

04;11

Источник широкоапертурного плазменного потока на основе низковольтного искрового разряда с сегнетоэлектрическим электродом

© Ю.В. Коробкин, С.П. Горбунов, В.В. Мязькиви, В.Л. Паперный

Московский государственный институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)
Иркутский государственный университет
E-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 21 декабря 2009 г.

Экспериментально исследован низковольтный вакуумный искровой разряд (напряжение накопителя 75–600 В) с катодом в виде металлической сетки, расположенной на поверхности электрода из поляризованной сегнетокерамики, с помощью которого инициировался разряд. Обнаружено, что инициация разряда происходила при подаче на тыльную поверхность сегнетокерамики управляющего импульса амплитудой 1 кВ и длительностью 100 нс только отрицательной полярности, независимо от направления вектора поляризации керамики. Оптические измерения показали, что площадь эмитирующей поверхности катода растет приблизительно пропорционально увеличению разрядного напряжения. Согласно коллекторным измерениям, ионы плазменного потока имеют медленную и быструю компоненты, причем скорости обеих компонент остаются практически постоянными при изменении амплитуды разрядного тока в широком диапазоне величин.

Сегнетокерамические пластины и монокристаллы в течение ряда лет исследуются в качестве катодов, предназначенных для генерации широкоапертурных электронных пучков (см., например [1–3]). Их эмиссионные характеристики исследованы достаточно хорошо, результаты отражены в ряде обзоров [4,5]. В последнее время появились работы, где изучается возможность создания на основе вакуумных разрядов с электродной системой на основе сегнетокерамики источников пучков тяжелых ионов (Ti^+ , Cu^+ и др.) для различных применений [6,7]. В частности, подобные системы рассматриваются в качестве источников

широкоапертурных плазменных и ионных потоков и могут использоваться как перспективные маневровые плазменные двигатели для микроспутников [8]. Ранее авторами была показана перспективность применения в этом качестве низковольтного вакуумно-искрового разряда с острийным металлическим катодом [9]. Представляет интерес использование в таком разряде сегнетокерамического электрода, позволяющего существенно увеличить апертуру эмитируемого плазменного потока. В данной работе исследуются особенности работы вакуумно-искрового разряда с большой площадью катода, инициация которого осуществляется с помощью сегнетоэлектрического электрода.

Эксперименты проводились в вакуумной камере, где была размещена электродная система, катодный узел которой представлял собой диск из предварительно поляризованной сегнетокерамики PZT-19 диаметром 12 mm и толщиной 0.6 mm. Сторона диска, обращенная к аноду, была покрыта сеткой из молибдена с размером ячейки 1×1 mm и прозрачностью около 85%, которая была подключена к конденсатору емкостью $2 \mu\text{F}$, заряжаемому до напряжения U_c . Тыльная сторона диска, покрытая серебряным электродом, подключена к генератору управляющих импульсов амплитудой 1 kV и длительностью 100 ns. Анодом служила соединенная с заземленным корпусом металлическая сетка с размером ячейки 0.6×0.6 mm, прозрачностью 60%, расположенная на расстоянии 2.5 mm от катода. Ток разряда измерялся поясом Роговского, который находился в катодной цепи разряда. В ходе экспериментов в рабочем объеме поддерживался безмаслянный вакуум не хуже 10^{-5} Торг. Плазменная струя, генерируемая на поверхности сегнетокерамического диска с сеткой, проходила через сетчатый анод и расширялась в дрейфовую трубку диаметром 50 mm и длиной 32 cm.

На торце дрейфовой трубки располагался либо прозрачный фланец для регистрации изображения поверхности катода с помощью работающей в интегральном режиме цифровой камеры, либо коллектор для измерения ионного тока. Коллектор диаметром 32 mm находился под постоянным напряжением -200 V, при котором регистрируется ионный ток насыщения. Перед коллектором устанавливалась сетка для подавления вторичной эмиссии с поверхности коллектора, на которую подавалось напряжение 200 V относительно коллектора. Временное разрешение регистрирующей системы составляло около 40 ns. Для получения статистически обоснованных результатов каждый результат усреднялся по 10 выстрелам при неизменных параметрах разряда.

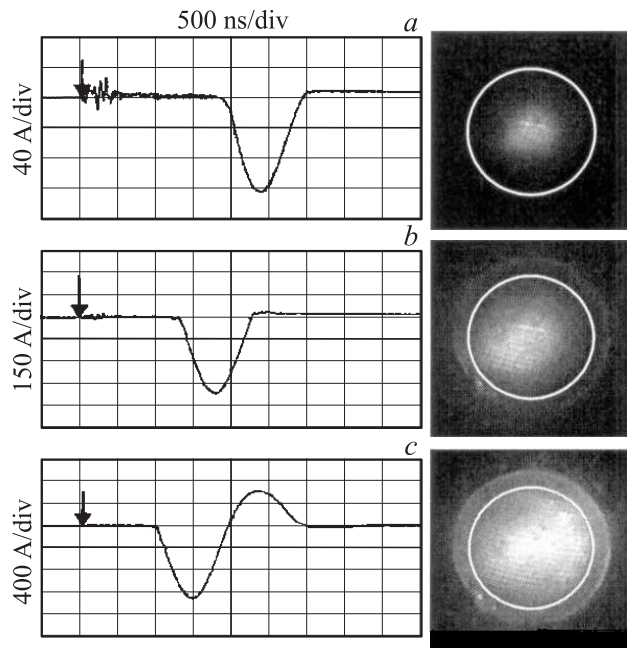


Рис. 1. Осциллограммы разрядного тока при напряжении накопителя: *a* — 75 В, *b* — 150 В *c* — 300 В (левый столбец); изображения катода при тех же напряжениях (правый столбец). Стрелки показывают момент подачи управляющего импульса.

В ходе измерений было обнаружено, что при изменении напряжения на катоде во всем диапазоне исследуемых величин $U_c = -(75-600 \text{ В})$ разряд возникал только при отрицательной полярности управляющего импульса, причем лишь в случае превышения U_c минимального значения указанного диапазона.

На рис. 1 представлены сигналы с пояса Роговского и фотографии светового излучения с поверхности катода при разных значениях напряжения разряда и соответственно амплитуды разрядного тока. Из рис. 1, *a* видно, что с ростом напряжения U_c задержка между моментом приложения управляющего импульса и моментом начала разряда уменьшается и достигает $800 \mu\text{s}$ при $U_c = 600 \text{ В}$. В то же

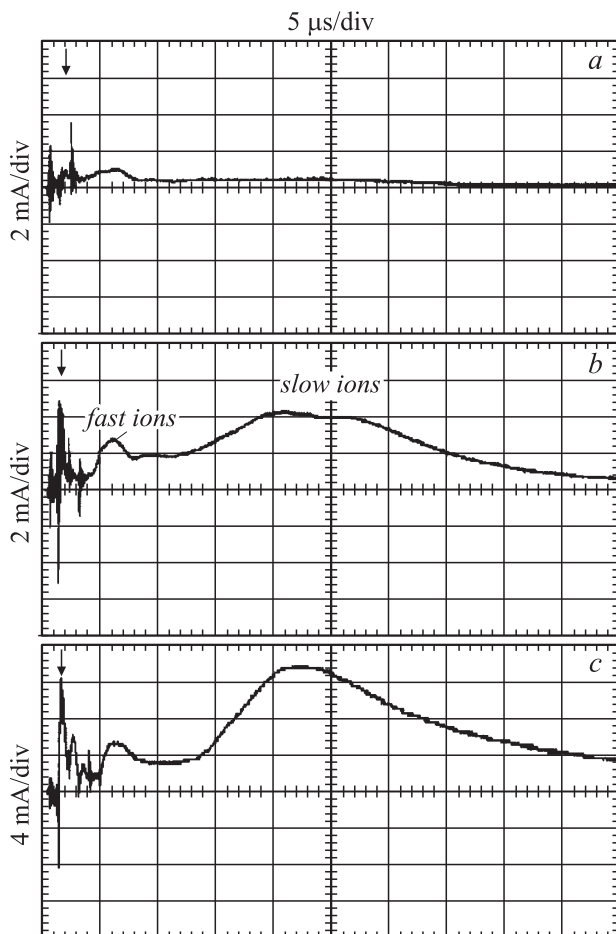


Рис. 2. Осциллограммы тока коллектора при напряжении накопителя: *a* — 150 V, *b* — 300 V, *c* — 600 V. Стрелки показывают момент достижения (первого) максимума тока разряда.

время рис. 1, *b* показывает, что с увеличением U_c возрастает площадь светящейся области на поверхности сегнетоэлектрика. Можно оценить эту площадь как составляющую приблизительно 0.1 площади диска при

напряжении 75 В и амплитуде тока разряда 160 А, а при $U_c = 600$ В и токе разряда 1.3 кА светящаяся область занимает практически всю поверхность сегнетоэлектрика. Таким образом, можно заключить, что площадь светового излучения с поверхности сегнетокерамического диска растет приблизительно пропорционально увеличению тока разряда.

На рис. 2 представлены осциллограммы ионного тока на коллектор, измеренные при различных напряжениях разряда. Задержка управляющего импульса относительно начала развертки составляла 500 ns. На сигналах ионного тока можно выделить быструю и медленную компоненты, подобно наблюдавшимся ранее в подобных экспериментах с медным катодом [10], амплитуды которых, как и в работе [10], также существенно возрастают с увеличением разрядного тока. Предполагая, в соответствии с эктонной моделью [11], что ионный ток в разряде пропорционален разрядному, т.е. они достигают максимальных значений в один момент времени, можно оценить скорость медленной компоненты по времени задержки максимума ионного тока на коллектор относительно максимума тока разряда. Для получения статистически обоснованного результата данные измерений усреднялись по 10 выстрелам при неизменных параметрах разряда. Как следует из рис. 3, скорость медленной компоненты практически не зависит от тока разряда в диапазоне от 0.2 до 2.8 кА и составляет около $1.5 \cdot 10^6$ см/с. Эта величина близка к средней скорости ионов катодной струи, регистрируемой в вакуумном разряде, которая для широкого круга материалов катода лежит в диапазоне $(1-2) \cdot 10^6$ см/с [12].

Для оценки скорости быстрой ионной компоненты, заметим, что, как следует из рис. 2, максимум соответствующего ей сигнала также быстро растет с увеличением амплитуды разрядного тока, с которым, следовательно, и связана генерация быстрых ионов. Поэтому по методике, использованной выше для медленной компоненты, можно оценить скорость быстрой компоненты как близкую к $7 \cdot 10^6$ см/с, причем, как видно из рис. 3, эта скорость мало меняется в диапазоне разрядных токов 1–6 кА.

Важной особенностью описанных измерений является существенно меньший разброс данных в различных выстрелах по сравнению с острым медным катодом, что указывает на более устойчивый характер горения разряда в данном случае.

Результаты эксперимента показывают, что инициация разряда происходит вследствие эмиссии электронов с поверхности сегнетокерамического диска при подаче на его тыльную поверхность управляющего

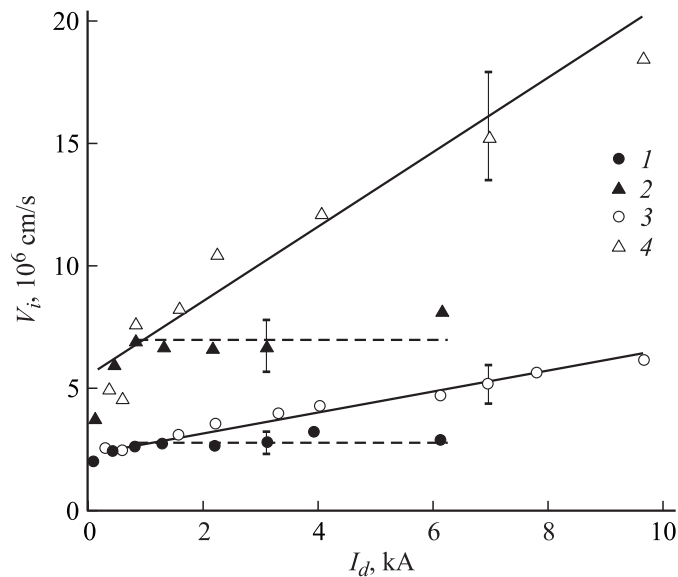


Рис. 3. Зависимость скорости медленной (1) и быстрой (2) ионной компоненты от тока разряда. Полученная в работе [9] зависимость скорости медленной (3) и быстрой (4) ионной компоненты от тока разряда с медным острым катодом.

импульса. Отсутствие зависимости этого эффекта от направления вектора поляризации керамики указывает на то, что эмиссия, по-видимому, обусловлена пробоем вдоль передней поверхности сегнетоэлектрика с образованием форплазмы в так называемых тройных точках (сегнетоэлектрик–металл–вакуум), образующихся в местах касания сеткой поверхности керамики [4].

Уменьшение задержки начала эмиссии электронов относительно момента приложения инициирующего разряд импульса с ростом напряженности электрического поля у поверхности катода наблюдалось ранее для сегнетокерамических катодов в диапазоне напряженности десятки kV/cm [13]. Как следует из данных, приведенных на рис. 1, *a*, подобная зависимость в нашем эксперименте наблюдается также при изменении напряженности постоянной компоненты поля в диапазоне менее одного kV/cm .

Сравним теперь результаты данного эксперимента с ранее полученными зависимостями скорости ионов быстрой и медленной ионных компонент катодной струи от амплитуды разрядного тока в разряде с острым медным катодом [9,10]. Существенно различный характер этих зависимостей, приведенных на рис. 3, можно объяснить, если учесть, что значительный рост скорости ионов с увеличением разрядного тока в случае острого катода, согласно предложенной авторами модели [14], был обусловлен сжатием катодной струи собственным магнитным полем тока (пинчеванием). Принципиальным обстоятельством для возникновения этого эффекта служила малая площадь начального сечения катодной струи на поверхности катода, что обеспечивало высокую плотность протекающего в струе тока и, вследствие этого, большую величину амперовых сил, определяющих динамику сжатия струи при движении к аноду. В данном эксперименте плазменная струя генерируется на поверхности катода большой площади, которая растет с увеличением разрядного тока. Следовательно, плотность разрядного тока в струе остается небольшой, что препятствует процессу сжатия струи и соответственно дополнительному ускорению ионов. На отсутствие в данном случае процесса пинчевания, приводящего к неустойчивому характеру движения струи в межэлектродном промежутке, указывает также отмеченный выше более стабильный характер течения катодной плазменной струи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект: № 07-02-01488-а, № 09-08-01114а) и Рособразования (проект 2.1.1/473).

Список литературы

- [1] Korobkin Yu.V., A. Moorti, S. Sailaja et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. N 8. P. 1163–1168.
- [2] Коробкин Ю.В., Романов И.В., Рупасов А.А. и др. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2001. № 11. С. 20–25.
- [3] Коробкин Ю.В., Романов И.В., Рупасов А.А., Шиканов А.С. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 8. С. 24–31.
- [4] Месяц Г.А. // УФН. 2008. Т. 178. № 1. С. 85–102.
- [5] Dunaevsky A., Krasik Ya.E., Felsteiner J., Dorfman S.J. // Appl. Phys. 1999. V. 95. P. 8464–8484.
- [6] Chirko K., Krasik Ya.E., Felsteiner J. // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. P. 9487–9494.
- [7] Dunaevsky A., Fisch N.J. // J. Appl. Phys. 2004. V. 95. P. 4621–4626.

- [8] *Yarmolich D., Vekselman V., Krasik Ya.E.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 081504–081507.
- [9] *Горбунов С.П., Красов В.И., Паперный В.Л., Коробкин Ю.В., Романов И.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 22. С. 87–94.
- [10] *Gorbunov S.P., Krasov V.P., Paperny V.L., Savyelov A.S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 5002–5007.
- [11] *Месяц Г.А.* Эктон в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [12] *Anders A., Yushkov G.Y.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. N 8. P. 4824–4832.
- [13] *Krasik Ya.E., Dunaevsky A., Krokhmal A., Felsteiner J.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 2379–2400.
- [14] *Красов В.И., Крипберг И.А., Паперный В.Л.* и др. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 22. С. 1–8.