

УДК 537.862

## ДИНАМИКА ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ЦИКЛОТРОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЭНЕРГИИ

Д. А. Михеев, В. Л. Саввин, Р. В. Егоров, К. Т. Ч. Ву

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический  
факультет

119991, ГСП-1, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр.2

Статья поступила в редакцию 28 марта 2018 г.

**Аннотация.** Изучается формирование и транспортировка ленточного электронного потока с потенциалом 20 кВ и током 2,5 А в циклотронном преобразователе энергии. Показано, что эффективность преобразования подводимой к преобразователю СВЧ мощности в мощность постоянного тока может превысить 75%. При этом величина преобразованной непрерывной мощности может превысить 150 кВт.

**Ключевые слова:** ленточный электронный поток, циклотронный преобразователь энергии, 3D-моделирование, электронная пушка, резонатор, коллектор.

**Abstract.** The main attention of this paper is paid to the three-dimensional modeling of the dynamics of sheet electron beam in cyclotron wave converter (CWC) and to evaluation of its efficiency and power characteristics. Sheet electron beam propagation was analyzed in Cuccia – type resonator and in the region of reversal change of focusing magnetic field. The method of "particle in a cell" with beam current limitation by a spatial charge field was used during analysis of excitation of cyclotron rotation of the beam. The results of computer simulation were obtained taking into account Maxwell velocity distribution of emitted electrons, as well as the thermal losses of microwave power in the conducting walls of the resonator. The original design of the Cuccia – type resonator with transverse electric field was presented. It was found that the efficiency of power exchange with sheet electron

beam in the resonator may exceed 90%. The longitudinal velocities of electrons can remain mono-energetically at the output of the resonator. Dynamics of sheet electron beam in the reversal change of the magnetic field was analyzed using the method of large particles and original multi-period 3D model of electron beam. It was found that the efficiency of rotational beam power conversion into longitudinal beam motion may exceed 80%, as well as the total efficiency of conversion of the microwave power into DC power can reach 75%. The value of the continuous-wave HF power been converted can reach 150 kW.

**Key words:** sheet electron beam, cyclotron wave converter, 3D simulation, electron gun, resonator, collector.

## 1. Введение

К настоящему моменту существенно активизировались работы по изучению ленточных электронных потоков, их формированию и транспортировке в электромагнитных полях различной конфигурации [1-7]. Повышенный интерес к исследованию ленточных потоков напрямую связан с развитием трехмерных программ численного моделирования и огромным скачком в росте производительности современного компьютерного оборудования. Ленточные электронные потоки с широким прямоугольным (или эллипсоидальным) сечением дают возможность реализовать одновременно большой ток пучка и низкую плотность пространственного заряда, снизить уровень фокусирующего магнитного поля и обеспечить высокие значения средней мощности. Исследования, проведенные в последние годы за рубежом, продемонстрировали перспективность устройств СВЧ с ленточными электронными пучками. Среди работ следует выделить клистрон и лампу бегущей волны (ЛБВ) в миллиметровом диапазоне длин волн [3, 5].

Использование ленточных электронных потоков может быть достаточно перспективным для поперечно-волновых устройств СВЧ, обладающих большими значениями суммарного коэффициента полезного действия (КПД).

В циклотронном преобразователе энергии (ЦПЭ), являющегося объектом изучения данной статьи, эффективность преобразования энергии микроволнового излучения в энергию постоянного тока может достигать 80% [8, 9]. Однако стоит отметить, что входная мощность опытных образцов ЦПЭ, изготовленных к текущему моменту, остается сравнительно невысокой и не превышает 10 кВт [10, 11]. Применение ленточных электронных потоков существенно может повысить выходную мощность данного устройства.

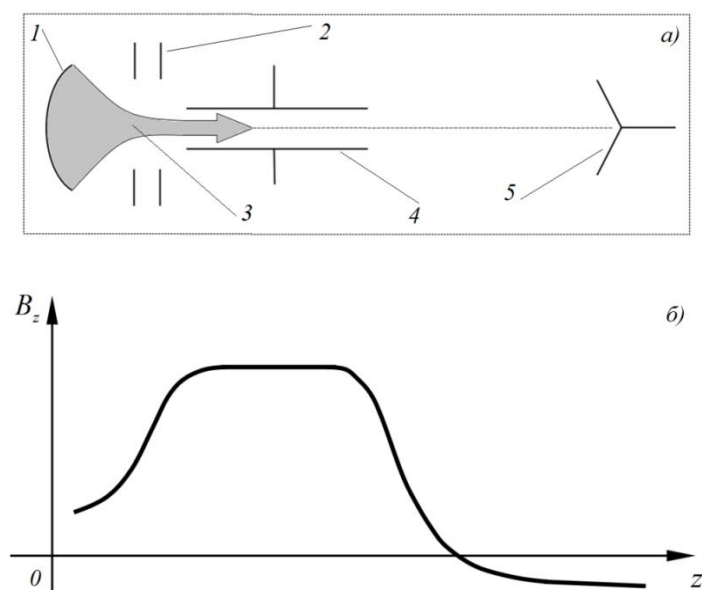


Рис.1.Схема ЦПЭ (а) и профиль расширяющегося аксиально-симметричного магнитного поля (б): 1 – катод, 2 – анод, 3 – сфокусированный электронный пучок, 4 – резонатор с поперечным электрическим полем, 5 – коллектор.

Принцип действия ЦПЭ довольно прост (Рис. 1). Электронный пучок, сформированный катодом прибора, инжектируется в емкостной зазор полости цилиндрического резонатора типа Каччия. В резонаторе при энергообмене в условиях циклотронного резонанса в пучок передается мощность СВЧ сигнала, после чего пучок раскручивается и на выходе из резонатора попадает в расширяющееся аксиально-симметричное магнитное поле (область реверсивного изменения магнитного поля). Здесь происходит преобразование

энергии вращения пучка в энергию его поступательного движения. Дополнительная мощность пучка выделяется в нагрузке коллектора.

В настоящей работе основное внимание обращено к трехмерному моделированию динамики ленточного электронного потока в цилиндрическом резонаторе и области реверсивного изменения магнитного поля. Также обсуждаются вопросы формирования и рекуперации ленточного электронного потока в ЦПЭ.

## **2. Формирование ленточного электронного потока и его транспортировка в цилиндрическом резонаторе циклотронного преобразователя энергии**



Рис.2. Электронная пушка для формирования ленточного электронного потока

Вопрос формирования ленточных электронных потоков изучен в ряде работ [5-7]. Как правило, для формирования ленточных пучков используют цилиндрические катоды. Особо следует выделить электронную пушку клистрона, представленную в работе [7], для транспортировки ленточного потока с сечением  $0,32 \times 4 \text{ мм}^2$ , потенциалом 19,5 кВ и током пучка 3,3 А (Рис .2). Пучок с такими параметрами удалось транспортировать через трубу дрейфа сечением  $0,4 \times 5 \text{ мм}^2$  на расстояние 20 мм в однородном поле 0,085 Тл без существенных искажений поперечного сечения пучка с токопрохождением

более 98%. Компрессия пучка составила около 25, плотность тока на катоде – около  $8 \text{ А/см}^2$ .

В нашей работе мы ограничились плотностью тока с цилиндрического катода не более  $1 \text{ А/см}^2$ , т. к. ЦПЭ в отличие от клистрона функционирует в непрерывном режиме. Расчетное значение компрессии пучка составило 20, сечение пучка –  $1 \times 12,5 \text{ мм}^2$ . Потенциал пучка составил  $U_0 = 20 \text{ кВ}$ , ток –  $I_0 = 2,5 \text{ А}$ .

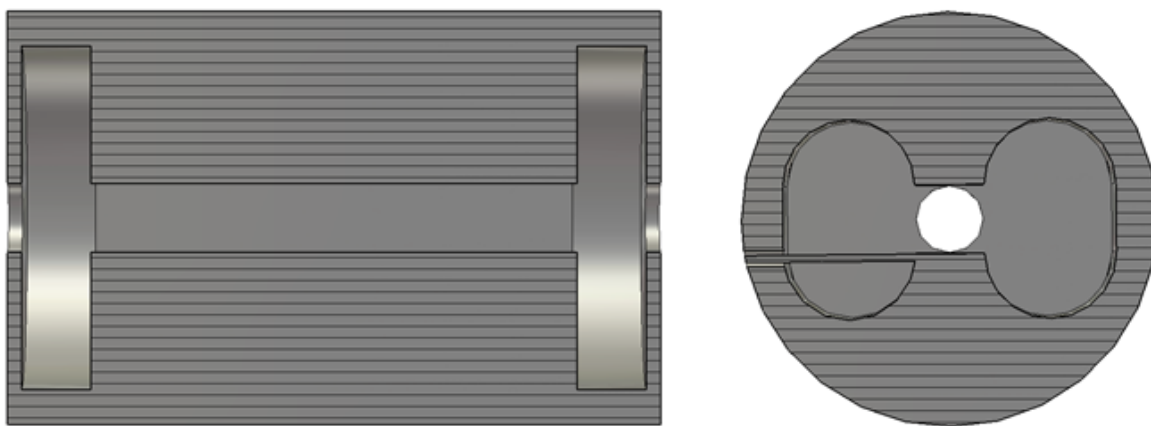


Рис.3. Цилиндрический резонатор в продольном и поперечном сечениях.

Моделирование динамики электронного потока в цилиндрическом резонаторе ЦПЭ проводилось методом «частица в ячейке» в режиме ограничения тока пространственным зарядом [12]. В модели учтено максвелловское распределение скоростей эмиттируемых частиц. Для моделирования использована гексагональная сетка. Результаты моделирования получены с учетом тепловых потерь энергии СВЧ сигнала в металлических (медных) стенках резонатора

При моделировании использовалась оригинальная конструкция резонатора типа Каччия [13]. В полости резонатора (Рис. 3) сделано два цилиндрических отверстия и одно прямоугольное. Верхние грани прямоугольного отверстия образуют ламели, в узком и протяженном зазоре

между которыми возбуждается поперечное поле микроволнового сигнала, вводимого посредством петли связи.

Резонатор помещен в однородное магнитное поле  $B_0$ . При взаимодействии высокочастотного поля с электронным пучком подводимая СВЧ мощность  $P_{in}$  преобразуется в поперечное циклотронное вращение пучка при условии циклотронного резонанса. Согласование низкоомной нагрузки источника СВЧ сигнала и высокоомной нагрузки пучка производится посредством треугольного узла согласования между петлями связи одной из ламелей резонатора.

Геометрические размеры резонатора и величина напряженности магнитного поля  $B_0$  выбраны таким образом, чтобы обеспечить условия циклотронного резонанса на частоте  $f = f_c = \omega_c / 2\pi = eB_0 / 2\pi m = 2,45$  ГГц, где  $f$  – частота СВЧ сигнала,  $f_c$  – циклотронная частота,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона.

Ограничение по уровню вводимой в электронный поток мощности при заданной величине пучка  $I_0$  связано с геометрическими размерами емкостного зазора  $D$  резонатора, определяющими максимально возможное значение радиуса вращения электронов  $R_c$  ( $D > 2R_c$ ).

Циклотронный радиус электронов равен:

$$R_c = \frac{1}{\omega_c} \sqrt{\frac{2eU_0W}{m}}, \quad (1)$$

где  $W$  – отношение СВЧ мощности  $P_{in}$ , вводимой в поток, к начальной мощности пучка  $P_0$ .

Основные параметры модели представлены в Таблице 1.

Несомненно, задачей ставилась максимизация подводимой СВЧ мощности. Однако в данной работе мы ограничились  $W = 4$  ( $P_{in} = 200$  кВт). При больших значениях  $W$  энергия потока на выходе может превысить 100

кэВ. При этом энергиях существенно проявляют себя релятивистские эффекты, что влечет за собой изменение конфигурации сопровождающего пучок магнитного поля с поправкой на гамма-фактор. Последнее приводит к усложнению магнитной системы ЦПЭ и ухудшению устойчивости электронного потока. Кроме того, увеличивается емкостной зазор  $D$  между ламелями резонатора, что приводит к существенному увеличению импеданса пучка, определяемого соотношением:

$$Z = \frac{8U_0}{I_0} \left( \frac{D}{L} \right)^2, \quad (2)$$

и трудности согласования низкоомной нагрузки источника СВЧ сигнала и высокоомной нагрузки пучка.

Таблица 1

Параметр	Обозначение	Значение
Потенциал пучка, кВ	$U_0$	20
Ток пучка, А	$I_0$	2,5
Отношение поперечной энергии к продольной	$W$	4
Входная мощность пучка, кВт	$P_0$	50
Входная мощность СВЧ сигнала, кВт	$P_{in}$	200
Сечение пучка, мм <sup>2</sup>	$S_0$	1 × 12,5
Сечение прямоугольного отверстия, мм <sup>2</sup>	$S$	23 × 23
Длина прямоугольного отверстия, мм	$L$	80
Циклотронный радиус, мм	$R_c$	10,9
Напряженность магнитного поля, Тл	$B_0$	0,0876
Циклотронная частота, ГГц	$f_c$	2,45

В ходе оптимизации модели резонатора размеры прямоугольного отверстия не изменялись. Настройка на необходимую частоту проводилась

посредством изменения объема цилиндрических отверстий и изменению геометрических размеров треугольного узла согласования.

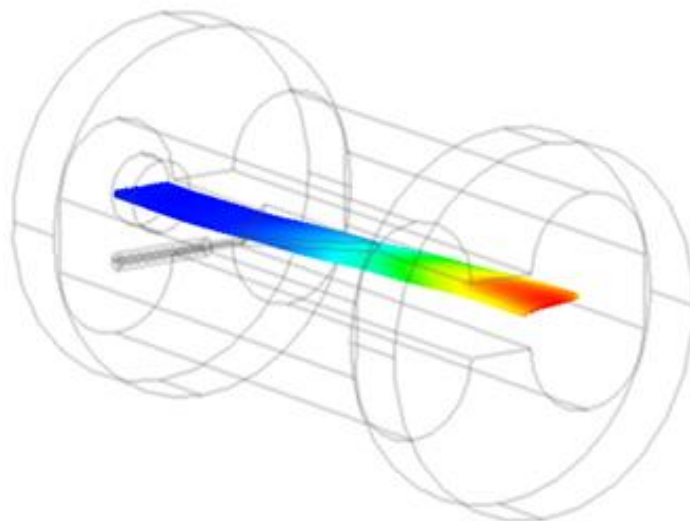


Рис. 4. Ленточный электронный пучок в полости цилиндрического резонатора в условиях циклотронного резонанса.

В ходе моделирования ленточного пучка в резонаторе удалось добиться условий циклотронного резонанса на заданной частоте  $f = f_c = 2,45$  ГГц. В условиях циклотронного резонанса пучок вытянут вдоль прямой линии и вращается как единое целое. В пучке отсутствуют пульсации, электронных сгустков не наблюдается. Передача СВЧ энергии в пучок происходит линейно.

Была вычислена эффективность энергообмена поперечного поля резонатора с ленточным пучком, а также разброс продольных скоростей на выходе из резонатора.

Эффективность энергообмена оценивалась как:

$$\eta_{res} = 1 - \frac{P_r}{P_{in}}, \quad (3)$$

где  $P_r$  – мощность отраженного СВЧ сигнала в волноводном порту петли связи.



Относительный разброс продольных скоростей электронного потока определялся как отношение абсолютного разброса скоростей к средней скорости потока на выходе из области взаимодействия:

$$\delta v_z = \frac{v_{z \max} - v_{z \min}}{\bar{v}_z}, \quad (4)$$

где  $v_{z \max}$  – максимальная продольная скорость частиц в сечении ленточного пучка на выходе из области взаимодействия,  $\bar{v}_z$  – средняя по времени продольная скорость частиц.

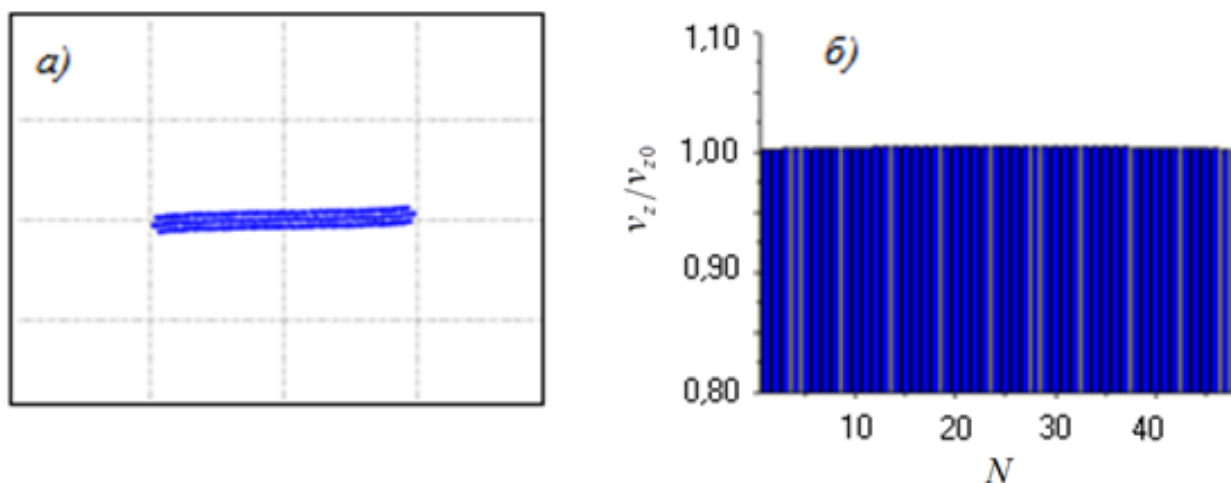


Рис. 5. Поперечное сечение ленточного пучка (а) и спектр продольных скоростей (б) на выходе из резонатора,  $N$  – количество частиц в сечении пучка.

В результате моделирования установлено, что эффективность энергообмена поперечного электрического поля резонатора с ленточным электронным потоком составляет  $\eta_{res} = 0,92$  (92%). Спектр продольных скоростей частиц характеризуется малым разбросом  $\delta v_z = 2 - 3\%$  (Рис. 5б). Пучок на выходе из резонатора можно считать моноскоростным.

Форма пучка в сечении не претерпевает серьезных изменений (Рис. 5а). Диокотронная неустойчивость не проявляется. Поворот пучка вокруг собственной оси не превышает 5 градусов.

### 3. Транспортировка ленточного электронного потока в области реверсивного изменения магнитного поля и рекуперация энергии

Изучение динамики электронного потока в области реверсивного изменения магнитного поля (области реверса) проводилось методом крупных частиц в многопериодной модели электронного потока, разработанной на кафедре фотоники и физики микроволн МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с ФГУП «НПП «Торий» [14]

В рамках модели рассматривается не весь пучок, а лишь его фрагмент, состоящий из нечетного числа периодов инжекции пучка  $N_i$ . Параметры взаимодействия пучка с полем определяются по “средней” группе инжектированных электронов, принадлежащих  $(N_i + 1)/2$  периоду. Все остальные частицы являются буферными.

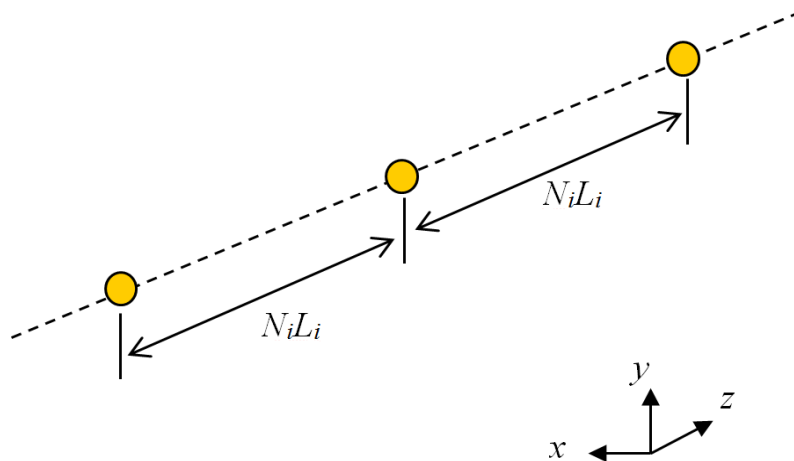


Рис. 6. Фрагмент крупной частицы.

Крупная частица в 3D модели ленточного пучка представляет собой бесконечную последовательность частиц (субчастиц) шарообразной формы с равномерно распределенной плотностью пространственного заряда, имеющих всегда одинаковые поперечные координаты  $x$  и  $y$  и расположенных на одной прямой, параллельной оси  $z$ , на расстоянии  $N_i L_i$ , где  $L_i$  – длина цуга инжектированных за период частиц (рис. 6). Субчастица, принадлежащая

«среднему» периоду инжекции, является базовой по отношению к остальным. Все субчастицы, входящие в одну крупную частицу, двигаются синхронно.

Уравнения движения крупных частиц записываются следующим образом:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\eta_0 \sqrt{1 - \frac{|\vec{v}|^2}{c^2}} \left\{ \left[ \vec{v} \vec{B} \right] + \left( \gamma \vec{E} - \frac{\vec{v}(\vec{v} \vec{E})}{c^2} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad (6)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор частицы,  $\vec{v}$  – скорость частицы,  $t$  – текущее время,  $c$  – скорость света в вакууме  $\eta_0 = e/m$  – удельный заряд электрона,  $\vec{B} = \{B_x(x, y, z), B_y(x, y, z), B_z(z)\}$  – магнитное поле в области, электрическое поле  $\vec{E} = \vec{E}_{pc} + \vec{E}_q$ , где  $\vec{E}_q = \{E_{qx}(x, y, z), E_{qy}(x, y, z), E_{qz}(x, y, z)\}$  – поле пространственного заряда,  $\vec{E}_{pc}$  – электростатическое поле предколлектора.

В рассматриваемой модели длина области реверса  $l$  для удобства выражается в циклотронных длинах волн  $\lambda_c$  как  $l = N_c \lambda_c$ , где  $N_c$  – число циклотронных длин волн, а  $\lambda_c = 2\pi v_{z0} / \omega_c$ , где  $v_{z0}$  – начальная скорость потока.

Компоненты реверсивного (аксиально-симметричного) магнитного поля в рамках многопериодной модели рассматриваются в параксиальном приближении:

$$B_x(x, z) = x \frac{\pi}{4l} B_0 (1 - C_0) \sin \frac{\pi z}{l}, \quad (7)$$

$$B_y(y, z) = y \frac{\pi}{4l} B_0 (1 - C_0) \sin \frac{\pi z}{l}, \quad (8)$$

$$B_z(z) = 0.5 B_0 (1 + C_0 + (1 - C_0) \cos \frac{\pi z}{l}), \quad (9)$$

где  $B_0$  – величина магнитного поля на входе в область реверсивного изменения магнитного поля,  $C_0 = B_1 / B_0$  – параметр изменения магнитного поля,  $B_1$  –

величина магнитного поля на выходе из области реверсивного изменения магнитного поля.

Поле пространственного заряда, создаваемое одной  $i$ -ой крупной частицей, записывается в виде суперпозиции полей составляющих ее субчастиц:

$$\vec{E}_{q_i} = \vec{E}_{qi0} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k, k \neq 0} \frac{\vec{r}_{ik}}{|\vec{r}_{ik}|^3}, \quad (10)$$

где  $\vec{r}_{ik}$  – радиус-вектор от  $k$ -ой субчастицы  $i$ -ой крупной частицы в точку наблюдения,  $q$  – заряд субчастицы,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $k$  – индекс суммирования, причем  $k \in (0,7)$ ,  $\vec{E}_{qi0}$  – поле, создаваемое базовой субчастицей в точке наблюдения:

$$\vec{E}_{qi0} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}_{i0}}{|\vec{r}_{i0}|^3}, \text{ при } |r_{i0}| > r_s, \quad (11)$$

$$\vec{E}_{qi0} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}_{i0}}{r_s^3}, \text{ при } |r_{i0}| < r_s, \quad (12)$$

где  $r_s$  – радиус субчастицы.

В силу конструктивных особенностей преобразователя (близость коллекторного узла и широкая входная апертура предколлекторной области) в область преобразования проникает тормозящее электрическое поле коллектора. Действие тормозящих коллекторных полей приводит к замедлению электронного потока и увеличению плотности его пространственного заряда, что может крайне негативно сказаться на поддержании формы и структуры электронного потока. В этом случае в предколлекторной области целесообразно установить дополнительный электрод (предколлектор), потенциал которого ниже токоприемного электрода коллектора, препятствующий возврату вторичных электронов в полость резонатора. Многопериодная модель ленточного потока учитывает проникновение тормозящих полей коллектора. Профиль поля предколлектора  $\vec{E}_{pc}$  выбирается

таким образом, чтобы продольная скорость движения электронов оставалась бы постоянной [15].

Предколлектор также выполняет функции барьерного электрода. Его потенциал задается на несколько сотен вольт ниже, чем потенциал коллектора. В этом случае обратные электроны, возникающие в результате вторичной эмиссии, будут вновь возвращаться на коллектор ЦПЭ.

Основные параметры модели представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Параметр	Обозначение	Значение
Потенциал пучка, кВ	$U_0$	20
Ток пучка, А	$I_0$	2,5
Отношение поперечной энергии к продольной	$W$	4
Входная мощность пучка, кВт	$P_0$	50
Входная мощность СВЧ сигнала, кВт	$P_{in}$	200
Сечение пучка, мм <sup>2</sup>	$S_0$	1 × 12,5
Циклотронный радиус, мм	$R_c$	10,9
Напряженность магнитного поля, Тл	$B_0$	0,0876
Циклотронная частота, ГГц	$f_c$	2,45
Параметр изменения магнитного поля	$C_0$	0,1
Сечение области взаимодействия, мм <sup>2</sup>	$S_r$	60x120
Длина области взаимодействия (в циклотронных длинах волн)	$l$	9

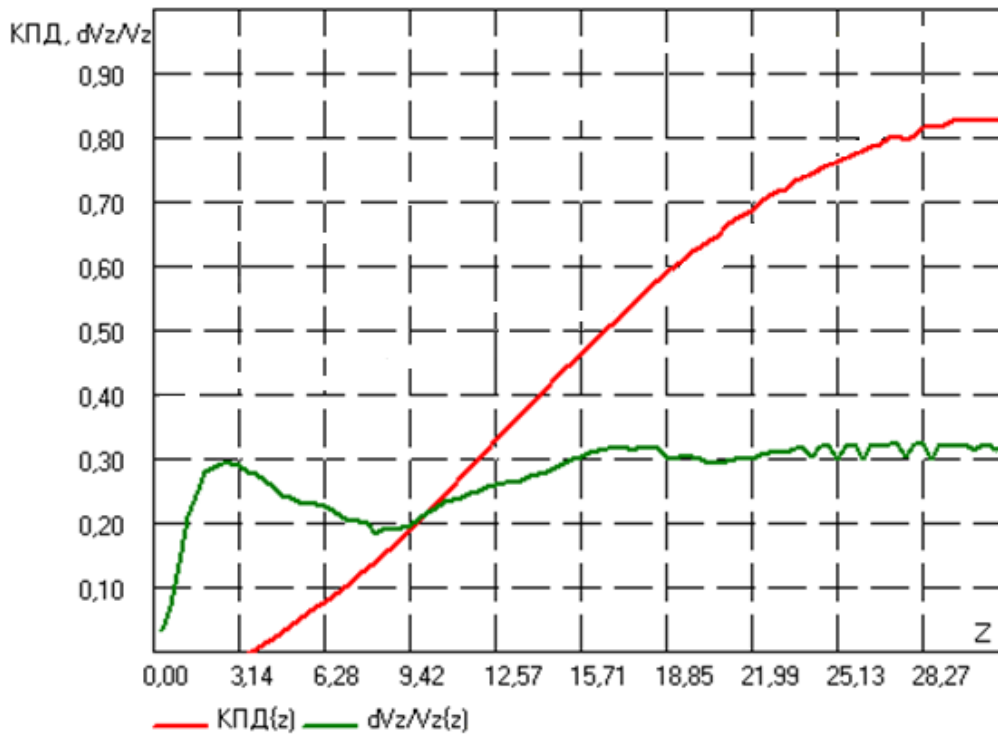


Рис. 7. КПД преобразования поперечной энергии пучка в энергию постоянного тока (красная линия) и разброса продольных скоростей (зеленая линия) вдоль области реверсивного изменения магнитного поля.

Была вычислен КПД преобразования поперечной энергии пучка в энергию постоянного тока, а также разброс продольных скоростей на выходе из области реверса (Рис .7).

Эффективность (КПД) преобразования  $\eta_{rev}$  вращательной кинетической энергии электронного пучка в энергию его поступательного движения определялась по формуле

$$\eta_{rev} = \frac{1}{W} \left( \frac{v_{z\min}^2}{v_{z0}^2} - 1 \right), \quad (13)$$

где  $v_{z\min}$  – минимальная продольная скорость частиц в сечении пучка на выходе из области взаимодействия. Разброс продольных скоростей оценивался по формуле (4).

В результате моделирования установлено, что КПД преобразования поперечной энергии ленточного пучка в энергию постоянного тока составляет  $\eta_r = 0,82$  (82%) (Рис. 7). Спектр продольных скоростей частиц характеризуется сравнительно высоким разбросом  $\delta v_z = 31 - 32\%$  (Рис. 7).

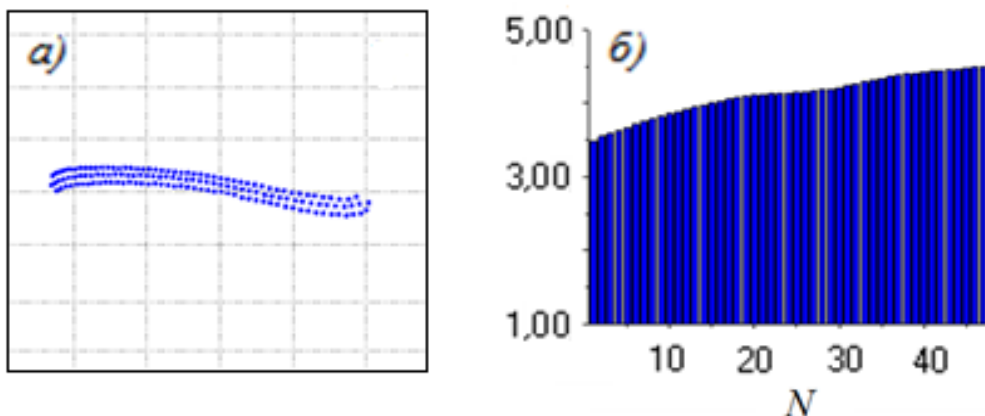


Рис. 8. Поперечное сечение ленточного пучка (а) и спектр продольных скоростей (б) на выходе из области реверса,  
 $N$  – количество частиц в сечении пучка.

Форма пучка в сечении претерпевает ряд изменений (Рис. 8а). Края пучка немного скручиваются. Сечение пучка расширяется, плотность тока в потоке падает. Тем не менее, поворот пучка вокруг собственной оси все ещё не превышает 5 градусов.

Устойчивость пучка при таком разбросе скоростей поддерживается за счет уменьшения фактора  $\vec{E} \times \vec{B}$ , ответственного за деформацию поперечного сечения ленточного пучка. В расширяющемся аксиально-симметричном магнитном поле происходит как уменьшение поля пространственного заряда  $\vec{E}$  при расширении пучка в области взаимодействия, так и снижение напряженности фокусирующего магнитного поля  $\vec{B}$  в 10 раз по длине области.

Таким образом, суммарный КПД преобразования поперечной энергии ленточного пучка в энергию постоянного тока  $\eta = \eta_{rev}\eta_{res} \approx 0,754$  (75,4%).

Величина преобразованной СВЧ мощности при этом составила  $P_{out} = \eta P_{in} = 150,8$  кВт.

#### 4. Заключение

Применение ленточных электронных пучков позволяет существенно повысить как входную, так и выходную мощность циклотронного преобразователя. При этом КПД преобразования подводимой к преобразователю СВЧ мощности в мощность постоянного тока может превысить 75%.

Величина входной мощности ЦПЭ может быть увеличена до 50 кВт. Величина преобразованной непрерывной мощности при этом может превысить 150 кВт.

Ленточный пучок на выходе из ЦПЭ имеет достаточно высокий разброс продольных скоростей (более 30%). В настоящей работе при моделировании динамики ленточного потока мы ограничились односекционным коллектором и дополнительным барьерным электродом. На практике для достижения подобных значений КПД при таких разбросах скоростей потребуется более сложная конструкция коллектора ЦПЭ.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения работ по научному проекту № 16-32-00826 мол\_а.

#### Литература

1. Gamzina D., Barnett L. R., Ravani B., Luhmann N. C. Mechanical Design and Manufacturing of W-Band Sheet Beam Klystron // IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 64. № 6. 2017. PP. 2675-2682.
2. Wang Z. et. al. A non-axisymmetric structure multistage depressed collector for sheet beam VEDs // 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium (IVEC). 2017. PP. 403-412.



3. Pasour J. et. al. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz // IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 61. № 6. 2014. PP. 1630-1636.
4. Pchel'nikov Y., Yelizarov A. Optimization of a Sheet Electron Beam Interaction With a Slow Wave // IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 61. № 6. 2014. PP. 1661-1665.
5. Pershing D. et al. Demonstration of a wideband 10-kW Ka-band sheet beam TWT amplifier // IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 61. № 6. 2014. PP. 1637-1642.
6. Ruan C. et. al. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field // IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 61. № 6. 2014. PP. 1643-1650.
7. Pasour J. et. al. Demonstration of a 100-kW solenoidally focused sheet electron beam for millimeter-wave amplifiers // IEEE Trans. Electron Devices. Vol. 58. № 6. 2011. PP. 1792-1797.
8. Барденков В. А., Ванке В. А., Горшков И. О., Лопухин В. М. О преобразователе СВЧ-энергии с реверсивным магнитным полем // Радиотехника и электроника. 1976. Т.21. № 4. С.821-828.
9. Vanke V. A., Savvin V. L. Cyclotron-Wave Converter for SPS Energy Transmission System // Proc. Of Sec. Intern. Symp. Power from Space. Paris. 1991. PP. 515-520.
10. Vanke V. A., Matsumoto H., Shinohara N., Kita A. Cyclotron Wave Converter of Microwaves into DC // IEICE Trans. on Electronics. Vol. E81-C. 1998. PP. 1136-1142.
11. Будзинский Ю. А., Быковский С. В., Кантюк С. П., Матрюков М. А. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока // Радиотехника. 1999. №4. С.32-40.
12. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

13. Лопухин В. М., Рошаль А. С. Электроннолучевые параметрические усилители поперечных волн // Успехи Физических Наук. 1965. Т.85. № 2. С.297-334.
14. Д. А. Михеев и др. Дискретная математическая модель ленточного электронного пучка в спадающем магнитном поле // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т.80. №2. С.229-232.
15. В. Л. Саввин и др. Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2011. №11. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/nov11/1/text.pdf>.

**Для цитирования:**

Д.А. Михеев, В.Л. Саввин, Р.В. Егоров, К.Т.Ч. Ву. Динамика ленточного электронного потока в циклотронном преобразователе энергии. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr18/2/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.4.2