

# Гистерезисные эффекты в электронных пушках и дрейфовых промежутках

А.В. Агафонов, В.С. Воронин, А.Н. Лебедев  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

При проектировании электронной пушки с большой компрессией тонкостенного электронного пучка обнаружены гистерезисные эффекты, проявляющиеся в формировании пучков с различным током при одинаковых внешних условиях. Обсуждается качественное отличие режимов установления тока пучка в пушке с термокатодом при включении напряжения или в пушке с фотокатодом на постоянном напряжении при включении эмиссии.

## Введение

В источниках электронных пучков высокой яркости для лазеров на свободных электронах и линейных коллайдеров в последнее время стали применяться 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 эмиттирующей поверхности существенно превышают характерные продольные размеры ускоряющего промежутка; 3) эмиссионная способность катода неограничена.

Первое из этих условий соответствует стационарности тока и предполагает, что его величина задается ускоряющим напряжением. Фотоэмиттеры с лазерным облучением дают возможность независимого варьирования эмиссионной способности катода, что наряду с возможностью варьирования напряжения приводит к качественно иной ситуации. Второе условие — одномерность геометрии — очевидно, нарушается в реальных условиях, в частности вблизи краев эмиттирующей поверхности, хотя и считается, что влияние краевых эффектов обычно невелико. В то же время нетрудно указать простую геометрию — плоский диод с эмиттером, поперечные размеры которого примерно равны длине ускоряющего промежутка, — в которой влияние краевых эффектов становится определяющим.

## 1. Гистерезисные эффекты в дрейфовом промежутке

Рассмотрим вначале влияние неоднородности геометрии 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 так называемую  $\lambda$ -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 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  $I_{cr1} = 4I_{CL}$ ,  $I_{cr2} = 2I_{cr1}$ ,

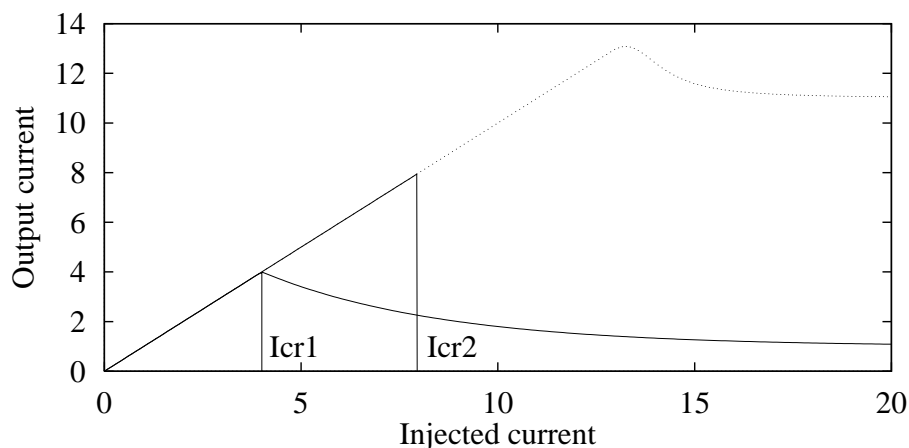


Рис. 1: Зависимость проходящего тока от тока инжекции.

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 двумерные эффекты проявляются наиболее эффективно. Для этого выберем область дрейфа в виде цилиндра диаметром ( $D = 5$  см) 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 линией — 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 пристеночных “усах”, толщина которых уменьшается при увеличении инжектируемого тока, а внутренняя часть пучка полностью заперта. С увеличением диаметра пучка экранирующее влияние “усов” ослабевает, и электроны начинают проходить и в приосевой области, плотность тока в которой стремится к чайльд-ленгмюровской. Вклад “усов” в полный ток становится малым по сравнению с током в центральной области, что отвечает картине одномерного потока.

## 2. Гистерезисные эффекты в высоковольтной электронной пушке

Пространственно-временные 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). Затем 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.

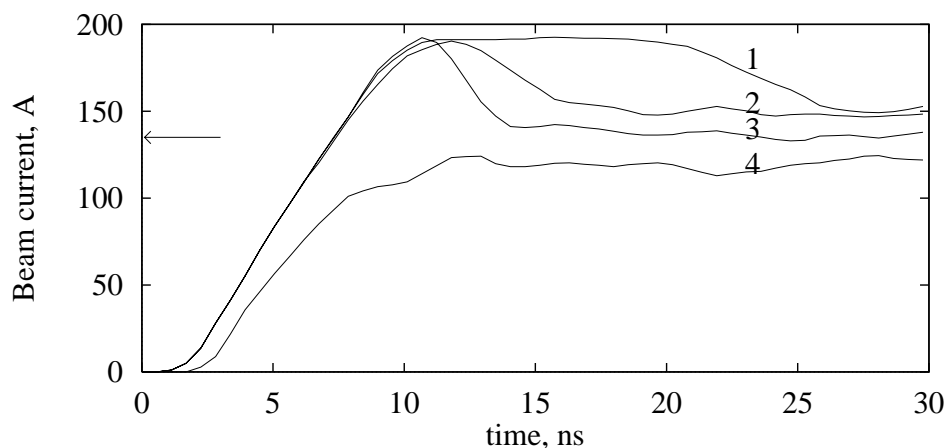


Рис. 2: Поведение тока пучка на выходе пушки в различных режимах.

На рис. 3 показана  $\lambda$ -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), появляются возвратные электроны, вблизи эмиттера образуется виртуальный катод, и ток пучка спадает до некоторого стационарного значения.

Интересно отметить, что в результатах этого численного эксперимента (рис.3) проявились два различных эффекта: нестационарность процессов с выбросами тока пучка в начальной части импульса (пунктир) и ограниченность эмиссионной способности эмиттера, когда при ее увеличении установившийся ток пучка лишь постепенно приближается к пределу (135 А при 400 кВ, кривая 4 на рис.2). Очевидно, что при ограничении эмиссионной способности величиной, не превосходящей этого предела, ток пучка после выхода напряжения на постоянное значение 400 кВ должен

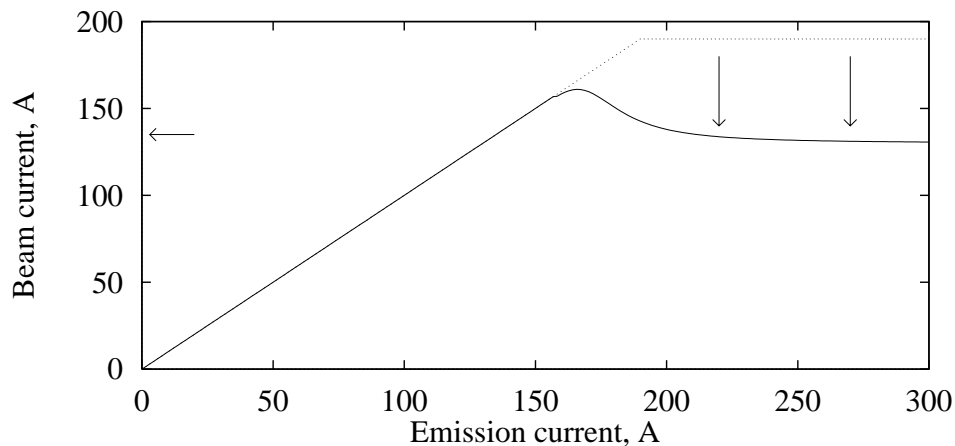


Рис. 3: Расчетная  $\lambda$ -кривая для пушки с управляемым эмиттером.

быть равен току эмиссии как для термокатода при включении напряжения, так и для фотокатода при постоянном напряжении и включении эмиссии. Таким образом, нижняя часть  $\lambda$ -кривой, имеющая гистерезисный характер, отражает просто ограничение эмиссионной способности катода, независимо от того, термокатод это или фотокатод. Верхняя же ее часть, где возможно формирование метастабильных состояний пучка с током, превышающим установившийся в режиме ограничения пространственным зарядом, применима только для фотокатодов.

## Литература

- [1] Ivey H.F. Adv. Electronic and Electron Physics. 1954, vol. 6, p. 137.
- [2] Воронин В.С., Зозуля Ю.Т., Лебедев А.Н. ЖТФ. 1972, т. 42, с. 546.
- [3] Agafonov A.V., Krastelev E.G., Lebedev A.N., Voronin V.S., Bishaev A.M., Krasnopolsky V.A., van der Slot P. J.M. Proc. 10th Intern. Conf. on High Power Particle Beams. June 20–24, 1994, San Diego, USA. Vol. 2, p. 522.
- [4] Agafonov A.V., Lebedev A.N., Voronin V.S. Proc. IEEE Conf. on Particle Accelerators, USA, Dallas, May 1–5, 1995. Vol. 5, p. 3269.
- [5] Котеташвили П.В., Рыбак П.В., Тараканов В.П. Препринт ИОФАН, 1991, № 44.
- [6] Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. Препринт ИЯФ СО АН, 1987, № 87–35.