

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА АВТОРЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ

А. П. ИШКОВ

(Представлена научным семинаром сектора сверхвысоких частот и теории ускорителей НИИ ЯФЭА)

Общезвестные технологические трудности в создании линейных ускорителей привели к поиску новых методов ускорения, в результате которых был предложен авторезонансный метод ускорения [1, 2]. Отличительной особенностью этого метода ускорения является использование поперечных электромагнитных полей при наложении продольного постоянного магнитного поля, величина которого определяется частотой колебаний электромагнитного поля. Траектория ускоряемой частицы при этом будет представлять собой коническую спираль с растущим продольным шагом.

Непосредственное использование плоской электромагнитной волны, распространяющейся в свободном пространстве, малоэффективно, потому что для получения необходимой напряженности электрического поля потребуются значительные мощности. Магнитные волны в стандартных волноводах, типа H_{11} в круглом и H_{10} в прямоугольном, позволяют просто осуществить авторезонансное ускорение электронов, однако достигаемая энергия ускоренных электронов в них ограничена [3]. Ограничения вносятся расстройкой резонансного взаимодействия ускоряемого электрона и электромагнитной волны, так как фазовая скорость волны в гладком волноводе больше скорости света. Поэтому в волноводах процесс ускорения становится периодическим. Для стандартного волновода участок, на котором происходит ускорение, составляет несколько сантиметров [3].

Для уменьшения фазовой скорости волны H_{10} в прямоугольном волноводе с целью увеличения участка, на котором происходит ускорение, целесообразно использовать увеличение поперечного сечения волновода. При этом одновременно создаются благоприятные условия для увеличения радиуса конической спирали, по которой движется ускоряемый электрон.

Целью данной статьи является исследование ускоряющей системы авторезонансного ускорителя на основе прямоугольного волновода большого сечения. Исходя из практических соображений, в качестве ускоряющей системы нами был выбран прямоугольный волновод сечением 120×110 мм. Фазовая скорость волны в таком волноводе составляет 1,15. Длина ускоряющей системы определена по формуле [3]

$$z = \frac{\lambda \beta_{\phi}}{2(\beta_{\phi}^2 - 1)},$$

и для нашего случая она составляет 200 мм. На этом участке укладывается половина периода ускорения.

Согласование ускоряющего волновода со стандартными волноводами в первоначальном варианте осуществлялось с помощью максимально плоских ступенчатых четвертьволновых волноводных трансформаторов [4]. С генератором ускоряющий волновод соединялся стандартным волноводом сечения 72×44 мм, а с согласованной нагрузкой волноводом сечения 72×34 мм (рис. 1, а). Частотная характеристика этой ускоряющей системы представлена на рис. 2, а.

Ускоряющая система одновременно являлась и вакуумной камерой, в которой создавался вакуум $5 \cdot 10^{-6}$ тор. Инжекция электронов осуществлялась по оси ускоряющей системы через отверстие в изгибе волновода. Вывод ускоренных электронов производился через алюминиевое окно толщиной 30 мк в торцевой стенке согласующего трансформатора.

Исследование ускорителя в действии показало, что ускоряющая система позволяет ускорить электроны до энергии несколько Мэв. Экспериментально было установлено, что острые кромки согласующего трансформатора внутри камеры создавали благоприятные условия для автоэлектронной эмиссии. На фоне автоэлектронной эмиссии влияние инжекции импульса тока электронов до 1 ампера не было замечено.

Отмеченный недостаток был устранен упрощением рабочей поверхности ускоряющей системы посредством замены ступенчатых трансформаторов рупорами. Электрическая длина рупоров выбрана равной 90° для взаимной компенсации отражений на изломах волноводной поверхности (рис. 1, б). Уменьшение геометрической длины согласующего трансформатора облегчает одновременно транспортировку инжектированного пучка электронов из пушки в ускоряющую систему, которая помещается в магнитное поле [5].

Рассчитать электрическую длину рупора можно из следующих соображений: электрическая длина волновода определяется соотношением

$$\varphi = 360^\circ \frac{l}{\Lambda}, \quad (1)$$

где l — геометрическая длина волновода,

Λ — длина волны в волноводе и определяется по формуле

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}. \quad (2)$$

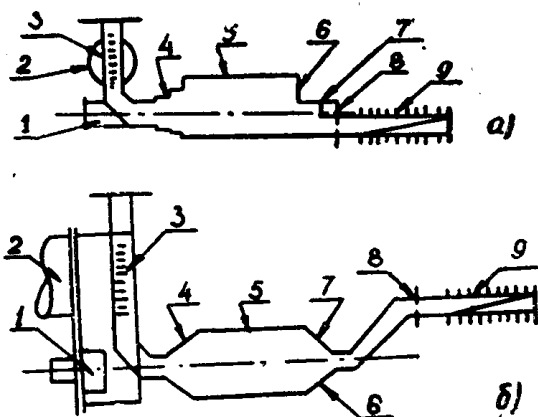


Рис. 1.

1 — пушка, 2 — фланец вакуумного насоса, 3 — щели для откачки волновода, 4 — входной согласующий трансформатор, 5 — ускоряющий волновод, 6 — место вывода пучка ускоренных электронов, 7 — выходной согласующий трансформатор, 8 — кварцевое окошко, 9 — поглощающая нагрузка

Рупор является волноводом, в котором λ — величина переменная, и если его ширина нарастает линейно с увеличением его длины, то для него можно записать

$$\lambda_{кр} = 2(a + cz), \quad (3)$$

где z — текущая координата по оси рупора,

a — начальная ширина рупора,

c — параметр, определяющий угол между узкими стеклами рупора.

Если (3) и (2) подставить в (1), то электрическая длина рупора может быть после предельного перехода представлена в форме интеграла

$$\varphi = \frac{360^\circ}{\lambda} \int_0^l \sqrt{1 - \left[\frac{\lambda}{2(a + cz)} \right]^2} dz. \quad (4)$$

Интегрирование (4) дает следующее выражение для φ :

$$\varphi = \frac{90^\circ}{\lambda} \left[\sqrt{4(a + 2cl)^2 - \lambda^2} - \sqrt{4a^2 - \lambda^2} - \lambda \left(\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{4(a + 2cl)^2 - \lambda^2}}{\lambda} - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{4a^2 - \lambda^2}}{\lambda} \right) \right]. \quad (5)$$

Полагая $\varphi = 90^\circ$ из (5), легко численным методом определить значение l .

Частотная характеристика ускоряющей системы с рупорными согласующими трансформаторами представлена на рис. 2, б. Из рисунка

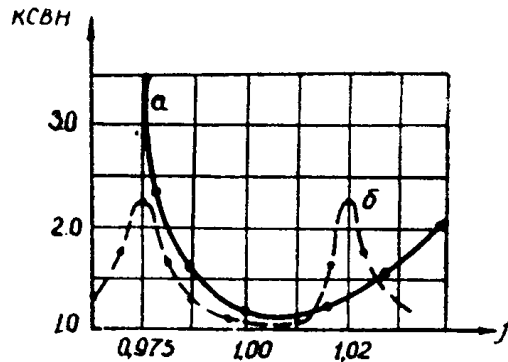


Рис. 2.
а — частотная характеристика ускоряющей системы с четвертьволновыми максимально плоскими согласующими трансформаторами; б — частотная характеристика ускоряющей системы с рупорными согласующими трансформаторами

видно, что КСВН ускоряющей системы на рабочей частоте не хуже 1,1. На макете посредством зондов экспериментально было установлено отсутствие высших типов волн в ускоряющей системе.

Запуск ускорителя при использовании ускоряющей системы с рупорным согласователем показал, что фон излучения, обусловленный электронами автоэмиссии, уменьшился на порядок. Тонкие стенки рупора, соединяемого с согласованной нагрузкой, покрывались люминофором, для наблюдения места пересечения ускоренных электронов, движущихся по конической спирали с рупором. Свечение наблюдалось в форме дуг окружности на стенках рупора, что вполне согласуется с теорией [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. ДАН, 145, 1259, 1962.
2. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. ЖЭТФ, 44, 261, 1963.
3. А. А. Воробьев и др. Атомная энергия, 22, вып. 1, стр. 3, 1967.
4. А. П. Фельдштейн и др. Справочник по элементам волноводной техники, 1963.
5. А. П. Ишков. Изв. ТПИ, 184, 1970.