

УДК 621.391.822

ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ЦИКЛОТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

А.В. Коннов¹, Г.М. Казарян², Д.А. Михеев², В.Л. Саввин², Т.И. Чернобай³

¹ФГУП “НПП “Торий”, Москва

²Физический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра фотоники и физики микроволн

³ФГУП “НПП “Исток”, Фрязино, Московская обл.

Получена 24 мая 2012 г.

Аннотация. Спроектирована электронно-оптическая система циклотронного преобразователя энергии, включающая пушку со сферическим катодом и магнитную систему, образованную кольцевыми радиально намагниченными магнитами, с потенциалом пучка 2000 В и током 0.14 А. Проведен трехмерный траекторный анализ электронного пучка в области его формирования. Наилучшие условия согласования сходящегося электронного пучка получены при магнитном поле на катоде, близком к нулю. В режиме согласования пульсации огибающей электронного пучка не превышают 7%. Различные условия фокусировки приосевых и периферийных электронов, приводят к образованию гало, несущего около 10% тока пучка. Показано, что для корректного вычисления тока, снимаемого с катода, необходимо учитывать тепловое смещение керны катода.

Ключевые слова: СВЧ излучение, циклотронный преобразователь энергии СВЧ излучения, электронная пушка, электронно-оптическая система, формирование электронного пучка, ток пучка, транспортировка электронного пучка, магнитное поле, пульсации пучка, 3D-моделирование.

Abstract. Cyclotron wave converter electron optics including electron gun with spherical impregnated cathode and magnetic system consisting of ring permanent magnets with radial magnetization is designed. The electron beam potential is 2000 V and cathode current is 0.14 A. 3D-simulation of the electron beam trajectories in the gun region is done. The best confinement condition is obtained by zero cathode

magnetic fields. In this regime the beam envelope ripples are not more than 7%. Different focusing of near axis and peripheral particles led to the beam halo formation. The halo keeps about 10% of beam current. It is shown that for the correct computation of the cathode current is necessary to take into account the cathode kern thermal shift.

Keywords: microwave irradiation, cyclotron wave converter, electron gun, electron optics, electron beam formation, beam current, electron beam transport, magnetic field, envelope beam ripples, 3D-simulation.

Введение

Использование нетрадиционных источников энергии (без сжигания ископаемого топлива, в том числе ядерного) и, в частности солнечной энергии, является одним из приоритетов современной науки и техники. Передача энергии от солнечных батарей, расположенных в Космосе на геостационарной орбите Земли, сфокусированным СВЧ излучением потребителю – одна из самых впечатляющих научно-технических задач, сопоставимая по своему масштабу с освоением ядерной энергии [1,2]. Важнейшей составной частью этого проекта является наземный приемно-преобразующий комплекс (приемно-выпрямительный тракт), в котором осуществляется преобразование энергии СВЧ излучения в потребительские формы энергии, в частности, в энергию постоянного тока.

К преобразующим элементам наземного приемно-выпрямительного тракта предъявляется ряд требований:

- 1) высокая энергоёмкость;
- 2) надёжность системы при коммутации;
- 3) устойчивость к грозовым разрядам (молниям);
- 4) высокий КПД преобразования (не менее 70%), слабо зависящий от перепада мощности по приёмной антенне;
- 5) минимально возможное число элементов (высокая удельная мощность на один прибор);

- б) минимальный уровень обратных (отражённых) излучений на гармониках основного сигнала;
- 7) простота конструкции;
- 8) невысокая стоимость при массовом производстве.

В настоящее время прибором, наиболее полно удовлетворяющим всем перечисленным выше требованиям, является циклотронный преобразователь энергии (ЦПЭ) СВЧ излучения в энергию постоянного тока [3,4]. Большая удельная мощность (до 10-20 кВт/прибор), высокая устойчивость к перегрузкам свидетельствуют о перспективности применения ЦПЭ в крупномасштабных приёмно-преобразующих комплексах наземных и космических энергосистем.

Кроме того, ЦПЭ не имеет принципиальных ограничений по КПД, так как при взаимодействии ВЧ полей с электронным пучком не происходит модуляции пучка по плотности. Экспериментальные и теоретические исследования [5,6] показали, что КПД 80% в мощных ЦПЭ реально достижим.

В работах, проведенных ранее, освещены в полной мере не все вопросы, связанные с проектированием мощных ЦПЭ. В частности, не найдены оптимальные конструкции резонаторов мощных ЦПЭ, не выработаны критерии достижения высоких значений КПД в ЦПЭ с существенно различными уровнями входной СВЧ мощности и, соответственно, с различными выходными апертурами резонатора. Остались не решенными задачи минимизации потоков вторичных электронов из коллекторов мощных ЦПЭ, имеющих в отличие от традиционных приборов О-типа значительные входные апертуры. Фрагментарно рассмотрены вопросы о степени влияния провисания электрического поля коллектора на КПД преобразования в области реверса.

На физическом факультете МГУ проводится работа по созданию демонстрационного прототипа ЦПЭ с мощностью входного СВЧ сигнала 1 кВт на частоте 2.45 ГГц и КПД не менее 70%. В рамках этого проекта предусмотрено использование магнитной системы на постоянных магнитах, снижение потенциала пучка до 2 кВ, а для увеличения долговечности до 20 тысяч часов – использование пушки с импрегнированным катодом с низкой

средней плотностью тока (менее 1 А/см^2). Перечисленные выше требования приводят к необходимости использования в ЦПЭ плотных пучков с микропервеансом больше $1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ и компрессией более 10.

Траектории электронов в ЦПЭ имеют трёхмерный характер. Для получения высоких значений КПД принципиально важным является формирование электронного пучка с малым ореолом, небольшими пульсациями (менее 10%) и максимально равномерным распределением плотности пространственного заряда по сечению пучка, поэтому в работе делается акцент на численном трехмерном анализе процессов взаимодействия в ЦПЭ как в статическом, так и динамическом режимах.

В данной статье рассмотрено формирование пучка в электронно-оптической системе (ЭОС) ЦПЭ со следующими параметрами: потенциал пучка – 2000 В, ток пучка – 0.1 А, фокусирующее магнитное поле – 0.0875 Т, плотность тока на катоде – менее 1 А/см^2 .

Основные результаты

Для макета ЦСЭ разработана и изготовлена из сплава NdFeB магнитная система на кольцевых радиально намагниченных магнитах (рис. 1).

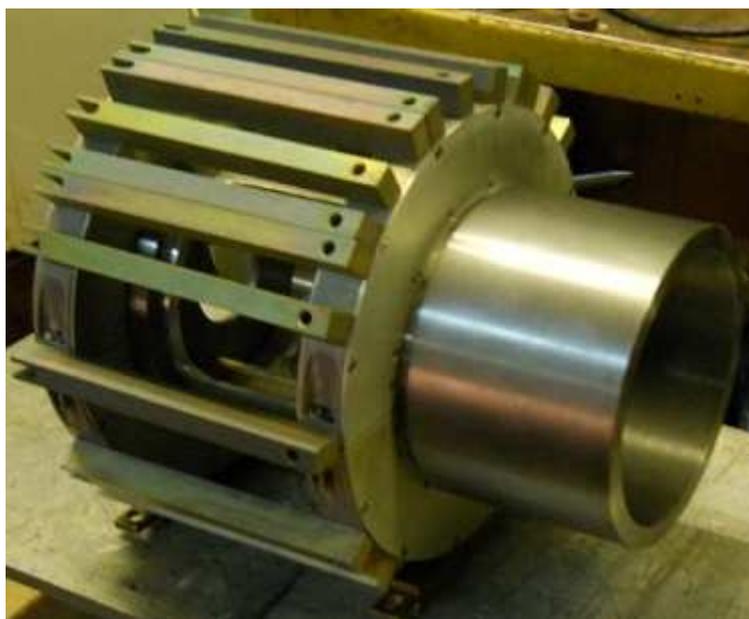


Рис. 1. Вид магнитной системы ЦПЭ

Кольцевые магниты соединены восемнадцатью продольными железными перемычками для получения необходимого уровня магнитного поля (0.0875 Т) и повышения однородности продольного магнитного поля в области резонатора ЦПЭ. Уровень магнитного поля определяется условиями циклотронного резонанса в области резонатора и практически не допускает корректировки. Измеренное распределение продольной компоненты магнитного поля приведено на рис. 2.

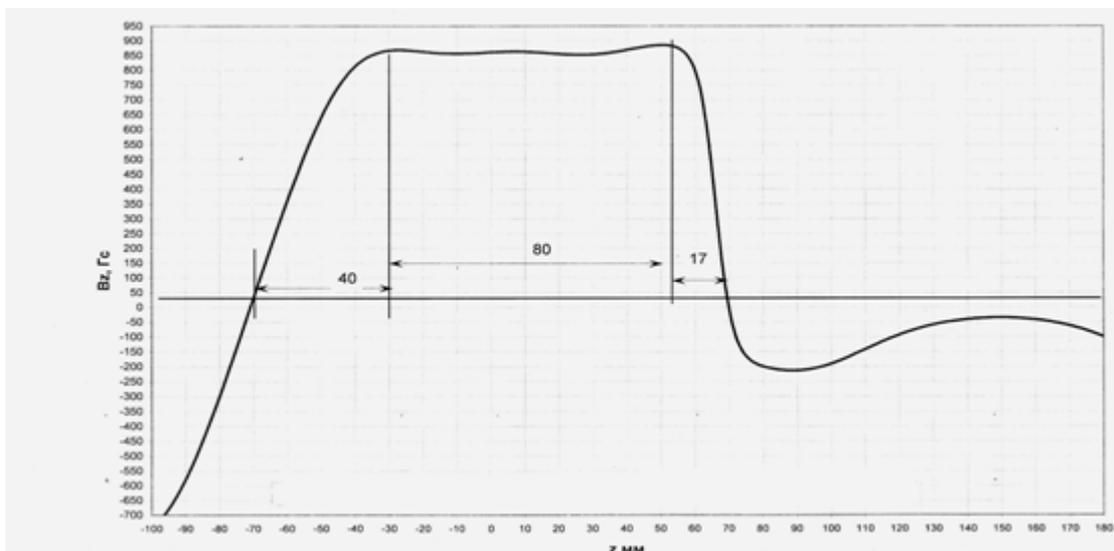


Рис. 2. Распределение продольной компоненты магнитного поля в ЦПЭ

Область нарастания магнитного поля от нулевого до максимального значения зависит от отверстия в полюсном наконечнике и имеет длину 40 мм при диаметре отверстия 40 мм. Для наилучшей компрессии электронного пучка сферический катод электронной пушки помещается в область нулевого магнитного поля.

Сферический катод имеет площадь S_c , заключенную в телесном угле 2θ , равную [7]

$$S_c = 2\pi R_k^2 (1 - \cos(\theta)), \quad (1)$$

где R_k – радиус кривизны поверхности катода.

При $\theta \ll 1$ (1) упрощается, и $S_c = \pi R_c^2$, здесь R_c – радиус катода (рис. 3).

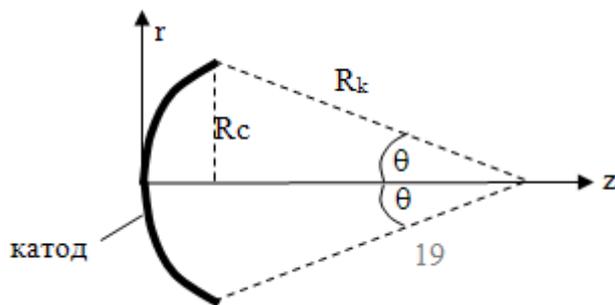


Рис. 3. Схема, поясняющая обозначения в формуле (1)

Нетрудно определить с помощью (1), что при радиусе кривизны катода $R_k = 6.6$ мм, радиусе катода $R_c = 3.5$ мм и токе с катода 0.1 А средняя плотность тока на поверхности катода $j = 0.24$ А/см². Таким образом, приведенные геометрические размеры катода дают требуемую среднюю плотность тока с некоторым запасом, необходимым при учете неравномерного распределения плотности тока по поверхности катодов в конструкциях реальных пушек.

Сначала рассмотрим модельную задачу. Определим радиус равномерно заряженного пучка с минимальными пульсациями в магнитном поле (рис. 2) и распределение плотности тока по сферическому катоду с геометрическими размерами, приведенными выше. Инжектируем пучок с потенциалом 2 кВ и током 0.1 А с плоского круглого эмиттера, размещенного в центре “плато” магнитного поля в направлении сферического катода, выполняющего в данном случае функцию коллектора с рекуперацией энергии пучка (“обратная” задача). Диаметр эмиттера равен диаметру пучка, а на эмиттере магнитное поле равно нулю. Для того, чтобы не было отраженных электронов потенциал сферического катода, положим немного меньшим потенциала пучка: -1.98 кВ. Анод расположим по отношению к сферическому катоду так, чтобы электроны пучка в прикатодной области не выходили за пределы сферического катода. Потенциалы анода и трубки дрейфа равны нулю.

На рис. 4 представлен пучок электронов с пульсациями огибающей менее 5% , полученный в результате подбора радиуса эмиттера в “обратной” задаче. При этом “оптимальный” радиус пучка составил 0.5 мм, что немного превышает бриллюеновское значение радиуса пучка, равное 0.48 мм.

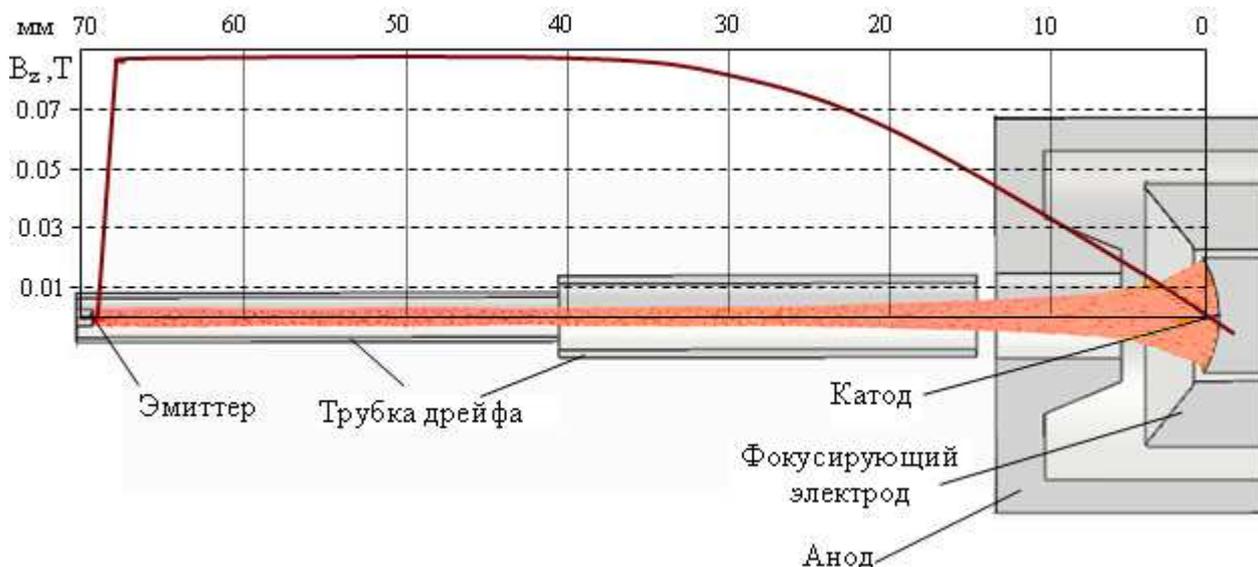


Рис. 4. Пучок и продольное магнитное поле в модельной “обратной” задаче.

Распределение плотности тока вдоль дуги, проходящей по поверхности катода через центр мениска, имеет более чем четырехкратный перепад по плотности тока от 0.15 до 0.65 А/см^2 , но остается меньше 1 А/см^2 (рис. 5).

В качестве прототипа пушки ЦПЭ использована серийно выпускаемая пушка прибора УВ-384 [8], которая имеет импрегнированный сферический катод с радиусом кривизны $R_k = 6.6 \text{ мм}$, радиусом катода $R_c = 3.5 \text{ мм}$ и микроперванс, $0.65 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Пушка УВ-384 включает три электрода: катод, фокусирующий и управляющий электроды. Анодом является электродинамическая система.

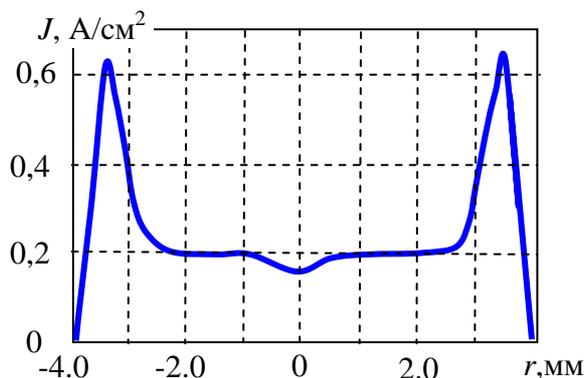


Рис. 5. Распределение плотности тока на поверхности катода

В штатном режиме при температуре поверхности катода 1200°C и потенциалах катода и фокусирующего электрода, равных нулю, управляющего электрода – 15 кВ , а анода – 19 кВ , ток катода составляет 1.65 А . Пушка УВ-

384 явилась удобным объектом для выбора сетки в прикатодной области, плотность которой определяет точность расчета тока эмиссии с поверхности катода и параметров электронного пучка.

Моделирование эмиссии с поверхности катода производится методом крупных частиц (“частица в сетке”) в режиме ограничения тока пространственным зарядом. В модели учтено максвелловское распределение скоростей эмиттируемых частиц. Для моделирования используется гексагональная сетка. Несмотря на то, что геометрия пушки обладает аксиальной симметрией, траектории частиц ее не имеют.

Шаг сетки в прикатодной области равен 0.05 мм по всем координатам, а в области анода – 0.5 мм. При таком распределении плотности сетки в области моделирования, которая включает пушку и область нарастания магнитного поля, содержит немногим более 4 млн. ячеек (гексаэдров). Число эмиттируемых частиц с катода – около 16 тысяч. Поверхность эмиссии смещена к аноду от геометрической поверхности катода на 1.5 диагонали гексаэдра в область ненулевых электрических полей. Самосогласованное решение ищется методом итераций до достижения точности расчета траекторий частиц 0.01.

На рис. 6 приведена схема пушки УВ-384, распределение магнитного поля в ней и сетка в областях пушки, используемая в трехмерном траекторном анализе.

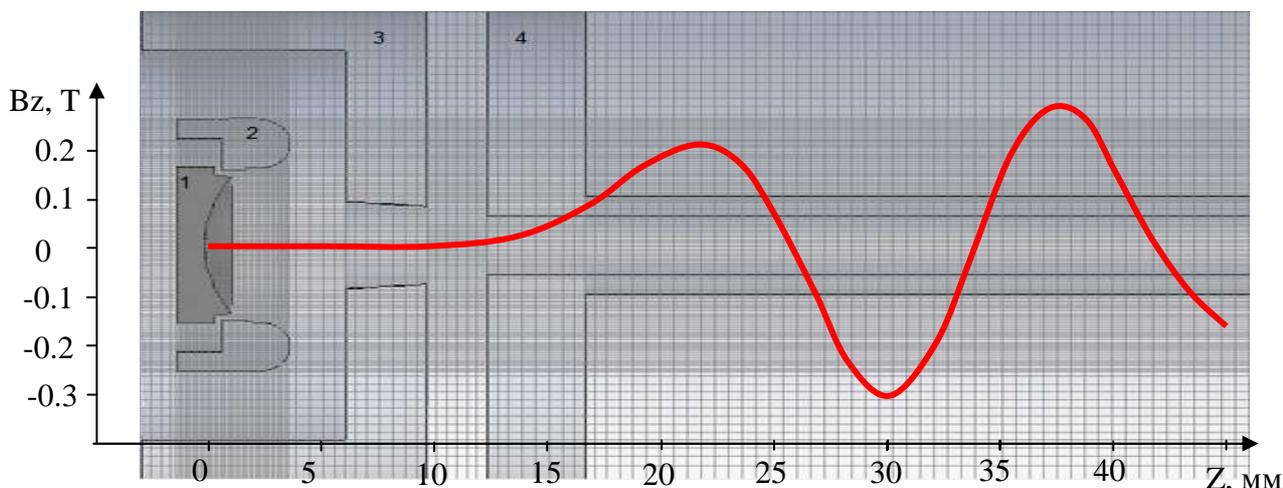


Рис. 6. Сетки областей для расчёта эмиссии с катода в пушке УВ-384 и осевое распределение продольного магнитного поля; 1 – катод, 2 – фокусирующий электрод, 3 – управляющий электрод, 4 – анод

Зависимость тока эмиссии с катода от числа ячеек $N_{яч.}$ приведена на рис. 7, из которого следует, что плотность сетки в прикатодной области, соответствующая 4 млн. ячейкам, достаточна для расчета тока эмиссии с катода, который равен 1.4 А, и не изменяется при дальнейшем увеличении плотности сетки.

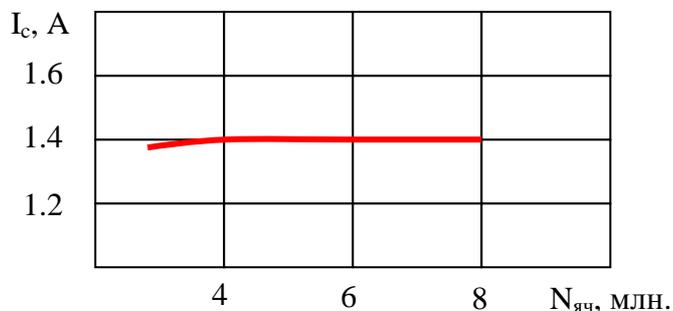


Рис. 7. Зависимость тока эмиссии с катода от числа ячеек.

Вычисленное значение тока примерно на 15% меньше измеренного. Причина отличия заключается в том, что в модели не учтено тепловое расширение керна катода. Материал керна катода – тантал, имеющий коэффициент линейного теплового расширения $KTP = 7.3 \cdot 10^{-6} \text{ мм/}^\circ$, длина керна 35 мм. Рабочая температура катода 1200°C , его тепловое смещение $\Delta_c = 0.30$ мм. Материал фокусирующего электрода – молибден, $KTP = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ мм/}^\circ$, длина 37 мм, температура фокусирующего электрода 400°C . При этой температуре тепловое смещение фокусирующего электрода $\Delta_f = 0.07$ мм. Ток катода в зависимости от смещения катода к аноду представлен на рис. 8. Отметим, что тепловое смещение фокусирующего электрода практически не влияет на токоотбор с катода.

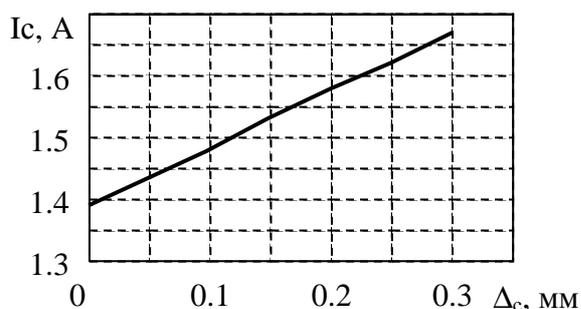


Рис.8. Зависимость тока катода от смещения керна катода

Как следует из представленной зависимости при смещении катода на $\Delta_c = 0.30$ мм, ток катода $I_c = 1.67$ А. Таким образом, при учете теплового смещения керна катода рассчитанное и измеренное значения тока катода хорошо совпадают.

Для использования пушки УВ-384 в ЦПЭ необходима ее модификация, заключающаяся в смещении управляющего электрода к катоду и использовании управляющего электрода в качестве первого анода. Технически эта модификация наиболее проста, так как достаточно углубить посадочное место управляющего электрода. Как показали расчеты, управляющий электрод необходимо приблизить на 1.3 мм к катоду. В модифицированной пушке напряжение катода и фокусирующего электрода -2 кВ, а управляющий электрод и анод имеют нулевой потенциал. При таких значениях потенциалов электродов, ток, снимаемый с катода, составляет 0.11 А без учета теплового смещения керна катода и 0.14 А – с учетом.

Распределение плотности тока эмиссии по поверхности катода представлено на рис. 9. Имеет место отличие от распределения плотности тока в “модельной” задаче (рис. 5), вследствие заметного различия в форме анодов. В центральной части катода плотность тока эмиссии выше из-за большей плотности пространственного заряда. Тем не менее, и в “реальной” пушке ЦПЭ плотность тока эмиссии с катода не превышает 0.63 А/см².

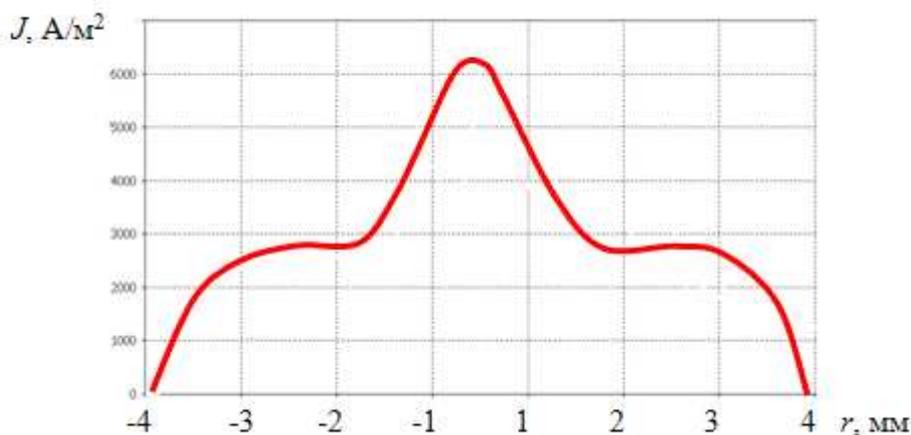


Рис. 9. Плотность тока эмиссии на поверхности катода пушки ЦПЭ

Динамика перераспределения плотности тока в пушке (рис. 10) показывает, что уже на начальном этапе формирования пучок имеет значительно меньшую плотность тока в приосевой части пучка и сохраняет такую структуру в области нарастания магнитного поля вплоть до уровня 0,6 от максимального значения. Это согласуется с распределением плотности тока в прикатодной области в “обратной” задаче.

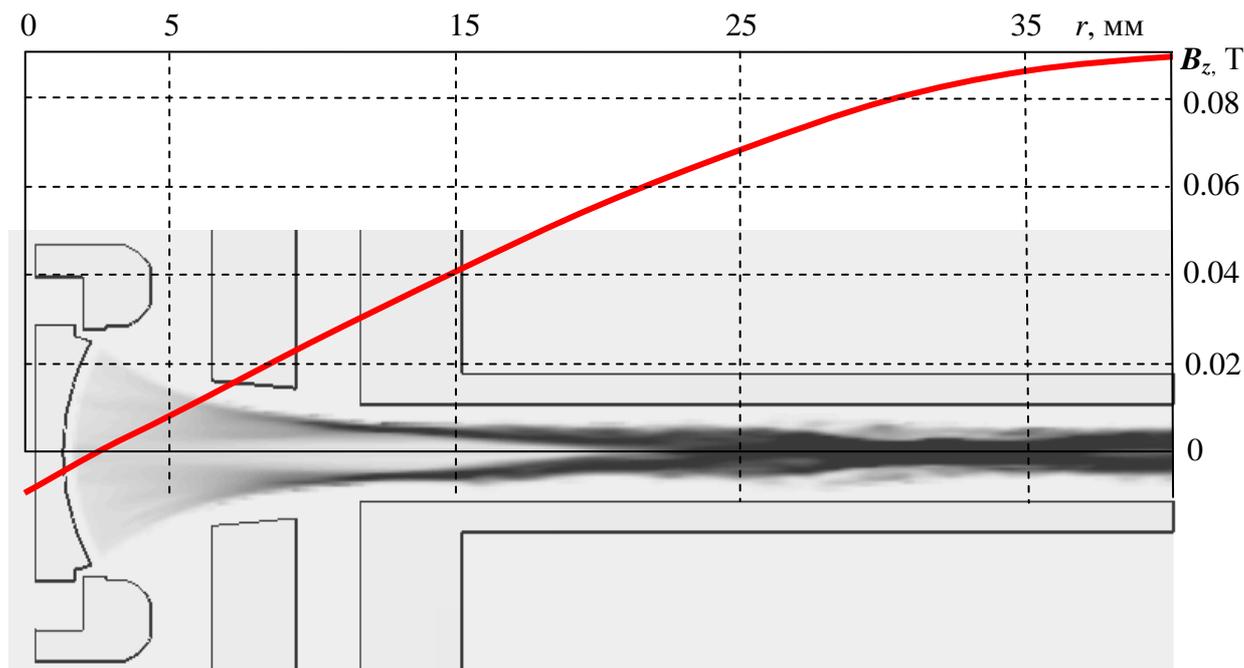


Рис. 10. Распределение плотности тока в пучке при его формировании

Для выяснения внутренней структуры пучка значительный интерес представляют результаты траекторного анализа.

На рис. 11а показан пучок, на участке от катода до середины “плато” магнитного поля (рис.2). На рисунке 11 четко видно, как магнитное поле фокусирует внешние электроны пучка, образуя “перетяжки” в пучке.

Как следует из сопоставления сечений пучка (рис. 11б) с распределением частиц на поверхности катода (рис. 12) группа частиц, образующая кольцо вокруг оси трубки дрейфа, достаточно устойчива и лишь немного увеличивает свой радиус в процессе формирования и фокусировки пучка. Другими словами, частицы, движущиеся в приосевой области пучка, практически не испытывают фокусирующего действия магнитного поля и отклоняются от оси лишь под действием сил пространственного заряда (рис. 11б).

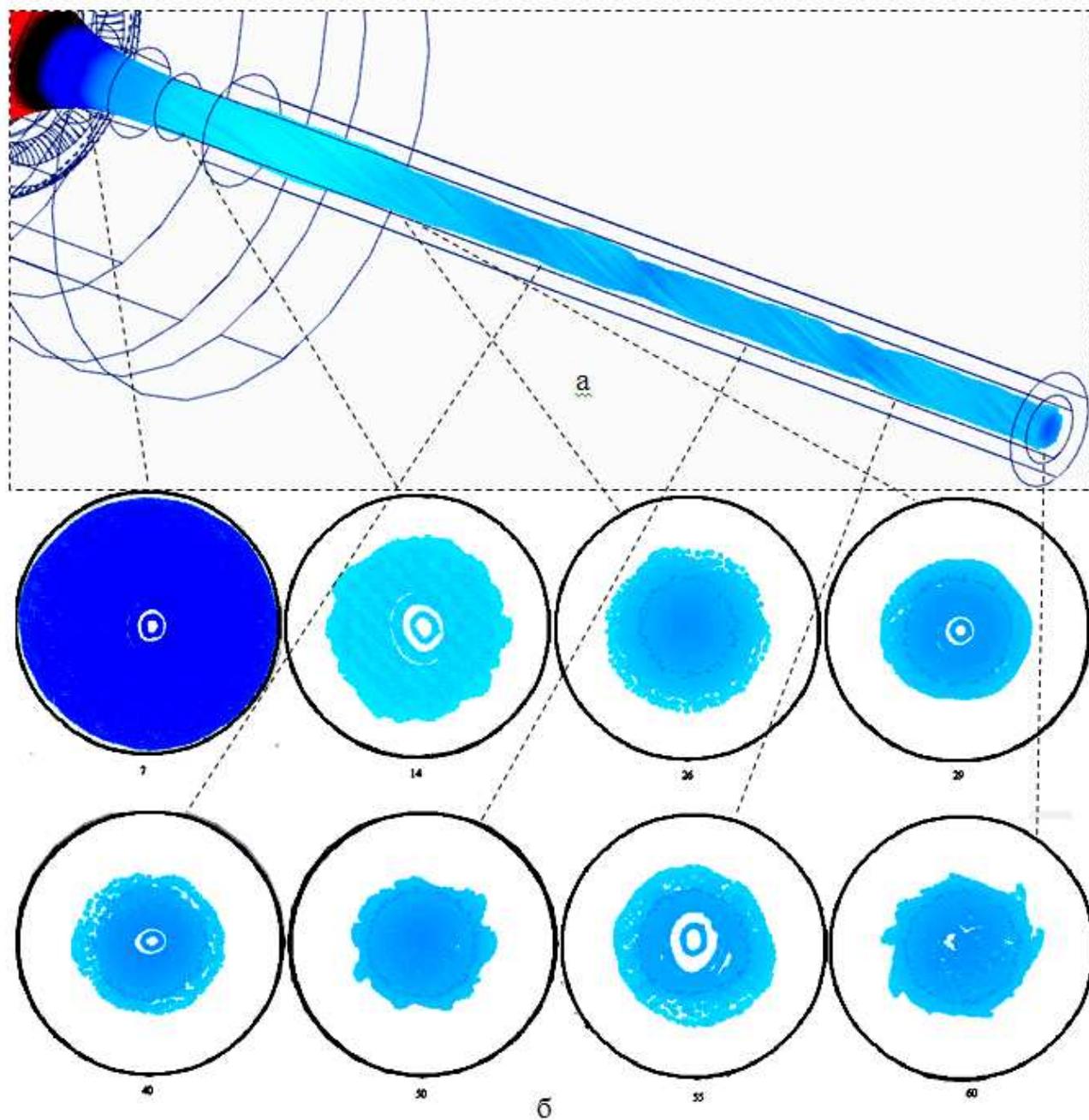


Рис.11. а) Траектории частиц, б) поперечные сечения пучка в трубе дрейфа, радиус трубы дрейфа 1.5 мм



Рис. 12. Распределение частиц на поверхности катода

В процессе формирования пучка образуется ядро и гало пучка (рис. 13) с соотношением радиальных размеров примерно 3: 1.

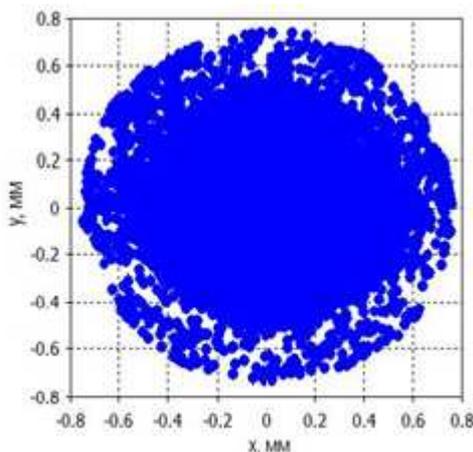


Рис. 13. Ядро и гало пучка

За появление гало ответственны частицы, эмитируемые с катода с радиусов от $0.1 R_c$ до $0.7 R_c$, которые под действием электрических полей в области катод–перый анод движутся на периферию пучка, тогда как частицы, эмитируемые с периферийной области катода смещаются в к центру пучка (рис. 14). Пульсации огибающей пучка составляют 7%.

Динамику изменения распределения плотности тока пучка после выхода его из области катод-анод иллюстрирует рис. 15. В области однородного магнитного поля ($z = 56$ мм) формируется “колоколообразное” распределение плотности тока по радиусу пучка. По уровню 95% тока (0.1 А) радиус пучка составляет 0.8 мм, а в гало сосредоточено около 10% тока пучка.

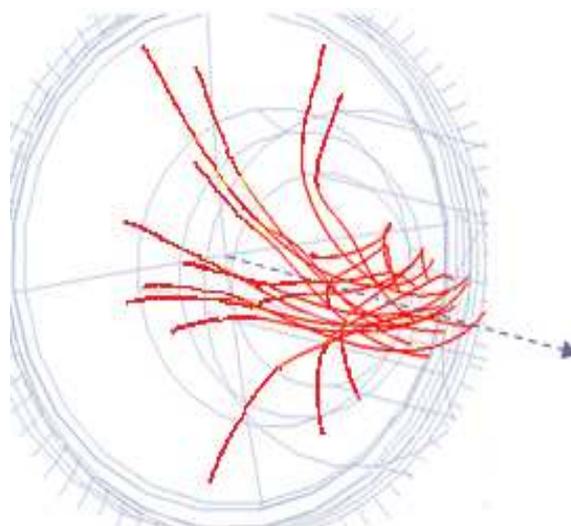


Рис. 14. Траектории эмитируемых с катода частиц в области катод-первый анод

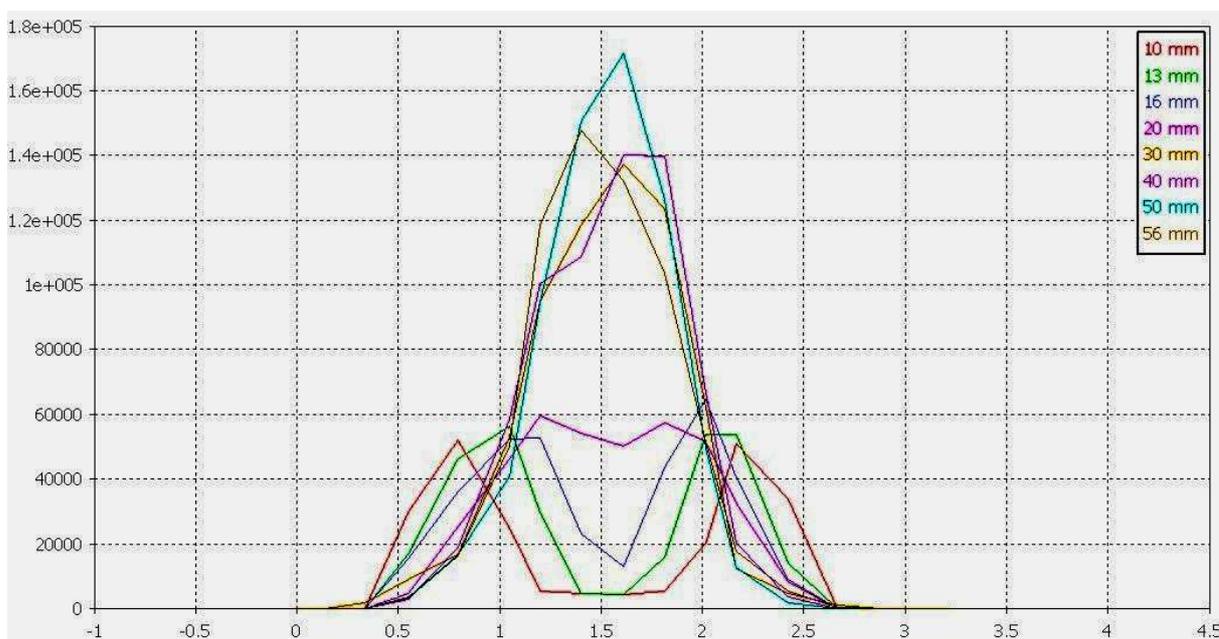


Рис. 15. Распределение плотности тока пучка после его выхода из пушки

Выводы

1. Проведено трехмерное моделирование пушки УВ-384. Учтен тепловой уход керна катода и получено хорошее соответствие рассчитанного и экспериментально измеренного тока эмиссии. На основании этого теста определена плотность сетки в прикатодной области, необходимая для моделирования формирования пучка в пушке ЦПЭ.

2. Рассчитана геометрия электронной пушки ЦПЭ с импрегнированным катодом, потенциалом пучка 2000 В и микропервеансом $1.1 \text{ мкА/В}^{3/2}$.
3. Проведен трехмерный численный траекторный анализ ЭОС ЦПЭ в режиме ограничения тока пространственным зарядом и с учетом максвелловского распределения частиц по скоростям.
4. Рассчитано значение тока эмиссии с катода (0.14 А) при учете теплового ухода керна катода и показано, что максимальная величина плотности тока эмиссии с катода не превышает 0.63 А/см^2 .
5. Получено хорошее согласование пучка с полем магнитной системы. Уровень пульсаций огибающей пучка не превышает 7%.
6. Распределение плотности тока по сечению пучка неравномерно, в процессе его формирования образуется гало, в котором сосредоточено 10% тока. На уровне 95% тока радиус пучка 0,8 мм.

Литература

1. *Ванке В.А.* СВЧ-электроника – перспективы в космической энергетике.//ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, № 5, 2007, сс. 98–102
2. *McSpadden J. O. and J. C. Mankins*, Space Solar Power Programs and Microwave Wireless Power Transmission Technology//IEEE Microwave Magazine, December 2002, pp.46-57
3. *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
4. *Быковский С.В., Квылинский Ю.Ф., Семенович В.Д., Ванке В.А., Будзинский Ю.А., Саввин В.Л.* Циклотронный преобразователь СВЧ-энергии // Патент РФ, RU 2119691, 1998
5. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Росновский В.К., Саввин В.Л., Сигорин К.И.* О наземном приемно-преобразующем комплексе солнечных

космических энергосистем // Радиотехника и электроника, 1982, т. 27, N 5, с. 1014

6. *Саввин В.Л., Казарян Г.М., Коннов А.В., Михеев Д.А., Пеклевский А.В.* Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе //Радиоэлектроника, 2011, №11, с.1-26
7. *Алямовский И.В.* Интенсивные электронные потоки.// МИРЭА, Москва, 1991
8. Разработка СВЧ усилительных цепочек в трёх частотных диапазонах для наземных мобильных станций.// Научно-технический отчёт № 14-9366, ФГУП «НПП «Исток», М., 2010