

04;10

Излучательные характеристики электрического разряда, инициируемого сильноточным электронным пучком в атмосфере

© В.И. Олешко, В.М. Лисицын

Томский политехнический университет, Томск
E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2011 г.

Представлены результаты экспериментального исследования спектрально-кинетических характеристик электрического разряда, инициируемого сильноточным электронным пучком в воздухе атмосферного давления. Показано, что в условиях эксперимента формируется объемный (диффузный) разряд, в спектре которого наблюдаются полосы люминесценции второй положительной системы азота. В катодной области разряда формируются яркие катодные пятна, излучающие сплошной спектр наносекундной длительности и более длительное линейчатое излучение атомов, входящих в состав катода.

Электрические („стримерные“) разряды, инициируемые в твердых диэлектриках и полупроводниках электронными пучками, изучались в [1–3]. Исследование таких разрядов стало возможным при использовании сильноточных электронных пучков с плотностью тока $\geq 10 \text{ A/cm}^2$ или высоковольтных импульсных источников, позволяющих получать импульсы напряжения 200–300 kV с крутизной фронта $dU/dt \sim 10^{14} \text{ V/s}$.

Целью данной работы являлось изучение закономерностей и особенностей формирования высоковольтных электрических разрядов в воздухе при атмосферном давлении, отличительной особенностью которых является то обстоятельство, что они инициируются сильноточным электронным пучком (СЭП) наносекундной длительности.

Интерес к разрядам в плотных газах (1–4 atm) при больших перенапряжениях определяется необходимостью выяснения механизмов формирования и распространения объемных разрядов, возможностью создания мощных источников спонтанного и вынужденного излучения,

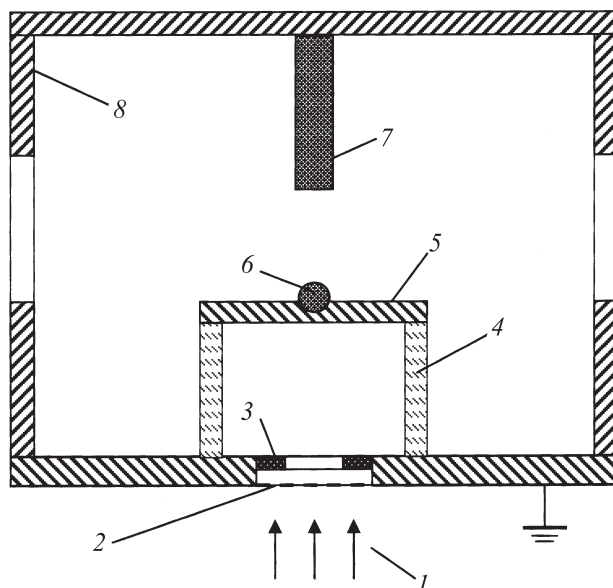


Рис. 1. Схема инициации электрических разрядов в атмосферном воздухе с помощью СЭП: 1 — электронный пучок, 2 — анод, 3 — диафрагма, 4 — диэлектрический держатель (стекло), 5 — электрод „потенциальный“ (Al, $d = 2$ mm), 6 — сфера (Pb, $\varnothing = 3$ mm), 7 — электрод „нулевой“, 8 — корпус.

а также получения электронных пучков субнаносекундной длительности [4–8].

Для формирования импульсов высокого напряжения использовалась схема, подобная [9]. Один из электродов 5 („потенциальный“) представлял собой металлическую пластинку, толщиной $d = 2$ mm (катод), которая закреплялась на диэлектрической подставке 4 и отделяла вакуумный диод от атмосферы (рис. 1). Для локализации электрического поля в углубления, изготовленные в электроде 5, помещались металлические (Pb, Cu) сферы 6 радиусом ~ 1.5 mm. Второй электрод (анод) 7, был выполнен в виде стального цилиндра диаметром 7 mm и соединен с корпусом ускорителя. В отдельных экспериментах анод изготавливался из одной или двух медных проволочек диаметром ~ 1 mm. Расстояние между электродами 6 и 7 изменялось от 5 до 15 mm.

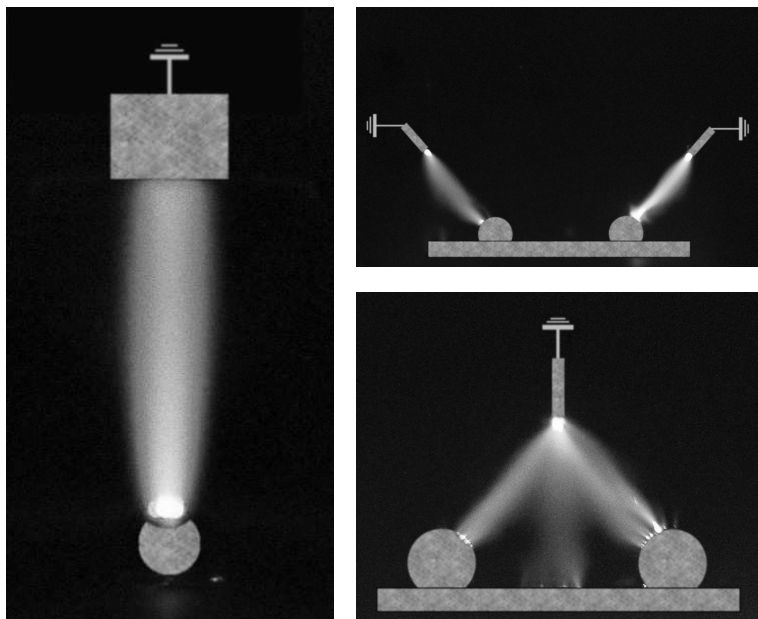


Рис. 2. Свечение объемных разрядов, инициируемых СЭП в атмосферном воздухе при различной геометрии разрядного промежутка.

В процессе исследований изучались два способа формирования электрических разрядов в воздухе: зарядкой электрода 5 сильноточным электронным пучком и инъекцией СЭП в стеклянную пластинку, которая устанавливалась вместо электрода 5. Толщина электрода 5 (и стеклянной пластинки) составляла 2 mm и значительно превышала длину пробега электронного пучка. Средняя энергия электронов в спектре СЭП ~ 250 keV, длительность импульса тока ~ 15 ns. Ток электронного пучка варьировался в диапазоне 150–300 A. Изображение разрядного промежутка проецировалось с помощью линзы на входную щель монохроматора МДР-204. Оптический сигнал поступал на ФЭУ-118 и регистрировался запоминающим осциллографом TDS 2014.

Установлено, что в момент инъекции СЭП в электрод 5 между электродами 6 и 7 формируется импульсный электрический разряд. Внешний вид разрядов, инициируемых электронным пучком в воздухе

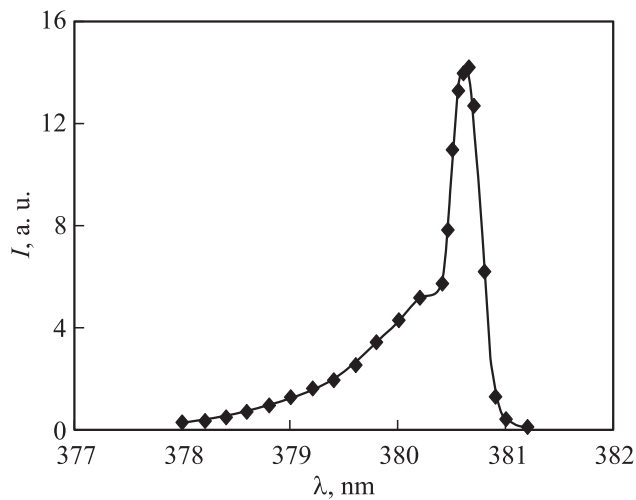


Рис. 3. Форма полосы люминесценции молекул N_2 ($\lambda = 380.49$ nm), возбуждаемой объемным разрядом.

при атмосферном давлении и различной геометрии разрядного промежутка, приведен на рис. 2. Интегральная картина свечения разряда фотографировалась фотоаппаратом ЗЕНИТ с регистрацией на цветную фотопленку FUJI 400 за один импульс возбуждения. Пространственная форма разрядов изменялась с помощью металлических сфер, предварительно устанавливаемых на поверхности катода, а также применением одного или нескольких анодов. Видно (рис. 2), что большую часть межэлектродного промежутка занимает объемное (диффузное) свечение и только вблизи электродов с малым радиусом кривизны формируются яркие катодные и анодные пятна.

Изучение спектральных характеристик объемного разряда показывает, что основной вклад в импульс свечения дает излучение второй положительной системы молекул азота (переходы $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$). Форма одной из полос излучения N_2 ($\lambda = 380.49$ nm) приведена на рис. 3. Длительность импульса свечения, измеренная на полувысоте, для большинства электронно-колебательных переходов молекулы N_2 , составляет $\tau_{1/2} \sim 15$ ns, что сравнимо с временным разрешением импульсного спектрометра.

Измерен спектр свечения из области, прилегающей к катоду. Установлено, что в спектре свечения катодного факела наблюдаются две компоненты — быстрая ($\tau \sim 15$ ns), со сплошным спектром и длинновременная ($\tau \sim 250\text{--}400$ ns), в спектре которой присутствуют линии излучения атомов, входящих в состав сменных катодов (Pb I, $\lambda = 405.78$ nm; Cu I, $\lambda = 510.55$ nm; Ag I, $\lambda = 338.29$ nm).

При втором способе инициирования электрический разряд развивался между инжектированным в стеклянную пластинку отрицательным объемным зарядом электронного пучка и заземленным анодом. Установлено, что амплитудные и спектрально-кинетические характеристики объемного барьерного разряда, развивающегося между тыльной (по отношению к электронному пучку) поверхностью стеклянной пластинки и анодом, не отличаются от оптических характеристик разряда, инициируемого между металлическими электродами 6 и 7.

Известно [10], что для формирования объемного разряда в молекулярных и атомарных газах при высоких давлениях необходимо применять предварительную ионизацию разрядного промежутка от различных источников ионизирующего излучения или использовать наносекундные импульсы напряжения с крутым передним фронтом (единицы или доли наносекунд) [4–8]. Специально проведенные нами эксперименты показали, что тормозное излучение, возникающее при бомбардировке электрода 5 электронным пучком, не оказывает влияния на формирование объемного разряда и его характеристики.

Таким образом, экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе, и анализ литературных данных по формированию электрических разрядов в газах повышенного давления позволяют сделать заключение о том, что в условиях эксперимента реализуется объемный разряд, инициируемый убегаящими электронами. Основным условием формирования объемных разрядов в газах при повышенных давлениях, как известно, является высокая скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке ($dU/dt \geq 10^{14}$ V/s), что приводит к появлению быстрых электронов, осуществляющих предьонизацию разрядного промежутка. Это же условие является необходимым для инициирования стримерных разрядов в твердых телах [11,12] и реализуется при зарядении диэлектриков (или металлической пластинки, закрепленной на изоляторе) сильным электронным пучком наносекундной длительности [2,3].

Весьма важной особенностью объемного разряда, инициируемого с помощью СЭП в атмосферном воздухе, является высокая интенсивность излучения газовых молекул. Сравнение пиковых интенсивностей полосы люминесценции азота ($\lambda = 337.13 \text{ nm}$) при двух способах возбуждения (прямым возбуждением атмосферного воздуха СЭП и объемным разрядом, инициируемым СЭП) показывает, что интенсивность излучения молекул азота при возбуждении объемным разрядом, на два порядка превышает интенсивность катодоллюминесценции N_2 , измеренной вблизи анодной фольги ускорителя электронов. Основной причиной, приводящей к увеличению интенсивности свечения молекул азота при возбуждении объемным разрядом, является наличие низкоэнергетического „хвоста“ в энергетическом спектре убегающих электронов. Это обстоятельство позволяет расширить возможности использования СЭП в аналитической спектроскопии и применять их не только для люминесцентного контроля твердых тел, но и для анализа газовой фазы.

Импульсные объемные разряды, формируемые с помощью СЭП в плотных газах, представляют интерес для исследования быстропротекающих плазмохимических процессов, инициируемых мощными источниками ионизирующего излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00153).

Список литературы

- [1] Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С. и др. // ЖЭТФ. 1976. Т. 70. № 5. С. 1751–1761.
- [2] Лисицын В.М., Олешко В.И. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 1. С. 15–18.
- [3] Олешко В.И. Дис. . . . докт. физ.-мат. наук. Томск, 2009. С. 317.
- [4] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. В. 7. С. 49–82.
- [5] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [6] Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 11. С. 19–26.
- [7] Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В. и др. // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 6. С. 595–596.
- [8] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 1. С. 35–44.

- [9] *Олешко В.И., Datatte G., Malys D., Лисицын В.М.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 20. С. 55–61.
- [10] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [11] *Грибковский В.П.* Полупроводниковые лазеры. Минск: Университетское, 1988. 304 с.
- [12] *Вершинин Ю.Н.* Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 259 с.