

УДК 621.384.611.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ В МИКРОТРОНЕ

А. В. Серов

*Приведены результаты экспериментов с новой конструкцией эмиттера микротрона. Эмиттер состоит из двух материалов, имеющих существенно различные работы выхода электронов. Из материалов, имеющих более высокую работу выхода, изготовлены те части эмиттера, из которых инжектируются электроны с большой величиной координаты, перпендикулярной медианной плоскости. С новой конструкцией эмиттера при токах инжекции 150 – 200 мА удалось в 3 – 4 раза повысить коэффициент захвата. При больших токах эмиссии коэффициент захвата падает и достигает величины, характерной для традиционной конструкции эмиттера.*

Одной из величин, характеризующей эффективность работы микротрона [1], является величина коэффициента захвата. Коэффициент захвата  $K$  определяется как отношение тока на последней орбите  $I_n$  к току инжекции в резонатор микротрона  $I_0$ . Потери частиц при ускорении вызваны в основном двумя причинами: во-первых, в режим ускорения не захватываются частицы, не попавшие в область фазовой устойчивости. Во-вторых, теряются частицы, у которых слишком велика амплитуда колебаний, перпендикулярных плоскости ускорения. Величина  $K$  зависит от ряда параметров: размеров и формы ускоряющего резонатора и пролетных отверстий, амплитуды ускоряющего высокочастотного поля и ведущего магнитного поля, размеров и положения эмиттера. В настоящей работе представлены результаты экспериментов с различными эмиттерами.

Эксперименты проводились на микротроне-инжекторе синхротрона "Пахра" ОФВЭ ФИАН. Микротрон работает на первом типе ускорения. Электроны ускоряются в цилиндрическом резонаторе радиусом  $R = 39$  мм и шириной  $L = 18$  мм. Плоскость ускорения горизонтальна. После прохождения 12 орбит электроны имеют энергию 7.4 МэВ, а ускоренный ток составляет 40 – 50 мА в импульсе длительностью 4 мксек. Электроны инжектируются в резонатор с торцевой поверхности цилиндра, выполненного из гексаборида лантана ( $LaB_6$ ). Конструкция эмиттера и схема его расположения относительно стенки резонатора показана на рис. 1а. Цилиндр из борида лантана (2) имеет диаметр  $d = 2.7$  мм и длину  $l = 8 - 10$  мм. Эмиттер крепится на ножке (3) и располагается на внешней поверхности ускоряющего резонатора (1). Разогревается эмиттер до температуры  $T \simeq 1500 - 1700^\circ C$  внешним электронным пучком. Оптимальное расстояние между эмиттирующей поверхностью и внутренней поверхностью резонатора (размер  $\delta$  на рис. 1а), при котором захват максимален, подбирается экспериментально. Рассчитать это расстояние трудно, поскольку отверстие в стенке резонатора, через которое электроны попадают в резонатор, и эмиттер образуют электромагнитную линзу довольно сложной конфигурации. Параметры этой линзы определяются диаметром отверстия  $d_i$ , толщиной стенки резонатора, диаметром эмиттера  $d$ , размером  $\delta$ . Кроме того, на расходимость пучка, особенно при инжекции, когда энергия электронов мала, влияют собственные поля частиц и, следовательно, плотность тока эмиссии.

Резонатор данного микротрона-инжектора имеет некоторые особенности, влияющие на параметры ускоренного тока и коэффициент захвата. Как известно, ускоряемые электроны при движении через резонатор микротрона могут возбуждать в нем колебания более высокой частоты, чем частота магнетрона. Наиболее эффективно возбуждение "паразитного" поля происходит в том случае, когда собственная частота возбуждаемой пучком моды резонатора совпадает с одной из гармоник основного ускоряющего поля. "Паразитное" поле при достаточно высокой амплитуде влияет на динамику частиц, на коэффициент захвата и величину ускоренного тока. Традиционно в резонаторе микротрона основное ускоряющее поле имеет моду  $E_{010}$ . Расчеты показали [2, 3], что возбуждение ускоряемым током в резонаторе микротрона "паразитной" моды  $E_{011}$  приводит к увеличению коэффициента захвата электронов. Рост числа захваченных частиц происходит как за счет расширения области фазовой устойчивости, так и за счет фокусирующего действия наведенной моды. По мере увеличения амплитуды "паразитной" моды происходит рост коэффициента захвата. Это происходит только до тех пор, пока амплитуда напряженности поля наведенной моды не достигнет величины, соста-

вляющей 8 – 10% от амплитуды поля основной ускоряющей моды. Дальнейший рост напряженности "паразитного" поля приводит к снижению величины  $K$ .

Собственные частоты колебаний цилиндрического резонатора определяются его радиусом  $R$  и толщиной  $l$ . Частота колебаний моды  $E_{01p}$  описывается выражением

$$\omega_{01p} = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu}} \sqrt{\left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{l}\right)^2}. \quad (1)$$

При  $R/l \simeq 2.15$  собственная частота колебаний типа  $E_{011}$  совпадает с третьей гармоникой основного ускоряющего поля. Для микротрона-инжектора был изготовлен резонатор с такими размерами, при которых ускоряемым током возбуждалась мода  $E_{011}$ . С этим резонатором коэффициент захвата  $K$  в данном микротроне увеличился примерно в два раза [3]. Однако величина коэффициента захвата  $K$  стала зависеть от тока эмиссии  $I_0$ , поскольку амплитуда "паразитной" моды пропорциональна току со всех орбит. Такая зависимость не наблюдается в микротронах, использующих традиционные резонаторы [1].

На рис. 2 показана экспериментально измеренная зависимость коэффициента захвата от тока эмиссии. Видно, что с ростом тока эмиссии величина  $K$  сначала увеличивается, проходит через максимум и затем незначительно спадает. Такое поведение зависимости  $K(I_0)$  согласуется с результатами расчетов [2, 3].

Как показывают расчеты [1 – 3], большие потери электронов происходят на первой орбите из-за больших значений вертикальных координат частиц. Эти частицы обрезаются пролетными отверстиями резонатора. Казалось бы, можно уменьшить потери частиц при инжекции, уменьшая вертикальный размер эмиттера. Однако, как показали эксперименты [1], простое уменьшение размера эмиттера не приводит к увеличению захвата электронов. По-видимому, уменьшение вертикального размера эмиттера увеличивает дефокусирующее действие электромагнитной линзы, образованной эмиттером и стенкой резонатора, что приводит к дополнительным потерям частиц и к уменьшению коэффициента захвата.

Были проведены эксперименты с эмиттерами другой конструкции. Плотность тока эмиссии в сильных полях хорошо описывается формулой Шоттки [1]

$$i = AT^2 \exp\left(-\frac{\varphi - e\sqrt{eE}}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $A$  – постоянная Ричардсона,  $T$  – температура,  $\varphi$  – работа выхода материала эмиттера,  $k$  – постоянная Больцмана,  $E$  – напряженность электрического поля. Из выражения

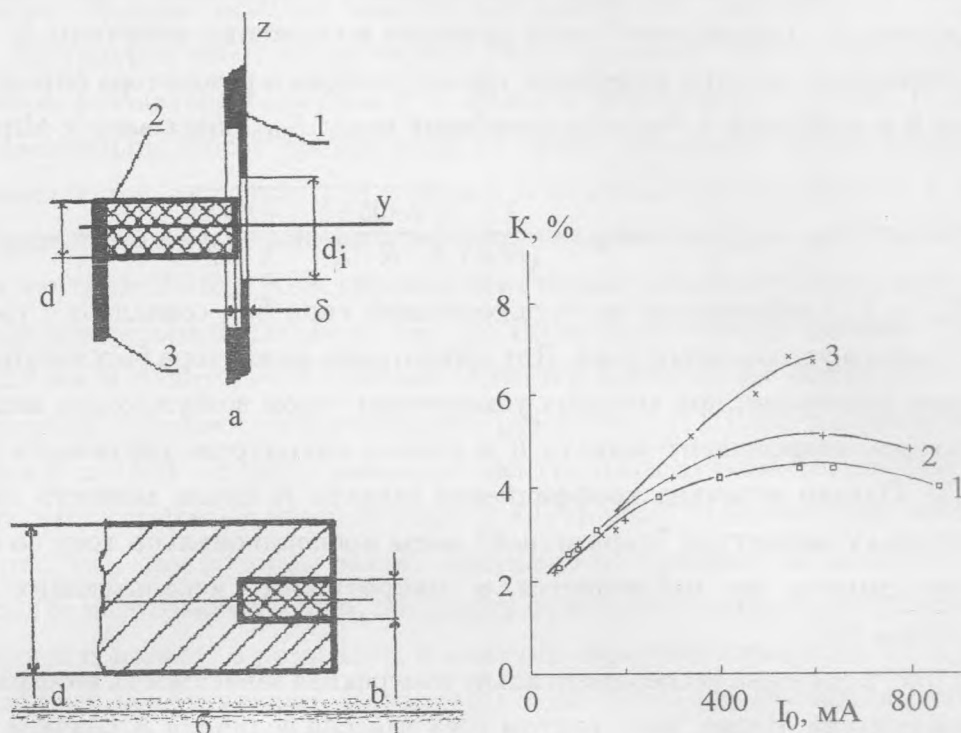


Рис. 1. Расположение эмиттера относительно стенки резонатора а) и конструкция нового эмиттера. 1 – стенки резонатора, 2 – эмиттер, 3 – ножка. б) Новая конструкция эмиттера.  $d$  – диаметр цилиндра из Ta или W,  $b$  – ширина пластинки из  $LaB_6$ .

Рис. 2. Зависимость коэффициента захвата  $K$  от тока эмиссии  $I_0$ . Эмиттер из гексаборида лантана. 1.  $\delta = 0.56$  мм; 2.  $\delta = 0.54$  мм; 3.  $\delta = 0.5$  мм.

(2) следует, что плотность тока очень сильно зависит от работы выхода материала эмиттера. Поэтому для того, чтобы уменьшить количество электронов, имеющих большое значение вертикальной координаты, нужно те части эмиттера, которые инжектируют такие частицы, изготовить из материала с большей работой выхода.

Схема новой конструкции эмиттера приведена на рис. 1б. Сами цилиндры были выполнены не из гексаборида лантана, а из тантала и вольфрама. В металлических цилиндрах были сделаны горизонтальные щели глубиной 2 – 3 мм и различной толщины  $b$  ( $b = 0.3, 0.5, 1$  мм). В эти щели впрессовывались пластинки из гексаборида лантана.



После этого эмиттеры обрабатывались таким образом, чтобы их внешние размеры были такими же, как и у эмиттеров, выполненных целиком из гексаборида лантана. Предполагалось, что поскольку работа выхода для тантала ( $\varphi_{Ta} = 4.12 \text{ эВ}$ ) и вольфрама ( $\varphi_W = 4.54 \text{ эВ}$ ) выше, чем для гексаборида лантана ( $\varphi_{LaB} = 2.64 \text{ эВ}$ ), электронов, инжектированных из тантала и вольфрама и имеющих недопустимо большую вертикальную координату  $z$ , будет значительно меньше. С другой стороны, и тантал и вольфрам имеют высокую проводимость и не изменят электронно-оптических свойств линзы, образованной эмиттером и стенкой резонатора.

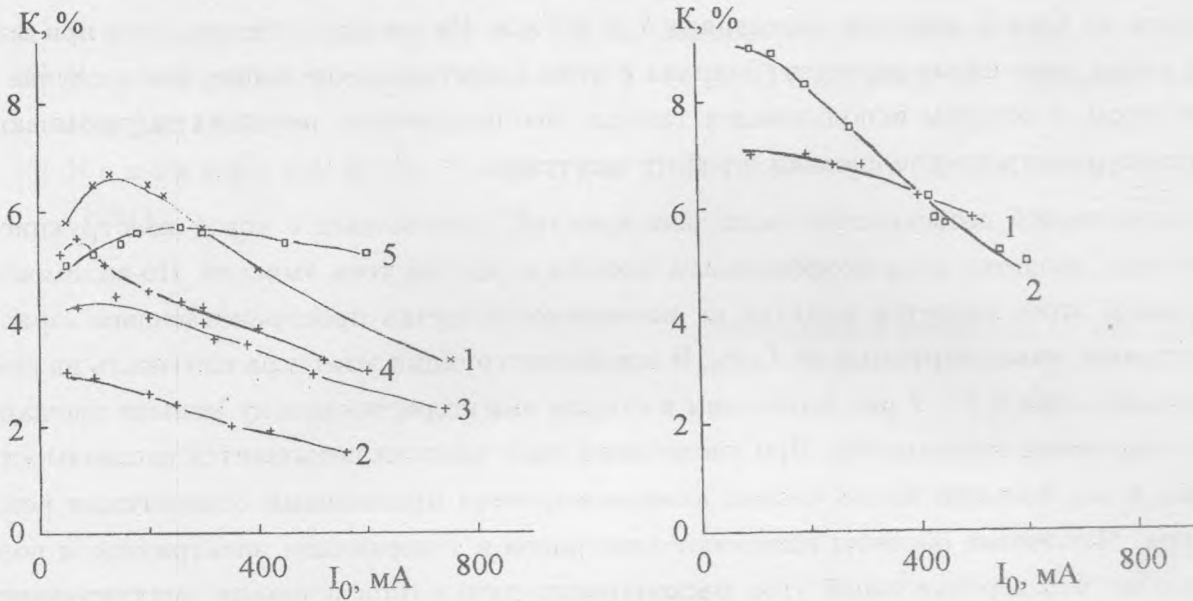


Рис. 3. Зависимость коэффициента захвата  $K$  от тока эмиссии  $I_0$ . Эмиттер из гексаборида лантана, впрессованного в цилиндр из тантала. 1.  $b = 0.3 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0.5 \text{ мм}$ ; 2.  $b = 0.5 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0.1 \text{ мм}$ ; 3.  $b = 0.5 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0.56 \text{ мм}$ ; 4.  $b = 0.5 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0.4 \text{ мм}$ ; 5.  $b = 1 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0.5 \text{ мм}$ .

Рис. 4. Зависимость коэффициента захвата  $K$  от тока эмиссии  $I_0$ . Эмиттер из гексаборида лантана, впрессованного в цилиндр из вольфрама.  $b = 0.5 \text{ мм}$ , 1.  $\delta = 0.45 \text{ мм}$ , 2.  $\delta = 0.4 \text{ мм}$ .

Были измерены зависимости коэффициента захвата микротрона от тока эмиссии. Зависимости получены при различных расстояниях эмиттирующей поверхности от внутренней поверхности резонатора  $\delta$ . Следует заметить, что для получения того же тока эмиссии, что и при старой конструкции, необходимо было повысить температуру эмиттера. Эксперименты проводились с эмиттерами, имеющими разную толщину вставки

из бориды лантана. Результаты измерений с эмиттером из  $Ta + LaB_6$  приведены на рис. 3. Первый эмиттер имел вставку из гексаборида лантана толщиной  $b = 0.3$  мм (кривая 1), второй – вставку толщиной  $b = 0.5$  мм (кривые 2, 3, и 4), а третий – вставку толщиной  $b = 1$  мм (кривая 5). Видно, что при малых токах эмиссии коэффициент захвата и, следовательно, усренный ток для эмиттеров новой конструкции заметно выше, чем при старом эмиттере. При токе эмиссии 100 мА величина  $K$  больше в 1.7 раза для эмиттера с  $b = 1$  мм и в 2.5 раза при  $b = 0.3$  мм. Ускоренные токи составляют соответственно 5 мА и 6.5 мА.

Результаты экспериментов с эмиттером из  $W + LaB_6$  показаны на рис. 4. Толщина вставки из бориды лантана составляла  $b = 0.5$  мм. Из рисунка следует, что при малых токах эмиссии коэффициент захвата с этим эмиттером еще выше, чем в случае с эмиттером, в котором использовался тантал. Все полученные результаты указывают на правильность предположений о работе эмиттера.

Характерной особенностью всех зависимостей, полученных с новой конструкцией эмиттера, является спад коэффициента захвата с ростом тока эмиссии. По-видимому, причиной этого является влияние на расходимость пучка пространственного заряда электронов, инжектируемых из  $LaB_6$ . В новой конструкции эмиттера плотность инжектируемого тока в 3 – 7 раз выше, чем в старом эмиттере, поскольку меньше площадь эмиттирующей поверхности. При увеличении тока эмиссии повышается расходимость пучка и все большее число частиц диафрагмируется пролетными отверстиями резонатора. Численные расчеты динамики электронов в ускоряющем электрическом поле показали, что вертикальный угол расходимости пучка (при площади эмиттирующей поверхности 1 – 1.5 мм<sup>2</sup>, напряженностях ускоряющего поля 20 – 100 кВ/см и токах инжекции 500 – 800 мА) достигает величины  $1 - 5 \cdot 10^{-2}$ . Эта расходимость сравнима с предельно допустимой, полученной из расчетов вертикального движения электронов в микротроне [1]. Кроме того, следует учесть, что в новой конструкции, для получения такого же тока инжекции, эмиттер должен быть разогрет до более высокой температуры. При этом повышаются поперечные тепловые скорости электронов, также увеличивающие расходимость.

Аргументом в пользу указанной причины спада  $K$  может служить сравнение кривых (1) и (5) на рис. 3. В том случае, когда площадь эмиттирующей поверхности в новой конструкции в 2.5 раза меньше площади старого эмиттера (кривая 5), уменьшение коэффициента захвата  $K$  с ростом тока эмиссии  $I_0$  существенно меньше, чем в случае, когда эти площади различаются в 8 раз (кривая 1).

Таким образом, новые конструкции эмиттеров позволяют существенно (в 3 – 4 раза) повысить величину коэффициента захвата при токах инжекции 150 – 200 мА. Однако при больших токах коэффициент захвата падает и, в лучших случаях, имеет величину, достигнутую с традиционным эмиттером.

Автор благодарен А. В. Агафонову за расчеты расходимости пучка при инжекции, В. Д. Алешину за помощь в проведении экспериментов, Г. Д. Богомолу за обсуждение полученных результатов, В. И. Шведуну за помощь в изготовлении эмиттеров.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Капица С. П., Мелехин В. Н. Микротрон, М., Наука, 1969.
- [2] Беловинцев К. А., Левонян С. В., Серов А. В. Препринт ФИАН N 4, М., 1979.
- [3] Беловинцев К. А., Левонян С. В., Серов А. В. ЖТФ, 51, в. 4, 752 (1981).

Поступила в редакцию 12 мая 2003 г.