

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ВОЗРАСТАНИЯ ФАЗОВОГО ОБЪЕМА ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

С.В.Мартынов, В.И.Першин, В.К.Плотников, Н.Я.Попова
Институт теоретической и экспериментальной физики
Москва, 117259

Транспортировка интенсивных электронных пучков без потерь частиц на расстояния порядка или больше длины волны поперечных колебаний при нестабильности параметров пучка не более 10% ("корректная" проводка) является в настоящее время одной из основных проблем, которые приходится решать при создании линейных индукционных ускорителей (ЛИУ). Очевидно, что в ЛИУ, где сам ускорительный тракт является каналом транспортировки, корректная проводка пучка требует достаточно хорошего согласования поперечного фазового объема пучка с фокусирующим каналом. Известно, что согласование может быть получено при достаточно больших токах пучка и при весьма различных распределениях плотности частиц пучка по его сечению¹. Однако условия согласования удается определить лишь в отсутствие зависимости параметров пучка от продольной координаты или при адиабатичности этой зависимости. В реальных пучках в вакууме на входе в фокусирующий канал это условие нарушается из-за влияния собственного объемного заряда пучка на продольное распределение потенциала в канале. При корректной проводке пучка влияние уменьшения потенциала в продольном направлении сказывается при токах пучка, значительно меньших предельного тока, соответствующего полной остановке частиц пучка и образованию виртуального катода.

В представленном докладе излагаются результаты экспериментального исследования влияния изменения продольного распределения потенциала на фазовый объем пучка в вакуумном дрейфе элементарной пушки ускорителя ЛИУ-5/10⁻². В этой пушке (рис.1)

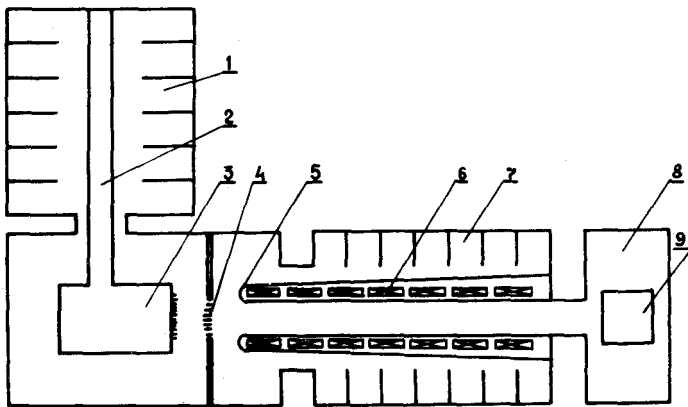


Рис.1. 1,7 - 1-й и 2-й импульсные трансформаторы, 2,3 - катодный блок, 4 - сетка, 5 - труба дрейфа (анод), 6 - фокусирующий соленоид, 8 - камера наблюдения, 9 - измеритель фазового объема пучка.

пучок генерируется десорбционно-щелевым катодом диаметром 7,5 см, ускоряется в 2-х зазорах, разделенных сеткой и

транспортируется в трубе дрейфа. В полых металлических стенках трубы размещены фокусирующие соленоиды. Длина трубы дрейфа 1,3 м, диаметр апертуры 8,6 см. Пучок в пушке ускоряется до энергии 600-700 кэВ. При этом напряжения на зазорах регулировались независимо; длительность импульса напряжения на полуволте составляла 150-200 нс. Давление в электронной пушке было не выше $(1-2) \cdot 10^{-8}$ торр. Ток пучка с катода достигал 2,5 кА, и пучок имел практически нулевой фазовый объем. После прохождения сетки фазовый объем существенно возрастал из-за дефокусирующего действия электрического поля в ячейках сетки.

В описываемых экспериментах диаметр пучка ограничивался диафрагмами диаметром 4,6 и 6,6 см, установленными непосредственно на сетке. Первой диафрагме соответствовал по расчету радиус пучка в кроссовере 2,1 см, второй - 3 см. Кроссовер пучка близок к точке, в которой фокусирующее магнитное поле, нарастая по продольной координате, имеет напряженность, равную половине напряженности в фокусирующем канале трубы дрейфа. Для лучшего согласования пучка с каналом распределение магнитного поля на участке его возрастания регулировалось изменением тока в трех коротких (длиной 10 см) соленоидах, установленных в начале трубы дрейфа. Напряженность магнитного поля на катоде не превышала 10 Гс.

Относительное изменение потенциала на оси пучка $\Delta U/U_0$ на участке от сетки (на которой потенциал задан) до точки минимума потенциала пропорционально плотности объемного заряда ρ_0 ч.а

$$\frac{\Delta U}{U_0} \sim \frac{I}{\beta c U_0} \sim \frac{I}{(\gamma-1)\sqrt{\gamma^2-1}} \cdot \frac{1}{S}, \quad (1)$$

где U_0 - потенциал в этой точке, I - ток пучка, γ - релятивистский фактор электронов, β - их относительная скорость, S - площадь поперечного сечения пучка. В электронной пушке, ускоряющей электроны до релятивистской энергии, связь между током и энергией определяется выражением⁴

$$I = \rho_0 U_0 \left[1 - \frac{3}{56}(\gamma-1) + \frac{15}{1408}(\gamma-1)^2 - \frac{3}{1024}(\gamma-1)^3 + \dots \right], \quad (2)$$

где ρ_0 - первеанс пушки, определяемый ее геометрией. Видно, что релятивистская поправка невелика вплоть до $\gamma \approx 3+4$, причем при $\gamma < 3$ достаточно учитывать лишь первое приближение по $\gamma - 1$. При ускорении до релятивистских энергий зависимость тока пучка от напряжения более сложная, чем $I = \rho_0 U_0^{3/2}$, и вместо первеанса значительно удобнее пользоваться безразмерным коэффициентом, который предлагается называть "гамма-первеансом" и определять по формуле

$$\rho_0 = \frac{I}{I_0} \cdot \frac{1}{(\gamma-1)^{3/2}}, \quad (3)$$

где

$$I_0 = \frac{mc^3}{e}. \quad (4)$$

Для электронов $I_0 \approx 17$ кА. Выражая ток I через гамма-переванс для $\gamma \leq 3-4$ и подставляя его в (1), получим

$$\frac{\Delta U}{U_0} \sim \frac{P_{\gamma 0} \gamma \sqrt{2}}{S(\gamma+1)} \cdot [1 - \frac{3}{56}(\gamma-1)]^{-1} \quad (5)$$

Обозначим с учетом (3)

$$\mathcal{F}(\gamma) = \frac{I}{I_0} \frac{\gamma \sqrt{2}}{(\gamma+1)\gamma^2-1} \cdot [1 - \frac{3}{56}(\gamma-1)]^{-1} \quad (6)$$

Множитель $\sqrt{2}$ добавлен здесь для того, чтобы при $\gamma \rightarrow 1$ $\mathcal{F}(\gamma) \rightarrow P_{\gamma 0}$. В результате, изменение потенциала на оси пучка из-за его объемного заряда

$$\frac{\Delta U}{U_0} \sim \frac{\mathcal{F}}{S} \quad (7)$$

Поэтому при исследовании зависимости величины фазового объема пучка от $\Delta U/U_0$ все результаты представлялись как функции параметров \mathcal{F} или \mathcal{F}/S .

Фазовый объем пучка V на выходе трубы дрейфа зависит, помимо параметра \mathcal{F} , также и от напряженности H фокусирующего магнитного поля. Поэтому при измерении фазового объема при каждом значении \mathcal{F} напряженность фокусирующего магнитного поля выбиралась минимальной из области, в которой $V = \text{const}$, а потери частиц отсутствуют. Значения эмиттанса определялись в момент времени, соответствующий максимуму тока пучка.

На рис. 2 приведена экспериментально измеренная зависимость фазового объема, содержащего часть тока пучка \mathcal{A} от $\mathcal{A} = 0,5$ до $\mathcal{A} = 1$ от фактора \mathcal{F} для диафрагмы диаметром 4,6 см. Характерно, что каждая кривая может быть аппроксимирована двумя отрезками прямых — одним от области малых \mathcal{F} до точки излома $\mathcal{F}_{кр}$ (критическое значение \mathcal{F}), который параллелен оси \mathcal{F} , и другим — при $\mathcal{F} > \mathcal{F}_{кр}$, который является наклонным; для пучков одного диаметра кривые, соответствующие разным долям тока пучка, имеют одинаковое значение $\mathcal{F}_{кр}$. Очевидно, что величина фазового объема на горизонтальном участке кривой совпадает со значением V_0 фазового объема на входе в канал фокусировки. Для диафрагмы $\varnothing 6,6$ см характер кривых полностью совпадает с приведенными на рис. 2. Точка излома на всех кривых для обеих диафрагм соответствует одному и тому же значению $\mathcal{F}_{кр}/S = 0,0016 \text{ см}^{-2}$.

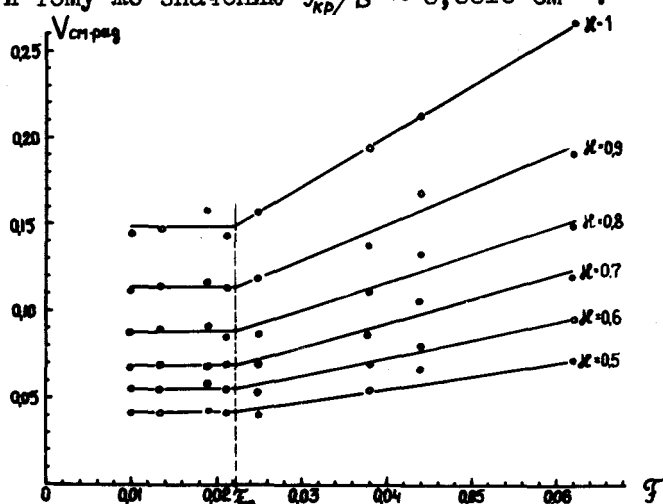


Рис. 2. Зависимость фазового объема пучка V , соответствующего доле тока пучка \mathcal{A} , от фактора \mathcal{F} для пучка, вырезанного диафрагмой $\varnothing = 4,6$ см.

Относительный наклон прямых участков зависит от $\mathcal{F} > \mathcal{F}_{кр}$ при разных \mathcal{A} для каждого пучка, с $\frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{d\mathcal{F}}$ для $\varnothing_2 = 6,6$ см и $\varnothing_1 = 4,6$ см составляют соответственно 26,7 и 19,6. Интересно отметить, что в ли и н $\frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{d\mathcal{F}} \cdot L \cdot R_n$,

где R_n — радиус пучка, L и L/R_n — абсолютное и относительное расстояния от катода до точки изменения, для двух диафрагм практически равны. Отсюда следуют два, правда, не слишком сильно обоснованных, вывода: рост фазового объема на относительном расстоянии от минимума потенциала $L/R_n \approx 50+60$ продолжается, причем примерно линейно, а минимум потенциала в пучке находится близко (на расстоянии менее нескольких радиусов пучка) от входа в канал. Отношение тока пучка в точке излома кривых $V(\mathcal{F})$ к предельному току, при котором электроны полностью останавливаются и образуется виртуальный катод, составляет для пучка радиусом 3 см примерно 0,10, а для пучка радиусом 2,1 см — около 0,07. По-видимому, $\Delta U/U_0$ при $\mathcal{F}_{кр}$ имеет тот же порядок.

Таким образом, уже при $\Delta U/U_0 \approx 0,1$ возникают искажения фазового объема пучка, причем фазовый объем увеличивается сразу весь, а не только его краевые участки, и рост фазового объема происходит на протяженном участке вдоль фокусирующего канала. Следует подчеркнуть, что в описываемых измерениях изменению фактора \mathcal{F} не соответствовало монотонное изменение тока пучка. Например, при $\varnothing_2 = 6,6$ см в точках $\mathcal{F} = 0,0644$, $0,0698$ и $0,0796$ значения тока были таковы: $I = 628$ А, 361 А и 832 А. Это обстоятельство показывает, что величина фазового объема зависит именно от относительного изменения потенциала в пучке.

Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что если режим работы электронной пушки выбран таким образом, что

$$\mathcal{F}/S > (\mathcal{F}/S)_{кр}, \quad (8)$$

то увеличение фазового объема является серьезным препятствием для корректной проводки пучка через длинный фокусирующий канал. В случае, если режим работы фиксирован и параметр \mathcal{F}/S на входе фокусирующего канала не меняется, можно, по-видимому, подобрать закон изменения напряженности фокусирующего

пучка без роста его радиуса и, следовательно, без потерь. Интересно отметить, что при ускорении в ЛИУ-5/5000 (импульс тока напряжения и тока пучка в котором не имеют плоской вершины) пучка с током $1+2$ кА, т.е. при \mathcal{F} существенно выше $\mathcal{F}_{кр}$, на выходе ускорителя в зависимости от режима фокусировки можно было получить пучок с амплитудой тока, близкой к току пучка в зазоре электронной пушки, но при длительности импульса тока, укороченной в 2+3 раза, либо получить двукратный импульс тока пучка, т.е. провести через фокусирующий канал только частицы, соответствующие одному значению энергии. В то же время при токе пучка ≤ 600 А и энергии на выходе пушки $500+600$ кэВ импульс тока пучка на выходе ускорителя совпадал с импульсом тока на входе канала как по длительности, так и по амплитуде.

Указанные соображения приводят к выводу, что при корректной проводке пучка в ЛИУ ток пучка не должен превышать некоторого значения $I_{кр.пр}$.

Из (8), (6) и (2) следует, что значения

$$I_{кор.пр} = \frac{I_0 S}{\sqrt{2}} \left(\frac{\gamma}{S} \right)_{кр} \frac{(\gamma-1)\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} \left[1 - \frac{3}{56}(\gamma-1) \right] = \frac{I_0 S}{\sqrt{2}} \left(\frac{\gamma}{S} \right)_{кр} \varphi(\gamma) \quad (9)$$

Предполагая, что значение $(\gamma/S)_{кр} = 0,0016$ является справедливым не только для геометрии электронной пушки ЛИУ-5/5000, но и для других пушек сходной конструкции, получаем

$$I_{кор.пр} = 0,019 S \varphi(\gamma) \text{ кА}. \quad (10)$$

График функции $\varphi(\gamma)$ приведен на рис.3. Видно,

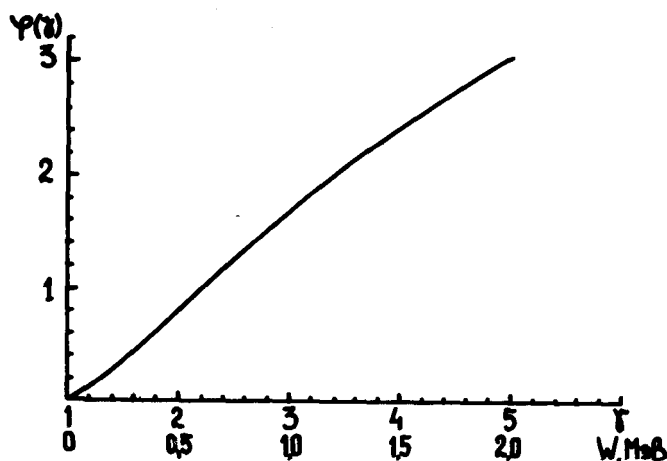


Рис.3. График функции $\varphi(\gamma)$ для определения тока пучка, пригодного для корректной проводки пучка.

что эта зависимость без существенных погрешностей может быть аппроксимирована прямой

$$\varphi(\gamma) \approx 0,80(\gamma-1), \quad (II)$$

что дает простую оценочную формулу для тока пучка, пригодного для корректной проводки:

$$I_{кор.пр} \approx 0,016 S(\gamma-1) \text{ кА}. \quad (12)$$

Оценим значения $I_{кор.пр}$ для ускорителей ЛИУ-5/5000 и АТА^{5,6}. В первом случае $S = 50 \text{ см}^2$, $\gamma = 1,75$, во втором $S = 320 \text{ см}^2$, $\gamma \approx 5$. Для ЛИУ-5/5000 получаем $I_{кор.пр} \approx 0,6 \text{ кА}$, для АТА — $I_{кор.пр} \approx 25 \text{ кА}$. Из (12) видно, что увеличение тока пучка, пригодного для корректной проводки, требует увеличения ускоряющего напряжения и площади апертуры трубы дрейфа электронной пушки.

Литература

1. Плотников В.К., Термен Е.Л. Фокусировка электронных пучков в линейных индукционных ускорителях. — Препринт ИТЭФ, № 107, 1984.
2. Вахрушин Ю.П. и др. Источники электронов линейного индукционного ускорителя. Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — Дубна, 1983, т.П.
3. Данильцев Е.Н. Печкин В.И. Импульсный десорбционный щелевой катод. — ПТЭ, 1979, № 4, с.36.
4. Ivey H.F. Advances in Electronics and Electron Physics, 1954, v.6, p.137-256.
5. Fessenden J.G. et al. The Experimental Test Accel. (ETA). — IEEE, 1981, NS-28, N3.
6. Briggs R.G. et al. The Experimental Test Accelerator (ETA). — IEEE Trans on Nucl. Sci, 1977, NS-26.