

**П.И. Акимов¹, А.К. Балабанов¹, Р.А. Косарев¹, Г.В. Мельничук¹,
П.В. Невский¹, Б.В. Прокофьев¹, И.А. Фрейдович¹, В.Г. Чудин¹,
В.И. Шведунов²**

¹ФГУП «НПП «Торий»

²НИИ ядерной физики МГУ им. Скобелева

Многолучевой клистрон С-диапазона с фокусирующей системой на постоянных магнитах

Изложена концепция разработки мощного многолучевого клистрона С-диапазона для СВЧ питания ускорителя с использованием однореверсной фокусирующей системы на кольцевых радиально намагниченных магнитах, кольцевых резонаторов на виде колебаний E_{020} окна вывода энергии на «смешанных модах».

Ключевые слова: многолучевой клистрон, постоянные магниты, реверсная магнитная фокусирующая система, кольцевые резонаторы

Начиная с 1986 года предприятие ФГУП «НПП «Торий» выпускает пакетированные многолучевые клистроны (МЛК) с фокусирующими реверсными системами на постоянных магнитах, работающие в S - диапазоне и применяемые для СВЧ питания ускорителей. Для расширения возможности применения ускорителей в областях радиотерапии, радиографии, инспекционно-досмотрового контроля, дефектоскопии и других областей радиационной технологии необходимо качественное улучшение их характеристик и, прежде всего, уменьшение массы, габаритов и снижение стоимости.

Указанные преимущества достижимы при увеличении частоты СВЧ излучения, используемого для ускорения частиц. Исследования, проведенные в НИИЯФ МГУ, показали, что оптимальные величины частот запитывающих ускорители СВЧ сигналов должны соответствовать диапазону от 5 до 6 ГГц. Известно, что ограничивающим фактором увеличения частоты СВЧ сигнала является размер пролетного канала в ускоряющей секции. С уменьшением диаметра канала растут потери пучка частиц в процессе ускорения, уменьшается достижимая мощность, ухудшаются поперечные характеристики пучка вследствие аббераций.

Вследствие перечисленных выше причин предприятием ФГУП «НПП «Торий» начата разработка конструкции МЛК, работающего на частоте 5712 МГц со следующими основными характеристиками:

- выходная импульсная мощность до 3.5 МВт;
- выходная средняя мощность до 10 кВт;
- напряжение катода, около 40 кВ;
- эффективность, не ниже, 0.45;
- коэффициент усиления, не ниже 50 дБ;
- масса клистрона с фокусирующей магнитной системой не более 45 кг.

Предполагается достижение указанных характеристик путем использования в разрабатываемом приборе следующих конструктивных элементов:

1. 26-ти лучевой конструкции электронно-оптической системы с центрами лучей, расположенными на двух concentрических кольцевых рядах, 18 лучей во внешнем ряду и 8 лучей во внутреннем (см. рис. 1)

2. Парциальных магнитно-экранированных пушек Пирса со сходимостью электронного луча в кроссовере не менее 12 (по площади).

3. Одноревверсной магнитной фокусирующей системы на кольцевых магнитах из самарий-кобальтового сплава.

4. Кольцевых резонаторов, работающих на высшем виде колебаний E_{021} .

Одним из основных условий эффективной работы электронно-оптической системы многолучевого клистрона является правильный выбор коэффициента заполнения пролетных каналов электронными пучками, определяющий в конечном итоге величину КПД прибора и уровень токопрохождения пучка в статическом и динамическом режимах работы. С одной стороны, чем меньше диаметр луча и больше фокусирующее магнитное поле, тем легче обеспечить хорошее токопрохождение. С другой стороны, уменьшение диаметра луча приводит к увеличению плотности объемного заряда, а, следовательно, к увеличению сил электростатического расталкивания в группируемом сгустке электронов и уменьшению эффективности их группировки, а также к снижению эффективности взаимодействия электронов с ВЧ полем в зазорах резонаторов.

При проектировании электронно-оптической системы и расчёте электродинамической системы прибора был выбран коэффициент заполнения, равный 0,45. Схема расположения каналов транспортировки парциальных пучков внутреннего и внешнего ряда представлена на рисунке 1 (центральное отверстие является технологическим).

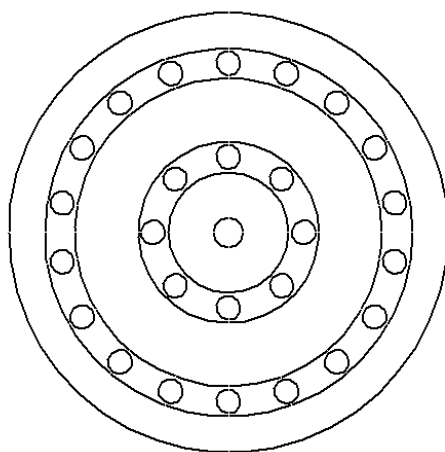


Рисунок 1

Конструирование электронной пушки и электронно-оптической системы прибора проводилось по стандартной, отработанной на предприятии технологии, первоначально в двумерном приближении проводился расчет и оптимизация параметров парциальной пушки. Полученное решение представлено на рисунке 2, величина коэффициента компрессии парциального луча в кроссовере по площади равна 16.

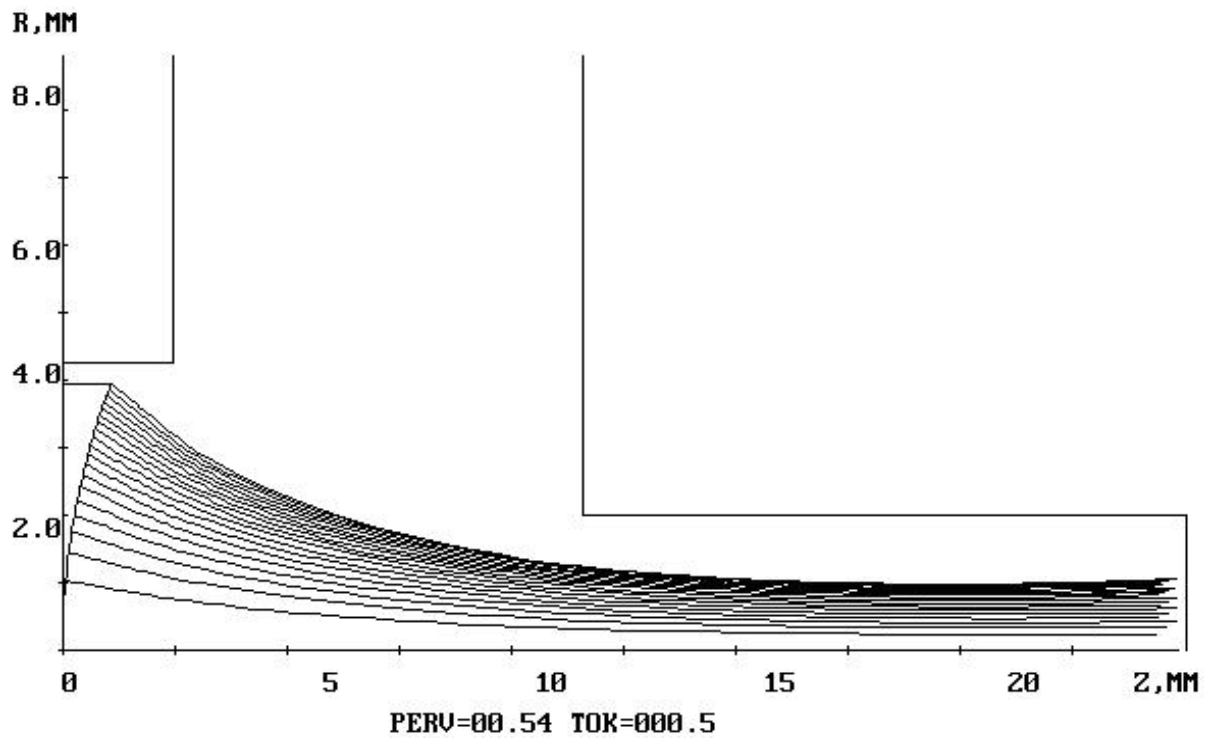


Рисунок 2

Отдельной задачей при расчете парциальной пушки являлось получение достаточно равномерного распределения плотности тока на эмиссионной поверхности. Помимо достаточно хорошей однородности плотности эмиссионного тока, распределение которого представлено на рисунке 3, полученный вариант пушки с возрастанием плотности тока на краю эмиттера гарантирует отсутствие эффекта перефокусировки граничных траекторий, характерного для пушек с компрессией.

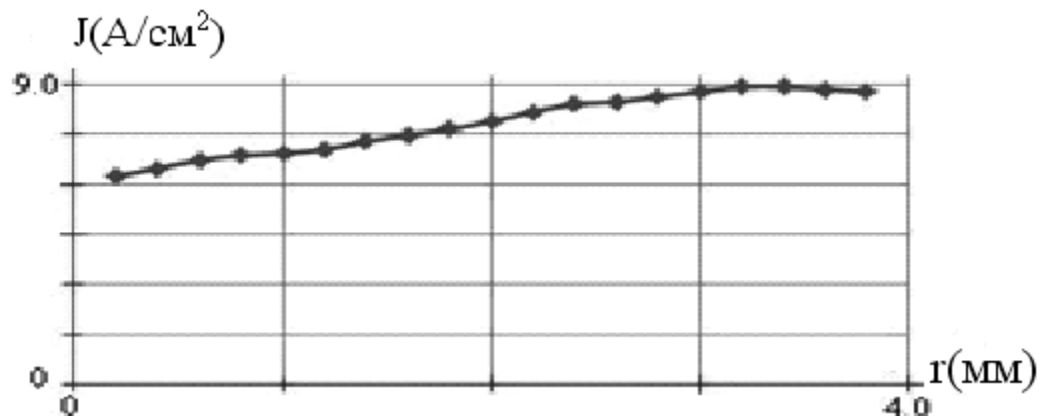


Рисунок 3

Несмотря на очевидную сложность разработки конструкций МЛК с реверсными магнитными системами преимущества использования последних определяются тем, что наряду со значительным улучшением весогабаритных характеристик магнитной фокусирующей системы, а значит и прибора в целом, применение МРФС позволяет

существенно увеличить коэффициент использования энергии магнитного поля за счет уменьшения полей рассеивания.

Результаты проектирования конструкции однореверсной МФС прибора на кольцевых магнитах с полюсными наконечниками и экранами (анодным и коллекторным), а также расчетное распределение продольной компоненты индукции фокусирующего магнитного поля в канале транспортировки пучка внешнего ряда представлены на рисунках 4 и 5.

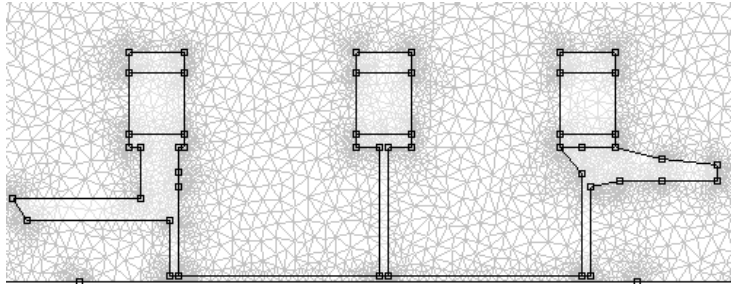


Рисунок 4

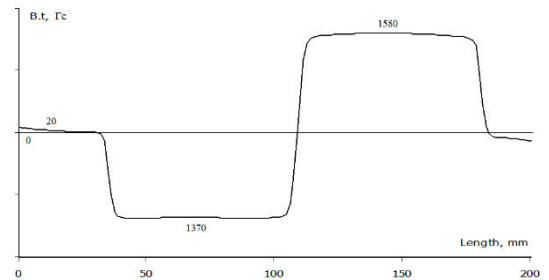


Рисунок 5

Результаты траекторного анализа парциального пучка в статическом режиме в варианте согласования пушки с магнитным полем МФС представлены на рисунке 6. При отработке согласования учитывалось, что протяженность зон реверса в практических конструкциях приблизительно равно диаметру отверстия в полюсном наконечнике и соизмерима с длиной волны пульсации пучка в пролетном канале. Электроны пучка в зоне реверса оказываются под воздействием магнитного поля много меньшего, чем необходимо для существования равновесного пучка, а нарушение баланса сил приводит к кратковременной расфокусировке пучка. Далее поле опять быстро нарастает до заданного значения. При небольшой длине зоны реверса пучок не успевает сильно расшириться, но электроны приобретают радиальную составляющую скорость. Следовательно, после прохождения зоны реверса пучок начинает сильно пульсировать. Снизить амплитуду пульсаций можно, если пучок вводить в зону реверса пульсирующим, а фазу пульсации подобрать так, чтобы при подходе к зоне реверса пучок был бы сходящимся, что и реализовано в варианте, представленном на рисунке 6.

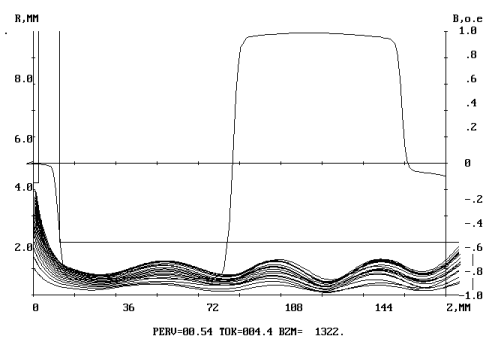


Рисунок 6

Электродинамическая система клистрона построена на кольцевых резонаторах, работающих на виде колебаний E_{020} . Распределение электрических и магнитных СВЧ полей в сечении резонатора представлено на рис. 7.

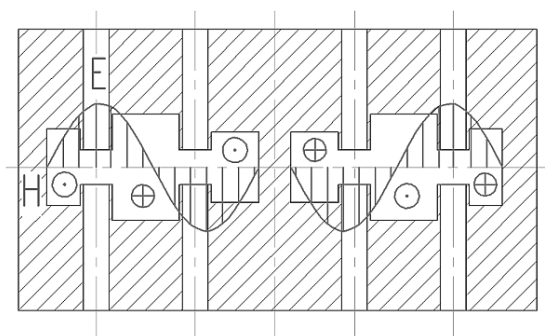


Рисунок 7

Для применения в выводе энергии предложена простая конструкция окна, работающего на «смешанных модах» H_{11} и E_{11} круглого волновода. Новая конструкция окна отличается высокой технологичностью и позволяет резко уменьшить электрические поля в области спая металл-диэлектрик (рис. 8) и, таким образом, снизить вероятность электрических пробоев по поверхности диэлектрика, которые являются основной причиной выхода из строя окон приборов с высокой импульсной мощностью[4].

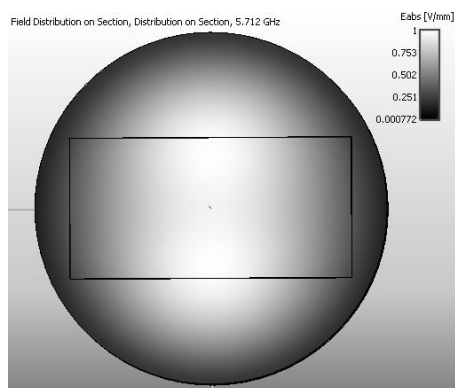


Рисунок 8

Библиографический список

1. I.A. Freydovich, P.V. Nevsky, V.P. Sacharov, M. Yu. Vorobyev, E.A. Knapp, W.P. Trower, H. Yamada, A. Kleev, A.S. Alimov, V.I. Shvedunov, Yu.N. Gavrish, V.M. Nikolaev. Application of the Multi-Beam klystrons with Reverse Permanent Magnet Focusing System in RF Systems of the Compact Electron Accelerators. Proc. IVEC/IVESC 2006, p. 307-308
2. Drozdov S.S., Nevsky P.V. Reversible periodic magnetic focusing system: United States Patent 4,433,270. Feb. 21, 1984.
3. Nevsky P.V. The main problems of the electron optics of multi electron beams and their solution. Applied Physics. № 3. 1998. p.46-51.
4. Kazakov S. Yu. A New Traveling-Wave Mixed-Mode RF Window with a Low Electric Field in Ceramic Metal Brazing Area. KEK Preprint 98-120. August 1998. p.1-4.