

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 537.523.4, 537.524.4

Динамика мощности и сопротивления на начальной стадии электрического пробоя воздуха и азота при средних и высоких давлениях

Л.М. Василяк, А.В. Красночуб

Экспериментально исследована начальная стадия статического и импульсного электрического пробоя в наносекундном диапазоне времен для разрядных промежутков длиной 2–10 мм в широком диапазоне давлений 0,2–2 атм. Энерговклад в разряд исследован с применением шунта обратного тока. Проведено сравнение динамики измеренного сопротивления с приближениями Теплера и Ромпе-Вайцеля.

PACS: 52.70.Ds, 52.80.Mg

Ключевые слова: электрический пробой, воздух, азот, сопротивление разряда, энерговклад, время коммутации

Введение

Рост урбанизации и плотности населения требует необходимости повышения эффективности инженерной защиты окружающей среды, а именно, очистки воды, воздуха и утилизации отходов. Большое распространение в этой области получили различные плазменные технологии. Спектр их применения чрезвычайно широк, начиная от обеззараживания воды с помощью различных типов газоразрядных ламп или импульсного разряда [1] до генераторов озона в коронном и барьерном разрядах. Плазменные реакторы с импульсными или незавершенными разрядами используются также для различных плазмо-химических и каталитических процессов, например, для удаления вредных веществ или запахов из воздуха.

В основном на практике используют тот или иной тип импульсного разряда: искровой, барьерный, коронный либо разряд

по поверхности. Основным преимуществом применения импульсного разряда, особенно импульсного разряда с перенапряжением, является то, что в этих условиях происходит наиболее интенсивная наработка активных частиц и свободных радикалов, которые и производят требуемые химические реакции. При использовании технологий очистки воздуха в промышленных масштабах очень важным параметром является не только эффективность проведения технологического процесса, но также количество затраченной энергии и энергетический КПД процесса.

Настоящая работа посвящена исследованию вложения энергии в разряд на начальных стадиях формирования искрового канала, что соответствует условиям работы большинства плазмохимических реакторов, используемых для экологических задач. Цель работы – экспериментальное исследование динамики энерговклада в разрядный промежуток на начальной стадии высоковольтного импульсного разряда в наносекундном диапазоне времени, конкретно, в воздухе и азоте.

Метод исследования

и экспериментальная установка

Для измерения динамики вклада энергии в разрядный промежуток использовался шунт обратного тока (ШОТ). Подробно метод измерения энерговклада описан в работе [2].

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник.

Красночуб Александр Владимирович, научный сотрудник.

Объединенный институт высоких температур (ОИВТ) РАН.

Россия, 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2.

Тел.: +7 (495) 4841810.

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru ; akrasnochub@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2012 г.

© Василяк Л.М., Красночуб А.В., 2013

Для длинных линий ток и напряжение связаны соотношением $U = I \cdot Z$, а прошедшая энергия

$$W = \int I^2(t) Z dt \quad (1)$$

Учтя падающий, прошедший и отраженный импульсы, можно определить энергию, выделившуюся на нагрузке.

ШОТ уже применялся нами для исследования пробоя в длинных промежутках [3] и точность измерения энерговклада была подтверждена калориметрическим методом [2]. Экспериментальная установка позволяла проводить исследования пробоя разрядного промежутка как при медленном повышении напряжения (статический пробой), что необходимо для верификации метода, так и в условиях высоковольтного импульсного разряда наносекундной длительности. Исследования проводились в азоте и воздухе, поскольку для азота проще сравнивать результаты эксперимента с результатами численных моделей, а воздух интересен для практических применений.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, которая состоит из линии зарядки Л1, отводящей линии Л2, разрядной ячейки с искровым промежутком 3, системы откачки и наполнения газом 7 и системы

диагностики. Линии Л1 и Л2 собраны из коаксиальных кабелей РК-50-11 длиной 9 и 13 м, соответственно. Линия зарядки Л1 может быть подключена к источнику постоянного высоковольтного напряжения или к генераторам импульсного напряжения (ГИН). Использовались два различных генератора, а именно, ГИН1 с частотой следования импульсов 2,4 кГц, длительностью импульсов 77 ± 5 нс, временем нарастания 10 ± 2 нс; и ГИН2 – с частотой следования 40 Гц, длительностью 20 ± 2 нс, временем нарастания 3 ± 1 нс; для обоих генераторов амплитуду напряжения импульса можно было варьировать в диапазоне 10–40 кВ.

Цилиндрическая коаксиальная разрядная ячейка была сконструирована таким образом, что позволяла проводить исследования в диапазоне давлений 0,001 – 2 атм. В работе использовались воздух и технически чистый азот. Внешняя обечайка разрядной ячейки ($\varnothing = 60$ мм) соединялась с оплеткой кабелей и окружала кварцевую трубку ($\varnothing = 20$ мм, толщина стенок 1,5 мм). Вдоль оси разрядной ячейки были расположены цилиндрические электроды $\varnothing = 6$ мм, с закруглением $R = 5$ мм. В работе использовались стальные и латунные электроды, расстояние между которыми d можно было изменять в диапазоне 0–10 мм. Для возможности регистрации прошедшего тока через искровой промежуток ко второму электроду присоединялась линия Л2, нагруженная на согласованную нагрузку 50 Ом. Нагрузка собиралась из малоиндуктивных резисторов типа ТВО мощностью 60 Вт.

ШОТ были основными средствами измерения электродинамических характеристик. ШОТ собраны из параллельно соединенных малоиндуктивных резисторов ТВО-0,125 Вт - 3 Ом, которые включены в разрыв оплетки кабелей, как показано на рис. 1. Шунт на линии Л1 находился на расстоянии 5 м от начала линии со стороны генератора. Шунт на линии Л2 располагался на расстоянии 6,7 м от разрядной ячейки. Сигналы с ШОТ подавались на 50-омный вход осциллографа Tektronix TDS640A (полоса 500 МГц). Синхронизация сигналов с ШОТ выполнялась в условиях короткозамкнутого разрядного промежутка, точность синхро-

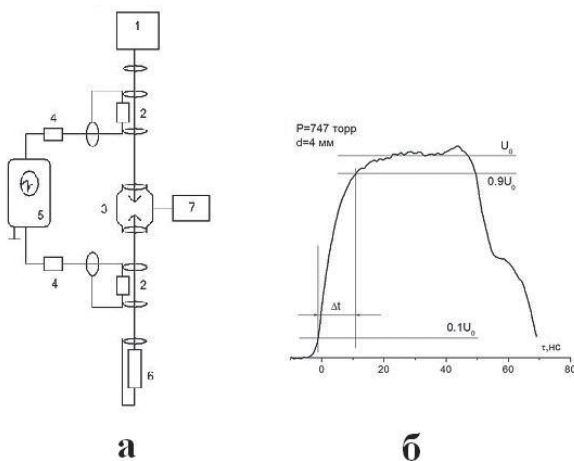


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и типовая осциллограмма с ШОТ (б). Обозначения: 1 – источник постоянного напряжения или импульсный генератор, 2 – шунты обратного тока, 3 – разрядная ячейка, 4 – аттенюаторы 20 Дб, 5 – осциллограф Tektronix TDS640A, 6 – согласованная нагрузка, 7 – система откачки и наполнения газом, л1 и л2 – коаксиальные передающие линии.

низации 0,35 нс. Типовая осциллограмма с ШОТ при давлении азота $p = 747$ Торр и длине межэлектродного промежутка 4 мм показана на рис. 1. На осциллограмме также указана методика определения длительности фронта импульса.

Искровой разряд

в условиях статического пробоя

В условиях искрового самопробоя промежутка были измерены напряжение пробоя и время коммутации в зависимости от давления газа и длины искрового промежутка. Напряжение на разрядном промежутке находилось вычитанием сигналов с шунтов обратного тока в линиях Л1 и Л2 из пробойного напряжения. В исследуемом нами диапазоне pd пробойное напряжение линейно нарастает ростом pd (рис. 2, а), причем следует отметить хорошее совпадение результатов для различных материалов электродов в широком диапазоне изменений параметров ($p = 0.2-2$ атм, $d = 2-8$ мм). Время коммутации определялось как время между точками, в которых напряжение принимает значения $0,1U_0$ и $0,9U_0$, где U_0 – напряжение на полке импульса (рис. 1, б).

В условиях пробоя газа, близких к статическим, время коммутации может быть оценено [4] из выражения:

$$pt \approx \frac{k}{a} \left(\frac{p}{E} \right)^2, \quad (2)$$

выводимого с использованием формулы Ромпе-Вайцеля, где p – давление газа; E – напряженность электрического поля, при

которой происходит пробой; k – коэффициент, зависящий от длительности фронта импульса напряжения, подаваемого на разрядник (обычно 10–20); a – константа, характеризующая газ (для азота $a = 0,8-1$ атм \times см 2 /с \times В 2). В работе [4] на основании предположения о том, что пробой происходит при статическом напряжении, делается заключение, что $t \sim 1/p$. Однако в реальности при сохранении монотонного роста наблюдается отклонение от линейной зависимости (рис. 2, б) из-за того, что напряжение на искровом промежутке меняется в течение пробоя. Различие конфигураций электрического поля при разных межэлектродных расстояниях обуславливает разброс значений времени коммутации при одинаковом давлении газа.

Используемый метод позволяет получить синхронизованные значения разрядного тока и напряжения на искровом промежутке, затем построить экспериментальную кривую для сопротивления разрядного канала и сравнить его с известными способами оценки Теплера [5]:

$$R_T(I, t) = \frac{kd}{\left(\int_0^t Idt \right)} \quad (3)$$

и Ромпе-Вайцеля [6]:

$$R_{RW} = \frac{d\sqrt{p}}{\sqrt{2a \int_0^t I^2 dt}}, \quad (4)$$

где d – межэлектродное расстояние; p – давление газа; I – разрядный ток; k – эмпирическая константа Теплера, которая имеет

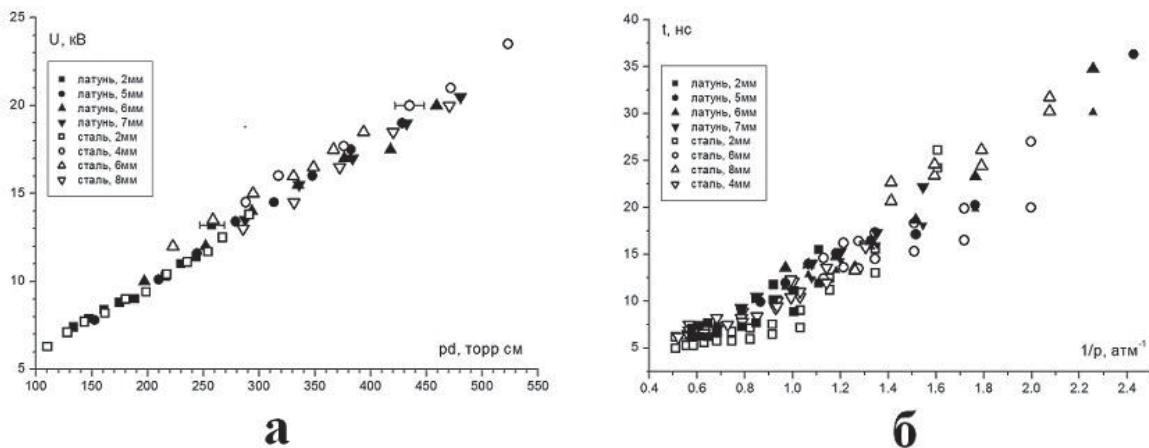


Рис. 2. Характеристики разряда:

а - зависимость пробойного напряжения от pd в азоте при статическом пробое для разных электродов; б - время коммутации разрядного промежутка в зависимости от давления газа для разных электродов и разных длин межэлектродного промежутка.

разброс от $1,5 \cdot 10^{-4}$ В·с/м [5] до $4 \cdot 10^{-3}$ В·с/м [7] и даже до $5 \cdot 10^{-3}$ В·с/м [8]; a – эмпирическая константа Ромпе-Вайцеля $0,8$ (атм·см²)/В²·с [9]. В работе [10] выводится связь между константами Теплера и Ромпе-Вайцеля

$$k = \frac{P}{2aE}, \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля.

Экспериментальные данные динамики спада сопротивления на искровом промежутке и их сравнение с теоретическими оценками показаны на рис. 3. Для формул (3) и (4) использовались экспериментальные значения тока. Хорошее совпадение теории и эксперимента для сопротивления промежутка на начальном этапе достигается при значениях $k = 1,7 \cdot 10^{-3}$ В·с/м и значении $a = 0,5$ (атм·см²)/В²·с, которое было определено из соотношения (5).

Таким образом, обнаруженное отклонение времени коммутации от линейной зависимости от $1/p$ (рис. 2, б) происходит также из-за того, что приближение Ромпе-Вайцеля хуже описывает коммутацию искрового промежутка в условиях самопробоя, приводя к завышенным значениям времени коммутации.

Интересно соотнести динамику мощности и сопротивления разрядного промежутка на начальной стадии пробоя. Динамика мощности и сопротивления определялась по ос-

циллограммам тока и напряжения, сопротивление – отношение напряжения к току, мощность по формуле (1). Результаты для межэлектродного расстояния 6 мм и давления 656 Торр представлены на рис. 4.

Наращение мощности, вкладываемой в разрядный промежуток, происходит на начальном этапе, когда происходит основная ионизация искрового канала. Как видим, максимум мощности достигается через 10 нс после начала пробоя, при этом сопротивление разрядного промежутка к этому времени падает более чем на два порядка. После достижения сопротивления канала менее 100 Ом происходит снижение вкладываемой мощности и резко изменяется динамика спада сопротивления канала, что позволяет говорить об изменении каналов распределения вкладываемой энергии, последовательное сокращения потерь на ионизацию, возбуждение. Всё это, в конечном итоге, приводит за 25 нс к разогреву искрового канала и поддержанию необходимой концентрации электронов.

Импульсный искровой разряд

При исследовании импульсного разряда в условиях перенапряжения нами также были получены данные по динамике мощности искрового канала и его сопротивления (рис. 5) в воздухе, при атмосферном давлении и $d = 2-12$ мм.

Видно, что эффективный энерговклад в

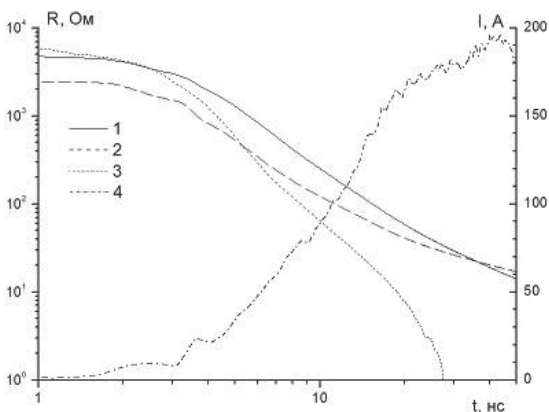


Рис. 3. Динамика сопротивления разрядного промежутка R и осциллограмма тока разряда I в азоте при $p = 656$ Торр и межэлектродном расстоянии 6 мм. Кривая 1 – приближение Теплера, 2 – приближение Ромпе-Вайцеля, 3 – эксперимент, 4 – ток разряда.

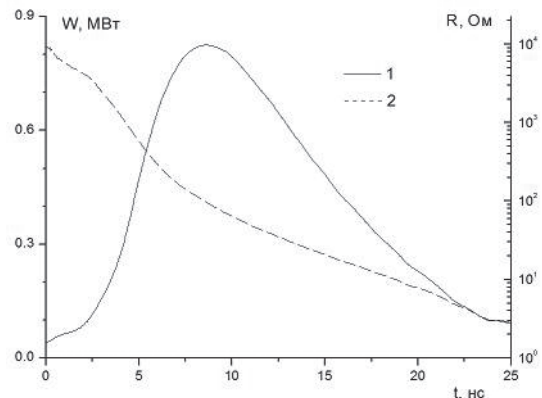


Рис. 4. Характеристики разряда в эксперименте: кривая 1 – динамика мощности, вкладываемой в разряд; 2 – динамика сопротивления разрядного промежутка. Условия те же, что и на рис. 3.

разряд происходит в течение первых 15 нс для ГИН2 и 30 нс для ГИН1, что согласуется с величиной времени около 20 нс в случае статического пробоя. Мощность и энерговыход при импульсном разряде выше, чем при статическом пробое. Энерговыход при пробое на короткозамкнутый электрод выше, чем на электрод с нагрузкой 50 Ом. Для импульса с более коротким фронтом от ГИН2 амплитудная мощность в разряде почти вдвое выше, чем для импульса с более длинным фронтом от ГИН1. Остаточная ионизация газа при импульсно-периодическом режиме, видимо, не оказывает существенного влияния, поскольку частота следования импульсов от ГИН1 в 58 раз выше, чем от ГИН2, и влияние частоты на динамику пробоя не было обнаружено.

Поскольку частота следования импульсов 1–2 кГц используется в разрядных устройствах для очистки воздуха, то из приведенных данных можно оценить эффективность использования электроэнергии в реальном устройстве. Мы провели сравнение измеренного сопротивления с приближением Ромпе-Вайцеля (4), используя экспериментальные значения разрядного тока. Так же, как и в случае статического пробоя, для совпадения величины сопротивления эмпирическую кон-

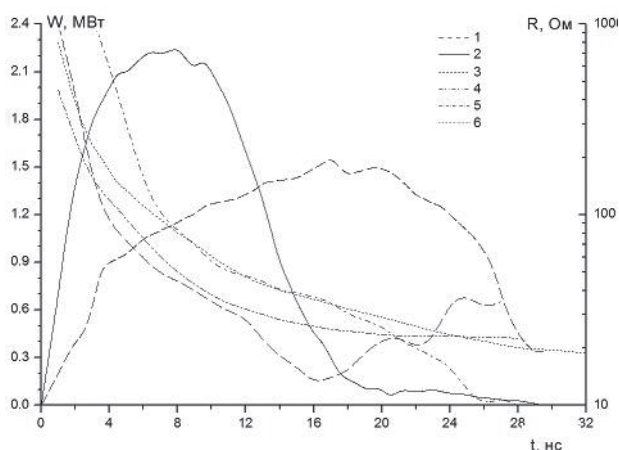


Рис. 5. Характеристики искрового разряда:
 кривые 1 и 2 — мощность, вкладываемая в разряд, для ГИН1 и ГИН2, соответственно;
 кривая 3 — экспериментально полученное сопротивление разряда;
 4 — приближение Ромпе-Вайцеля для ГИН2;
 5 и 6 — для ГИН1.
 Условия — давление воздуха 1 атм;
 межэлектродное расстояние 5 мм;
 положительная полярность, амплитуда импульса 18 кВ.

станту пришлось взять равной $0,35 \text{ (атм}\cdot\text{см}^2)/\text{В}^2\cdot\text{с}$, что существенно меньше величины, приведенной в [9], и также было получено, что приближение Ромпе-Вайцеля завышает время коммутации искрового промежутка.

Заключение

В результате экспериментального исследования искрового разряда в условиях статического и импульсного пробоя при большом перенапряжении получены данные по динамике спада сопротивления и вклада энергии на начальной стадии пробоя в наносекундном диапазоне времен. Проведено сравнение с известными теоретическими приближениями. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Основной энерговыход в разрядный промежуток происходит в течение 15–30 нс при сопротивлениях искрового канала более 10 Ом. Динамика вклада энергии не зависит от материала электродов.

2. В условиях статического самопробоя минимальное время коммутации 6 нс было получено при давлении азота 2 атм. Показано, что время коммутации отклоняется от линейной зависимости от $1/p$.

3. В условиях импульсного пробоя с перенапряжением энерговыход выше, чем при статическом пробое, что объясняется большим вложением в ионизацию, наработку радикалов и возбуждением высоколежащих уровней. Энерговыход при пробое на короткозамкнутый электрод выше, чем на электрод с нагрузкой 50 Ом.

4. Показано, что приближение Теплера лучше описывает время коммутации искрового промежутка. Уточнены значения константы Теплера $= 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ В}\cdot\text{сек}/\text{м}$ и константы Ромпе-Вайцеля $= 0,35\text{--}0,5 \text{ (атм}\cdot\text{см}^2)/\text{В}^2\cdot\text{с}$.

Литература

1. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. Под ред. Карамзинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В. — ИД «Интеллект», 2012.
2. Васильяк Л.М., Красночуб А.В. // Исследовано в России. 2011. <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2011/022.pdf>.
3. Krasnochub A.V., Vasilyak L.M. // Journal Physics D: Applied Physics. 2001. V. 34. P. 1678.
4. Месяц Г.А., Бычков Ю.И., Кремнев В.В. // УФН. 1972. Т.107. Вып. 2. С. 201
5. Toepler M. // Arch.Elektrotechnik. 1927. V. 18. P. 549

6. Weizel W., Rompe R. // Annalen der Physik. 1947. V. 436. Issue 6. P. 285

7. Voldman S.H. Electrostatic Discharge: Physics and Devices. J.Wiley. 2004.

8. Pfeiffer W., Ph.D. dissertation, Tech. Univ. Darmstadt, Darmstadt, Germany, 1970.

9. Месяц Г.А., Коршунов Г.С. // ЖТФ. 1968. Т. 38. № 4. С. 646

10. Rizk F.A.V., Vidal F. // IEEE Trans. 2008. V. 23. No. 1. P. 296

Dynamics of power and resistance at the initial stage of electrical breakdown of air and nitrogen at high and moderate pressures

L.M. Vasilyak and A.V. Krasnochub

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
13/Bd. 2 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru ; akrasnochub@gmail.com

The initial stage of static and pulsed electric breakdown in the nanosecond time scale was investigated experimentally at wide pressure range of 0.2-2 atm and the length of discharge gap of 2-10 mm. Energy input in the discharge was investigated with the use of the shunt of return current. The comparison of the dynamics of the measured resistance with Toepler's and Rompe Weizel's approximations was made.

PACS: 52.70.Ds, 52.80.Mg

Keywords: electrical breakdown, air, nitrogen, discharge resistance, energy deposition, switching time.

Bibliography – 10 references

Received November 15, 2012

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 O₂. 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 O₂ обнаружен механизм послыоного 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 послыоного роста играет формирующееся в разряде с убегающими электронами рентгеновское излуче-

ние. 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