

04;10

Спектры рентгеновского излучения в газовом разряде низкого давления с убегающими электронами

© В.О. Пономаренко, Г.Н. Толмачев

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону
Научно-исследовательский институт физики ЮФУ, Ростов-на-Дону
E-mail: v-o.pon@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 апреля 2012 г.

Проведено прямое экспериментальное исследование спектров рентгеновского излучения из газового разряда с убегающими электронами при низком давлении Хе, а также с V-мишенью при низком давлении O₂. Показано, что энергетическое распределение рентгеновского излучения из такого газового разряда описывается в рамках теории интенсивности непрерывного спектра рентгенофлуоресцентного анализа.

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. Поскольку разряды с убегающими электронами широко используются в технологии роста пленок [1,2], в газовых лазерах с поперечными типами разрядов [3,4] и других приложениях, важно знать, рентгеновское излучение какого спектрального диапазона присутствует в камерах разряда с убегающими электронами. В работах [5–7] представлены данные об энергетическом распределении электронов и квантах рентгеновского излучения при диффузном наносекундном разряде с убегающими электронами в воздухе при атмосферном давлении. В работе [8] описана регистрация мягких (1.2–1.5 keV) рентгеновских квантов с поверхности Ti-катода в процессе импульсно-периодического тлеющего разряда в дейтерии. Однако следует отметить тот факт, что данные об энергетическом распределении рентгеновского излучения из разряда в

этих работах были получены расчетным способом, на основе измерений экспозиционной дозы излучения за фильтром-поглотителем переменной толщины. Кроме того, отсутствуют прямые доказательства о том, из какой среды (газ, элементы конструкции камеры) формируется регистрируемое рентгеновское излучение. Чтобы ответить на эти вопросы, необходимы прямые измерения спектров рентгеновского излучения из камеры газового разряда от металлических поверхностей и различных газов.

Цель данной работы — с помощью энергодисперсионной системы регистрации провести прямые исследования спектров рентгеновского излучения из газоразрядной камеры при низком давлении Хе и V-мишенью при низком давлении O_2 в разряде с убегающими электронами, а также доказать, что энергетическое распределение рентгеновского излучения из газового разряда можно описать в рамках теории интенсивности непрерывного спектра рентгенофлуоресцентного анализа [9].

Для исследования спектров рентгеновского излучения из газового разряда использовалась камера, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

В качестве катода и мишени использовался V в форме круга радиусом 3 см и толщиной 100 μm , которые располагались на одной оси относительно друг друга. Выбор V обусловлен тем, что его характеристические линии лежат в удобном для регистрации диапазоне энергий: $V K_\alpha = 4.94 \text{ keV}$, $V K_\beta = 5.42 \text{ keV}$. Расстояние между катодом и мишенью можно было изменять извне камеры от 1 до 10 см, обеспечивая тем самым регистрацию спектров рентгеновского излучения или с мишени, или с газа. При регистрации рентгеновского излучения из мишени плоскость мишени относительно плоскости линии вылета пучковых электронов с катода повернута таким образом, чтобы угол падения электронного пучка α и угол отбора рентгеновского излучения β были равны и составляли 45° . При регистрации рентгеновского излучения из разряда мишень выводилась из зоны выходного окна. Анодом служила металлическая камера. Расстояние от центра оси пучков до выходного Ве-окна камеры составляло 10 см. Детектор от выходного окна камеры находился на расстоянии 5 см в воздушной атмосфере. Толщина Ве-окна составляла 100 μm . Рабочие газы (Ar, Хе, O_2) запускались в камеру через игольчатый натекаТЕЛЬ. Давление газов в камере поддерживалось на уровне $p \sim 3.5 \cdot 10^{-2} \pm 0.1 \text{ Torr}$. Напряжение изменялось от 1 до 10 кВ, ток — от 0 до 30 мА. Регистрация рентгеновского излучения проводи-

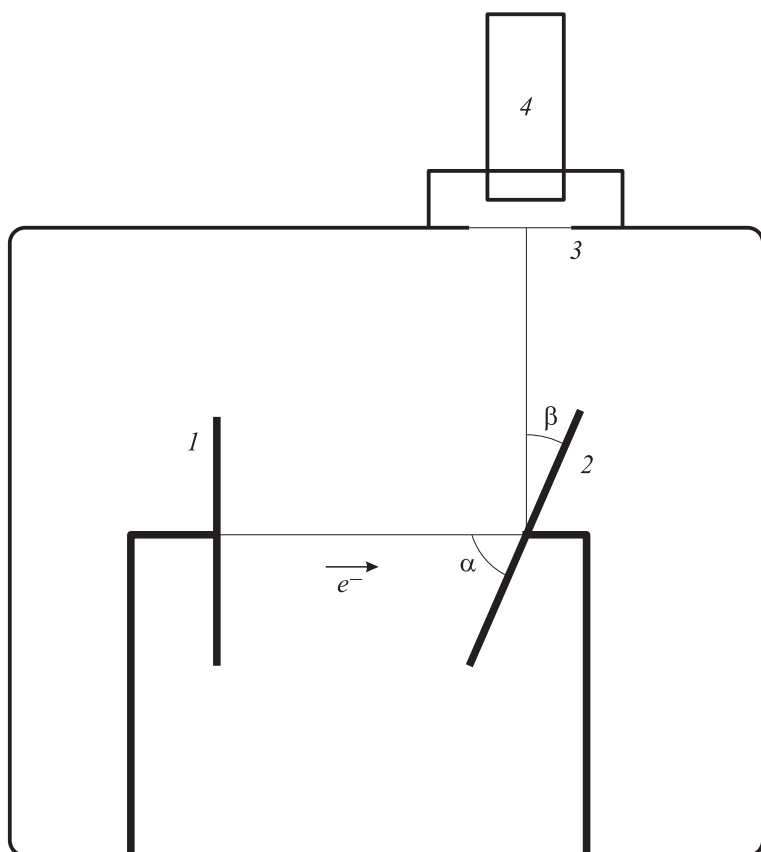


Рис. 1. Принципиальная схема камеры газоразряда для исследования сплошного рентгеновского излучения: 1 — катод, 2 — мишень, 3 — Be-окно, 4 — полупроводниковый детектор; анод — металлическая камера.

лась с помощью полупроводникового энергодисперсионного детектора фирмы Amptek Inc. (Si-Pin Si(Li), энергетическое разрешение для линии $Mn K_{\alpha}$ (5.9 keV) составляет 180 eV). Калибровка детектора проводилась с помощью стандартного γ -источника ^{55}Fe . Толщина входного Be-окна детектора составляла $20 \mu m$. С целью защиты входного окна детектора

от механических повреждений на него был надет защитный Ве-колпачек толщиной $100\ \mu\text{m}$.

На рис. 2, а (кружки) представлен характерный экспериментальный спектр рентгеновского излучения из газового разряда от V-мишени в атмосфере низкого давления O_2 при подводимом напряжении $7.5\ \text{kV}$. В этом спектре 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 $V K_\beta$. При измерении спектра загрузка детектора превышала величину $5 \cdot 10^3\ \text{imp/s}$. Чтобы не перегружать детектор и снизить величину загрузки, устанавливались дополнительные фильтры Al-фольги толщиной $100\ \mu\text{m}$ после выходного окна камеры перед детектором. В результате фильтр существенно ослабил интенсивность рентгеновского излучения, особенно в диапазоне энергий от 3 до $4.5\ \text{keV}$, практически полностью поглотив тормозное излучение левее характеристической K_α -линии V.

В ходе проведения измерений, понижая значение подводимого к разряду напряжения, экспериментально установлен нижний предел по энергии регистрируемого рентгеновского излучения — $3\ \text{keV}$, ниже которого излучение уже не регистрировалось из-за сильного ослабления в Ве и в воздухе.

Теоретическое описание экспериментальных спектров проводилось на основе выражения для интенсивности непрерывного спектра рентгеновского излучения [9] с учетом присутствия флуоресцентных линий анода:

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

где $I(E)$ — интенсивность рентгеновского излучения в зависимости от энергии, $I(E)_{K_\alpha}$ — интенсивность K_α -линии V, $I(E)_{K_\beta}$ — интенсивность K_β -линии V, C — экспериментальная константа, Z — атомный номер материала анода, E_0 — подводимое напряжение, μ_1, μ_2, μ_3 — линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения в воздухе, Ве и Al, l_1, l_2, l_3 — расстояния, которые рентгеновское излучение проходит в воздухе, Ве и Al соответственно.

На рис. 2, а (сплошная линия) представлен рассчитанный спектр V-мишени. Видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных

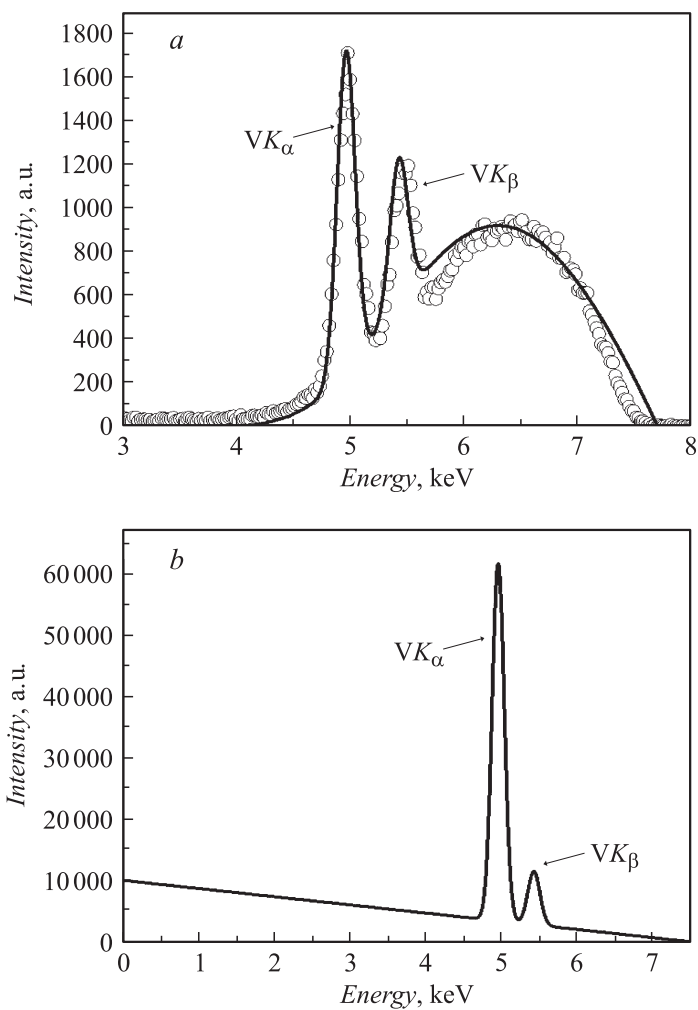


Рис. 2. *a* — экспериментальный и расчетный спектры рентгеновского излучения из газового разряда; *b* — восстановленный первоначальный спектр рентгеновского излучения в газовом разряде (мишень — V, газ — O₂, напряжение 7.5 kV, ток 15 mA, $p = 3.5 \cdot 10^{-2} \pm 0.1$ Torr).

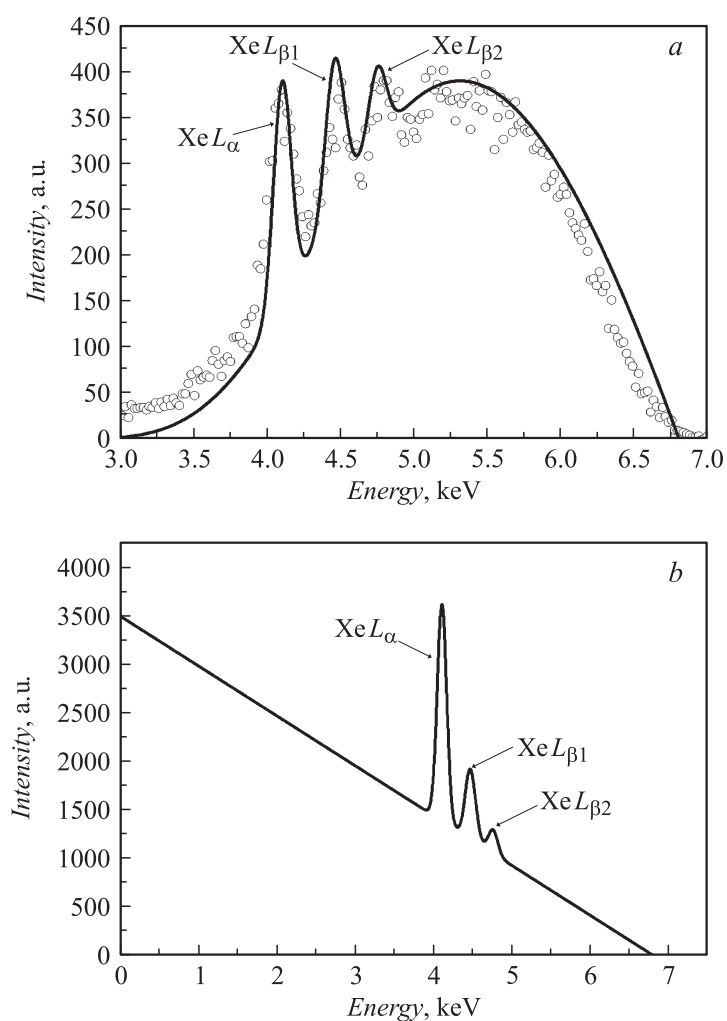


Рис. 3. *a* — экспериментальный (круги) и расчетный (сплошная линия) спектры рентгеновского излучения из газового разряда, газ — Xe, напряжение 6.5 kV, $p = 3.5 \cdot 10^{-2} \pm 0.1$ Torr; *b* — восстановленный первоначальный спектр рентгеновского излучения в газовом разряде, газ — Xe, напряжение 6.5 kV, $p = 3.5 \cdot 10^{-2} \pm 0.1$ Torr.

кривых. Форма флуоресцентной линии описывается гауссовой линией, соотношения между интенсивностями K_{α} - и K_{β} -линий V хорошо известны [10]. После обработки экспериментального спектра, убрав из формулы (1) экспоненту, отвечающую за ослабление, можно восстановить первоначальный спектр, который формируется в разряде (рис. 2, *b*).

Для исследования рентгеновских спектров из газового разряда, вклад в которые дает только газ, заполняющий объем камеры, мы выбрали Хе. Выбор обусловлен тем, что характеристические линии этого газа лежат в удобном для нас диапазоне энергий: Хе $L_{\alpha} = 4.1$ keV, Хе $L_{\beta 1} = 4.41$ keV, Хе $L_{\beta 2} = 4.71$ keV. В этом случае, чтобы исключить вклад мишени в регистрируемый спектр, ее выводили из зоны регистрации. На рис. 3, *a* представлены характерный экспериментальный (круги) и расчетный (сплошная линия) спектры рентгеновского излучения из камеры газового разряда, заполненной Хе. Видны характеристические линии Хе L_{α} , $L_{\beta 1}$, $L_{\beta 2}$. На рис. 3, *b* представлен восстановленный первоначальный спектр рентгеновского излучения внутри камеры газового разряда с убегающими электронами, вычисленный с использованием выражения (1).

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Внутри камеры газового разряда с убегающими электронами существует весьма сильное как тормозное, так и характеристическое рентгеновское излучение, связанное как с типом газа в камере разряда, так и с материалом мишени.

2. Присутствие интенсивных характеристических линий газов, а также материала мишени в спектре рентгеновского излучения газового разряда ставит задачу оценки их влияния на свойства разряда и процессы с участием такого разряда (лазеры, напыление пленок и др.).

Список литературы

- [1] *Mukhortov V.M., Golovko Y.I., Tolmachev G.N., Klevtzov A.N.* // *Ferroelectrics*. 2000. V. 247. N 1–3. P. 75–83.
- [2] *Мухортов В.М., Головки Ю.И., Маматов А.А., Толмачев Г.Н., Бирюков С.В., Масычев С.И.* // *Труды Южного научного центра РАН. Ростов-на-Дону*, 2007. Т. 2. С. 224–264.
- [3] *Ivanov I.G., Latush E.L., Sem M.F.* *Metal Vapour Ion Lasers. Kinetic Processes an Gas Discharges*. England: John Wiley & Sons Ltd., 1996.

- [4] Латуш Е.Л., Михалевский В.С., Сэм М.Ф., Толмачев Г.Н., Хасилев В.Я. // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 24. № 2. С. 81–83.
- [5] Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г., Козырев А.В., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Петин В.К., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шляхтун С.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 1. С. 51–59.
- [6] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 2. С. 111–117.
- [7] Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Шутько Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 22. С. 26–33.
- [8] Липсон А.Г., Русецкий А.С., Карабут А.Б., Майли Дж. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. В. 6. С. 1334–1349.
- [9] Афонин В.П., Комяк Н.И., Николаев В.П., Плотников Р.И. Рентгенофлуоресцентный анализ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 173 с.
- [10] Блохин М.А., Швейцер И.Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, 1982. 375 с.