

## **Бипериодическая призматическая ускоряющая структура для портативного разрезного микротрона**

*Д.В.Костин, В.Е.Мазепов, Н.П.Собенин,  
Московский государственный инженерно физический институт  
(Технический Университет), Москва, Россия  
А.И.Карев,  
Физический институт РАН, Москва, Россия  
В.И.Мелехин,  
Институт физических проблем РАН, Москва, Россия  
В.И.Шведунов,  
Институт ядерной физики при МГУ, Москва, Россия*

Для портативного разрезного микротрона (РМ) на энергию 70 МэВ необходима ускоряющая структура с уменьшенным размером в плоскости орбит электронов с целью обеспечения прохода частиц на первом обороте. В качестве решения этой задачи предлагается использовать бипериодическую структуру на основе призматических резонаторов (БСПР) с прямоугольными отверстиями в диафрагмах. Такая структура обладает возможностью горизонтальной высокочастотной фокусировки, что также позволяет упростить конструкцию РМ. Представлены результаты расчета фокусирующего градиента и других электродинамических характеристик (ЭДХ) для различных вариантов структуры, включая вариант оптимальный для РМ.

### **1. Введение**

В ранее проводимых нами исследованиях в портативном РМ применялись бипериодические ускоряющие структуры на основе круглых резонаторов или БСПР с круглыми отверстиями в диафрагмах [2]. Последняя из них удовлетворяла условию прохода электронов на первой орбите. БСПР с круглыми пролетными отверстиями подобна квадруполью с вертикальной фокусировкой и горизонтальной дефокусировкой частиц, совершающих устойчивые фазовые колебания в РМ. Для достижения горизонтальной фокусировки в БСПР вместо круглых пролетных отверстий применены прямоугольные отверстия, причем отверстия, как и сами резонаторы структуры вытянуты в вертикальном направлении. Предварительные расчеты динамики пучка в РМ с горизонтально фокусирующей БСПР приведены в работе [3].

### **2. Расчет ЭДХ ускоряющей структуры**

Для расчета геометрических размеров структуры с оптимальными значениями ЭДХ были использованы как аналитические, так и численные методы.

Коэффициенты связи ускоряющих ячеек и ячеек связи были рассчитаны с использованием [4] (щели связи моделируются посредством симметричной полосковой линии):

$$\begin{cases} k_{c1} \equiv \left( \frac{4\lambda_p f^2}{c^2} \right)^2 \frac{Z_{sl}}{Z_0} \frac{\tilde{l}_{s1}^3}{3} \frac{1}{\sqrt{L_a L_c}} \left( \frac{A}{B} \right)^3 \left[ 1 + \left( \frac{A}{B} \right)^2 \right]^{-2} \sin^2 \left( \frac{\pi x_{s1}}{B} \right) \\ k_{c2} \equiv \left( \frac{4\lambda_p f^2}{c^2} \right)^2 \frac{Z_{sl}}{Z_0} \frac{\tilde{l}_{s2}^3}{3} \frac{1}{\sqrt{L_a L_c}} \frac{A}{B} \left[ 1 + \left( \frac{A}{B} \right)^2 \right]^{-2} \sin^2 \left( \frac{\pi y_{s2}}{A} \right) \end{cases}, \text{ где } \frac{Z_{sl}}{Z_0} = \left\{ \frac{t}{d_s} + \frac{2}{\pi} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{\pi t}{2d_s} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (1)$$

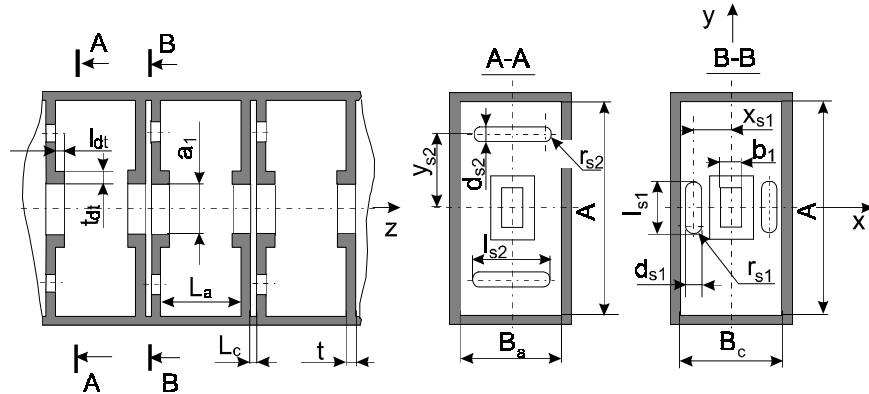


Рис. 1. БСПР с прямоугольными пролетными отверстиями.

Размеры  $A$ ,  $B$ ,  $L_a$ ,  $L_c$ ,  $l_{s1}$ ,  $l_{s2}$ ,  $x_{s1}$ ,  $y_{s2}$ ,  $t$ ,  $d_s$  обозначены на рис.1, причем  $\lambda_p = 2D = L_a + L_c + 2t$ . Необходимо обеспечить равные значения коэффициентов связи от обеих пар щелей.

Для 3-мерного численного расчета ЭДХ БСПР, которая является аксиально несимметричной структурой, была использована одна из версий программы MAFlA [5], адаптированная для расчетов на PC Pentium 200MHz/64Mb RAM, позволяющая вести расчет на сетке с количеством узлов до 400000 и выполнять расчет на сетке со 190000 узлов за час. Проведены расчеты БСПР с геометрическими размерами представленными в таблице 1, результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 1. Геометрические размеры БСПР.

A	B <sub>a</sub>	B <sub>c</sub>	L <sub>a</sub>	L <sub>c</sub>	t	a <sub>1</sub> ×b <sub>1</sub>	l <sub>dt</sub>	t <sub>dt</sub>	x <sub>s1</sub>	l <sub>s1</sub>	d <sub>s1</sub> =2r <sub>s1</sub>	y <sub>s2</sub>	l <sub>s2</sub>	d <sub>s2</sub> =2r <sub>s2</sub>	
1	110	55	52.9	37	3.5	5.5	16×10	2.9	5.0	20	20.8	8	41.5	31.5	8
2	110	55	53.8	37	3.5	5.5	20×10	3.0	5.0	20	20.8	8	41.5	31.5	8
3	110	55	55.0	37	3.9	5.5	30×10	2.9	5.0	20	21.4	8	41.5	31.5	8
4	110	55	55.9	37	3.9	5.5	40×10	2.9	5.0	20	21.4	8	41.5	31.5	8
5	110	55	53.4	37	3.9	5.5	30×5	2.9	5.0	20	20.8	8	41.5	31.5	8

Таблица 2. ЭДХ БСПР с прямоугольными отверстиями в диафрагмах.

	f <sub>π/2</sub> МГц	Q	k <sub>c</sub> %	r <sub>eff,sh</sub> МОм/м	(G <sub>x</sub> ) <sub>n</sub> м <sup>-2</sup>	(G <sub>y</sub> ) <sub>n</sub> м <sup>-2</sup>
1	2,918	11,400	3.8	51.0	-15	+15
2	2,905	11,400	3.7	50.5	+350	-350
3	2,897	11,400	3.7	48.9	+650	-650
4	2,889	11,600	3,6	48,8	+730	-730
5	2,895	11,900	3.6	55.8	+810	-810

На частоте рабочего вида колебаний  $\pi/2$  при фазовой скорости  $\beta_{ph}=1$  были рассчитаны значения эффективного шунтового сопротивления  $r_{sh,eff}$ , добротности  $Q$ , коэффициента связи  $k_c$ , нормализованных градиентов поля  $(G_x)_n$  и  $(G_y)_n$ . Для оценки значений ЭДХ на других частотах можно воспользоваться тем, что  $r_{sh,eff} \sim \sqrt{f}$ , а  $(G_x)_n \sim f^2$ . Затем было проведено численное моделирование полной ускоряющей секции РМ, состоящей из семи ускоряющих ячеек и шести ячеек связи. Схема с учетом квадрупольной симметрии структуры представлена на рис.2.

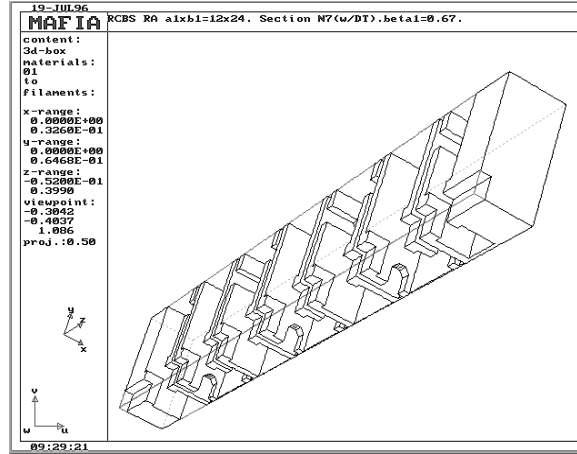


Рис. 2. Схема ускоряющей секции РМ для расчета по программе MAFIA.

### 3. Фокусирующие свойства БСПР

Поперечные фокусирующие градиенты обычно рассчитываются по формулам

$$G_x(x,0) = -\frac{1}{\omega} G_x(x,0)_n E_{z1}(0,0) \sin \varphi = -\frac{1}{\omega} \frac{\partial^2 E_{z1}(x,0)/E_{z1}(0,0)}{\partial x^2} E_{z1}(0,0) \sin \varphi$$

$$G_y(0,y) = \frac{1}{\omega} G_y(0,y)_n E_{z1}(0,0) \sin \varphi = \frac{1}{\omega} \frac{\partial^2 E_{z1}(0,y)/E_{z1}(0,0)}{\partial y^2} E_{z1}(0,0) \sin \varphi$$
(2)

$\varphi$  – фаза сгустка по отношению к ВЧ-полю, причем релятивистская частица с фазой  $\varphi=0$  получает максимальный прирост энергии.  $E_{z1}(x,y)$  – первая гармоника разложения поля в ряд Фурье. Фокусирующая сила ячейки (в МэВ/с/м):

$$S_x = \frac{dp_x}{dx}, S_y = \frac{dp_y}{dy}. \quad (3)$$

Фокусирующие силы, рассчитанные при численном моделировании динамики электронов, связаны с фокусирующими градиентами посредством теоремы Панофского-Венцеля. При периоде структуры  $D=\lambda/2$  имеем

$$S_u(x,y) = -\frac{\lambda^2 \sin(\varphi_0)}{8\pi} G_u(x,y) E_{z1}(0,0); \quad u = x, y, \quad (4)$$

где  $E_{z1}$  измеряется в МВ/м.

Численное моделирование динамики пучка проведено с использованием программы RTMTRACE [6]. При этом электромагнитное поле в структуре получено при расчете по программе MAFIA. В качестве теста проведен расчет для поля  $E_{110}$  в

цилиндрическом резонаторе без пролетных отверстий. Для резонатора с радиусом 46.86 мм и длиной 61.182 мм получена резонансная частота 2451.4 МГц (расчет по MAFIA), и для  $E_0 \approx 19.2$  МВ/м с использованием MAFIA и RTMTRACE получены значения  $G_x = G_y \approx 1360$  м<sup>-2</sup>,  $S_x = S_y|_{y_{max}} \approx 19.2$  МэВ/с/м. Аналитический расчет дает соответственно 2448.9 МГц, 1320 м<sup>-2</sup>, и 19.2 МВ/м.

Фокусирующий градиент для БСПР с прямоугольными пролетными отверстиями зависит от отношения  $a_1/b_1$  и меняет знак при  $a_1/b_1 \sim 1.6$ , как видно из таблицы 2 и рис.3. Подобные результаты получены для БСПР без щелей связи (таблица 3.) Поперечное сечение ускоряющей ячейки было выбрано 67×127 мм<sup>2</sup>, период структуры 61.182 мм, длина ускоряющей ячейки 41.72 мм и длина трубок дрейфа 4 мм.

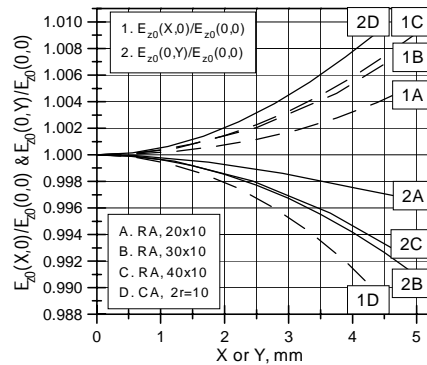


Рис. 3. Зависимость амплитуды первой гармоники поля  $E_z$  от значения поперечной координаты вблизи оси структуры.

Таблица 3. Результаты расчета для БСПР с прямоугольными пролетными отверстиями, без щелей связи.

$a_1 \times b_1$ , мм <sup>2</sup>	f, МГц	$r_{eff.sh}$ МОм/м	$ S _{max}$ МэВ/с/м	$(G_x)_n$ м <sup>-2</sup>	$(G_y)_n$ м <sup>-2</sup>	$E_{ac}$ , МВ/м	$E_{штг}$ , МВ/м
10×10	2458.09	53	9.9	-660	660	12.2	50
16×10	2459.63	58	0.55	50	-50	12.2	5
20×10	2444.29	52	4.6	330	-330	12.2	50
30×10	2427.96	52	7.8	530	-530	12.2	50

#### 4. Заключение

Возможность ВЧ-фокусировки в горизонтальной плоскости в БСПР с прямоугольными пролетными отверстиями позволяет упростить конструкцию РМ при использовании данной ускоряющей структуры. При расчете БСПР были получены значения фокусирующих градиентов порядка 650 м<sup>-2</sup> и эффективного шунтового сопротивления 48.9 МОм/м при  $\beta_{ph}=1$  в S диапазоне частот, для использования в РМ структура имеет достаточно хорошие параметры.

## 5. Литература

1. W.P. Trower, A.I. Karev, V.N. Melekhin, V.I. Shvedunov, and N.P. Sobenin, *Nucl. Instrum. Meth.* **B99** (1995) 736;
2. N.P. Sobenin, V.N. Kandrunin, A.I. Karev, V.N. Melekhin, V.I. Shvedunov, and W.P. Trower, (IEEE, Piscataway, 1996).p.1827.
3. V.N. Melekhin, A.I. Karev, V.I. Shvedunov, N.P. Sobenin and W.P. Trower, in *Proc. 5th European Particle Accelerator Conf.* 1996, in press
4. Н.П.Собенин, Б.В.Зверев, *Электродинамические Характеристики Ускоряющих Резонаторов*: Энергоатомиздат, Москва, 1993, 220 с.
5. R. Klatt, F. Krawczyk, W.R. Novender, C. Palm, T. Weiland. in *Proc. 1986 Linear Accelerator Conf.*, SLAC-303 p.276 (1986). A version this MAFIA code, obtained by V.S. in 1989 from T.W.
6. В.Г.Геворкян, А.Б.Савицкий, М.А.Сотников, В.И.Шведун, ВИНТИ депозит номер 183-689 (1989) -- программа RTMTRACE .