

## ЭНЕРГООБМЕН ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

Д. А. Михеев<sup>1</sup>, Г. М. Казарян<sup>1</sup>, В. Л. Саввин<sup>1</sup>, К. В. Иванов<sup>1</sup>, А. В. Коннов<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,  
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн<sup>2</sup>ФГУП «НПП ТОРИЙ», Москва

prodimm@mail.ru

Один из наиболее распространённых вариантов резонаторного устройства, используемых в параметрических и электростатических усилителях [1], показан на рис. 1. В цилиндрической полости резонатора расположены две ламели, в узком и протяжённом зазоре между которыми возбуждается поперечное высокочастотное электрическое поле микроволнового сигнала, вводимого посредством петли связи. Электронный пучок инжектируется в резонатор через круглое отверстие в торце, проходит через зазор между ламелями и выходит из резонатора через отверстие в противоположном торце.

При взаимодействии высокочастотного поля с электронным пучком подводимая энергия микроволн преобразуется в поперечное циклотронное вращение пучка при условии циклотронного резонанса  $\omega = \omega_c$ , где  $\omega$  – частота микроволн на входе резонатора,  $\omega_c$  – циклотронная частота. При этом в пучке не происходит продольной модуляции по плотности, то есть пучок не группируется в сгустки [2]. Поэтому действие сил пространственного заряда незначительно, и передача мощности сигнала в пучок носит линейный характер. Следовательно, электровакуумные приборы, в которых используется данный вариант резонаторного устройства, лишены ограничений по КПД, связанных с действием сил пространственного заряда.

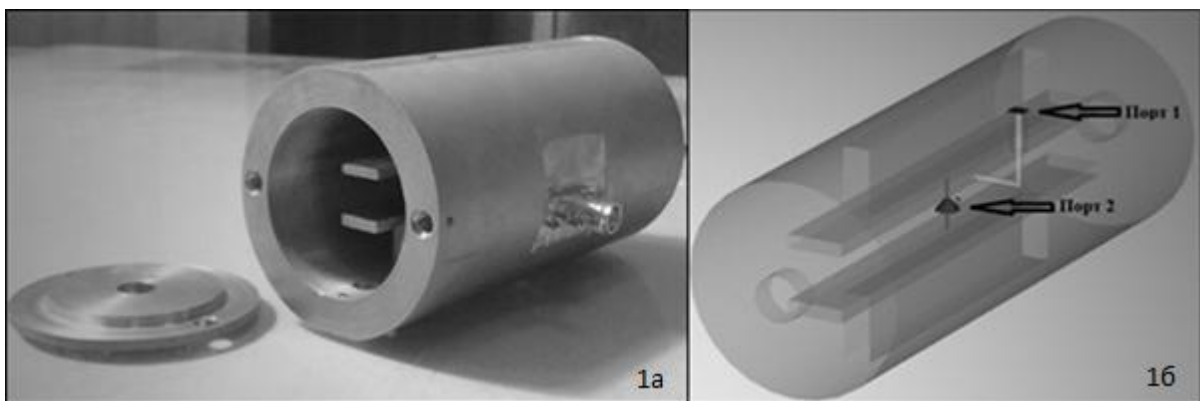


Рис. 1. Цилиндрический резонатор (1а) и его трёхмерная модель (1б)

Другой отличительной особенностью данной конструкции резонатора является длительное взаимодействие высокочастотного поля с быстрой циклотронной волной электронного потока. В отличие от резонаторов клистронов, где пролётный угол электронов обычно не превышает  $\pi/2$ ,

в резонаторе с ламелями пролётный угол электронов может быть равен нескольким десяткам  $\pi$ .

В настоящей работе проводится трёхмерное моделирование цилиндрического резонатора, представленного на рисунке 1а. По полученным результатам определяется форма и местоположение петли связи, а также геометрия и размеры согласующего узла резонатора, обеспечивающие высокоэффективный энергообмен резонансной моды с электронным пучком. Затем исследуется динамика взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем резонатора.

На рисунке 1б представлена трёхмерная модель резонатора. Его геометрические размеры подобраны так, чтобы обеспечить циклотронный резонанс на частоте  $\omega = 2,45$  ГГц при входной мощности не более 1 кВт. Энергия микроволн вводится через волноводный порт 1. Для симуляции электронного пучка используется дискретный порт 2 с некоторым сопротивлением. Применение данной модели возможно благодаря тому, что электронный пучок имеет своё значение электронной проводимости:

$$G_e = \frac{1}{8} \frac{I_0}{U_0} \left( \frac{l}{d} \right)^2, \quad (1)$$

где  $I_0$  – ток пучка,  $U_0$  – ускоряющее напряжение,  $d$  – величина зазора между ламелями,  $l$  – длина ламели. Сопротивление дискретного порта выражается как обратная величина проводимости пучка.

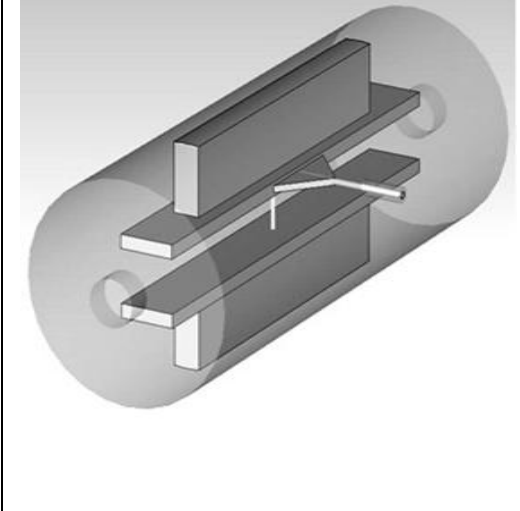
	Вид согласующего узла	$S_{11}$	$S_{12}$
	L-образный	0,585	0,811
	I-образный	0,507	0,862
	I-образный с прямоугольной вставкой	0,195	0,973
	I-образный с треугольной вставкой	0,130	0,991

Рис. 2. Резонатор с треугольной вставкой и S-параметры для различных узлов согласования

Моделирование резонатора позволяет получить S-параметры матрицы рассеяния, в частности, коэффициент отражения ( $S_{11}$ ) и коэффициент передачи из порта 1 в порт 2 ( $S_{12}$ ). Проведена оптимизация данных параметров с целью получения максимально возможного коэффициента передачи при минимально возможном коэффициенте отражения для обеспечения высокоэффективного энергообмена резонансной моды с электронным пучком.

В рамках оптимизации для моделирования использовались L- (рис. 1б) и I-образные (рис. 2) узлы согласования. Установлено, что I-образный узел с несколькими вставленными прямоугольными пластинами значительно улучшает характеристики резонатора. Наиболее же предпочтительным является I-образный согласующий узел с треугольной вставкой (рис. 2).

Исследована структура основной моды  $\omega = 2,532$  ГГц нагруженного резонатора. Электрическое поле исследуемой моды сосредоточено между ламелями и имеет необходимую однородную структуру. Собственная добротность (обусловленная только потерями в резонаторе) основной моды оказалась равной  $Q_0 = 5079$ . Нагруженная добротность (при введённой нагрузке в виде дискретного порта) составила  $Q_H = 56,9$ . Точность результатов моделирования экспериментально проверена при помощи измерительного комплекса Rohde&Schwartz.

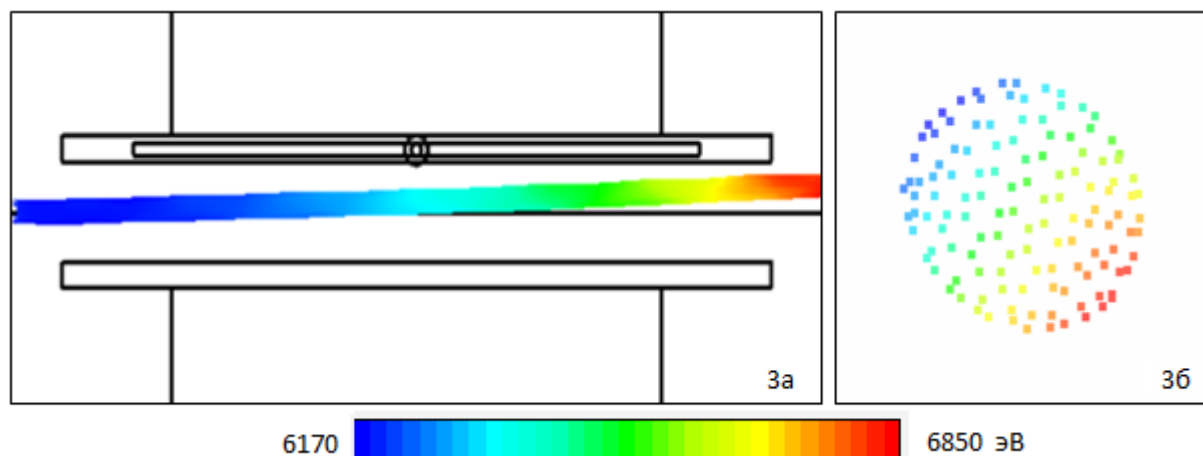


Рис. 3. Профиль электронного пучка (3а) и его поперечное сечение на выходе из резонатора (3б)

Изучена динамика взаимодействия электронного пучка с высокочастотным поперечным полем (рис. 3). Использовался запускаемый с прямого катода модельный пучок радиуса  $r = 0,8$  мм с током  $I_0 = 0,1$  А и ускоряющим потенциалом  $U_0 = 2000$  В, помещённый в однородное магнитное поле  $B = 0,088$  Тл. Входная мощность микроволнового сигнала составила  $P_{вх} = 800$  Вт. Показано, что в электронном пучке не образуется сгустков (рис. 3а).

Получен спектр скоростей на выходе из резонатора. Он оказался достаточно однородным, без резких максимумов и минимумов, а также сравнительно узким (рис. 4). Средняя энергия пучка на выходе из резонатора составила  $\bar{W} = 6571 \pm 19$  эВ.

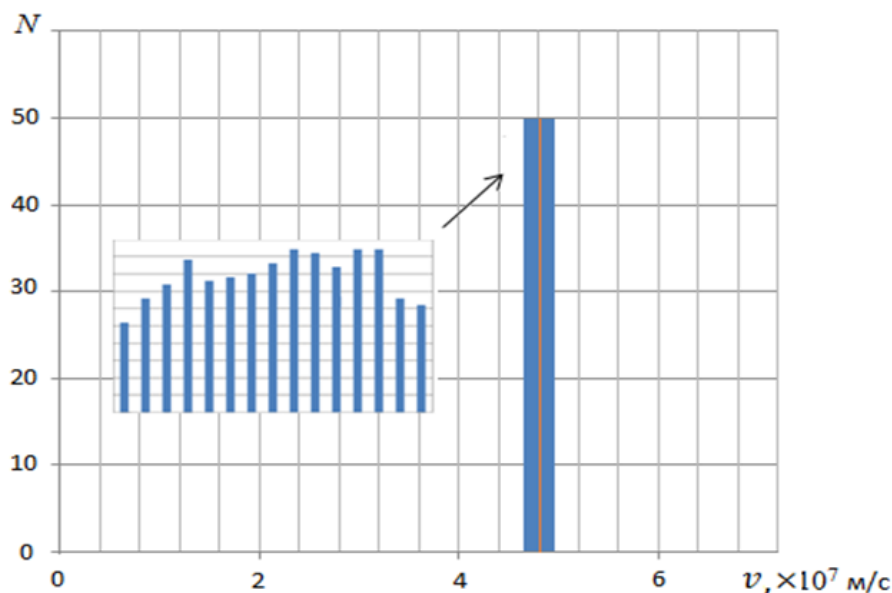


Рис. 4. Спектр скоростей в электронном пучке на выходе из резонатора,  $v$  – скорость частиц,  $N$  – число частиц в  $i$ -ой синей полосе, оранжевая полоса – средняя скорость  $\bar{v} = (4,807 \pm 0,007) \times 10^7$  м/с

Установлено, что на выходе из резонатора в электронном пучке возникает разброс поперечных и продольных скоростей (рис. 3б, 4). Его можно оценить следующим образом:

$$\delta v_{\perp} = \frac{\bar{v}_{\perp} - v_{\perp \min}}{\bar{v}_{\perp}}, \quad \delta v_z = \frac{\bar{v}_z - v_{z \min}}{\bar{v}_z}, \quad (2)$$

где  $v_{\perp \min}$  и  $v_{z \min}$  – минимальные значения соответственно поперечной и продольной скоростей,  $\bar{v}_{\perp}$  и  $\bar{v}_z$  – их средние значения. В результате разброс поперечных скоростей составил  $\delta v_{\perp} = 3,6$  %, продольных –  $\delta v_z = ,2$  %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vanke V., Matsumoto H., Shinohara N. Cyclotron Wave Electrostatic Amplifier. // Journal of Radioelectronics, №10, 1999
2. Саввин В.Л., Казарян Г.М., Михеев Д.А., Коннов А.В. Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе. // Журнал радиоэлектроники, №11, 2011