерный экспериментальный (кружки) и расчетный (сплошная линия) спектры рентгеновского излучения из камеры газового разряда, заполненной Ar. Видны характеристические линии  $Ar K_{\alpha}$  и  $Ar K_{\beta}$ . На рис. 2, б представлен восстановленный первоначальный спектр рентгеновского излучения внутри камеры газового разряда с убегающими электронами, вычисленный с использованием формулы (1).

### Заключение

С помощью полупроводниковой системы регистрации рентгеновского излучения удалось провести прямое экспериментальное исследование спектров рентгеновского излучения из газового разряда с убегающими электронами в атмосфере Ar, а также с V-мишенью в атмосфере  $O_2$ . Установлено, что полученные спектры носят непрерывный характер и содержат в себе как тормозную ком-

поненту, обусловленную торможением пучка электронов в газе, заполняющем камеру и в материале мишени, так и характеристическую компоненту, обусловленную ионизацией электронами пучка атомов газа и материала мишени. Качественно форму спектров можно описывать в рамках теории рентгенофлуоресцентного анализа [10], однако для проведения количественных оценок и анализа процессов, происходящих в газовом разряде, аналитическое описание спектров может потребовать существенных доработок.

### Литература

1. Mukhortov V M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtsov A.N. // *Ferroelectrics*. 2000. V. 247. No. 1-3. P. 75
2. Сигов А.С., Мишина Е.Д., Мухортов В.М. // *ФТТ*. 2010. Т. 52. № 4. С. 709.
3. Мухортов В.М., Масычев С.И., Головки Ю.И. и др. // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. № 10. С. 106
4. Есипов Ю.В., Мухортов В.М. // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. № 1. С. 82.
5. Бакихт Е.Х., Бураченко А.Г., Козырев А.В. и др. // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. № 1. С. 51
6. Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакихт Е.Х. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37. № 22. С. 26
7. Долгов А.Н., Савелов А.С., Салахутдинов Г.Х. // *Прикладная физика*. 2008. № 5. С. 35
8. Павлинский Г.В. *Основы физики рентгеновского излучения*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
9. Пономаренко В.О., Толмачев Г.Н. // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38. № 16. С. 34
10. Афонин В.П., Комяк Н.И., Николаев В.П., Плотников Р.И. *Рентгенофлуоресцентный анализ*. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 1991
11. Блохин М.А., Швейцер И.Г. *Рентгеноспектральный справочник*. – М.: Наука. 1982.

## Gas discharge of low pressure with runaway electrons as a source of X-ray

*V.O. Ponomarenko and G.N. Tolmachev*

South Scientific Center of the Russian Academy Sciences,  
41 Chekhov av., Rostov-on-Don, 344006, Russia  
E-mail: v-o.pon@yandex.ru

*A direct experimental study of the spectra of X-ray emission from the gas discharge with runaway electrons in an Ar atmosphere without the target, and also with a V-target in an atmosphere of O<sub>2</sub> are presented. It is shown that the energy distribution of the X-ray emission from a gas discharge can be qualitatively described within the framework of the theory of X-ray fluorescence analysis.*

*PACS: 52.38.Ph*

*Keywords: X-rays, gas discharge, spectrum.*

*Bibliography – 11 references*

*Received November 28, 2012*