

## Система СВЧ-питания источника многозарядных ионов ЭЦР

С.В. Григоренко<sup>1</sup>, С.А. Трифонов<sup>1</sup>, А.Р. Оганесян<sup>2</sup>, А.А. Андреев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»

<sup>2</sup>АО «НИИ «Феррит-Домен»

**Аннотация:** разработка ускорителя тяжелых многозарядных ионов является перспективной задачей, сочетающей в себе передовые научные и инженерно-конструкторские разработки. Одной из важнейших систем, обеспечивающих работу ускорительного комплекса, будет являться система СВЧ-питания для источника на базе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), генерирующего многозарядные ионы. Приводятся требования, предъявляемые к системе питания, и разрабатываемая модель.

**Ключевые слова:** СВЧ-питание, источник многозарядных ионов ЭЦР, инжектор

### 1. Введение

Для отработки и испытаний макета источника многозарядных ионов (МЗИ) типа ЭЦР, который является составной частью ускорительного комплекса на базе циклотрона многозарядных ионов, разрабатывается стенд источника ЭЦР. Стенд источника ЭЦР должен обеспечивать испытание макета источника ЭЦР 14 ГГц в режимах работы, предусмотренных техническими характеристиками работы системы внешней инжекции МЗИ. Источник ЭЦР должен обеспечить получение ионов углерода, кислорода, неона, кремния, аргона, железа, криптона, серебра и ксенона с отношением массового числа к заряду, лежащим в заданном интервале. Предполагается ускорение ионов следующих элементов: Углерод–12(13), Кислород–16 (18), Неон–20, Кремний–28, Аргон–40, Железо–56, Криптон–84, Серебро–107, Ксенон–136.

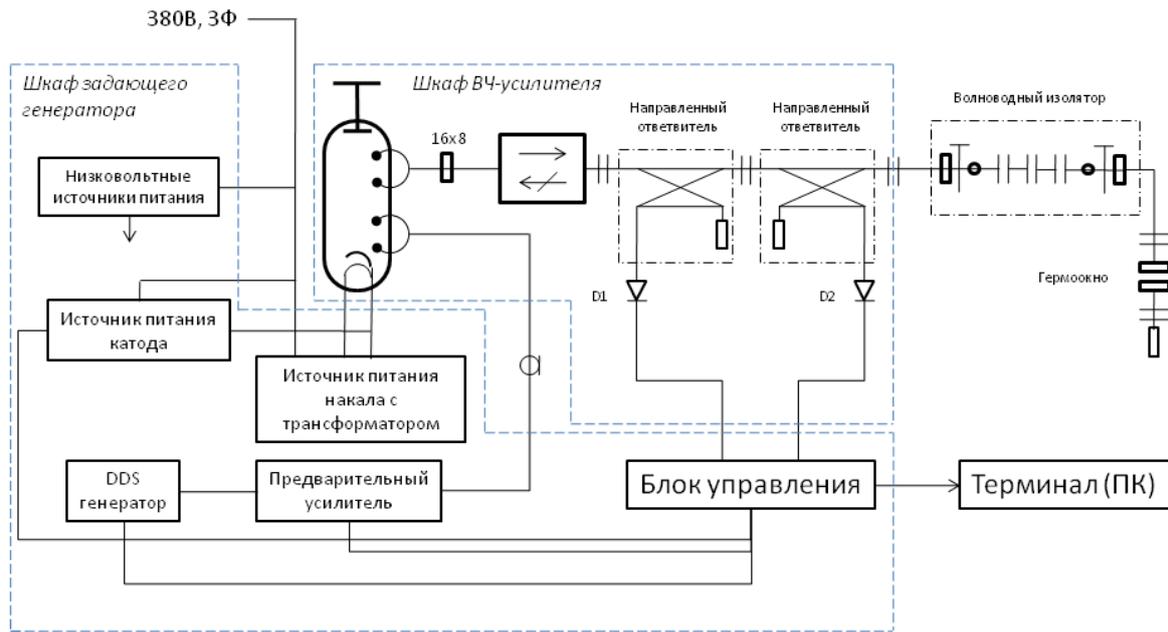
Энергия инжекции для каждого сорта ионов (диапазон 18÷26 кэВ) рассчитывается индивидуально из расчета постоянства орбит, то есть постоянства ларморовского радиуса в инфлекторе неизменной геометрии. Требуемый ток ионов, измеряемый за поворотным анализирующим магнитом системы внешней инжекции – 1,4 ÷ 40 мкА. Источник ионов МЗИ должен работать в непрерывном режиме [1,2].

### 2. Система СВЧ-питания источника ионов ЭЦР

Система СВЧ-питания источника ЭЦР имеет следующие параметры:

- Частота рабочая – 14 ГГц;
- Выходная мощность максимальная – 2 кВт;
- Потребляемая мощность – 10 кВт.

В состав оборудования системы СВЧ-питания источника ЭЦР входят: задающий генератор, твердотельный предварительный усилитель и оконечный усилительный каскад, собранный на клистроне непрерывного действия. Блок-схема системы СВЧ питания источника ионов ЭЦР приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Блок-схема системы СВЧ питания источника ионов ЭЦР.

СВЧ-генератор в своем составе имеет следующие элементы:

- задающий генератор – синтезатор стабильной частоты;
- предварительный усилитель с источником питания;
- источник питания катодного напряжения усилительного клистрона;
- источник питания накала клистрона;
- блок управления;
- шкаф.

В качестве задающего генератора используется синтезатор СВЧ сигналов с цифровым управлением, имеющий следующие характеристики:

Рабочий диапазон частот 13,9 ÷ 14,1 ГГц

Шаг установки частоты 0,1 Гц

Нестабильность частоты ±50 ppm

Предварительный усилитель - широкополосный СВЧ усилитель мощности, работающий в диапазоне частот 13.9 ÷ 14.1 ГГц, имеющий характеристики:

Выходная мощность не более 2 Вт;

Коэффициент усиления 34 дБ;

Цифровое 5-разрядное управление усилением;

Шаг установки выходной мощности 1 дБм

Диапазон аттенюатора от 0 до -28 дБ

Встроенный детектор выходной мощности;

Напряжение питания  $U_1 = +9$  В;

Каскад СВЧ-питания (задающий генератор, твердотельный предварительный усилитель, источники электропитания клистрона и предварительного усилителя, модуль управления и измерения) размещаются в стандартной стойке 24U, расположенной снаружи защитного бункера.

СВЧ усилитель в своем составе имеет следующие элементы:

- Клистрон непрерывного действия;
- Волноводный вентиль;

- Направленные ответвители с датчиками падающей и отраженной мощности;
- Трансформатор
  - Шкаф настенный

В усилительном каскаде используется клистрон непрерывного действия КУ-411, который обеспечивает выходную мощность 2 кВт в диапазоне частот  $14000 \pm 10$  МГц; коэффициент усиления 40 дБ; питающее напряжение 12 кВ; потребляемый ток 0.6 А; на входе и выходе волновод с сечением  $16 \times 8$  мм. Клистрон имеет два контура водяного охлаждения. Защита клистрона от отраженной мощности обеспечивается волноводным вентилем, обеспечивающим ее рассеяние.

Источником питания катодного напряжения клистрона является программируемый блок питания со стабилизированным напряжением до  $-12$  кВ на выходе и максимальным рабочим током до 0.67 А. Конструкция источника питания имеет встроенные блокировки от короткого замыкания и дугового разряда.

Источник питания накала клистрона представляет собой лабораторный источник переменного напряжения с регулировкой в диапазоне 0-220В, подключенный к понижающему развязывающему трансформатору с выходным напряжением 0-10В и переменным током до 10А. Накал находится под высоким потенциалом относительно «земли» ( $-12$  кВ).

Блок управления обеспечивает автоматизацию всей системы и контролирует оптимальный выход на рабочий режим. Производится контроль следующих параметров: расход, давление, температура воды по трём каналам; выходная мощность с предварительного усилителя; выходная и отраженная СВЧ мощность с клистрона; напряжение питания синтезатора, аттенюатора, предусилителя.

В ручном и автоматическом режимах происходит управление приборами: ИП накала, ИП катода, ИП синтезатора, синтезатором частот, аттенюатором, системой индикации и защитной автоматикой.

Вентиль на основе 4-плечного фазового циркулятора имеет рабочий диапазон частот  $13,9 \div 14,1$  ГГц и рассчитан на среднюю мощность не менее 2 кВт с возможностью работы на КЗ (водяное охлаждение). Присоединительные фланцы к волноводу  $16 \times 8$  мм.

Волноводная нагрузка имеет рабочий диапазон частот  $13,9 \div 14,1$  ГГц и рассчитана на среднюю мощность 2 кВт. Входит в состав вентили.

Тракт передачи СВЧ мощности в своем составе имеет следующие элементы:

- коаксиальный волновод;
- прямоугольный волновод;
- волноводный высоковольтный изолятор;
- волноводное вакуумное гермоокно;

Волноводный высоковольтный изолятор представляет из себя устройство, состоящее из волноводных отрезков, между которыми отсутствует омический контакт с целью развязки по постоянному току. При этом потери не превышают 10%.

Направленные ответвители производства падающей и отраженной мощности с детекторными секциями служат для контроля передачи СВЧ мощности в тракте.

Оконечный усилительный каскад, а также циркулятор и согласованная нагрузка для поглощения отраженной мощности (имеющие водяное охлаждение) размещаются вблизи ионного источника.

Разрабатываемая автоматизированная система управления (АСУ) системы СВЧ-питания предполагает её интеграцию в программно-аппаратный комплекс ускорителя. АСУ обеспечивает дистанционное включение, выключение и управление системой, управление в автоматическом и ручном режимах.

Система имеет панель визуальной сигнализации (Охлаждение, СВЧ ВКЛ,

Нормальный режим, Аварийный режим и т.д.), ручную аварийную остановку (аварийная кнопка), защитные блокировки, управление по стандарту BUS TCP или MODBUS RS-485. Так же она позволяет гибко менять параметры системы, производить удаленное управление напряжением катода, накала, входной СВЧ мощностью, частотой синтезатора, удаленно получать данные о давлении, расходе и температуре воды; входной, выходной и отраженной СВЧ мощности; токе накала; токе катода[3,4,5].

#### Список литературы

1. Браун Я. Физика и технология источников ионов - М.: Мир - 1998
2. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки – М.: Энергоатомиздат – 1991
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ – М.; Издательство Высшая Школа: Том I, 1970
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи – М.: Государственное энергетическое издательство – 1961
5. Шаров Г.А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн – М.: Горячая линия-Телеком – 2016