

Источник плазмы на основе сегнетокерамики для сильноточных ионных пучков

*А.В. Степанов**, *С.К. Павлов*, *Ф.В. Конусов*, *Г.Е. Ремнев*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

**stepanovav@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований характеристик разряда в источнике плазмы на основе сегнетокерамики ВаTiO₃, а также ионного и атомного спектрального состава плазмы. Источник плазмы представлял собой цилиндрический электрод в виде спирали навитой на стержень ВаTiO₃. Исследования выполнены в атмосфере аргона в диапазоне давлений 10⁻⁵–10⁻² мм.рт.ст. Методом оптической эмиссионной спектроскопии исследован спектр излучения плазмы. Спектр идентифицирован как линии атомов и ионов входящих в состав керамики (Ва, Ti, O) и остаточной атмосферы аргона (Ar). Установлено влияние давления газа на характеристики разряда и спектральный состав плазмы.

Ключевые слова: источник плазмы, сегнетокерамика, разряд, оптический спектр, аргон

1. Введение

Плазменные катоды на основе сегнетокерамики [1, 2] являются эффективным источником пучков заряженных частиц, в частности подобные источники используются для формирования электронных пучков. Формирование плазмы на поверхности сегнетокерамики происходит под действием импульсов управляющего напряжения. Разряд формируется в тройных точках (контакт металл-диэлектрик-вакуум) и благодаря высокой относительной диэлектрической проницаемости сегнетокерамики (например, для титаната бария $\epsilon \sim 1800$) характеризуется низкой величиной напряжения зажигания [3, 4]. Из-за наличия микроострий на поверхности керамики и усиления тангенциальной компоненты электрического поля напряженность в тройных точках достигает 10⁴–10⁵ В/см [5]. Плазма формируется на поверхности керамики при испарении и ионизации материала керамики и газового слоя адсорбированного на ее поверхности. Разряд протекает в незавершенной стадии и обладает многоканальной структурой [1], за счет этого на поверхности катода большой площади достигается высокая однородность плазменного слоя. Благодаря низкой эрозии материала керамики ресурс подобных катодов может достигать 10⁶ импульсов [5].

Согласно результатам исследований [6] плазменные катоды также могут являться источником ионов. Формирование плазмы сопровождается испарением и ионизацией адсорбированного газового слоя на поверхности катода. В результате чего в составе пучка появляются ионы Н⁺, О⁺ и С⁺. Поэтому при использовании сегнетокерамики в качестве источника ионов необходимо учитывать влияние остаточной атмосферы и параметров управляющих импульсов напряжения на формирование плазмы [7]. Целью данной работы являлось исследование характеристик разряда источника плазмы на основе сегнетокерамики, а также ионного и атомного спектрального состава плазмы в зависимости от давления остаточной атмосферы.

2. Источник плазмы

Для проведения исследований был разработан источник плазмы на основе сегнетокерамики ВаTiO₃ (Рис. 1а). Источник плазмы представлял собой электрод в виде спирали изготовленной из нихромовой нити навитой на керамический стержень. Общая длина и диаметр электрода составляли 96 мм и 32 мм соответственно, шаг намотки спирали 5 мм. Источник плазмы был установлен в диэлектрическом корпусе, как показано на Рис. 1а, с внутренним диаметром 48 мм. Один из выводов электрода был подключен к источнику управляющих импульсов напряжения, второй вывод соединен с заземленным электродом –

сеткой. В основании корпуса находился клапан для напуска газа в область электрода. В отличие от плоских плазменных катодов [8] цилиндрическая конструкция источника плазмы позволяла обеспечить равномерный поток газа вдоль поверхности электрода при заданном давлении.

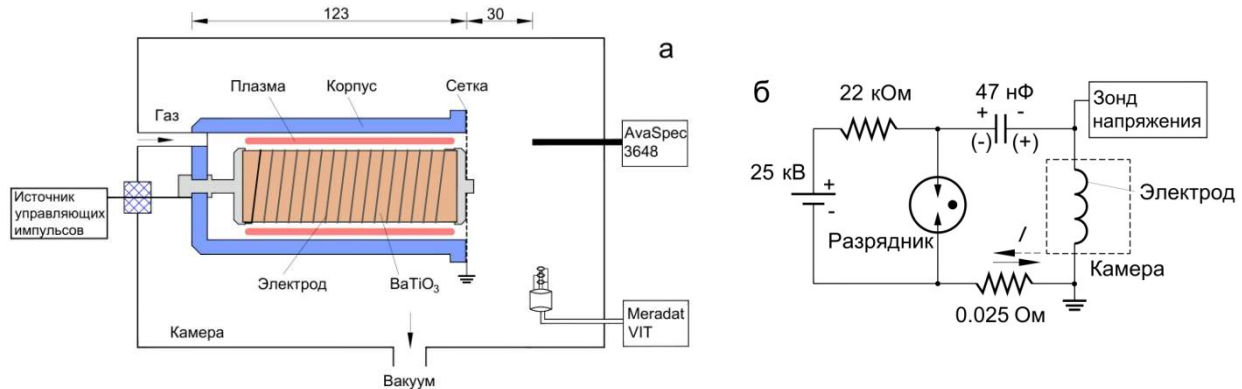


Рис. 1. Экспериментальная установка: (а) источник плазмы, (б) источник управляющих импульсов напряжения.

Разряд зажигался на поверхности керамики в точках контакта с витками электрода при разряде емкостного накопителя источника управляющих импульсов (Рис. 1б). К выводам электрода прикладывались разнополярные затухающие импульсы напряжения, при этом ток источника протекал параллельно через спиральный электрод и вдоль поверхности керамики. Индуктивность подключения элементов источника была минимальной, поэтому индуктивность контура разряда накопителя фактически определялась индуктивностью спирального электрода. Ток в цепи спирального электрода контролировался низкоиндуктивным резистивным шунтом величиной 0.025 Ом. Напряжение на выводах спирального электрода контролировалось с помощью высоковольтного зонда напряжения Актаком АСА-6039. Сигналы тока и напряжения регистрировались осциллографом Tektronix 2024В.

3. Характеристики разряда

Разряд на поверхности керамики был исследован в непрерывном потоке аргона в диапазоне давлений 10^{-5} – 10^{-2} мм.рт.ст. В рабочей камере предварительно создавалось предельно низкое давление $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. диффузионным паромасляным насосом НВДМ-250. Затем осуществлялся непрерывный напуск аргона в область спирального электрода. Давление газа регулировалось напускным клапаном, и контролировалась в области сетки преобразователем ПМИ-10-2 [9] и вакуумметром МЕРАДАТ-ВИТ19ИТ2 (Рис. 1а). Разряд характеризовался величиной напряжения зажигания U , величиной тока I протекающего через спиральный электрод, периодом T и временем релаксации колебаний τ напряжения и тока. В свою очередь период колебаний напряжения и тока T был связан с параметрами схемы источника питания следующим образом:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{1/LC - (1/\tau)^2}}, \quad (1)$$

где L – индуктивность спирали, C – емкость накопителя, τ – время релаксации колебаний.

Разряд зажегся на переднем фронте напряжения и сопровождался появлением высокочастотных пульсаций напряжения и тока. Характерные сигналы напряжения и тока представлены на Рис. 2а.

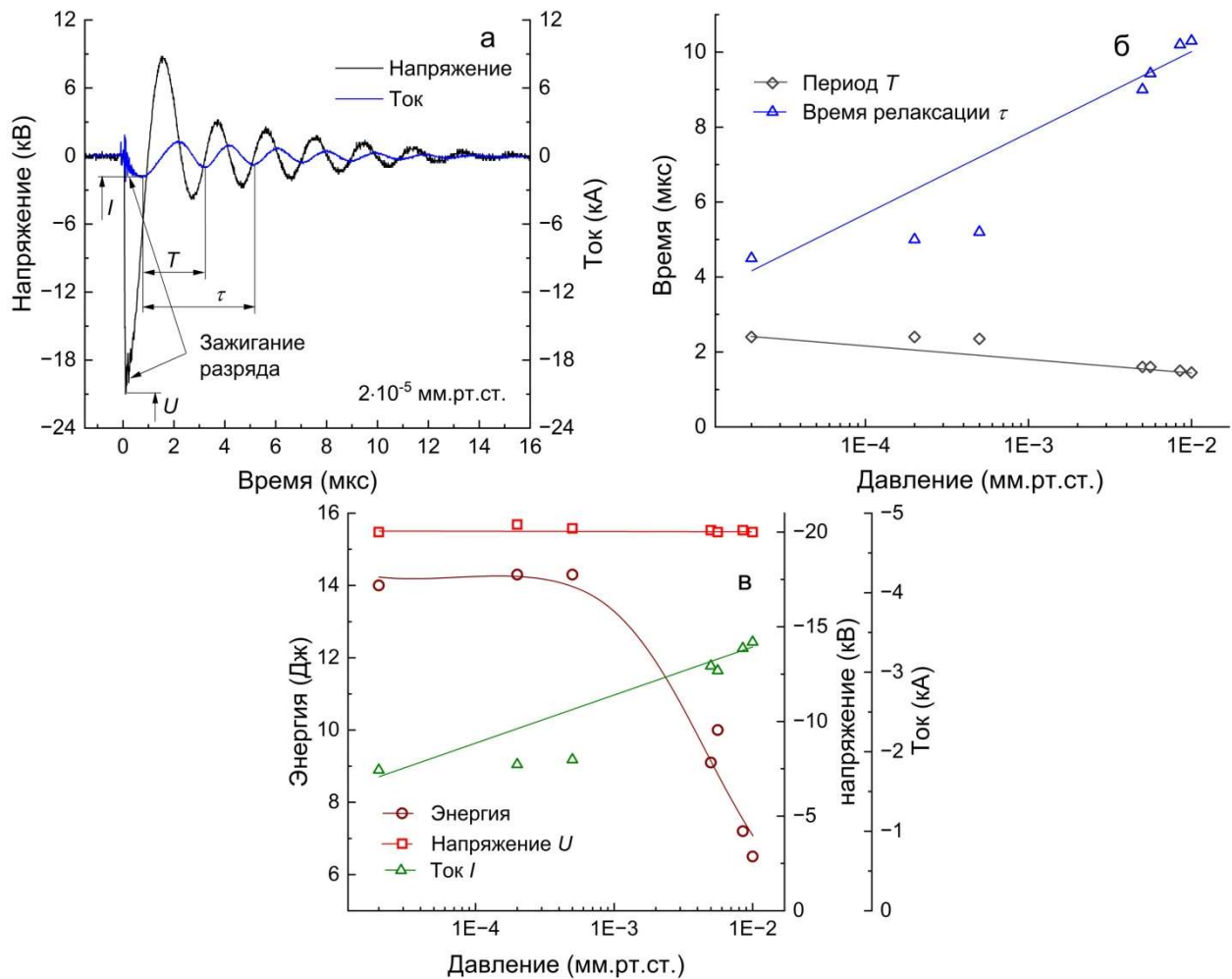


Рис. 2. Характеристики разряда: (а) сигналы напряжения и тока, (б) период и время релаксации колебаний, (в) влияние давления газа на характеристики разряда.

При предельно низком давлении в камере $1 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. напряжение зажигания разряда составляло -20 кВ. При этом амплитуда тока на первой полувольте составляла -1.8 кА. Период колебаний и время затухания были равны 2.4 мкс и 4.5 мкс соответственно (Рис. 2б). На основании выражения (1) была сделана оценка индуктивности спирального электрода:

$$L = \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2} C, \quad (2)$$

величина которой составила 3.1 мкГн. В интервале давлений от $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. напряжение зажигания разряда оставалось неизменным, ток в цепи спирального электрода увеличивался в диапазоне от -1.8 кА до -2.2 кА. Период T и время релаксации колебаний τ менялись как показано на рис. 2б. С ростом давления газа до $1 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. ток в цепи электрода значительно возрастал до 3.4 кА, при этом напряжение зажигания составляло -20 кВ, как показано на Рис. 2в. Период T уменьшался до 1.45 мкс, а время релаксации τ

увеличивалось до 10.3 мкс, как показано на Рис. 2б. В результате повышения давления, в соответствии с выражением (2), индуктивность контура снизилась до 1.3 мкГн. Таким образом, повышение давления газа способствует увеличению тока поверхностного разряда, о чем свидетельствует снижение индуктивности спирального электрода. На основании сигналов тока и напряжения была сделана оценка энергии выделяемой в контуре спирального электрода. В диапазоне давлений $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. в разрядном контуре выделяется ~14 Дж (93% запасаемой в накопителе энергии). При этом частично энергия источника расходуется на формирование разряда и наработку плазмы. С увеличением давления аргона наблюдалось снижение энергии выделяемой в контуре спирального электрода до 6.5 Дж (Рис. 2в). Это обусловлено тем, что с ростом давления газа и увеличением тока разряда увеличивалась частота столкновения электронов с атомами и молекулами материала керамики и газа. В результате чего, затраты энергии источника на формирование разряда и наработку плазмы возрастали.

4. Спектральный анализ

Влияние давления газа на формирование плазмы было исследовано с помощью оптической эмиссионной спектроскопии. Спектры свечения плазмы разряда были получены в диапазоне длин волн 300–800 нм с помощью спектрометра Avaspec 3648. Время интегрирования сигнала составляло 1 с. Идентификация отдельных линий атомов и ионов эмиссионного спектра проводилась путем их сопоставления с данными базы NIST Atomic Spectra Database ver. 5.4 [10]. При наложении близких по центрам линий, связанных с различными компонентами, выбор преобладающего элемента осуществлялся по значениям табличных интенсивностей и вероятностей электронных переходов между верхним и нижним уровнем энергии атомов. Величину инструментального уширения линий определили при предварительной калибровке с помощью лазерного излучения неодимового и гелий-неонового лазеров с длинами волн 355.532 нм и 632.84 нм, соответственно.

Характерные спектры свечения плазмы в вакууме и при разряде в потоке аргона представлены на Рис. 3. При разряде в вакууме спектр плазмы (рис. 3а) состоит из линий атомов и ионов элементов сегнетокерамики (Ti, Ba, O), и ионов и атомов азота (N), появление которых было обусловлено ионизацией адсорбированного на поверхности керамики слоя газа. В интервалах длин волн 410–440 нм, 500–520 нм и 530–570 нм присутствуют широкие полосы, которые могут быть связаны с молекулами углерода [11], азота и кислорода [12–17]. Основной вклад в спектр обеспечивают линии атомов и ионов титана и бария. Интенсивность линий ионов кислорода значительно ниже, что может быть связано с тем, что значения энергии их верхних уровней более высокие по сравнению с барием и титаном, т. е. для эффективного возбуждения атомов кислорода энергия электронов плазмы не достаточно высокая. Интенсивность широких молекулярных полос очень слабая (Рис. 3б) и их вклад в спектр излучения пренебрежимо мал.

При разряде в потоке аргона (Рис. 3б) в спектре плазмы наряду с линиями атомов и ионов элементов керамики появлялись линии ионов и атомов аргона (Ar) (Рис. 3б). Спектральные линии ионов аргона Ar II и Ar III были зарегистрированы в интервале длин волн 420–520 нм, 350–410 нм и 660–710 нм (Рис. 3б), а линии атомов Ar I были зарегистрированы в интервале 690–860 нм. С увеличением давления аргона ток разряда возрастал, в результате чего интенсивность спектральных линий атомов и ионов (Ti, Ba, O, Ar) увеличивалась, что свидетельствовало об увеличении температуры и концентрации плазмы. Увеличение частоты столкновений электронов с молекулами и атомами вещества у поверхности керамики с ростом давления влияет на процессы возбуждения и релаксации энергетических уровней атомов и ионов, что в свою очередь приводит к изменению

интенсивности линий спектра. Наибольшей интенсивностью в спектре обладали линии ионов и атомов Ti, Ba и Ar. Элементный состав плазмы оставался неизменным во всем интервале давления газа.

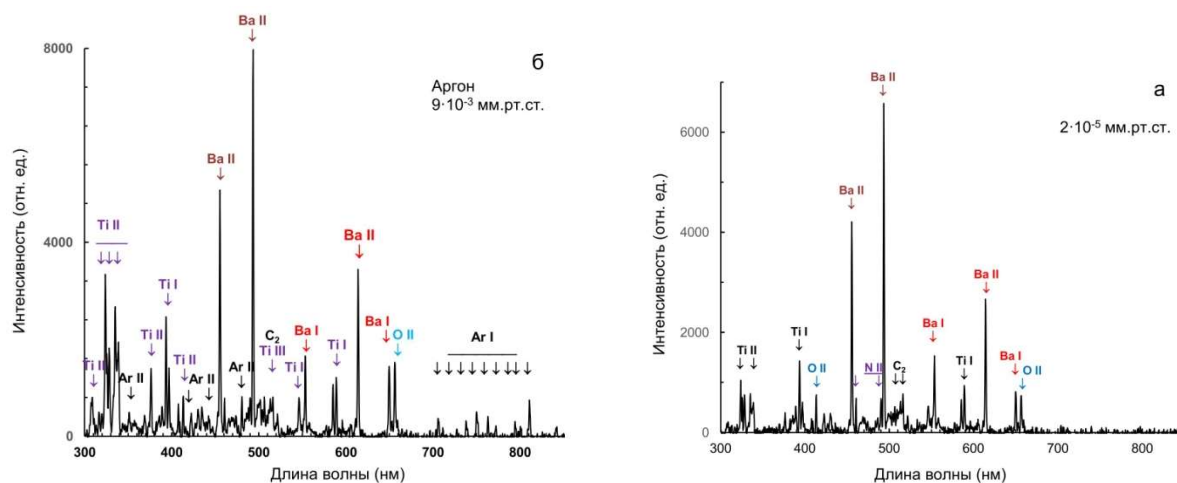


Рис. 3. Эмиссионные спектры плазмы разряда: (а) в вакууме, (б) в потоке аргона.

5. Заключение

В ходе работы были исследованы характеристики разряда источника плазмы и спектральный состав плазмы. При разряде в атмосфере аргона в диапазоне давлений 10^{-5} - 10^{-2} мм.рт.ст. спектр плазмы состоял из линий ионов и атомов Ti, Ba, O и Ar. Формирование плазмы сопровождалось изменением характеристик тока и напряжения в контуре спирального электрода. С ростом тока разряда наблюдалось увеличение интенсивностей линий ионов и атомов спектра. Элементный состав спектра оставался стабильным при изменении тока разряда и давления остаточной атмосферы в исследуемом диапазоне.

Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке фонда РФФ проект № 23-29-00455.

6. Список литературы

- [1] G.A. Mesyats, Electron emission from ferroelectric plasma cathodes, *Physics – Uspekhi*, **51**(1), 79, 2008; doi: 10.1070/PU2008v051n01ABEH006426
- [2] S.P. Bugaev, G. A. Mesyats, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **12**, 1358 (1968).
- [3] H. Riege, I. Boscolo, J. Handerek, U. Herleb, Features and technology of ferroelectric electron emission, *J. Appl. Phys.*, vol. **84**(3), 1602, 1998; doi: 10.1063/1.368230
- [4] O. Peleg, K. Chirko, V. Gurovich, J. Felsteiner, Ya.E. Krasik, V. Bernshtam, Parameters of the plasma produced at the surface of a ferroelectric cathode by different driving pulses, *J. Appl. Phys.*, vol. **97**, 2005; doi: 10.1063/1.1927704
- [5] Y.E. Krasik, A. Dunaevsky, J. Felsteiner, A. Krokhmal, C. Leibovitch, A. Rosenberg, I. Schnitzer, J. Shiloh, Study of electron diodes with a ferroelectric plasma cathode, *IEEE Transactions on plasma science*, vol. **28**(5), 1642, 2000; doi: 10.1109/27.901248
- [6] K. Chirko, Ya.E. Krasik, J. Felsteiner, Ion beam generation in a diode with a ferroelectric anode, *Journal of Applied Physics*, vol. **91**(12), 9487, 2002; doi: 10.1063/1.1479465
- [7] A. Dunaevsky, Ya.E. Krasik, J. Felsteiner, A. Sternlieb, Ferroelectric plasma cathode with a control grid, *Journal of applied physics*, vol. **91**(3), 975, 2002; doi: 10.1063/1.1425422

-
- [8] A.V. Stepanov, F.V. Konusov, S.K. Pavlov, V.A. Tarbokov, M.A. Serebrennikov, Ion emission from the plasma formed in the ferroelectric active source, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, 1062, 2024; doi: 10.1016/j.nima.2024.169223
- [9] S.V. Korobkov, M.E. Gushchin, A.V. Strikovskiy, K.N. Loskutov, A.A. Evtushenko, Study of a pulsed air flow in a large vacuum chamber by means of a commercial ionization gauge, *Technical Physics*, vol. **64**(1), 27, 2019; doi: 10.1134/S1063784219010171
- [10] U. Cvelbar, N. Krstulovic, S. Milosevic, M. Mozeti, Inductively coupled RF oxygen plasma characterization by optical emission spectroscopy, *Vacuum*, vol. **82**(2), 224, 2007; doi: 10.1016/j.vacuum.2007.07.016
- [11] R. Engeln, B. Klarenaar, O. Guaitella, Foundations of optical diagnostics in low-temperature plasmas, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **29**, 2020; doi: 10.1088/1361-6595/ab6880
- [12] Ding Wu, Liying Sun, Jiamin Liu, Xiao Yu, Ran Hai, Feng Chunlei, Zhiwei Wang, Hongbin Ding, Dynamics of prompt electrons, ions, and neutrals of nanosecond laser ablation of tungsten investigated using optical emission, *Phys. Plasmas.*, vol. **26**(1), 2019; doi: 10.1063/1.5081969
- [13] V. Milosavljević, M. Donegan, P.J. Cullen, D.P. Dowling, Diagnostics of an O₂-He RF Atmospheric Plasma Discharge by Spectral Emission, *J. Phys. Soc. Jap.*, vol. **83**, 014501, 2014; doi: 10.7566/JPSJ.83.014501
- [14] S.M. Starikovskaia, K. Allegraud, O. Guaitella, A. Rousseau, On electric field measurements in surface dielectric barrier discharge, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **43**(12), 124007, 2010; doi: 10.1088/0022-3727/43/12/124007
- [15] J.J. Camacho, M. Santos, L. D'iaz, J.M.L. Poyato, Optical emission spectroscopy of oxygen plasma induced by IR CO₂ pulsed laser, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **41**, 21, 215206, 2008; doi: 10.1088/0022-3727/41/21/215206
- [16] N. Bolouki, Wen-Hui Kuan, Yu-Yun Huang, Jang-Hsing Hsieh, Characterizations of a Plasma-Water System Generated by Repetitive Microsecond Pulsed Discharge with Air, Nitrogen, Oxygen, and Argon Gases Species, *Appl. Sci.*, vol. **11**, 13, 6158, 2021; doi: 10.3390/app11136158
- [17] Yong M. Kim, Jong U. Kim, Jeon G. Han, Investigation on the pulsed DC plasma nitriding with optical emission Spectroscopy, *Surface and Coatings Technology*, vol. **151–152**, 227, 2002; doi: 10.1016/S0257-8972(01)01601-2