

УДК 537.533, 621.314

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ЗАРЯД И РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В ЦИКЛОТРОННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

В. Л. Саввин<sup>1</sup>, Г. М. Казарян<sup>1</sup>, А. В. Коннов<sup>2</sup>, Д. А. Михеев<sup>1</sup>, А. В. Пеклевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра фотоники и физики  
микроволн

<sup>2</sup> – ФГУП «НПО ТОРИЙ»

Получена 25 октября 2011г.

**Аннотация.** Изучена динамика электронного пучка в реверсной области циклотронного преобразователя в присутствии тормозящего электростатического поля. Показана возможность реализации высокоэффективных режимов (до 90%) преобразования и рекуперации кинетической энергии интенсивного электронного пучка.

**Ключевые слова:** беспроводная передача энергии, преобразование микроволн в постоянный ток, циклотронный преобразователь, электронный поток.

**Abstract.** Dynamics of electron beam was studied at the reversal region of cyclotron-wave converter at presence of braking electrostatic field. The possibility of realization of high efficient (up to 90%) regimes of conversion an recuperation of kinetic energy of intense electron beam.

**Keywords:** wireless power transmission, conversion of microwaves into DC, cyclotron-wave converter, electron beam.

### Введение

Для приема и преобразования энергии микроволн в энергию электрического тока в разрабатываемых проектах беспроводной передачи энергии [1-3] предполагается использовать ректенны, содержащие полупроводниковые диоды Шоттки. Ректенны продемонстрировали высокий КПД на этапе лабораторных испытаний, однако соединение маломощных и низковольтных ректенн в

последовательно-параллельные цепи в энергетических системах неизбежно скажется на надежности и стабильности их работы. Кроме того, уровень переизлучения ректенных систем на гармониках рабочей частоты, возникающих в процессе преобразования микроволн, может вызвать затруднения для работы существующих систем передачи информации и радиосвязи.

Альтернативой ректеннам могут стать циклотронные преобразователи энергии (ЦПЭ) [4-6], заметно превосходящие их по удельной мощности, величине выходного напряжения, устойчивости к электромагнитным и радиационным воздействиям и перегрузкам.

Принцип действия циклотронного преобразователя энергии основан на поперечной модуляции электронного потока. Помимо электронной пушки и внешней магнитной системы, циклотронный преобразователь имеет три основных

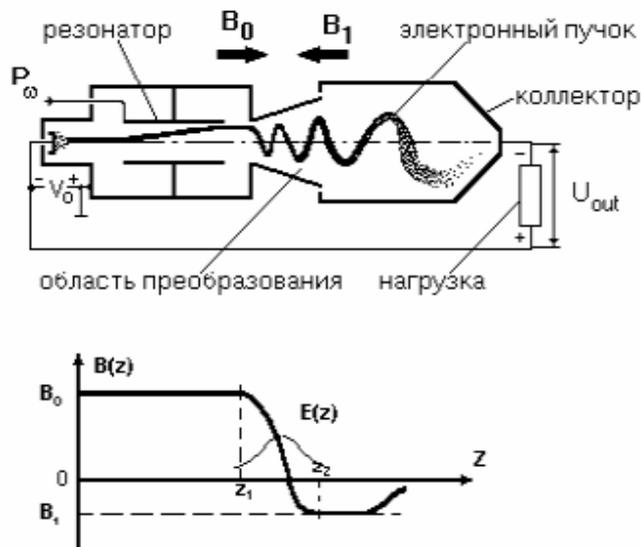


Рис. 1. Схема циклотронного преобразователя энергии (ЦПЭ) и диаграмма распределения магнитного поля на его оси.  $P_\omega$  – входная микроволновая мощность;  $V_0$  – ускоряющее напряжение электронной пушки;  $B_0$ ,  $B_1$  – фокусирующее и реверсивное значение магнитного поля на оси прибора;  $z_2 - z_1$  – протяженность области преобразования;  $E(z)$  – проникающее электростатическое поле коллектора;  $U_{out}$  – выходное напряжение на нагрузке.

узла: резонатор, область реверсивного изменения продольного магнитного поля (область преобразования) и коллектор (см. рис. 1). Сформированный пушкой электронный поток пронизывает емкостной промежуток резонатора с поперечным высокочастотным ( $\omega$  – частота микроволн на входе) электрическим полем, где приобретает дополнительную поперечную кинетическую энергию в виде вращательного (циклотронного) движения пучка около оси системы. В области реверсивного изменения магнитного поля вращение электронов преобразуется в поступательное движение. Далее ускоренный в продольном направлении электронный поток испытывает торможение, попадая в поле коллектора, где происходит рекуперация энергии электронов. Таким образом, энергия микроволн  $P_{\omega}$ , поступающих в резонатор, преобразуется в энергию постоянного электрического тока в нагрузке.

Проведенные ранее исследования электронных процессов в ЦПЭ [5-7] основывались на предположении об изолированности электронных процессов в пространственно разнесенных узлах преобразователя (область преобразования и коллектор) и возможности их независимой оптимизации. Основные результаты были получены для потоков с низкой плотностью пространственного заряда. Такой подход позволил выявить основные закономерности процессов, однако в ходе практической реализации опытных образцов ЦПЭ была обнаружена неполная адекватность такого предположения. В практических конструкциях преобразователя не удаётся полностью изолировать пространственно-разделенные области от взаимного влияния. Близость коллекторного узла и широкая входная апертура коллекторной области не позволяют исключить влияние тормозящего электрического поля коллектора на область преобразования. Кроме того, предлагавшееся распределение магнитного поля (см. рис.1) имеет на выходе реверсивной области протяженный участок с ослабленным полем ( $B_1/B_0 = 0.1 - 0.2$ ), что крайне негативно сказывается на фокусировке электронного потока и поддержании его формы и структуры.

Изучение влияния поля пространственного заряда и тормозящего электрического поля на процесс преобразования поперечных волн с учетом проникновения поля коллектора в область реверсивного изменения магнитного поля крайне важен для реализации практических конструкций ЦПЭ. Кроме того, полезно исследовать возможность использования других распределений магнитного поля в области преобразования.

### **Модель электронного потока и профиль магнитного поля в реверсивной области**

Для численного анализа процессов преобразования использована трехмерная модель электронного потока с парциальными спиралевидными недеформируемыми пучками конечного сечения (рис.2), обеспечивающая наиболее равномерное распределение плотности пространственного заряда по сечению потока [8-9].

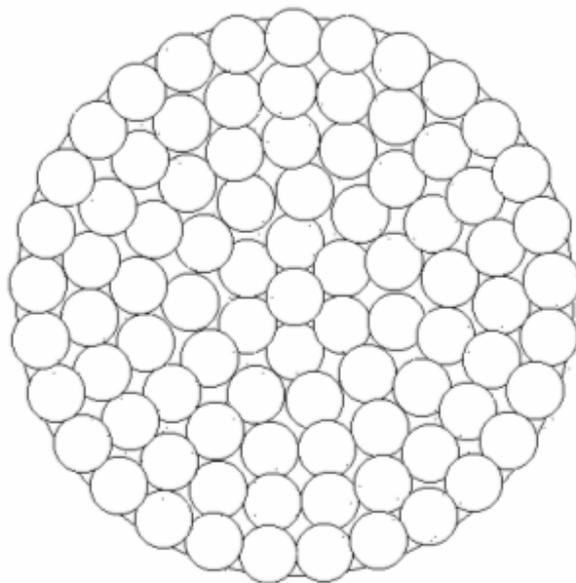


Рис. 2. Модель электронного потока. Начальное расположение недеформируемых пучков.

Разработанная модель, допускает взаимное проникновение и совмещение парциальных пучков. Это позволяет воспроизводить в модели электронного потока локальные возмущения плотности пространственного заряда любой величины без «жесткого» взаимодействия между соседними пучками. «Мягкое» взаимодействие между парциальными пучками максимально приближено к взаимодействиям в непрерывной среде. Отличительной особенностью модели является существенно более низкий уровень неравномерности начального распределения поля пространственного заряда по поперечному сечению потока. Этого достигается путем эмпирических корректировок в формулах начальной расстановки пучков в ходе тестирования модели. По результатам тестирования установлено, что в разработанной модели электронного потока погрешность вычисления кулоновских полей на порядок ниже по сравнению с использовавшимися ранее нитевидными моделями [7].

Численный анализ электронных процессов основан на релятивистском уравнении движения электрона:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{-e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left( \vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}] - \frac{\vec{v}}{c^2} (\vec{v}, \vec{E}) \right), \quad (1)$$

где  $\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля, а  $\vec{B}$  - вектор индукции магнитного поля.

Для перехода от динамики электрона к динамике парциального электронного пучка использовано выражение

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_z \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2)$$

Для спиралевидных парциальных пучков  $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$ , поэтому:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{v_z} \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) \quad (3)$$

Это позволяет при численном решении уравнений движения большого числа  $N$  парциальных пучков исключить процедуру интегрирования по времени.

С учетом приведенных выше соотношений уравнения движения системы парциальных пучков примут вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v_x}{\partial z} &= \frac{1}{v_z} \left( -\eta_o \sqrt{1-\beta^2} \left( E_x + v_y B_z - v_z B_y - \frac{v_x}{c^2} \cdot VE \right) + \omega \cdot v_y \right) \\
 \frac{\partial v_y}{\partial z} &= \frac{1}{v_z} \left( -\eta_o \sqrt{1-\beta^2} \left( E_y + v_z B_x - v_x B_z - \frac{v_y}{c^2} \cdot VE \right) + \omega \cdot v_x \right) \\
 \frac{\partial v_z}{\partial z} &= \frac{1}{v_z} \left( -\eta_o \sqrt{1-\beta^2} \left( E_z + v_x B_y - v_y B_x - \frac{v_z}{c^2} \cdot VE \right) \right) \\
 \frac{\partial x}{\partial z} &= \frac{1}{v_z} (v_x + \omega \cdot y) \\
 \frac{\partial y}{\partial z} &= \frac{1}{v_z} (v_y - \omega \cdot x)
 \end{aligned} \tag{4}$$

Представленная выше система пяти уравнений (4) составляет основу вычислительного алгоритма для каждого  $i$ -го пучка (с учетом опущенных индексов). Численное интегрирование  $N$  аналогичных систем совместно с  $N$  граничными условиями позволяют решить поставленную задачу о движении электронного потока в аксиально-симметричном реверсивном магнитном поле и тормозящем электрическом поле коллектора.

На рис. 3 изображено пространственное распределение магнитного поля для предложенного ранее оптимального случая  $C_0 = B_1/B_0 = -0,2$  [7], продольная составляющая магнитного поля имеет профиль косинуса, изменяющегося от 0 до  $\pi$  радиан. Радиальная составляющая магнитного поля будет иметь в этом случае профиль синуса, изменяющегося в тех же пределах. Изменение продольной скорости парциальных пучков происходит под действием радиальных компонент магнитного поля (4), поэтому интенсивность преобразования энергии вращения

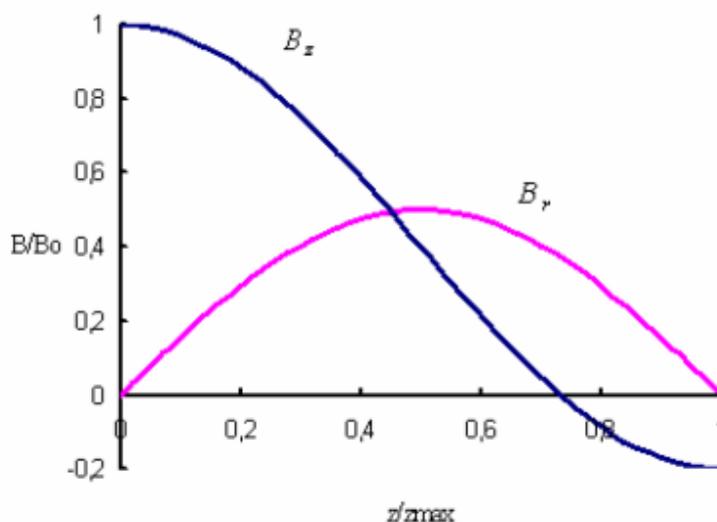


Рис. 3. Распределение магнитного поля вдоль области преобразования [4-5].  $B_z$  – распределение поля на оси,  $B_r$  – распределение радиальной компоненты поля на расстоянии циклотронного радиуса от оси. Глубина реверса  $C_0 = -0,2$ .

пучка максимальна в середине области. В конце области реверса, когда фокусирующее продольное магнитное поле мало, интенсивность преобразования уменьшается, а электронный поток сильно расширяется под действием сил пространственного заряда.

Иначе выглядит ситуация, если выбрать косинусоидальный профиль магнитного поля, изменяющийся от 0 до  $\pi/2$  радиан (см. рис. 4).

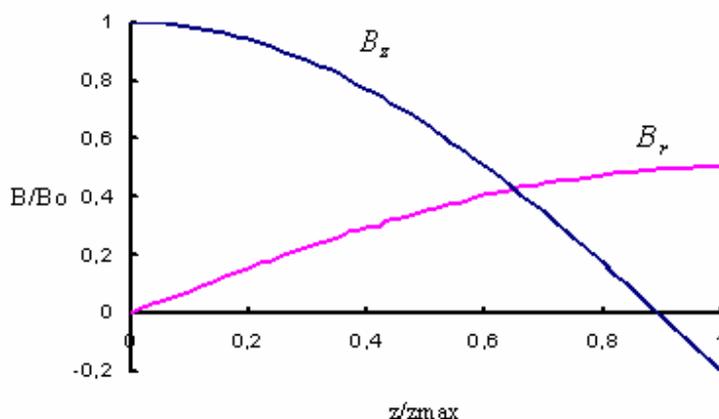


Рис. 4. Распределение магнитного поля вдоль области преобразования ЦПЭ.  $B_z$  – распределение поля на оси,  $B_r$  – распределение радиальной компоненты поля на расстоянии циклотронного радиуса от оси. Глубина реверса  $C_0 = -0,2$ .

Аппроксимирующая функция для такого  $\pi/2$ -профиля поля имеет вид

$$B(z) = B_0 \left( C_0 + (1 - C_0) \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{z}{z_{max}} \right) \right), \quad 0 < z < z_{max} \quad (5)$$

Профиль радиальной компоненты магнитного поля в этом случае будет похож на синус, изменяющийся в том же диапазоне от 0 до  $\pi/2$  радиан (рис. 4).

Теперь амплитуда радиальной компоненты магнитного поля монотонно нарастает, достигая максимума к концу области, профиль фокусирующего поля проходит через ноль при  $z/z_{max} = 0.9$ , обеспечивая лучшую фокусировку и меньшее расширение пучка по сравнению профилем поля на рис.3. Предложенное распределение поля интересно и с практической точки зрения, поскольку  $\pi/2$ -профиль магнитного поля значительно проще реализовать в практических конструкциях фокусирующей системы с постоянными магнитами.

### **Результаты моделирования динамики электронного потока в реверсивной области с учетом проникающего поля коллектора**

При численном моделировании динамики электронного потока в реверсивной области рассчитывались три основные характеристики: коэффициент трансформации  $K$ , эффективность преобразования энергии вращения парциальных пучков в энергию их поступательного движения  $E$  и относительный разброс продольных скоростей парциальных пучков  $\delta v_z$ , определения которых пояснены на рис. 5.

Коэффициент трансформации  $K$  является отношением суммарной вращательной кинетической энергии парциальных частиц потока к ее значению на входе в область преобразования и может быть вычислен через значения поперечных кинетических потенциалов:

$$K = 1 - \frac{u_{\perp}}{u_{\perp 0}} = 1 - \frac{u_{\perp}}{W \cdot U_0} \quad (6)$$

Эффективность преобразования вращения парциальных пучков в энергию их поступательного движения  $E$  определялась из условия оседания самого медленного его электрона на одноступенчатый коллектор с нулевой скоростью

$$E = \frac{u_{z\min} - u_{z0}}{u_{\perp 0}} \quad \text{или} \quad E = \frac{\frac{u_{z\min}}{u_{z0}} - 1}{W}, \quad (7)$$

где  $u_{z\min}$  пропорционально квадрату продольной скорости самого медленного парциального пучка в конце области преобразования  $v_{z\min}^2$ ,  $u_{\perp 0} \sim v_{\perp 0}^2$ ,  $u_{z0} \sim v_{z0}^2$ . В процессе численного моделирования все кинетические потенциалы вычислялись по известным релятивистским формулам.

Относительный разброс продольных скоростей электронного потока определялся как отношение абсолютного разброса скоростей к начальной скорости пучка  $v_{z0}$

$$\delta v_z = \frac{v_{z\max} - v_{z\min}}{v_{z0}} \quad (8)$$

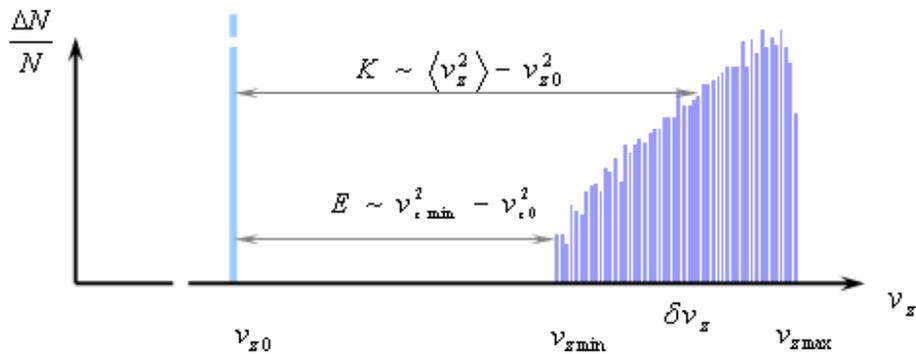


Рис. 5. К определению величин трансформации волн  $K$  и эффективности преобразования  $E$ .  $\Delta N/N$  – распределение продольных скоростей парциальных пучков,  $v_{z0}$  – начальное значение продольной скорости пучков,

$$\delta v_z = v_{z\max} - v_{z\min} .$$

Эффективность рекуперации электронного потока существенным образом зависит от величины разброса продольных скоростей в нём. Поэтому с точки

зрения возможности реализации высокоэффективных режимов работы необходимо совместное рассмотрение в области преобразования как среднестатистических величин ( $K$ ), так и величин, зависящих от поведения самого медленного парциального пучка ( $E$ ,  $\delta v_z$ ).

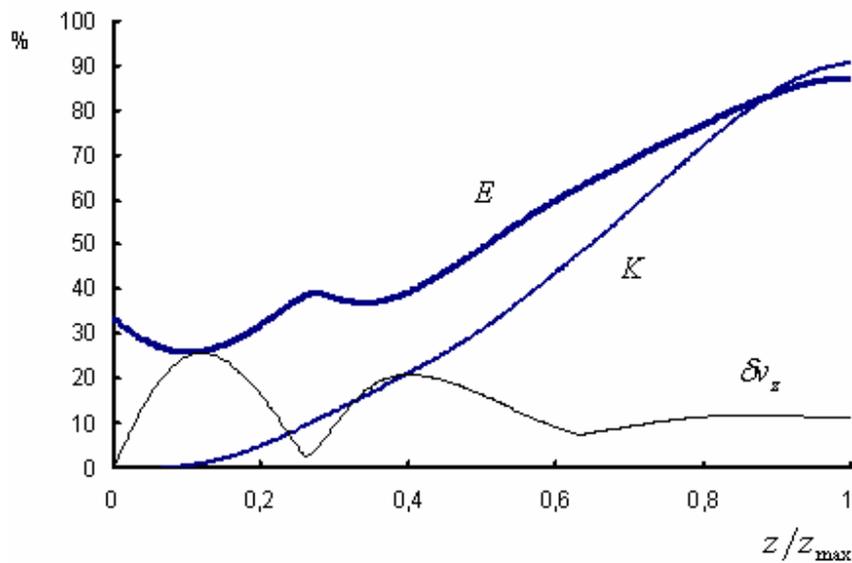


Рис. 6. Зависимости изменения величин коэффициента трансформации волн  $K$ , эффективности преобразования  $E$  и разброса продольных скоростей парциальных пучков  $\delta v_z$  вдоль области преобразования длиной  $z_{\max}$  при параметрах относительной мощности  $W = 2$ , относительного радиуса пучка  $g = 0.5$ , глубины реверса  $C_0 = -0.1$ . Ток пучка 2А, напряжение 5кВ. Кулоновское поле включено.

Результаты численного моделирования с учетом трехмерного кулоновского поля вдоль реверсивной области представлены на рис. 6 для следующих параметров - ток пучка  $I_0 = 2\text{А}$ , анодное напряжение  $U_0 = 5\text{кВ}$ ,  $W = P_\omega / I_0 U_0 = 2$ ,  $g = R_0 / R_c = 0.5$ ,  $R_0$  и  $R_c$  - начальный радиус электронного потока и радиус циклотронного вращения электронов в начале области преобразования соответственно, параметр реверса  $C_0 = -0.1$ .

В начале области относительный разброс продольных скоростей в потоке возрастает до 25% (см. рис.6), что указывает на высокую интенсивность потока и неоднородность радиальной компоненты магнитного поля по сечению потока.

Интересно отметить, что в ходе дальнейшего движения пучка в расходящемся магнитном поле разброс скоростей уменьшается до 2%, затем увеличивается до 20% и снова снижается. Этот эффект обусловлен вращением пучка вокруг собственной оси под действием поля пространственного заряда при сохранении круглой формы его поперечного сечения, в результате чего воздействие неоднородного магнитного поля усредняется при каждом обороте пучка.

Эффективность преобразования  $E$  чувствительна к ширине разброса продольных скоростей в потоке, профиль которого практически зеркально отразился на форме зависимости  $E$  вдоль области преобразования. В итоге в конце области получены следующие значения:  $K=90.7\%$ ,  $E=87.2\%$ ,  $\delta v_z=11.8\%$ , линейные размеры поперечного сечения потока увеличиваются в три раза.

Предположение о действии поля пространственного заряда на процесс преобразования может быть подтверждено путем моделирования того же самого

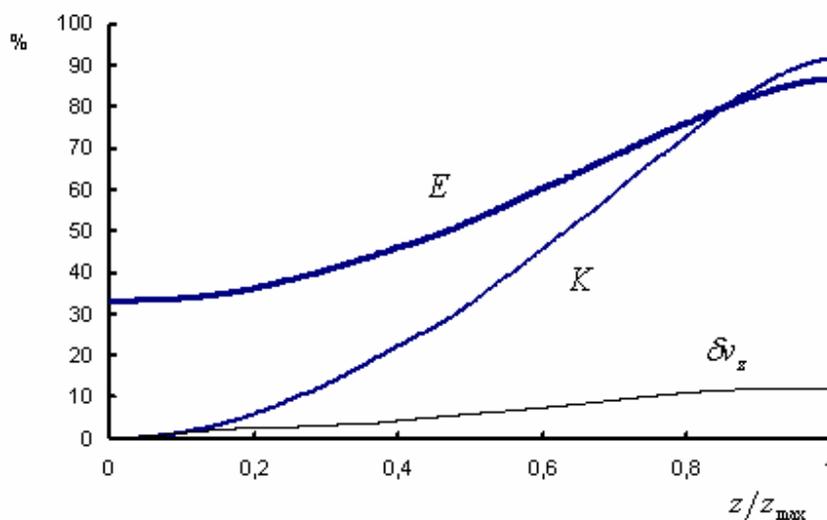


Рис. 7. Зависимости коэффициента трансформации  $K$ , эффективности преобразования  $E$  и разброса продольных скоростей  $\delta v_z$  вдоль области преобразования длиной  $z_{\max}$  при параметрах относительной мощности  $W=2$ , относительного радиуса пучка  $g=0.5$ , глубины реверса  $C_0=-0.1$ . Ток пучка 2А, напряжение 5кВ. Кулоновское поле выключено.

процесса (с теми же начальными параметрами), но в отсутствие кулоновского взаимодействия в потоке. Численный эксперимент позволяет это сделать.

На рис. 7 приведены зависимости основных рассчитываемых величин в ходе преобразования поперечных волн с теми же параметрами, но при выключенных кулоновских полях. Разброс продольных скоростей пучков  $\delta v_z$  монотонно нарастает вдоль длины области и не испытывает пульсаций. Таким образом, при выключенном поле пространственного заряда нет вращения пучка вокруг своей оси и, следовательно, нет усреднения разброса скоростей по поперечному сечению потока.

Сравнивая значения относительного расширения электронных потоков в обоих случаях, видим, что кулоновское поле участвует в увеличении поперечных размеров электронного потока на выходе из области преобразования, однако пучок расширился в 2.33 раза в радиальном направлении и при отсутствии кулоновского поля. Следовательно, увеличение поперечных размеров и искажение формы сечения электронного потока происходит в результате неоднородного воздействия радиального магнитного поля по его сечению. Кулоновское поле оказывает влияние на степень расширения потока, на форму деформации его поперечного сечения, но не является ее первопричиной.

Результаты вычислений для большей информативности и наглядности удобно изображать в виде контурных диаграмм, позволяющих оценивать изменение наблюдаемой величины в зависимости от двух параметров ( $C_0$  и  $N_c$ ,  $N_c = z_0 \omega_{c0} / 2\pi v_{z0}$  - длина реверсивной области, выраженная в длинах циклотронных волн) сразу. На рис. 8 приведены результаты вычислений для вышеописанного процесса преобразования с включенным кулоновским полем с параметрами  $W=2$ ,  $g=0.5$ ,  $I_0=2A$ ,  $U_0=5kV$ ,  $C_0=-0.1$ . Распределение магнитного поля соответствует  $\pi/2$ -профилю (5).

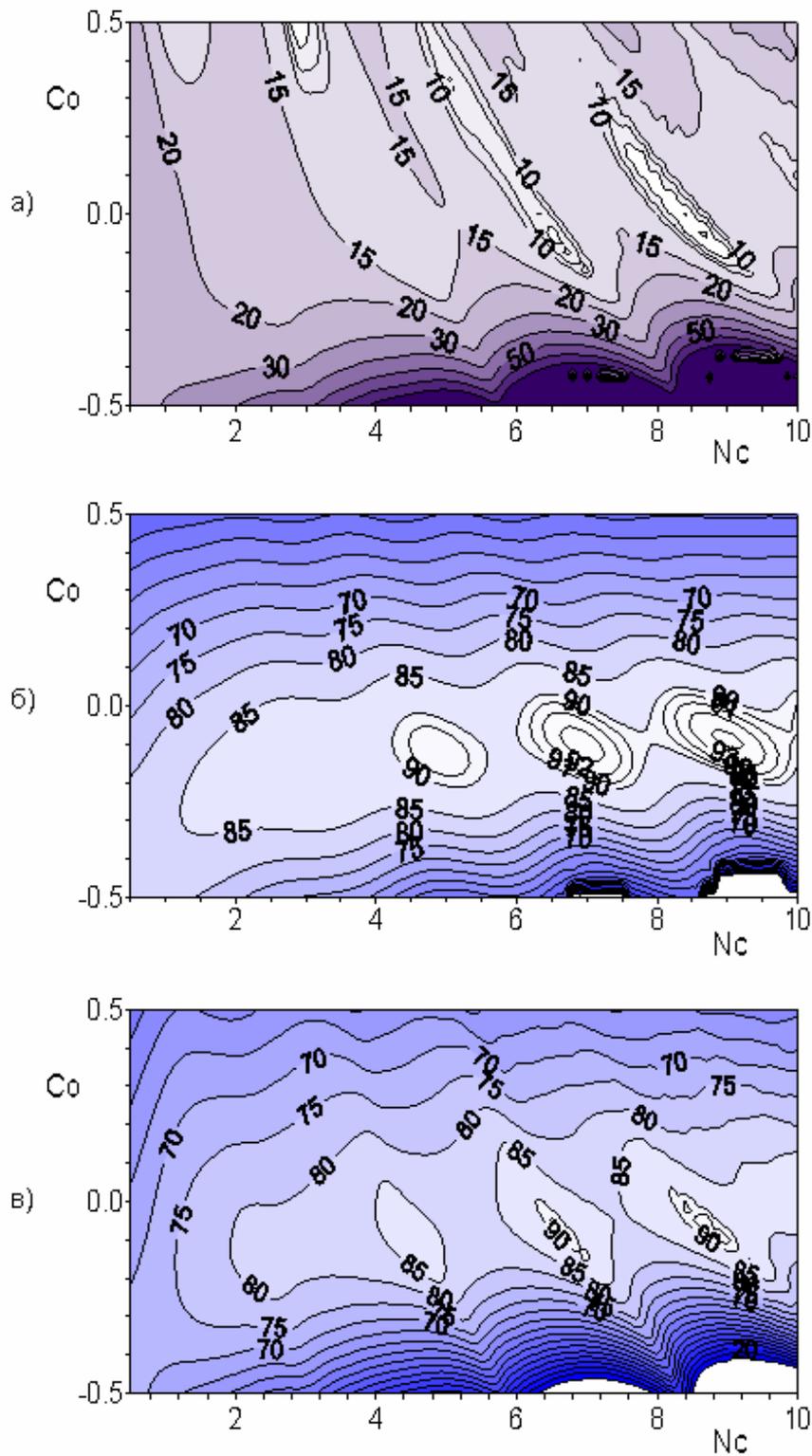


Рис. 8. Линии уровней а) – относительного разброса продольных скоростей  $\delta v_z$ , б) - коэффициента преобразования  $K$ , в) – эффективности преобразования  $E$  в процентном выражении в зависимости от параметров глубины и протяженности

реверса магнитного поля  $C_0$  и  $N_c$ .  $U_0 = 5\text{кВ}$ ,  $I_0 = 2\text{А}$ ,  $g = 0.5$ , параметр мощности  $W = 2$ ,  $\pi/2$ -профиль магнитного поля. Кулоновское поле включено.

Для величин  $K$  и  $E$  наблюдается явно выраженный гребнеобразный максимум в области значений  $C_0 = -0.1 \div -0.2$  и  $N_c = 3 \div 10$  с волнообразной вершиной, причем амплитуда колебаний  $E$  вдоль гребня достигает 5–7%. Это принципиально важно учитывать при конструировании приборов, чтобы набор параметров (например,  $W$  и  $g$ ) соответствовал максимальным значениям эффективности преобразования.

Наибольшие различия привносит действие кулоновского поля в контуры диаграммы для относительного разброса продольных скоростей. При включении кулоновских полей на диаграмме появляется несколько гребней с уровнями  $\delta v_z = 10\text{--}15\%$ . Поле пространственного заряда в присутствии продольного магнитного поля приводит электронный поток во вращение вокруг собственной оси, что способствует эффективному усреднению разброса продольных скоростей в потоке и снижает его величину.

### **Режимы максимального к.п.д. преобразования с учетом тормозящего поля коллектора**

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. С одной стороны, с ростом кулоновских полей это должно способствовать более интенсивному собственному вращению потока и эффективному усреднению неоднородностей в нем. С другой стороны, на выходе реверсивной области аксиальное магнитное поле ослаблено, и увеличение плотности

пространственного заряда может крайне негативно сказаться на поддержании формы и структуры электронного потока.

Если предположить, что тормозящее поле может быть достаточно сильным, не разрушая при этом процесс взаимодействия поперечных волн электронного потока, то оптимальным его профилем может быть такой, при котором продольная скорость движения электронов оставалась бы постоянной. В этом случае энергия циклотронного вращения электронов непосредственно трансформировалась бы в их потенциальную электрическую энергию.

Результаты моделирования с учетом проникающего в область реверса тормозящего поля  $E_{z0}(z)$  коллектора показали, что при правильно выбранных его значениях такой режим преобразования возможен.

Можно рассмотреть и другие режимы торможения пучка (см. рис. 9), отбирая на каждом шаге  $\Delta z$  не всё приращение его кинетической энергии поступательного движения  $\Delta u$ , а лишь некоторую его часть:

$$E_{z0}(z) = J\Delta u / \Delta z, \quad (9)$$

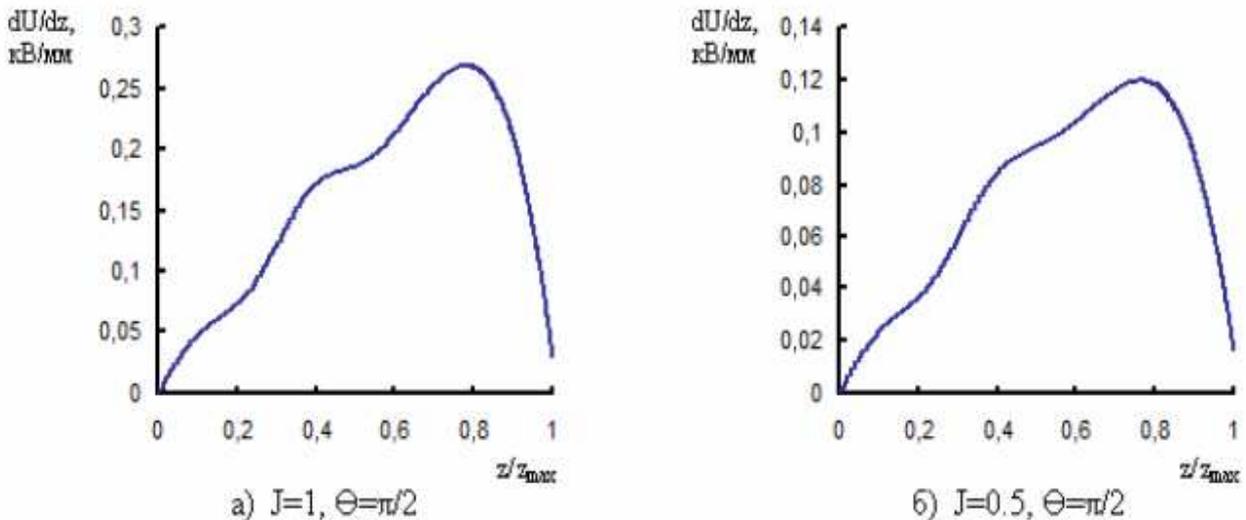


Рис. 9. Профили продольного тормозящего электрического поля на оси реверсивной области протяженностью  $z_{max}$  для  $\pi/2$ - магнитного поля при а) полном ( $J=1$ ) и б) частичном ( $J=0.5$ ) преобразовании кинетической энергии поступательного движения пучка.  $W=2, g=0.5, I_0=2A, U_0=5kV, C_0=-0.1$ .

где  $J$  - коэффициент отбора продольной кинетической энергии пучка, являющийся также параметром профиля тормозящего электростатического поля.

При  $J=1$  получаем вышеописанный случай движения пучка с постоянной скоростью вдоль оси системы. При  $J=0.5$  половина приращения кинетического потенциала пучка будет преобразована в потенциальную электрическую энергию непосредственно в области преобразования (реверса), а другая - в коллекторной области в результате рекуперации.

Двумерные диаграммы зависимости  $K$ ,  $E$  и  $\delta v_z$  от параметров  $C_0$  и  $N_c$  при  $J=1$  представлены на рис. 10.

Характерной особенностью процесса преобразования поперечных волн является существенное увеличение ширины разброса продольных скоростей (до 20-30% к концу реверсивной области). В режимах с  $J=1$  применение  $\pi/2$ -профиля магнитного поля приводит к заметному снижению величины относительного разброса продольных скоростей (примерно на 10–20 %) по сравнению с  $\pi$ -профилем. Значения коэффициента преобразования  $K$  достигают 90–94% при оптимальных параметрах  $C_0$  и  $N_c$ , а эффективность преобразования  $E$  – 85–90% (рис. 10).

Применение режимов преобразования в присутствии тормозящего коллекторного поля для интенсивных электронных потоков может существенно снизить возможность появления вторичной эмиссии с поверхности коллектора и облегчить процесс рекуперации энергии электронного потока. Однако реализация таких режимов на практике потребует применения более сложных конструкций коллекторов.

Для ограничения обратного тока вторичной эмиссии из коллектора целесообразно создание в предколлекторной области потенциального барьера [10] с помощью дополнительного электрода, потенциал которого ниже потенциала коллектора. «Высота» потенциального барьера должна обеспечивать «запирание» вторично эмиттированных электронов в полости коллектора.

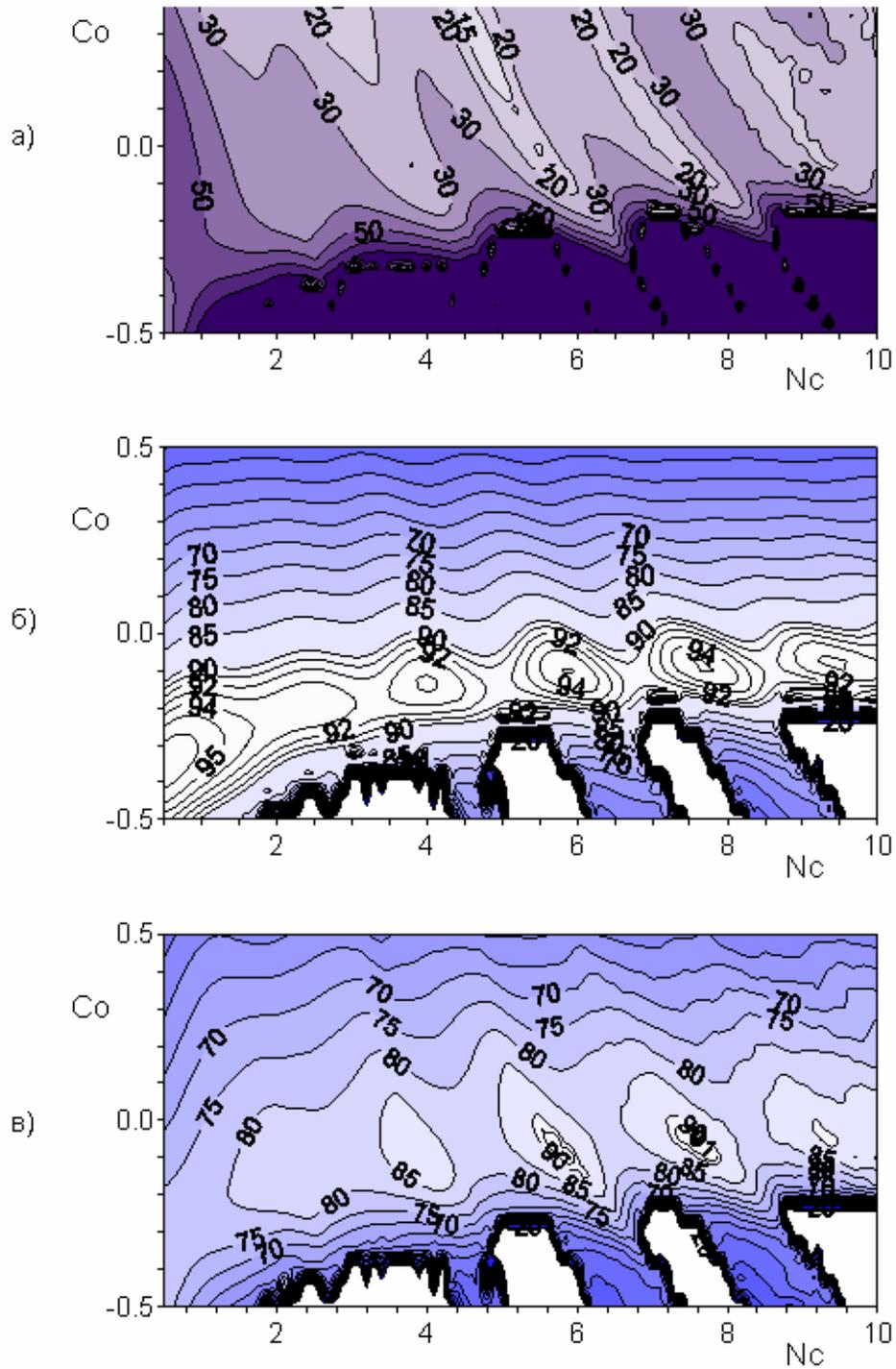


Рис. 10. Линии уровней а) – относительного разброса продольных скоростей  $\delta v_z$ , б) - коэффициента преобразования  $K$ , в) – эффективности преобразования  $E$  в процентном выражении в зависимости от параметров глубины и протяженности реверса магнитного поля  $C_0$  и  $N_c$  в присутствии тормозящего электростатического поля с параметром  $J=1$ .  $U_0=5\text{кВ}$ ,  $I_0=2\text{А}$ ,  $g=0.5$ , параметр мощности  $W=2$ ,  $\pi/2$ -профиль магнитного поля.

Потенциал барьерного электрода должен выбираться из условия максимального прохождения электронного пучка из области реверса на токоприемный электрод коллектора. При этом необходимо учитывать, что глубокое торможение электронного пучка в области потенциального барьера может значительно увеличить плотность пространственного заряда в пучке и привести к образованию виртуального катода, затрудняющего прохождение электродов в полость коллектора.

Моделирование динамики пучка в предколлекторной области позволило оценить оптимальные значения высоты потенциального барьера, потенциала барьерного электрода и тока пучка. На рис. 11 приведены зависимости эффективности преобразования  $Eff$ , потенциала барьерного электрода  $U_{min}$  и тока пучка  $I_0$  от параметра  $W$  для двух значений входной мощности микроволн – 1 и 20 кВт.

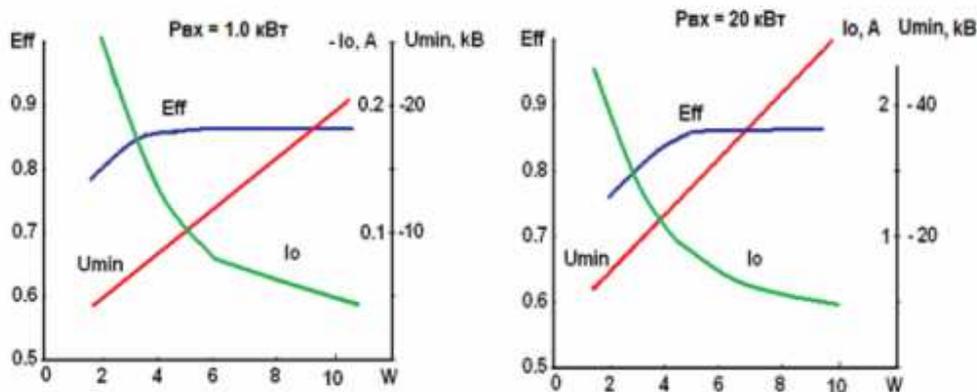


Рис. 11. Расчетные характеристики преобразователя с учетом потенциального барьера в предколлекторной области, а)  $P_{ex} = 1$  кВт, б)  $P_{ex} = 20$  кВт,  $Eff$  - эффективность преобразования,  $U_{min}$  - потенциал барьерного электрода,  $I_0$  - ток пучка.

Для преобразователя с расчетной входной мощностью  $P_{\hat{\alpha}\hat{\delta}} = 1$  кВт оптимальные значения  $W$  заключены в интервале 4–6, при этом эффективность преобразования может достигать 85%. Высота потенциального барьера

составляет от 150В (при  $W=10$ ) до 200В (при  $W=2$ ). Для случая с  $P_{\dot{\alpha}\delta}=20$  кВт кривая зависимости  $E_{ff}$  выходит на плато при  $W>5$ , высота барьера увеличивается и составляет от 200В (при  $W=2$ ) до 400В (при  $W=10$ ), реальные значения эффективности преобразования могут достигать 85%.

### **Разработка демонстрационного прототипа**

В МГУ ведется работа по созданию демонстрационного прототипа циклотронного преобразователя с входной мощностью 1 кВт на частоте 2.45 ГГц. Разработана конструкции прототипа устройства с барьерным электродом в предколлекторной области. В расчете конструкции демонстрационного прототипа заложены следующие значения параметров: ток пучка  $I_0 = 0.125$  А, мощность электронного потока  $P_0 = I_0 \cdot U_0 = 200$  Вт,  $W=P_{вх} / P_0 = 5$ , расчетное значение КПД преобразования 70%, магнитная индукция фокусирующей системы в области резонатора  $B_0 = 0,085$  Тл, магнитная индукция фокусирующей системы в области реверса  $B_1 = - 0,009$  Тл.

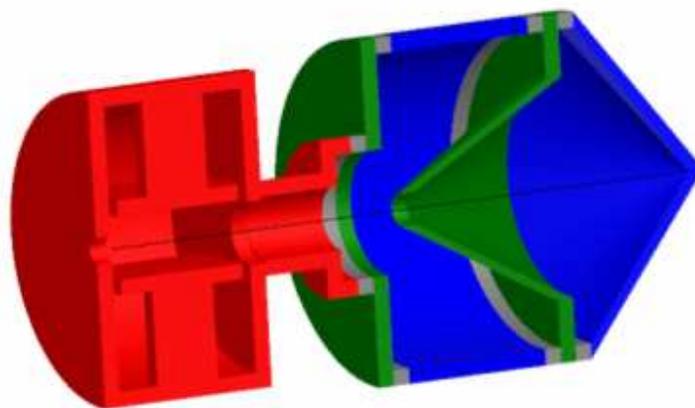


Рис.12. Эскиз конструкции циклотронного преобразователя.

На рисунке 12 представлена эскиз конструкции прототипа циклотронного преобразователя, красным цветом отмечены резонатор и трубка дрейфа, синим

цветом обозначены поверхности токоприемных электродов коллектора, зеленым – электроды предколлектора, серым цветом – изоляторы.

Электрическая компонента высокочастотного поля в резонаторе сосредоточена в зазоре между ламелями (см. рис. 13). Однородный характер распределения поля и оптимальная нагрузка резонатора электронным пучком дают возможность преобразовать до 95% входной мощности микроволн в мощность быстрой циклотронной волны электронного потока.

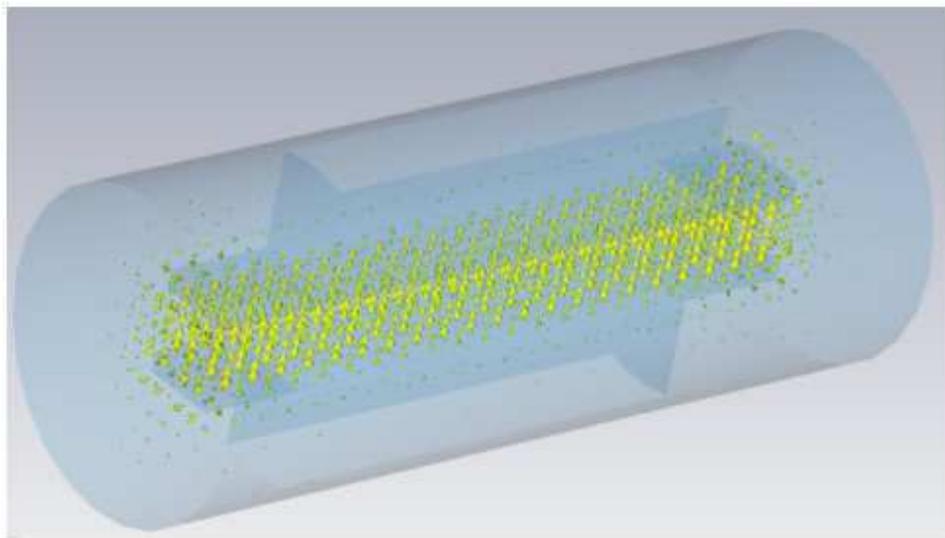


Рис. 13. Распределение электрической компоненты высокочастотного поля в резонаторе, (силовые линии поля показаны желтыми стрелками).

Изучена динамика преобразования энергии вращения электронного пучка в потенциальную энергию в реальном профиле реверсивного магнитного поля. Поле предколлектора создается с помощью дополнительного барьерного электрода, потенциал которого на 300 – 350 вольт ниже, чем потенциал токоприемного электрода коллектора. Использовалась специально разработанная программа расчета динамики электронного пучка в реверсивном магнитном поле в присутствии тормозящего поля предколлектора. Начальные данные для задачи получены для входной мощности микроволн 1 кВт и параметров пучка на выходе из резонатора.

Результаты расчета представлены на рис. 14.

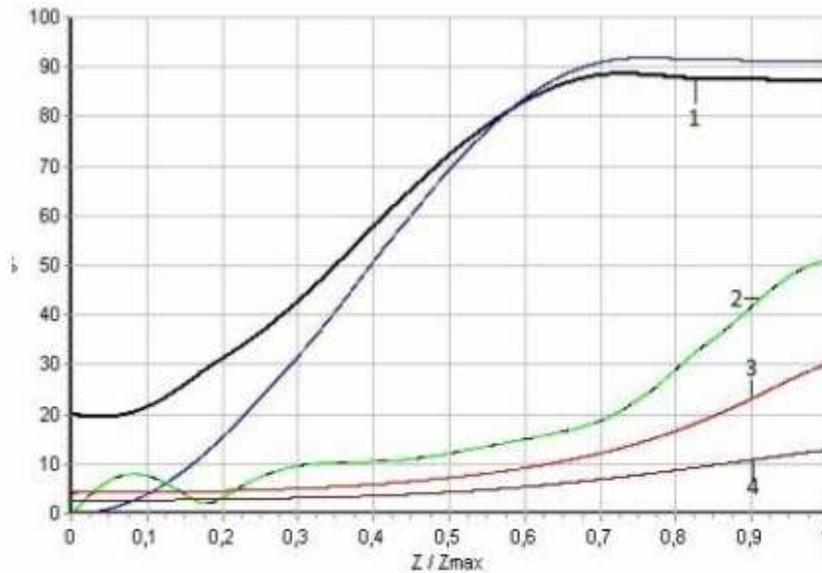


Рис. 14. Характеристики реверсной области опытного циклотронного преобразователя.

Кривая 1 – эффективность преобразования, 2 – разброс продольных скоростей парциальных пучков, 3 – максимальный поперечный размер потока, 4 – минимальный размер потока.

Результаты расчетов показывают возможность реализации заданных характеристик прототипа преобразователя.

В динамическом режиме работы (при подаче микроволн на вход преобразователя) электронный поток отклоняется от оси реверсной области (см. кривые 3 и 4 на рис.14), преодолевает потенциальный барьер на входе в коллектор и оседает на цилиндрическом токоприемном электроде коллектора.

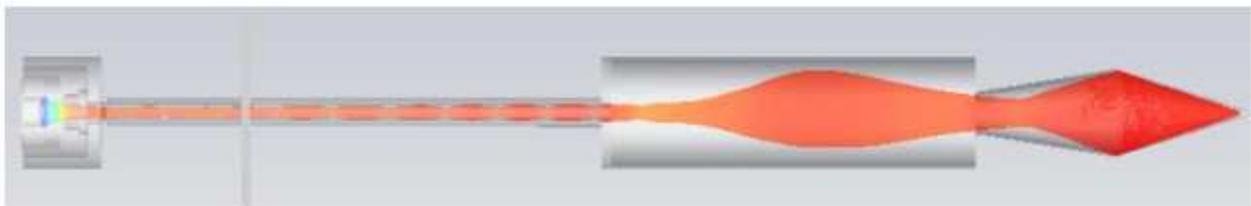


Рис.15. Прохождение электронного пучка в электронно-оптическом макете прототипа.

Проведен расчет динамики электронного пучка в электронно-оптическом макете прототипа (см. рис. 15). В статическом режиме работы (при отсутствии мощности микроволн на входе) электронный пучок проходит по оси в отверстие конусного электрода и оседает на конусном токоприемном электроде.

### **Заключение**

Использование модифицированной модели электронного потока с парциальными пучками конечного сечения позволило на порядок уменьшить погрешность вычисления поля пространственного заряда и выявить его влияние на электронные процессы в реверсивной области преобразователя. Изучена динамика электронного пучка в реверсивной области с  $\pi/2$ - профилем магнитного поля в присутствии тормозящего электростатического поля коллектора. Показана возможность реализации высокоэффективных режимов (до 90%) преобразования кинетической энергии интенсивного пучка непосредственно в его потенциальную энергию. Проанализирована схема циклотронного преобразователя с комбинированной реверсивной областью, в которой продольные скорости электронов сохраняются на постоянном уровне. Это существенно снижает возможность появления вторичной эмиссии с поверхности коллектора и облегчает рекуперацию энергии электронного потока. Изучена схема коллектора с отдельными токоприемными электродами для статического и динамического режимов работы.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ad Astra Special Report on Space-Based Solar Power. // Ad Astra, National Space Society, USA, v.20, N 1, 2008.
2. Space-Based Solar Power As an Opportunity for Strategic Security. // Report to the National Security Space Office, USA, October 2007.

3. Research and Study of SSPS (Space Solar Power System). // JAXA/MRI, Science and Technology Agency, 2005.
4. Ванке В.А., Лопухин В.М., Росновский В.К., Саввин В.Л., Сигорин К.И. О наземном приемно-преобразующем комплексе солнечных космических электростанций. // Радиотехника и электроника, т.27, №4, с.1014, 1982.
5. Vanke V.A., Savvin V.L. Cyclotron Wave Converter for SPS Transmission System. // Proc. of Sec. Intern. Symp. Power from Space, pp. 515-520, Paris, 1991
6. Vanke V.A., Matsumoto H., Shinohara N., Kita A. High Power Converter of Microwaves into DC. // Journal of Radioelectronics, № 9, 1999.
7. Ванке В.А., Зайцев А.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. К анализу физических процессов в переходной области циклотронного преобразователя энергии. - Радиотехника и электроника, 1978, т.23, № 6, с.1217.
8. Пеклевский А.В., Саввин В.Л. Спектр скоростей и динамика электронных потоков в расширяющихся магнитных полях. // Известия РАН, Серия физическая, 2008, том 72, №1, с. 139-142.
9. Пеклевский А. В. Нелинейное взаимодействие поперечных волн электронного потока в расходящихся аксиально-симметричных магнитных полях. - Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат.наук. Москва, физический факультет МГУ, 2008.
10. Казарян Г.М., Магтесян М.А., Саввин В.Л., Пеклевский А.В.. Пространственный заряд, вторичная эмиссия и виртуальный катод в циклотронном преобразователе энергии. // Научная сессия МИФИ, 2011, том 2, стр. 159.