

Разработка комплексных СВЧ-систем для научных исследований на примере СВЧ-питания многозарядного источника ионов

В. И. Мотренко

АО «НИИ «Феррит-Домен»

v.i.motrenko@domen.ru

А. А. Андреев

АО «НИИ «Феррит-Домен»

a.a.andreev@domen.ru

А. Е. Хошев

АО «НИИ «Феррит-Домен»

a.e.hoshev@domen.ru

Аннотация. В работе представлена архитектура и технические характеристики системы СВЧ питания, предназначенной для генерации плазмы электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в источнике многозарядных ионов. Система функционирует на частоте 14 ГГц и обеспечивает выходную мощность до 2 кВт с возможностью регулировки в диапазоне 1–2000 Вт. Рассмотрены основные компоненты системы, включая задающий генератор на основе синтезатора частот с цифровым управлением, усилительный каскад на базе клистрона непрерывного действия, а также волноводный тракт, включающий элементы защиты и контроля параметров излучения. Подробно описаны конструкция и принцип действия волноводного высоковольтного изолятора, обеспечивающего гальваническую развязку источника СВЧ мощности от плазменной камеры, находящейся под высоким потенциалом. Приведены требования к системе управления, обеспечивающей дистанционный контроль и мониторинг параметров, включая мощность, частоту, температуру и давление охлаждающей жидкости. Анализируются особенности конструкции низкодобротного резонатора, являющегося частью плазменной камеры источника ионов. Обоснованы требования к стабильности параметров системы и её эксплуатационной надежности. Рассмотрены вопросы обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности при работе с высоковольтным оборудованием.

Ключевые слова: система СВЧ питания, источник многозарядных ионов, электронно-циклотронный резонанс, СВЧ техника, вакуумная техника, высоковольтная техника

I. ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ ЭЦР

Генерация плазмы методом электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) находит широкое применение в различных областях науки и техники, включая создание источников многозарядных ионов (ИМИ). Эффективность и стабильность работы ЭЦР ИМИ в значительной степени определяются характеристиками системы СВЧ питания, обеспечивающей ввод высокочастотной мощности в плазменную камеру. Данный доклад посвящен детальному рассмотрению архитектуры, технических характеристик, принципов функционирования и особенностей реализации системы СВЧ питания, предназначенной для генерации ЭЦР плазмы в источнике многозарядных ионов, работающем на частоте 14 ГГц с выходной мощностью до 2 кВт.

II. АРХИТЕКТУРА И ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ СВЧ ПИТАНИЯ

Система СВЧ питания представляет собой комплекс взаимосвязанных компонентов, обеспечивающих генерацию, усиление, передачу и контроль параметров СВЧ излучения. Блок-схема представлена на рис. 1. Основными элементами системы являются:

- **Задающий генератор:** Выполнен на основе синтезатора стабильной частоты с цифровым управлением и предварительным усилителем. Синтезатор обеспечивает формирование СВЧ сигнала в диапазоне частот 13,5–14,5 ГГц с шагом установки частоты 500 кГц. Цифровое управление позволяет осуществлять точную настройку и регулировку выходной мощности в диапазоне -33 дБ с шагом 0,5 дБм. Выходная мощность задающего генератора составляет не менее 2 Вт.
- **СВЧ усилитель:** Основан на клистроне непрерывного действия КУ-411, обеспечивающем выходную мощность до 2 кВт в диапазоне частот 14000 ± 10 МГц с коэффициентом усиления 40 дБ. Питание клистрона осуществляется от источника катодного напряжения и источника питания накала. СВЧ усилитель включает в себя также волноводный вентиль, направленные ответвители с датчиками падающей и отраженной мощности.
- **Волноводный тракт:** Предназначен для передачи СВЧ мощности от усилителя к плазменной камере ИМИ. Включает в себя коаксиальный и прямоугольный волноводы, волноводный высоковольтный изолятор, волноводное вакуумное гермоокно, согласованную нагрузку и короткозамыкатель (для испытаний). Волноводный тракт выполнен из стандартных прямоугольных волноводов сечением 16x8 мм.
- **Блок управления:** обеспечивает дистанционное включение, выключение и управление системой, а также мониторинг ее параметров. Блок управления обеспечивает визуальную сигнализацию, а также ручную аварийную остановку. Осуществляется удаленный контроль напряжения катода, накала, входной и выходной СВЧ мощности, а также получение данных о давлении, расходе и температуре воды; токе накала и токе катода.

- Источник питания катодного напряжения: Высоковольтный источник питания SpellmanST15N12 (15 кВ, 0,8 А, 12 кВт) с цифровым управлением.
- Источник питания накала клистрона: Обеспечивает питание накала клистрона переменным током 11 А, напряжением 10 В. Реализован на основе однофазного понижающего трансформатора (220 В / 10 В, 50 Гц) с высоковольтной изоляцией (20 кВ) между первичной и вторичной обмотками. Стабилизация напряжения накала обеспечивается стабилизатором, подключенным к первичной обмотке трансформатора.

III. КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Ключевым элементом системы, обеспечивающим ее безопасную и эффективную работу, является волноводный высоковольтный изолятор. Он предназначен для гальванической развязки заземленного корпуса СВЧ системы от корпуса плазменной камеры ИМИ, находящейся под высоким потенциалом

(до +30 кВ). Изолятор представляет собой конструкцию, состоящую из набора керамических изоляторов и отрезков круглого волновода, соединенных методом пайки. С обеих сторон изолятора выполнены переходы с круглого на прямоугольный волновод сечением 16х8 мм.

Монотонное нарастание потенциала вдоль системы электродов волноводного изолятора достигается за счет использования высокоомного делителя, собранного из пластиковых трубок, по которым циркулирует вода. Последовательное соединение электродов по току и по потоку воды обеспечивает требуемое распределение потенциала. Общая длина волноводного изолятора не превышает 1000 мм, а потери мощности в нем составляют не более 10 %.

Волноводное вакуумное гермоокно обеспечивает передачу СВЧ мощности из волноводного тракта, находящегося под атмосферным давлением, в объем плазменной камеры, в которой поддерживается высокий вакуум. Гермоокно имеет стандартные фланцы для присоединения к прямоугольному волноводу сечением 16х8 мм. Потери мощности в гермоокне не превышают 5 %.

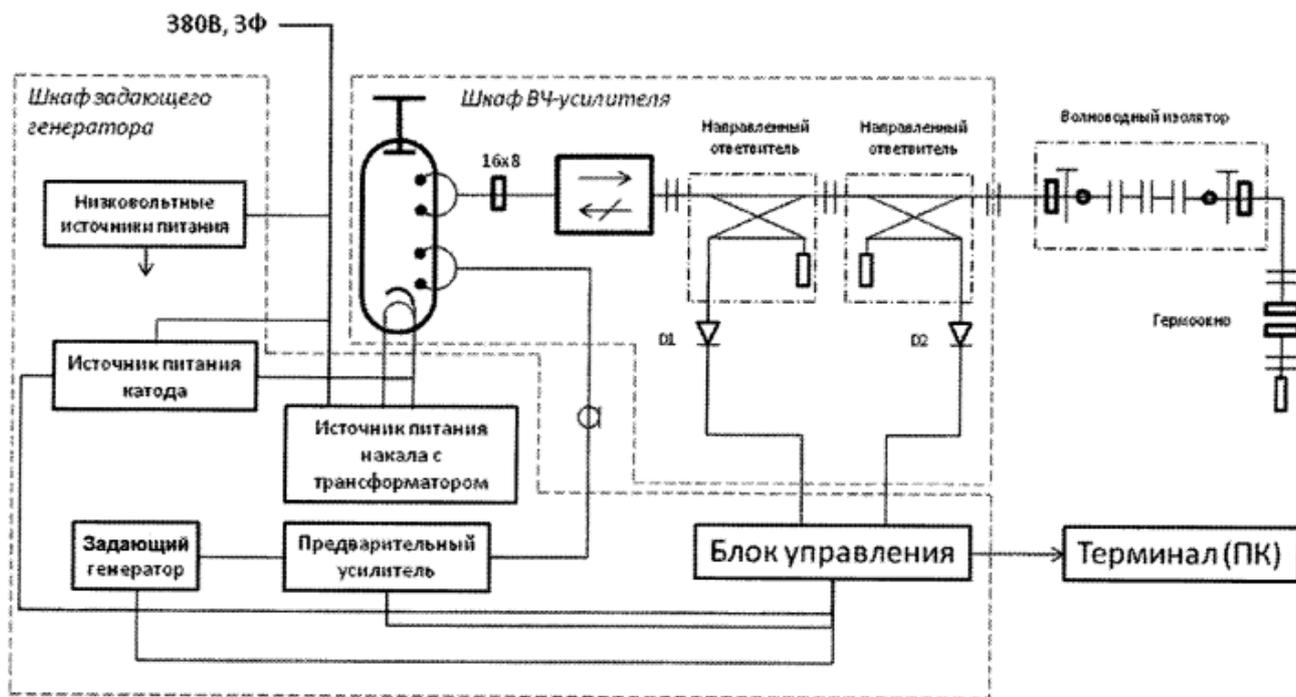


Рис. 1.

Низкодобротный резонатор является критически важным элементом плазменной камеры ИМИ, определяющим эффективность генерации и удержания плазмы. Он представляет собой цилиндрическую камеру, изготовленную из нержавеющей стали (12X18Н10Т) и соединенную с вакуумным участком прямоугольного волновода. Его размеры (длина 230 мм, диаметр 74 мм) подобраны таким образом, чтобы обеспечить оптимальные условия для формирования ЭЦР и эффективного ввода СВЧ мощности в плазму.

Низкая добротность резонатора означает, что энергия СВЧ излучения, введенная в резонатор, быстро поглощается плазмой, а не накапливается в резонаторе.

Это приводит к более широкой полосе резонанса и, следовательно, к меньшей чувствительности к изменениям параметров системы (частоты, мощности, магнитного поля). Высокая добротность, напротив, привела бы к узкой полосе резонанса, что сделало бы систему крайне чувствительной к малейшим отклонениям параметров и усложнило бы поддержание стабильного режима генерации плазмы. Кроме того, низкая добротность способствует более равномерному распределению СВЧ поля в объеме резонатора, что улучшает однородность плазмы.

IV. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

Электромагнитная совместимость является критически важным аспектом при проектировании и эксплуатации систем, генерирующих мощное СВЧ излучение. Она подразумевает способность системы функционировать в заданной электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых электромагнитных помех для другого оборудования и, в свою очередь, не подвергаясь воздействию помех, приводящих к нарушению ее работы. В данном случае, система СВЧ питания должна соответствовать требованиям ЭМС как в части излучаемых, так и кондуктивных помех.

Для обеспечения ЭМС предпринимаются следующие меры:

- Экранирование: Все источники СВЧ излучения (задающий генератор, усилитель, волноводный тракт) размещаются в экранированных шкафах, предотвращающих распространение электромагнитного излучения за пределы системы.
- Фильтрация: В цепях питания используются фильтры, подавляющие высокочастотные помехи, которые могут распространяться по сети электропитания.
- Заземление: Все металлические корпуса и экраны надежно заземлены для предотвращения накопления статического заряда и обеспечения стекания наведенных токов.
- Соответствие стандартам: Разработка и производство системы ведётся в соответствии со стандартами по электромагнитной совместимости.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем докладе представлена детально проработанная система СВЧ питания, предназначенная для генерации плазмы методом электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в источнике многозарядных ионов (ИМИ), работающем на частоте 14 ГГц с регулируемой выходной мощностью до 2 кВт. Разработанная архитектура системы, базирующаяся на принципах модульности и использования высоконадежных компонентов (включая задающий генератор на основе синтезатора частот, клистронный усилитель, прецизионный волноводный тракт и систему цифрового управления), обеспечивает достижение высоких эксплуатационных характеристик.

Ключевыми особенностями системы являются:

- Высокая стабильность параметров: Благодаря применению высокостабильного задающего генератора, системы автоматической регулировки мощности и термостабилизации, обеспечивается нестабильность выходной мощности не более $\pm 0,5$ дБ, что критически важно для стабильной генерации ЭЦР плазмы.

- Широкий диапазон регулировки мощности: Выходная мощность может регулироваться в диапазоне от 1 до 2000 Вт, что позволяет оптимизировать параметры плазмы для различных применений.
- Надежная гальваническая развязка: Использование волноводного высоковольтного изолятора обеспечивает безопасную работу системы при высоком потенциале плазменной камеры (до +30 кВ).
- Комплексное обеспечение ЭМС: Реализован многоуровневый подход к обеспечению электромагнитной совместимости, включающий экранирование, фильтрацию, заземление, развязку, рациональную компоновку и выбор компонентов с низким уровнем излучения, что гарантирует соответствие системы строгим стандартам ЭМС.
- Высокая эксплуатационная надежность и безопасность: Срок службы системы составляет не менее 10 лет, реализованы меры по обеспечению безопасности персонала при работе с высоковольтным оборудованием (блокировки, предупреждающие знаки, заземление).

Проведенные заводские испытания и пусконаладочные работы подтверждают соответствие системы заявленным характеристикам. Данная система СВЧ питания представляет собой завершённое, готовое к эксплуатации решение для создания и поддержания ЭЦР плазмы в источниках многозарядных ионов, и может найти широкое применение в ускорительной технике, материаловедении, производстве изотопов и других областях, где требуются интенсивные пучки высокозарядных ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бордусов С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. Минск : Бестпринт, 2002. 452 с.
- [2] Бордусов С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / под ред. А.П. Достанко. Минск, 2002.
- [3] Диденко А.Н. СВЧ-энергетика / А.Н. Диденко, Б.В. Зверев. Москва, 2000.
- [4] Мадвейко С.И. Схемотехнические особенности источника питания СВЧ-магнетрона непрерывного режима генерации для работы в составе плазменного технологического оборудования / С.И. Мадвейко, С.В. Бордусов // Доклады БГУИР. 2010. № 6 (52). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shemotekhnicheskie-osobennosti-istochnika-pitaniya-svch-magnetrona-nepreryvnogo-rezhima-generatsii-dlya-raboty-v-sostave-plazmennogo> (дата обращения: 13.02.2025).
- [5] Бордусов С.В. Регулирование величины мгновенной выходной мощности магнетрона непрерывного режима генерации (типа М-105, м-112) в составе плазменной технологической установки / С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко // Наука и техника. 2010. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/regulirovanie-velichiny-mgnovnoy-vyhodnoy-moschnosti-magnetrona-nepreryvnogo-rezhima-generatsii-tipa-m-105-m-112-v-sostave-plazmennoy> (дата обращения: 13.02.2025).