

Ускоряющая трубка электростатического ускорителя с повышенной эффективностью подавления вторичных заряженных частиц

С.В.Бажал, В.А.Романов

ГНЦ РФ Физико–энергетический институт, Обнинск, Россия

Необходимым условием устойчивой работы электростатического ускорителя является подавление разрядных процессов в канале ускоряющей трубки (УТ). Один из способов подавления, заключающийся в ограничении максимальной энергии вторичных заряженных частиц, реализован в УТ с наклонными полями [1].

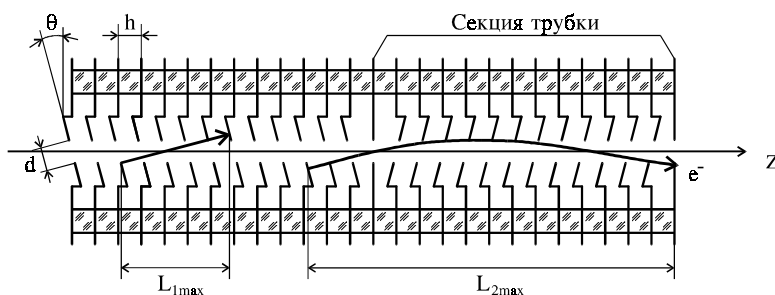


Рис. 1. Схема УТ с наклонными полями.

Вторичные частицы в этих трубках удаляются из канала поперечной составляющей электростатического поля, формируемого электродами, наклонными к оптической оси (рис.1). Электроды с одинаковым наклоном образуют секцию трубки, ускоряющее поле в которой постоянно по величине и

направлению, а продольный пробег низкоэнергетичных частиц L и их кинетическая энергия W ограничены величинами

$$L_{1max} = (d / \sin\theta + h) \cos^2\theta , \tag{1}$$

$$W_{1max} = qE_z(d / \sin\theta + h) , \tag{2}$$

где q – заряд частицы, E_z – продольная компонента поля, d – ширина апертуры электрода, h – шаг секционирования трубки, θ – угол между плоскостью электрода и нормалью к продольной оси Z .

Обычно трубка состоит из нескольких секций, в которых вектор напряженности E находится в одной общей плоскости, а направление его поперечной компоненты последовательно изменяется на противоположное для того, чтобы ускоряемый пучок не отклонялся от оптической оси. Однако, как было показано в работе [2], вторичные частицы (электроны или ионы), появившиеся вблизи границы между секциями, при переходе в область с противоположным наклоном поля изменяют направление движения и, следовательно, могут ускориться до энергии, значительно превышающей предел (2). Оценка их максимального пробега L_{2max} , выполненная в нерелятивистском приближении без учета влияния призматического поля между электродами с противоположным наклоном, дает

$$L_{2max} = (3 + 2\sqrt{2}) (d / \sin\theta + h) \cos^2\theta . \tag{3}$$

Данная оценка справедлива при условии, что длина каждой секции в трубке не менее $(2,5 + 2\sqrt{2}) (d / \sin\theta + h) \cos^2\theta$. В противном случае частицы попадут в следующую секцию и продолжат набор энергии. Экспериментальное измерение спектра рентгеновского излучения, сопровождающего электрон-ионные процессы в трубке с

наклонными полями, подтвердило существование высокоэнергетичных электронов в ускорительном канале [3].

Более эффективно удаляются вторичные частицы в УТ со спиральными полями [4]. В этих трубках каждый последующий наклонный электрод повернут относительно предыдущего в азимутальном направлении на некоторый угол, что

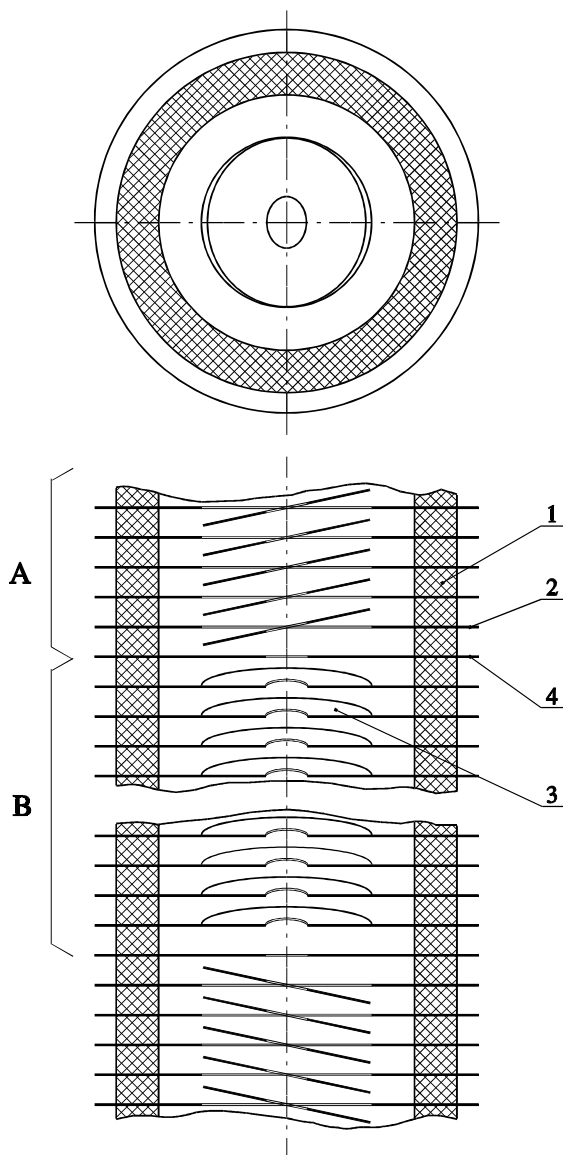


Рис. 2. Структура УТ со скрещивающимися наклонными полями.

оси установлен плоский электрод 4 с центральным отверстием, а каждая последующая секция B повернута в одном и том же направлении по азимуту на 90° относительно предыдущей A. Таким образом при переходе от секции к секции обеспечивается поворот на 90° поперечной составляющей ускоряющего поля, которое в пределах отдельной секции остается постоянным по величине и направлению.

обеспечивает удаление вторичных частиц на протяженном участке при относительно небольшом отклонении ускоряемого пучка от оптической оси. Экспериментальное измерение спектра рентгеновского излучения от трубок с наклонными и спиральными полями показало, что его максимальная энергия в последнем случае заметно ниже [5]. Однако внесение азимутальной компоненты в импульс вторичной частицы приводит к тому, что в момент соударения с электродом ее энергия может превысить предел (2), характерный для “идеальной” (т.е. состоящей из одной секции) трубки с наклонным полем. Следует отметить также, что трубки со спиральной структурой сложнее, чем с наклонными полями, в технологическом отношении.

Как альтернатива рассматриваемым конструкциям нами предложена схема трубки со скрещивающимися наклонными полями [6]. Ускоряющая трубка (рис. 2) включает в себя несколько секций, каждая из которых состоит из осесимметричных изолирующих колец 1, вакуумно-плотно соединенных с металлическими электродами 2. Центральные части электродов, предназначенные для формирования ускоряющего поля, выполнены в виде плоской электродной вставки 3 с отверстием для прохождения пучка заряженных частиц. Вставки расположены под углом к оптической оси трубки, который остается постоянным в пределах секции.

Между секциями перпендикулярно

Удаление вторичных частиц из канала в рассматриваемой трубке происходит следующим образом. Если низкоэнергетичная частица появилась на расстоянии между секциями, которое больше, чем L_{1max} (соотношение (1)), то ее пробег не превысит L_{1max} . Частица, появившаяся вблизи границы, может попасть в соседнюю секцию. Однако, сохраняя направление приобретенного поперечного импульса и получив дополнительный импульс в перпендикулярном к нему (а не в обратном, как в обычной схеме) направлении, частица покинет канал. Если апертура электрода имеет форму квадрата со стороной d , а длина секции составляет по крайней мере $(2\sqrt{2} - 1)(d/\sin\theta + h)\cos^2\theta$, то ее максимальный пробег будет ограничен величиной

$$L_{2max} = 2(d/\sin\theta + h)\cos^2\theta, \quad (4)$$

что почти в 3 раза меньше, чем для обычной УТ с наклонными полями. В более сложном для аналитических оценок случае применения электрода с круглой апертурой справедливо отношение

$$L_{2max} < 2(d/\sin\theta + h)\cos^2\theta. \quad (5)$$

Для выяснения возможности транспортировки протонного пучка через новую ускоряющую структуру использовалась аналитическая методика, развитая в работе [7]. Были определены условия, при которых пучок, входящий в трубку по оптической оси, на выходе из нее возвращается на ось. В частности, для трубки, состоящей из $4n$ секций ($n = 2, 3$), эти условия принимают вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n l_{4i-3} = \sum_{i=1}^n l_{4i-1} \\ \sum_{i=1}^n (l_{4i-2} + l_{4i-1}) = 0,5l \\ \sum_{i=1}^n (\sqrt{L_0 + z_{4i-3}} - \sqrt{L_0 + z_{4i-4}}) = \sum_{i=1}^n (\sqrt{L_0 + z_{4i-1}} - \sqrt{L_0 + z_{4i-2}}) \\ \sum_{i=1}^n (\sqrt{L_0 + z_{4i-1}} - \sqrt{L_0 + z_{4i-3}}) = 0,5(\sqrt{L_0 + L} - \sqrt{L_0}) \end{array} \right., \quad (6)$$

где L – длина трубки, l_i – длина i -ой секции, z_i – координата границы между i -ой и $i+1$ -ой секциями ($z_0 = 0$), параметр $L_0 = W_0/(eE)$ имеет размерность длины и соответствует такому перемещению однозарядного иона в однородном поле E , при котором его энергия инжекции в наклонное поле будет равна W_0 .

На основании полученных соотношений разработан вариант структуры со скрещивающимися наклонными полями для УТ высокоэнергетичной ступени перезарядного ускорителя ЭГП – 15 ГГц ФЭИ. Трубка с изолирующей длиной 4,6 м, предназначенная для эксплуатации при напряжении до 7,5 – 8,0 МВ, состоит из 8 секций с наклонными полями. Угол между плоскостью наклонной электродной вставки и нормалью к оси трубки равен 10° , диаметр апертуры ускорительного канала – 40 мм. На рис. 3 представлены проекции расчетной траектории осевой частицы на координатные плоскости ХОZ и YOZ. Численные результаты получены решением траекторных уравнений [8] с учетом влияния призматических полей на границе между секциями

$$\begin{cases} x'' = [q / (mv^2)] [1 + (x')^2 + (y')^2] (E_x - x'E_z) \sqrt{1 - (v/c)^2} \\ y'' = [q / (mv^2)] [1 + (x')^2 + (y')^2] (E_y - y'E_z) \sqrt{1 - (v/c)^2} \end{cases} \quad (7)$$

Как видно из рисунка, геометрия секций обеспечивает прохождение пучка через канал и его выход в конце трубки на оптическую ось. На рис. 4а показаны расчетные зависимости поперечной координаты $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ низкоэнергетичных электронов, появившихся на образующей ускорительного канала рассматриваемой трубки вблизи границы между секциями, от продольной координаты z . На рис. 4б

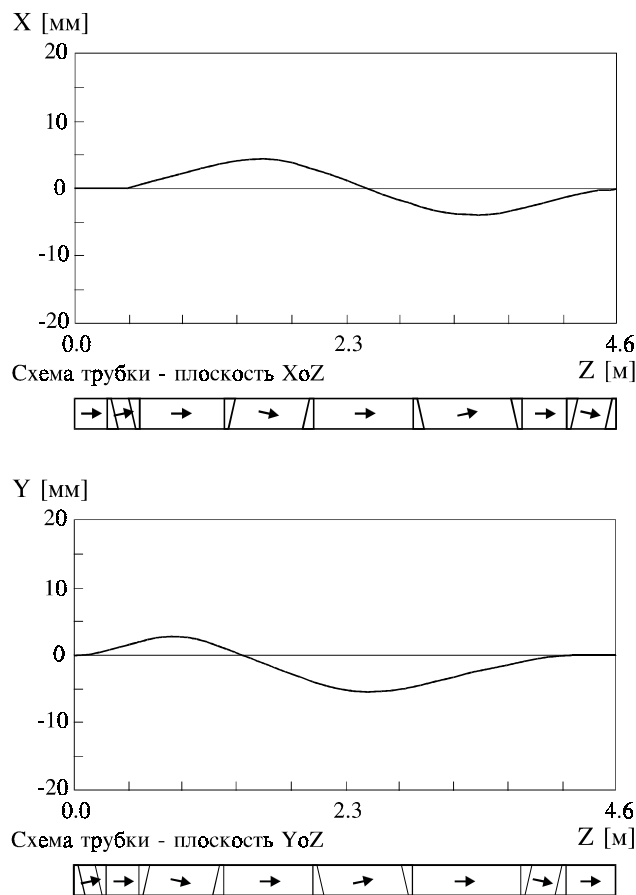


Рис. 3. Проекция траектории осевой частицы в УТ со скрещивающимися полями.

приведены траектории электронов в обычной трубке с наклонными полями, у которой поперечный размер апертуры канала также составляет 40 мм, а угол наклона электрода – 10°. (Предполагается, что ускорившиеся вторичные частицы после пересечения образующей канала задерживаются электродами трубки.) Сравнение пробегов вторичных электронов указывает на преимущество новой ускоряющей структуры.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-02-17294а).

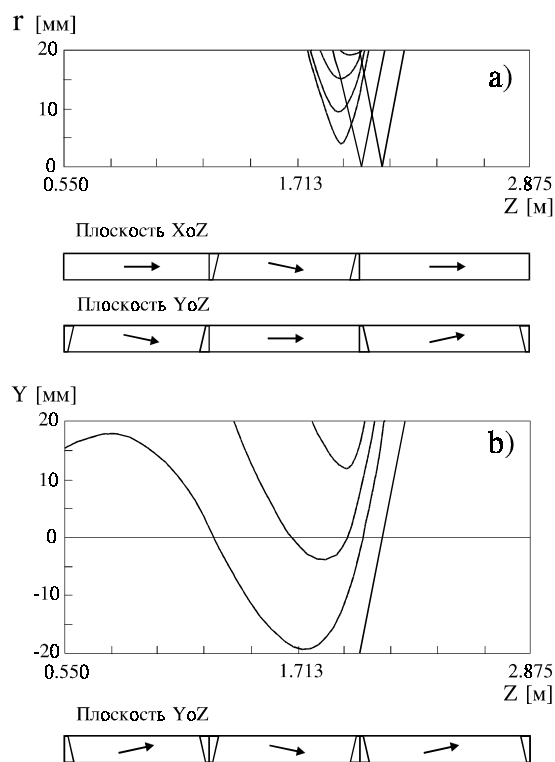


Рис. 4. Проекция траекторий вторичных электронов в УТ:
а) со скрещивающимися полями; б) с наклонными полями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van de Graaff R.J. et.al., Nature, 195, p.1293 (1962).
2. Сербинов А.Н., Мажулин В.А. Эффективность улавливания вторичных заряженных частиц в ускоряющих трубках с наклонными полями // ПТЭ, 1967, № 5, с. 221.
3. Kiss A.Z. et.al. Calculations and measurements on the maximum energy of secondary electrons in inclined-field acceleration tubes // Nucl. Instr. Meth. 1974. V.117. p.325-329.
4. Allen W.D. A new type of accelerating tube for electrostatic generators: NIRL / R / 21, Chilton, 1962.
5. Kiss A.Z. et.al. Optical behaviour of acceleration tubes studied in bremsstrahlung measurements // Nucl. Instr. Meth. 1983. V.212. p.81-89.
6. Бажал С.В., Романов В.А. // патент РФ № 95120463.
7. Бажал С.В., Романов В.А. Динамика многозарядных ионов в ускоряющих трубках с наклонными полями на перезарядных ускорителях -- XIV Конф. по УЗЧ, сб. докладов, т.1, 1994, Протвино, с.81-86.
8. Силадьи М. Электронная и ионная оптика - М.: "Мир", 1990.