

УДК 537.533

## **Механизм возникновения импульсного режима генерации при транспортировке релятивистского электронного потока в газонаполненной среде**

Шеин А. Г., Башкирев А. М.

*Волгоградский государственный технический университет  
просп. им. В. И. Ленина, д. 28, Волгоград, 400005, Российская Федерация  
professor39@mail.ru, alexandr.bashkirev@gmail.com*

Получено: 1 июня 2018 г.

Отрецензировано: 20 июня 2018 г.

Принято к публикации: 12 июля 2018 г.

**Аннотация:** *Исследуется процесс возникновения импульсного режима при распространении электронного потока в газонаполненном пространстве. Показано, что за счет изменения скорости электронов при возникновении виртуального катода повышается вероятность ионизации газа, что приводит к образованию ионного облака, вытесняющего виртуальный катод из пространства. Время вытеснения виртуального катода на порядок превосходит время его образования.*

**Ключевые слова:** *электронный поток, газонаполненное пространство, ион, вероятность ионизации, виртуальный катод, вытеснение, обратный ток.*

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Шеин А. Г., Башкирев А. М. Механизм возникновения импульсного режима генерации при транспортировке релятивистского электронного потока в газонаполненной среде // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 3. С. 275—281.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Шеин, А. Г. Механизм возникновения импульсного режима генерации при транспортировке релятивистского электронного потока в газонаполненной среде / А. Г. Шеин, А. М. Башкирев // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2018. — Т. 1, № 3. — С. 275—281.

# Mechanism of pulsed generation mode when transporting a relativistic electron beam in a gas-filled medium

A. G. Shein and A. M. Bashkirev

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University,  
28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation  
professor39@mail.ru, alexandr.bashkirev@gmail.com

Received: June 1, 2018

Peer-reviewed: June 20, 2018

Accepted: July 12, 2018

**Abstract:** *The process of a pulsed regime appearance in the propagation of an electron beam in a gas-filled space. It is shown that, due to a change in the electron velocity when a virtual cathode occurs, the ionization probability of the gas increases, which leads to the formation of an ion cloud displacing the virtual cathode from space. The time of displacement of the virtual cathode is an order of magnitude greater than the time of its formation.*

**Keywords:** *electron beam, gas-filled space, ion, ionization probability, virtual cathode, displacement, reverse current*

**For citation (IEEE):** A. G. Shein and A. M. Bashkirev, “Mechanism of pulsed generation mode when transporting a relativistic electron beam in a gas-filled medium,” *Info-communications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 3, pp. 275–281, 2018. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.3.21

## 1. Введение

При движении электронного потока в газонаполненной среде за счет процессов ионизации нейтрального газа возникает ионное облако, что, в случае электронного пучка с виртуальным катодом (ВК), приводит к появлению различных физических эффектов, таких как срыв генерации и возникновение различных режимов генерации [1—3]. Причиной этого является тот факт, что энергия электронов в интенсивном потоке существенно превосходит энергию, соответствующую максимуму коэффициента ионизации нейтрального газа при ударной ионизации. Однако в области ВК происходит существенное замедление электронов, и их энергия может быть сравнима с энергией, соответствующей максимуму коэффициента

ионизации. Следовательно, процессы образования ВК и процессы ионизации нейтрального газа являются самосогласованными, в связи с чем распределение ионизированного газа оказывается существенно неоднородным как в пространстве, так и во времени, что, в свою очередь, приводит к возникновению рассматриваемых эффектов.

В данной работе на основе 3D модели электронного потока [4] и разработанной программы<sup>1</sup> анализируется механизм возникновения импульсного режима генерации. Выделены основные физические процессы, происходящие в электронном потоке в режиме импульсной генерации: образование и вытеснение ВК, а также рассеяние ионного облака.

## 2. Механизм возникновения импульсного режима

Для анализа процессов, происходящих в электронном потоке, выбран моноскоростной поток радиусом 5 мм, инжектируемый в пространство взаимодействия длиной  $L = 10$  см со скоростью электронов на влете  $V_0 = 2,6 \cdot 10^7$  м/с при величине магнитной индукции продольного магнитного поля  $B_0 = 0,1$  Тл; тормозящий потенциал равен  $\Delta\varphi = 0,4U$ , где  $U$  — ускоряющий потенциал потока. Ток пучка равен 2 А, давление нейтрального газа  $p = 88$  Па.

На рис. 1 представлены зависимости электрических параметров, характеризующих образование виртуального катода (модуля суммарного заряда электронов, суммарного заряда ионов и обратного тока, протекающего через плоскость, расположенную на расстоянии 2 см от плоскости инжекции), в зависимости от времени.

Поскольку одним из основных признаков образования виртуального катода является возникновение обратного тока, по графику изменения обратного тока (кривая 1 на рис. 1) можно видеть периодическое возникновение ВК, а соответственно, и возникновение импульсной генерации. Один период импульсной генерации выделен линиями «а» и «в».

Момент времени, помеченный линией «а», соответствует локальному минимуму пространственного заряда электронов, и в тоже время локальному максимуму пространственного заряда ионов. Обратный ток равен нулю, что свидетельствует об отсутствии ВК. Вследствие того, что рассматриваемый поток является закритическим, то есть ток потока превышает критический ток, начинается накопление пространственного заряда электронов. Пространственный заряд ионов вытесняется из пространства взаи-

---

<sup>1</sup> Башкирев А. М. Шейн А. Г. Программа расчета динамики релятивистских частиц при движении в газонаполненном пространстве: свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2017611754 / ВолгГТУ. 2017.

модействия. Поскольку виртуальный катод отсутствует, скорости электронов существенно выше максимума коэффициента ионизации, т. е. скорость образования ионов посредством ионизации  $V_1$  Кл/с меньше скорости убывания заряда ионов через стенки пространства взаимодействия  $V_0$  Кл/с.

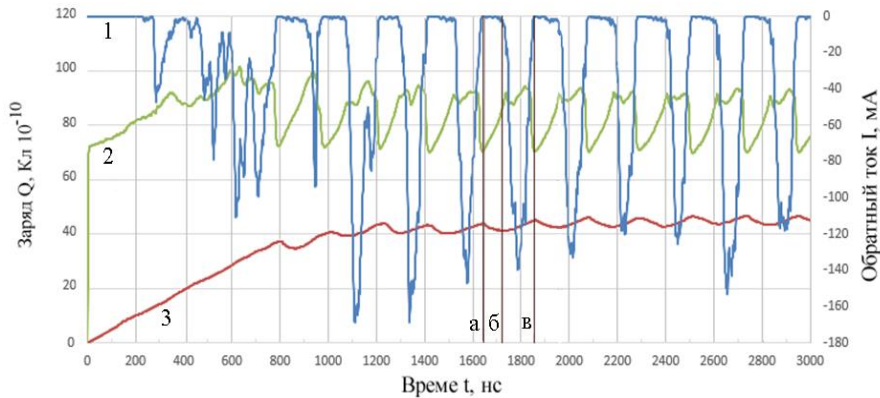


Рис. 1. Временные зависимости изменения электрических параметров (1 — обратный ток в плоскости  $z = 0,02$  м; 2 — модуль суммарного заряда электронов; 3 — суммарный заряд ионов).

Fig. 1. Time dependence of changes in electrical parameters (1 – is the inverse current in the plane  $z = 0.02$  m, 2 – is the total modulus of the electron charge, 3 – is the total ion charge)

В момент времени, отмеченный линией «б», пространственный заряд электронов достигает критического значения, что приводит к возникновению ВК, в результате чего система переходит в режим генерации за счет его колебаний в пространстве и во времени. Образование виртуального катода видно по возникновению обратного тока, который является следствием отражения электронов от области ВК. Возникший обратный ток уравнивает систему и прекращает дальнейшее накопление заряда.

Образование виртуального катода является первым из трех процессов при импульсной генерации. Оценки времени образования ВК при различных параметрах системы показывают, что оно имеет величину порядка нескольких наносекунд, что на два порядка меньше периода импульса генерации. Таким образом, образование виртуального катода не оказывает существенного влияния на частоту следования импульсов генерации.

Как известно, виртуальный катод совершает колебания в пространстве и времени. Однако в отсутствии нейтрального газа данные колебания совершаются вблизи некоего положения равновесия и положение ВК в пространстве может считаться квазистационарным. В случае же присут-

ствия нейтрального газа поведение виртуального катода существенным образом отличается. Поскольку ВК, по определению, является минимумом электрического потенциала, его положение можно наблюдать по зависимости электрического потенциала от времени в различных плоскостях вдоль оси  $Oz$ . Данные кривые приведены на рис. 2. Линиями отмечены минимумы потенциалов в различных плоскостях  $Oz$ : а — 0,02 м, б — 0,03 м, с — 0,04 м, д — 0,05 м, е — 0,06 м, ф = 0,07 м, ж — 0,08 м. з — 0,09 м. Эти графики можно интерпретировать как динамику перемещения виртуального катода в пространстве от его зарождения до исчезновения (вытеснения) вблизи границы пространства взаимодействия.

Из приведенного рисунка видно, что виртуальный катод образуется на расстоянии 2 см от плоскости влета электронов в пространство. Так как электроны, находящиеся в области виртуального катода, являются низкоэнергичными вследствие замедления в потенциальной яме, то их энергии могут быть близки к максимуму потенциала ионизации нейтрального газа.

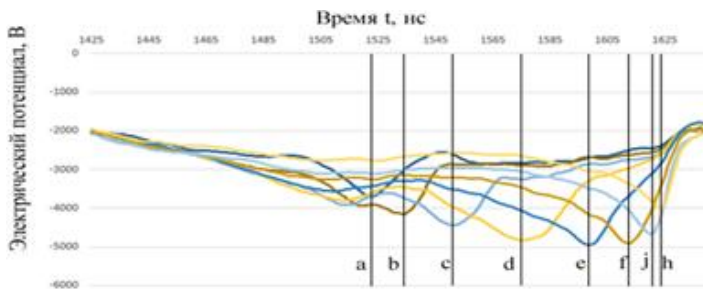


Рис. 2. Зависимости электрических потенциалов на оси потока на различных расстояниях от плоскости влета электронного потока.

Fig. 2. Dependences of electric potentials on the beam axis at various distances from the plane of electron beam

Соответственно, в области виртуального катода вероятность ионизации нейтрального атома газа возрастает. Образовавшиеся в результате ионизации вторичные электроны быстро покидают область виртуального катода, так как обладают на три порядка меньшей массой, чем ионы. Это приводит к тому, что положительный заряд возникших ионов компенсирует отрицательный заряд виртуального катода, смещая его в сторону анода. В результате ВК с течением времени перемещается в пространстве из плоскости  $z = 2$  см до плоскости  $z$ , соответствующей моменту времени, отмеченному линией «в» на рис. 1. Данный процесс является процессом вытеснения виртуального катода. Следует отметить, что время существования виртуального катода для данного варианта составляет порядка 0,12 мкс.

После исчезновения ВК в момент времени, помеченный линией «в», система приходит к начальному состоянию, соответствующему локальному минимуму пространственного заряда электронов и, в тоже время, локальному максимуму пространственного заряда ионов. Вновь начинается процесс вытеснения ионного облака. Цикл повторяется.

### 3. Рассеяние ионного облака

Последним процессом при генерации импульсов электронным потоком в пространстве взаимодействия, заполненном нейтральным газом, является процесс вытеснения ионного облака, образованного вдоль оси потока по мере вытеснения виртуального катода. Эволюция распределения ионного тока в пространстве за время одного импульса генерации показана на рис. 3. Индексами отмечены кривые, соответствующие расстоянию от плоскости инжекции такими же, как и в предыдущем разделе.

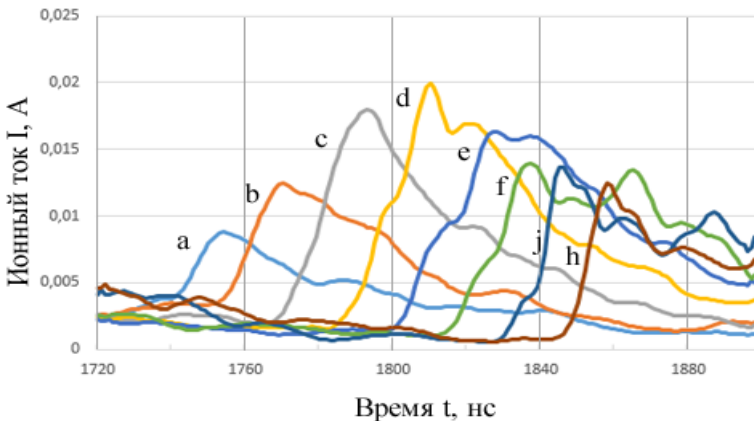


Рис. 3. Зависимости ионного тока от времени в различных плоскостях.

Fig. 3. Dependences of the ion current on time in various planes

Сравнение зависимостей электронного обратного тока от времени в различных плоскостях, представленных на рис. 2, с зависимостями ионного тока от времени в тех же плоскостях (рис. 3), показывает, что возникновение этих токов синхронизировано как во времени, так и в пространстве, хотя наблюдается запаздывание ионного тока относительно обратного электронного тока

Если время вытеснения виртуального катода является временем генерации сигнала, то время рассеяния ионного облака — это время его отсутствия.

#### 4. Заключение

Наибольшее влияние на режим импульсной генерации оказывает процесс вытеснения виртуального катода и процесс рассеяния ионного облака. Они занимают на порядок больше времени чем образование виртуального катода. При увеличении скоростей электронов качественная картина возникновения генерации сохраняется, но изменяются ее параметры.

#### Список литературы

1. Филатов Р. А. Калинин Ю. А., Храмов А. Е., Трубецков Д. И. Влияние положительных ионов на колебательные процессы в электронном пучке с виртуальным катодом // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 10. С. 853—863.
2. Филатов Р. А., Храмов А. Е. Моделирование колебательных процессов в пучково-плазменной системе с виртуальным катодом в газонаполненном пространстве взаимодействия // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 429—443.
3. Фролов Н. С. Короновский А. А. Храмов А. Е. Изучение механизмов генерации в системах трехмерного электромагнитного моделирования электронного потока // Изв. РАН. Сер. физическая. 2014. Т. 78. № 12. С. 1604—1607.
4. Башкирев А. М., Шейн А. Г. Численное моделирование релятивистского электронного потока в газонаполненном пространстве взаимодействия на графическом процессоре // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9. № 2. С. 78.

#### References

- [1] R. A. Filatov et al. “Influence of positive ions on oscillatory processes in an electron beam with virtual cathode,” *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 10, pp. 769—778, 2006.
- [2] R. A. Filatov and A. E. Hramov, “Simulation of oscillatory processes in a beam-plasma system with a virtual cathode in gas-filled interaction space,” *Plasma Physics Reports*, vol. 37, no. 5, pp. 395—408, 2011.
- [3] N. S. Frolov, S. A. Kurkin, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov, and Y. A. Kalinin, “Investigating mechanisms of generation in a virtual cathode system using a 3D electron flow model,” *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, vol. 78, no. 12, pp. 1313—1315, 2014.
- [4] A. M. Bashkirev and A. G. Shein “Numerical simulation of a relativistic electron beam in a gas-filled interaction space using a graphics processor,” *Naukovedenie (Internet-journal)*, vol. 9, no 2, p. 78, 2017. (In Russ.).

#### Информация об авторах

**Шейн Александр Георгиевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация.

**Башкирев Александр Михайлович**, аспирант кафедры физики Волгоградского государственного технического университета, г. Волгоград, Российская Федерация.

#### Information about the authors

**Alexandr G. Shein**, Dr. Sci. (Phys.), physics chair professor of the Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

**Alexandr M. Bashkirev**, graduate student of the Physics chair of the Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.