

04;12

## **Динамика формирования импульсного поперечного разряда наносекундной длительности с протяженным полым катодом**

© Н.А. Ашурбеков, К.О. Иминов, А.Р. Рамазанов, Г.Ш. Шахсинов

Дагестанский государственный университет, Махачкала  
E-mail: nashurb@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 марта 2014 г.

Выполнены экспериментальные исследования пространственно-временной динамики формирования и развития поперечного наносекундного плазменно-пучкового разряда с протяженным щелевым катодом в инертных газах с использованием высокоскоростной фотокамеры. Установлены особенности и закономерности динамики развития наносекундного разряда с полым катодом в зависимости от внешних условий. Экспериментально показано, что первое регистрируемое оптическое излучение разряда возникает у поверхности катода и формирование разряда начинается одновременно у выхода из щели катода и в промежутке между электродами.

Неравновесная и нестационарная плазма, получаемая с помощью плазменно-пучковых наносекундных разрядов, находит широкое применение при разработке многочисленных типов быстродействующих коммутаторов тока, в импульсных источниках света, предназначенных для метрологии быстропротекающих процессов, в газовых лазерах, в источниках интенсивных электронных потоков и рентгеновского излучения [1–4]. Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию импульсных наносекундных газовых разрядов, многие вопросы, связанные с физикой импульсного пробоя и механизмами формирования высокоэнергетических электронов в разрядной плазме до конца не выяснены и вызывают научные дискуссии и споры [5,6]. В связи с вышеуказанными обстоятельствами несомненный интерес представляет экспериментальное исследование последовательной динамики развития поперечных наносекундных разрядов с протяженным полым катодом,

где в процессе электрического пробоя газа формируются пучки быстрых электронов с энергией до нескольких keV [7–9].

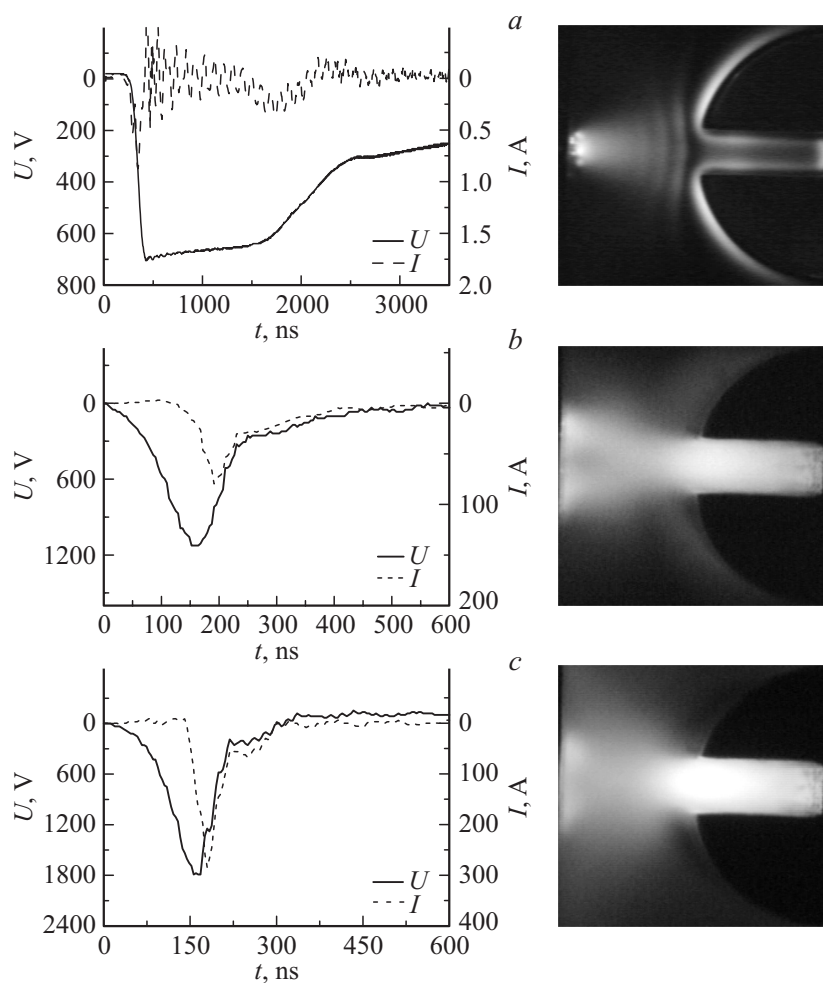
Целью данной работы является экспериментальное исследование пространственно-временной динамики формирования поперечного наносекундного плазменно-пучкового разряда (ППР) с протяженным полым катодом в инертных газах.

Для экспериментального исследования последовательной динамики формирования и развития поперечного наносекундного ППР в инертных газах была использована экспериментальная установка, электрическая часть которой подробно описана в [8]. Разрядная камера представляет собой кварцевую трубку диаметром 3 см, в которую помещена электродная система из двух алюминиевых электродов, расположенных на расстоянии 0.6 см друг от друга. Анод представляет собой плоскую пластину длиной 5 см, шириной 2 см и толщиной 0.5 см. Катод представляет собой цилиндрический стержень длиной 5 см и диаметром 1.2 см, вдоль которого прорезана полость прямоугольной формы шириной 0.2 см и глубиной 0.6 см.

Измерения тока и напряжения горения разряда производились с помощью омического шунта и калиброванного делителя напряжения. При исследовании оптических свойств излучение от разряда подавалось на высокоскоростной ФЭУ типа Н6780-20. Пространственно-временная динамика развития разряда исследовалась с использованием высокоскоростной фотокамеры Prinseton Instruments PI-MAX3 ICCD Camera в режиме покадровой съемки оптических картин разряда через заданные промежутки времени.

Были выполнены экспериментальные исследования электрических, оптических характеристик ППР с протяженным полым катодом и динамики пространственно-временного распределения оптического излучения в полости катода и в разрядном промежутке с наносекундным временным разрешением при давлениях газа (гелия) в разрядной камере 1–100 Торг и амплитудах прикладываемого к электродам напряжения 0.5–5 kV.

На основе обобщения и анализа комплексных экспериментальных исследований было установлено, что в зависимости от значений параметра  $E/N$  и плотности электронов  $n_e$  существуют 3 различные формы функционирования исследованного типа наносекундного разряда, а именно: стратифицированный разряд (*a*), однородный объемный разряд с пучком электронов (*b*) и сильноточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц (*c*) (рис. 1).



**Рис. 1.** Характерные осциллограммы и картины пространственной структуры разряда в гелии (давление газа  $P = 10$  Torr).

При небольших значениях напряжения горения, когда длина свободного пробега ускоренных в области катодного падения потенциала быстрых электронов меньше характерного размера полости (полуширина), в

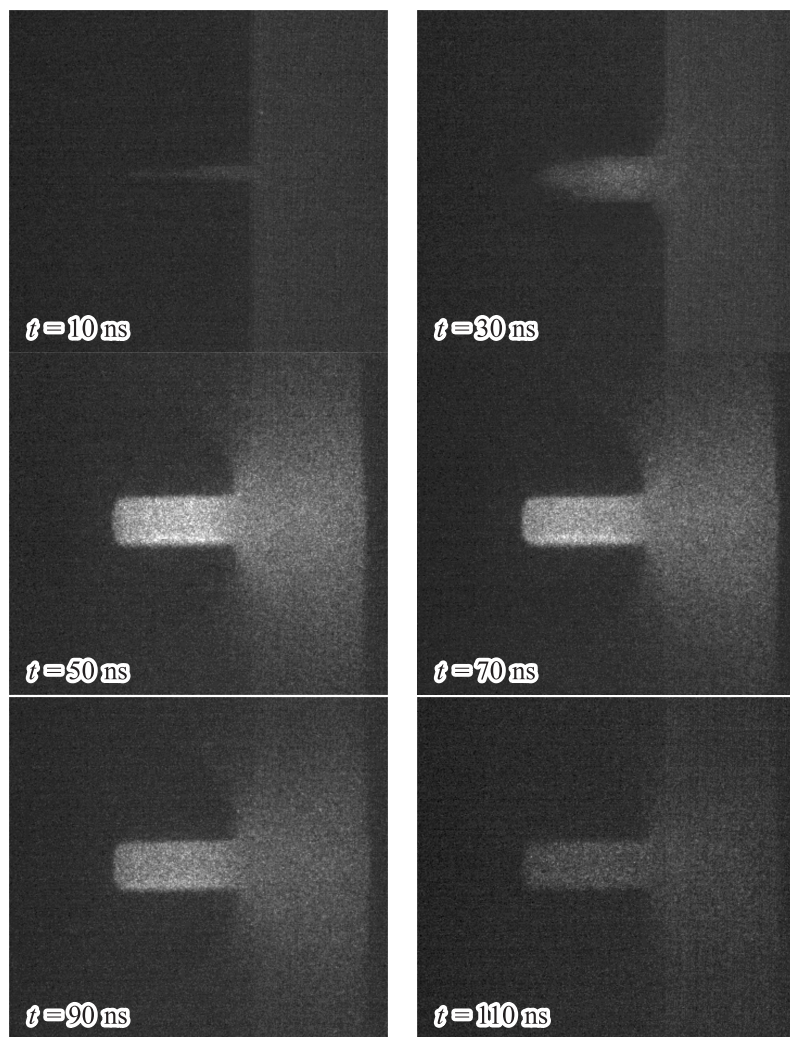
промежутке между электродами формируется периодическая плазменная структура в виде стоячих страт. При этом пробой происходит на плоской вершине импульса напряжения горения, импульс тока разряда имеет колоколообразный вид, а величина разрядного тока составляет несколько сотен миллиампер (рис. 1, *a*). При повышении значений напряжения горения с началом появления ускоренных электронов в разрядном промежутке периодическая плазменная структура исчезает и во всем промежутке формируется однородный объемный разряд. Здесь, как и при высоких значениях напряжения горения, пробой происходит на переднем фронте импульса, и величина тока разряда составляет десятки ампер (рис. 1, *b*).

При высоких значениях напряжения горения в разрядном промежутке за счет нелинейного взаимодействия электрического поля с потоками заряженных частиц формируются области кумуляции электрического поля и заряженных частиц. В этом случае величина тока разряда составляет сотни ампер (рис. 1, *c*). Отметим, что в условиях, соответствующих рис. 1, *b* и *c*, пробой газа происходит в перенапряженном промежутке, где при некоторых условиях величина перенапряжения достигает более 100%.

Детальные исследования показали, что форма импульса оптического излучения разряда примерно повторяет форму импульса разрядного тока. Приведенные на рис. 1 картины пространственного распределения оптического излучения соответствуют временам, при которых интенсивность оптического излучения максимальна.

Для изучения закономерностей формирования разряда и его оптического излучения были выполнены исследования пространственного распределения спонтанного излучения в покадровом режиме на различных стадиях формирования объемного разряда. В качестве примера на рис. 2 приведены характерные закономерности формирования разряда при одном значении давления газа и амплитуды импульсов напряжения. Такие исследования показали, что первое регистрируемое излучение разряда возникает у поверхности катода (рис. 2,  $t = 10$  ns). Через 20 ns излучение появляется у выхода из щели катода и в промежутке между анодом и катодом. В дальнейшем растет интенсивность излучения как в промежутке, так и внутри щели катода, причем внутри щели катода интенсивность излучения существенно выше, чем в промежутке.

Анализ оптических картин интегрального свечения разряда и сопоставление их с осциллограммами тока и оптического излучения



**Рис. 2.** Оптические картины разряда в гелии при давлении газа  $P = 10 \text{ Torr}$  и амплитуде импульсов напряжения  $U_0 = 1.5 \text{ kV}$ .

позволяет сделать следующие выводы относительно динамики развития ППР со щелевым катодом в исследованных условиях. На ста-

дии формирования объемного разряда рост проводимости обусловлен механизмом лавинного размножения эмитированных с поверхности катода электронов. При этом данный механизм работает только в промежутке между электродами и у выхода из щели в катоде, и первое регистрируемое излучение разряда возникает у поверхности катода. Затем, рост величины пространственного заряда в полости катода приводит к перераспределению электрического поля между электродами, и на второй стадии наблюдается пробой между положительным пространственным зарядом и стенками полости катода. Проникновение разряда внутрь полости катода в результате такого механизма приводит к формированию катодного слоя уже внутри полости и ускорению в катодном слое электронов, эмитированных с внутренних поверхностей полости, при этом происходит увеличение величины разрядного тока более чем на порядок.

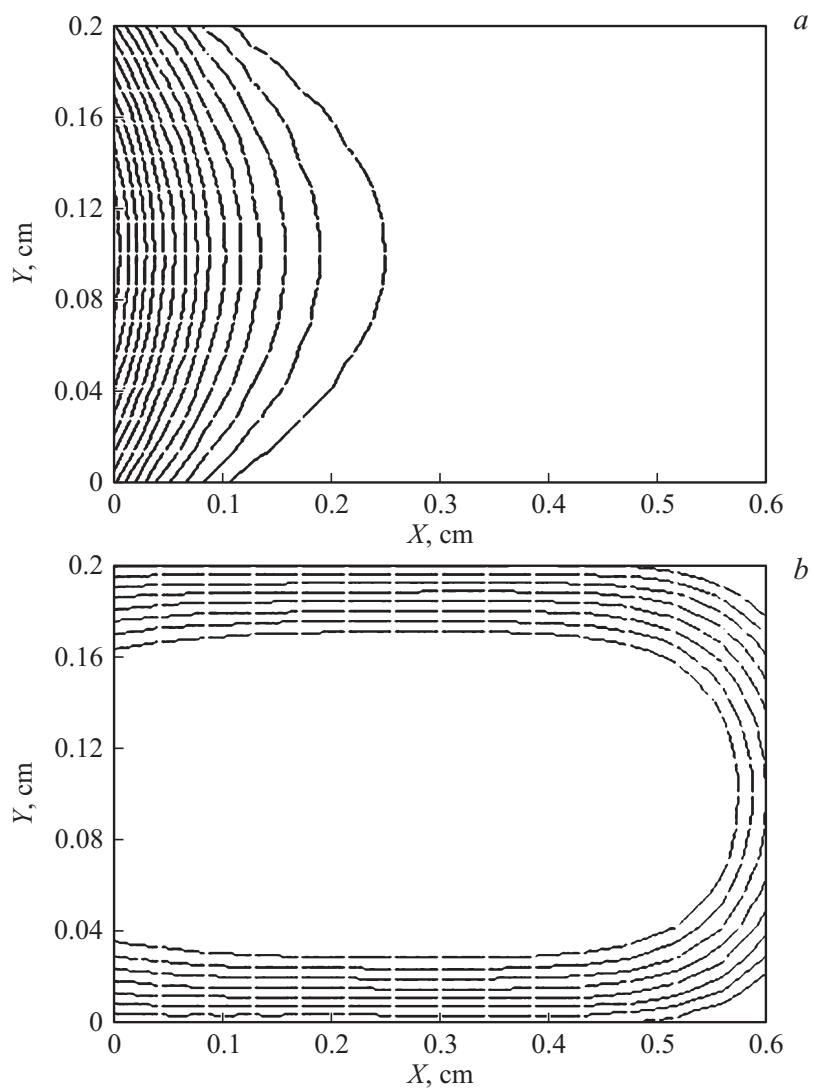
Для подтверждения описанной качественной картины динамики развития ППР были рассчитаны распределения потенциала электрического поля внутри полости катода. В качестве исходного уравнения использовалось уравнение Лапласа для двумерного случая, поскольку вдоль электродов условия можно считать постоянными [10,11]:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial y^2} = -4\pi e n_0 \left[ \exp\left(\frac{e\varphi(x, y)}{kT_e}\right) - \left(1 - \frac{2e\varphi(x, y)}{Mv_0^2}\right)^{-1/2} \right], \quad (1)$$

где  $\varphi(x, y)$  — распределение потенциала в полости катода,  $n_0$  — плотность фоновой (квазистационарной) плазмы,  $M$  — масса ионов,  $v_0$  — скорость ионов. Уравнение (1) решалось численно с использованием метода сеток для дифференциальных уравнений в частных производных в среде MathCad Professional в прямоугольной области  $\Pi = \{0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b\}$  при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \varphi(0, y) = \varphi_0 \\ \varphi(a, y) = \varphi(x, b) = \varphi(x, 0) = 0, \end{cases}$$

где  $a$  — глубина щели,  $b$  — ее ширина,  $\varphi_0$  — начальный потенциал, подаваемый на анод. Характерные результаты расчета представлены на рис. 3 в виде эквипотенциальных линий.



**Рис. 3.** Характерный вид эквипотенциальных линий в полости катода ( $a$  —  $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ,  $b$  —  $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ),  $\varphi_0 = 3$  units CGSE.

Анализ полученных результатов показывает, что при малых концентрациях электронов (менее  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ) проникновение электрического потенциала в полость катода составляет менее 1/3 от ее глубины (рис. 3, *a*). Такой режим характерен для начальных стадий формирования разряда. Далее по мере увеличения плотности электронов потенциал проникает вплоть до основания полости за счет распределения пространственного заряда в полости катода. При плотности электронов выше  $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  практически весь потенциал локализован вдоль внутренних поверхностей полости щелевого катода, т. е. в полости катода формируется катодный слой (рис. 3, *b*). Результаты расчетов на основе качественной модели, приведенной выше, не противоречат результатам экспериментальных исследований динамики развития ППР с протяженным щелевым катодом.

Таким образом, выполненный в данной работе комплекс экспериментальных исследований пространственно-временной динамики формирования и развития наносекундного ППР с протяженным щелевым катодом показывает, что в зависимости от внешних условий могут наблюдаться 3 режима формирования разряда, а именно: стратифицированный разряд, однородный объемный разряд с пучком электронов и сильнооточный плотный разряд с областями кумуляции электрического поля и заряженных частиц. Экспериментально установлено, что первое регистрируемое оптическое излучение разряда возникает у поверхности катода и формирование разряда начинается одновременно у выхода из щели катода и в промежутке между электродами.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части госзадания Минобрнауки России на проведение НИР.

## Список литературы

- [1] Korolev Y.D., Frants O.B., Landl N.V., Shemyakin I.A., Geyman V.G. // IEEE Transaction on Plasma Science. 2013. V. 41. N 8. P. 2087–2096.
- [2] Lieberman M., Lichtenberg A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. New Jersey: Wiley Hoboken, 1994. 598 p.
- [3] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [4] Бохан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 1. С. 88–95.
- [5] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [6] Бабич Л.П. // УФН. 2005. Т. 175. № 10. С. 1069–1091.



- [7] *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 12. С. 47–54.
- [8] *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 8. С. 63–70.
- [9] *Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзев О.В., Кобзева В.С., Шахсинов Г.Ш.* // Вестник ДГУ. Естественные науки. 2011. В. 1. С. 5–13.
- [10] *Чен Ф.* Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987. 398 с.
- [11] *Ашурбеков Н.А., Виричуева В.С., Иминов К.О., Омаров О.А.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2003. Т. 67. № 9. С. 1307–1311.