УДК 621.385.69

МИКРОВОЛНОВЫЙ КОМПЛЕКС МЕГАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТОКА В ТОКАМАКЕ Т-15МД

Г. Г. Денисов[1], *В. И. Малыгин*[1], *А. И. Цветков*[1*], *А. Г. Еремеев*[1], *М. Ю. Шмелев*[1], *В. И. Белоусов*[1], *И. С. Бабер*[1], *Н. И. Карпов*[1], *И. И. Леонов*[1], *Е. А. Копелович*[1], *М. М. Троицкий*[1], *М. В. Кузнецов*[1], *И. А. Варыгин*[1], *К. А. Журин*[1], *Б. З. Мовшевич*[1], *А. В. Чирков*[1], *М. Ю. Глявин*[1], *Е. М. Тай*[2], *Е. А. Солуянова*[2], *М. И. Бакулин*[2], *И. Н. Рой*[3], *И. О. Анашкин*[3], *П. П. Хвостенко*[3], *Н. А. Кирнева*[3,4]

[1] Институт прикладной физики РАН;
[2] Научно-производственное предприятие «Гиком», г. Нижний Новгород;
[3] Курчатовский институт;
[4] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

В рамках создания уникального токамака Т-15МД с магнитным полем 2 Тл и аспектным соотношением 2,2 разработан и успешно испытан первый из серии (состоящей из 8 штук) микроволновых комплексов мегаваттного уровня мощности для электронно-циклотронного нагрева плазмы и поддержания тока. Комплекс включает в себя гиротрон, источники питания, линию транспортировки сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, систему управления и систему быстрой (время срабатывания не более 10 мкс) защиты гиротрона от возникновения аварийных ситуаций. Экспериментально продемонстрирован режим генерации с параметрами 1 МВт/30 с/82,6 ГГц при эффективности 57 %.

ВВЕДЕНИЕ

Установки управляемого термоядерного синтеза (УТС), в которых осуществляется удержание высокотемпературной плазмы в магнитных полях с различными конфигурациями станут основой создания термоядерных и гибридных реакторов будущего. К таким установкам относятся токамаки, стеллараторы и открытые ловушки. Наибольшие успехи достигнуты на токамаках: впервые была продемонстрирована возможность достижения условий интенсивного протекания реакций синтеза и генерация нейтронных потоков большой мощности [1, 2]. Обширная база данных, полученная на десятках токамаков, и современные программные коды для численного моделирования процессов позволили международному сообществу разработать проект и начать строительство Международного экспериментального термоядерного токамака-реактора ИТЭР [3], который рассматривается как ключевой шаг от современных научных экспериментальных установок к термоядерным электростанциям будущего.

В большинстве токамаков и стеллараторов, построенных для исследований в области УТС, применяются системы электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы и поддержания тока. В качестве источников мощного микроволнового излучения для этого используются непрерывные (или длинноимпульсные) гиротроны с мегаваттным уровнем мощности [4]. Успешное развитие гиротронов в последние годы сделало ЭЦР нагрев основным методом нагрева плазмы. Его предполагается использовать в качестве одного из методов дополнительного нагрева плазмы в токамаке-реакторе ИТЭР. В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» создаётся инновационный токамак Т-15МД [5, 6]. Основной особенностью данной установки является

* tsvetkov@ipfan.ru

достаточно высокое тороидальное магнитное поле $B_T = 2$ Тл при низком аспектном отношении $A = 2{,}2$. Благодаря такому сочетанию параметров Т-15МД представляет собой уникальную установку: он занимает промежуточное положение между сферическими токамаками ($A < 1{,}9$ при $B_T \leq 1$ Тл у существующих установок, см., например [7]) и традиционными токамаками, работающими при сравнимых с Т-15МД магнитных полях, но более высоком аспектном отношении. Для сравнения, аспектное отношение установки D-IIID составляет $A = 2{,}3$ [8], для KSTAR $A = 3{,}6$ [9], для JET $A = 3$ [2], аспектное отношение установки ИТЭР равняется $A = 3{,}1$ [3]. Предполагаемая программа исследований на Т15-МД [10] будет направлена на решение наиболее актуальных проблем физики токамаков (в том числе и проекта ИТЭР), таких как нагрев и удержание горячей плазмы, механизм формирования и поддержания транспортных барьеров, стационарная генерация неиндукционного тока, управление процессами на первой стенке и в диверторе, подавление глобальных неустойчивостей и периодических выбросов энергии на стенку и др.

Система ЭЦР нагрева плазмы и поддержания тока в токамаке Т-15МД будет состоять из 8 гиротронных комплексов с суммарной мощностью не менее 8 МВт. Предполагается использовать 2 гиротрона с частотой 82,6 ГГц и 6 гиротронов с частотой 105 ГГц. Генерируемая каждым из гиротронов мощность СВЧ излучения должна составлять по крайней мере 1 МВт в импульсе длительностью от 20 до 30 секунд при эффективности генерации не менее 50 % (предполагается использование системы рекуперации остаточной энергии электронного пучка [4]). Выбор частот и мощностей гиротронных комплексов обусловлен характеристиками магнитной системы токамака и расчётными параметрами плазмы. Для транспортировки СВЧ излучения гиротронов в разрядную камеру токамака предполагается использование линий передачи на основе гофрированного волновода с диаметром 63,5 мм. Длина каждой из линий передачи будет составлять от 27 до 42 м. Данная система предназначена для решения следующих задач: предыонизация нейтрального газа на начальной стадии разряда; нагрев плазмы на второй гармонике электронного циклотронного резонанса; создание безындукционного тока за счёт поглощения в плазме электронных циклотронных волн; подавление магнитогидродинамических неустойчивостей в плазме токамака; получение режимов с улучшенным удержанием плазмы за счёт оптимизации профиля тока и давления.

Ниже приводится описание и результаты испытаний основных компонентов первого из 8 микроволновых комплексов на основе мегаваттного гиротрона с частотой 82,6 ГГц, разработанного и изготовленного в ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП «Гиком» (Нижний Новгород).

1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТОКАМАКА Т-15МД

Установка Т-15МД представляет собой токамак с «тёплой», т. е. не сверхпроводящей, электромагнитной системой. Это установка с малым аспектным отношением, $A = 2{,}2$, и D-образным сечением плазмы. Основные параметры токамака приведены в табл. 1 [6].

В верхней и нижней частях вакуумной камеры токамака будет установлено диверторное устройство, что позволит работать с одно- и двухнулевой конфигурацией плазмы. Дивертор токамака Т-15МД должен обеспечивать приём тепловых потоков с удельной мощностью до 10 МВт/м^2.

Установка оснащается современным диагностическим комплексом, который включает в себя системы, необходимые как для измерения и контроля параметров плазмы, так и контроля технологических параметров самой установки. Для измерения электронной температуры плазмы будут использованы диагностики томсоновского рассеяния, электронного циклотронного излучения из плазмы и спектров мягкого рентгеновского излучения. Применение этих диагностик позволит не только оценивать эффективность нагрева электронной компоненты плазмы, но и контролировать появление возможных отклонений функции распределения электронов от максвелловского

Таблица 1. Основные проектные параметры токамака Т-15МД

Параметры	Значение
большой радиус, м	1,48
малый радиус, м	0,67
вытянутость плазмы	1,9
треугольность плазмы	0,4
ток плазмы, МА	2
тороидальное магнитное поле в центре вакуумной камеры, Тл	2
длительность плато разряда, с	до 10
полная мощность дополнительного нагрева, МВт	до 20

вида при взаимодействии плазмы с СВЧ волной [11]. Для контроля профиля тока плазмы будет использована диагностика MSE (Motional Stark Effect Diagnostics) [12]. Это позволит сравнивать распределение тока плазмы и, в частности, величину и распределение неиндукционного тока, создаваемого методами дополнительного нагрева, с теоретически предсказанными значениями. Все диагностики будут обладать хорошим временны́м и пространственным разрешением, достаточным как для детального анализа процессов, так и для управления разрядом в реальном времени.

2. ИСТОЧНИК МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ: ГИРОТРОН 1 МВт/82,6 ГГц/30 с

Основным элементом описываемого микроволнового комплекса является гиротрон, мощность которого в основном ограничивают тепловые нагрузки на стенках резонатора. Поэтому для достижения мегаваттного уровня выходной мощности на расчётной частоте 82,6 ГГц необходимо иметь достаточно большое сечение пространства взаимодействия волны с электронным пучком и, приняв во внимание обостряющуюся с увеличением радиуса резонатора проблему конкуренции мод, использовать рабочую моду высокого порядка, что в свою очередь требует применения магнита с достаточно больши́м диаметром тёплого отверстия.

С учётом указанных факторов, в качестве рабочей была выбрана мода $TE_{13,5}$ цилиндрического волновода. Оптимизация электродинамической системы и расчёт выходной мощности и коэффициента полезного действия (КПД) на этапе проектирования проводились с использованием оригинальных программных кодов, разработанных в ИПФ РАН.

В качестве основного магнита с необходимым для работы гиротрона распределением поля применяется безжидкостный сверхпроводящий криомагнит модели JMTD-4T160 производства компании JASTEC Inc. (Япония) [13] со встроенным охладителем и рабочим магнитным полем около 4,0 Тл в центре тёплого отверстия с диаметром 162 мм.

Структурная схема систем, обеспечивающих работу гиротрона, и его фотография на испытательном стенде представлены на рис. 1.

Для корректировки магнитного поля в области эмиттера электронов установлена дополнительная катодная катушка подмагничивания. Для уменьшения тепловой нагрузки на коллектор применяется сканирующая коллекторная катушка, которая имеет секции, питаемые постоянным и пилообразным токами.

Гиротрон оснащён встроенным квазиоптическим преобразователем, выводящим излучение в горизонтальном направлении через охлаждаемое водой окно с диаметром 80 мм и толщиной 1,53 мм, изготовленное из поликристаллического алмазного диска, выращенного с помощью технологии CVD (Chemical Vapor Deposition). Выходное излучение преобразовывается блоком согласующих зеркал (2 шт.) в рабочую волну с содержанием гибридной моды HE_{11} не менее

95 %. Рассеянное излучение выводится через дополнительное (балластное) окно в балластную нагрузку.

Электронно-оптическая система гиротрона состоит из диодной магнетронно-инжекторной пушки с эмиттером, изготовленным из гексаборида лантана LaB_6, а также коллектора с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка. Катод имеет отрицательный потенциал относительно земли. Для питания подогревателя эмиттера (накала) гиротрона используется стабилизированный источник тока с выходным разделительным трансформатором (изоляция 70 кВ). Коллектор находится под потенциалом земли, а для реализации рекуперации положительный потенциал прикладывается к резонатору (аноду) гиротрона. Рекуперацию энергии электронного пучка обеспечивает автономный источник питания (ИП) анодной цепи гиротрона, позволяющий модулировать выходное напряжение от 5 до 35 кВ с частотой от 0 до 500 Гц внутри импульса с длительностью до 30 с. Модуляция напряжения на источнике питания соответствует модуляции мощности ЭЦР нагрева плазмы с глубиной до 100 % и частотой до 500 Гц. Это расширяет возможности системы для использования в экспериментах по исследованию процессов переноса и контролю магнитогидродинамических неустойчивостей (см, например, [14, 15]). В частности, в работе [16] увеличение эффективности ЭЦР нагрева при модуляции мощности излучения объясняется сильно нелинейной зависимостью скорости ионизации от электронной температуры и более слабой зависимостью от неё скорости рекомбинации. При температурных осцилляциях плазмы, вызванных модуляцией мощности, эффективная температура оказывается выше, чем в стационаре, что приводит к более быстрой «обдирке» сильно излучающих ионов.

Схема высоковольтного питания представлена на рис. 1*а*. Поскольку корпус гиротрона во время работы находится под потенциалом земли, он не требует применения высоковольтной изоляции при монтаже в криомагнит. Гиротрон оснащён рентгеновским экраном (колпаком), обеспечивающим подавление рентгеновского излучения с коллектора.

Для контроля и поддержания давления в гиротроне на необходимом уровне в него встроен электроразрядный насос (ЭРН) с соответствующим источником питания. Параметры насоса и его расположение внутри гиротрона выбраны таким образом, чтобы обеспечить оптимальную скорость откачки при рабочих значениях магнитного поля.

Комплекс оснащён низковольтными источниками питания, необходимыми для работы систем гиротрона: сверхпроводящего магнита, термокатода (накала), катодной катушки подмагничивания и системы размазки электроннго пучка на коллекторе (постоянный и пилообразный токи коллекторной катушки).

Для корректной работы рассматриваемого гиротрона величина индукции внешних рассеянных магнитных полей в области его коллектора не должна превышать 10 Гс для вертикальной составляющей и 2 Гс для горизонтальной составляющей. Для исключения влияния импульсных магнитных полей токамака описываемый микроволновый комплекс (как и остальные комплексы системы ЭЦР нагрева) устанавливается в отдельном зале на достаточно большом расстоянии от магнитов. Именно по этой причине длина волноводной линии передачи составляет более 40 м.

Гиротронный комплекс оборудован распределительными гребёнками системы охлаждения, оснащёнными датчиками давления, протока и температуры, и присоединяющимися к магистралям системы охлаждения дистиллированной водой токамака. Гребёнки обеспечивают подведение и отведение охлаждающей воды как для различных узлов гиротрона (коллектор, резонатор, алмазное вакуумное окно и т. д.), так и для элементов микроволнового комплекса (блок согласующих зеркал, нагрузки, все элементы линии передачи и компрессор криомагнита). Учитывая уровень выходной мощности комплекса, наиболее существенный расход воды необходим для охлаждения узлов гиротрона — более 17 л/с (в том числе 14,5 л/с для охлаждения коллектора), а также для охлаждения поглощающей нагрузки — более 11 л/с.

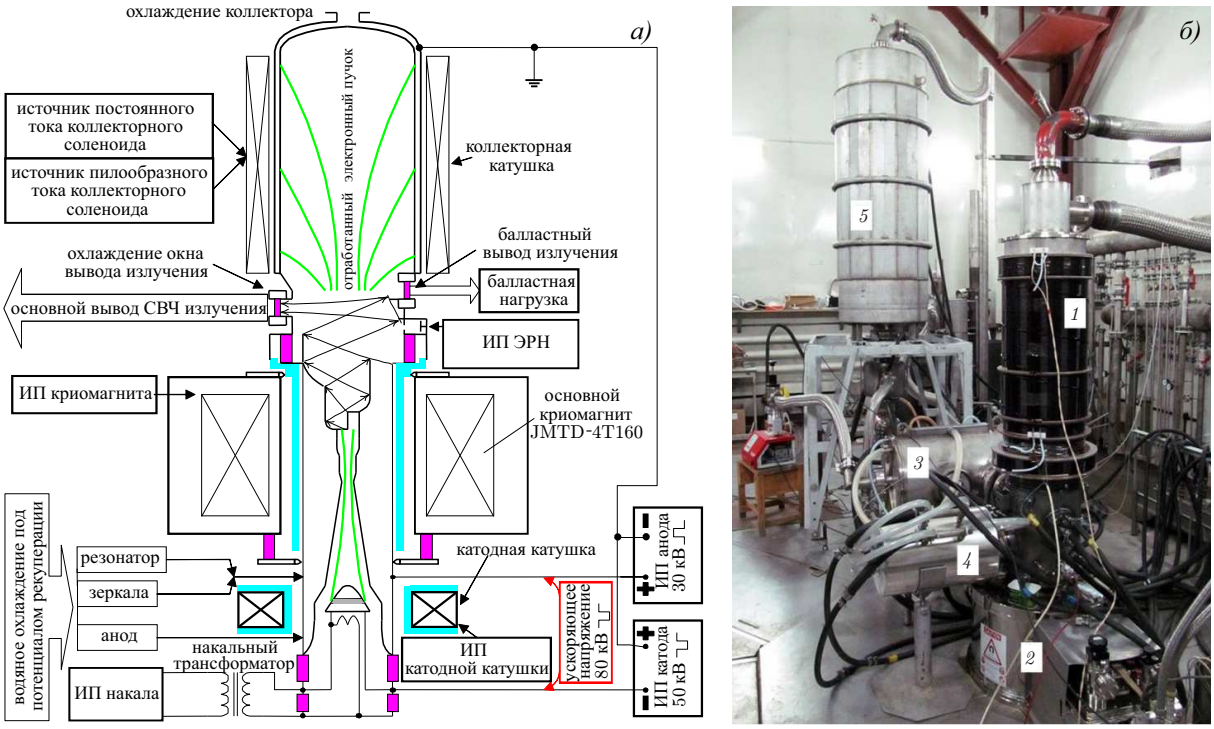


Рис. 1. Панель *а*: структурная схема систем, обеспечивающих работу гиротрона. Панель *б*: фотография гиротрона на испытательном стенде (1 — гиротрон, *2* — криомагнит, *3* — блок согласующих зеркал, *4* — балластная нагрузка, *5* — измерительная нагрузка)

Результаты измерения выходной мощности гиротрона в различных режимах представлены на рис. 2, при эффективности 57 % (большей, чем, например, в гиротронах, разрабатываемых для программы ИТЭР) продемонстрирован режим 1 МВт/82,6 ГГц/30 с.

3. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для транспортировки СВЧ излучения от гиротрона до разрядной камеры установки Т-15МД спроектирована и изготовлена вакуумно-плотная линия передачи на базе сверхразмерного цилиндрического волновода с гофрировкой внутренней поверхности с диаметром 63,5 мм. В качестве рабочей моды тракта используется гибридная волна HE_{11}, обладающая в гофрированном цилиндрическом волноводе наименьшими омическими потерями [17] (примерно 10^{-3} дБ/м на частоте 82,6 ГГц для волноводов, изготовленных из алюминиевого сплава АМГ-6). Схема линии передачи представлена на рис. 3.

Излучение гиротрона в виде собственной моды HE_{11} гофрированного цилиндрического волновода с диаметром 63,5 мм, сформированной блоком согласующих зеркал, поступает на вход линии передачи, включающей в себя следующие элементы: волноводный 90°-уголок, совмещённый с направленным ответвителем, универсальный поляризатор, волноводные 90°-уголки, компенсаторы тепловых расширений, волноводные переключатели мощности, откачные порты, диэлектрическую волноводную развязку, вакуумный затвор и механическую развязку. Кроме того, в тракт включены короткоимпульсная и длинноимпульсная измерительные нагрузки. Короткоимпульсная нагрузка нужна для настройки основных режимов гиротрона. Для этого в большинстве случаев достаточно длительностей СВЧ импульсов до 100 мс. При работе в режиме длинных

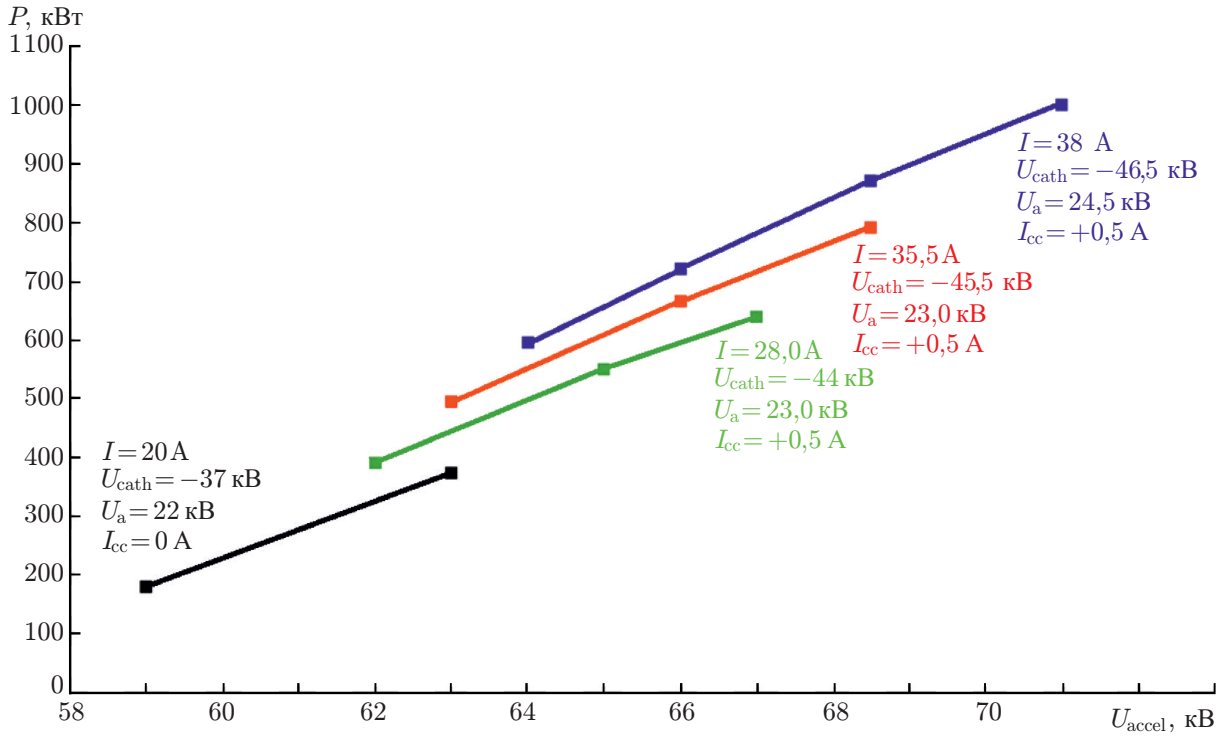


Рис. 2. Результаты испытаний гиротрона в различных режимах. Здесь P — СВЧ мощность на окне гиротрона, U_{accel} — ускоряющее напряжение, I — ток электронного пучка, U_{cath} — потенциал катода относительно земли, U_a — потенциал анода относительно земли, I_{cc} — ток катодной катушки

импульсов для настройки или измерения мощности может быть использована измерительная нагрузка, способная поглощать более 1 МВт СВЧ мощности в непрерывном режиме. Излучение может направляться в эти нагрузки при помощи волноводных переключателей.

Волноводы, изготовленные отрезками по 1 м, соединены между собой и элементами электродинамического тракта фланцами, обеспечивающими соосность их стыковки. Кроме того, фланцы снабжены водяными каналами и выполняют роль охлаждающих элементов линии передачи. Вакуумная плотность тракта в местах соединения элементов обеспечивается подпружиненными алюминиевыми уплотнениями. Для компенсации тепловых расширений прямолинейных участков линии передачи, связанных с нагревом элементов тракта мощным СВЧ излучением гиротрона, длинные (более 1 м) волноводные участки линии передачи снабжены компенсаторами тепловых расширений на основе сильфона, герметично приваренного к медным гофрированным волноводам. Разрыв между волноводами составляет 15 мм и при нагревании или охлаждении соответствующего участка волноводного тракта этот разрыв сокращается или удлиняется. Дифракционные потери в волноводном разрыве можно оценить по формуле [18]

$$\frac{\Delta P}{P} = 0{,}389 \left(\frac{l\pi}{ka^2} \right)^{3/2}, \qquad (1)$$

где l — длина разрыва волноводного тракта, k — волновое число, a — радиус волновода.

Волноводные 90°-уголки предназначены для реализации необходимой траектории волноводной линии передачи в пространстве, соединяющей выходной фланец блока согласующих зеркал гиротрона и фланец входного патрубка токамака Т-15МД. Каждый уголок образован пересекающимися под прямым углом гофрированными волноводами с диаметром 63,5 мм. В центре пересечения осей этих волноводов установлено плоское металлическое зеркало, снабжённое ка-

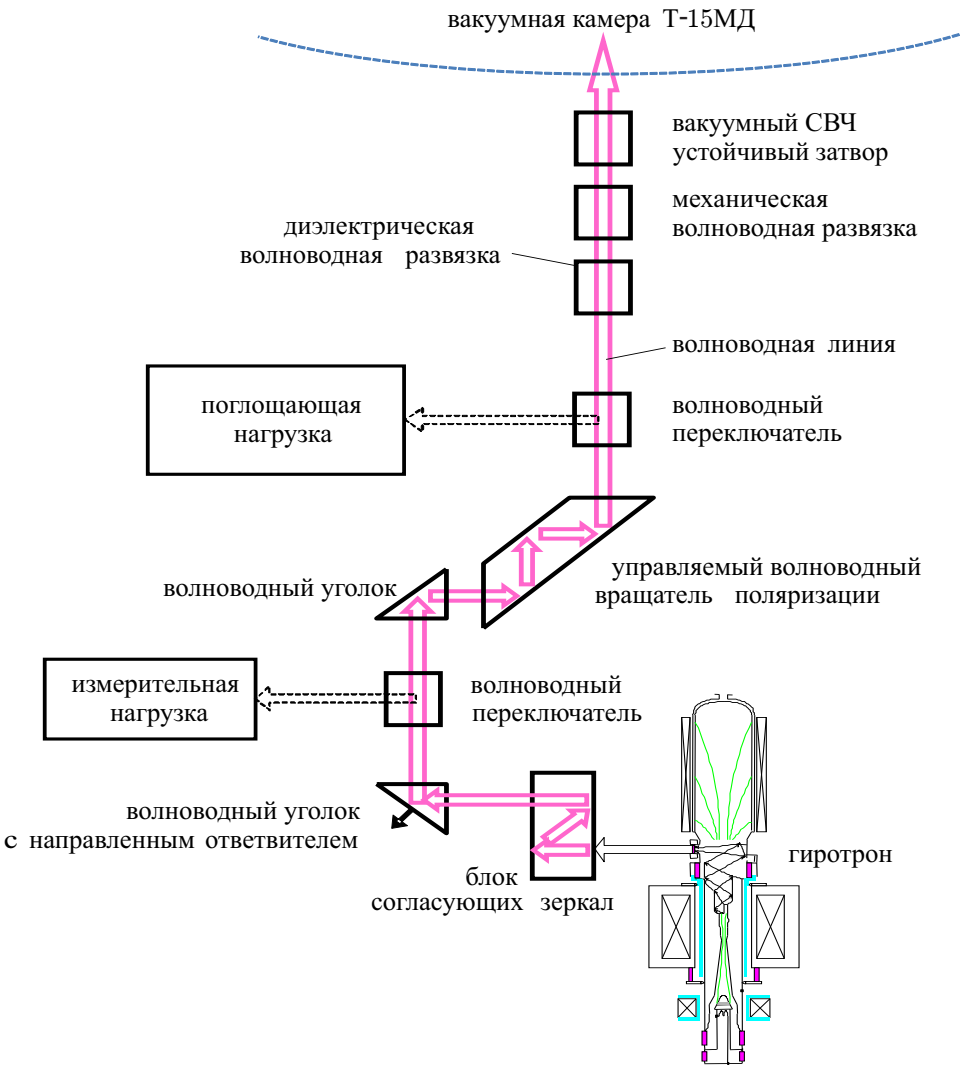


Рис. 3. Блок-схема линии передачи СВЧ излучения

налами водяного охлаждения.

Для волны HE_{11} каждый уголок является эквивалентом разрыва волноводного тракта, причём длина этого разрыва в каждом азимутальном сечении своя: от 31,75 до 63,5 мм. Согласно формуле (1) дифракционные потери будут составлять около 1 % при максимальной длине разрыва. Кроме того, следует учесть омические потери на зеркале, которые в зависимости от поляризации падающего на него излучения будут от 0,15 % до 0,30 % [19].

Кроме обычных 90°-уголков, в тракт включён уголок с направленным ответвителем. Этот уголок с коэффициентом ответвления около −90 дБ предназначен для контроля частоты и мощности гиротрона в течение импульса. Направленным ответвителем здесь является антенна, образованная набором отверстий в зеркале уголка. Главный максимум этой антенны возбуждает приёмный рупор, нагруженный на детектор. Рупор установлен в кожухе, покрытом поглотителем, за зеркалом уголка в центральной части главного максимума антенны. Герметичность тракта обеспечивается барьерным кварцевым окном резонансной толщины.

Волноводные переключатели предназначены для переключения мощности транспортируемого по линии передачи излучения на измерительную или поглощающую нагрузки. Каждый волно-

водный переключатель состоит из корпуса, внутри которого перемещается поршень с двумя волноводными каналами. Принцип его работы основан на замещении прямого волноводного канала линии передачи (отрезка гофрированного волновода) на поворотный уголок с плоским зеркалом. Фотография волноводного переключателя представлена на рис. 4.

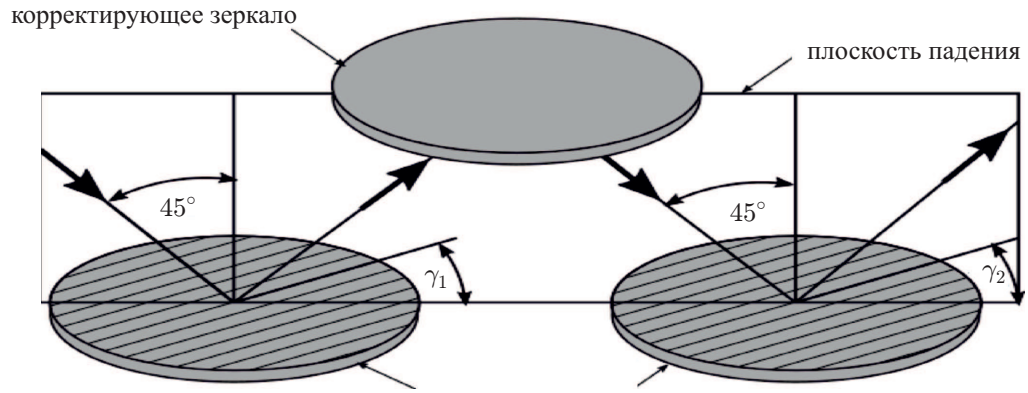
Рис. 4. Фотография волноводного переключателя

Поршни переключателей приводятся в движение линейными шаговыми двигателями и имеют возможность дистанционного управления с помощью контроллеров. В тех случаях, когда СВЧ излучение гиротрона проходит через волноводные переключатели к камере токамака, однородность волноводного тракта не нарушается и потери мощности отсутствуют. Технологические зазоры, необходимые для движения поршня в корпусе переключателя, не превышают 0,1 мм, что в соответствии с формулой (1) не может внести заметных потерь на этом участке тракта. Когда же переключатель работает на нагрузку, интегральные (дифракционные и омические) потери эквивалентны потерям в обычном поворотном уголке и составляют около 1,2 %.

Излучение на выходе гиротрона является линейно поляризованным. Управление параметрами поляризации поступающего в плазму СВЧ излучения осуществляется в тракте с помощью универсального поляризатора [20]. Он состоит из корпуса двух гофрированных и одного корректирующего зеркал. Квазиоптическая схема и фотография поляризатора представлены на рис. 5. Гофрированные зеркала имеют возможность поворота вокруг своих осей и приводятся в движение шаговыми двигателями, закреплёнными на их осях . Управление двигателями осуществляется контроллерами дистанционно через USB или Ethernet интерфейсы. Углы поворота зеркал относительно плоскости падения электромагнитной волны определяют параметры поляризации излучения на выходе из устройства.

Дифракционные потери в универсальном поляризаторе существенным образом зависят от параметров корректирующего зеркала. Поверхность этого зеркала была синтезирована с помощью методики, описанной в [21]. На рис. 7 приведена форма поверхности этого зеркала. Она имеет достаточно сложный (не квадратичный) профиль с глубиной деформации до 4 мм. Дифракционные потери в поляризаторе составили около 0,3 %, омические потери на зеркалах (в соответствии с данными [18]) можно оценить как 0,7 %. Таким образом, общие потери в поляризаторе составляют около 1 %. Поскольку указанные величины потерь являются весьма существенными по абсолютной величине при мегаваттном уровне выходной мощности гиротрона, зеркала поляризатора, как и другие элементы линии передачи, являются водоохлаждаемыми.

Соответствие поляризационных параметров выходного излучения теоретически рассчитанной карте, приведённой на рис. 6, проверялось экспериментально при малом уровне мощности



а)

б)

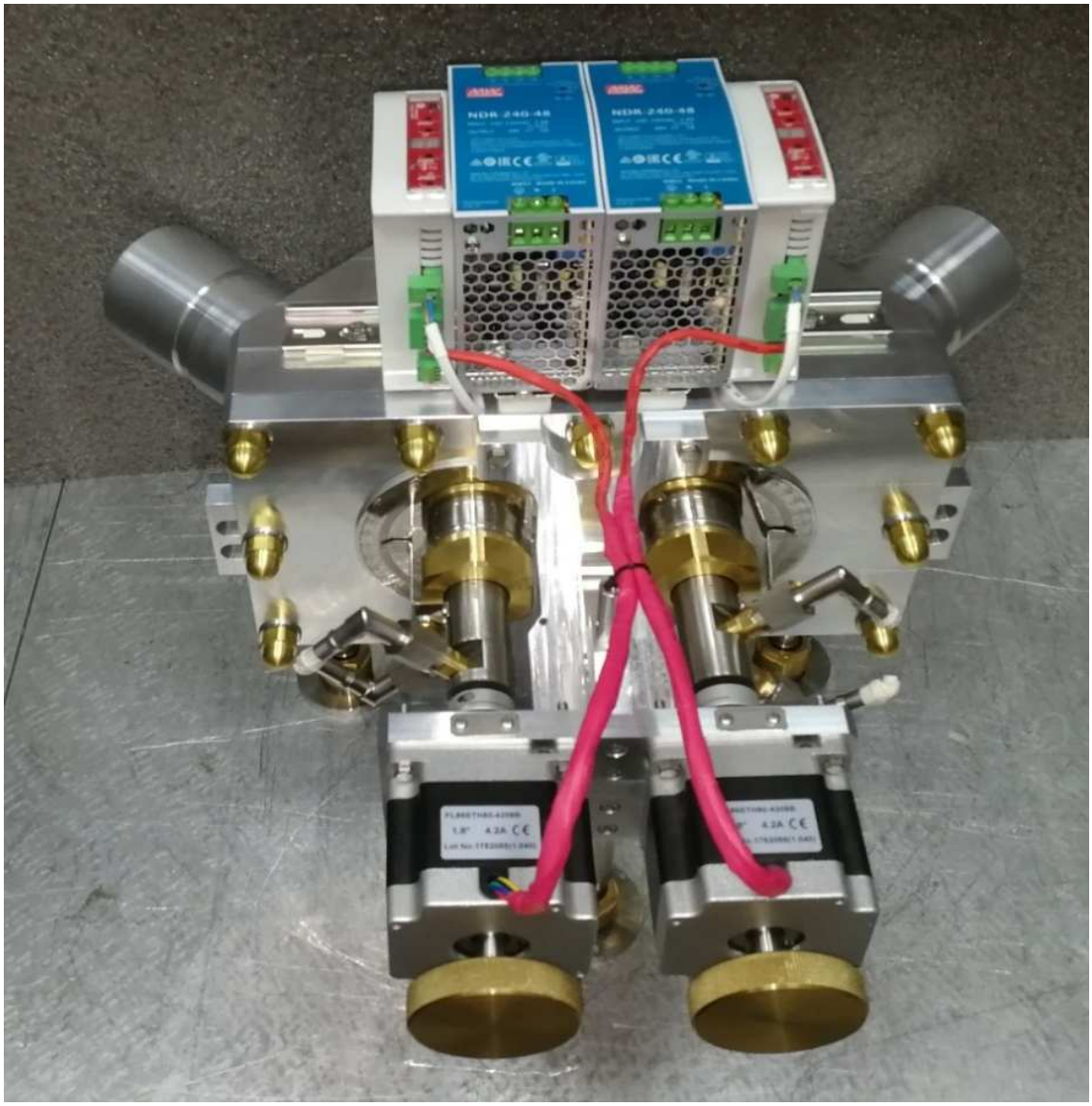


Рис. 5. Схема (*а*) и фото (*б*) универсального поляризатора

СВЧ излучения в нескольких характерных точках. Для этого поляризатор возбуждался специально изготовленным возбудителем моды HE_{11} с линейной поляризацией. Электрическое поле **E** лежало в плоскости падения волны. На выходе устройства устанавливался приёмный волновод с детектором, имеющий возможность углового вращения вокруг собственной оси и отсчётный лимб. В характерных точках карты детектором с квадратичной характеристикой измерялось отношение минимального и максимального сигналов, принятых приёмным волноводом при его азимутальном вращении, что соответствовало квадрату отношения осей поляризационного эллипса. По азимутальному положению волновода, соответствующему максимальному сигналу, можно было судить об угле наклона большой оси эллипса поляризации к плоскости падения волны.

Карта параметров выходного излучения на плоскости углов поворота гофрированных зеркал представлена на рис. 6. Здесь предполагается, что на вход поляризатора поступает линейно поля-

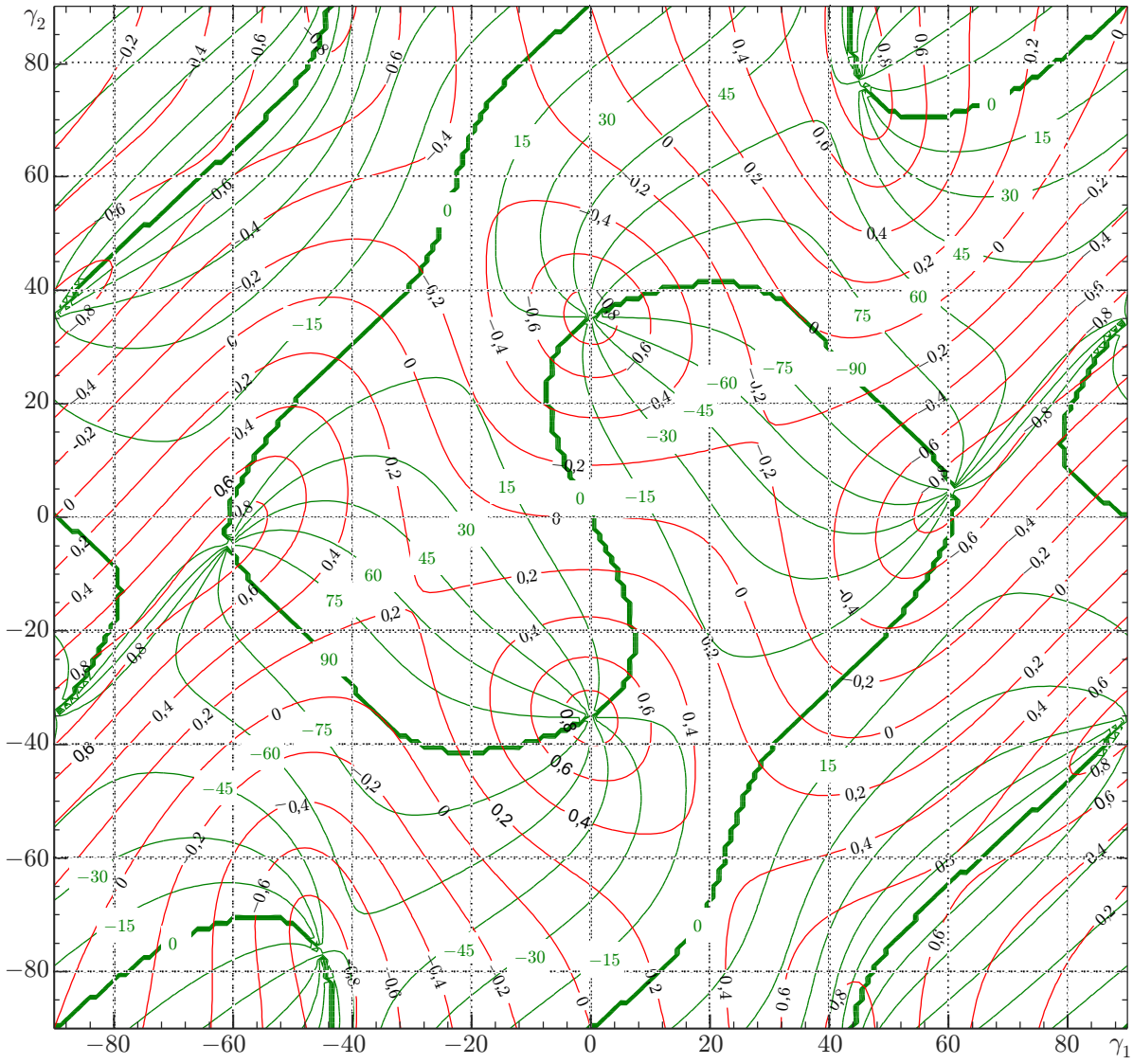


Рис. 6. Карта параметров поляризации выходного излучения поляризатора (на входе линейно поляризованная волна, поле **E** лежит в плоскости падения волны на зеркала устройства). Красным цветом обозначены линии равного уровня отношения осей поляризационного эллипса; зелёным — линии равного уровня угла наклона эллипса поляризации к плоскости падения волны

ризованная волна, у которой поле **E** лежит в плоскости её падения на зеркала устройства. Положительным считается угол поворота против часовой стрелки направления гофрировки зеркала относительно плоскости падения волны (если смотреть на поверхность гофрированного зеркала).

Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Сравнение теоретических и экспериментальных данных позволяет утверждать о соответствии результатов эксперимента расчётным значениям.

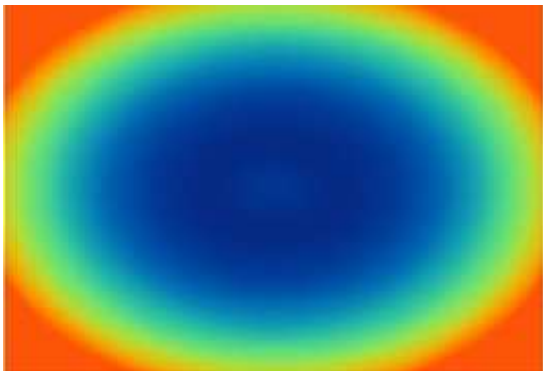


Рис. 7. Форма поверхности корректирующего зеркала поляризатора

Подобно волноводным секциям, тракт присоединяется к входному фланцу разрядной камеры токамака через механическую развязку на основе сильфона, что позволяет компенсировать механические перемещения массивного входного фланца при воздействии на него сильного импульсного магнитного поля и высокотемпературной плазмы, возникающей в разрядной камере.

Для разделения потенциалов разрядной камеры токамака и линии передачи (1 кВ) в тракт

Таблица 2. Сравнение экспериментально измеренных параметров поляризации с теоретическими данными, приведёнными на рис. 6

Угол поворота первого зеркала γ_1	Угол поворота второго зеркала γ_2	Расчётные параметры поляризации на выходе из устройства в соответствии с данными рис. 6	Измеренное отношение осей эллипса поляризации $U_{\min}/U_{\max} = E^2_{\min}/E^2_{\max}$	Экспериментальные параметры поляризации на выходе из устройства
0	0	линейная поляризация, совпадающая с исходной	−45 дБ	близкая к линейной поляризация, совпадающая с исходной
0	35°	круговая поляризация	0,99	поляризация, близкая к круговой
0	−35°	круговая поляризация	0,98	поляризация, близкая к круговой
35°	35°	линейная поляризация, совпадающая с исходной	−40 дБ	близкая к линейной поляризация, совпадающая с исходной
35°	−35°	линейная поляризация, перпендикулярная исходной	−38 дБ	близкая к линейной поляризация, перпендикулярная исходной
−35°	−35°	линейная поляризация, совпадающая с исходной	−41 дБ	близкая к линейной поляризация, совпадающая с исходной
−35°	−35°	линейная поляризация, перпендикулярная исходной	−37 дБ	близкая к линейной поляризация, перпендикулярная исходной

включена диэлектрическая волноводная развязка. Этот элемент линии передачи образован двумя отрезками гофрированного волновода, которые соосно впаяны в керамический изолятор с зазором 6 мм. Разделение вакуумных объёмов токамака и линии передачи осуществляет СВЧ-устойчивый вакуумный затвор с пневмоприводом.

Микроволновый комплекс оснащён подсистемой быстрых защит, предназначенной для защиты гиротрона от следующих аварийных ситуаций: пробои в цепях катода или анода гиротрона; перенапряжение на катоде или аноде; срыв генерации, отслеживаемый по сигналу СВЧ детектора, подключённого к направленному ответвителю; перегрузка датчика тока катода; световой пробой, определяемый по оптическому сигналу блока световой защиты. При возникновении любой из описанных ситуаций подсистема быстрых защит формирует сигнал запрета работы высоковольтных источников питания за время не более 10 мкс.

4. КОМПЛЕКС ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ГИРОТРОНА

Электронно-оптическая система гиротрона состоит из диодной магнетронно-инжекторной пушки с эмиттером, изготовленным из гексаборида лантана LaB_6, а также коллектора с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка. Катод гиротрона имеет отрицательный потенциал относительно земли. Для питания подогревателя эмиттера (накала) гиротрона используется стабилизированный источник питания на базе транзисторно-конденсаторного преобразователя постоянного напряжения повышенной частоты с выходным разделительным трансформатором, который имеет межобмоточную изоляцию, рассчитанную на 70 кВ.

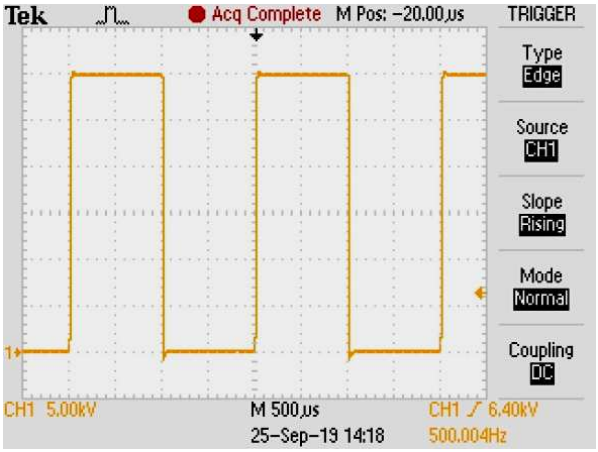


Рис. 8. Осциллограмма импульсов выходного напряжения при их амплитуде 30 кВ и частоте повторения 500 Гц

Коллектор гиротрона заземлён. Для реализации режима рекуперации энергии электронного пучка положительный потенциал, формируемый высоковольтным источником питания ВИЭП35/0,1, приложен к резонатору (аноду) гиротрона. Это позволяет получать на резонаторе (аноде) напряжение в диапазоне от 5 до 35 кВ при токе нагрузки до 100 мА и обеспечивать модуляцию данного напряжения с частотой от 0 до 500 Гц. Формирование такого потенциала на управляющем электроде расширяет возможности системы при проведении экспериментов по исследованию процессов переноса и контролю магнитогидродинамических неустойчивостей плазмы.

Высоковольтный источник постоянного напряжения имеет традиционную структуру и состоит из трёхфазного сетевого выпрямителя, транзисторного преобразователя постоянного напряжения повышенной частоты, выполненного по полумостовой схеме с дозирующими конденсаторами, трансформаторно-выпрямительного модуля с масляной изоляцией и модуля системы управления. Ёмкостной фильтр обеспечивает коэффициент пульсаций выходного напряжения порядка 0,15 % в рабочем диапазоне выходных напряжений от 20 до 35 кВ.

Наиболее сложными как в разработке, так и в изготовлении компонентами являются высоковольтные транзисторные ключи, которые обеспечивают коммутацию напряжения величиной до 35 кВ при амплитуде импульсов тока через них до 70 А. Силовая часть каждого транзисторного ключа состоит из 48 последовательно включенных IGBT-транзисторов IRG4PH50UD

с индивидуальными узлами управления. Импульсы управления транзисторами ключа формируются драйвером и передаются на затвор-эмиттер транзистора через импульсные трансформаторы. Каждый индивидуальный узел управления содержит два импульсных трансформатора — включающий и выключающий, первичные обмотки которых подключены к драйверу. Благодаря использованию импульсных трансформаторов обеспечивается одновременность включения и выключения всех транзисторов транзисторных ключей, а также осуществляется развязка по напряжению между драйвером и силовой частью ключа.

Разработанные ключи характеризуются временем включения порядка 100 нс. В качестве иллюстрации работы источника в режиме модуляции на рис. 8 представлена осциллограмма импульсов выходного напряжения при их амплитуде 30 кВ и частоте повторения 500 Гц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИПФ РАН совместно с ЗАО НПП «Гиком» разработан и создан микроволновый комплекс на основе гиротрона с частотой 82,6 ГГц, обеспечивающего уровень выходной мощности 1 МВт в импульсе с длительностью до 30 с с эффективностью 57 % в режиме с рекуперацией остаточной энергии электронного пучка. В состав комплекса входит волноводно-зеркальная линия передачи с длиной 42 м для транспортировки излучения от гиротрона в разрядную камеру токамака. Общие потери в линии передачи, включающей в себя, кроме волноводов, 4 уголка, поляризатор, откачной порт, 3 компенсатора тепловых расширений, 2 волноводных переключателя, диэлектрическую волноводную развязку и механическую развязку, не превышают 7 %. Описанная система является одним из 8 гиротронных комплексов, предполагаемых к использованию для ЭЦР нагрева плазмы и поддержания тока в уникальном токамаке Т-15МД, сооружающемся в НИЦ «Курчатовский институт».

Формулировка требований к оборудованию системы ЭЦР нагрева плазмы и поддержания тока выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом». Разработка микроволнового комплекса выполнена при поддержке РНФ (проект 19–79–30071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bell M. G., McGuire K. M., Arunasalam V., et al. // Nucl. Fusion. 1995. V. 35, No. 12. P. 1 429–1 436. https://doi.org/10.1088/0029-5515/35/12/I02
2. Jacquinot J. and JET Team // Nucl. Fusion. 1998. V. 38, No. 9. P. 1 263–1 273. https://doi.org/10.1088/0029-5515/38/9/301
3. Aymar R., Barabaschi P., Shimomura Y. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. V. 44, No. 5. P. 519–565. https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/5/304
4. Thumm M. K. A., Denisov G. G., Sakamoto K., Tran M. Q. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59, No. 7. Art. no. 073001. https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005
5. Azizov E. A., Belyakov V. A., Filatov O. G., et al. // 23rd IAEA Fusion Energy Conf. (FEC 2010). Book of Abstr. 11–16 October 2010. Daejeon, South Korea. P. 433.
6. Хвостенко П. П., Анашкин И. О., Бондарчук Э. Н. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез. 2019. Т. 42, № 1. С. 15–38.
7. Gusev V. K., Azizov E. A., Alekseev A. B., et al. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. Art. no. 093013. https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093013

8. Андреев В. Ф., Иванов А. А., Касьянова Н. В. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37, вып. 3. С. 48–55.
9. Park H. K., Choi M. J., Hong S. H., et al. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59, No. 11. Art. no. 112020. https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab20e2
10. Roy I. N., Anashkin I. O., Kirneva N. A., et al. // EPJ Web of Conf. 2017. V. 149. Art. no. 03021. https://doi.org/10.1051/epjconf/201714903021
11. Esipchuk Yu. V. // Plas. Physics Control. Fusion. 1995. V. 37, No. 11A. P. A267–A278. https://doi.org/10.1088/0741-3335/37/11A/018
12. Melnikov A. V., Sushkov A. V., Belov A. M., et al. // Fusion Engineering and Design. 2015. V. 96–97. P. 306–310. https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.06.080
13. https://www.jastec-inc.com/e_products_cryogen/
14. Thumm M. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45, No. 12A. P. A143–A161. https://doi.org/10.1088/0741-3335/45/12A/011
15. Митришкин Ю. В., Коренев П. С., Прохоров А. А. и др. // Проблемы управления. 2018. Вып. 1. С. 2–20.
16. Морозов Д. Х., Пшенов А. А., Минеев А. В. // Физика плазмы. 2010. Т. 36, № 3. С. 483–491.
17. Clarricoats P. J. B., Saha P. K. // Electronic Letters. 1970. V. 6, No. 12. P. 370–372. https://doi.org/10.1049/el:19700260
18. Каценеленбаум Б. З. // Радиотехника и электроника. 1963. Т. 8, № 7. С. 1 111–1 119.
19. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М. : Наука, 1966. 240 с.
20. Belousov V. I., Koposova E. V., Orlova I. M. // Coll. Pap. “Gyrotron”. 1989 / Ed. V. A. Fljagin, Inst. Appl. Phys. USSR. Gorky. P. 155–160.
21. Bogdashov A. A., Chirkov A. V., Denisov G. G., et al. // Int. J. Infrared Millim. Waves. 1995. V. 16, No. 4. P. 735–744. https://doi.org/10.1007/BF02066633

Поступила в редакцию 4 июня 2020 г.; принята в печать 23 июля 2020 г.

MICROWAVE SETUP OF A MEGAWATT POWER LEVEL FOR THE ECR PLASMA HEATING AND CURRENT DRIVE SYSTEM OF THE T-15MD TOKAMAK

G. G. Denisov, V. I. Malygin, A. I. Tsvetkov, A. G. Eremeev, M. Yu. Shmelev, V. I. Belousov, I. S. Baber, N. I. Karpov, I. I. Leonov, E. A. Kopelovich, M. M. Troitskiy, M. V. Kuznetsov, I. A. Varygin, K. A. Zhurin, B. Z. Movshevich, A. V. Chirkov, M. Yu. Glyavin, E. M. Tai, E. A. Soluyanova, M. I. Bakulin, I. N. Roy, I. O. Anashkin, P. P. Khvostenko, and N. A. Kirneva

As part of the creation of a unique T-15MD tokamak with a magnetic field of 2 T and an aspect ratio of 2.2, the first one of a series (8 pieces) of microwave setups of a megawatt power level for electron-cyclotron heating of plasma and current drive was developed and successfully tested. The setup includes a gyrotron, power supplies, a microwave radiation transmission line, and a fast (response time is no more than 10 μs) gyrotron emergency protection system. The generation regime was experimentally demonstrated with the parameters 1 MW/30 s/82.6 GHz for an efficiency of 57%.