

ПРИМЕНЕНИЕ ВЗРЫВОЭМИССИОННОГО КАТОДА С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ТОЛСТОСТЕННОГО ТРУБЧАТОГО РЭП МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

А. Ф. Александров, В. Л. Веснин, С. Ю. Галузо, М. В. Каравичев

В мощных сильноточных устройствах релятивистской СВЧ электроники используются, как правило, трубчатые электронные пучки. Для формирования таких пучков обычно используются коаксиальные магнитоизолированные диоды со взрывоэмиссионными катодами. В этом случае важной проблемой является задача обеспечения стабильных пространственно-временных характеристик релятивистских электронных пучков [1]. Одной из причин, вызывающих нестабильность характеристик РЭП, является диокотронная неустойчивость [2—4]. Так как инкремент развития этой неустойчивости пропорционален плотности электронов пучка, то стабилизировать ее при фиксированном ведущем магнитном поле можно, несколько уменьшив плотность электронов в пучке, т.е. увеличив начальную толщину стенки РЭП. Для управления толщиной стенки трубчатого пучка используются катоды с конической эмиттирующей поверхностью [5, 6]. Использование такого катода позволило авторам работы [6] получить с помощью взрывоэмиссионного катода достаточно однородное по толщине стенки ($\Delta = 4$ мм) распределение плотности тока наносекундного ($\tau \approx 40$ нс) трубчатого РЭП и наблюдать его устойчивую транспортировку в длинном вакуумном канале.

Следует отметить, что при коротких импульсах РЭП ($\tau \sim 10$ нс) геометрия эмиттирующей поверхности взрывоэмиссионного катода однозначно определяется его формой. В наносекундном диапазоне длительностей разлет катодной плазмы может привести к существенному искажению начального профиля эмиттирующей поверхности и, как следствие, к перераспределению плотности тока по радиусу РЭП [7, 8]. В связи с этим в настоящей работе ставилась задача выяснения особенностей формирования наносекундных сильноточных трубчатых РЭП с увеличенной толщиной стенки с помощью взрывоэмиссионных катодов с конической эмиттирующей поверхностью, в частности влияния движения катодной плазмы на стабильность радиального профиля плотности тока толстостенного РЭП.

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе (СЭУ) "Тандем-1" [9]. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1, а. Область формирования пучка располагалась в анодной секции диаметром 16 см. В канале транспортировки пучка (труба диаметром 9.1 см) создавалось однородное продольное магнитное поле $B_0 = 5...22$ кГс (рис.1, б). Неоднородность магнитного поля в катодной области в пределах 14 см от кромки катода в сторону дрейфовой трубы не превышала 10%. Величина магнитного поля на катоде составляла $0.6 \cdot B_0$. Давление в канале транспортировки составляло $3...5 \cdot 10^{-5}$ Тор.

В отличие от [9] для увеличения длительности импульса ускоряющего напряжения использовалось непосредственное подключение восьмикаскадного ГИНа к диодной части СЭУ. В этом случае большое влияние на форму импульса ускоряющего напряжения оказывает процесс формирования в диоде обратного

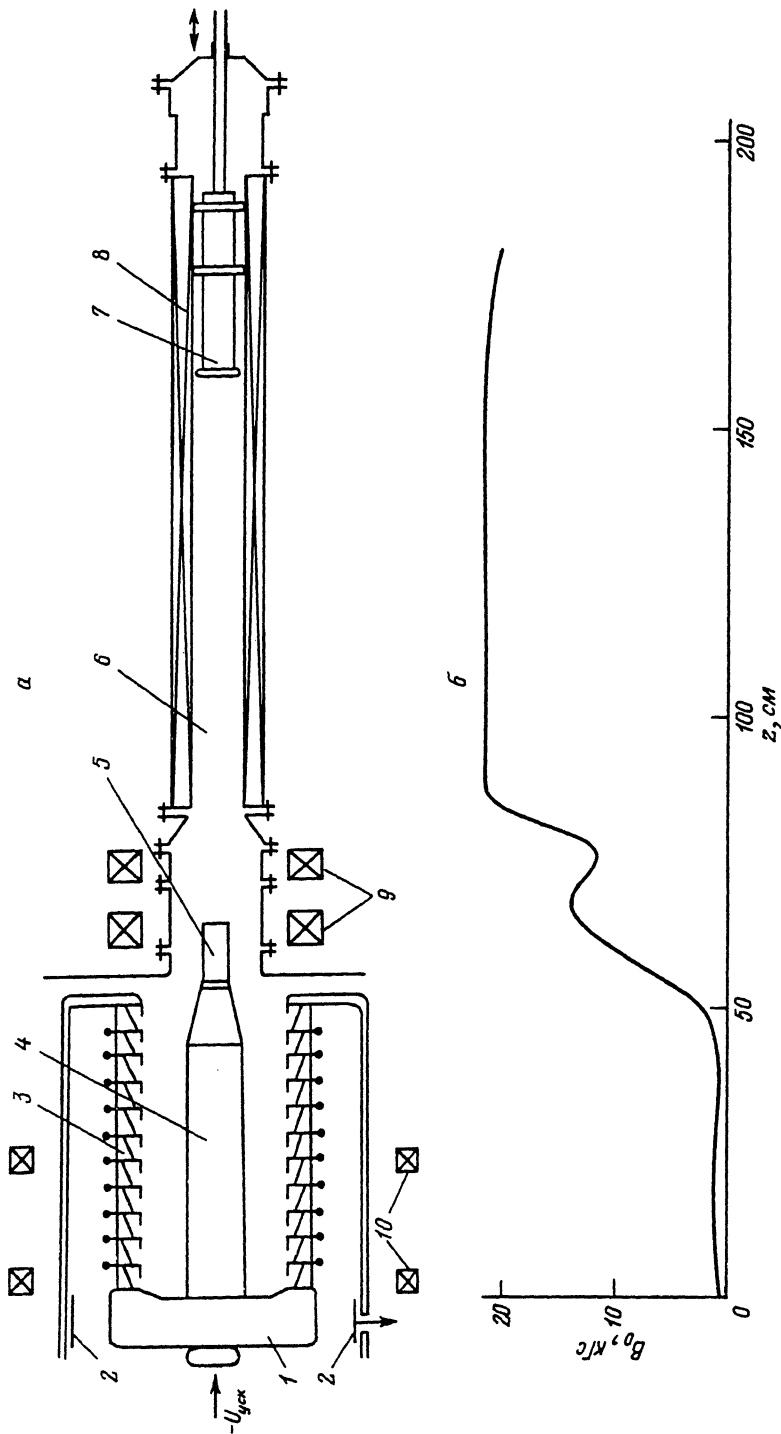


Рис. 1.

a — схема экспериментальной установки: 1 — высоковольтный электрод, 2 — электрод емкостного делителя напряжения, 3 — высоковольтный изолятор, 4 — катододержатель, 5 — катод, 6 — канал транспортировки, 7 — коллектор, 8 — соленоид магнитного канала транспортировки, 9 — катушки магнитного поля катодной области, 10 — катушки магнитного поля области изолятора; *б* — распределение магнитного поля вдоль оси системы.

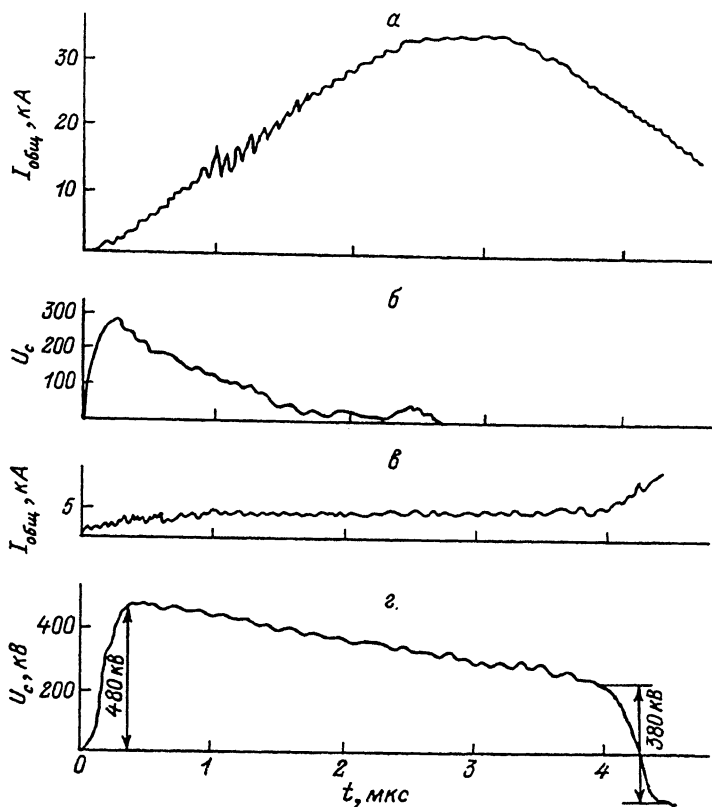


Рис. 2. Осциллограммы общего тока ускорителя и напряжения с емкостно-резистивного делителя. а, б — при отсутствии магнитного поля в области изолятора; в, г — при наличии его.

пучка электронов, приводящего к росту общего диодного тока со скоростью ≈ 13 кА/мкс (рис. 2, а) и, как следствие, к большому падению напряжения на индуктивностях ГИНа и подводющих элементов. В результате импульс ускоряющего напряжения имел треугольную форму и длительность ≈ 1 мкс по уровню 0.5 (рис. 2, б).

Существенного увеличения длительности импульсов ускоряющего напряжения и РЭП удалось достичь благодаря созданию в области изолятора магнитного поля (рис. 1, б), форма силовых линий которого подбирались так, чтобы воспрепятствовать оседанию электронов обратного пучка на стенки анода и градиентные кольца изолятора в течение большей части импульса ускоряющего напряжения. В дальнейших экспериментах отношение минимального магнитного поля в области изолятора к полю на катоде составляло 0.07. Осциллограммы импульса ускоряющего напряжения (с емкостно-резистивного делителя с постоянной времени ≈ 10 мкс) и общего тока диода при наличии магнитного поля в области изолятора приведены на рис. 2, в, г.

В экспериментах использовались графитовые катоды с конической эмиттирующей поверхностью с толщиной стенки $\Delta_0 = 3$ мм и разными углами α между образующей конической поверхности и осью системы, аналогичные катодам, использованным в работе [6], а также тонкостенный (толщина 0.5 мм) катод из нержавеющей стали. Наружный диаметр D_0 всех катодов составлял 48 мм.

Для регистрации распределения плотности тока использовался секционированный коллектор, аналогичный описанному в работе [10], который представлял собой систему из двенадцати графитовых ламелей, расположенных со сдвигом по радиусу 1 мм за графитовой диафрагмой с радиальной щелью шириной ≈ 2 мм. Для предохранения коллекторной диафрагмы от разрушения под воздействием длительного импульса РЭП перед ней была установлена входная графитовая диафрагма толщиной 10 мм с радиальной щелью шириной ≈ 4 мм. Секционированный коллектор мог перемещаться вдоль трубы дрейфа. Минимальное расстояние катод-коллектор ограничивалось развитием пробоя вдоль магнитного поля, который приводил к быстрому разрушению входной диафрагмы. Так, при расстоянии катод-коллектор $L = 25$ см пробой происходил через 4...4.4 мкс после начала импульса ускоряющего напряжения. Так с каждой графитовой ламели коллектора регистрировался. Эти сигналы усреднялись по пяти импульсам. При азимутально симметричных системах формирования и транспортировки пучка и возможной азимутальной неоднородности РЭП указанное усреднение по различным импульсам эквивалентно усреднению пространственного распределения плотности тока РЭП по азимуту. По усредненным осциллограммам строились гистограммы радиального распределения плотности тока РЭП в различные моменты времени. Момент $t = 0$ соответствовал достижению импульсом ускоряющего напряжения значения 1/2 от максимального. По гистограммам определялись координаты границ пучка (по уровню 0.5) и области с максимальной плотностью тока.

Скорость увеличения радиуса РЭП в канале транспортировки при использовании графитового катода с углом $\alpha = 90^\circ$ и ведущем магнитном поле $B_0 = 10...20$ кГс составляла 0.6 ± 0.2 мм/мкс, а при использовании тонкостенного катода из нержавеющей стали была существенно выше и составляла 2.5 ± 0.4 мм/мкс. С учетом компрессии трубчатого пучка при переходе из катодной области в пространство дрейфа (отношение магнитного поля на катоде к магнитному полю в трубе дрейфа составляло 0.6) скорость увеличения радиуса пучка в катодной области составляла 0.8 ± 0.3 мм/мкс для графитового катода и 3.2 ± 0.5 мм/мкс для катода из нержавеющей стали.

Отметим, что эти скорости расширения пучка оказались ниже аналогичных скоростей, зарегистрированных в ранее проведенных на установке "Тандем-1" экспериментах с тонкостенными катодами из этих материалов с внешним диаметром 55 мм при ускоряющем напряжении 250 кВ, токе пучка 1.8 кА и магнитном поле 10 кГс. Скорость расширения пучка в случае графитового катода составляла 2.2 ± 0.2 мм/мкс, а при использовании катода из нержавеющей стали — 4.6 ± 0.3 мм/мкс. Увеличенные значения скорости расширения пучка могли быть связаны с формой импульса ускоряющего напряжения, который имел треугольную форму, близкую к приведенной на рис. 2, б, что вызывало дополнительный дрейф катодной плазмы в скрещенных постоянном магнитном и изменяющемся во времени электрическом полях [11].

На рис. 3 приведены гистограммы радиального распределения плотности тока РЭП для катодов с углом $\alpha = 90^\circ$ (а), 45° (б) и 30° (в) при магнитном поле в канале транспортировки 21.4 кГс и расстоянии катод-коллектор $L = 40$ см. Видно, что у катода с углом $\alpha = 90^\circ$ в основном эмиттирует наружная кромка. У катода с $\alpha = 45^\circ$ плотность тока с внутренней кромки несколько выше, но преобладает эмиссия с наружной. Распределение плотности тока для катода с $\alpha = 30^\circ$ оказалось наиболее однородным.

Анализ изменения распределения плотности тока с течением времени (для катода с $\alpha = 30^\circ$) показывает, что непосредственно после подачи импульса ускоряющего напряжения начинает эмиттировать острая внутренняя кромка катода, где наиболее велика напряженность электрического поля. Примерно через 0.1...0.15 мкс по мере образования новых эмиссионных центров и распространения плазмы на всю коническую поверхность катода, распределение плотности тока становится относительно однородным и остается таким в течение приблизительно 0.5 мкс. При этом формируется пучок с толщиной стенки $\Delta \approx 4$ мм. Через 0.6...0.7 мкс после начала импульса РЭП разлет катодной плазмы приводит к

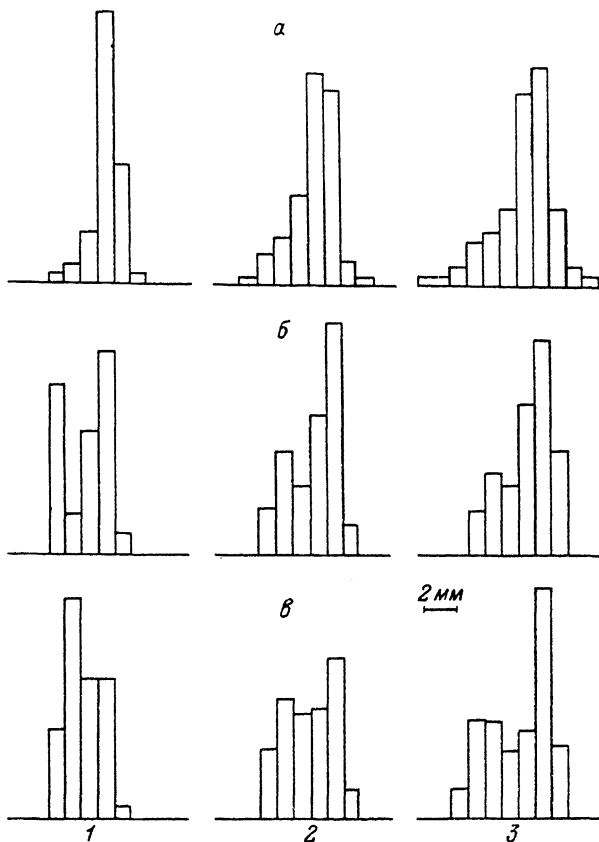


Рис. 3. Гистограммы радиального распределения плотности тока РЭП при $B_k = 13.4$ кГс.
 Время: 1 — 0.125, 2 — 0.375, 3 — 0.625 мкс.

тому, что эмиттирующая поверхность существенно искажается, максимум плотности тока смещается в сторону наружной кромки катода и эмиттируемый на последующих стадиях пучок мало отличается от пучков, эмиттируемых тонкостенным ($\Delta_0 = 0.5$ мм) катодом и катодом с $\alpha = 90^\circ$ с наружными диаметрами 48 мм.

Следует заметить, что пучок, эмиттируемый катодом с конической поверхностью, на поздних стадиях аналогичен пучку, эмиттируемому в начале импульса катодом с $\alpha = 90^\circ$, причем временной сдвиг приблизительно равен времени, в течение которого катод с конической поверхностью формирует пучок с однородным распределением плотности тока (рис. 4). Такое поведение пучка можно объяснить разлетом катодной плазмы с образованием плазменного конуса, вершина которого служит эмиттером для области РЭП с максимальной плотностью тока [1]. Действительно, следует заметить, что при удалении этой вершины от катодной поверхности форма катода не должна оказывать существенного влияния на распределение плотности тока РЭП.

Используя полученные в эксперименте значения времени существования однородного распределения плотности тока и толщины однородного пучка, можно провести оценки скорости разлета катодной плазмы поперек магнитного поля в непосредственной близости от поверхности катода

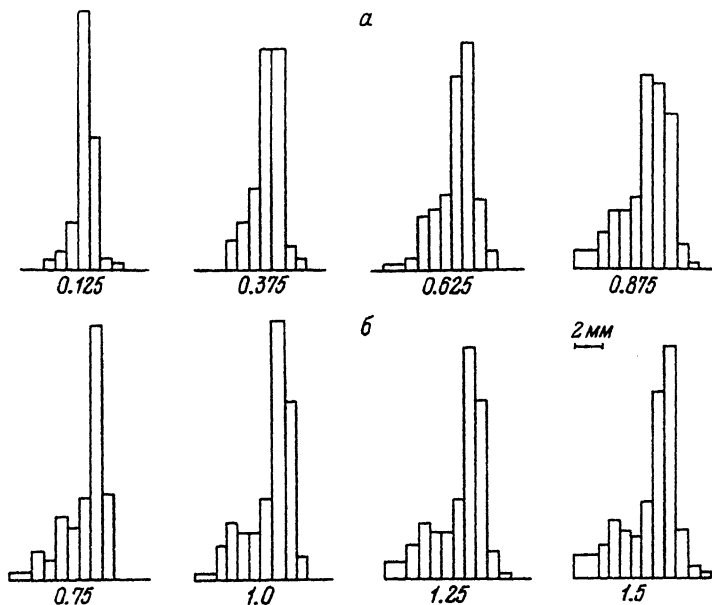


Рис. 4. Гистограммы радиального распределения плотности тока пучков, эмиттируемых катодом с конической поверхностью ($\alpha=30^\circ$) (а) на поздних стадиях импульса и катодом с $\alpha=90^\circ$ (б) на начальных стадиях импульса (время в нкс).

$$v \approx \frac{\Delta}{\tau} = 8 \text{ мм/нкс.} \quad (1)$$

Это значение оказывается на порядок выше скорости расширения РЭП в катодной области, измеренного с помощью секционированного коллектора. Этот факт косвенно свидетельствует о существовании конуса катодной плазмы с относительно медленно перемещающейся по радиусу вершиной, являющейся эмиттером РЭП, и быстро расширяющимся основанием [1].

В отличие от тонкостенного РЭП (при использовании катода с $\alpha = 90^\circ$), когда изменение магнитного поля на катоде от 14 до 7 кГс практически не влияет на радиальное распределение плотности тока вблизи катода ($L = 40$ см), для пучка, эмиттируемого катодом с конической ($\alpha = 30^\circ$) поверхностью, такое изменение магнитного поля в катодной области оказывается существенным. Как видно из гистограмм, приведенных на рис.5, с уменьшением магнитного поля формирование равномерного распределения плотности тока происходит в более поздние моменты времени, кроме того, оно существует в течение более короткого временного интервала. Более позднее формирование однородного распределения плотности тока при уменьшении магнитного поля связано, по-видимому, с увеличением времени формирования на поверхности катода однородного плазменного слоя из-за уменьшения плотности эмиссионных центров [12, 13]. При уменьшении магнитного поля возрастает также скорость разлета катодной плазмы в поперечном направлении, что приводит к более быстрому изменению формы эмиттирующей поверхности и к исчезновению равномерного распределения плотности тока.

Предполагая, что нестабильность РЭП обусловлена развитием в нем диодронной неустойчивости и ее влияние на поведение пучка становится существенным, когда пространственный инкремент неустойчивости достигает величины обратного времени пролета электронов через канал транспортировки, можно оценить величину "критического" магнитного поля, при превышении которого

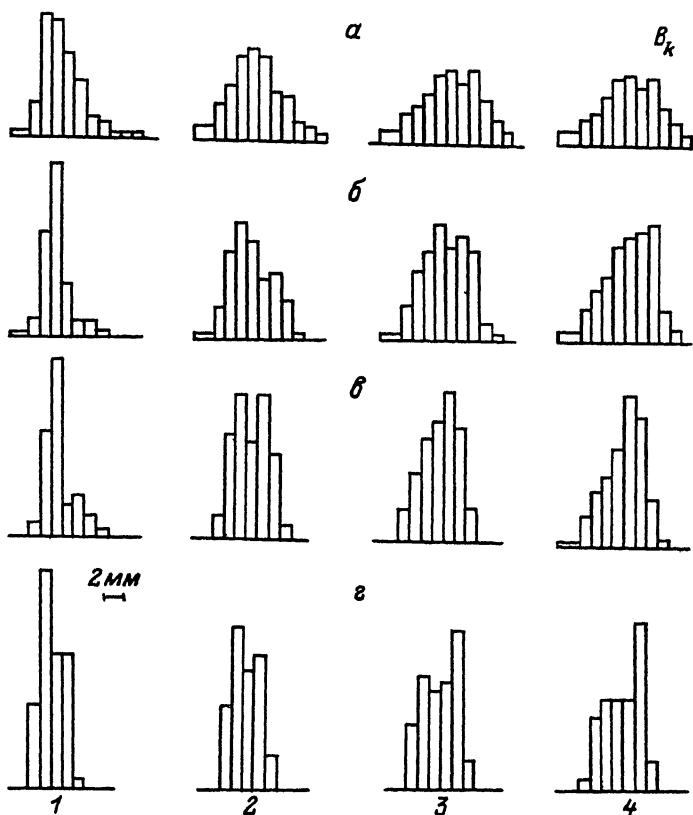


Рис. 5. Изменение радиального профиля РЭП в различные моменты времени в зависимости от величины продольного магнитного поля на катоде B_k при расстоянии катод-коллектор $L=40$ см.

Время: 1 — 0.125, 2 — 0.25, 3 — 0.375, 4 — 0.5 мкс; B_k : а — 3.3, б — 6.7, в — 10, г — 13.4 кГс.

диокотронная неустойчивость не будет оказывать существенного влияния на поведение РЭП,

$$B_c = \frac{I_b L}{4\pi\epsilon_0 c^2 e_x (\gamma^2 - 1) r_b \Delta}, \quad (2)$$

где I_b — ток пучка, L — длина канала транспортировки, $e_x = 2.718\dots$, γ — релятивистский фактор электронов РЭП, r_b и Δ — радиус и толщина стенки пучка.

Для описанных экспериментов расчетное значение “критического” магнитного поля составляло 7.5 кГс.

Результаты измерений толщины стенки пучка, эмиттированного графитовым катодом с $\alpha = 30^\circ$ при различных магнитных полях и расстояниях катод-коллектор 40 и 95 см, приведены на рис.6. Толщина стенки пучка вычислялась как среднее за время 0.125...0.625 мкс. Значение 7.5 кГс соответствует слиянию (в пределах ошибок измерений) кривых $\Delta(B_0)$ для различных расстояний катод-коллектор. При уменьшении магнитного поля ниже 7.5 кГс толщина стенки РЭП при $L = 90$ см увеличивается значительно быстрее, чем при $L = 40$ см, что может быть

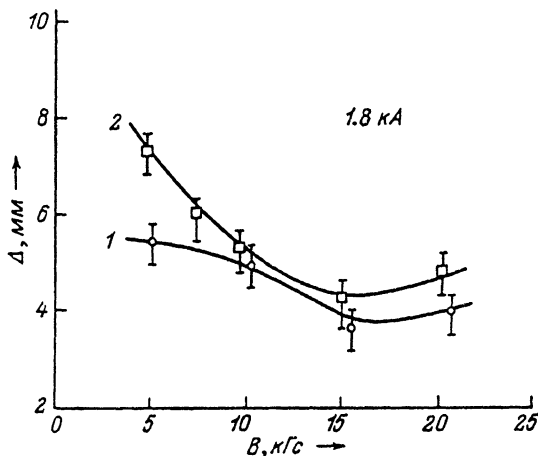


Рис. 6. Зависимость толщины стенки пучка по уровню 0.5 от ведущего магнитного поля B_0 для расстояний катод-коллектор 40 (1) и 95 см (2) и тока 1.8 кА.

связано с развитием в пучке диокотронной неустойчивости при больших длинах дрейфового канала. При $L = 40$ см распределение плотности тока в основном определяется поведением катодной плазмы.

Для получения дополнительной информации о распределении плотности тока в поперечном сечении РЭП были получены "автографы" пучка на медной фольге. При длительности импульса ≈ 1 мкс "автографы" пучка с начальной толщиной около 1.5 мм, формируемого графитовым катодом с $\alpha = 90^\circ$ при увеличении расстояния катод-коллектор до 95 см и снижении магнитного поля до 10.7 кГс, показывают значительный рост средней толщины стенки РЭП и характерное для диокотронной неустойчивости разбиение пучка на струи. Эксперименты на РЭП с увеличенной начальной толщиной ($\Delta = 4$ мм), транспортирующемся в тех же условиях, показали, что он практически не изменяется при увеличении длины дрейфового канала с 40 до 95 см в диапазоне магнитных полей 10...20 кГс.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что движение катодной плазмы оказывает существенное влияние на распределение плотности тока трубчатого РЭП с увеличенной толщиной стенки. При этом по истечении времени существования однородного распределения плотности тока (в наших экспериментах ≈ 0.5 мкс) разлет катодной плазмы приводит к перераспределению тока в поперечном сечении РЭП и формированию тонкостенного трубчатого пучка с толщиной стенки около 1.5 мм, диаметр которого определяется диаметром наружной границы расширяющегося конуса катодной плазмы.

Список литературы

- [1] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Зайцев Н. И. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький. 1988. Вып. 5. С. 163—182.
- [2] Нечаев В. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 9. С. 1067—1074.
- [3] Иванов В. С., Кременцов С. И., Райзер М. Д., Рухадзе А. А. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 4. С. 784—789.
- [4] Александров А. Ф., Веснин В. Л., Галузо С. Ю. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по силовой электронике. Томск. 1988. Ч. 2. С. 151—153.
- [5] Гром Д. Ю., Нечаев В. Е., Офицеров М. М. и др. // Тез. докл. IV Всесоюз. симпозиума по силовой электронике. Томск. 1982. Ч. 1. С. 163—166.
- [6] Стрелков П. С., Федотов А. В., Шкварунец А. Г. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 375—377.
- [7] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Михеев В. В. и др. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 110—111.
- [8] Александров А. Ф., Воронков С. Н., Галузо С. Ю. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 11. С. 1388—1392.

- [9] Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И. и др. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2381—2389.
- [10] Воронков С. Н., Лоза О. Т., Раваев А. А. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 10. С. 1259—1262.
- [11] Гапанович В. Г., Казанский Л. Н. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 329—333.
- [12] Бакирт Р. Б., Бугаев С. П., Кошелев В. И. и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 13. С. 593—597.
- [13] Беломытцев Р. Б., Месяц Г. А., Коровин С. Д. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 18. С. 1089—1092.

Московский университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
4 декабря 1990 г.
