

03;04

## Особенности широкоапертурного разряда в полом катоде в гелии

© П.А. Бохан, Дм.Э. Закревский

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 19 февраля 2010 г.

Проведены исследования широкоапертурного разряда в полом катоде в гелии, в котором обеспечены условия для доминирования фотоэмиссии электронов с холодного катода. Благодаря этому в квазистационарном режиме получены токи, на порядок превышающие токи аномального разряда. В диапазоне давлений 5–15 Торг установлена независимость ВАХ от давления газа, которая является отличительной особенностью и следствием фотоэмиссионного характера разряда с электронным пучком.

В последнее время возрос интерес к газовым разрядам, в которых преобладающим видом эмиссии электронов с холодных катодов является фотоэмиссия [1–6]. Общей их особенностью является такой режим горения, при котором ионы ввиду их инерционности не имеют достаточного времени для достижения катода, тем самым блокируется эмиссия под действием тяжелых частиц. Этим же механизмом обеспечивается преобладание фотоэмиссии при пробое газоразрядных промежутков при средних давлениях и временах развития разряда менее  $10^{-6}$  с [7]. В непрерывном режиме преобладание фотоэмиссии достигнуто в так называемом широкоапертурном разряде (WAD) [6] за счет большого объема излучающей плазмы.

Одной из отличительных особенностей WAD является резкое отличие их ВАХ от ВАХ аномальных разрядов (AD), в которых преобладающим механизмом эмиссии электронов является эмиссия под действием тяжелых частиц [8,9]. Для AD вплоть до напряжения горения  $U = 10$  кВ они имеют квадратичную зависимость от давления газа  $p$ :

$$j = Ap^2U^x, \quad (1)$$

где  $j$  — плотность тока,  $U$  — катодное падение потенциала,  $A$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от рода газа. Показатель  $x$

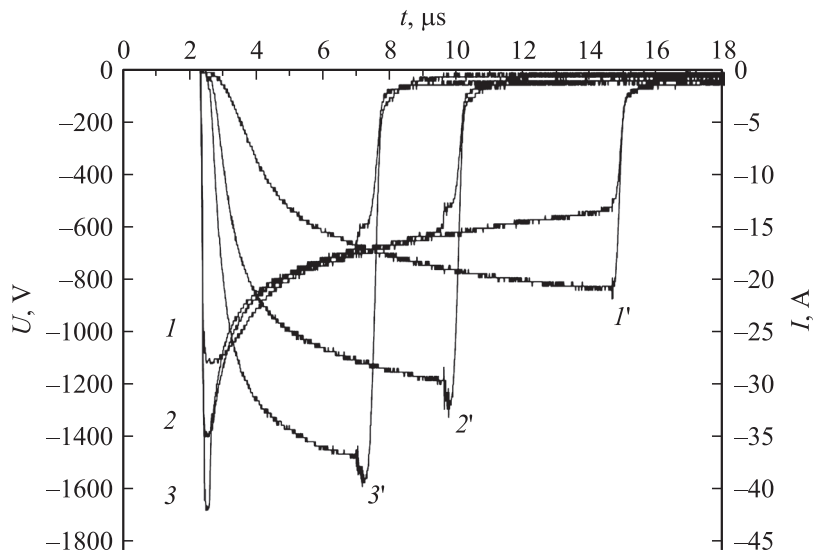
принимает значения в диапазоне  $x = 2.5-3$ . Для гелия в [8] приводится соотношение

$$j = 2.5 \cdot 10^{-12} \cdot p^2 U^3, \quad (2)$$

в котором размерности величин следующие:  $j$  [A/cm<sup>2</sup>],  $p$  [Торр],  $U$  [V]. В WAD в тщательно подготовленных разрядных кюветах в диапазоне напряжений 300–1000 V  $j$  практически не зависит от  $U$  [6], в то время как  $j \sim p^3$  [10]. Как правило, при высоком  $U$  измерение ВАХ проводится при малом  $p$  (и соответственно  $j$  мало) во избежание большого тепловыделения на катоде и развития неустойчивостей. В этих условиях с высокой эффективностью генерируется электронный пучок, энергия которого либо рассеивается на аноде при малом межэлектродном расстоянии, либо в протяженном объеме, если пучок используется, например, для возбуждения лазеров. В силу этого обстоятельства эффективность фотоподсветки незначительна даже в WAD [11].

В данной работе проведено исследование свойств широкоапертурного разряда в гелии при условиях, когда энергия электронного пучка рассеивается в рабочем газе, излучение которого в значительной степени перехватывается катодом. Разрядная кювета состояла из катода в форме стакана из нержавеющей стали диаметром 5.6 см, длиной 7 см и общей площадью 148 см<sup>2</sup>. Расстояние между анодом и открытой стороной катода составляло 1 см. Использованная геометрия разряда (типичная по форме для разрядов с полым катодом с большим диаметром), с одной стороны, позволяет в импульсном разряде поддерживать условия, при которых ВУФ — резонансное излучение разряда в значительной степени перехватывается катодом. С другой стороны, ток ионов на катод может быть сильно ослаблен из-за короткой длительности импульса. Таким образом, в данном эксперименте могут быть объединены условия для реализации всех разрядов с преобладанием фотоэмиссии.

Исследования проведены с гелием чистотой М4, дополнительно очищаемым ловушкой из активированного угля, охлаждаемой жидким азотом, до уровня чистоты, при которой присутствие N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> не обнаруживается спектральными методами. Осуществлялось три режима питания: „а“ — импульсное — при разряде пиковой емкости  $C_p$  при ее равенстве с накопительной емкостью  $C$ , разряжаемой через тиратрон; „b“ — квазистационарное — от транзисторного генератора прямоугольных импульсов с регулируемой длительностью и с использованием балластного сопротивления  $R$ ; „с“ — совместное питание от обоих генераторов с регулируемой задержкой между ними  $\tau_d$ .



**Рис. 1.** Типичные осциллограммы напряжения на разрядном промежутке  $U$  (1, 2, 3), тока  $I$  ( $I'$ ,  $2'$ ,  $3'$ ) через него (режим питания „b“,  $p = 7 \text{ Torr}$ : 1,  $I'$  —  $U = 1120 \text{ V}$ , 2,  $2'$  —  $U = 1400 \text{ V}$ , 3,  $3'$  —  $U = 1680 \text{ V}$ ).

На рис. 1 приведены усредненные по 100 импульсам осциллограммы развития разряда при питании разрядного промежутка прямоугольными импульсами (режим питания „b“) и  $R = 27 \Omega$ . При каждом начальном напряжении длительность импульса увеличивалась до достижения неустойчивости (дугообразования) в конце импульса, что выражалось в возникновении бросков тока и напряжения. Из рис. 1 видно, что квазистационарная стадия горения разряда не достигается, несмотря на то, что основное падение напряжения происходит на балластном сопротивлении. При  $R > 100 \Omega$  квазистационарный режим реализуется, однако получение больших токов в этом случае затруднительно. Поэтому ВАХ квазистационарного разряда снималась в режиме питания „c“ — при питании двойными импульсами с регулируемой задержкой между ними. Первый импульс, пример осциллограммы которого приведен на рис. 2, а, подавался от генератора с пиковой емкостью ( $C_p = C = 14.1 \text{ nF}$ ). Как и при питании прямоугольными импульсами,

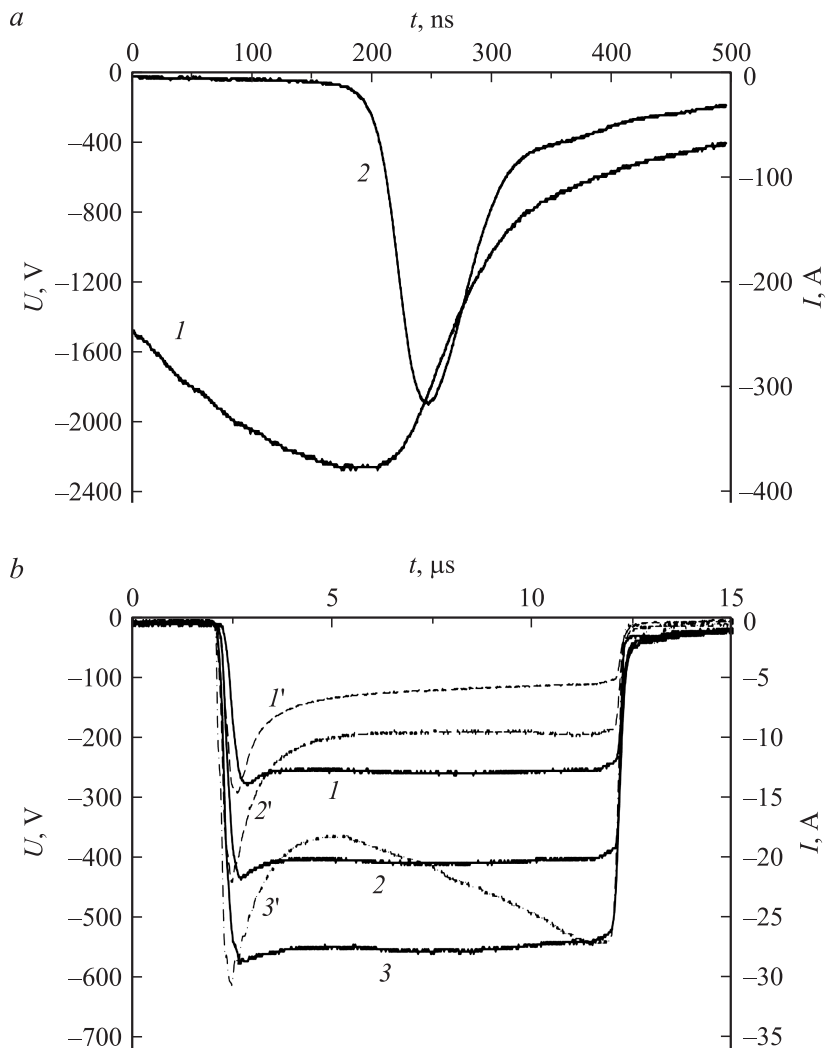
ВАХ разряда на спаде импульса — ток  $I$ ; ток АД  $I_{AD}$  (расчет по [8]); отношение  $I/I_{AD}$  (условия рис. 2,  $a$ , за  $t = 0$  принято время пика тока)

$t$ , ns	$U$ , V	$I$ , A	$I_{AD}$ , A	$I/I_{AD}$
0	1800	307	58.3	5.4
15	1560	273	38	7.5
30	1260	207	20	10.6
45	1080	146	12.6	13.1
60	940	105	8.3	16.3
90	720	68	3.73	18.2
125	620	62	2.38	25.2
195	450	40.9	0.91	44.53
320	310	27	0.3	90.6
500	200	15.5	0.08	193.7

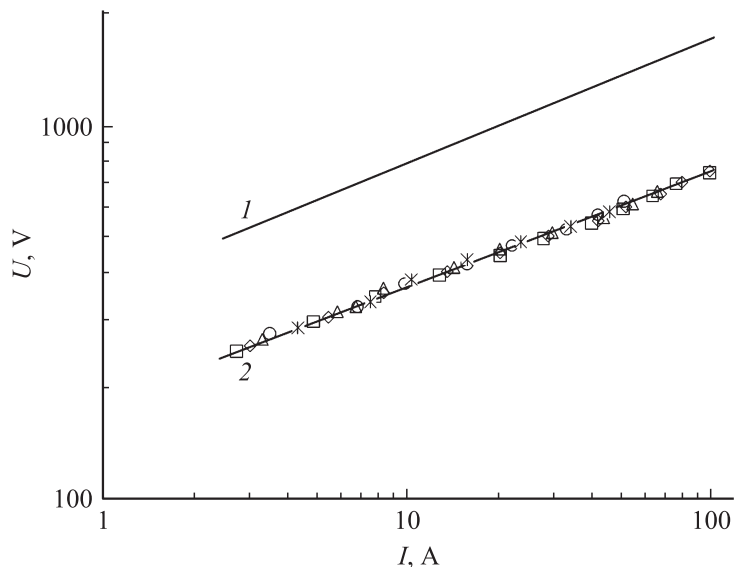
наблюдается значительная задержка в развитии разряда. Тем не менее он устойчив во всех фазах до амплитуды тока  $I \sim 600\text{--}800$  А, которая зависела от давления газа. В таблице приведены величины тока  $I$  от времени (за 0 принято время пика тока). Из рис. 2,  $a$  и таблицы видно, что разрядный промежуток сохраняет проводимость в течение длительного времени после прохождения пика тока, причем ток разряда при  $U < 300$  В на два порядка выше тока аномального разряда  $I_{AD}$ , рассчитанного по соотношению (2). Значительное превышение тока  $I$  над  $I_{AD}$  реализуется и в его пике.

При наложении на промежуток второго прямоугольного импульса питания с задержкой  $\tau_d < 1$  ms относительно первого разряд развивается значительно быстрее, чем при питании только прямоугольными импульсами. При дальнейшем уменьшении задержки (десятки микросекунд) импульс тока становится близким к прямоугольному. При  $\tau_d < 15$   $\mu$ s ток в начале импульса может быть значительно выше, чем в конце. Квазистационарная фаза горения разряда в этом случае устанавливается через несколько микросекунд от начала импульса напряжения.

При фиксированной задержке (например,  $\tau_d \sim 10$   $\mu$ s, рис. 2,  $b$ ) по мере увеличения напряжения форма импульса тока меняется от падающей в течение импульса до возрастающей в конце импульса ( $R$  отсутствует). Аналогичного вида осциллограммы наблюдаются при использовании балластного сопротивления, которое включалось для



**Рис. 2.** Типичные осциллограммы тока  $I$  через разрядный промежуток при разных  $U$  (режим питания „с“,  $\tau_d = 10 \mu$ s).  $a$  — первый импульс: 1 —  $U$ ; 2 —  $I$ ;  $p = 5.2$  Тогг,  $b$  — второй импульс:  $U$  (1, 2, 3),  $I$  (1', 2', 3'),  $p = 7.9$  Тогг.



**Рис. 3.** ВАХ разряда ( $1$  — режим питания „с“,  $\tau_d = 10 \mu\text{s}$ ;  $\square$  —  $p = 6.2 \text{ Torr}$ ,  $\diamond$  —  $p = 7.3 \text{ Torr}$ ,  $\Delta$  —  $p = 8.9 \text{ Torr}$ ,  $\circ$  —  $p = 10.3 \text{ Torr}$ ,  $\times$  —  $p = 12.2 \text{ Torr}$ ;  $2$  — аппроксимация для АД по [8] для  $p = 7.3 \text{ Torr}$ ).

защиты транзисторного генератора при дугообразовании при больших токах. В дальнейшем при измерении ВАХ за величину квазистационарного тока принималось его значение на плоской части осциллограммы, сохраняющейся до конца импульса ( $15 \mu\text{s}$  в условиях эксперимента или до возникновения неустойчивости).

На рис. 3 приведены примеры ВАХ разряда при  $R = 10 \Omega$  для разных давлений гелия. В диапазоне его изменения от 5 до 15 Torr все точки ложатся (в пределах ошибок измерения) на одну прямую, представленную в логарифмическом масштабе. Следовательно, ВАХ такого разряда кардинально отличается от ВАХ других типов тлеющих разрядов, в которых реализуются зависимости (1) и (2) или близкие к ним. В исследуемом же случае ВАХ не зависит от давления и имеет вид:

$$I = 3.87 \cdot 10^{-8} \cdot U^{3.27} \quad \text{или} \quad j = 2.62 \cdot 10^{-10} \cdot U^{3.27}, \quad (3)$$

где размерности величин следующие:  $I$  [A],  $j$  [A/cm<sup>2</sup>],  $U$  [V].

В результате в области малых давлений плотность тока намного выше, чем в АД. Так, например, при  $U = 750 \text{ V}$  и  $p = 6.2 \text{ Torr}$   $j$  в  $\sim 16$  раз выше, чем по соотношению (2) для аномального разряда.

Кратко обсудим механизм горения реализованного разряда. Обратимся к осциллограмме режима питания „а“ (рис. 2, а). Для этого случая постоянная роста тока ( $\lambda$  в обозначениях [7]) составляет  $\lambda = 5.3 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ , что, согласно [7], соответствует почти 100%-ной доле фотоэмиссии в токе с катода. С другой стороны, согласно расчетам по модели из работы [12], к моменту пика тока длина области катодного падения потенциала составляет  $\sim 0.2 \text{ mm}$ . В этих условиях практически со 100%-ной эффективностью генерируется электронный пучок, доля  $\delta \sim 18\%$  энергии которого тратится на возбуждение резонансного состояния и генерацию ВУФ-фотонов [12]. Ко времени окончания основной фазы тока ( $\sim 100 \text{ ns}$  после пика) это составит  $N_{ph} \sim 1.64 \cdot 10^{15}$  фотонов. Попадая на катод, они приведут к эмиссии электронов с количеством электричества  $q = eN_{ph}\gamma_{ph}R_s = 3.9 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ , где  $e$  — заряд электрона,  $\gamma_{ph} = 0.3$  — коэффициент фотоэмиссии для резонансного излучения гелия в разряде [11],  $R_s$  — геометрический перехват излучения катодом. К этому времени количество электричества, перешедшего из пиковой емкости в разрядную цепь, составляет  $q = C_p\Delta U = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ , где  $\Delta U$  — изменение напряжения на пиковой емкости в течение импульса питания. Это означает, что за счет фотоэмиссии, вызванной излучением только с резонансного уровня, может быть эмитировано значительно больше электронов, чем потребляет разрядная цепь, что и приводит к многократному превышению тока в финальной стадии разряда по сравнению с током АД. Ток в этих условиях обеспечивается эмиссией электронов от фотонов, пришедших с приосевых частей разряда.

В квазистационарной стадии скорость образования резонансных фотонов составляет

$$n_{ph} = \delta UI / e\varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon = 21.2 \text{ eV}$  — энергия фотона. Определяемое реабсорбцией время их прихода к катоду с осевых областей разряда, согласно соотношениям из [7,13], составляет  $\tau = \sqrt{R}/1.1 \cdot 10^6 \text{ s}$  или  $\sim 1.5 \mu\text{s}$ . Следовательно, все резонансные фотоны при длительности импульса более  $3 \mu\text{s}$  попадают на катод. Они обеспечивают ток эмиссии  $I = en_{ph}\gamma_{ph}R_s \approx 96 \text{ A}$  при  $U = 750 \text{ V}$ . Согласно графикам рис. 3, ток разряда составляет  $100 \text{ A}$ .

Таким образом, и в квазистационарной фазе разряд является фотоэмиссионным. Фотоэмиссионный механизм также обеспечивает и независимость ВАХ от давления гелия. В полом катоде быстрые электроны осциллируют внутри катода до полного торможения. Вследствие этого вне зависимости от давления они приводят к генерации одинакового количества фотонов, определяемого соотношением (4), обеспечивая независимость ВАХ от  $p$ .

Таким образом, в гелии в широкоапертурном разряде типа полый катод обеспечиваются условия для доминирования фотоэмиссии. В квазистационарном режиме это приводит к получению токов, более чем на порядок превышающих ток аномального разряда. Такие условия благоприятны для ряда применений, например для накачки лазеров. Главной отличительной особенностью фотоэмиссионного разряда является независимость его ВАХ от давления гелия в диапазоне 5–15 Торр.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 09-08-00232 и интеграционным проектом СО РАН № 91.

## Список литературы

- [1] Баранов И.Я. // Физика плазмы, 2007. Т. 33. № 1. С. 59.
- [2] Ganter R., Ouyng J., Callegari Th. et al. // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. N 3. P. 992.
- [3] Nakamura K., Ando M., Sugai H. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2003. V. 206B. P. 798.
- [4] Radu I., Bartnikas R., Wertimer M.R. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 5994.
- [5] Ашурбеков Н.А., Иминов К.О., Кобзева В.С., Кобзев О.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 12. С. 47.
- [6] Belskaya E.V., Bokhan P.A., Zakrevsky Dm.E. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 091503.
- [7] Phelps A.V. // Phys. Rev. 1960. V. 117. N 3. P. 619.
- [8] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 138.
- [9] Phelps A.V. // Plasma Sources. Sci. Technol. 2001. V. 10. N 2. P. 329.
- [10] Бохан П.А., Закревский Дм.Э. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 19. С. 87.
- [11] Бохан П.А., Закревский Дм.Э. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 1. С. 109.
- [12] Бельская Е.В., Бохан П.А., Закревский Дм.Э. // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. С. 823.
- [13] Holstein T. // Phys. Rev. A. 1951. V. 83. N 6. P. 1159.