

УДК 537.523.2; 537.533.9

*Е.Х. БАКШТ**, *С.Я. БЕЛОМЫТЦЕВ**, *А.Г. БУРАЧЕНКО**, **, *А.А. ГРИШКОВ**,
*В.А. ШКЛЯЕВ**, ***, *В.Ф. ТАРАСЕНКО**, **

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА В РЕЗКО НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ¹

Представлены результаты экспериментального (с временным разрешением ~ 100 пс) и численного исследования развития пробоя в азоте при давлениях ниже 1 атм в диоде с резко неоднородным электрическим полем вблизи катода. Получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных как по сигналам с делителей напряжения в передающей линии, так и по сигналу тока пучка с коллектора. Также в численном моделировании получены временные зависимости ускоряющего напряжения на диоде и мгновенные портреты распределения напряженности z -компоненты электрического поля в диоде. Показана динамика развития пробоя.

Ключевые слова: наносекундный высоковольтный разряд, резко неоднородное электрическое поле, убегающие электроны, численное моделирование.

Введение

Уже более десяти лет высоковольтные наносекундные разряды в электрическом поле с резко неоднородной геометрией и сопутствующие им явления (пучки убегающих электронов и рентгеновское излучение) являются предметом интенсивного исследования со стороны ряда научных групп [1–16]. Импульсные [1–6, 9–12] и импульсно-периодические [7, 8] разряды возбуждались в различных газах в широком диапазоне давлений и напряжений на разрядном промежутке при разных межэлектродных зазорах. Интерес к разрядам подобного типа во многом обусловлен возможностью использования их в плазмохимии, для очистки, модификации и упрочнения поверхностей, переработке отходов и для ряда других приложений. Однако ряд вопросов, связанных с формированием наносекундного разряда, до сих пор окончательно не решен. Для понимания процессов, происходящих при формировании высоковольтного наносекундного разряда, проведение экспериментов необходимо сопровождать численным моделированием, так как непосредственное наблюдение этих процессов, зачастую протекающих в субнаносекундном диапазоне времени, крайне затруднительно на данном этапе развития измерительной техники.

В последнее время появились работы [4, 6, 11–16], связанные с численным моделированием развития пробоя в газонаполненном диоде. Однако большинство используемых математических моделей являются одномерными и, как следствие, электростатическими (для расчета распределения электрического поля используется уравнение Пуассона). При этом ясно, что высокие скорости протекающих в газонаполненном диоде процессов требуют полной электромагнитной постановки задачи (в 2D-осесимметричной или в 3D-геометрии). В настоящей работе развивается именно такой подход. Экспериментально и численно (в 2D-осесимметричной геометрии) исследуется формирование наносекундного разряда в азоте и переход от вакуумного режима генерации электронного пучка к режиму генерации в газе.

Экспериментальная аппаратура, методики измерений и численных исследований

В экспериментах использовался импульсный наносекундный генератор СЛЭП-150, к которому была подключена заполненная трансформаторным маслом передающая линия и газонаполненный диод (рис. 1). Анодом служила алюминиевая фольга (3) толщиной 15 мкм и металлическая диафрагма (2) диаметром 10 мм. За фольгой располагались сетки для ослабления тока пучка и армирования фольги, суммарное пропускание которых составляло 1.3 %. В качестве катода (1) использовалась трубка диаметром 7.3 мм из нержавеющей стали с толщиной рабочей кромки 200 мкм. Амплитуда падающей волны в передающей линии составляла ~ 140 кВ. Фронт импульса при этом составлял ~ 250 пс на уровне 0.1–0.9, а длительность импульса напряжения на полувысоте в случае согласованной нагрузки составляла ~ 1 нс. В ходе экспериментов в диоде обеспечивал-

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-02-00136 и 13-08-01314.

ся форвакуум либо он наполнялся азотом под давлением до 100 Торр. Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора. Коллектор (4) состоял из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50 Ом. Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 мм и располагалось на расстоянии 5 мм от фольги. В дрейфовом пространстве между фольгой диода и коллектором обеспечивался форвакуум. Для регистрации импульсов напряжения использовались два емкостных делителя (обычно U_2 и U_3), что позволяло восстановить напряжение на промежутке. Временное разрешение систем регистрации тока электронного пучка и напряжения в передающей линии составляло ~ 100 пс. Электрические сигналы регистрировались осциллографом TDS-6604 (6 ГГц, $20 \cdot 10^9$ с $^{-1}$).

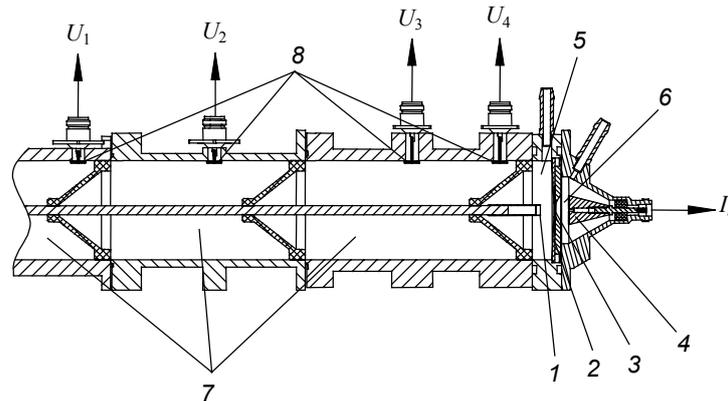


Рис. 1. Конструкция передающей линии и газонаполненного диода: 1 – катод; 2 – диафрагма; 3 – Al-фольга; 4 – коллектор; 5 – газонаполненный диод; 6 – дрейфовое пространство; 7 – передающая линия; 8 – емкостные делители

Численное моделирование проводилось с использованием двумерных осесимметричных Particle-In-Cell кодов KARAT [17] и ХООPIC [18], ранее неоднократно применявшихся как для решения вакуумных задач по формированию пучков заряженных частиц в сильноточной электронике [19, 20], так и для моделирования процессов, проходящих в газонаполненных диодах [13–16].

Геометрия расчетного пространства, используемая в моделировании, описывала диод с частью передающей линии и узлом регистрации тока электронного пучка. Передающая линия была заполнена модельной областью с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.2$, что соответствует диэлектрической проницаемости трансформаторного масла, используемого в экспериментальной установке. Узел регистрации тока пучка представлял собой коллектор, соединенный с передающей линией с волновым сопротивлением 50 Ом.

Для регистрации импульсов напряжения в передающей линии рассчитывались интегралы r -компоненты напряженности электрического поля с координатой z , соответствующей расположению делителей U_2 , U_3 и U_4 в эксперименте. Кроме того, в ходе моделирования регистрировалось ускоряющее напряжение U_z – интеграл z -компоненты напряженности электрического поля в диоде от катода до анодной фольги на радиусе, равном радиусу катода. Ток пучка электронов регистрировался как на плоскости коллектора подсчетом количества электронов, так и в линии узла коллектора расчетом напряжения U_c .

Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов были получены осциллограммы токов электронного пучка и напряжений с емкостных делителей в случае вакуумной и газовой изоляции диода.

Тестирование работы программ и созданной геометрии расчетной области основывалось на сравнении результатов моделирования с результатами экспериментов при вакуумной изоляции диода и при заполнении азотом с давлением до 3 Торр. Моделирование показало хорошее совпадение с результатами экспериментов как по значению и длительности импульса тока пучка на коллектор, так и по виду осциллограмм напряжения на делителях U_3 и U_4 . Кроме того, получены данные по значению ускоряющего напряжения U_z в диоде и поведению распределения z -компоненты напряженности электрического поля в диоде, что представляет ценность для понимания процессов в диоде и не может быть измерено в эксперименте.

Большинство работ по исследованию пробоя в сильно неоднородном электрическом поле и формированию пучков убегающих электронов при развитии разряда выполнено при воздушном заполнении межэлектродного промежутка. В связи с этим, для численного моделирования выбраны данные, описывающие взаимодействие электронов с азотом. Критическое значение приведенной напряженности электрического поля (необходимой для перехода электронов в режим непрерывного ускорения) составляет $(E/P)_{\text{крит}} \sim 590 \text{ В/см/Торр}$.

Моделирование показало, что в первые 60 пс после начала импульса напряжения U_z на диоде у эмиссионной поверхности катода за счет ионизации газа эмиссионными электронами формируется проводящий слой, напряженность электрического поля в котором существенно ниже напряженности внешнего электрического поля (рис. 2). Электроны, как эмитированные с катода, так и появившиеся вблизи катода в результате ионизации газа, переходят в режим непрерывного ускорения, так как приведенное значение напряженности электрического поля у катода за счет неоднородности геометрии существенно (в несколько раз) выше критического значения.

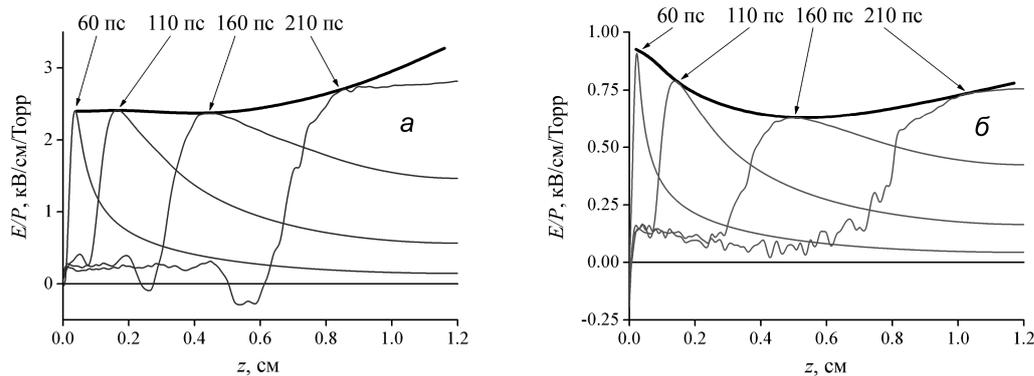


Рис. 2. Серые кривые – распределение z -компоненты приведенной напряженности электрического поля в диоде в различные моменты времени (числа над графиком указывают на моменты времени, отсчитываемые от начала импульса напряжения на диоде). Черная кривая – огибающая, определяющая максимальное значение напряженности электрического поля в диоде в различные моменты времени. Межэлектродное расстояние $d = 12 \text{ мм}$, $a - P = 30 \text{ Торр}$; $b - P = 100 \text{ Торр}$

При заполнении диода азотом при давлении 30 Торр максимальное значение приведенной напряженности электрического поля в диоде (находящееся перед проводящим слоем) составляет $\sim 2.5 \text{ кВ/см/Торр}$. При этом в переходной области (между проводящим слоем и точкой максимального значения приведенной напряженности электрического поля) формируется пучок убегающих электронов. Стоит отметить, что в течение всего времени формирования разряда, пока проводящий слой движется от катода к аноду, в диоде всегда есть место, где формируется пучок убегающих электронов, то есть где приведенная напряженность электрического поля $E/P > (E/P)_{\text{крит}}$ (рис. 2, a). Скорость движения проводящего слоя составляет $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ см/с}$, и за 240 пс промежуток длиной 1.2 см будет заполнен проводящим слоем, напряженность электрического поля во всем диоде будет ниже $(E/P)_{\text{крит}}$ и формирование пучка прекратится. Однако длительность пучка, регистрируемого за алюминиевой фольгой, толщина которой составляет 15 мкм, не превышает 120–150 пс. Это связано с тем, что электроны с энергией меньше 40 кэВ не способны пройти через такую фольгу, т.е. все электроны (в том числе и убегающие), стартовавшие с середины зазора. Таким образом, в этих условиях длительность пучка убегающих электронов при давлении азота 30 Торр ограничена толщиной алюминиевой фольги, разделяющей диод и узел регистрации пучка (оценка энергии отсечки дает значение $\sim 40 \text{ кэВ}$).

В случае, когда давление азота в диоде равно 100 Торр, пучок убегающих электронов также начинает формироваться вблизи катода вследствие неоднородности геометрии и увеличения напряженности электрического поля у катода. Однако максимальное значение напряженности электрического поля в диоде (в отличие от случая с давлением 30 Торр) резко падает. И к 160 пс становится сравнимым с $(E/P)_{\text{крит}}$ (рис. 2, b), что приводит к прекращению формирования пучка убегающих электронов или к существенному уменьшению вероятности перехода электронов в режим непрерывного ускорения. Длительность пучка убегающих электронов в данном случае ограничена временем $\sim 40\text{--}60 \text{ пс}$.

Заключение

Таким образом, в данной работе проведено экспериментальное и численное исследование формирования наносекундного высоковольтного разряда в азоте. Численная модель отлажена при сравнении результатов расчета в вакууме с экспериментом. Методом численного моделирования получена динамика развития пробоя и формирования пучка убегающих электронов при давлениях ниже атмосферного. Показано существенное различие в причинах ограничения длительности пучка убегающих электронов при формировании разряда в азоте при 30 и 100 Торр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baksht E.H., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A., and Tarasenko V.F. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – V. 42. – P. 185201.
2. Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // *ЖТФ.* – 2010. – Т. 80. – С. 51–59.
3. Тарасенко В.Ф., Рыбка Д.В., Бакшт Е.Х., Костыря И.Д., Ломаев М.И. // *Изв. вузов. Физика.* – 2007. – Т. 50. – С. 89–98.
4. Levko D., Tarasenko V.F., and Krasik Ya.E. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 112. – P. 073304.
5. Yatom S., Vekselman V., Gleizer J.Z., and Krasik Ya.E. // *J. Appl. Phys.* – 2011. – V. 109. – P. 073312.
6. Yatom S., Gleizer J.Z., Levko D., Vekselman V., Gurovich V., Hupf E., Hadas Y., and Krasik Ya.E. // *EPL.* – 2011. – V. 96. – P. 65001.
7. Shao T., Zhang Ch., Niu Z., Yan P., Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., and Shur'ko Yu.V. // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. – V. 98. – P. 021503.
8. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., Baksht E.Kh., Yan P., and Shut'ko Yu.V. // *Laser Part. Beam.* – 2012. – V. 30. – P. 369–378.
9. Месяц Г.А., Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А. // *Физика плазмы.* – 2012. – Т. 38. – С. 34–51.
10. Mesyats G.A., Reutova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., and Yalandin M.I. // *Laser Part. Beam.* – 2011. – V. 29. – P. 425–435.
11. Демкин В.П., Мельничук С.В., Борисов А.В., Бардин С.С. // *Изв. вузов. Физика.* – 2013. – Т. 56. – С. 115–116.
12. Иванов С.Н., Лисенков В.В. // *ЖТФ.* – 2010. – Т. 80. – С. 54–58.
13. Shklyayev V.A., Belomyttsev S.Ya., and Ryzhov V.V. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 112. – P. 113303.
14. Grishkov A.A., Artemov K.P., Belomyttsev S.Ya., Ryzhov V.V., Shklyayev V.A., Turchanovskii I.Yu. // *Plasma Physics Reports.* – 2009. – V. 35. – No. 9. – P. 779–784.
15. Baksht E.Kh., Belomyttsev S.Ya., Burachenko A.G., Ryzhov V.V., Tarasenko V.F., Shklyayev V.A. // *Tech. Phys.* – 2012. – V. 57. – P. 998–1002.
16. Lisenkov V.V., Shklyayev V.A. // *Tech. Phys. Lett.* – 2013. – V. 39. – P. 730–733.
17. Tarakanov V.P. // *User's manual for code Karat.* – Springfield, VA; Berkley Research Associates, Inc., 1992.
18. Verboncoeur J.P., Langdon A.B., and Gladd N.T. // *Comput. Phys. Commun.* – 1995. – V. 87. – P. 199–211.
19. Belomyttsev S.Ya., Grishkov A.A., Korovin S.D., Ryzhov V.V. // *Laser Part. Beam.* – 2003. – V. 21. – No. 4. – P. 561–565.
20. Grishkov A.A., Pegel I.V. // *Plasma Physics Reports.* – 2013. – V. 39. – P. 936–946.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

***Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

E-mail: BEN@loi.hcei.tsc.ru

Бакшт Евгений Хаимович, к.т.н., ст. науч. сотр. лаборатории оптических излучений;
Беломытцев Святослав Яковлевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. теоретической лаборатории;
Бураченко Александр Геннадьевич, инженер лаборатории оптических излучений;
Гришков Антон Андреевич, мл. науч. сотр. теоретической лаборатории;
Шкляев Валерий Александрович, мл. науч. сотр. теоретической лаборатории;
Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лабораторией оптических излучений.

E.KH. BAKSHT, S.YA. BELOMYTTSEV, A.G. BURACHENKO, A.A. GRISHKOV, V.A. SHKLYAEV, V.F. TARASENKO

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF NANOSECOND HIGH-VOLTAGE DISCHARGE FORMATION IN SHARPLY-NONUNIFORM ELECTRIC FIELD

The results of experimental (with a time resolution of ~ 100 ps) and numerical studies of breakdown development in nitrogen and helium at pressures below 1 atm in a diode with sharply-nonuniform electric field near the cathode are presented. A good agreement was obtained between experimental and calculated data of signals from the voltage divider in the transmission line and the e-beam current signal from the collector. Time dependences of the accelerating voltage at the diode and instant portraits of the strength distribution of z -component of the electric field in the diode were obtained as well in numerical simulation. The breakdown dynamics is presented in the paper.

Keywords: nanosecond high-voltage discharge, sharply-nonuniform electric field, runaway electrons, numerical simulation.

REFERENCES

1. Baksht E.H., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A., and Tarasenko V.F. (2009). Runaway-electron-preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(18), 185201.
2. Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., and Rybka D.V. (2010). High-pressure runaway-electron –preionized diffuse discharges in a nonuniform electric field. *Technical Physics*, 55(2), 210–218.
3. Tarasenko V.F., Rybka D.B., Baksht E.H., Kostyrya I.D., and Lomaev M.I. (2007). On the generation of supershort avalanche electron beams and x radiation during nanosecond discharges in dense gases (results and discussion). *Russian Physics Journal*, 50(9), 944–954.
4. Levko D., Tarasenko V.F., and Krasik Y.E. (2012). The physical phenomena accompanying the sub-nanosecond high-voltage pulsed discharge in nitrogen. *Journal of Applied Physics*, 112(7), 073304.
5. Yatom S., Vekselman V., Gleizer J.Z., and Krasik Ya.E. (2011). Space-and time-resolved characterization of nanosecond time scale discharge at pressurized gas. *Journal of Applied Physics*, 109(7), 073312.
6. Yatom S., Gleizer J.Z., Levko D., Vekselman V., Gurovich V., Hupf E., Hadas Y., and Krasik Y.E. (2011). Time-resolved investigation of nanosecond discharge in dense gas sustained by short and long high-voltage pulse. *EPL (Europhysics Letters)*, 96(6), 65001.
7. Shao T., Zhang C., Niu Z., Yan P., Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., and Shut'ko Y.V. (2011). Diffuse discharge, runaway electron, and X-ray in atmospheric pressure air in an inhomogeneous electrical field in repetitive pulsed modes. *Applied Physics Letters*, 98(2), 021503.
8. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., Baksht E.Kh., Yan P., and Shut'ko Yu.V. (2012). Repetitive nanosecond pulse discharge in a highly nonuniform electric field in atmospheric air: Xray emission and runaway electron generation. *Laser and Particle Beams*, 30(3), 369–378.
9. Mesyats G.A., Yalandin M.I., Reutova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., and Shunailov S.A. (2012). Picosecond runaway electron beams in air. *Plasma Physics Reports*, 38(1), 29–45.
10. Mesyats G.A., Reutova A.G., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., and Yalandin M.I. (2011). On the observed energy of runaway electron beams in air. *Laser and Particle Beams-Pulse Power and High Energy Densities*, 29(4), 425–435.
11. Demkin V.P., Mel'nichuk S.V., Borisov A.V., and Bardin S.S. (2013). Monte-Carlo calculation of the electron energy distribution function of a He-N₂ plasma of a high-voltage pulsed discharge. *Russian Physics Journal*, 56(4), 486–488.
12. Ivanov S.N. and Lisenkov V.V. (2010). Evolution of subnanosecond pulsed electric breakdown of gas gaps for uniform gas preionization. *Technical Physics*, 55(1), 53–57.
13. Shklyayev V.A., Belomyttsev S.Y., and Ryzhov V.V. (2012). Simulation of the formation of a runaway electron beam in an overvolted gas gap breakdown. *Journal of Applied Physics*, 112(11), 113303.
14. Grishkov A.A., Artemov K.P., Belomyttsev S.Y., Ryzhov V.V., Turchanovskii I.Y., and Shklyayev V.A. (2009). Study of the formation of a fast electron beam in a coaxial gas diode in the unlimited emission model. *Plasma Physics Reports*, 35(9), 779–784.
15. Baksht E.K., Belomyttsev S.Y., Burachenko A.G., Ryzhov V.V., Tarasenko V.F., and Shklyayev V.A. (2012). Experimental and numerical investigation of two mechanisms underlying runaway electron beam formation. *Technical Physics*, 57(7), 998–1002.
16. Lisenkov V.V. and Shklyayev V.A. (2013). Generation of accelerated electrons in a gas diode with hot channel. *Technical Physics Letters*, 39(8), 730–733.
17. Tarakanov V.P. *User's manual for code Karat*. Springfield, VA, Berkley Research Associates, Inc., 1992.
18. Verboncoeur J.P., Langdon A.B., and Gladd N.T. (1995). An object-oriented electromagnetic PIC code. *Comput. Phys. Commun.*, 87(1), 199–211.
19. Belomyttsev S.Ya., Grishkov A.A., Korovin S.D., and Ryzhov V.V. (2003) On the current of an annular electron beam with a virtual cathode in a drift tube. *Laser and Particles Beam*, 21(4), 561–565.
20. Grishkov A.A. and Pegel I.V. (2013). An annular high-current electron beam with an energy spread in a coaxial magnetically insulated diode. *Plasma Physics Reports*, 39(11), 936–946.