

Искажения электрического сигнала с токового шунта при высоковольтном наносекундном разряде в газовых и вакуумных диодах

М.И. Ломаев^{1,2,}*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

**lomaev@loi.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Статья посвящена выявлению причин появления искажений формы импульсов разрядного тока, регистрируемых токовым шунтом, при генерации электронного пучка в высоковольтном наносекундном разряде в вакуумных и газовых диодах. Искажения на осциллограмме импульса тока появляются в случае, когда осуществляется одновременная регистрация импульсов тока разряда токовым шунтом и тока пучка ускоренных электронов, регистрируемых токовым коллектором, размещенным за заземленным анодом, изготовленным из алюминиевой фольги толщиной, не достаточной для полного поглощения электронов пучка при ее прохождении. Было установлено, что причиной появления указанных искажений является падение напряжения на индуктивности токового шунта при протекании наведенного тока, индуцированного, в соответствии с теоремой Шокли-Рамо, движением высокоэнергичных электронов пучка вблизи заземленного анода.

Ключевые слова: высоковольтный наносекундный разряд, вакуумный и газовый диод, электронный пучок, активное и реактивное сопротивление.

1. Введение

Искажения формы импульсов тока через разрядный промежуток, регистрируемых токовым шунтом, наблюдались при одновременном измерении тока через разрядный промежуток и тока пучка электронов, генерируемого при высоковольтном наносекундном разряде в вакуумных и газовых диодах. Важной особенностью указанных разрядов, как с научной, так и с практической точек зрения, является эффект кумуляции (самофокусировки) электронного пучка, формируемого в данных условиях. На практике это может быть использовано для возбуждения люминесценции кристаллов [1, 2], получения мощного излучения в терагерцовом диапазоне частот [3], в областях радиационной химии и физики твердого тела [4], при изучении вещества при повышенном давлении, в термоядерных исследованиях [5] и других областях. Важно отметить, что эффект кумуляции реализуется не только за счет собственного магнитного поля в релятивистских электронных пучках при токах десятки-сотни кА [6], но и при токах до единиц кА [3, 7–9], что недостаточно для самофокусировки собственным магнитным полем. Поиск возможных физических причин кумуляции пучка электронов при данных условиях предполагает регистрацию временного хода одновременно нескольких наиболее важных параметров – падения напряжения на диоде, тока через разрядный промежуток и тока пучка электронов. При одновременном использовании традиционных способов регистрации – малоиндуктивных токовых шунтов с полосой пропускания до 5 ГГц, выполненных из чип-резисторов и коллекторов с временным разрешением до десятков пикосекунд [10], возникает указанная выше проблема искажения сигнала с токового шунта.

Целью настоящей работы было выявление физической причины формирования искажений формы импульсов тока через разрядный промежуток при одновременном использовании токового шунта, оснащенного токоприемной площадкой, выполненной из фольги, частично прозрачной для электронов пучка, и коллектора, установленного за фольгой для регистрации импульса тока пучка электронов, не поглощенных фольгой.

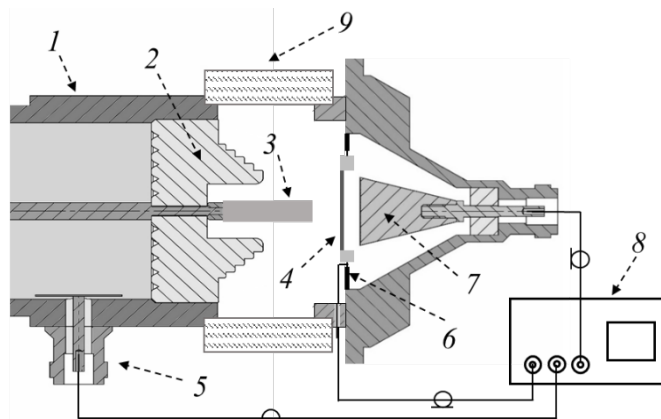


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор высокого напряжения РАДАН-220; 2 – изолятор; 3 – трубчатый катод диаметром 4 мм; 4 – заземленный анод, выполненный из алюминиевой фольги; 5 – делитель напряжения; 6 – токовый шунт; 7 – коллектор; 8 – осциллограф. Межэлектродное расстояние – 2.7 мм; давление воздуха в разрядной камере: $10\text{--}10^{-5}$ Торр.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В ее состав входили: высоковольтный импульсный генератор РАДАН-220 [11], формировавший импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой в падающей волне до 120 кВ, длительностью фронта и длительностью на полувысоте 0.5 нс и 2 нс, соответственно; газовый/вакуумный диод, система откачки и напуска рабочего газа, в качестве которого использовался воздух; система регистрации импульсов напряжения, тока через разрядный промежуток и тока пучка электронов. Описание емкостного делителя напряжения, токового шунта и коллектора, использовавшихся в эксперименте, приведено в [10]. Временное разрешение коллектора при диаметре приемной части 20 мм составляло ~ 80 пс. Давление остаточного воздуха в диоде изменялось в диапазоне от 10 до $1 \cdot 10^{-5}$ Торр. Оптимальная с точки зрения реализации эффекта кумуляции пучка электронов величина зазора между электродами составляла 2.7 мм. Импульсы напряжения подавались на потенциальный катод 3, выполненный в виде трубки диаметром 4 мм, изготовленной из нержавеющей стали толщиной 100 мкм (Рис. 1). В качестве заземленного анода 4 выступали алюминиевые фольги толщиной 55 мкм и 275 мкм. При изменении толщины фильтра от 55 до 275 мкм амплитуда тока пучка уменьшалась более, чем на два порядка величины. Для регистрации электрических импульсов использовались осциллограф KeySight DSO-X6004A с полосой пропускания 6 ГГц, радиочастотные кабели 5D-FB и аттенюаторы Barth Electronics 142-NM.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В работе анализировались сигналы с токового шунта и коллектора в случаях, когда электроны пучка проходили или поглощались алюминиевой фольгой при ее толщине, соответственно, 55 мкм и 275 мкм (Рис. 2). По данным [12], длина пробега электрона в алюминии, равная 275 мкм, соответствует энергии электрона ≈ 240 кэВ. При этом измеренные в эксперименте амплитуды импульсов напряжения на диоде не превышали 220 кВ. Разряд в диоде зажигался при давлении воздуха 0.2 Торр, оптимальном для реализации эффекта самофокусировки пучка электронов. Из рисунка 2 следует, что, во-первых, алюминиевая фольга толщиной 275 мкм практически полностью поглощает электроны пучка. Во-вторых, при уменьшении толщины фольги до 55 мкм амплитуда тока пучка, регистрируемого за фольгой, возрастает более, чем на два порядка величины. При этом сигнал с токового шунта был сильно искажен относительно случая полного поглощения

электронов пучка заземленным анодом. Регистрируемая осциллограмма тока через разрядный промежуток при толщине фольги 55 мкм характерна, во-первых, увеличением амплитудного значения сигнала примерно на порядок величины. Во-вторых, на сигнал падения напряжения на активной составляющей сопротивления шунта, соответствующий отрицательной полярности импульса напряжения, накладывается значительная знакопеременная составляющая. Для удобства сопоставления временной формы импульсов (2), (4) на рис. 2 данные для кривой (4) тока через разрядной промежуток при толщине фольги 275 мкм были умножены на 10.

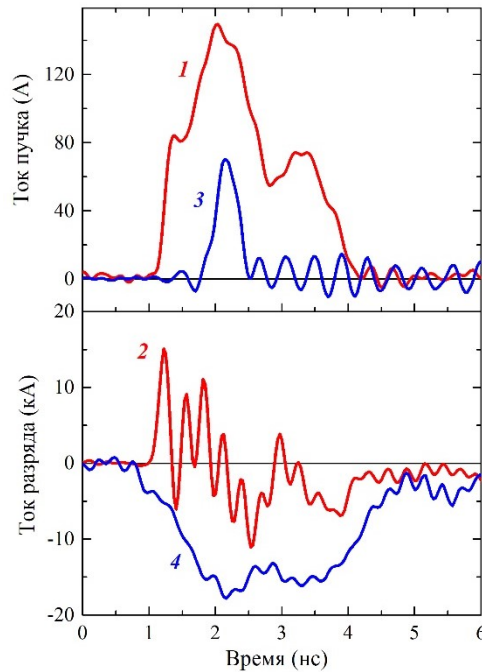


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока пучка (1), (3) и тока через разрядный промежуток (2), (4). Толщина заземленного анода - алюминиевой фольги: 55 мкм – (1), (2); 275 мкм – (3), (4). Данные для кривых (3) и (4) были умножены на 300 и 10, соответственно. Давление воздуха в разрядной камере: 0.2 Торр.

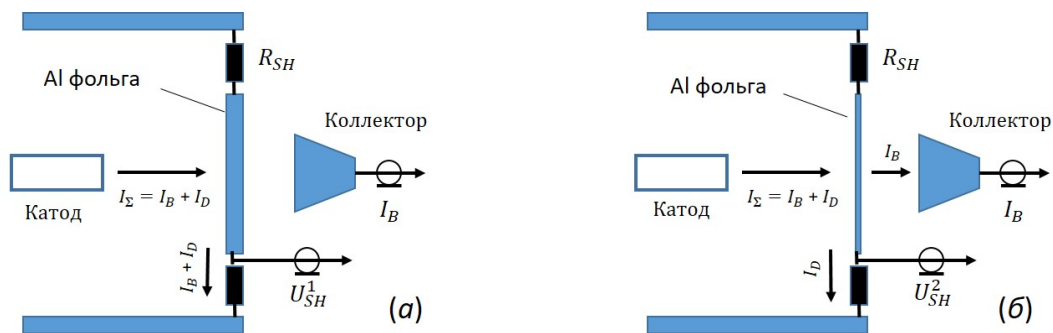


Рис. 3. Схема регистрации сигналов тока разряда I_d и тока пучка I_B при толщине алюминиевой фольги 275 мкм (а) и 55 мкм (б). I_Σ – сумма токов разряда и пучка; R_{SH} – активное сопротивление шунта; U_{SH}^1 , U_{SH}^2 – импульсы напряжения с токового шунта, регистрируемые осциллографом при толщине фольги 275 мкм и 55 мкм, соответственно.

Для анализа причины возникновения знакопеременной составляющей сигнала с токового шунта в случае, когда большая часть электронов пучка проходит фольгу, рассмотрим схему регистрации сигналов, приведенных на рис. 2. При толщине фольги

275 мкм электроны пучка поглощаются и через резисторы токового шунта протекает ток, равный сумме тока пучка I_B и тока разряда I_D (Рис. 3а), формируя сигнал U_{SH}^1 , регистрируемый осциллографом. В случае фольги толщиной 55 мкм коллектором и шунтом регистрируются токи I_B и I_D , соответственно. При этом на токовом шунте формируется сигнал U_{SH}^2 (Рис. 3б). Принимая во внимание не только активную R_{SH} , но и индуктивную L_{SH} составляющие сопротивления токового шунта, величины U_{SH}^1 и U_{SH}^2 можно выразить соотношениями (1) и (2), соответственно:

$$U_{SH}^1 = R_{SH} \cdot I_{\Sigma} + L_{SH} \frac{dI_{\Sigma}}{dt} \quad (1)$$

$$U_{SH}^2 = R_{SH} \cdot I_D + L_{SH} \frac{d(I_{\Sigma} - I_B)}{dt} \quad (2)$$

Вычитая (2) из (1) и учитывая, что $I_{\Sigma} = I_B + I_D$, получаем:

$$U_{SH}^1 - U_{SH}^2 = R_{SH} \cdot I_{\Sigma} + L_{SH} \frac{dI_{\Sigma}}{dt} - R_{SH} \cdot I_D - L_{SH} \frac{d(I_{\Sigma} - I_B)}{dt} = R_{SH} \cdot I_B + L_{SH} \frac{dI_B}{dt} \quad (3)$$

Разность $U_{SH}^1 - U_{SH}^2$ можно не только рассчитать в соответствии с (3), используя оценку величины $L_{SH} \approx 1.4 \cdot 10^{-9}$ Гн, измеряемые величины R_{SH} , I_B , но и определить разность экспериментально регистрируемых осциллограмм U_{SH}^1 и U_{SH}^2 . Их удовлетворительное совпадение (Рис. 4) указывает на корректность выражений (1) и (2) для U_{SH}^1 и U_{SH}^2 , соответственно, и, как следствие, на необходимость учета в рассматриваемых условиях индуктивной составляющей сигнала с токового шунта.

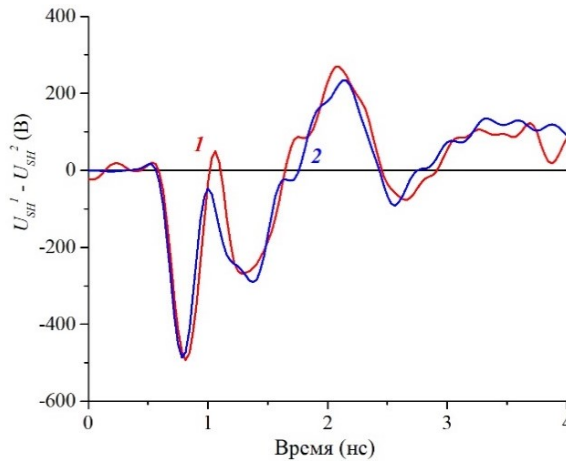


Рис. 4. Временной ход разности $U_{SH}^1 - U_{SH}^2$: расчет (кривая 1), экспериментальные данные (кривая 2).

Особенностью регистрации сигнала с токового шунта в рассматриваемом случае является наличие пучка электронов, ускоренных до высоких скоростей. В соответствии с теоремой Шокли-Рамо [13], это вызывают протекание в цепи наведенного тока, индуцированного движением высокоэнергичных электронов пучка вблизи заземленного анода. Величина наведенного тока I при движении заряда q пропорциональна скорости движения зарядов v и составляющей напряженности электрического поля вдоль вектора скорости в точке нахождения заряда E_v при следующих условиях: все заряды удалены,

потенциал данного электрода увеличен до единичного, а все другие проводники заземлены [13]:

$$I = q \cdot v \cdot E_v \quad (4)$$

Падение напряжения на индуктивности шунта U_{SH}^L вызывает не величина наведенного тока, а ее изменение во времени:

$$U_{SH}^L = L_{SH} \frac{dI}{dt} = L_{SH} \frac{d(q \cdot v \cdot E_v)}{dt} \approx L_{SH} \cdot q \cdot v \frac{dE_v}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = L_{SH} \cdot q \frac{dE_v}{dx} \cdot v^2 \quad (5)$$

Из (5) видно, что величина U_{SH}^L пропорциональна квадрату скорости движения электронов. Скорость электронов пучка при условиях проводившегося эксперимента может достигать величин, соответствующих энергии ~ 200 кэВ.

4. Выводы

При проведении данной работы установлено, что причиной искажения сигнала с токового шунта в условиях одновременной регистрации тока разряда и тока пучка электронов в газовом и вакуумном диодах является появление знакопеременной составляющей падения напряжения на индуктивности шунта при быстром изменении тока пучка электронов, движущихся с субсветовыми скоростями.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

5. Литература

- [1] В.И. Соломонов, С.Г. Михайлов, *Импульсная катодолюминесценция и ее применение для анализа конденсированных веществ*. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
- [2] D.A. Sorokin, A.G. Burachenko, D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, E.I. Lipatov, and M.I. Lomaev, Luminescence of crystals excited by a runaway electron beam and by excilamp radiation with a peak wavelength of 222 nm, *Journal of Applied Physics*, vol. **122**, 154902, 2017, doi: 10.1063/1.4996965
- [3] S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, and A.A. Gurinovich, Electrostatic cumulation of high-current electron beams for terahertz sources, *Physical Review Accelerators and Beams*, vol. **22**, 043403, 2019, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.043403
- [4] Д.И. Вайсбурд (ред.), *Высокоэнергетическая электроника твердого тела*. Новосибирск: Наука, 1982.
- [5] A.C. Kolb, Uses of intense electron beams, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **22**(3), 956–961, 1967.
- [6] Э.Э. Тарумов, Получение и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков в диодах, в книге: *Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков*. Под ред. Л.И. Рудакова. Москва: Энергоатомиздат, 122–181, 1990.
- [7] V.I. Baryshnikov and V.L. Paperny, On the electron temperature in the cathode plasma of a pulse vacuum discharge, *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. **28**, 2519, 1995, doi: 10.1088/0022-3727/28/12/019
- [8] В.И. Олешко, В.Ф. Тарасенко, А.Г. Бураченко, V.V. Nguyen, Филаментация и самофокусировка электронных пучков в вакуумных и газовых диодах, *Письма в ЖТФ*, том **45**(7), 3–7, 2019, doi: 10.21883/PJTF.2019.07.47526.17640

- [9] М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко, А.В. Дятлов, Кумуляция сильноточного электронного пучка при наносекундном высоковольтном разряде в диоде низкого давления, *Известия высших учебных заведений. Физика*, **62**(6), 68–71, 2019, doi: 10.17223/00213411/62/6/68
- [10] Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко, Е.В. Балзовский. Методики и датчики для измерений субнаносекундных и пикосекундных импульсов тока пучка, тока через разрядный промежуток и напряжения, в книге *Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления. Под ред. В.Ф. Тарасенко*. Томск: СТТ, Глава 20, 475–494, 2015.
- [11] Ф.Я. Загулов, А.С. Котов, В.Г. Шпак, Я.Я. Юрике, М.И. Яландин, РАДАН – малогабаритный импульсно–периодический сильноточный ускоритель электронов, *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 146–149, 1989.
- [12] Stopping-Power & Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions, NIST Standard Reference Database 124 [online], July 2017; <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>
- [13] Z. He, Review of the Shockley–Ramo theorem and its application in semiconductor gamma-ray detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. **463**, 250, 2001.