

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА TRT

© 2021 г. В. И. Белоусов^{a, *}, Г. Г. Денисов^{a, **}, М. Ю. Шмелев^{a, ***}

^a Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: vbelousov@ipfran.ru

**e-mail: den@ipfran.ru

***e-mail: shm@ipfran.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Представлены основные параметры возможной системы электронно-циклотронного резонансного нагрева (ЭЦРН) плазмы для токамака TRT. По предварительным оценкам для ввода в плазму излучения с расчетной мощностью 10 МВт при длительности 100 с потребуется до 12 мегаваттных гиротронных комплексов, работающих на частоте 230 ГГц. Выполнены предварительные расчеты основных компонентов системы.

Ключевые слова: токамак, электронно-циклотронный резонансный нагрев плазмы, гиротрон, линия передачи, квазиоптический волновой пучок

DOI: 10.31857/S0367292121110147

1. ВВЕДЕНИЕ

Электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) плазмы – один из основных методов дополнительного нагрева в плазменных установках УТС [1–6]. Преимуществами метода перед остальными являются:

- высокая удельная мощность, вводимая через патрубки токамака (до 100 МВт/м²);
- возможность создания барьера (вакуумного окна) между объемом токамака и внешним пространством;
- микроволны поглощаются локально, при выполнении резонансного условия

$$\omega_{RF} = \frac{eB}{\gamma m_0} + k_{\parallel} v_{\parallel},$$

где ω_{RF} – частота излучения, e , m_0 – заряд и масса электрона, B – магнитное поле, γ – релятивистский масс-фактор, k_{\parallel} и v_{\parallel} – проекции волнового вектора и скорости электронов на вектор магнитного поля.

Поглощение может быть реализовано в областях с размерами существенно меньше размеров плазмы (вплоть до нескольких сантиметров). Это свойство дает возможность использовать ЭЦРН-системы для решения таких важнейших задач, как управление профилем тока в плазме и подавление плазменных неустойчивостей. Последняя задача в ряде случаев требует быстрой (до 10 кГц) модуляции мощности излучения гиротронов.

В настоящее время гиротроны способны непрерывно (длительность генерации более 1000–3000 с) генерировать когерентное излучение мощностью до одного мегаватта в диапазоне частот 70–170 ГГц с эффективностью более 50% [6–9]. Большинство крупномасштабных термоядерных установок в мире оснащено многомегаваттными комплексами гиротронов (см., например, [6]). Можно отметить такие установки как ASDEX Upgrade, East, KSTAR, W7-X, DIII-D и многие другие. В строящейся установке ИТЭР планируется гиротронный комплекс мощностью 24 МВт с частотой 170 ГГц, поставку которого должны обеспечить Япония (8 гиротронных систем), Россия (8), ЕС (6), Индия (2). Гиротроны, разработанные в России и Японии, полностью соответствуют спецификации ИТЭР. В рамках российского сотрудничества ИПФ РАН и GYCOM уже изготовлены 4 штатные гиротронные системы, которые приняты международной организацией. По степени готовности комплекс ECRH опережает созданные в ИТЭР комплексы ионно-циклотронного нагрева и нейтральной инжекции. Начаты работы по строительству токамака DTT (моделирование диверторов для ИТЭР), в котором будут использованы 16 гиротронов с частотой 170 ГГц.

ЭЦРН также в настоящее время рассматривается как основное средство нагрева плазмы и генерации тока в перспективных установках с большим магнитным полем (в частности TRT), что

потребуется значительного прогресса в развитии физических принципов гиротрона и технологии их производства для обеспечения необходимого увеличения частоты (до 230–240 ГГц) и желаемого повышения мощности, эффективности и надежности.

В настоящей статье представлены основные черты возможной системы ЭЦРН для рассматриваемого токамака TRT [10].

2. СОСТАВ СИСТЕМЫ ЭЦРН

TRT при магнитном поле 8 Тл требует работы системы ЭЦРН на частоте 230 ГГц. В проекте рассматривается мощность ЭЦРН-системы 10 МВт при длительности до 100 с. Для ввода мощности в плазму планируется использовать один экваториальный порт.

Предлагаемая система состоит из

- 10–12 гиротронов, находящихся на расстоянии порядка 50 м от токамака, с магнитами до 10 Тл;

- высоковольтных (55 кВ/50 А + 35 кВ/0.1 А, для каждого гиротрона) и прочих источников питания;

- системы охлаждения гиротронов, нагрузок, линий передачи и др. до 30 л воды в секунду для каждого гиротронного комплекса;

- линий передачи с барьерными окнами, вакуумными затворами и зеркальной системой ввода излучения в плазму;

- системы управления и защиты, совместимой с центральной системой управления токамаком.

Основным элементом системы СВЧ-нагрева является генерирующий модуль ключевым элементом которого является гиротрон – электровакуумный СВЧ-генератор, представляющий собой разнородность мазера на циклотронном резонансе. Источником СВЧ-излучения является электронный пучок, вращающийся в сильном магнитном поле. Излучение генерируется на частоте равной циклотронной в резонаторе с критической частотой близкой к генерируемой.

Для нагрева плазмы на установке TRT целесообразным является применение гиротрона со следующими параметрами:

- частота генерации фиксированная, 230 ГГц,
- выходная мощность 1 МВт,
- длительность импульса 100 с,
- окно из CVD поликристаллического алмазного диска для основного вывода СВЧ-излучения,
- прибор работает в режиме с рекуперацией энергии электронного пучка,
- электрический КПД 40–50%.

Также генерирующий модуль снабжен:

- блоком согласующих зеркал (МОУ), фильтрующим и подготавливающим гиротронное излучение для распространения по волноводу;

- балластной нагрузкой, поглощающей рассеянное СВЧ-излучение, выходящее из балластного вывода излучения;

- защитным рентгеновским экраном (колпаком), экранирующим тормозное рентгеновское излучение, возникающее при осаждении электронного пучка на коллекторе гиротрона.

Магнитное поле, с необходимым для работы гиротрона распределением, формируется основным “сухим” криогенным магнитом со встроенным криокулером с рабочим магнитным полем 10 Тл. Для корректировки магнитного поля в области эмиттера электронов служит катодная катушка с источником постоянного тока. Для уменьшения тепловой нагрузки на коллектор служит сканирующая коллекторная катушка, имеющая секции питаемые постоянным и пилообразным токами от соответствующих источников.

Ускоряющий потенциал обеспечивается двумя источниками высокого напряжения: катодного 55 кВ (50 А) и анодного 30 кВ (0.1 А). Анодный источник питания обеспечивает рекуперацию энергии электронного пучка.

Для охлаждения термонагруженных элементов гиротрона и волноводно-зеркальной линии передачи СВЧ-излучения используется дистиллированная (деионизированная) вода с удельной электрической проводимостью не более 5 мкСм/см. Необходимый расход воды: гиротрон – 25 л/с, поглощающая нагрузка и элементы линии передачи – 12 л/с.

Структурная схема систем, обеспечивающих работу гиротрона представлена на рис. 1. На рис. 2 показан гиротрон для токамака ITER с системой охлаждения и нагрузкой.

3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ГИРОТРОНА С МОЩНОСТЬЮ 1 МВТ НА ЧАСТОТЕ 230 ГГц

Конструкция такого гиротрона была разработана с учетом размеров и распределения магнитного поля криомагнита JMTD 10T-150 (рис. 3). Магнит обеспечивает магнитное поле до 10 Тл в теплом проходном отверстии 150 мм. Магнит рассчитан совместно ИПФ РАН и фирмой JASTEC Inc., изготовлен и испытан в JASTEC Inc. и поставлен в ИПФ РАН.

Естественно, что размеры пространства взаимодействия и параметры электронного пучка в рассматриваемом гиротроне при мегаваттном уровне мощности должны быть близки к своим аналогам в уже хорошо освоенных гиротронах с частотами 170, 140 и 105 ГГц, у которых радиус ре-

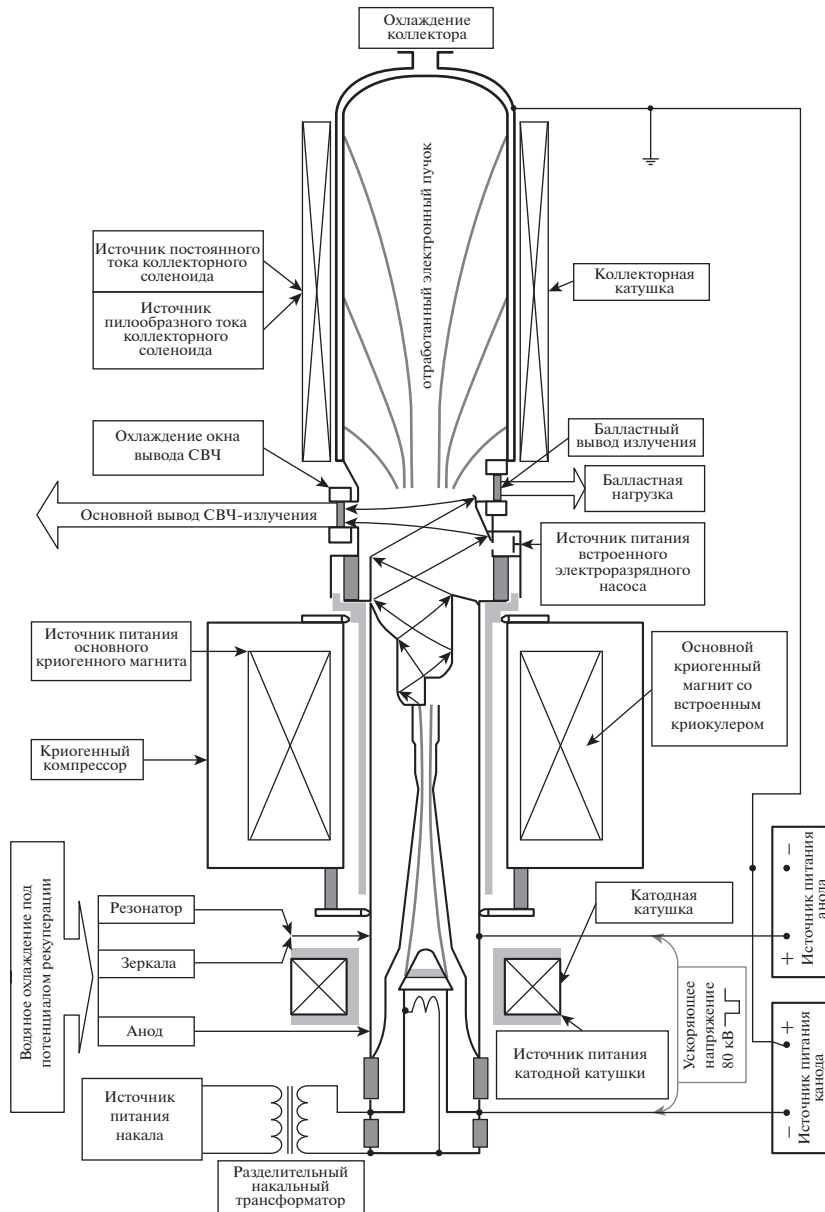


Рис. 1. Структурная схема систем, обеспечивающих работу гиротрона.

зонатора составляет $R_p = 17-18$ мм, а радиус электронного пучка $R_0 = 7.1-7.5$ мм.

У этого магнита по сравнению с традиционно использовавшимся магнитом JMTD7T-160G из-за увеличения магнитного поля от 7 до 10 Тл и соответственно размеров сверхпроводящих катушек возросли также наружные размеры и ширина распределения магнитного поля. Как следствие, увеличились и расстояния от центра магнитного поля до катода и коллектора гиротрона. При этом оказалось возможным сохранить традиционную конфигурацию коллектора упомянутых выше гиротронов, но электронную пушку необходимо было разрабатывать заново. Разумным оказалось

перейти к триодной конфигурации электронной пушки, для чего в область между катодом и резонатором гиротрона ввели дополнительный изолятор. Проведенные расчеты электронной оптики от катода до коллектора и взаимодействия электронного пучка с полем резонатора позволяют рассчитывать на реализацию в гиротроне предлагаемой конструкции заложенной в расчет выходной мощности 1 МВт с КПД выше 50%.

Исходя из имеющегося опыта работы с электронными пучками мегаваттных гиротронов непрерывного режима, напряжение пучка в расчетах полагалось равным $U_b = 72$ кВ, а пич-фактор $g = 1.1-1.15$, при котором пучок с разбросом попе-



Рис. 2. Гиротрон для ИТЭР с системой охлаждения (справа) и основной нагрузкой (слева).

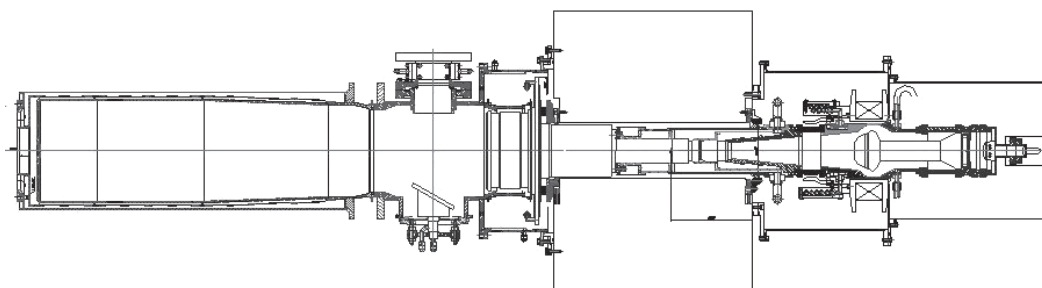


Рис. 3. Общий вид гиротрона и его размещение в теплом отверстии диаметром 150 мм.

речных скоростей электронов $\Delta V_{\perp} = 30\%$ сохранил бы устойчивость.

Расчет в одномодовом приближении (электронный пучок взаимодействует с одной модой резонатора, приближение необходимо для оптимизации параметров резонатора) дал весьма оптимистические результаты.

Результаты расчета зависимости выходной мощности P_{out} и КПД гиротрона от тока электронного пучка I_b в резонаторе с рабочей модой $TE_{33,13}$ на частоте 230 ГГц при $g = 1.15$ приведены в табл. 1 и показаны на рис. 4. Также в табл. 1 приведены значения рабочего магнитного поля B_0 и максимальная плотность мощности тепловых нагрузок на стенки резонатора P_{ohm} .

Выходная мощность в резонаторе на моде $TE_{33,13}$, достигает 1.175 МВт с КПД = 36% при токе пучка $I_b = 45$ А. Магнитное поле для этого режима составляет $B_0 = 90.27$ кГс. Остаточная энергия электронов в соответствии с расчетом превышает

30 кВ, что позволяет использовать глубокую рекуперацию энергии на коллекторе для поднятия значения КПД выше 50%.

Расчет электронно-волнового взаимодействия при учете конкуренции многих мод в выбранном резонаторе большого диаметра показал, что негативное влияние конкуренции на эффективность

Таблица 1

I_b , А	B_0 , кГс	КПД, %	P_{out} , кВт	P_{ohm} , кВт/см ²
20	91.11	25.4	365	1.05
25	90.87	29	522	1.45
30	90.66	31.8	686	1.9
25	90.56	33.9	856	2.29
40	90.4	35.5	1024	2.59
42	90.405	35.95	1087	2.8
45	90.32	37.2	1200	3.05

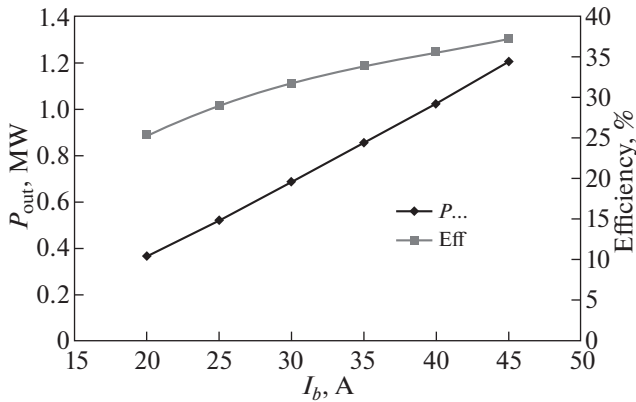


Рис. 4. Зависимость выходной мощности и КПД гиротрона от тока пучка на моде $TE_{33,13}$.

и стабильность генерации может быть полностью скомпенсировано введением в резонатор внешнего сигнала с мощностью в несколько десятков кВт [11–13]. Для этого конструкция квазиоптического преобразователя должна обеспечивать ввод этого сигнала в резонатор и вывод мегаваттного излучения из прибора.

4. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ

Для транспортировки СВЧ-излучения от гиротрона до разрядной камеры токамака предполагается использовать вакуумно-плотную линию передачи (рис. 5) на базе сверхразмерного цилиндрического волновода с гофрировкой внутренней поверхности [14–16]. Излучение гиротрона формируется блоком согласующих зеркал и поступает на вход волноводной линии передачи в виде волны близкой по своей структуре к собственной волне HE_{11} этого волновода. Волноводные отрезки различной длины соединяют между собой все необходимые элементы линии передачи: волноводный 90° уголок, совмещенный с направленным ответвителем, обычные волноводные 90° уголки, волноводный переключатель мощности, универсальный поляризатор, компенсаторы тепловых расширений, откачные порты, диэлектрическую волноводную развязку, вакуумный затвор, вакуумное барьерное окно, квазиоптическую систему ввода СВЧ-излучения в плазменную камеру токамака.

Гибридная волна HE_{11} в гофрированном волноводе обладает наименьшими омическими потерями и по этой причине достаточно часто выбирается в качестве рабочей моды в электродинамических трактах мегаваттного уровня мощности [15, 17, 18].

Для периодической гофрировки в виде прямоугольных ступенек с длиной выступов (или впадин) равным половине периода эти потери при

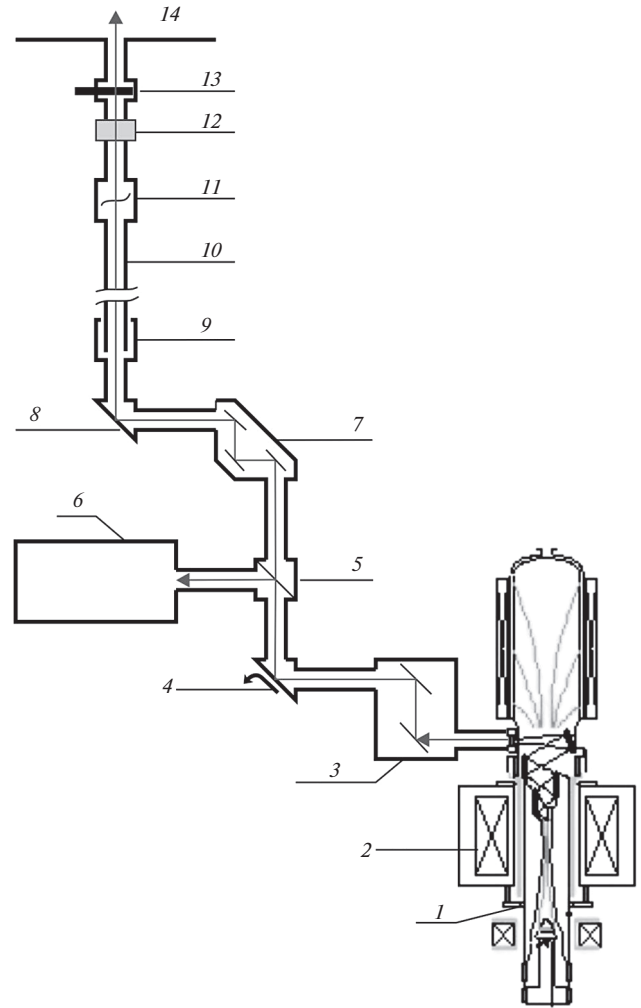


Рис. 5. Основные элементы линии передачи СВЧ-излучения и гиротрон: 1 — гиротрон, 2 — сверхпроводящий магнит, 3 — блок согласующих зеркал, 4 — волноводный уголок с направленным ответвителем, 5 — волноводный переключатель, 6 — калориметрическая нагрузка, 7 — управляемый волноводный вращатель, 8 — волноводный уголок, 9 — компенсатор тепловых расширений, 10 — волноводная линия, 11 — механическая и диэлектрическая развязки, 12 — барьерное CVD-окно, 13 — вакуумный затвор, 14 — вакуумная камера TRT.

оптимальной глубине гофрировки ($\sim \lambda/4$) могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [19–21].

В частности, если выбрать диаметр волновода равный 50 мм, глубину гофрировки $\sim \lambda/4$, период гофрировки $\sim 0.3\lambda$, то для гофрировки в виде прямоугольных ступенек с длиной выступов (или впадин) равным половине периода эти потери для волновода, изготовленного из алюминиевого сплава типа Ад31 (проводимость $\sigma = 2.61 \times 10^{17} \text{ с}^{-1}$), на частоте 230 ГГц будут составлять 1.1×10^{-4} дБ/м. При типичной длине линии передачи между ги-

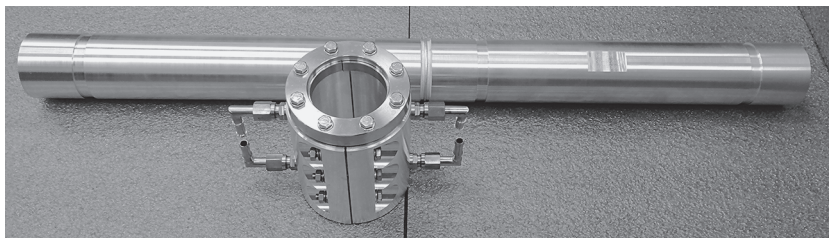


Рис. 6. Волноводная секция длиной 1 м и фланцевое соединение.

ротроном и камерой токамака ~ 50 м омические потери волны HE_{11} не будут превышать $\sim 0.055\%$. Как показывают прямые расчеты с помощью CST Studio [22], для гофрировки синусоидального профиля омические потери примерно вдвое больше и для волновода длиной 50 м с периодом гофрировки 0.43 мм и глубиной 0.32 мм составят величину $\sim 0.1\%$.

Как правило, общая длина волноводного тракта в несколько десятков метров набирается из волноводных отрезков длиной ~ 1 м. При этом, фланцевые соединения должны обеспечивать приемлемые допуски на осевые и угловые смещения элементов электродинамического тракта при их стыковке. Дифракционные потери, неизбежно возникающие в местах волноводных соединений, в основном будут определяться величиной угловых отклонений осей волноводов в местах их соединений [15, 22, 23].

На рис. 6 в качестве примера приведена фотография отрезка гофрированного волновода длиной 1 м и соединительного фланца, обеспечивающего необходимую точность соединений волноводов, изготовленных для электродинамического тракта системы ЭЦРН плазмы установки Т-15МД. Точность обработки волноводов и фланцевых соединений ± 0.02 мм обеспечивала дифракционные потери $\sim 0.03\%$ в каждом из волноводных соединений.

Если применить аналогичную конструкцию соединительных фланцев для волноводных трактов системы ЭЦРН плазмы токамака TRT, то для волноводной линии передачи, состоящей из 50–60 соединений, ожидаются дифракционные потери ~ 1.5 – 2% .

Волноводные 90° уголки предназначены для создания необходимой траектории волноводной линии передачи в пространстве, соединяющей выходной фланец блока согласующих зеркал гиротрона и фланец входного патрубка токамака TRT. Каждый уголок образован пересекающимися под прямым углом гофрированными волноводами. В центре пересечения осей этих волноводов установлено плоское металлическое зеркало, снабженное каналами водяного охлаждения.

Для волны HE_{11} каждый уголок эквивалентен разрыву волноводного тракта, длина которого равна двойному расстоянию между апертурой гофрированного волновода и центром поворотного зеркала. Дифракционные потери в таком разрыве определяются его длиной [24]. Наименьшими дифракционными потерями будет обладать уголок с длиной разрыва, равной диаметру волновода.

Если же в уголке сделать гофрировку по всей его внутренней поверхности, то можно уменьшить дифракционные потери еще примерно вдвое [15, 19].

Для уголка волноводного тракта диаметром 50 мм на частоте 230 ГГц, дифракционные потери волны HE_{11} будут составлять $\sim 0.2\%$.

Кроме того, следует учесть омические потери на поворотном зеркале уголка [25].

Для 90° уголка с медным зеркалом ($\sigma = 5.35 \times 10^{17} \text{ с}^{-1}$) омические потери на частоте 230 ГГц будут составлять $\sim 0.1\%$ для волны, линейно поляризованной в плоскости, перпендикулярной плоскости излома, и $\sim 0.2\%$ для волны, линейно поляризованной в плоскости излома.

В качестве примера на рис. 7 приведены схема и фотография 90° уголка, изготовленного для системы ЭЦРН плазмы установки Т-15МД.

Кроме обычных 90° уголков в тракт обычно включается уголок с направленным ответвителем (рис. 8). Этот уголок с коэффициентом ответвления ~ -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 приемный рупор, нагруженный на детектор. Рупор установлен в кожухе, покрытом поглотителем, за зеркалом уголка. Герметичность этого элемента тракта, обеспечивается барьерным кварцевым окном резонансной толщины.

Суммарные потери мощности при прохождении волны HE_{11} через это устройство совпадают с потерями обычного 90° уголка и составляют $\sim 0.3\%$, если электрическое поле E падающей волны перпендикулярно плоскости уголка, и $\sim 0.4\%$,

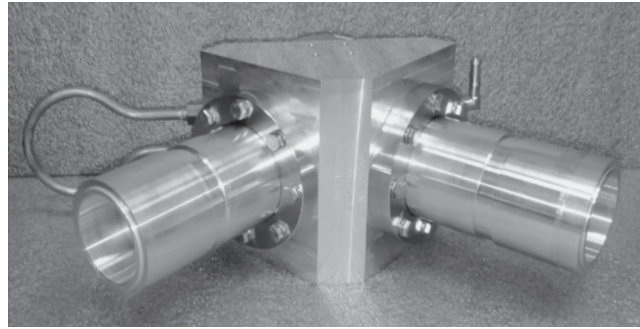
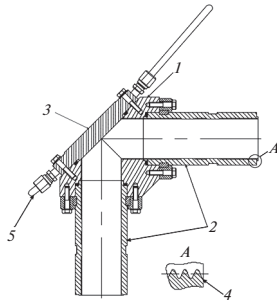


Рис. 7. Волноводный 90° уголок: 1 – корпус уголка, 2 – гофрированные волноводы, 3 – металлическое зеркало, 4 – форма гофрировки внутренней поверхности волноводов, 5 – штуцер водяного охлаждения.

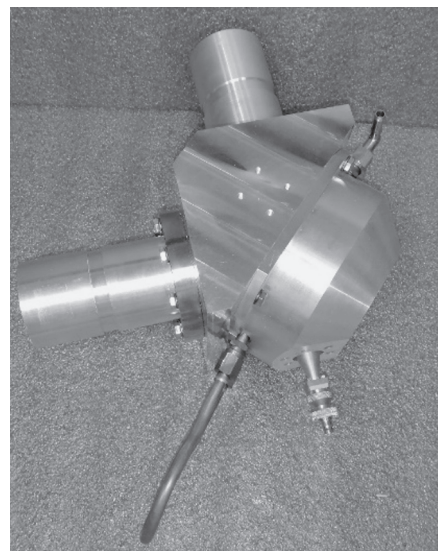
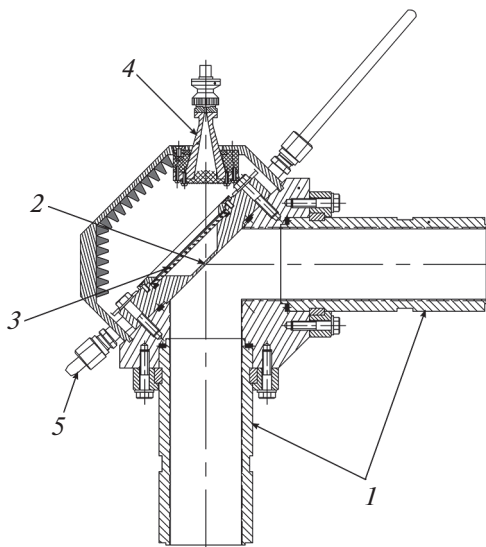


Рис. 8. Волноводный 90° уголок с направленным ответвителем для системы ЭЦРН Т-15МД: 1 – гофрированные волноводы, 2 – отверстия связи, 3 – барьерное окно, 4 – приемный рупор с детекторной камерой, 5 – штуцер водяного охлаждения.

если электрическое поле \mathbf{E} падающей волны лежит в плоскости уголка.

Волноводный переключатель (на рис. 5) необходим для переключения мощности СВЧ-излучения, проходящего по волноводному тракту, между камерой токамака и нагрузкой. Режим работы гиротрона на нагрузку необходим для измерения мощности гиротрона и настройки его параметров. Принцип работы переключателя – замещение прямого волноводного канала линии передачи (отрезка гофрированного волновода) на поворотный уголок с плоским зеркалом.

Переключатель практически не имеет потерь, если поршень (рис. 9) стоит в положении 2. В положение поршня 1 общие потери в переключателе совпадают с потерями 90° уголка – от 0.3% до

0.4% в зависимости от поляризации, пришедшей на зеркало переключателя волны.

Для управления параметрами поляризации поступающего в плазму СВЧ-излучения в тракт включен квазиоптический универсальный поляризатор [26]. Квазиоптическая схема устройства представлена на рис. 10. Зеркала поляризатора образуют 90° квазиоптический уголок. Гофрированные зеркала имеют возможность углового поворота каждого из них вокруг своей оси. Углы поворота зеркал γ_1, γ_2 относительно плоскости падения электромагнитной волны определяют параметры поляризации выходного излучения.

Дифракционные потери в универсальном поляризаторе, существенным образом зависят от параметров корректирующего зеркала, которое как правило имеет не квадратичную форму и рас-

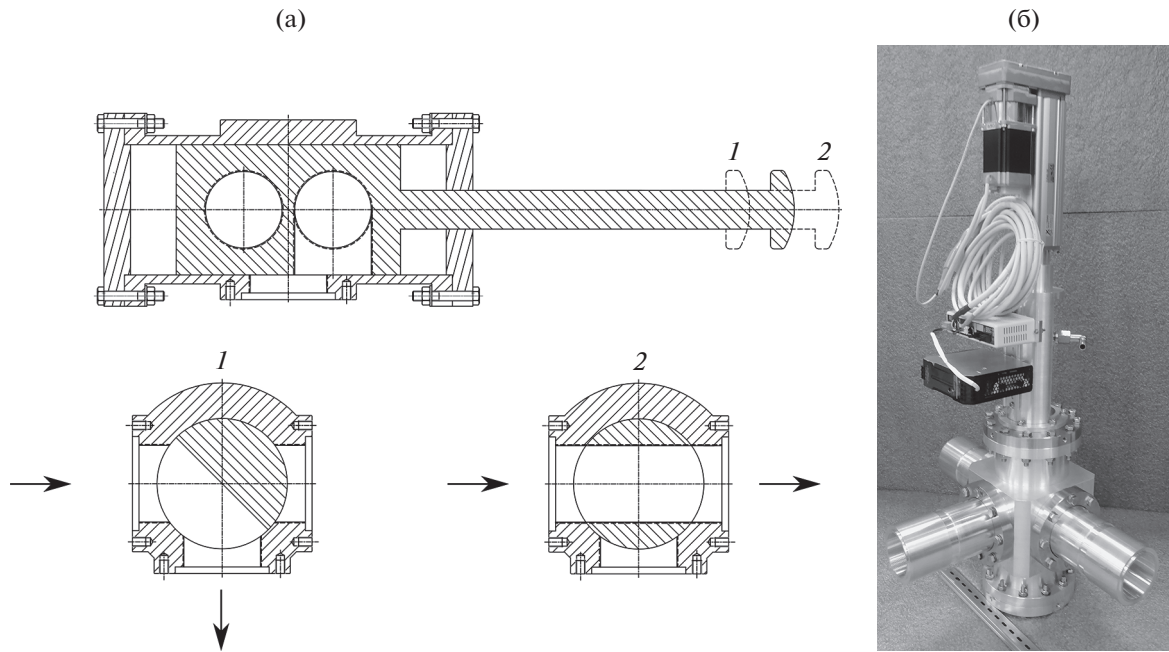


Рис. 9. Волноводный переключатель мощности: схема переключателя (а), фотография переключателя, изготовленного для системы ЭЦРН-плазмы установки Т-15МД (б). Положение поршня переключателя: 1 – при направлении излучения от гиротрона к нагрузке, 2 – от гиротрона к токамаку.

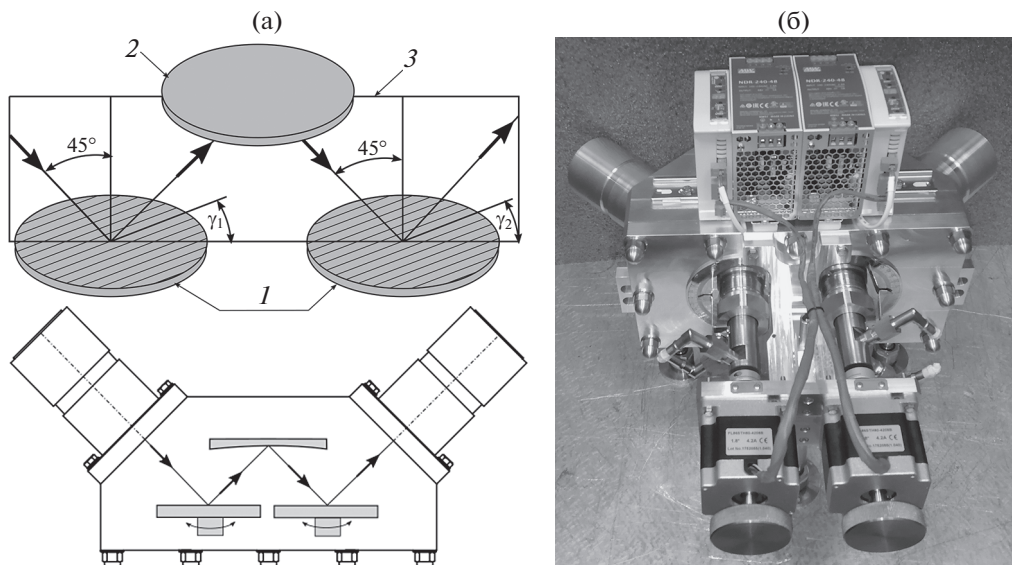


Рис. 10. Квазиоптический универсальный поляризатор: квазиоптическая схема переключателя (а), фотография переключателя, изготовленного для системы ЭЦРН-плазмы установки Т-15МД (б): 1 – гофрированные зеркала, 2 – корректирующее зеркало, 3 – плоскость падения.

считывается специально разработанными для этого программами синтеза фазовых корректоров [27, 28]. Как правило, расчетные дифракционные потери в таком устройстве не превышают 0.5%.

Омические потери [25] в зеркалах устройства в зависимости от поляризации, падающей на них

волны, на частоте 230 ГГц могут составлять от 0.5 до 1%.

Кроме того, в волноводный тракт системы ЭЦРН плазмы должны быть включены: компенсаторы тепловых расширений (для сохранения исходной длины волноводного тракта при его на-

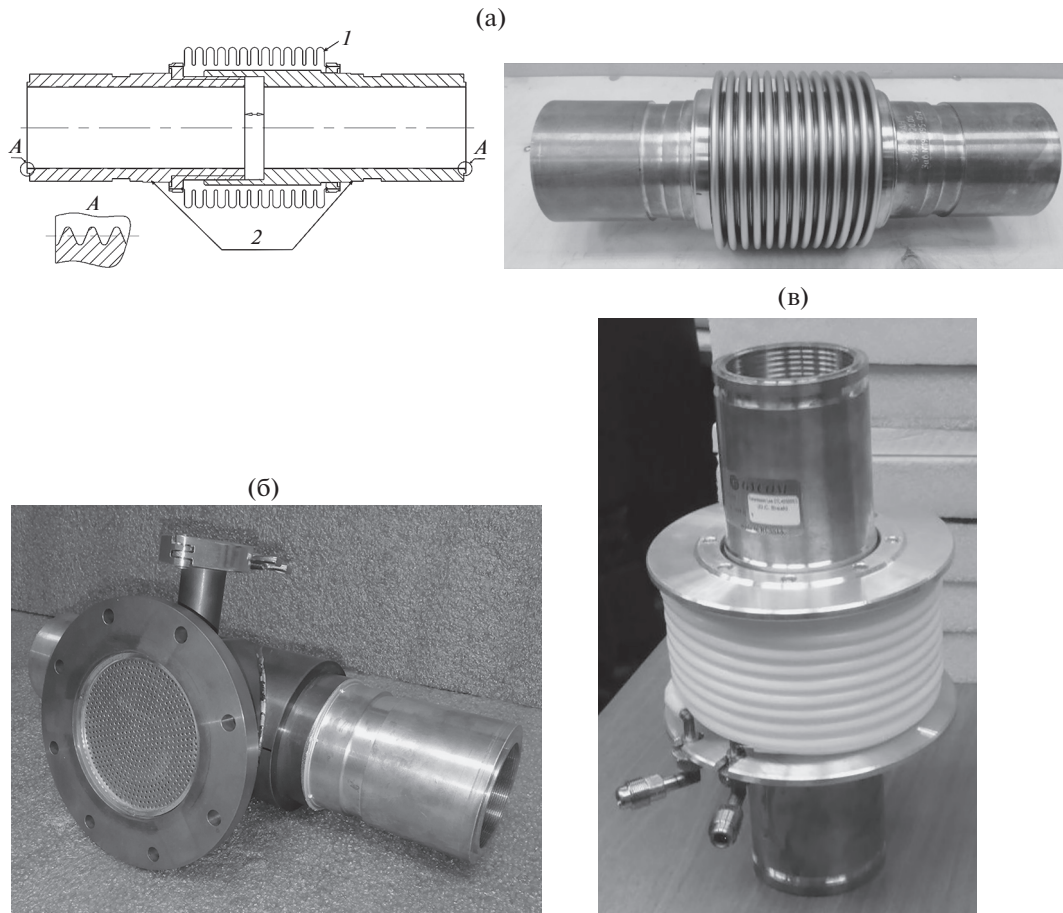


Рис. 11. Элементы линии передачи системы ЭЦРН плазмы установки Т-15МД: компенсатор тепловых расширений (1 – сиффон, 2 – гофрированные волноводы) (а), откачной порт (б), диэлектрическая развязка (в).

греве или охлаждении), откачные порты (для создания в волноводном тракте необходимого давления $\sim 10^{-3}$ мбар), диэлектрическая волноводная развязка (для разделения потенциалов между линией передачи и токамаком $\sim 1\text{--}5$ кВ).

Во всех этих элементах (рис. 11) присутствует разрыв волноводного тракта ~ 10 мм, который в волноводном тракте диаметром 50 мм на частоте 230 ГГц будет вносить дифракционные потери $\sim 0.01\%$.

Для разделения вакуумных объемов токамака ТРТ и волноводной линии передачи (рис. 5) в тракт включены вакуумное барьерное окно и вакуумный затвор с пневматическим приводом.

Барьерное окно, изготовленное из искусственно выращенного в газовой среде алмаза, герметично впаяно в металлическую обечайку. Для резонансного прохождения через такое окно СВЧ-излучения окно должно иметь толщину кратную половине длине волны в диэлектрике. В частности, на частоте 230 ГГц алмазное окно толщиной 1.64 мм (6 полуволн) будет обеспечивать как резонансное прохождение через него квази-

оптического волнового пучка, так и необходимую прочность, позволяющую выдерживать силы атмосферного давления.

Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg } \delta = 10^{-5}$, определяет уровень мощности, поглощаемой диэлектриком, и соответственно требования к системе охлаждения алмазного окна. На частоте 230 ГГц для алмазного диска толщиной 1.64 мм эти потери будут составлять 3×10^{-4} . Или при мощности волнового пучка ~ 1 МВт около 300 Вт.

На рис. 12 приведены фотографии алмазного барьерного окна и вакуумного затвора для системы ЭЦРН плазмы установки Т-15МД.

Таким образом, общие потери мощности волны HE_{11} (омические и дифракционные) при передаче СВЧ-излучения от гиротрона до плазменной камеры токамака по волноводному тракту диаметром 50 мм и длиной ~ 50 м, могут составлять на частоте 230 ГГц $\sim 5\text{--}6\%$ (при оценке потерь принималось, что, как правило, в каждой линии передачи используется 5–7 волноводных 90° уголков).

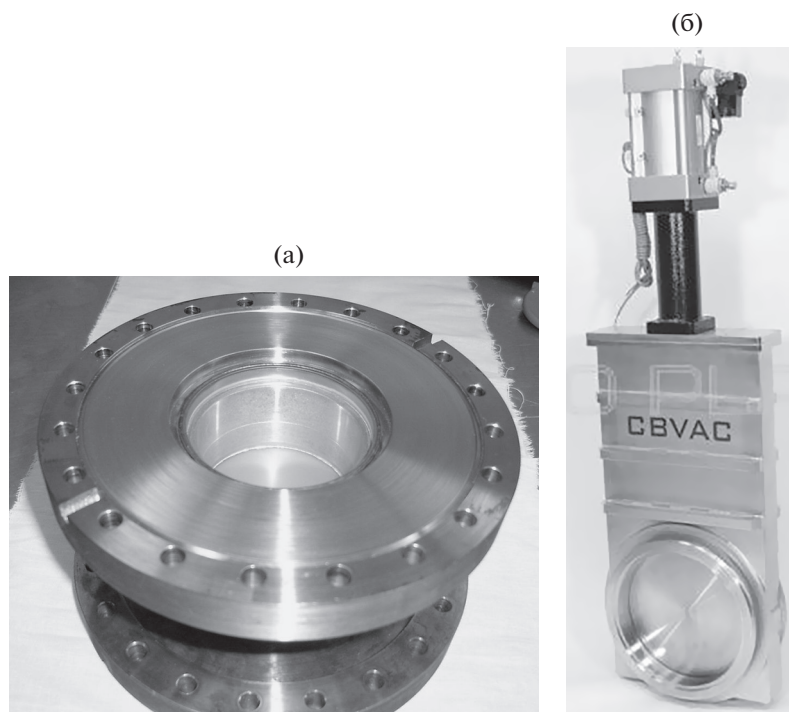


Рис. 12. Элементы линии передачи системы ЭЦРН плазмы установки Т-15МД вакуумное барьерное окно (а), вакуумный затвор с пневматическим приводом (б).

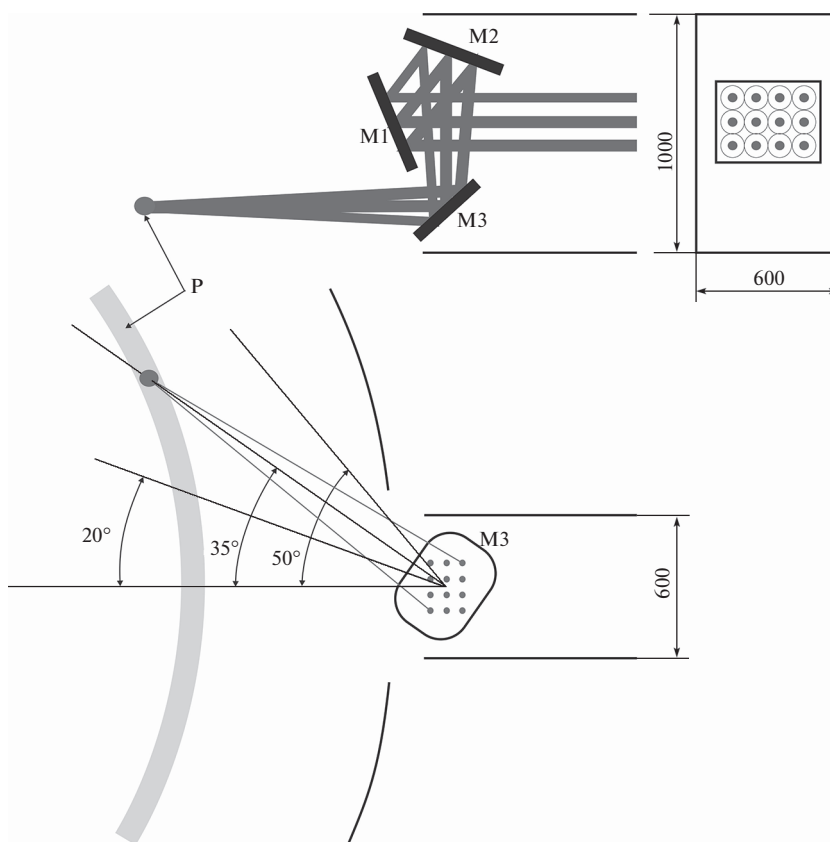


Рис. 13. Схема антенны в экваториальном порту TRT. Размер порта 1000×600 мм. M1 и M2 – фокусирующие зеркала с фазовыми корректорами, M3 – плоское поворотное зеркало (угол поворота 20° – 30°), P – центр плазмы.

5. АНТЕННА ЭЦР-СИСТЕМЫ

Ввод микроволнового излучения в токамак осуществляется через экваториальный порт размером 1000×600 мм (рис. 13). В порт входят 12 волноводов, формирующих матрицу 4×3 волновых пучков с полушириной 11.5 мм. Пучки распределены равномерно по площади 400×300 мм на расстоянии 100 мм друг от друга. Зеркала М1 и М2 представляют собой матрицу из фазовых корректоров и формируют сходящиеся в центре плазменного жгута волновые потоки. Размер зеркала М1 и М2 500×400 мм. Плоское зеркало М3 позволяет направлять пучки под углом к радиусу токамака от 20° до 50° . Зеркало М3 имеет размер 550×400 мм и скругленные углы, чтобы при повороте вписаться в габариты порта. Антенна производит фокусировку вводимого микроволнового излучения в пятно размером $\sim 40 \times 40$ мм.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены предварительные расчеты основных компонентов ЭЦР-системы для токамака с сильным полем TRT. Подходы к расчету базируются на параметрах хорошо освоенного гиротрона для ИТЭР (170 ГГц, 1 МВт) и опыта разработки различных линий передачи мощного миллиметрового излучения. Повышение частоты в системе ЭЦР до 230 ГГц усложняет реализацию всех подсистем с оптимистической оценкой финального результата. Более сложная конструкция гиротрона с режимом захвата колебаний может дать преимущества в стабильности частоты и возможности когерентного сложения сигналов от разных приборов. Для ввода в плазму излучения с мощностью 10 МВт, по-видимому, потребуется 12 гиротронов.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект 19-79-30071)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wagner F., Becoulet A., Budny R., Erckmann V., Farina D., Giruzzi G., Kamada Y., Kaye A., Koechl F., Lackner K., Marushchenko N., Murakami M., Oikawa T., Parail V., Park J.M., Ramponi G., Sauter O., Stork D., Thomas P.R., Tran Q.M., Ward D., Zohm H., Zucca C. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V. 52. P. 124044. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/12/124044>
2. Poli E., Tardini G., Zohm H., Fable E., Farina D., Fignini L., Marushchenko N.B., Porte L. // Nuclear Fusion. 2013. V. 53. P. 013011.
3. Omori T., Albajar F., Bonicelli T., Carannante G., Cavinato M., Cismondi F., Darbos C., Denisov G., Farina D., Gagliardi M., Gandini F., Gassmann T., Goodman T., Hanson G., Henderson M., Kajiwara K., McElhaney K., Nousiainen R., Oda Y., Oustinov A., Parmar D., Popov V., Purohit D., Rao S.L., Rasmussen D., Rathod V., Ronden D., Saibene G., Sakamoto K., Sartori F., Scherer T., Singh N., Strauss D., Takahashi K. // Fusion Eng. Des. 2015. V. 96–97. P. 547. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.12.023>
4. Goodman T.P., Felici F., Sauter O., Graves J.P. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 245002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.245002>
5. Henderson M.A., Heidinger R., Strauss D., Bertizzolo R., Bruschi A., Chavan R., Ciattaglia E., Cirant S., Collazos A., Danilov I., Dolizy F., Duron J., Farina D., Fischer U., Gantenbein G., Hailfinger G., Kasperek W., Kleefeldt K., Landis J.-D., Meier A., Moro A., Platania P., Plum B., Poli E., Ramponi G., Saibene G., Sanchez F., Sauter O., Serikov A., Shidara H., Sozzi C., Spaeh P., Udintsev V.S., Zohm H., Zucca C. // Nuclear Fusion. 2008. V. 48. P. 054013. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/5/054013>
6. Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. // Nuclear Fusion. 2019. V. 59. P. 073001. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005>
7. Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E. // Nuclear Fusion. 2008. V. 48. P. 054007. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/5/054007>
8. Litvak A.G., Denisov G.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Azizov E.A., Ilin V.I. // J Infrared Milli Terahz Waves. 2011. V. 32. P. 337. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9743-8>
9. Krasilnikov A.V., Abduhanov I.M., Aleksandrov E.V., Alekseev A.G., Amosov V.N., Antonov N.V., Arkhipov N.I., Burdakov A.V., Chugunov I.N., Denisov G.G., Gervash A.A., Ivantsivskiy M.V., Kaschuk Y.A., Khomyakov S.E., Krasilnikov V.A., Kupriyanov I.B., Kuzmin E.G., Kuznetsov V.E., Lelekhov S.A., Leshukov A.Y., Litvak A.G., Makhankov A.N., Mazul I.V., Mokeev A.N., Mukhin E.E., Petrov A.A., Petrov M.P., Petrov S.Y., Petrov V.G., Rodin I.Y., Romannikov A.N., Rumyantsev Y.N., Safronov V.M., Savrukhin P.V., Tronza V.I., Tugarinov S.N., Ustinov A.L., Vershkov V.A., Vdovin V.L., Vysotsky V.S., Zernov S.N., Zhitlukhin A.M., Zvonkov A.V. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 104007. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/10/104007>
10. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы (настоящий выпуск).
11. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. P. 263501. <https://doi.org/10.1063/1.4923269>
12. Bakunin V.L., Guznov Y.A., Denisov G.G., Zaitsev N.I., Zapevalov S.A., Kuftin A.N., Novozhilova Y.V., Fokin A.P., Chirkov A.V., Shevchenko A.S. // Tech. Phys. Lett. 2018. V. 44. P. 473. <https://doi.org/10.1134/S1063785018060020>
13. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y.V. // IEEE Electron Device Lett. 2020. V. 41. P. 777. <https://doi.org/10.1109/LED.2020.2980218>
14. Denisov G.G., Chirkov A.V., Belousov V.I., Bogdashov A.A., Kalynova G.I., Sobolev D.I., Rodin Y.V., Tai E.M., Ilin V.I., Kornishin S.Y., Kulygin M.L., Malygin V.I., Soluyanov E.A., Parshin V.V., Shmelev M.Y. // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2011. V. 32. P. 343. <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9756-3>

15. *Thumm M.K., Kasperek W.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. V. 30. P. 755.
16. *Anderson J., Doane J., Moeller C., Grunloh H., O'Neill R., Brookman M., Smiley M., Su D.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 203. P. 04001.
17. *Doane J.L.* // Fusion Sci. Technol. 2008. V. 53. P. 159.
18. *Clarricoats P.J.B., Olver A.D., Chong S.L.* // Proc. Inst. Electrical Eng. 1975. V. 122. P. 1173.
19. *Lau C., Kaufman M.C., Doyle E.J., Hanson G.R., Peebles W.A., Wang G., Zolfaghari A.* // IEEE Transac. Microwave Theory Techniques. 2019. V. 67. P. 38. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2879808>
20. *Doane J.L.* // Infrared and Millimeter Waves. V. 13 / Ed. K. J. Button. N. Y.: Academic, 1985. P. 123.
21. *Dragone C.* // IEEE Transac. Microwave Theory Techniques. 1980. V. MTT-28. P. 704.
22. *Nanni E.A., Jawla S.K., Shapiro M.A., Woskov P.P., Temkin R.J.* // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2012. V. 33. P. 695.
23. *Ohkubo K., Kubo S., Idei H., Sato M., Shimozuma T., Takita Y.* // Int. J. Infrared Millim. Waves. 1997. V. 18. P. 23.
24. *Каценеленбаум Б.З.* // Радиотехника и электроника. 1963. Т. 8. С. 1111.
25. *Каценеленбаум Б.З.* Высоочастотная электродинамика. М.: Наука, 1966.
26. *Денисов Г.Г., Малыгин В.И., Цветков А.И., Еремеев А.Г., Шмелев М.Ю., Белоусов В.И., Бабер И.С., Карпов Н.И., Леонов И.И., Копелович Е.А., Троицкий М.М., Кузнецов М.В., Варьгин И.А., Журин К.А., Мовшев Б.З., Чирков А.В., Глявин М.Ю., Тай Е.М., Солянова Е.А., Бакулин М.И., Рой И.Н., Анашкин И.О., Хвостенко П.П., Кирнева Н.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. С. 369.
27. *Каценеленбаум Б.З., Семенов В.В.* // Радиотехника и электроника. 1967. № 2. С. 244.
28. *Чирков А.В., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Малыгин В.И., Малыгин С.А., Павельев А.Б., Солянова Е.А.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 59. С. 381.