

Краткие сообщения

04;09;10

О токе, прошедшем через виртуальный катод

© А.Е. Дубинов, И.А. Ефимова

Саровский физико-технический институт,
607188 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 21 октября 2002 г.)

Представлено два существующих мнения о величине тока, прошедшего через виртуальный катод в замкнутой эквипотенциальной полости: значение прошедшего тока всегда меньше половины значения предельного тока (из стационарного рассмотрения) и значение прошедшего тока осциллирует во времени около среднего уровня, в точности равного значению предельного тока (из нестационарного самосогласованного моделирования методом крупных частиц.) Описана история вопроса. Показана несостоятельность первого мнения.

Электронные пучки с виртуальным катодом (ВК) находят все большее применение в технике: генерация тормозного рентгеновского и СВЧ излучения, коллективное ускорение электронов и ионов, сильноточная коммутационная аппаратура и многое др. Обзоры современного состояния физики и техники электронных приборов с ВК представлены в [1,2].

Одним из важных моментов в связи с этим является вопрос о величине тока I_f , прошедшего через ВК. Задача ставится следующим образом. Пусть в замкнутую эквипотенциальную полость произвольной формы инжектируется моноэнергетический замагниченный прямолинейный пучок электронов с постоянным по времени током инжекции I_{inj} и пусть значение тока инжекции превосходит величину предельного тока I_{lim} , так что в полости сформирован ВК. Требуется установить значение тока, прошедшего через ВК.

Имеются два различных мнения о значении этого тока. Цель настоящей работы — выяснить, какое из мнений является верным.

Одно из мнений основано на анализе стационарных состояний электронного пучка в полости. Такой анализ показывает, что при инжекции интенсивных электронных пучков в эквипотенциальные полости различной конфигурации нелинейность, связанная с влиянием поля собственного пространственного заряда пучка, приводит к соеобразному явлению, когда при одних и тех же параметрах возможны различные его состояния. Это явление — гистерезис состояний, одно из которых стационарно отвечает полному пролету электронов сквозь полость, а другое соответствует отражению части электронов от некоторого сечения, стало известно уже в 1923 г. [3].

В таких условиях многие величины, характеризующие состояние пучка, имеют вид двузначной зависимости на некотором интервале значений тока пучка [4–7]. Это явление можно использовать для генерации мощных наносекундных импульсов тока [8,9], а также для коллективного ускорения положительных ионов [10,11]. Кроме

того, само явление гистерезиса можно использовать для генерации мощного электромагнитных колебаний релаксационного типа [12,13].

Стационарный анализ задачи для полости в виде плоского промежутка в нерелятивистском случае показывает, что прошедший ток I_f при изменении тока инжекции I_{inj} также претерпевает гистерезис (рис. 1), причем нисходящая ветвь 2, соответствующая режиму с ВК, описывается зависимостью

$$\frac{I_f}{I_{lim}} = \frac{I_{inj}}{I_{lim}} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2(I_{inj}/I_{lim})} - \frac{1 + \sqrt{1 + 8(I_{inj}/I_{lim})}}{8(I_{inj}/I_{lim})^2}} \right). \quad (1)$$

Представление о таком поведении I_f является общепринятым и широко распространено в оригинальной научно-технической литературе [6,14,15], в монографиях [16–19], учебниках [4,20,21] и т.д.

Поясним, как трактуется график рис. 1. При достаточно медленном возрастании инжектируемого тока I_{inj} прошедший ток I_f также возрастает в соответствии с $I_f = I_{inj}$ (верхняя ветвь 1 графика). По достижению I_{inj} предельного значения I_{lim} ток скачком падает до значения, меньшего $I_{lim}/2$, на нисходящей ветви 2. С этих пор в пучке формируется ВК и при дальнейшем увеличении I_{inj} прошедший ток стремится к $I_{lim}/8$. При уменьшении I_{inj} значение растет вдоль всей ветви 2. Итак, в соответствии с изложенным считается, что

$$I_f \in (I_{lim}/8; I_{lim}/2) < I_{lim}. \quad (2)$$

Строгое неравенство (2) составляет существо первого мнения о прошедшем через ВК токе. Укажем, что поведение электронного потока в случае релятивистских энергий представляется в соответствии со стационарным рассмотрением качественно аналогичным, но точных

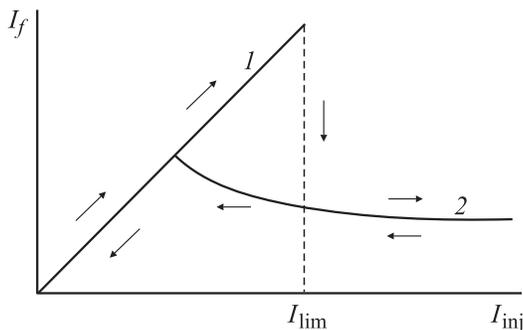


Рис. 1. Зависимость прошедшего тока I_f от инжектируемого I_{inj} демонстрирующий гистерезис: 1 — ветвь графика, соответствующая полному пролету электронов; 2 — ветвь, соответствующая режиму с ВК.

характерных значений получить уже не удастся. Аналогично же поведение пучка и в эквипотенциальных полостях иной формы, например, в цилиндрической трубе в случае тонкостенного трубчатого пучка при продольной коаксиальной инжекции [22–24].

Однако численное моделирование методом крупных частиц дает иной результат: значение прошедшего через ВК тока осциллирует во времени около величины I_{lim} , и с большой степенью точности (погрешность не более 2%)

$$\langle I_f \rangle = I_{lim}. \quad (3)$$

Для моделирования мы использовали 2.5-мерный вариант известного particle-in-cell кода „Карат“ [25], самоогласованно решающего уравнения Максвелла на сетке и релятивистские уравнения движения частиц. Код многократно был тестирован на задачах подобного класса пользователями из многих лабораторий мира. На рис. 2

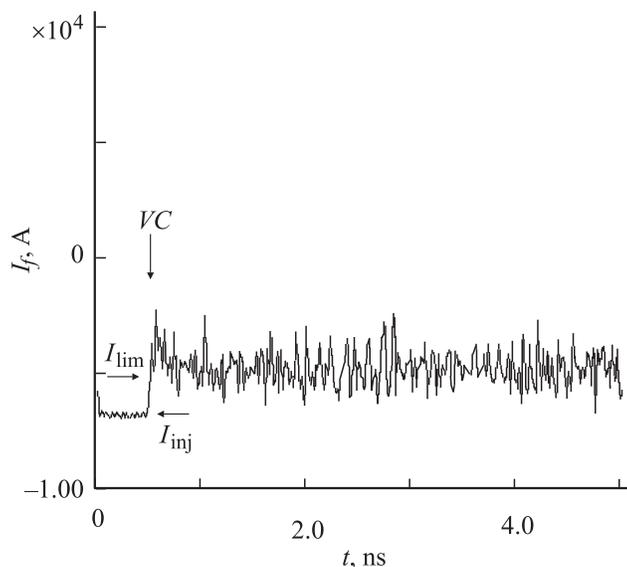


Рис. 2. Пример расчетной „осциллограммы“ прошедшего тока I_f из [26]; горизонтальные стрелки соответствуют уровням I_{inj} и I_{lim} и вертикальная — моменту возникновения ВК.

показана расчетная „осциллограмма“ прошедшего тока, взятая из [26] и иллюстрирующая (3). Начальная стадия осциллограммы соответствует I_{inj} , когда ВК еще не сформировался, а последующая часть после формирования ВК соответствует интенсивным колебаниям I_f около среднего значения, равного I_{lim} .

Оказалось, что такой же результат получен и в других работах, использующих другие коды, которые основаны на методе крупных частиц. Так, в [27] сообщается, что I_f и I_{lim} для пучка с ВК различаются не более чем на 12% (использовался код собственной разработки), а в [28] равенство (3) выполняется с погрешностью не более 1% (использовался известный particle-in-cell код „Magic“ [29]). Там же видны и сильные колебания прошедшего тока. В работе [30] (собственный код) получено, что средний прошедший ток превышает критический всего на 0.75%, а в работе [31] — $\langle I_f \rangle = 0.96I_{lim}$ и $\langle I_f \rangle = 0.975I_{lim}$ для различных параметров задачи (также собственный код). Известны также и другие работы, подтверждающие (3).

Учитывая высокую степень достоверности равенства (3), мы уже использовали его для разработки простой модели вынужденного излучения в виркаторе [32] и для дальнейшего тестирования кода „Карат“ [26].

Равенство (3) составляет существо второго мнения о величине прошедшего через ВК тока.

Итак, в отношении величины I_f в литературе сформировались два взаимно исключающие мнения, соответствующие (2) и (3), у каждого из которых есть много сторонников. Вопрос о величине прошедшего тока является очень важным для приборов СВЧ электроники и коллективного ускорения ионов и требует скорейшего разрешения. В связи с этим возникла научная дискуссия [33,34], причем авторы настоящего сообщения придерживаются второго мнения.

Для доказательства несостоятельности неравенства (2) обратимся к работе, в которой впервые был проведен его вывод [35]. Напомним, что неравенство (2) было получено там из стационарного рассмотрения на основе уравнения Пуассона для электрического потенциала. В точке, в которой существует стационарный ВК, электрический потенциал имеет минимум и скорость электронов равна нулю, а сам пучок делится на две части: прошедшие и отраженные электроны. В результате промежутки условно делится виртуальным катодом на два диода: двухпоточковый диод до ВК и диод Чайльда–Ленгмюра после ВК. Положение ВК, таким образом, связано с балансом токов в этих диодах, из чего следует (1) и (2). Во всех указанных источниках кратко повторен вывод [35].

Однако основная трудность этого вывода отмечена только в оригинальной работе [35], а в последующих источниках игнорируется. Эта трудность заключена в вопросе: как и почему одни электроны отражаются от потенциального барьера назад, а другие такие же электроны проходят сквозь него? Напомним, что инжектируемый пучок моноэнергетический. Сам автор [35]

в примечаниях делает следующую оговорку, противоречащую условию задачи: „Допущение небольшого, например теплового, распределения скоростей электронов достаточно для объяснения механизма разделения электронов на проходящие и возвращающиеся“. Вместе с тем ясно, что пропорция, в которой ВК делит электроны на проходящие и возвращающиеся, должна зависеть прежде всего от формы распределения электронов по скоростям. Итак, невозможность корректно объяснения пропорции разделения электронов ВК на отраженные и прошедшие — главный недостаток стационарной модели.

Численное нестационарное моделирование методом крупных частиц, недоступное в тот период времени, когда выполнялась работа [35] сразу же выявило, что ВК принципиально нестационарен, его потенциал и положение в пространстве осциллируют во времени и эти колебания отнюдь не малы [36]. При этом ВК работает как клапан, он то пропускает все электроны моноэнергетического пучка в одних фазах этих колебаний, то отражает все назад в других фазах. Такой механизм разделения пучка получил название фазовой сепарации [37]. Именно она ответственна за развитие излучательной неустойчивости в виркаторе [32]. Современные средства вычислительного эксперимента уже позволяют сейчас наблюдать процесс фазовой сепарации в анимации.

В заключение отметим, что в обзоре [1] впервые была построена классификация ВК по различным типам. Согласно этой классификации, рассматриваемый здесь процесс связан с динамикой осциллирующего ВК, который имеет порог по току и может возникать в моноэнергетическом пучке, в то время как в работе [35] была сделана попытка замены некоторых признаков осциллирующего ВК на признаки стационарного теплового ВК, который не имеет порога по току, не может существовать в моноэнергетическом пучке и демонстрирует другую кинетику.

Таким образом, соотношение (2) несостоятельно, выводы работы [33] ошибочны, при разработке приборов с ВК следует руководствоваться соотношением (3), которое многократно подтверждено в сомогласованных расчетах, а также в экспериментах [38].

Авторы благодарны Н.Ф. Ковалеву, инициировавшему научную дискуссию, а также благодарны А.А. Рухадзе, В.Д. Селемиру и Н.С. Uhm за обсуждение вопросов, затронутых в работе, и В.П. Тараканову за помощь.

Список литературы

- [1] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РиЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 645–672.
- [2] Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11 (в печати).
- [3] Бурсиан В., Павлов В. // Журн. Русск. физ.-хим. общества. 1923. Т. 55. № 1–3. С. 71–80.
- [4] Гвоздовер С.Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М.: ГИТТЛ, 1956.
- [5] Пащенко А.В., Руткевич Б.Н., Федорченко В.Д., Мазалов Ю.П. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 1. С. 75–80.
- [6] Fay C.E., Samuel A.L., Shockley W. // The Bell System Technical J., 1938. Vol. 17. N 1. P. 49–79.
- [7] Дубинов А.Е. // ВАНТ. Теоретическая и прикладная физика. 2001. № 2. С. 3–6.
- [8] Пащенко А.В., Руткевич Б.Н. Генератор наносекундных импульсов. А.С. СССР № 646783. Н 01 J 25/68. БИ 1979. № 30.
- [9] Дубинов А.Е., Макарова Н.Н., Селемир В.Д. Способ генерации наносекундных импульсов тока и устройство для его осуществления. Патент РФ. № 2155411. Н 05 Н 5/00. БИ. 2001. № 20.
- [10] Лымарь А.Г., Беликов В.В., Звягинцев А.В., Приступа В.И., Хижняк Н.А. // ВАНТ. Ядерно-физические исследования. 1989. № 5. С. 71–73.
- [11] Дубинов А.Е. Способ коллективного ускорения ионов. Патент РФ. № 2171017. Н 01 J 25/68. БИ. 2000. №24.
- [12] Девятков М.Н. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1979. № 5. С. 75–77.
- [13] Алексеев Ю.К., Костиенко А.И. // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 1980. Т. 21. № 2. С. 95–98.
- [14] Коломенский А.А. // Труды Совещания по проблемам коллективного метода ускорения. Дубна: ОИЯИ, 1982. С. 71–80.
- [15] Birdsall C.K. // Proc. of Symposium on Plasma Double Layers. Riso National Lab. (Denmark), 1982. P. 84–89.
- [16] Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
- [17] Миллер Р. Введение в физику пучков заряженных частиц. М.: Мир., 1984.
- [18] Мешков И.Н. Транспортировка пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1991.
- [19] Birdsall C.K., Bridges W.B. Electron Dynamics of Diode Regions. New York: Academic, 1966.
- [20] Лебедев А.И. Физические процессы в сильноточных диодах. М.: МИФИ, 1984.
- [21] Алексеев Ю.К., Сухоруков А.П. Введение в теорию катастроф. М.: МГУ, 2000.
- [22] Бугаев С.П., Зайцев Н.И., Ким А.И., Кошелев В.И., Федотов А.И., Фукс М.И. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 36–61.
- [23] Fuchs M.I., Kovalyov N.F. Proc. of 10th Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. Moscow, 1981. Vol. 1. P. M-4.
- [24] Ковалев Н.Ф., Фукс М.И. // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 10. С. 2002–2008.
- [25] Tarakanov V.P. User's Manual for Code Karat. Berkley Research Associate Inc. Springfield. VA, 1992.
- [26] Дубинов А.Е., Ефимова И.А. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 80–86.
- [27] Григорьев В.П., Ильин В.П., Коваль Т.В., Саблин Н.И., Урев М.В. Препринт ВЦ СО АН СССР. № 889. Новосибирск, 1990. 26 с.
- [28] Seo Y., Choi E.H., Byun C.G., Choi M.C. // Proc. of 13th Intern. Conf. On High-Power Particle Beams (BEAMS 2000). Nagaoka (Japan), 2000. P. 742–745.
- [29] Goplen B., Ludking L., Smith D. Magic User's Manual. Mission Res. Corp., Newington, VA, 1996. Vol. MRC/WDC-R-380.
- [30] Вишнев В.А. Численные методы механики сплошной среды. 1979. Т. 10. № 2. С. 40–48.

- [31] Филиппычев Д.С., Шафер В.Ф. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 2. С. 182–189.
- [32] Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Судовцев А.В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ техника. 1997. № 1 (469). С. 7–8.
- [33] Ковалев Н.Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 7. С. 113–116.
- [34] Dubinov A.E., Efimova I.A. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. N 8. P. 1530–1531.
- [35] Лукошков В.С. // ЖТФ. 1936. Т. 6. Вып. 4. С. 624–643.
- [36] Bridges W.B., Birdsall C.K. // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. N 10. P. 2611–2618.
- [37] Селемир В.Д., Алехин А.Б., Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Степанов Н.В., Шамро О.А., Шибалко К.В. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7–8. С. 689–708.
- [38] Мхеидзе Г.П., Пулин В.И., Райзер М.Д., Цопн Л.Э. // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. Вып. 7. С. 104–106.