

УДК 621.385.64;

**Акимов П.И.¹, Косарев Р.А.¹, Мартыненко М.А.¹, Мельничук Г.В.¹,
Прокофьев Б.В.¹, Саблин В.М.¹, Сергеев К.Л.², Терентьев Д.А.¹,
Фрейдович И.А.¹, Чудин В.Г.¹, Шведунов В.И.³**

¹АО «НПП «Торий»

²АО «Спецмагнит»

³НИИЯФ МГУ им. Скобелева

Импульсный многолучевой клистрон для питания малогобаритного линейного ускорителя электронов

Аннотация. Представлены результаты разработки основных узлов многолучевого клистрона с реверсной магнитной системой, выходной мощностью до 3 МВт, напряжением катода 43 кВ на частоту 5.712 ГГц.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, электронно-оптическая система, электродинамическая система, коллектор

Для обеспечения возможности использования малогабаритных линейных ускорителей на предприятии АО «НПП «Торий» проведена разработка конструкции МЛК на частоту 5712 МГц с выходной импульсной мощностью не менее 3 МВт при уровне средней мощности до 10 кВт [1]. Прибор проектировался на уровень напряжения на катоде порядка 43 кВ и величину КПД не ниже 45% и рассчитан на коэффициент усиления не менее 50 дБ. При этом в соответствии с требованиями ТЗ вес прибора с фокусирующей магнитной системой не должен превышать 55 кг. Анализ возможных конструктивных решений основных узлов прибора показал, что характеристики, соответствующие ТЗ можно получить при использовании 26-ти лучевой конструкции ЭОС с центрами парциальных пучков, расположенными на двух кольцевых рядах (18 - во внешнем ряду и 8 - во внутреннем). Парциальные электронные пучки формируются пушками типа Пирса традиционной для МЛК конструкции с коэффициентом линейной компрессии в кроссовере не менее 3.5. Транспортировки многолучевого пучка обеспечивается однореверсной магнитной фокусирующей системой кольцевых радиально намагниченных самарий-кобальтовых магнитов. Характерной особенностью прибора является использование кольцевых резонаторов, работающих на высшем виде колебаний E_{020} , что позволяет обеспечить равномерность СВЧ поля в зазорах взаимодействия большой поперечной площади при приемлемой плотности тока с катода.

Основные требования к параметрам многолучевой электронной пушки: импульсный суммарный ток – 140 А, рабочее напряжение катода – 43 кВ, микропервеанс парциального пучка – $0,55 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Результаты двумерного и трехмерного анализа формирования пучка в парциальной пушке, представленные на рис. 1, показали удовлетворительную сходимость.

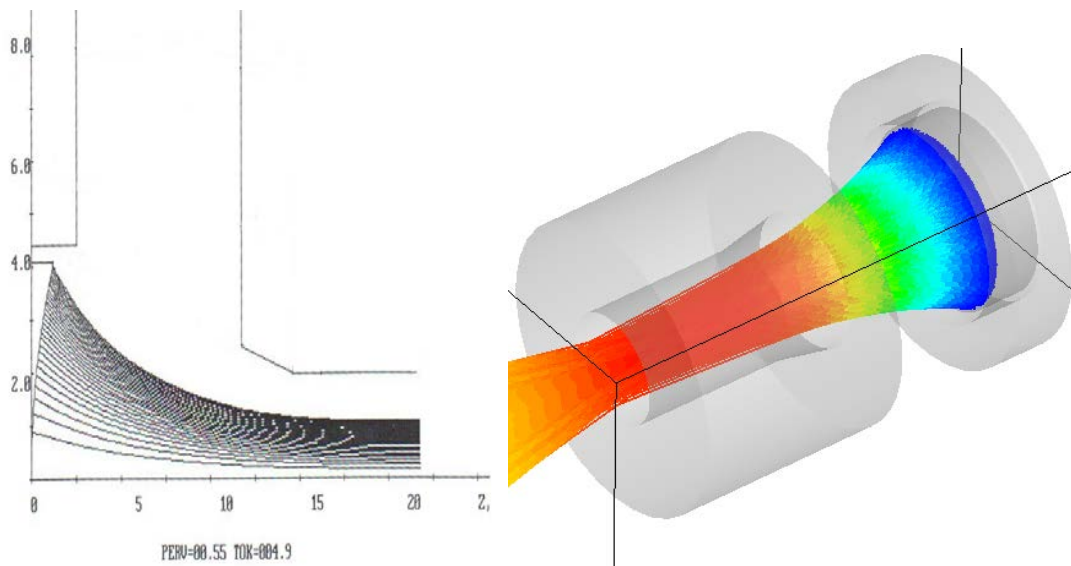


Рис. 1. Результаты расчета парциальной электронной пушки

Транспортировка парциальных пучков в каналах резонаторной системы прибора обеспечивается однореверсной магнитной фокусирующей системой с радиально намагниченными кольцевыми магнитами, выполненными из сплава КС-25ДЦ. Использование реверсной фокусирующей системы позволяет в несколько раз уменьшить массу и габариты фокусирующей системы по сравнению с системами, создающими униполярное магнитное поле. Расчетные величины амплитуд магнитного поля: 1270 Гс в первом реверсе и 1430 Гс во втором реверсе. Проведенный анализ показал, что неоднородность продольной составляющей индукции магнитного поля, измеренной в внешнем пролётном канале в первом и во втором реверсах, должна не превышать 20 Гс. Результаты расчета продольной составляющей индукции магнитного поля на оси канала транспортировки, а также расчет траекторий парциального пучка в двумерном приближении представлены на рис. 2.

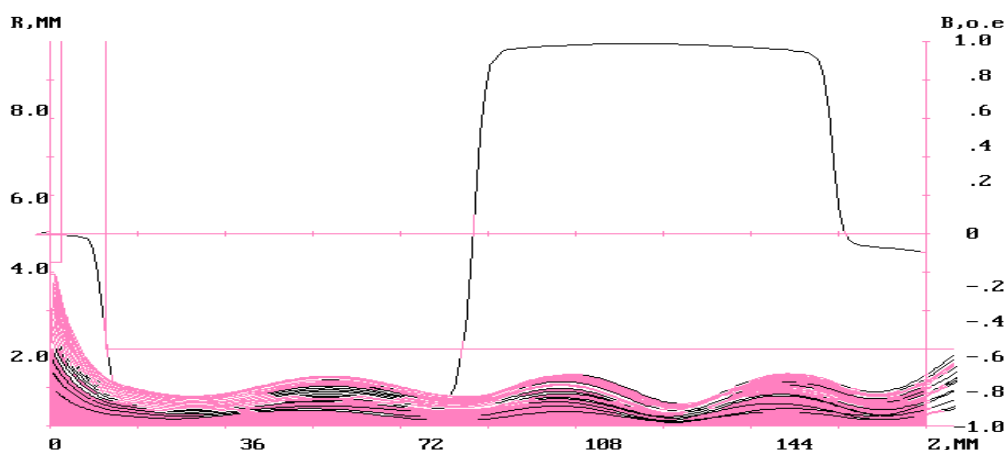


Рис. 2. Результаты расчета продольной составляющей магнитного поля и траектории пучка в канале транспортировки

При оптимизации параметров парциального пучка в канале транспортировки учитывалось, что протяженность зон реверса в практических конструкциях приблизительно равна 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 заметно расшириться, но электроны приобретают радиальную составляющую

скорости. В этом случае, после прохождения зоны реверса пучок может сильно пульсировать. Снижения амплитуды пульсаций можно добиться путем подбора фазы входа пучка в реверс (рис. 2). Общий вид конструкции магнитной фокусирующей системы представлен на рисунке 3. МФС включает три радиально намагниченных кольцевых магнита с полюсными наконечниками переменной толщины, а также анодный и коллекторный экраны.

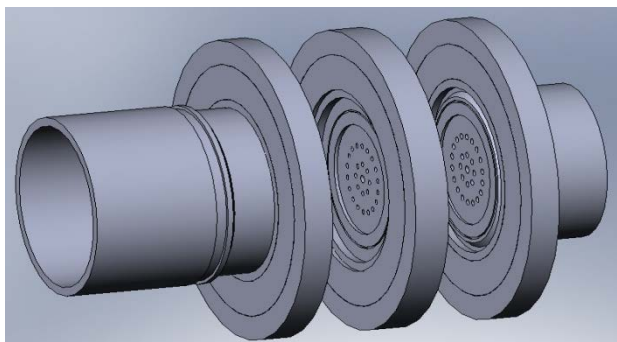


Рис. 3. Общий вид конструкции магнитной фокусирующей системы прибора

Для применения в выводе энергии прибора предложена конструкция окна вывода СВЧ энергии, работающего на «смешанных модах» H_{11} и E_{11} круглого волновода, параметры окна были рассчитаны в программе MEMFIS [3]. Конструкция отличается не только высокой технологичностью, но и малыми величинами напряженности электрического поля в области спая металл-диэлектрик (рис. 4). Это позволило снизить вероятность электрических пробоев по поверхности диэлектрика, являющихся основной причиной выхода из строя окон приборов с высокой импульсной мощностью.

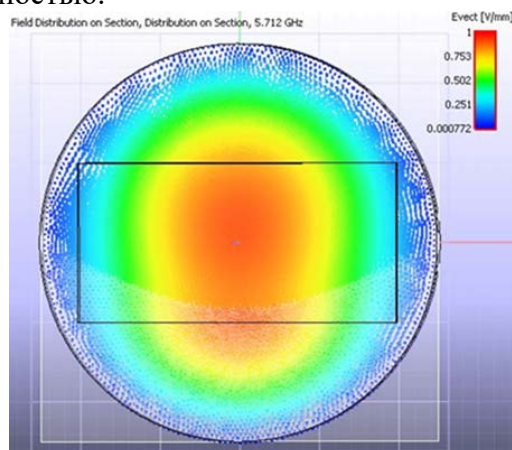


Рис. 4. Напряженность электрического поля в области спая металл-диэлектрик

Как известно, в большинстве случаев в клистронах применяются тороидальные резонаторы. В то же время при переходе на многолучевую конструкцию снижается эффективность работы прибора вследствие высокой неоднородности радиальной составляющей электрического поля в зазорах взаимодействия. В данной работе было принято решение использовать кольцевые резонаторы, работающие на высшем виде колебаний, в частности, на виде колебаний E_{020} . В этом случае по радиусу кольцевого полого резонатора умещается не одна, а две полуволны, а в области двух максимумов электрического поля располагаются два кольцевых емкостных зазора на разных диаметрах (рис. 5). Такая конфигурация поля позволяет получить достаточно высокую однородность поля по сечению пролетного канала, а также максимально отдалиться от паразитных видов колебаний (в данном случае – E_{012} и E_{022}).

Варьирование объема центральной области, находящейся между кольцевыми емкостными зазорами, позволяет манипулировать частотами паразитных видов за счет того, что электрическое поле на видах E_{01n} имеет максимум поля в области центральной линии

резонатора, и изменение емкости в этой области влияет на частоту этих видов сильнее, чем на частоты видов E_{02n} .

Проведенные измерения резонаторов на малом уровне мощности показали хорошее совпадение с расчетами. Измерения на векторной панораме показали разницу фаз во внутреннем и внешнем каналах, равную 180° . Амплитудная неравномерность после настройки резонаторов не превышает 1дБ. Настройка входного и выходного резонаторов проводилась при помощи прогиба крышки и настроечных винтов в волноводе.

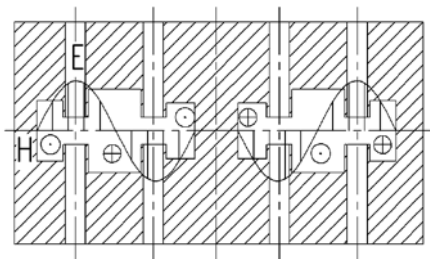


Рис. 5. Распределение электрического поля по диаметру полого резонатора, работающего на виде колебаний E_{020}

Коллектор клистрона имеет многокамерную конструкцию (рис. 6). Такой вариант коллектора, несмотря на сложность его конструкции и системы охлаждения, позволяет исключить явление возникновения виртуального катода, когда все лучи с большой величиной суммарного первеанса ($14.3 \text{ мкА/В}^{3/2}$), попадают в один объем и образуют область с большим пространственным зарядом, отбрасывающим в пространство взаимодействия медленные электроны, что ухудшает стабильность работы клистрона.

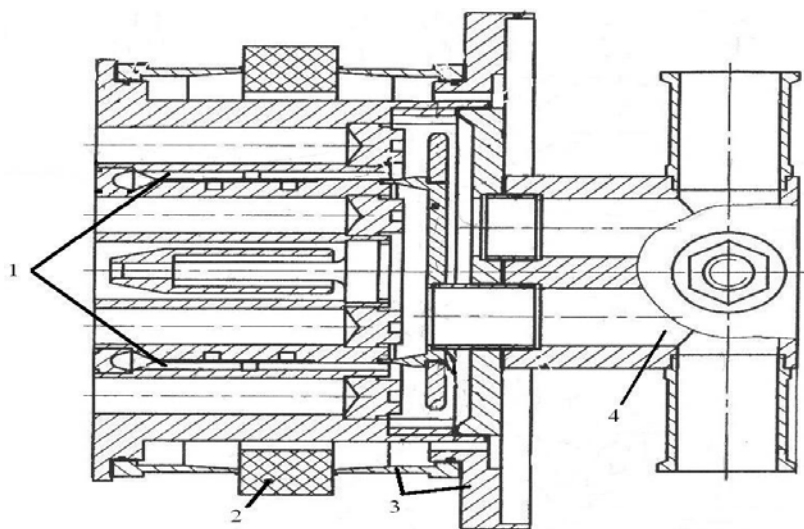


Рис. 6. Конструкция коллектора с системой охлаждения: 1 – каналы охлаждения; 2 – изоляционное кольцо; 3 – элементы магнитного экрана; 4 – элементы системы охлаждения

Проведенные расчеты формирования парциальных пучков в коллекторной области показали недостаточную расходимость пучков в камерах [2], что приводило к большим удельным тепловым нагрузкам на внутренние поверхности камер. С целью снижения удельных тепловых нагрузок была модифицирована конструкция коллекторного магнитного экрана. Изменение конструкции коллекторного экрана позволило на входе в парциальные камеры сформировать достаточно большую по величине поперечную компоненту индукции магнитного поля, обеспечивающую отклонение пучка и более равномерное распределение электронов по поверхности токоприемников (рис. 7). Проведенные расчеты теплового режима

коллектора показали, что при выбранных параметрах системы жидкостного охлаждения коллектора и полученных величинах распределения мощности парциальных пучков в наиболее напряженном статическом режиме работы прибора максимальная температура на стенках парциальных камер не превышает 200 °С, что гарантирует надежную работу коллекторного узла прибора.

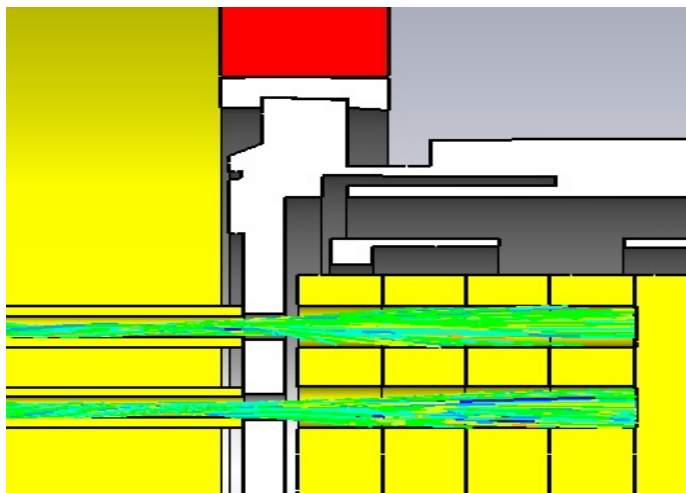


Рис. 7. Результаты моделирования пучков в области коллектора с доработанным экраном

Библиографический список

1. А.К. Балабанов, Р.А. Косарев, Г.В. Мельничук, П.В. Невский, Б.В. Прокофьев, И.А. Фрейдович, В.Г. Чудин, В.И. Шведунцов Многолучевой клистрон С-диапазона с фокусирующей системой на постоянных магнитах // Доклады III Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, июнь 2014г.
2. П.И. Акимов, И.С. Кузнецов, П.В. Невский, В.М. Саблин, И.А. Фрейдович, И.С. Фролов, В.Г.Чудин Проектирование коллекторного узла многолучевого клистрона // «Вакуумная наука и техника» Материалы XXII научно-технической конференции под редакцией академика А.С. Бугаева. М.:.2015г. с.296-300.
3. Grigoriev A.D., Salimov R.V., Tikhonov R.I. Modeling of Complicated Microwave Devices by RFS Code // Conf. Proc.: 2012 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Device Engineering. APEDE 2012. – 2012. – С.175-182.