

УДК 537.533.9, 537.525.99

Характеристическое излучение азота при субнаносекундном пробое в сильно неоднородном электрическом поле при положительной полярности электрода

В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, А. Г. Бураченко, М. И. Ломаев

Проведены экспериментальные исследования диффузных разрядов в газах повышенного давления при неоднородном распределении электрического поля в промежутке. Показано, что при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны в азоте и воздухе генерируется характеристическое излучение (К-линия азота). Тормозное рентгеновское излучение из анода зарегистрировано в воздухе атмосферного давления при амплитуде падающей волны импульса напряжения 12 кВ.

PACS: 52.80.-s

Ключевые слова: диффузный разряд, неоднородное электрическое поле, характеристическое рентгеновское излучение, тормозное рентгеновское излучение, убегающие электроны.

Введение

Изучению импульсных объёмных (диффузных) разрядов в различных газах повышенного давления уделялось и уделяется большое внимание [1—3]. В однородном электрическом поле объёмные разряды при высоких давлениях формируются за счет создания в промежутке от дополнительного источника (пучка электронов или коротковолнового излучения) начальных электронов, из которых развиваются электронные лавины [1]. При перекрытии головок лавин до достижения ими критического размера [4] в широком диапазоне экспериментальных условий формируется объёмный разряд. Также хорошо известно о формировании диффузных разрядов при высоких давлениях в неоднородном электрическом поле без использования дополнительного источника для создания начальных электронов (см. коллективную монографию [3] и ссылки в ней). Диффузные разряды формируются как в промежутке с одним

электродом с малым радиусом кривизны и вторым плоским, так и в промежутке с двумя электродами с малыми радиусами кривизны.

В настоящее время достоверно установлено, что при отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны у катода и в промежутке, заполненном воздухом атмосферного давления, генерируются убегающие электроны, которые осуществляют предыонизацию промежутка [5].

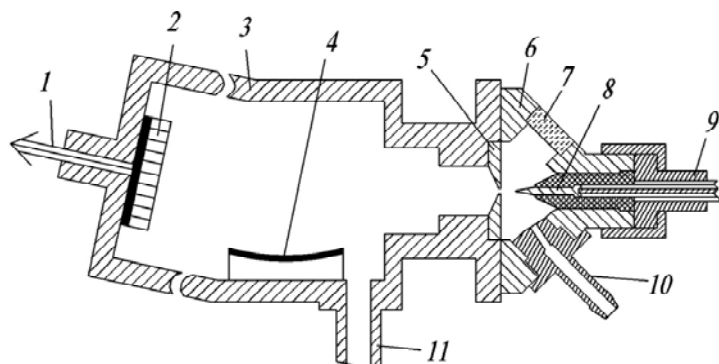
Число убегающих электронов, генерируемых при субнаносекундном пробое импульсами напряжения отрицательной полярности, может составлять 10^{10} и более. В воздухе атмосферного давления за анодом из Al-фольги был зарегистрировано $\approx 6 \times 10^{10}$ электронов, что соответствует при длительности импульса на полувысоте 100 пс амплитуде тока пучка убегающих электронов ≈ 100 А [6]. За счет генерации убегающих электронов в промежутке создаются начальные электроны, число которых достаточно для формирования диффузного разряда в широком диапазоне давлений. В том числе диффузные разряды формируются при числе убегающих электронов на несколько порядков меньше, чем было ранее зарегистрировано за анодной фольгой ($\sim 10^{10}$ электронов [6]). Однако причина формирования диффузных разрядов высокого давления при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны, когда убегающие электроны уходят в анод или в плотную плазму, фронт которой движется к катоду, остаётся пока не выясненной.

Тарасенко Виктор Федотович, зав. лабораторией.
Бакшт Евгений Хаимович, старший научный сотрудник.
Бураченко Александр Геннадьевич, младший научный сотрудник.
Ломаев Михаил Иванович, старший научный сотрудник.
Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.
Тел. (3822) 491-685. E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2016 г.

© Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Бураченко А. Г., Ломаев М. И., 2016

В работе [7] было показано, что в легких газах интенсивность характеристического рентгеновского излучения существенно превышает интенсивность тормозного рентгеновского излучения. Однако экспериментально характеристическое излучение в разряде в легких газах при повышенных давлениях до настоящего времени не было зарегистрировано. Это связано с относительно малой энергией квантов характеристического излучения и его поглощением при увеличении давления газа. Длина волны характеристического излучения в азоте составляет 3,16 нм (энергия кванта 392 эВ), в кислороде — 2,36 нм (энергия кванта 525 эВ) и в углероде — 4,47 нм (энергия кванта 277 эВ) [8]. При атмосферном давлении в воздухе рентгеновские кванты с такой энергией поглощаются на расстоянии несколько миллиметров и их сложно зарегистрировать с помощью рентгеновского спектрометра. Только при переходе к тяжелым газам ксенону [9] и аргону [10] рентгеновское излучение было зарегистрировано экспериментально. Однако эксперименты в [9, 10]



проводились только при низком давлении ($\sim 3,5 \times 10^{-2}$ Торр), и рентгеновское излучение регистрировалось за тонким фильтром (металлической фольгой). Для более легкого газа аргона (длина волны характеристического излучения равнялась 0,42 нм, энергия кванта $\cong 3$ кэВ), также удалось разделить фольгой рентгеновский спектрометр и разрядную камеру.

Цель данной работы — зарегистрировать излучение *K*-линии в азоте в диффузном разряде в неоднородном электрическом поле и повышенном давлении воздуха и азота (≥ 20 Торр).

Экспериментальные установки и методики

Исследования проводились на специально созданной установке, представленной на рис. 1. Из-за малой энергии рентгеновских квантов характеристического излучения окно между входной щелью спектрометра и разрядной камерой нельзя было закрывать фольгой,

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — вывод сигналов с ПЗС-линейки, 2 — ПЗС-линейка, 3 — корпус рентгеновского спектрометра GIS-2, 4 — дифракционная решетка, 5 — входная щель спектрометра, 6 — корпус разрядной камеры, 7 — кварцевое окно, 8 — электрод с малым радиусом кривизны, 9 — ввод для подачи импульсов высокого напряжения от генератора, 10 — патрубок для напуска рабочего газа, 11 — отверстие для откачки газа из спектрометра.

Разрядная камера крепилась к входному фланцу рентгеновского спектрометра GIS-2 [11], в котором использовалась дифракционная решетка (1200 штрихов/мм). С данной решеткой рентгеновское излучение регистрировалось в области от 2 до 20 нм. Ширина входной щели спектрометра составляла 20 или 40 мкм. Разряд зажигался между электродом в виде острого или трубки и дополнительной сеткой, которая устанавливалась на внешней поверхности входной щели спектрометра. Щель спектрометра была образована двумя лезвиями из нержавеющей стали. На разрядный промежуток подавались импульсы напряжения с частотой до 1 кГц от генератора FPG-10, который формировал импульсы напряжения с амплитудой до 12,5 кВ в передающей линии с волновым сопротивлением 50 Ом. Длительность импульса на полувысоте составляла 1 нс с длительностью фронта 0,3 нс (см. рис. 2).

Давление в разрядной камере могло изменяться от 1 атмосферы до 10^{-2} Торр. Спектрометр

без напуска газа в камеру откачивался турбомолекулярным насосом до давления 10^{-5} Торр. При напуске газов в разрядную камеру и давлении газов в спектрометре 10^{-1} Торр и менее давление в камере не должно было превышать 60 Торр. При более высоком давлении насос не справлялся с напуском газа. Данная схема эксперимента с дифференциальной откачкой была выбрана для обеспечения минимального поглощения рентгеновского излучения при его распространении от области разряда до дифракционной решетки и ПЗС-линейки.

Для регистрации рентгеновского излучения с энергией квантов ~ 5 кэВ и более использовались ФЭУ и сцинтиллятор, который устанавливался за тонким экраном из Al фольги, который защищал ФЭУ от электромагнитных наводок. Электрические импульсы измерялись с помощью цифрового осциллографа DPO70604 с полосой пропускания 6 ГГц и шагом дискретизации 40 пс. Интегральное излучение из промежутка фотографировалось цифровым фотоаппаратом Sony A100.

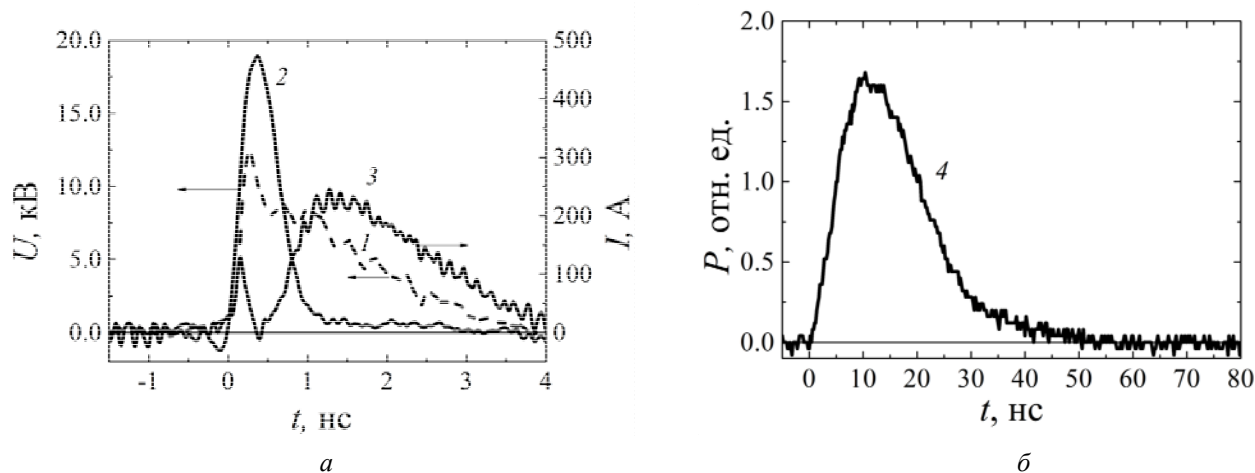


Рис. 2. Экспериментальные данные: а — импульсы падающей волны напряжения в передающей линии генератора FPG-10 (1), а также восстановленные импульсы напряжения на разрядном промежутке (2) и тока через разрядный промежуток (3); б — мощность излучения сцинтиллятора Р под действием тормозного рентгеновского излучения из анода при разряде в атмосферном воздухе (4). Длина межэлектродного зазора $d = 0,5$ мм.

Экспериментальные результаты

При атмосферном давлении воздуха и азота, максимальном напряжении генератора в падающей волне 12,5 кВ с межэлектродным зазором 2 мм формировался диффузный разряд как с одним электродом в виде острия (независимо от его полярности), так с двумя. При уменьшении зазора до 1 и 0,5 мм вначале формировался диффузный разряд, который затем мог переходить в искровой. Рентгеновское излучение при заполнении спектрометра газом от единиц Торр атмосферного давления не регистрировалось. Однако на спектрограмме в нулевом порядке решетки регистрировался интенсивный сигнал, который был обусловлен оптическим излучением из разрядной плазмы. Для того чтобы работать с максимальными выдержками и при этом не повредить ПЗС-линейку в области нулевого порядка, часть ПЗС-линейки, соответствующая нулевому порядку, закрывалась экраном из черной бумаги. Тем не менее, при использовании больших выдержек край излучения нулевого порядка, обусловленный дифракцией на краю экрана, частично перекрывал область первого порядка на ПЗС-линейке. В области длин волн короче 4 нм наблюдалась паразитная засветка ПЗС-линейки (см. рис. 3). Интенсивность оптического излучения зависела от давления в разрядной камере. При малых давлениях (доли Торр) промежутки не пробивался.

Проведенные исследования спектров излучения плазмы разряда при дифференциальной откатке спектрометра позволили впервые зарегистрировать в азоте и воздухе характеристическое излучение К-линии азота (длина волны 3,16 нм). Данное излучение было зарегистрировано при по-

ложительной полярности электрода с малым радиусом кривизны при различных давлениях азота и воздуха (рис. 3). Замена воздуха и азота на гелий и аргон приводила к исчезновению характеристического излучения азота с максимумом на длине волны 3,16 нм. Тормозное излучение азота и воздуха в этих условиях было слабым и нам не удалось его выделить на фоне засветки ПЗС-линейки оптическим излучением из различных газов.

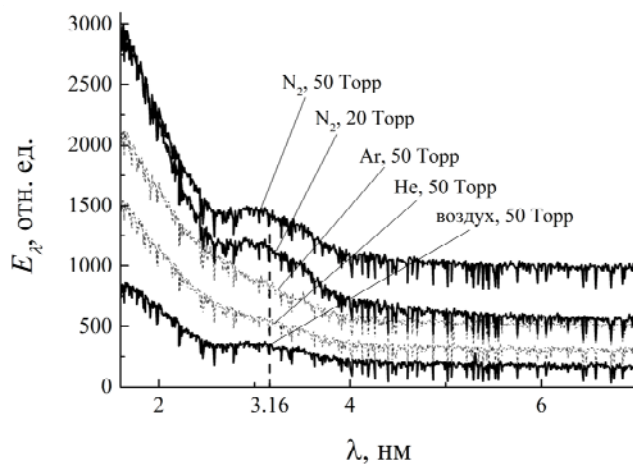


Рис. 3. Рентгенограммы, полученные с помощью рентгеновского спектрометра в различных газах. Частота следования импульсов генератора 1 кГц, амплитуда напряжения в бегущей волне 12,5 кВ. E_λ — спектральная плотность энергии излучения.

При отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны интенсивность тормозного рентгеновского излучения возрастала, и оно было зарегистрировано и при атмосферном давлении воздуха. На рис. 2 показаны импульс напряжения на промежутке, ток через промежуток и

импульс рентгеновского излучения, зарегистрированный с помощью скинциллятора и ФЭУ. Наибольшая амплитуда сигнала с ФЭУ регистрировалась с анодом из вольфрама и уменьшалась при использовании материала анода из металла с меньшим атомным номером. Соответственно, регистрируемое излучение было отнесено к тормозному излучению материала анода.

О механизме формирования диффузного разряда при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны

Полученные в данной работе результаты подтверждают результаты работы [7], где на основе расчета было установлено, что интенсивность характеристического излучения в лёгких газах превышает интенсивность тормозного излучения. Известно, что за счет концентрации электрического поля на катоде с малым радиусом кривизны и на фронте волны ионизации режим убегания для части электронов достигается при сравнительно малых средних напряженностях электрического поля [3, 5, 7]. Предыонизация промежутка убегающими электронами объясняет быстрое продвижение фронта волн ионизации в неоднородном электрическом поле при отрицательной полярности импульсов напряжения, подаваемых на электрод с малым радиусом кривизны. Однако при аноде с малым радиусом кривизны скорость движения фронта волны ионизации [12] и катодонаправленного стримера [13] в широком диапазоне экспериментальных условий обычно больше, чем при использовании острия в качестве катода. Считаем, что характеристическое излучение обеспечивает эффективную фотоионизацию газа перед фронтом волны ионизации (т. е. области локально усиленного поля) при любой полярности импульса напряжения. Как известно, характеристическое рентгеновское излучение, в отличие от направленного потока быстрых электронов, практически изотропно. Это обеспечивает предыонизацию промежутка и в направлении, противоположном от направления движения убегающих электронов. Более того, при положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны область ионизованного газа меньше, соответственно, напряженность электрического поля в этой области больше, чем при отрицательной полярности. Это приводит к большей скорости движения фронта катодонаправленной волны ионизации и катодонаправленного стримера.

Заключение

В данной работе впервые зарегистрировано характеристическое излучение K -линии азота при повышенном давлении воздуха и азота. Данное излучение возникает при выбивании электронов из K -оболочки атомов азота убегающими электронами и, как мы считаем, определяет формирование диффузных разрядов при движении волны ионизации от электрода положительной полярности с малым радиусом кривизны. Можно предположить, что генерация характеристического излучения влияет и на распространение катодонаправленного стримера в импульсных высоковольтных разрядах. Кванты характеристического излучения генерируются с малыми задержками при возбуждении атомов и молекул быстрыми электронами и обеспечивают предыонизацию перед фронтом волны ионизации и стримера.

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной академии наук (проект № 14-29-00052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Наука, 1991.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — Долгoprудный: Интеллект, 2009.
3. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / Ed. by V. F. Tarasenko. — New York, USA: Nova Science Publishers, Inc., 2014.
4. Palmer A. J. // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. No. 3. P. 138.
5. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / Под ред. В. Ф. Тарасенко. — Томск: СТТ, 2015.
6. Костыря И. Д., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 80.
7. Козырев А. В., Тарасенко В. Ф., Бакиит Е. Х., Шутько Ю. В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 22. С. 26.
8. Физические величины / Под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. Пономаренко В. О., Толмачев Г. Н. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 16. С. 34.
10. Пономаренко В. О., Толмачев Г. Н. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 1. С. 49.
11. Спектрограф скользящего падения. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rnd-isan.ru/?page_id=290, свободный. (Дата обращения: 11.04.2016).
12. Тарасенко В. Ф., Белоплотов Д. В., Ломаев М. И. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 10. С. 902.
13. Wang D., Jikaya M., Yoshida S., Katsuki S., Akiyama H. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. Vol. 35. P. 1098.

Characteristic radiation of nitrogen at a positive polarity of the electrode with a small radius of curvature at subnanosecond breakdown in a non-uniform electric field

V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, A. G. Burachenko, and M. I. Lomaev

Institute of High-Current Electronics, SB RAS
2/3 Academichesky av., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Received May 12, 2016

Experimental studies of diffuse discharges at high pressure gases in inhomogeneous electric field distribution in the gap were carried out. At a positive polarity electrode with small radius of curvature, characteristic radiation is generated in nitrogen and air (nitrogen K-line). X-ray bremsstrahlung from the anode was registered in the air at atmospheric pressure at the amplitude of the incident wave voltage pulse equal to 12 kV.

PACS: 52.80.-s

Keywords: diffuse discharge, non-uniform electric field, characteristic X-ray, X-ray bremsstrahlung, runaway electrons.

REFERENCES

1. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of Pulsed Breakdown in Gases* (URO-Press, Ekaterinburg, 1998; Nauka, Moscow, 1991).
2. Yu. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Springer, Berlin, 1991; Intellect, Dolgoprudny, 2009).
3. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges*. Ed. by V. F. Tarasenko (Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, 2014).
4. A. J. Palmer, *Appl. Phys. Lett.* **25** (3), 138 (1974).
5. *Generation of Runaway Electrons and X-ray Radiation in Elevated Pressure Discharges* Ed. by V. F. Tarasenko (STT, Tomsk, 2015) [in Russian].
6. I. D. Kostyrya, D. V. Rybka, and V. F. Tarasenko, *Instr. and Exp. Tech.* **55** (1), 72 (2012).
7. A. V. Kozyrev, V. F. Tarasenko, E. Kh. Baksht, and Yu. V. Shut'ko, *Tech. Phys. Lett.* **37** (11), 1054 (2011).
8. *Physical Quantities*. Ed. by I. S. Grigor'eva and E. Z. Meilihova (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
9. V. O. Ponomarenko and G. N. Tolmachev, *Tech. Phys. Lett.* **38** (8), 747 (2012).
10. V. O. Ponomarenko and G. N. Tolmachev, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*, **1** (1), 49 (2013).
11. Grazing Incidence Spectrometers: http://www.rnd-isan.ru/?page_id=290.
12. V. F. Tarasenko, D. V. Beloplotov, and M. I. Lomaev, *Plasma Physics Reports*, **41** (10), 832 (2015).
13. D. Wang, M. Jikuya, S. Yoshida, et al., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35**, 1098 (2007).