

09:10

Исследование зависимости критического тока электронного пучка, при котором формируется виртуальный катод, от величины тормозящей разности потенциалов

© М.Ю. Морозов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: morozov@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2007 г.

С помощью численного моделирования в рамках двумерной теории исследованы зависимости критического тока электронного пучка, при котором в электронном потоке формируется виртуальный катод (ВК), от величины тормозящей разности потенциалов и внешнего магнитного поля. Показано, что существует некоторое пороговое значение тормозящего поля, при превышении которого в пространстве взаимодействия системы наряду с нестационарным ВК может формироваться стационарный ВК.

PACS: 41.75.Fr, 84.40.-x

В современной СВЧ-электронике больших мощностей активно исследуются генераторы на ВК (виркаторы) [1–5]. Интерес к данным приборам вызван рядом их преимуществ над другими классами приборов мощной СВЧ-электроники, среди которых следует отметить: простоту конструкции, большую выходную мощность (до сотен MW), широкую перестройку частоты генерации, возможность управления прибором внешним сигналом [5, Т. 2. Л. 6]. Однако экспериментальное исследование виркаторов связано с рядом трудностей. Одной из них является необходимость использования интенсивных релятивистских электронных пучков с токами, превышающими критический (предельный вакуумный) ток [6,7]. Использование систем с дополнительным торможением электронов позволяет уйти от этой проблемы [8,9]. В данных системах, получивших название низковольтных виркаторов, нестационарный колеблющийся ВК формируется при меньших

величинах инжектируемого в систему тока за счет дополнительного торможения электронного потока [8,10].

В представленной работе приведены результаты численного исследования зависимости критического тока слабoreлятивистского электронного пучка, необходимого для формирования нестационарного колеблющегося ВК, от величины тормозящего электронного потока потенциала и внешнего фокусирующего пучка магнитного поля.

В качестве исследуемой модели для изучения процессов в электронном пучке в режимах образования ВК была рассмотрена модификация системы, рассмотренной в работах [6,7,11] применительно к задаче о критическом токе пучков заряженных частиц с дополнительным торможением электронов [10]. Исследуемая система предполагается аксиально-симметричной. Пространство дрейфа электронного потока представляет собой замкнутый отрезок цилиндрического волновода длиной L и радиусом R , ограниченный с торцов сеточными электродами. Аксиально-симметричный моноскоростной на входе сплошной электронный пучок со скоростью v_0 , током I и радиусом R_b инжектируется в пространство взаимодействия через левую (входную) сетку и выводится через правую (выходную), а также может оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. На левую сетку подается ускоряющий потенциал V_0 , который поддерживается постоянным. Потенциал правой сетки $V_r = V_0 - \Delta V_r$ изменяется от значения $V_r/V_0 = 1$ ($\Delta V_r = 0$ — отсутствие торможения) до $V_r/V_0 = 0$ ($\Delta V_r = V_0$ — полное торможение электронного потока). Вдоль оси системы прикладывается однородное внешнее фокусирующее магнитное поле с индукцией B .

В ходе исследований было показано, что основными параметрами, определяющими величину критического тока пучка, являются величина внешнего магнитного поля B , степень заполнения пучком волноведущей системы, т. е. отношение радиуса пучка на входе в пространство взаимодействия к радиусу волновода $\sigma = R_b/R$, безразмерная скорость электронного пучка $\beta_0 = v_0/c$ и величина тормозящего потенциала $\Delta V_r/V_0$. Исследования зависимости критического тока пучка от изменения величин параметров σ и β_0 были проведены в работе [11]. В данной работе скорость электронов на входе в систему и коэффициент заполнения пучком волновода считались фиксированными: $\sigma = 0.5$ и $\beta_0 = 0.5$.

Численное моделирование нестационарных процессов в электронном пучке основывалось на самосогласованном решении уравнений движения и Пуассона и проводилось методом крупных частиц в двух

измерениях [12]. Для каждой заряженной частицы решалось уравнение движения с учетом слабого релятивизма, которое в векторном виде в безразмерных переменных может быть записано следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{\beta_0^2}{2} v^2}} \right] = \mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Распределение потенциала в пространстве дрейфа рассчитывалось с помощью уравнения Пуассона:

$$\frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} + \frac{d^2\phi}{dr^2} + \frac{d\phi^2}{dz^2} = \alpha^2 \rho, \quad (2)$$

где α — безразмерный управляющий параметр, пропорциональный току пучка.

Рассмотрим результаты исследования влияния тормозящего потенциала и внешнего магнитного поля на величину I_0 критического тока электронного пучка, при которой возникает ВК. На рис. 1 представлены зависимости критического тока от величины тормозящей разности потенциалов $\Delta V_r/V_0 = 0$ для двух различных величин внешнего магнитного поля. Величины критического тока пучка были нормированы на значение критического тока I_0 при нулевом фокусирующем магнитном поле ($B = 0$) и отсутствии торможения электронного потока ($\Delta V_r/V_0 = 0$). Как видно из рис. 1, *a*, построенного для случая отсутствия внешнего магнитного поля ($B = 0$), значение критического тока, соответствующего формированию в системе осциллирующего ВК, монотонно убывает с ростом величины тормозящего потенциала. При превышении величины тормозящей разности потенциалов ΔV_r над пороговым значением $\Delta V_r/V_0 = 0.5$ в системе наряду с осциллирующим может возникать стационарный ВК, от которого стационарным образом отражается весь инжектируемый электронный поток, и ток, проходящий к выходной сетке, становится нулевым. Зависимость критического тока, необходимого для образования в пространстве взаимодействия стационарного ВК, показана на рис. 1 пунктирной линией. Отметим, что значение тока, при котором формируется стационарный ВК, на два порядка меньше величины тока, требуемой для образования осциллирующего ВК, поэтому в представленном на рис. 1 масштабе оно близко к нулевому. На рис. 1, *b* представлена зависимость критического

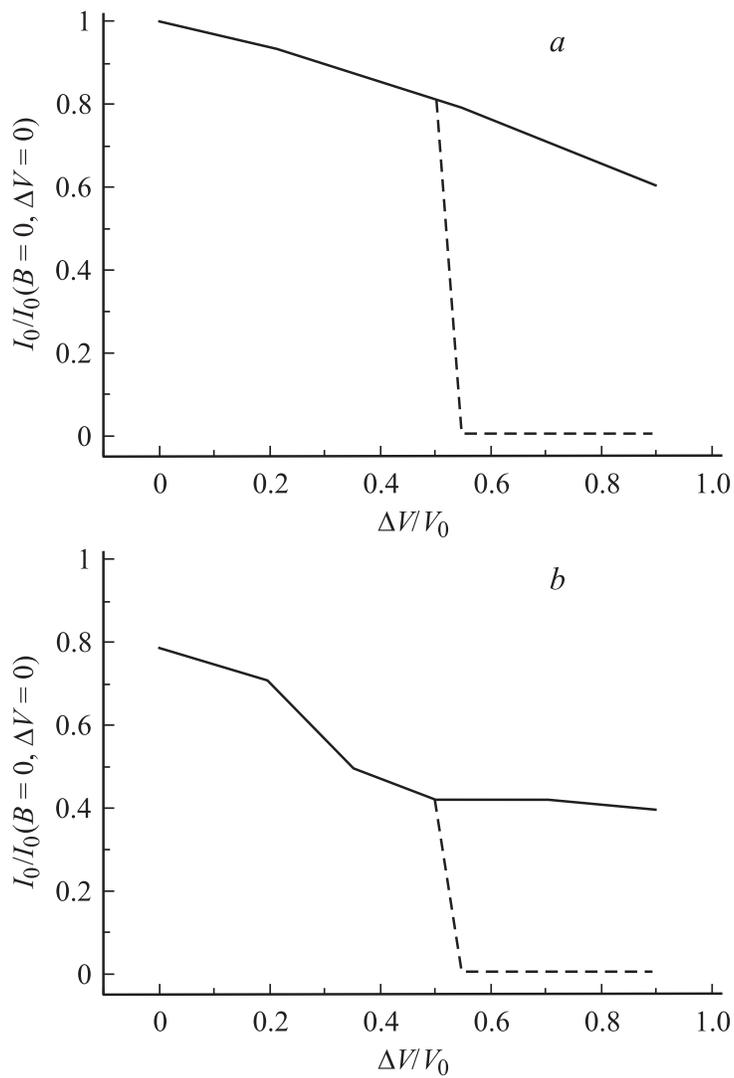


Рис. 1. Зависимости нормированной величины критического тока электронного пучка (нормировка осуществляется на величину тока пучка I_0 ($B = 0, \Delta V_r = 0$) при $B = 0$ и $\Delta V_r = 0$) от величины тормозящего потенциала для различных значений параметра B : $a - B = 0$, $b - B = 320$ Gs.

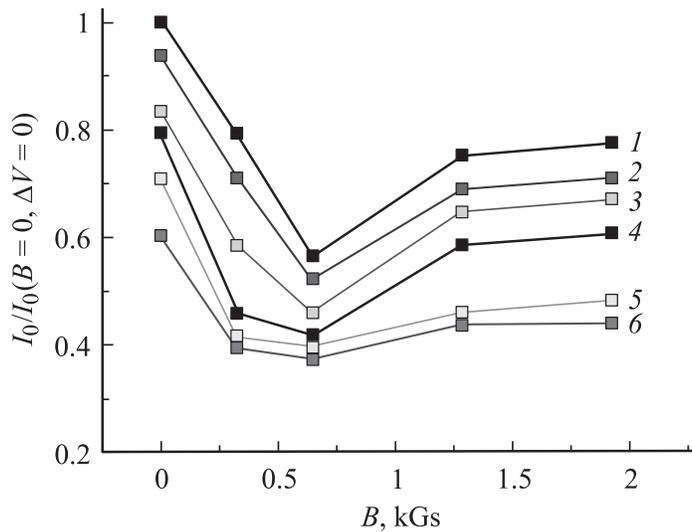


Рис. 2. Зависимости нормированной величины критического тока пучка от величины внешнего магнитного поля при различных величинах тормозящего потенциала: 1 — $\Delta V_r/V_0 = 0$, 2 — 0.2, 3 — 0.35, 4 — 0.5, 5 — 0.7, 6 — 0.9.

тока от величины тормозящей разности потенциалов в случае конечной величины фокусирующего магнитного поля — $B = 320$ Gs. Видно, что в присутствии внешнего магнитного поля при значениях тормозящего потенциала меньше порогового качественно вид зависимости остается неизменным. При превышении величины тормозящей разности потенциалов над пороговым значением критический ток пучка, необходимый для образования осциллирующего ВК, остается приблизительно постоянным в отличие от случая отсутствия фокусировки пучка магнитным полем.

На рис. 2 показаны зависимости нормированного критического тока пучка I_0 от величины индукции B фокусирующего магнитного поля для различных величин параметра $\Delta V_r/V_0$. Из рисунка видно, что на зависимостях критического тока пучка от внешнего магнитного поля можно выделить два интервала с различным характером изменения критического тока при увеличении магнитного поля. В первой области,

соответствующей малым величинам внешнего магнитного поля, наблюдается монотонное убывание критического тока пучка при увеличении индукции B . Во второй, при больших внешних магнитных полях, критический ток электронного пучка монотонно растет с увеличением магнитного поля. В последнем случае в отсутствие торможения $\Delta V_r/V_0 = 0$ величина критического тока асимптотически приближается к величине предельного вакуумного тока для сплошного пучка, найденной ранее в работе [6] для случая бесконечного фокусирующего электроны магнитного поля. Характер зависимости критического тока от величины внешнего магнитного был ранее рассмотрен в работе [11], и здесь мы на этом подробно останавливаться не будем.

Из рис. 2 следует также, что при значениях параметра $\Delta V_r/V_0 > 0.5$ значения критического тока с ростом магнитного поля сближаются в отличие от случая $\Delta V_r/V_0 < 0.5$. Данный вид кривых согласуется с рассмотренным выше графиком зависимости критического тока от величины тормозящей разности потенциалов (см. рис. 1). При малых значениях разности потенциалов на указанных зависимостях наблюдалось монотонное убывание тока. При величине тормозящего потенциала $\Delta V_r/V_0 > 0.5$ в присутствии внешнего магнитного поля значение критического тока оказывается приблизительно постоянным.

При более детальном изучении зависимости критического тока электронного пучка от величины тормозящей разности потенциалов было обнаружено явление гистерезиса, наблюдающееся в системе при переключении между процессами формирования в системе осциллирующего и стационарного виртуальных катодов. На рис. 3 представлена зависимость нормированной амплитуды СВЧ-колебаний для E_0 в области ВК от величины тормозящей разности потенциалов. Как видно из рис. 3, при увеличении разности потенциалов амплитуда колебаний поля становится отличной от нулевой при $\Delta V_r/V_0 \approx 0.6364$ — момент возникновения колебаний в системе, далее монотонно растет при увеличении тормозящего потенциала, принимая максимальное значение при величине тормозящей разности потенциалов $\Delta V_r/V_0 \approx 0.6383$. При последующем увеличении тормозящего потенциала наблюдается монотонное уменьшение амплитуды колебаний поля E_0 . При уменьшении разности потенциалов $\Delta V_r/V_0$, начиная от значения $\Delta V_r/V_0 = 0.639$, амплитуда СВЧ-колебаний поля монотонно увеличивается, достигая максимума при $\Delta V_r/V_0 \approx 0.6371$, затем убывает, обращаясь в ноль

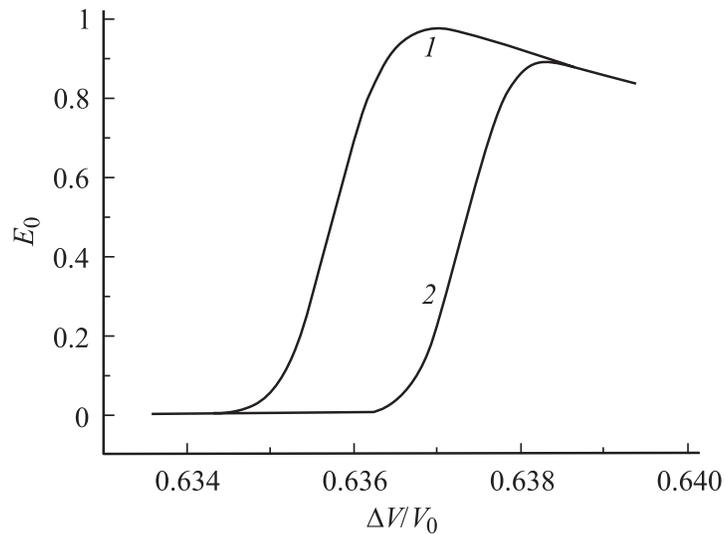


Рис. 3. Зависимости нормированной амплитуды СВЧ-колебаний поля E_0 (нормировка на максимальное значение амплитуды) от величины $\Delta V_r/V_0$ тормозящего потенциала при изменении значения разности потенциалов: 1 — в сторону уменьшения, 2 — увеличения $\Delta V_r/V_0$. График построен при $B = 0$ и величине тока пучка $I_0/I_0(B = 0, \Delta V_r = 0) = 0.677$.

при $\Delta V_r/V_0 \approx 0.6345$ — срыв колебаний в системе. Это означает, что на границе формирования ВК в узкой области значений тормозящего потенциала в пучковой системе наблюдаются гистерезисные явления.

Таким образом, в работе проведено исследование зависимости критического тока электронного пучка, при котором в системе формируется нестационарный колеблющийся ВК, от величины внешнего магнитного поля и тормозящего электронного потока потенциала. Показано, что возрастание величины тормозящего потенциала вызывает уменьшение критического тока электронного пучка. Качественно вид зависимости тока пучка от магнитного поля при изменении величины тормозящего электронного потока потенциала изменяется слабо. Также было определено пороговое значение тормозящего поля, при превышении которого в пространстве дрейфа системы наряду с осциллирующим может формироваться стационарный ВК.

Автор выражает благодарность проф. А.Е. Храмову за постоянные обсуждения работы и полезные критические замечания.

Работа поддержана РФФИ, грант 05-02-16286, 06-02-72007 МНТИ а, а также ФНП „Династия“.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Ф., Фоменко Г.П. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 6. С. 321.
- [2] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
- [3] Селемир В.Д., Алёхин Б.В., Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Степанов Н.В., Шамро О.А., Шибалко К.В. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7,8. С. 689.
- [4] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [5] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: В 2 т. М.: Физматлит, 2003, 2004.
- [6] Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
- [7] Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
- [8] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. Т. 31. № 11. С. 1009.
- [9] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 68. № 12. С. 1724.
- [10] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 49. № 10. С. 843.
- [11] Морозов М.Ю., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 7. С. 553.
- [12] Birdsall C.K., Langdon A.V. Plasma physics, via computer simulation. N.Y.: McGraw-Hill, 1985.