

УДК 537.533

КРАЕВЫЕ И ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШКАХ

А. В. Агафонов, А. Н. Лебедев

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Приведены результаты численного моделирования динамики формирования электронных пучков в нескольких простых дрейфовых и диодных геометриях и для пушки с большой компрессией трубчатого пучка по радиусу. Обсуждаются физические причины возникающих гистерезисных эффектов.

The results of computer simulation of beam dynamics are presented for several simple drift and diode geometries and for the gun with large radial compression of annular beam. Physics reasons of hysteresis behaviour of the beams are discussed.

ВВЕДЕНИЕ

В источниках электронных пучков высокой яркости для лазеров на свободных электронах и линейных коллайдеров применяются фотокатоды, позволяющие задавать временную структуру электронного пучка соответствующей структурой лазерного излучения. Возможности получения в фотопушках токов, превышающих предельный ток Чайльда–Ленгмюра, обсуждались в ряде работ, где отмечалось, что такое превышение возможно лишь для сгустков, длина которых меньше или порядка длины ускоряющего промежутка.

Классический закон Чайльда–Ленгмюра применим при следующих условиях: 1) напряжение на пушке постоянно; 2) поперечные размеры эмитирующей поверхности существенно превышают характерные продольные размеры ускоряющего промежутка; 3) эмиссионная способность катода не ограничена.

Первое из этих условий соответствует стационарности тока и предполагает, что его величина задается ускоряющим напряжением. Фотоэммиттеры с лазерным облучением дают возможность независимого варьирования тока эмиссии, что наряду с возможностью варьирования напряжения приводит к качественно иной ситуации. Второе условие — одномерность геометрии, — очевидно, нарушается в реальных условиях, в частности вблизи краев эмитирующей поверхности.

1. КРАЕВЫЕ И ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОСТЫХ ГЕОМЕТРИЯХ

Рассмотрим вначале влияние краевых эффектов на примере прохождения пучка, инжектируемого в эквипотенциальное дрейфовое пространство. Подобная задача для нерелятивистского стационарного одномерного и неограниченного в поперечном направлении потока решается в элементарных функциях [1] и зависимость проходящего тока I_{out} от тока инжекции I_{inj} представляет собой т. н. « λ -кривую» (рис. 1).

Для участка от I_{cr1} до I_{cr2} в таком потоке возможно существование трех решений, одно из которых с виртуальным катодом и частичным прохождением пучка (нижняя часть кривой), два других (с полным прохождением пучка, слившиеся в одну кривую) считаются

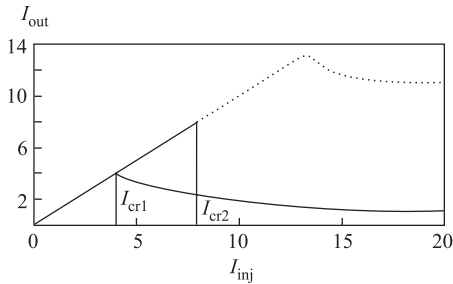


Рис. 1. Зависимость проходящего тока от тока инжекции («λ-кривая»)

неустойчивыми, всегда переходящими на нижнюю часть кривой. При увеличении инжектируемого тока проходящий ток асимптотически стремится к току Чайльда–Ленгмюра I_{CL} для плоского диода тех же размеров с напряжением, соответствующим энергии инжекции, а виртуальный катод прижимается к плоскости инжекции. Для нерелятивистских частиц $I_{cr1} = 4I_{CL}$, $I_{cr2} = 2I_{cr1}$.

В [2] было показано, что если поперечное сечение дрейфового пространства ограничено и полностью занято электронным потоком (рассматривалась полубесконечная плоская щель с торцевой инжекцией), проходящий ток может

расти неограниченно ($I_{out} \propto \sqrt{I_{inj}}$) за счет «просачивания» частиц в тонком слое вблизи стенки камеры, тогда как остальная часть пучка запирается, и виртуальный катод приобретает форму такой же щели со скругленными краями.

Рассмотрим случай, когда краевые эффекты проявляются наиболее ярко. Для этого выберем область дрейфа в виде цилиндра диаметром $D = 5$ см и длиной $d = 1$ см, диаметр инжектируемого пучка ($2r_e = 1$ см) и энергию электронов $W = 20$ кэВ. На рис. 1 значения токов приведены в единицах чайльд-ленгмюровского тока ($I_{CL} = \pi r_e^2 j_{CL}$, где $j_{CL} d^2 = 6,6$ А при 20 кВ). Сплошными линиями показаны зависимости для одномерного стационарного потока, пунктирной — расчетная зависимость для установившегося режима при инжекции пучков с различными токами и фронтом нарастания 4 нс. Установившаяся конфигурация пучка весьма похожа на рассмотренную в [2]. Отличия состоят в том, что пучок идет вдали от боковых стенок и с ростом инжектируемого тока проходящий ток не растет. Основная доля тока сосредоточена в пристеночном слое, толщина которого уменьшается при увеличении инжектируемого тока, а внутренняя часть пучка полностью заперта. С увеличением диаметра пучка экранирующее влияние слоя ослабевает и электроны начинают проходить и в приосевой области, плотность тока в которой стремится к чайльд-ленгмюровской.

2. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ

Гистерезисные эффекты проявились в процессе разработки электронной пушки (400 кВ, 100 А) с большой компрессией трубчатого пучка, предназначенного для генерации мощного микроволнового и ИК-излучения [3, 4]. Для расчета применялся электромагнитный код KARAT [5] с моделированием эмиссии частиц двумя способами: а) нарастанием напряжения при постоянном токе эмиссии (термокатод) и б) включением эмиссии при постоянном напряжении (фотокатод). Результаты тестировались с помощью стационарного кода SAM [6].

На рис. 2 показано усредненное поведение тока пучка при работе с фотокатодом (ток эмиссии нарастает до 195 А (1), 210 А (2) и 310 А (3) со скоростью 28 А/нс) и с термокатодом (ток эмиссии 400 А (4), а напряжение нарастает до 400 кВ за 8 нс). Видна четкая фиксация тока на уровне 195 А с последующим его срывом на значения, близкие к полученным по коду SAM.

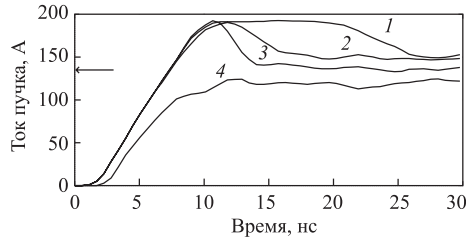


Рис. 2. Поведение тока пучка на выходе пушки в различных режимах

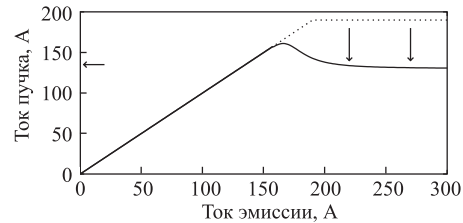


Рис. 3. Расчетная λ -кривая для пушки с управляемым эмиттером

На рис. 3 показана λ -кривая для пушки с фотокатодом, полученная обработкой результатов, частично приведенных на рис. 2. При $I_e \leq I_{cr1}$ все электроны достигают анода. В интервале $I_{cr1} \leq I_e \leq I_{cr2}$ возможны как полное прохождение (пунктир), так и возврат (спадающая часть) части электронов, причем время существования метастабильных состояний с большим током составляет несколько наносекунд и уменьшается с ростом I_e . Наконец, при $I_e > I_{cr2}$, амплитуда тока (см. выбросы на рис. 2) ограничивается уровнем I_{cr2} (пунктир), а установившийся ток пучка спадает до некоторого стационарного значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное моделирование формирования пучка в электронной пушке показывает наличие гистерезисных эффектов. Причем на верхней (метастабильной) части гистерезисной кривой ток пучка превосходит чайльд-ленгмюровский. Экспериментальное наблюдение подобных метастабильных состояний возможно при существовании возможности управления током эмиссии, т. е. в фотопушках.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 03-02-17301).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivey H. F. // Adv. Electronic and Electron Phys. 1954. V. 6. P. 137–256.
2. Voronin V. S., Lebedev A. N., Zozula Y. T. Selfconsistent states of relativistic electron flow in a drift region // Sov. JTP. 1972. V. 42. P. 546–551.
3. Agafonov A. V. et al. An electron gun with large compression of a thin annular beam // Proc. of the 10th Intern. Conf. on High Power Particle Beams, San Diego, USA, 1994. V. 2. P. 522–525.

54 *Агафонов А. В., Лебедев А. Н.*

4. *Агафонов А. В., Лебедев А. Н., Воронин В. С.* Spatial-temporal hysteresis effects in an intense electron beam // Proc. of 1995 IEEE Particle Accelerator Conf., Dallas, USA, 1995. V. 2. P. 3269–3271.
5. *Тараканов П. В.* User's Manual for Code KARAT. Springfield, 1992.
6. *Тюнов М. А., Фомел В. М., Яковлев В. П.* SAM — an interactive program for the design of electron guns on a minicomputers. INP Preprint No. 87–35. Novosibirsk, 1987.