

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*,***

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ПРОБОЙ ГАЗА 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 и тока газонаполненного диода. На основе сравнения экспериментальных осциллограмм напряжения с расчетными осциллограммами в режиме короткого замыкания делается предположение о протекании значительного тока смещения в диоде в процессе развития пробоя.

Ключевые слова: *наносекундный высоковольтный разряд, резко-неоднородное электрическое поле, убегаящие электроны, численное моделирование.*

Наносекундный высоковольтный газовый разряд в газонаполненных диодах при высоких перенапряжениях на разрядном промежутке исследуется уже достаточно давно [1–6]. Интерес к исследованиям в этой области связан, прежде всего, с проблемой быстрой коммутации разрядного промежутка, а также с генерацией электронных пучков субнаносекундной длительности. Получено большое количество экспериментального материала о возбуждении подобных разрядов в разных газах при различных давлениях и межэлектродных зазорах. Тем не менее вопрос о влиянии пучка убегаящих электронов на развитие пробоя в газонаполненном диоде и более широко – о протекающих в диоде физических процессах во время развития пробоя на сегодняшний день до конца не решен. Дискуссия по этому вопросу открыта, и обсуждение проводится в работах различных исследовательских групп [7–15].

В последнее время появились работы [3, 8, 9, 13, 15], в которых исследование развития субнаносекундного пробоя проводится методом Particle-in-Cell (PIC). Данный численный метод (в отличие от других методов, используемых при моделировании разряда) позволяет подробно описывать динамику развития пробоя. Однако большинство используемых математических моделей [3, 9, 15] являются одномерными и, как следствие, электростатическими (для расчета распределения электрического поля используется уравнение Пуассона). При этом высокие скорости протекающих в газонаполненном диоде процессов требуют полной электромагнитной постановки задачи (в 2D-осесимметричной или в 3D-геометрии), как это было выполнено в [13].

Цель данной работы – экспериментально и численно методом PIC в электромагнитной постановке исследовать динамику развития пробоя газонаполненного диода при давлениях до 100 Торр.

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 напряжения в передающей линии составляла ~ 140 кВ. Фронт импульса напряжения 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 обеспечивался 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

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-02-00136 и 15-08-03983.

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 Гс/с).

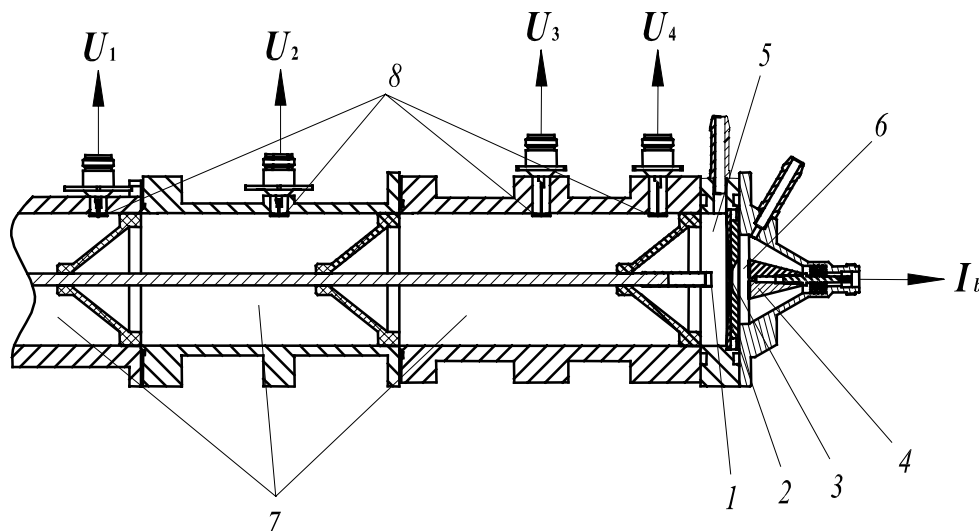


Рис. 1. Конструкция передающей линии и газонаполненного диода: 1 – катод; 2 – дифрагма; 3 – Al-фольга; 4 – коллектор; 5 – газонаполненный диод; 6 – дрейфовое пространство; 7 – передающая линия; 8 – емкостные делители

Численное моделирование проводилось с использованием 2.5D (2D3V) осесимметричных Particle-In-Cell кода ХООРІС [16], ранее неоднократно применявшегося для решения подобных задач [16–21].

Для регистрации импульсов напряжения в передающей линии рассчитывались интегралы r -компоненты напряженности электрического поля в сечениях с координатами, соответствующими расположению делителей U_2 , U_3 и U_4 в эксперименте. Кроме того, в ходе моделирования регистрировалось ускоряющее напряжение U_z в диоде. Ускоряющее напряжение U_z вычислялось как интеграл z -компоненты напряженности электрического поля в диоде от катода до анодной фольги на расстоянии от оси диода, равном радиусу катода.

Выбор граничных условий для запуска волны напряжения и модели эмиссии и проверка корректности этого выбора основывались на сравнении результатов моделирования с результатами экспериментов при вакуумной изоляции диода. Моделирование показало хорошее совпадение с результатами экспериментов как по значению и длительности импульса тока пучка на коллектор, так и по виду осциллограмм напряжения на емкостных делителях U_3 . Падающая волна напряжения в передающей линии получена путем экстраполяции части падающей волны напряжения, регистрируемой вторым емкостным делителем.

На рис. 2, а и б представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных напряжений на третьем делителе напряжения и токов электронного пучка при давлении азота 100 Торр, а также напряжение на разрядном промежутке U_z . Видно хорошее соответствие экспериментальных данных и данных, полученных в численном моделировании. Это говорит о том, что численная модель адекватно описывает происходящие в газонаполненном диоде процессы.

Динамику развития пробоя газового промежутка отражает ток, протекающий в газонаполненном диоде. На рис. 2, в представлен расчетный ток диода и ток зарядки межэлектродной емкости диода в режиме холостого хода. Видно, что ток, протекающий в диоде и обусловленный развитием пробоя, достигает своего максимума в течение ~ 200 пс, что согласуется с расчетами, проведенными в [21].

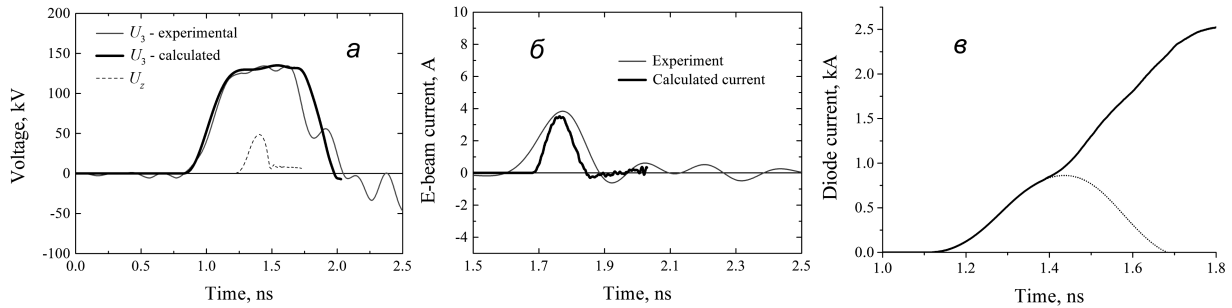


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная осциллограммы напряжения на третьем емкостном делителе напряжения в передающей линии и расчетное напряжение на разрядном промежутке U_z (а). Экспериментальная и расчетная осциллограммы токов коллектора (б). Расчетный ток в диоде (сплошная линия) и расчетный ток зарядки межэлектродной емкости в режиме холостого хода (в). Межэлектродное расстояние $d = 12$ мм, давление азота 100 Торр

К особенностям развития пробоя в описанных условиях стоит отнести и тот факт, что при давлении азота 100 Торр максимальное значение ускоряющего напряжения, полученное в численном моделировании, не превышает 50 кВ (рис. 2, а). Такое низкое значение напряжения, реализуемого в диоде, требует своего объяснения. На рис. 3 представлены экспериментальные осциллограммы напряжения, регистрируемого с третьего делителя при давлении азота 100 Торр и межэлектродном зазоре 12 мм, а также расчет напряжения в передающей линии в месте расположения третьего делителя для случая холостого хода и короткого замыкания. Близость хода экспериментальных осциллограмм напряжения и расчетной осциллограммы для случая короткого замыкания позволяет предположить, что в процессе развития пробоя в газонаполненном диоде протекает ток, близкий по значению к току короткого замыкания диода. Мы предполагаем, что это связано с наличием значительного тока смещения, замыкающего ток проводимости, протекающий через расширяющуюся к аноду плазменную область [21].

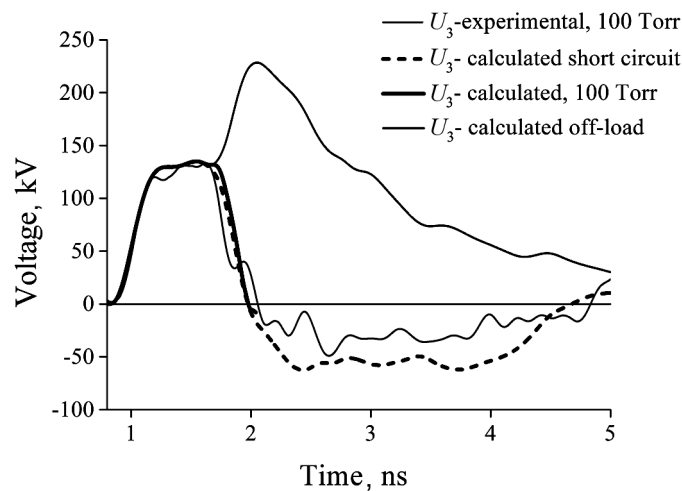


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная осциллограммы напряжения с третьего делителя в передающей линии U_3 при давлении азота в газонаполненном диоде 100 Торр, а также расчетные осциллограммы в случае холостого хода и короткого замыкания

Таким образом, в данной работе проведено экспериментальное и численное исследование развития пробоя в азоте в диоде с резко-неоднородным электрическим полем.

Сравнение результатов численного моделирования с результатами эксперимента показало хорошее совпадение как по показаниям напряжения на третьем делителе в передающей линии, так и по току пучка электронов, регистрируемому коллектором.

В численном моделировании получена динамика развития пробоя и формирования пучка убегающих электронов при давлениях ниже атмосферного. Получены данные по динамике ускоряющего напряжения в диоде.

Сделано предположение о наличии в диоде существенного тока смещения, замыкающего ток проводимости, который протекает через распространяющуюся к аноду плазменную область. Впервые данное предположение строится на сравнении экспериментальных осциллограмм с данными, полученными в численном моделировании в режиме короткого замыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meek J.M. and Craggs J.D. *Electrical Breakdown of Gases*. – New York: Oxford University Press, 1953.
2. Gurevich A.V., Milikh G.A., and Roussel-Dupre R. // *Phys. Lett. A*. – 1992. – V. 165. – P. 463–468.
3. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // *Phys. Scr.* – 2005. – V. 72. – No. 1. – P. 41–67.
4. Mesyats G.A., Yalandin M.I. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2009. – V. 37. – No. 6. – P. 785–789.
5. Raizer Yu.P. *Gas Discharge Physics*. – Berlin: Springer Verlag, 1991.
6. Korolev Yu.D., Mesyats G.A. *Physics of Pulsed Breakdown in Gases*. – Yekaterinburg: Ural Division of the Russian Academy of Science, 1998.
7. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., et al. // *J. Appl. Phys.* – 2013. – V. 113. – No. 9. – P. 093301.
8. Беломытцев С.Я., Романченко И.В., Рыжов В.В., Шкляев В.А. // *Письма в ЖТФ*. – 2008. – Т. 34. – № 9. – С. 10–16.
9. Levko D., Yatom S., Vekselman V., Gleizer J.Z., et al. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 111. – P. 013303.
10. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // *Plasma Devices and Operations*. – 2005. – V. 13. – No. 4. – P. 231–279.
11. Mesyats G.A., Yalandin M.I. // *Dokl. Phys.* – 2009. – V. 54. – P. 63.
12. Barenholtz S.A., Mesyats G.A., Tsventoukh M.M., Uimanov I.V. // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – V. 100. – P. 134102.
13. Shklyayev V.A., Belomyttsev S.Ya., Ryzhov V.V. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 112. – P. 113303.
14. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., et al. // *J. Appl. Phys.* – 2013. – V. 113. – No. 9. – P. 093301.
15. Levko D., Krasik Ya. E. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 112. – P. 113302.
16. Verboncoeur J.P., Langdon A.B., Gladd N.T. // *Comput. Phys. Commun.* – 1995. – V. 87. – P. 199–211.
17. Бакшт Е.Х., Беломытцев С.Я., Бураченко А.Г. и др. // *ЖТФ*. – 2012. – Т. 82. – № 7. – С. 102–106.
18. Koh W.S., Ang L.K. // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 90. – P. 141503.
19. Stoltz P.H., Verboncoeur J.P., Cohen R.H., et al. // *Phys. Plasmas*. – 2006. – V. 13. – P. 056702.
20. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., et al. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 111. – P. 023304.
21. Бакшт Е.Х., Беломытцев С.Я., Бураченко А.Г. и др. // *Изв. вузов. Физика*. – 2014. – Т. 57. – № 12/2. – С. 121–125.

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

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

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

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

Поступила в редакцию 03.08.15.

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

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

SUBNANOSECOND HIGH-VOLTAGE GAS BREAKDOWN 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 gasfilled diode and the diode current were obtained as well in the numerical simulation. Basing on the comparison of the experimental voltage waveforms with the waveforms calculated in the short-circuit mode, it is supposed that in the process of breakdown development, the essential displacement current is flowing in the diode.

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

REFERENCES

1. Meek J. M., Craggs J. D. *Electrical Breakdown of Gases*. New York, Oxford University Press, 1953.
2. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. (1992). Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Physics Letters A*, 165(5), 463–468.
3. Tarasenko V. F., Yakovlenko S. I. (2005). High-power subnanosecond beams of runaway electrons generated in dense gases. *Physica scripta*, 72(1), 41–67.
4. Mesyats G. A., Yalandin M. I. (2009) High-power picosecond electronics. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 37(6), 785–789.
5. Raizer Yu. P. *Gas Discharge Physics*. Berlin, Springer-Verlag, 1991, 449 p.
6. Korolev Yu. D., Mesyats G. A. *Physics of Pulsed Breakdown in Gases*. Yekaterinburg, Ural Division of the Russian Academy of Science, 1998, 275 p.
7. Shao T., Tarasenko V. F., Zhang Ch., et al. (2013). Diffuse discharge produced by repetitive nanosecond pulses in open air, nitrogen, and helium. *Journal of Applied Physics*, 113(9), 093301.
8. Belomyttsev S. Y., Romanchenko I. V., Ryzhov V. V., Shklyayev V. A. (2008). Initial stage of gas discharge in an inhomogeneous electric field. *Technical Physics Letters*, 34(5), 367–369.
9. Levko D., Yatom S., Vekselman V., et al. (2012). Numerical simulations of runaway electron generation in pressurized gases. *Journal of Applied Physics*, 111(1), 013303.
10. Tarasenko V. F., Yakovlenko S. I. (2005). High-power subnanosecond beams of runaway electrons and volume discharge formation in gases at atmospheric pressure. *Plasma Devices and Operations*, 13(4), 231–279.
11. Mesyats G. A., Yalandin M. I. (2009). Field emission and runaway electrons in dense gas. *Doklady Physics*, 54(2), 63–66.
12. Barendolts S. A., Mesyats G. A., Tsvetoukh M.M., Uimanov I. V. (2012). On the generation and disruption of a picosecond runaway electron beam during the breakdown of an atmospheric-pressure gas gap. *Applied Physics Letters*, 100(13), 134102.
13. Shklyayev V. A., Belomyttsev S. Y., 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. Shao T., Tarasenko V. F., Zhang Ch., et al. (2013). Diffuse discharge produced by repetitive nanosecond pulses in open air, nitrogen, and helium. *Journal of Applied Physics*, 113(9), 093301.
15. Levko D., Krasik Y. E. (2012). Particle-in-cell simulations of the runaway breakdown of nitrogen. *Journal of Applied Physics*, 112(11), 113302.
16. Verboncoeur J. P., Langdon A. B., & Gladd N. T. (1995). An object-oriented electromagnetic PIC code. *Computer Physics Communications*, 87(1), 199–211.
17. Baksht E. Kh., Belomyttsev S. Y., Burachenko A. G., Ryzhov V. V., Tarasenko V. F., Shklyayev V. A. (2012). Experimental and numerical investigation of two mechanisms underlying runaway electron beam formation. *Technical Physics*, 57(7), 998–1002.
18. Koh W. S., Ang L. K. (2007). Two-dimensional space-charge-limited flows in a crossed-field gap. *Applied Physics Letters*, 90(14), 141503.
19. Stoltz P. H., Verboncoeur J. P., Cohen R. H., Molvik A. W., Vay J. L., Veitzer S. A. (2006). Modeling ion-induced electrons in the High Current Experiment. *Physics of Plasmas*, 13(5), 056702.
20. Shao T., Tarasenko V. F., Zhang Ch., et al. (2012). Spark discharge formation in an inhomogeneous electric field under conditions of runaway electron generation. *Journal of Applied Physics*, 111(2), 023304.
21. Baksht E. Kh., Belomyttsev S. Y., Burachenko A. G., Grishkov A. A., Shklyayev V. A., Tarasenko V. F. (2014). Experimental and numerical study of nanosecond high-voltage discharge formation in sharply-nonuniform electric field. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 57(12/2), 121–125.