

Численное моделирование развития пробоя в условиях пространственного ограничения развития плазменного канала

*В.А. Шкляев**, *А.А. Гришков*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**shklyaev@to.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования пробоя в газе в осесимметричной постановке в условиях неоднородного электрического поля в геометрии острей-плоскость при различных условиях, ограничивающих развитие разряда в поперечном направлении. Для ограничения разряда использовалась диэлектрическая трубка и продольное ведущее магнитное поле разной амплитуды. Моделирование показало, что в этих условиях ток быстрых электронов на коллектор может быть усилен во много раз, а энергия электронов, поступающих на коллектор, может быть выше, чем энергия, соответствующая амплитуде приложенного напряжения. Увеличение энергии обусловлено тем, что пучок убегающих электронов формируется и развивается в усиленном электрическом поле перед плазменным каналом, который при ограничении диэлектрической трубкой или магнитным полем в данных условиях может рассматриваться как продолжение тонкостенного катода.

Ключевые слова: острей-плоскость, пробой, электронный пучок, убегающие электроны, численное моделирование.

1. Введение

В настоящее время одной из актуальных областей исследования газовых разрядов в широком диапазоне давлений и сортов газов является тематика пучков убегающих электронов [1–8]. Несмотря на то, что пучки убегающих электронов могут быть использованы как эффективный инструмент для получения низкотемпературной плазмы, для воздействия на различные поверхности и среды с целью их модификации или изменения их свойств, существуют объективные проблемы для достижения высоких энергий и высоких плотностей тока для пучка убегающих электронов. Одним из способов повышения плотности тока и плотности мощности пучков убегающих электронов может быть их фокусировка посредством формирования канала разряда заданной формы, например, ограничивая канал разряда диэлектрической трубкой или магнитным полем [4, 9–15]. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования пробоя в газе в осесимметричной постановке в условиях неоднородного электрического поля в геометрии острей-плоскость при различных условиях, ограничивающих развитие разряда в поперечном направлении. В качестве геометрии для моделирования выбраны условия проведённых ранее экспериментов [15] по получению пучков убегающих электронов при ограничении разряда внешним ведущим магнитным полем разной амплитуды. Целью данной работы являлся расчёт параметров пучка убегающих электронов и исследование влияния ограничения разряда на параметры тока и энергии пучка убегающих электронов на коллекторе.

2. Численное моделирование

Известно, что развитие пробоя в резко неоднородном электрическом поле зачастую связано с появлением убегающих электронов, которые стимулируют быстрое движение фронта плазменного канала (волны ионизации), создавая предварительную ионизацию межэлектродного промежутка [1, 5, 6]. При этом, развитие пробоя происходит как в продольном, так и поперечном направлении (вдоль осей OZ и OR). В условиях, когда межэлектродное расстояние вдоль оси OR (разница между радиусами анода и катода) меньше, чем вдоль оси OZ (расстояние между эмитирующим торцом катода и плоским анодом), то развитие плазменного канала наиболее вероятно будет происходить вдоль оси

0R. Для того чтобы ограничить развитие плазменного канала вдоль оси 0R можно использовать сильное магнитное поле, на уровне единиц Тесла, направленное вдоль оси 0Z, либо использовать канал, ограниченный диэлектриком [4, 9–15]. В проведённом моделировании в качестве расчётной геометрии использовались параметры экспериментальных исследований [15], схема которых представлена на Рис. 1.

Моделирование проводилось при помощи кода хоорис [16], который ранее был многократно успешно использован для моделирования пробоя в газах высокого и низкого давления [4–9] и был модифицирован для подобных задач. В проведённых расчётах в качестве плоского анода для пучка убегających электронов использовалось модельное граничное условие «фольга», которая отсекала электроны с энергией ниже 1 кэВ, а для более высокоэнергетических электронов имела прозрачность 100%.

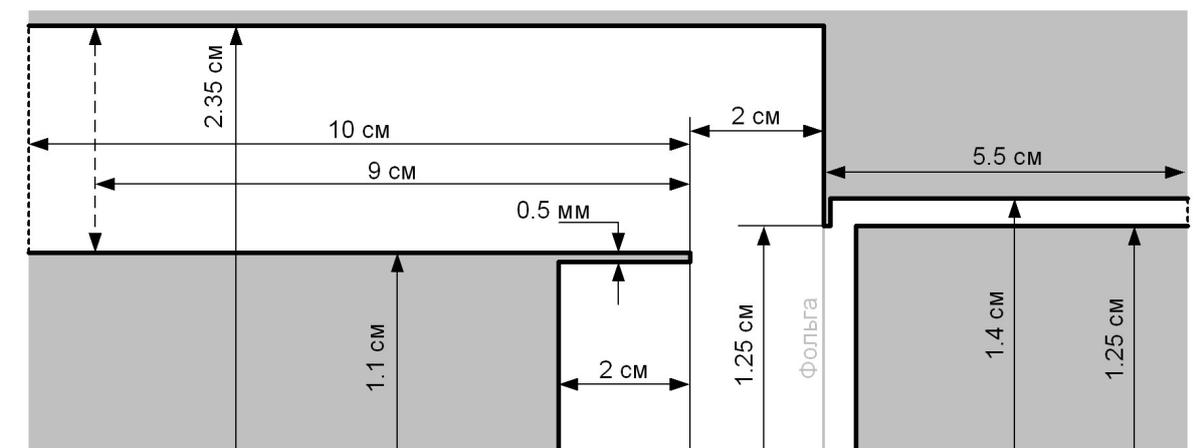


Рис. 1. Расчетная геометрия в осесимметричной постановке.

Катод радиусом 1.1 см являлся продолжением передающей линии, импеданс которой составлял 45.5 Ом. Межэлектродный зазор длиной 2 см был представлен в виде тонкостенной трубки толщиной 0.5 мм и плоского анода. После прохождения «фольги» электроны попадали на коллектор радиусом 1.25 см, являющимся центральным проводником линии с импедансом 6.8 Ом. Волна напряжения подавалась с левой границы (пунктир на Рис. 1). Фронт импульса напряжения составлял ~ 1 нс, далее напряжение оставалось неизменным на протяжении ~ 1.5 нс. Такой импульс напряжения использовался как модельный. Измерение напряжения проходило в трех местах: U_r – на расстоянии 9 см от торца катода; U_z – вдоль оси 0Z от торца катода до плоского анода; U_c – в линии коллектора. Эмиссия электронов с катода стартовала только при достижении максимального напряжения на U_z . Моделирование проводилось при амплитуде падающего напряжения ~ 50 кВ и давлении 250 Торр. В расчётах магнитное поле задавалось однородным вдоль оси 0Z с амплитудами 1–5 Тл.

3. Результаты

На Рис. 2 приведены расчетные осциллограммы импульсов напряжения U_r и U_z в различных условиях. В качестве калибровочного расчёта использовались условия холостого хода, осциллограммы для которого представлены кривой 1. Кривая 5 соответствует условиям, когда развитие пробоя было ничем неограниченно. Из осциллограмм видно, что в этом случае наблюдается максимальное падение как «продольного», так и «поперечного» напряжения (эти значения рассчитывались как интеграл соответствующей компоненты электрического поля вдоль продольной или поперечной осей). В соответствии с

разработанной ранее моделью «движущегося катода» [5] данный результат легко объясняется развитием большой амплитуды тока смещения в связи с изменением геометрии промежутка и заполнением его проводящей плазмой. Кривые 3 и 4 на Рис. 2 соответствуют условиям развития разряда в сильном ведущем (B_z) магнитном поле 5 Тл и 1 Тл, соответственно. Обращает на себя внимание гораздо меньшее падение напряжения в силу относительной компактности формирующегося канала. Наименьшее падение напряжения на промежутке, как в продольном, так и в поперечном направлении наблюдается при ограничении пробоя диэлектрической трубкой, внутренний радиус которой равен внешнему радиусу катода – кривая 2 на Рис. 2.

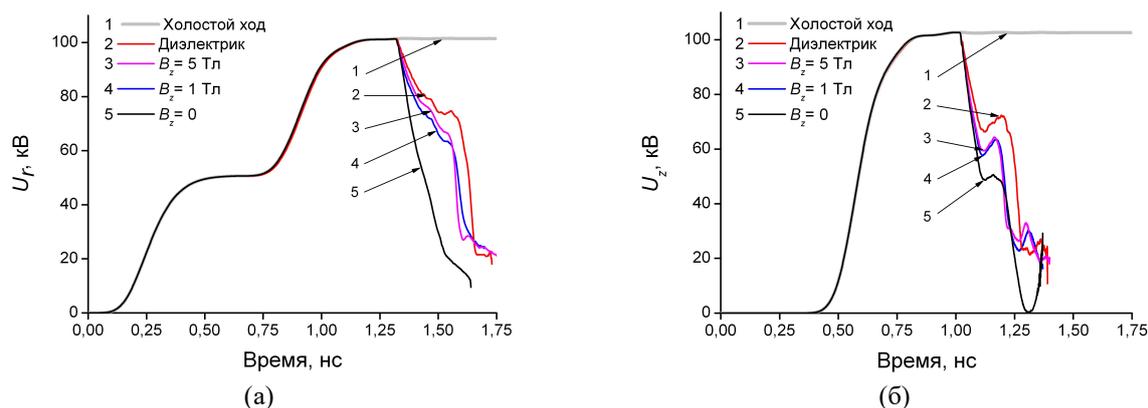


Рис. 2. Осциллограммы напряжения в расчётной области, а) напряжение в линии U_r , б) – напряжение в диоде U_z .

Ток электронов и спектр электронов измерялись на коллекторе. Причем, ток электронов вычислялся как отношение напряжения U_c , измеренного в линии коллектора, к импедансу линии коллектора (Рис. 3а). Хорошо видно, что при ограничении разряда ведущим магнитным полем ток быстрых электронов на коллектор усиливается многократно. В отсутствии магнитного поля амплитуда тока пука убегающих электронов на коллекторе составляет порядка ~ 50 А, а в условиях ограничения разряда магнитным полем амплитуда тока составляет 150 А и более. В случае, когда магнитное поле отсутствует ($B_z = 0$), значительная доля быстрых электронов уходит на боковые стенки камеры и не попадает на фольгу и в тракт регистрации. В случае, когда для ограничения развития пробоя вдоль оси OR использовалась диэлектрическая трубка, значительная доля электронов попадала на диэлектрик и, соответственно, также не доходила до фольги и до тракта регистрации.

Отдельного внимания заслуживает энергетический спектр электронов, измеренный на коллекторе (Рис. 3б). Если при отсутствии магнитного поля или диэлектрической трубки максимальное значение энергии составляло ~ 110 – 120 кэВ, что согласуется с режимом холостого хода и «вакуумным ускорением» в газовом диоде [17], когда убегающие электроны имеют энергию сравнимую с удвоенным значением амплитуды напряжения в бегущей волне, то при попытке ограничить развитие пробоя вдоль оси OR, в спектре появляются электроны с энергией, значительно превышающей это значение. Так при напряжении в бегущей волне 50 кВ в энергетическом спектре в разряде, ограниченном магнитным полем или диэлектрической трубкой появляются электроны с энергией ~ 140 – 145 кэВ. Такое увеличение энергии связано с тем, что пучок убегающих электронов всегда находится перед плазменным каналом, который в случае ограничения его диэлектрической трубкой или магнитным полем в данных может рассматриваться как продолжение

тонкостенного катода. В связи с этим, усиление напряженности электрического поля перед плазменным каналом может быть существенным.

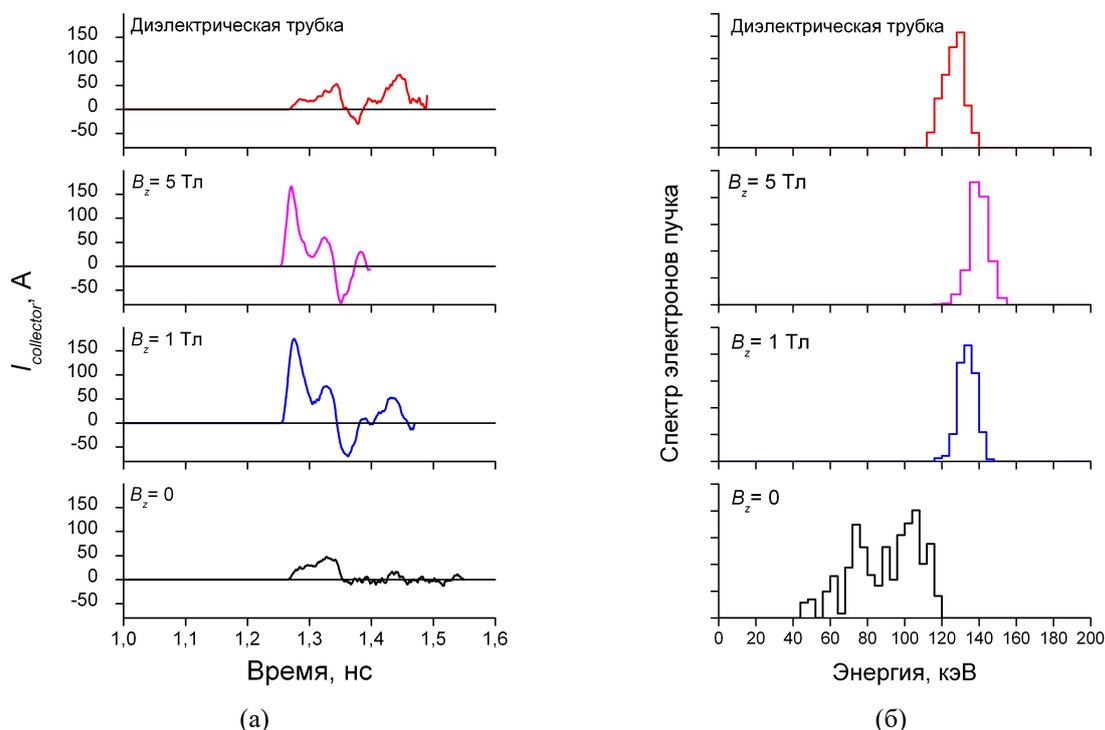


Рис. 3. Ток электронов на коллектор – (а), спектр электронов – (б) в различных конфигурация расчётной области.

На Рис. 4 представлен фазовый портрет пучка (положение частиц в пространстве координат и импульсов) и приведены два случая распределения электрического поля по оси катода в случае холодного диода и в момент формирования пучка убегающих электронов. Из Рис. 4 видно, что сгусток быстрых электронов в области, где напряженность электрического поля (сплошная кривая) увеличена почти в 1.5 раза по сравнению с полем «холодного» диода (пунктирная кривая).

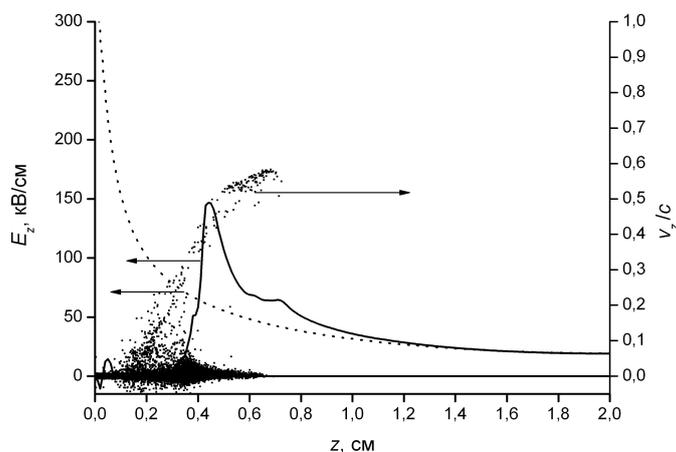


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля и фазовый протрет электронов.

Поскольку эти электроны всегда движутся в усиленном поле, их энергия начинает существенно превышать приложенное напряжение. Такая ситуация возможна только когда

плазменный канал, следующий за волной ионизации, можно представить в виде иглы или тонкостенной трубки, которая за счёт малой кривизны значительно усиливает напряженность электрического поля в своей окрестности.

4. Заключение

Таким образом в работе было исследовано несколько различных режимов формирования пучка убегающих электронов в осесимметричной постановке в геометрии острие-плоскость при различных условиях, ограничивающих развитие разряда в поперечном направлении. Моделирование показало, что в зависимости от выбора способов ограничения разряда как напряжения на диоде, так и ток быстрых электронов на коллектор и энергия этих электронов демонстрируют разное поведение. Так ток убегающих электронов может быть усилен во много раз, а энергия электронов, поступающих на коллектор, может быть выше амплитуды приложенного напряжения. Увеличение энергии обусловлено тем, что в случае ограничения разряда пучок убегающих электронов всегда находится перед плазменным каналом, который при ограничении диэлектрической трубкой или магнитным полем выступает как продолжение тонкостенного катода и приводит к кратному росту энергии электронов. Данную работу можно считать подготовительным этапом для дальнейших исследований в области ограничения разряда и сравнению полученных результатов с реальными условиями будущих экспериментов.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FWRM-2021-0007.

5. Литература

- [1] V. Tarasenko, Runaway electrons in diffuse gas discharges, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. **29**, 034001, 2020, doi: 10.1088/1361-6595/ab5c57
- [2] G.A. Mesyats, M.I. Yalandin, N.M. Zubarev, A.G. Sadykova, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.R. Ulmaskulov, O.V. Zubareva, A.V. Kozyrev, N.S. Semeniuk, How short is the runaway electron flow in an air electrode gap?, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **116**, 063501, 2020, doi: 10.1063/1.5143486
- [3] T. Shao, R. Wang, C. Zhang, P. Yan., Atmospheric-pressure pulsed discharges and plasmas: mechanism, characteristics and applications, *High Voltage*, vol. **3**, 14, 2018, doi: 10.1049/hve.2016.0014
- [4] S.Y. Belomytsev, A.A. Grishkov, V.A. Shklyayev, V.V. Ryzhov., Current in a pulsed gas breakdown at a highly inhomogeneous electric field, *J. Appl. Phys.*, vol. **123**, 043309 2018, doi: 10.1063/1.5008820
- [5] S.Ya. Belomytsev, A.A. Grishkov, V.A. Shklyayev, V.V. Ryzhov, Effect of the ionization wave velocity on the current and voltage of a gas-filled diode, *JAP*, vol. **123**, 203302, 2018, doi: 10.1063/1.5026030
- [6] Д.В. Белоплатов, А.А. Гришков, Д.А. Сорокин, В.А. Шкляев, Экспериментальное исследование и численное моделирование пробоя промежутка с резко неоднородным распределением электрического поля, *Известия высших учебных заведений. Физика*, том **62**, 136, 2021, doi: 10.17223/00213411/64/2/136
- [7] S.N. Ivanov, V.A. Shklyayev, A.A. Grishkov, Study of the ionization processes at the delay stage of the subnanosecond discharge in high-pressure nitrogen, *Journal of Physics Conference Series*, vol. **1115**, 02203, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1115/2/022038

-
- [8] A.A. Grishkov, Y.D. Korolev, and V.A. Shklyayev, Monte-Carlo simulation for development of electron avalanches in nitrogen at moderate and high reduced electric field, *Physics of Plasmas*, vol. **27**, 103504, 2020, doi: 10.1063/5.0021194
- [9] G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, Subnanosecond breakdown of air-insulated coaxial line initiated by runaway electrons in the presence of a strong axial magnetic field, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. **2064**, 012003, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012003
- [10] G.A. Mesyats, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, Runaway electron flows in magnetized coaxial gas diodes, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. **2064**, 012006, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012006
- [11] L.N. Lobanov, G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, Disk-Shaped Bunch of Runaway Electrons Formed in a Magnetized Air Diode, *IEEE Electron Device Letters*, vol. **44**, 1748, 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3301867
- [12] М.А. Гашков, Н.М. Зубарев, О.В. Зубарева, Г.А. Месяц, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, Компрессия потока убегающих электронов в воздушном зазоре с неоднородным магнитным полем, *Письма в ЖЭТФ*, том **113**, 370, 2021, doi: 10.31857/S1234567821060033
- [13] G.A. Mesyats, E.A. Osipenko, K.A. Sharypov, V.G. Shpak, S.A. Shunailov, M.I. Yalandin, and N.M. Zubarev, An Ultra-Short Dense Paraxial Bunch of Sub-Relativistic Runaway Electrons, *IEEE Electron Device Letters*, vol. **43**, 627, 2022, doi: 10.1109/LED.2022.3155173
- [14] K. Sharypov, E. Osipenko, V. Shpak, S. Shunailov, M. Yalandin, N. Zubarev, Parameters of a paraxial magnetized bunch of runaway electrons, 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, Russia, 566, 2022, doi: 10.56761/EFRE2022.S5-P-031801
- [15] G. Mesyats; V. Rostov, K. Sharypov, V. Shpak, S. Shunailov, M. Yalandin, N. Zubarev, Emission Features and Structure of an Electron Beam versus Gas Pressure and Magnetic Field in a Cold-Cathode Coaxial Diode, *Electronics*, **11**, 248, 2022, doi: 10.3390/electronics11020248
- [16] J.P. Verboncoeur, A.B. Langdon, and N.T. Gladd, An object-oriented electromagnetic PIC code, *Comput. Phys. Commun.*, vol. **87**, 1995, doi: 10.1016/0010-4655(94)00173-Y
- [17] Г.А. Месяц, В.Г. Шпак, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин, Источник электронов и режим ускорения пикосекундного пучка в газовом диоде с неоднородным полем, *Письма в ЖТФ*, том **34**, 4, 2008.