

12.1

Исследование характеристик скользящего разряда по поверхности титаната бария

© А.В. Степанов, Ф.В. Конусов, С.К. Павлов, В.А. Тарбоков, М.А. Серебренников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: stepanovav@tpu.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2023 г.

В окончательной редакции 23 апреля 2024 г.

Принято к публикации 5 мая 2024 г.

Представлены результаты исследования характеристик скользящего разряда по поверхности сегнетокерамики BaTiO_3 . Методом оптической эмиссионной спектроскопии исследован спектр излучения плазмы в диапазоне давлений остаточного газа 10^{-5} – 10^{-3} Torr. Спектр идентифицирован как линии атомов и ионов, входящих в состав керамики (Ba, Ti, O), и остаточной атмосферы (N). Установлено влияние тока разряда и давления остаточной атмосферы на интенсивность линий спектра.

Ключевые слова: сегнетокерамика, источник ионов, эмиссионная спектроскопия, давление.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.16.58537.19755

Плазменные катоды на основе сегнетокерамики [1,2] могут являться эффективным источником ионов [3]. Плазма формируется в результате разряда вдоль поверхности сегнетокерамики под действием импульсов управляющего напряжения. Разряд формируется в тройных точках (контакт металл–диэлектрик–вакуум) и характеризуется низкой величиной напряжения зажигания (единицы–десятки киловольт) [4,5], что обусловлено высокой напряженностью электрического поля. Из-за наличия микроострий на поверхности керамики и усиления тангенциальной компоненты электрического поля напряженность в тройных точках достигает 10^4 – 10^5 V/cm [6]. 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 катодов достигает 10^6 импульсов [6].

Формирование плазмы сопровождается потоком нейтральных частиц [7], что приводит к повышению давления у поверхности катода. В зависимости от параметров управляющих импульсов напряжения (амплитуда, длительность импульса, частота следования) повышение давления может привести к увеличению плотности плазмы у поверхности керамики [8]. Поэтому при использовании сегнетокерамики в качестве источника ионов необходимо учитывать влияние остаточной атмосферы и параметров управляющих импульсов напряжения на формирование плазмы. В настоящей работе выполнены исследования ионного и атомного спектрального состава плазмы в зависимости от электрофизических характеристик разряда и давления остаточной атмосферы.

Для проведения исследований был разработан источник плазмы [9] на основе титаната бария (BaTiO_3) (рис. 1, *a*). В отличие от подобных источников [3] в данной конструкции сегнетокерамика состоит из нескольких

цилиндрических сегментов. Диаметр и толщина каждого из них равны 40 и 20 mm соответственно. Такой подход позволяет управлять величиной тока разряда в зависимости от собственной емкости источника плазмы, а также изменять площадь поверхности керамики. Отдельные сегменты крепились на плоском диэлектрическом основании и были соединены общим электродом — подложкой. На противоположной стороне керамики был установлен внешний (передний) электрод в виде сетки из нержавеющей стали с размером ячейки 5×5 mm (диаметр проволоки сетки 0.5 mm) и диаметром 120 mm. Сетка жестко фиксировалась на поверхности керамики относительно диэлектрического основания, как показано на рис. 1, *a*, и была заземлена (имела нулевой потенциал). Общая площадь поверхности титаната бария под сеткой составляла 60 cm^2 .

Напряжение на подложке формируется при разрядке емкости источника питания на собственную емкость источника плазмы C_c (рис. 1, *b*). В момент срабатывания газового разрядника GD существует задержка t_d появления тока разряда (рис. 1, *b*). В течение ~ 100 ns относительное изменение напряжения на подложке составляет ~ 2 kV, при этом ток разряда близок к нулевому значению. Резкое нарастание тока разряда свидетельствует о появлении плазмы на поверхности керамики. По мере формирования и расширения плазменных каналов емкость источника плазмы C_c увеличивается и в течение фронта напряжения достигает практически постоянной величины 25 nF (рис. 1, *b*). Напряжение и ток разряда носят колебательный характер, что обусловлено рассогласованием емкостей источника питания и источника плазмы, а также наличием индуктивностей в схеме источника. Величина тока разряда ограничена емкостью источника плазмы и при напряжении на подложке -10 kV составляет 900 A.

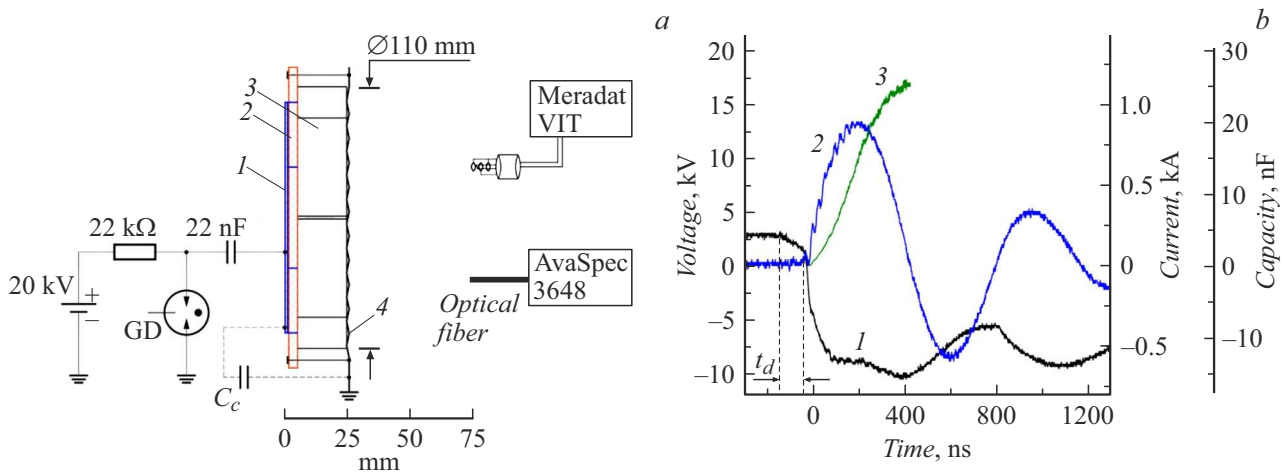


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки. 1 — подложка, 2 — диэлектрическое основание, 3 — титанат бария, 4 — передний электрод, GD — управляемый газовый разрядник, C_c — собственная емкость. *b* — осциллограммы тока и напряжения. 1 — напряжение на подложке, 2 — ток разряда, 3 — емкость катода, t_d — задержка.

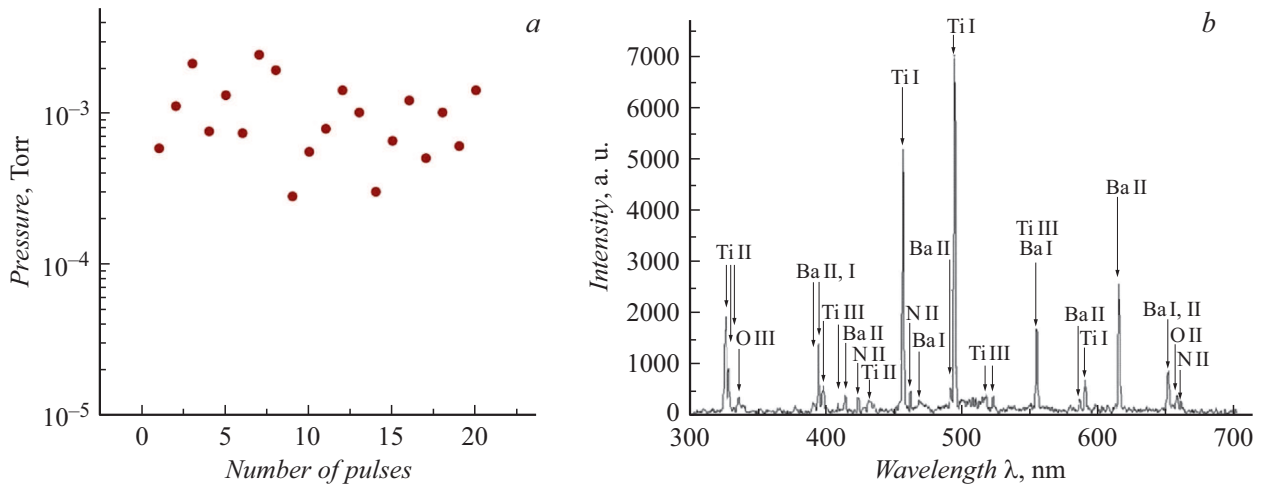


Рис. 2. *a* — давление в серии импульсов (напряжение на подложке -10 kV); *b* — оптический спектр плазмы при давлении $1 \cdot 10^{-5}$ Torr.

Спектральный состав плазмы [10] был исследован в диапазоне давлений 10^{-5} – 10^{-3} Torr. Предельно низкое давление в камере создавалось диффузионным паромасляным насосом НВДМ-250, повышение давления осуществлялось непрерывным напуском газа со стороны атмосферы. Давление контролировалось в области переднего электрода (рис. 1, *a*) преобразователем ПМИ-10-2 [11] с помощью вакуумметра Мерадат-ВИТ19ИТ2. Коэффициент относительной чувствительности ПМИ-10-2 был принят равным единице, поскольку в газе присутствуют компоненты как с высоким, так и с низким потенциалом ионизации. Оптические спектры регистрировались спектрометром AvaSpec 3648 в интервале 200–800 nm. Время интегрирования сигнала составляло 1 s. Идентификация отдельных линий атомов и ионов эмиссионного спектра проводилась путем их сопоставления с данными базы NIST Atomic Spectra

Database ver. 5.4 [12]. 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 неодимового лазера с основной длиной волны 1064 nm, перестроенного на вторую и третью гармоники с соответствующими длинами волн 532 и 355 nm, и гелий-неонового лазера с длиной волны 632.84 nm.

Формирование плазмы на поверхности сегнетокерамики сопровождается интенсивным потоком нейтральных частиц, который образуется при испарении материала керамики и десорбции газа с ее поверхности [10] под действием тока взрывной эмиссии электронов [1]. Ионизация нейтральных частиц происходит под действием

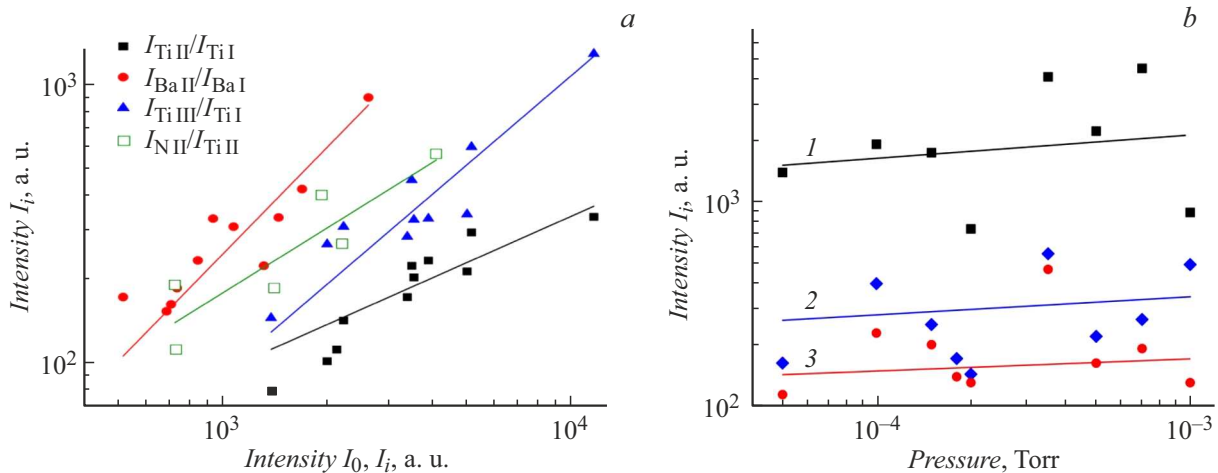


Рис. 3. *a* — соотношение интенсивностей спектральных линий ионов и атомов: Ti I (455.47 nm), Ti II (430.19 nm), Ti III (397.0 nm), Ba I (553.30 nm), Ba II (413.30 nm), N II (422.77 nm); *b* — зависимость интенсивности линий ионов I_i от давления: 1 — Ti II (325.43 nm), 2 — N II (422.77 nm), 3 — Ba II (389.18 nm).

электронной лавины, формируемой на поверхности сегнетокерамики в тангенциальном электрическом поле. В результате потока нейтральных частиц давление газа у поверхности переднего электрода увеличивается. В серии одиночных импульсов, следующих с паузой 5 с, давление на расстоянии 50 мм от поверхности переднего электрода возрастает от $3 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ Torr (рис. 2, *a*).

Типичный спектр свечения плазмы (рис. 2, *b*) состоит из линий нейтральных атомов и ионов элементов сегнетокерамики (Ti, Ba, O), ионов и атомов азота и широких полос в диапазонах 410–440, 500–520 и 530–570 nm, которые можно отождествить с молекулами углерода [13], азота и кислорода [12,14–19]. Появление линий ионов и атомов азота связано с ионизацией газа, адсорбированного на поверхности керамики. Согласно [5], ионизация газа происходит в приповерхностном слое толщиной в несколько монослоев. Основной вклад в спектр вносят линии атомов и ионов титана и бария. Спектральные линии ионов кислорода (O II, O III) уступают по интенсивности линиям ионов титана и бария. Интенсивность линий атомов и ионов азота также ниже. Интенсивность широких молекулярных полос очень слабая (рис. 2, *b*), и их вклад в спектр излучения пренебрежимо мал. Низкая интенсивность линий ионов O II и O III может быть связана с тем, что значения энергии их верхних уровней более высокие, чем у бария и титана, т.е. для эффективного возбуждения атомов кислорода энергия электронов плазмы недостаточно высокая.

Интенсивность линий спектра зависит от тока разряда. При увеличении тока от 450 до 900 А за счет повышения напряжения на подложке интенсивность линий ионов и атомов Ti, Ba и N возрастает, что свидетельствует об увеличении температуры и концентрации плазмы. Была установлена зависимость между интенсивностями

линий ионов I_i и атомов I_0 спектра в виде степенной функции $I_i \sim I_0^a$, где a — показатель степени (рис. 3, *a*). Изменение интенсивностей линий ионов Ti и Ba коррелирует с изменением интенсивностей линий их атомов, а изменение интенсивности линий ионов N коррелирует с изменением интенсивностей линий ионов Ti и Ba.

В диапазоне давлений 10^{-5} – 10^{-3} Torr элементный состав плазмы остается неизменным [9], в спектрах преобладают линии атомов и ионов Ti, Ba, O и N. По мере увеличения давления при заданном напряжении на подложке (рис. 1, *b*) происходит локальное изменение значений интенсивности линий атомов и ионов (рис. 3, *b*), при этом устойчивого роста или снижения интенсивности линий спектра не наблюдается. Значения интенсивностей линий Ti II, Ba II и N II коррелируют друг с другом, и их изменение происходит на фоне импульсного повышения давления у поверхности керамики. Величина давления влияет на частоту столкновений электронов с молекулами и атомами вещества у поверхности керамики. В результате это влияет на процессы возбуждения и релаксации энергетических уровней атомов и ионов, что в свою очередь приводит к изменению интенсивности линий спектра.

Спектр излучения плазмы разряда по поверхности сегнетокерамики $BaTiO_3$ состоит из линий атомов и ионов элементов, входящих в состав керамики, а также газа, адсорбированного на ее поверхности. Формирование плазмы сопровождается локальным повышением давления у поверхности сегнетокерамики. На фоне импульсного повышения давления происходят колебания значений интенсивностей линий спектра при изменении давления в камере в диапазоне 10^{-5} – 10^{-3} Torr. Элементный состав спектра остается стабильным при изменении тока разряда и давления остаточной атмосферы в исследуемом диапазоне. Изменение давления остаточной атмосферы в диапазоне 10^{-5} – 10^{-3} Torr не

оказывает существенного влияния на состав спектральных линий плазмы и их интенсивность.

Финансирование работы

Исследование проведено при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 23-29-00455).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.А. Месяц, УФН, **178** (1), 85 (2008). DOI: 10.3367/UFNr.0178.200801e.0085 [G.A. Mesyats, Phys. Usp., **51** (1), 79 (2008). DOI: 10.1070/PU2008v051n01ABEH006426].
- [2] С.П. Бугаев, Г.А. Месяц, ЖТФ, **37** (10), 1861 (1967). [S.P. Bugaev, G.A. Mesyats, Sov. Phys. Tech. Phys., **12**, 1358 (1968)].
- [3] K. Chirko, Ya.E. Krasik, J. Felsteiner, J. Appl. Phys., **91** (12), 9487 (2002). DOI: 10.1063/1.1479465
- [4] H. Riege, I. Boscolo, J. Handerek, U. Herleb, J. Appl. Phys., **84** (3), 1602 (1998). DOI: 10.1063/1.368230
- [5] O. Peleg, K. Chirko, V. Gurovich, J. Felsteiner, Ya.E. Krasik, V. Bernsham, J. Appl. Phys., **97** (11), 113307 (2005). DOI: 10.1063/1.1927704
- [6] Y.E. Krasik, A. Dunaevsky, J. Felsteiner, A. Krokhmal, C. Leibovitch, A. Rosenberg, I. Schnitzer, J. Shiloh, IEEE Trans. Plasma Sci., **28** (5), 1642 (2000). DOI: 10.1109/27.901248
- [7] K. Chirko, Ya.E. Krasik, J. Felsteiner, A. Sternlieb, J. Appl. Phys., **92** (10), 5691 (2002). DOI: 10.1063/1.1516259
- [8] A. Dunaevsky, Ya.E. Krasik, J. Felsteiner, A. Sternlieb, J. Appl. Phys., **91** (3), 975 (2002). DOI: 10.1063/1.1425422
- [9] A.V. Stepanov, F.V. Konusov, S.K. Pavlov, V.A. Tarbokov, M.A. Serebrennikov, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A, **1062**, 169223 (2024). DOI: 10.1016/j.nima.2024.169223
- [10] С.П. Бугаев, В.В. Кремнев, Ю.И. Терентьев, В.Г. Шпак, Я.Я. Юрике, ЖТФ, **41** (9), 1958 (1971). [S.P. Bugaev, V.V. Kremnev, Yu.I. Terent'ev, V.G. Shpak, Ya.Ya. Yurike, Sov. Phys. Tech. Phys., **16**, 1547 (1972)].
- [11] С.В. Коробков, М.Е. Гушин, А.В. Стриковский, К.Н. Лоскутов, А.А. Евтушенко, ЖТФ, **89** (1), 35 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46959.117-18 [S.V. Korobkov, M.E. Gushchin, A.V. Strikovskiy, K.N. Loskutov, A.A. Evtushenko, Tech. Phys., **64** (1), 27 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010171].
- [12] U. Cvelbar, N. Krstulović, S. Milošević, M. Mozetič, Vacuum, **82** (2), 224 (2007). DOI: 10.1016/j.vacuum.2007.07.016
- [13] R. Engeln, B. Klarenaar, O. Guaitella, Plasma Sources Sci. Technol., **29** (6), 063001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/ab6880
- [14] D. Wu, L. Sun, J. Liu, X. Yu, R. Hai, C. Feng, Z. Wang, H. Ding, Phys. Plasmas, **26** (1), 013303 (2019). DOI: 10.1063/1.5081969
- [15] V. Milosavljević, M. Donegan, P.J. Cullen, D.P. Dowling, J. Phys. Soc. Jpn., **83** (1), 014501 (2014). DOI: 10.7566/JPSJ.83.014501
- [16] S.M. Starikovskaia, K. Allegraud, O. Guaitella, A. Rousseau, J. Phys. D: Appl. Phys., **43** (12), 124007 (2010). DOI: 10.1088/0022-3727/43/12/124007
- [17] J.J. Camacho, M. Santos, L. Díaz, J.M.L. Poyato, J. Phys. D: Appl. Phys., **41** (21), 215206 (2008). DOI: 10.1088/0022-3727/41/21/215206
- [18] N. Bolouki, W.-H. Kuan, Y.-Y. Huang, J.-H. Hsieh, Appl. Sci., **11** (13), 6158 (2021). DOI: 10.3390/app11136158
- [19] Y.M. Kim, J.U. Kim, J.G. Han, Surf. Coat. Technol., **151-152**, 227 (2002). DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01601-2