

10

К вопросу о возникновении виртуального катода в винтовом электронном потоке под действием пространственного заряда пучка

© Е.Н. Егоров, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 февраля 2010 г.

Проведено численное исследование возникновения виртуального катода в трубчатом винтовом электронном потоке, формируемом магнетронно-инжекторной пушкой, в режиме малых питч-факторов под действием собственных полей пространственного заряда.

Важной фундаментальной проблемой современной радиофизики и электроники СВЧ является изучение колебательных и волновых процессов в интенсивных потоках заряженных частиц, возникающих под влиянием собственных полей пространственного заряда и приводящих к образованию минимума потенциала (виртуального катода (ВК)) в пространстве дрейфа электронного потока [1]. Это связано как с изучением общих свойств активных электронно-волновых сред со сложной динамикой, так и с прикладными задачами создания генераторов широкополосного хаотического сигнала СВЧ на виртуальном катоде (генераторы на ВК или виркаторы) [2].

В последние несколько лет были предложены так называемые низковольтные виркаторы, в которых ВК формируется в интенсивном (с высоким первеансом) нерелятивистском электронном потоке за счет дополнительного торможения электронов [3–5]. Важной особенностью таких нерелятивистских систем с ВК являются простота конструкции, возможность работы без фокусирующих магнитных полей, простота управления спектральными и энергетическими характеристиками генерации, возможность получения в таких приборах выходного сигнала малого и среднего уровня мощности сантиметрового диапазона длин

волн, с шириной полосы частот до октавы [3–5]. В рамках исследований низковольтных виркаторов возникает важный вопрос о выборе оптимальной электронно-оптической системы, формирующей интенсивный электронный поток.

Хорошо известно, что магнетронно-инжекторная пушка (МИП) обладает высоким первансом, характеризуется значительным разбросом электронов по скоростям, высоким уровнем собственных шумов электронного потока [6]. Все эти свойства являются важными факторами для оптимизации работы низковольтных виркаторов как эффективных пере-страиваемых генераторов широкополосного сигнала [3–5]. В частности, известно, что использование многоскоростных электронных потоков значительно улучшает характеристики генерируемого шумоподобного хаотического сигнала [7,8]. В связи с этим МИП может стать перспективным источником электронного потока в низковольтном виркаторе. Целью данной работы стало численное исследование возникновения ВК в МИП в режиме малых питч-факторов под действием собственных полей пространственного заряда.

Исследуемая математическая модель представляет собой двумерную самосогласованную систему нерелятивистских уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда. Схематическое изображение геометрии изучаемой в численной модели системы представлено на рис. 1. Рассматривалась аксиально-симметричная модель исследуемой системы. Серым цветом на этих рисунках выделена форма электродов МИП (1 — катод, 2 — анод) внутри области, в которой проводилось численное моделирование инжекции и динамики электронного потока. Заштрихованная область на катоде 1 соответствует эмитирующему полюску МИП. Конфигурация внешнего магнитного поля в МИП соответствует конфигурации поля магнитной ловушки. Начальная скорость частиц в точке инжекции задается таким образом, чтобы закон распределения полных тепловых скоростей электронов подчинялся распределению Максвелла [9]. Моделирование электронного потока проводилось с помощью метода крупных частиц. Интегрирование уравнений движения проводилось по схеме Бориса. Уравнение Пуассона с учетом аксиальной симметрии интегрируется с помощью пятиточечной разностной схемы в цилиндрической системе координат.

Для исследования образования ВК под действием сил пространственного заряда начальные условия в численном моделировании были

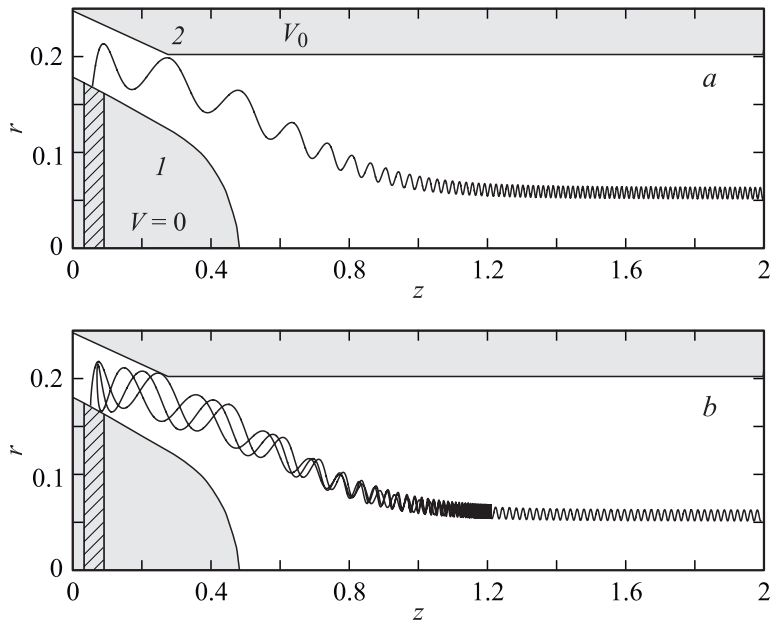


Рис. 1. *a* — траектория частицы, проходящей через пространство дрейфа без отражения; *b* — траектория частицы, испытывающей двукратное отражение от области виртуального катода. Серым цветом обозначены электроды МИП: 1 — катод с нулевым потенциалом, 2 — анод с потенциалом V_0 . Штриховкой обозначен эмитирующий полосок катода МИП.

подобраны таким образом, чтобы в системе реализовались условия полного прохождения электронного потока в режиме малого пространственного заряда. Это соответствует малым питч-факторам g электронного потока в пространстве дрейфа (в области с максимальной постоянной величиной продольной составляющей B_z магнитного поля): $g = v_{\parallel}/v_{\perp} \approx 2.5$, где v_{\parallel} — продольная дрейфовая компонента скорости заряженных частиц, а v_{\perp} — поперечная компонента скорости. Данный режим работы МИП характеризуется значительными величинами поперечных скоростей ($g > 1$), недостаточных, однако, для образования магнитной ловушки для электронного потока.

Величина ускоряющего потенциала, прикладываемого к аноду, при моделировании была выбрана $V_0 = 2500$ V, что соответствует параметрам работы макетов низковольтного виркатора [10]; отношение максимальной и минимальной величины продольной составляющей магнитного поля равно $k = B_z^{\max}/B_z^{\min} = 8.75$ при $B_z^{\min} = 1$ kGs. Угол наклона φ плоскости катода к оси системы в численном эксперименте составлял 15° , что соответствует формированию пучка с регулярным пересечением траекторий. Ширина эмитирующей полоски МИП выбиралась достаточно широкой, для получения значительного разброса по скоростям, который достигал для продольной компоненты скорости электронов величины $\delta v_{\parallel} = 56\%$. Таким образом, параметры системы в численном моделировании соответствуют параметрам реальных МИП, при которых в натурном эксперименте наблюдаются значительные собственные шумы электронного потока [10].

Обсудим результаты численного моделирования движения винтового электронного потока через пространство дрейфа в МИП. На рис. 1, *a* и *b* изображены две характерные траектории заряженных частиц, стартующих из разных точек на катоде в одно и то же время. На рис. 1, *a* приведена траектория заряженной частицы, которая проходит через пространство дрейфа, не испытывая отражения. Данная траектория представляет собой результат движения заряженной частицы в скрещенных слабопеременных электрическом и магнитном полях и самосогласованном поле пространственного заряда.

На рис. 1, *b* представлена траектория частицы, отражающейся в некоторой области пространства в сторону катода, а затем снова отражающаяся от катода к выходному (правому) концу пространства дрейфа. Первое отражение заряженных частиц связано со следующими эффектами. По мере продвижения заряженных частиц вдоль оси системы происходит уменьшение продольной скорости движения электронного потока из-за сгущения линий магнитного поля (так называемая магнитная ловушка). Однако, как было сказано выше, величины магнитного поля недостаточно для полного или частичного отражения электронного потока в область инжекции. Поэтому основным фактором, влияющим на появление отражений в потоке, является собственное поле пространственного заряда пучка, которое вызывает провисание потенциала в пространстве дрейфа и, как следствие, дополнительную потерю электронами энергии продольного движения. При этом наименьшей продольной кинетической энергией

обладают частицы, у которых в плоскости инжекции (на эмитирующем полоске) преобладает поперечная составляющая начальной тепловой скорости: $v_{\perp}^T > v_{\parallel}^T$. При этом вследствие регулярного пересечения винтовых траекторий [6] у частиц, стартующих с левого края эмитирующего полоска МИП, из-за действия пространственного заряда пучка уменьшение продольной скорости дрейфа будет больше, чем у частиц, стартующих в правой части полоска. Поэтому может сложиться ситуация, при которой только часть потока отражается от образовавшегося локального минимума потенциала в пространстве дрейфа, остальные частицы винтового потока при этом беспрепятственно выходят из области пространства дрейфа через правую границу системы. В данном случае магнитное поле выступает в качестве основного параметра, определяющего порог необходимой величины плотности тока пучка для начала отражений в потоке, обеспечивая переход электронного потока в режим с формированием виртуального катода.

Второе отражение частицы (рис. 1, *b*) происходит в статическом поле катода, которое является тормозящим для отраженных от ВК заряженных частиц. Возможна также ситуация, при которой отраженная частица осядет на катоде, вызывая его дополнительный нагрев и вторичную эмиссию электронов. Таким образом отразившись от катода, частица продолжает движение в пространстве дрейфа к выходному концу пушки. При этом она может снова отразиться от области пониженного потенциала либо, разогнавшись в ускоряющем поле анода и потенциальной ямы, приобрести достаточную продольную скорость для преодоления потенциального барьера и магнитной ловушки и покинуть пространство дрейфа.

На рис. 2, *a* приведен характерный мгновенный конфигурационный портрет пучка в координатах (продольные скорости v_z — координаты z заряженных частиц). Каждая точка на конфигурационном портрете соответствует одной заряженной частице. Отметим, что в среднем число частиц, используемых при моделировании, равно 10^5 . Видно, что часть электронного потока проходит, теряя часть своей продольной кинетической энергии, через область пониженного потенциала (через область ВК) и покидает пространство дрейфа через правую границу системы, а часть потока отражается от ВК обратно к катоду. При этом в отраженном потоке можно выделить две фракции частиц. Первую

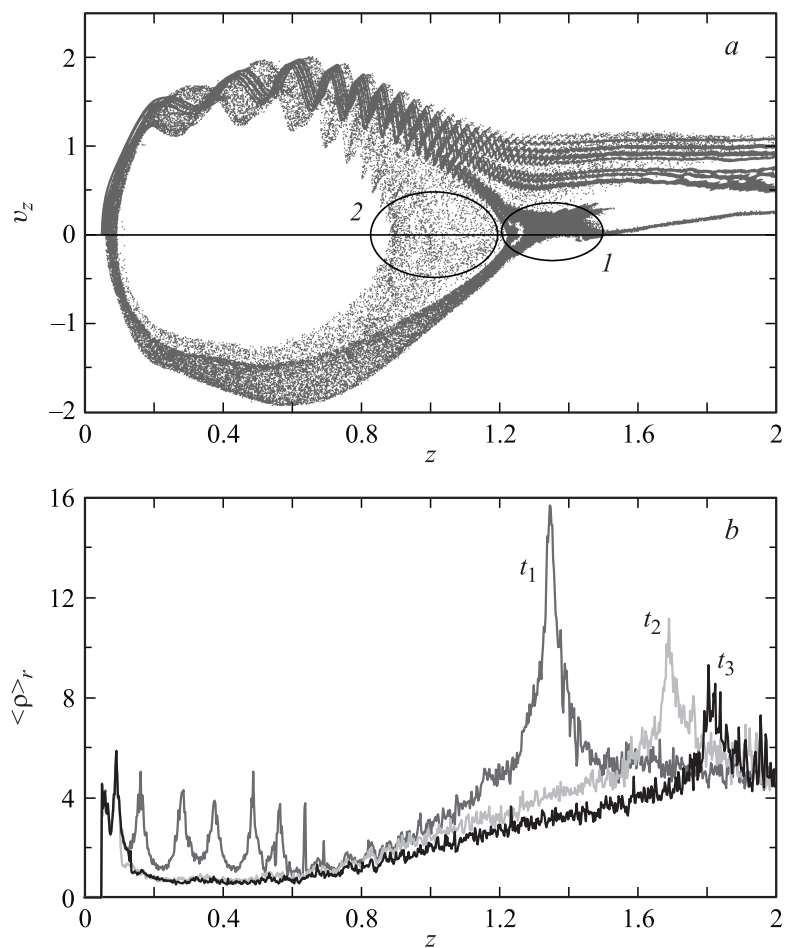


Рис. 2. *a* — конфигурационный портрет пучка в координатах (продольная скорость v_z заряженных частиц — продольная координата z) в нормированных единицах; *b* — распределение плотности пространственного заряда пучка $\langle \rho \rangle_r$, усредненного по радиусу вдоль длины МИП (в нормированных величинах). Цифрами обозначены распределения в различные моменты времени: $t_1 < t_2 < t_3$.

составляют электроны, которые в первый раз отражаются от ВК. На рис. 2, *a* область первичного отражения электронов обозначена овальной рамкой 1. Часть таких частиц, вернувшись вновь от катода, может пройти через ВК и покинуть пространство дрейфа через правую границу системы. Частицы второй фракции обратного тока обладают меньшей кинетической энергией вследствие торможения в потенциальной яме между катодом и ВК. Из-за потери энергии такие электроны не могут преодолеть ВК и снова отражаются к плоскости инжекции (испытывая, таким образом, три и более отражения) в области, обозначенной на рис. 2, *b* овальной рамкой 2. В обратном потоке такие электроны движутся с меньшей скоростью и соответствуют на рис. 2, *b* менее интенсивно закрашенной области ниже оси. Такие частицы практически не имеют возможности покинуть образовавшуюся ловушку между ВК и катодом МИП благодаря конфигурации магнитного поля и величине ускоряющего напряжения пушки. Со временем эти захваченные долгоживущие в пространстве дрейфа частицы накапливаются в пространстве дрейфа, значительно влияя на динамику винтового электронного потока.

На рис. 2, *b* приведено нормированное распределение плотности пространственного заряда, усредненного по радиусу вдоль длины пушки в различные моменты времени. Распределение, обозначенное на рис. 2, *b* t_1 , построено в момент времени, близкий к моменту возникновения ВК. Сопоставление рисунков 2, *a* и *b* показывает, что максимум плотности пространственного заряда пучка приходится на область, в которой электроны отражаются к плоскости катода. Эта область соответствует локализации ВК в пространстве дрейфа системы с МИП. В области катода пушки (область с координатами $z \in [0.1, 0.7]$) для распределения t_1 наблюдаются локальные пики распределения, соответствующие точкам пересечения траекторий, которое ярко выражено в МИП до начала перемешивания траекторий электронов.

Динамика потока после образования ВК во многом будет зависеть от параметров системы. Типичная ситуация показана на рис. 2, *b* в моменты времени $t_1 < t_2 < t_3$. Максимум на данных распределениях соответствует формирующемуся ВК. Видно, что с течением времени ВК начинает дрейфовать в сторону выходного конца системы (распределения для моментов времени t_2 и t_3). Однако такая картина характерна только для пучков с относительно малой плотностью тока. В случае больших токов пучка ВК не вытесняется из системы и совершает пространствен-

ные колебания около некоторой точки пространства дрейфа, которая определяется током пуска и величиной магнитного поля.

В данном случае наличие самосогласованного влияния пространственного заряда может приводить к разнообразной, сложной, вплоть до хаотической, нелинейной динамике электронного потока. В этом случае в отличие от образования ВК под действием одного лишь магнитного поля (магнитная ловушка), которое действует на пучок жестко и однонаправленно, пространственный заряд выступает эффективным параметром управления динамикой системы с ВК. При этом магнитное поле также остается одним из эффективных параметров управления динамикой потока. Данные вопросы будут подробно рассмотрены в следующей расширенной версии статьи.

Таким образом, в работе показано, что образование ВК в трубчатом винтовом пучке происходит под действием двух факторов, а именно магнитного поля, вследствие перекачки энергии продольного движения в энергию поперечного, а также под действием собственных полей пространственного заряда пучка. При этом влияние пространственного заряда приводит к значительному усложнению динамики винтового электронного потока с виртуальным катодом, формируемого МИП.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг., а также грантами РФФИ (08-02-00102 и 09-02-00255).

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, профессору Д.И. Трубецкову за плодотворные обсуждения результатов работы.

Список литературы

- [1] *Granatstein V.L., Alexeff I.* High Power Microwave Sources. Artech House Microwave Library, 1987.
- [2] *Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П.* // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
- [3] *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 8. С. 684.
- [4] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009.
- [5] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. XLIX. № 10. С. 843.

- [6] *Tsimring S.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2007.
- [7] *Методы* линейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот / Под ред. Д.И. Трубецкова, А.А. Кураева. Т. 2. М.: Физматлит, 2009.
- [8] *Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г., Александров Г.И., Железновский Е.Е.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 7. С. 83.
- [9] *Pollack M.A., Whinnery J.R.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 1964. V. 11. N 3. P. 81.
- [10] *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 5. С. 83.