

03;04

## Газовый разряд в аргоне и азоте при криогенной температуре в тонких зазорах

© А.Н. Лодыгин, Л.М. Порцель, Ю.А. Астров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail:yuri.astrov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 декабря 2007 г.

Обнаружено, что охлаждение микроразрядных устройств, заполненных аргонном, а также азотом, до криогенных ( $T \sim 100$  К) температур оказывает заметное влияние на потенциал зажигания разрядов в них. При разряде в азоте в системе с латунным катодом эффект можно объяснить уменьшением коэффициента вторичной электронной эмиссии, тогда как в случае аргона влияние охлаждения имеет более сложный характер. Полученные результаты представляют интерес при разработке криогенных микроразрядных устройств.

PACS: 51.50.+v, 52.80.Dy

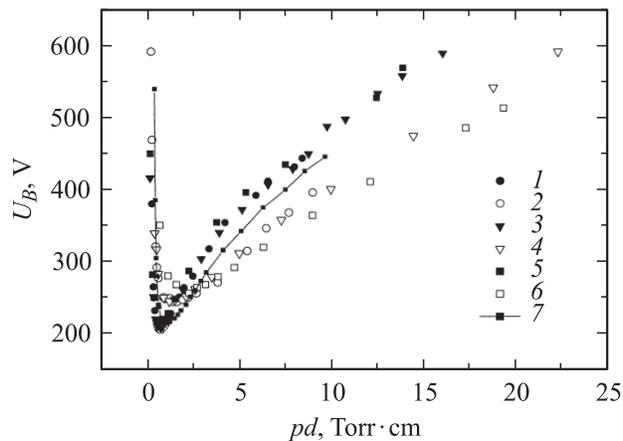
Газовые разряды при относительно малых межэлектродных расстояниях  $d \sim 0.1-1.0$  mm (микроразряды) имеют ряд важных для практических приложений свойств [1,2]. Наиболее известный пример применения микроразрядов — плазменные панели отображения информации. Продемонстрирована также возможность их использования в задачах контроля загрязнения окружающей среды, для целей обеззараживания биологических тканей и в ряде других задач (см. [2]).

Микроразрядные устройства „полупроводник–газоразрядный промежуток“ (ПП–ГРП) применяются для высокоскоростного преобразования инфракрасных (ИК) изображений [3,4]. Для обеспечения чувствительности прибора к ИК-излучению структура ПП–ГРП обычно охлаждается до температуры  $T = 80-100$  К. Следует подчеркнуть, что для малых длин ГРП  $d = 50-100$   $\mu$ m наблюдается режим устойчивого объемного горения разряда в системе ПП–ГРП, что позволяет осуществлять линейный режим преобразования оптических изображений при изменении тока системы в широких пределах [5]. В процессе изучения криогенных устройств ПП–ГРП обнаружилось также, что

увеличение  $d$  приводит к сокращению области устойчивости, что может привести к дестабилизации системы уже при относительно малых токах. Так, например, для  $d = 1.0 \text{ mm}$  однородное состояние заполненной азотом криогенной системы может стать неустойчивым уже при плотности тока  $j \sim 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  [6]. Развитие неустойчивостей в этом случае порождает многообразие диссипативных структур тока, что позволяет рассматривать такие системы в качестве новых электронных самоорганизующихся сред.

Понимание физики процессов в криогенных микроразрядных системах, которые определяют их свойства (в частности, условия образования пространственно-временных диссипативных структур тока), затруднено ввиду малоизученности этих систем. Целью данной работы является изучение влияния охлаждения на величину пробивного напряжения для двух газов: азота и аргона. Выбор газов и толщины газоразрядного промежутка определялся типичными условиями работы криогенных систем ПП–ГРП. В качестве катода использовался латунный электрод, что дало возможность сравнения результатов с имеющимися литературными данными, относящимися к разрядам при комнатной температуре.

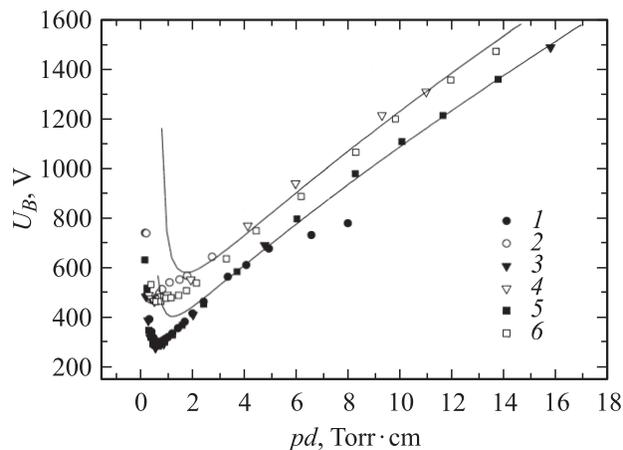
Сравнительные исследования микроразрядной системы выполнялись при комнатной и криогенной температурах в газоразрядной камере азотного криостата. Катод разрядной системы изготавливался в форме диска диаметром 30 mm и толщиной 1 mm и устанавливался на хладопровод криостата. В качестве анода использовалась стеклянная пластина толщиной 2 mm и диаметром 30 mm, покрытая прозрачной проводящей пленкой  $\text{SnO}_2$ . Анод отделялся от катода с помощью диэлектрической прокладки, в центре которой имелось отверстие диаметром 20 mm. Длина газоразрядного промежутка, который формировался отверстием диэлектрической прокладки, определялась толщиной прокладки. К электродам системы прикладывалось постоянное напряжение через высоковольтный разъем криостата. В качестве источника питания использовался источник постоянного напряжения Stanford PS350. Для ограничения газоразрядного тока при возникновении разряда в цепь питания включалось постоянное сопротивление величиной  $1.0 \cdot 10^8 \Omega$ . Применение прозрачного электрода позволяло регистрировать свечение газового разряда через выходное окно азотного криостата с помощью телевизионной камеры и таким образом контролировать пространственное распределение тока разряда при возникновении пробоя промежутка.



**Рис. 1.** Кривые Пашена для разряда в аргоне, измеренные для различных длин разрядного промежутка при комнатной и криогенной температурах.  $d, \mu\text{m}$ : 1, 2 — 100; 3, 4 — 520; 5, 6 — 1000;  $T, \text{K}$ : 1, 3, 5 — 300; 2, 4, 6 — 117. 7 —  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $T = 300 \text{ K}$  [7].

Давление газа  $p$  в разрядной камере измерялось вакуумметром CAP 100. Поскольку охлаждение разрядной области осуществлялось со стороны катода газоразрядной структуры, в ней существовал некоторый градиент температуры. Температура газа  $T$  в промежутке оценивалась как среднее между температурами латунного и стеклянного электродов. Измерения температуры компонентов разрядной ячейки выполнялись в специальных экспериментах, в которых в разрядную область устанавливался спай термопары медь—константан, прижимаемый к поверхности соответствующего электрода. При сравнении пробивных напряжений  $U_B$ , полученных при различных  $T$ , давление газа, измеренное при низкой температуре, приводилось к соответствующей величине для комнатной температуры.

На рис. 1 представлены зависимости  $U_B$  от произведения  $pd$ , измеренные при комнатной и низкой температурах для случая заполнения системы аргонem. Данные получены для набора величин  $d = 100, 520$  и  $1000 \mu\text{m}$ . Видно, что для обеих температур в исследованном диапазоне  $d$  хорошо выполняется закон Пашена, т.е. величина напряжения пробоя, измеренная для различных  $p$  и  $d$ , является функцией про-



**Рис. 2.** Кривые Пашена для разряда в азоте для различных длин разрядного промежутка при комнатной и криогенной температурах.  $d, \mu\text{m}$ : 1, 2 — 100; 3, 4 — 520; 5, 6 — 1000.  $T, \text{K}$ : 1, 3, 5 — 300; 2, 4, 6 — 117.

изведения этих величин. Однако наблюдается существенное различие в кривых Пашена для комнатной и криогенной температур. Так, при низкой температуре минимум кривой Пашена несколько сдвинут в сторону ббльших значений  $pd$ . Кроме этого, при низкой  $T$  пробивные напряжения на левой ветви кривой Пашена выше, чем при комнатной температуре, а на правой ветви — ниже. Рис. 1 содержит также результаты измерения кривой Пашена, заимствованные из работы [7], где определялось напряжение зажигания разряда в аргоне при комнатной температуре для длины разрядного промежутка  $d = 5 \text{ mm}$ .

На рис. 2 приведены кривые Пашена, измеренные для различных толщин газоразрядного промежутка при заполнении газоразрядной камеры азотом. Измерения проводились также для двух температур. Как и в случае аргона, наблюдается выполнение закона Пашена для обеих температур. При низкой  $T$  кривая Пашена также имеет несколько иной вид по сравнению с кривой, измеренной при комнатной температуре. При этом для всех значений  $pd$  пробивное напряжение при низкой температуре выше этой величины при комнатной температуре. Влияние

низкой  $T$  состоит также в том, что вся кривая Пашена как бы смещается по оси напряжений вверх на величину примерно 200 В.

Полученные результаты свидетельствуют, что охлаждение газоразрядного устройства, заполненного азотом или аргоном, сопровождается заметным изменением кривых Пашена. При этом как для комнатной, так и для криогенной температуры закон подобия соблюдается.

Известно, что охлаждение влияет на ряд процессов в газоразрядной плазме, которые могут оказывать существенное влияние на свойства разряда. В частности, происходит изменение подвижности ионов, меняются скорости процессов ионизации и электронно-ионной рекомбинации. Кроме того, может происходить образование кластерных ионов [8]. На „реальной“ или „технической“ поверхности катода всегда присутствует тонкий диэлектрический слой, состоящий из адсорбированных примесей, конденсированных атомов газа, а также продуктов газового разряда [9]. Этот слой в существенной степени определяет эмиссионные свойства катода [10]. Таким образом, охлаждение газа может не только влиять на процессы генерации электронов в объеме, но и вызывать изменение коэффициента вторичной эмиссии электронов  $\gamma$ .

Из приведенных выше экспериментальных данных, касающихся изменения кривых Пашена для криогенных условий разряда, вообще говоря, нельзя получить информацию о процессах, которые приводят к этому эффекту. В случае азота, однако, можно предположить, что основным фактором влияния температуры на величину пробивного напряжения является уменьшение величины  $\gamma$  при низких  $T$ . На эту возможность указывает хорошее соответствие полученным экспериментальным данным теоретических зависимостей  $U_B(pd)$ , построенных с учетом этого предположения. На рис. 2 приведены соответствующие теоретические кривые, рассчитанные из условия пробоя Таунсенда

$$\gamma [\exp(\alpha d) - 1] = 1. \quad (1)$$

При построении кривых использовалась аппроксимация зависимости первого коэффициента ионизации Таунсенда  $\alpha$  от приведенной напряженности электрического поля [11]:

$$\alpha = 12.0 p \exp[-342.0(p/E)], \quad (2)$$

где  $E$  — электрическое поле в газоразрядном зазоре. Значение  $\gamma$  использовалось в качестве подгоночного параметра при построении

расчетных кривых. Видно, что правая ветвь кривой Пашена как для комнатной, так и для низкой  $T$  хорошо описывается аппроксимацией (2) коэффициента  $\alpha$  в широком диапазоне изменения  $pd$  (от 2.5 до 17). Для комнатной температуры подгоночное значение  $\gamma$  оказалось равным  $5.0 \cdot 10^{-3}$ , а для криогенной —  $5.0 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, наблюдаемое изменение пробивного напряжения азота при понижении температуры может быть приписано уменьшению коэффициента вторичной эмиссии электронов.

В настоящей работе показано, таким образом, что охлаждение микрозарядных устройств, заполненных аргоном, а также азотом, до криогенных ( $T \sim 100$  К) температур оказывает заметное влияние на горение разрядов в них. Эти результаты получены при использовании латунного катода. В криогенной газоразрядной системе, наполненной азотом, эффект можно объяснить уменьшением коэффициента вторичной электронной эмиссии. Предварительные эксперименты показывают также, что подобные закономерности наблюдаются при использовании полупроводниковых катодов, изготовленных из кремния и арсенида галлия. Полученные результаты представляют интерес при разработке криогенных микрозарядных устройств, среди них преобразователи оптических изображений „полупроводник–газоразрядный промежуток“.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Райзеру за интерес к работе и полезные обсуждения.

Исследования выполнены в рамках Президентской программы поддержки ведущих научных школ России (грант НШ-5920.2006.2), а также Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-02-00168-а).

## Список литературы

- [1] Kogelschatz U, Eliasson B, Egli W. // Pure Appl. Chem. 1999. V. 71. N 10. P. 1819–1828.
- [2] <http://www.otm.uiuc.edu/techs/featured/microdischarge-devices.asp>.
- [3] Касымов Ш.С., Парицкий Л.Г. // Деп. ВИНТИ № 2693. 1974.
- [4] Astrov Yu.A., Portsel L.M., Teperick S.P., Willebrand H., Purwins H.-G. // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. N 4. P. 2159–2166.
- [5] Астров Ю.А., Порцель Л.М. // ЖТФ. 1981. Т. 51. В. 12. С. 2502–2505.
- [6] Astrov Yu.A., Logvin Yu.A. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. N 16. P. 2983–2986.

- [7] Лисовский В.А., Яковин С.Д. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 6. С. 58–62.
- [8] Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Раковец А.А. Криогенные разряды. М.: Наука, 1988. 60 с.
- [9] Phelps A.V., Petrović Z.Lj. // Plasma Sources Sci. Technol. 1999. V. 8. P. R21–R44.
- [10] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [11] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.