

РЕЖЕКТОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ, ДЛЯ СИСТЕМ СВЧ-ДИАГНОСТИКИ УСТАНОВОК УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

© 2023 г. Т. А. Хусаинов^{a,*}, М. Д. Проявин^{a,**}, Л. В. Лубяко^a

^aИнститут прикладной физики РАН
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

*e-mail: hta@ipfran.ru

**e-mail: pmd@ipfran.ru

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 17.01.2023 г.

Обсуждается возможность применения технологии 3D-печати с последующей металлизацией при изготовлении полосовых волноводных режекторных фильтров, предназначенных для обеспечения работы чувствительной приемной аппаратуры в экспериментах по коллективному томсоновскому рассеянию на флуктуациях плотности электронов плазмы, в которых используется мощное (до нескольких сотен киловатт) зондирующее излучение. Создан двухрезонаторный прототип фильтра, исследованы его характеристики и опробована работа в реальных условиях. Полученные результаты указывают на перспективность использованной технологии. С учетом того, что такие фильтры играют ключевую роль в обеспечении электромагнитной совместимости диагностической приемной аппаратуры и гиротрона, предложенная технология изготовления СВЧ-компонентов открывает возможности, представляющие интерес для широкого круга исследователей.

DOI: 10.31857/S0032816223030229, EDN: CVYZVI

ВВЕДЕНИЕ

Распространенность использования на установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) систем нагрева на электронном циклотронном резонансе, в которых используются гиротроны — источники мощного миллиметрового излучения [1], обуславливает развитие методов и средств защиты систем диагностики и контроля плазмы. Существующие угрозы для приемных систем связаны с тем, что поступающее в камеру установки в виде коллимированного пучка излучение гиротрона при неполном поглощении в плазме рассеивается на стенках камеры и часть рассеянного паразитного излучения попадает на вход приемника. Уровень этого паразитного сигнала может превышать безопасный, что требует решения задачи защиты приемника.

В разработанных к настоящему времени системах защиты основным элементом, позволяющим подавить паразитный сигнал на частоте гиротрона до безопасного уровня, является полосовой режекторный фильтр, за которым в литературе утвердилось название notch-filter. Предъявляемые к фильтру требования зависят от конкретных условий применения. Наиболее жесткие требования к точности частоты настройки, полосе и глубине

режекции фильтра предъявляются в диагностических установках, основанных на исследовании спектральных характеристик излучения при коллективном томсоновском рассеянии (CTS — Collective Thomson Scattering) на флуктуациях электронной плотности плазмы. Поскольку рассеяние весьма слабое, приходится использовать мощный источник зондирующего излучения и чувствительный приемник — анализатор спектра рассеянного сигнала. Чтобы обеспечить неискаженный прием сигнала от плазмы, необходимо подавить паразитный сигнал до уровня, определяемого динамическим диапазоном приемника. Значительная востребованность notch-фильтров способствовала поиску их оптимальной конструкции [2–6], который не завершен до настоящего времени. Из числа созданных и используемых в экспериментах конструкций notch-фильтров хорошо зарекомендовал себя волноводный многорезонаторный фильтр. В качестве примера приведем параметры notch-фильтра [7], созданного для исследования коллективного рассеяния в диапазоне 140 ГГц: при двадцати резонаторах фильтр обеспечивал режекцию не менее чем на 40 дБ в полосе 40 МГц и подавление не менее чем на 100 дБ на центральной частоте фильтра. Поте-

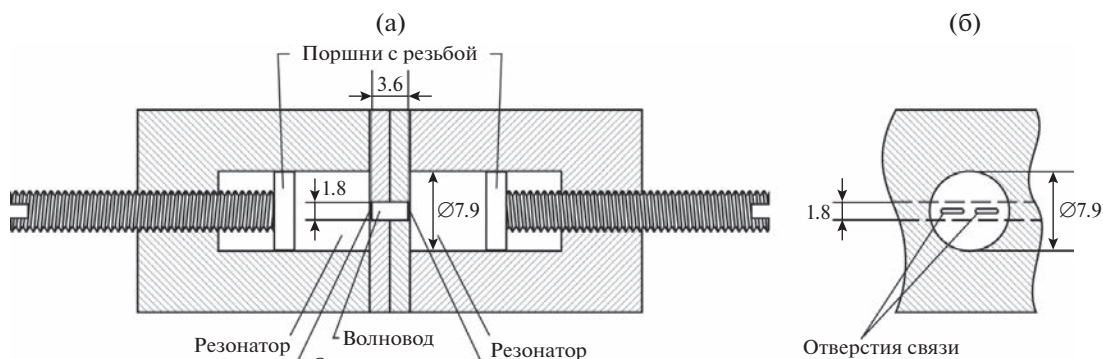


Рис. 1. Поперечное (а) и продольное (б) сечения прототипа notch-фильтра, изготовленного методом CMPS.

ри, вносимые вне полосы 150 МГц, не превышали 3 дБ.

При постановке экспериментов на газодинамической ловушке (ГДЛ) ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск [8–10], источником зондирующего излучения являлся гиротрон, генерировавший на частоте 54.47 ГГц мощность 400 кВт при длительности импульса до 8 мс. Спектральная чувствительность супергетеродинного приемника составляла порядка $5 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц. Развязка приемного и передающего трактов не превышала 45 дБ, и проблема обеспечения совместной работы приемника и гиротрона была одной из центральных задач. Паразитный сигнал на входе приемного тракта достигал нескольких десятков ватт, что существенно превышало допустимый уровень. Чтобы обеспечить измерения, на ГДЛ была создана система защиты приемника, в которой использовался десятирезонаторный режекторный фильтр, обеспечивающий в полосе ± 10 МГц относительно частоты гиротрона подавление сигнала на 30 дБ, а на средней частоте фильтра 54.47 ГГц — более чем на 50 дБ. Были изготовлены еще два фильтра, испытание которых показало необходимость доработки конструкции, что послужило поводом к поиску новой технологии, обеспечивающей высокую точность изготовления фильтров, воспроизводимость их электрических характеристик и возможность более высокого (с запасом) подавления сигнала (для диагностики плазмы) на частоте гиротрона. В частности, исследовалась возможность использования технологии 3D-печати с последующей металлизацией для изготовления notch-фильтра с требуемыми характеристиками.

В настоящей статье представлены результаты работы по созданию прототипа пластикового notch-фильтра на основе применяемой в ИПФ РАН технологии Chemical Metallization of Photopolymer based Structures (CMPS) [11] и обсуждается перспективность применения этой технологии при создании систем защиты, обеспечивающих

совместную работу мощных источников излучения и чувствительных приемных устройств.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОТИПА ПЛАСТИКОВОГО NOTCH-ФИЛЬТРА

По конструкции прототип в целом подобен используемым в работе [8] фильтрам, разработанным на основе решений, предложенных в работах [4, 5]. На рис. 1а показано поперечное сечение изготовленного фильтра. В центре находится прямоугольный одномодовый волновод, по которому передается излучение, сбоку от узких сторон волновода расположены цилиндрические резонаторы, связанные с волноводом через отверстия. Оси резонаторов ортогональны узкой стенке волновода, диаметр резонаторных полостей фиксирован, а длина настраивается при помощи поршня с резьбой, что позволяет выбирать полосу режекции. В отличие от фильтра [8], где резонаторов было десять, здесь их только два, и они расположены строго друг напротив друга. Вид отверстий связи волновода и резонатора на фоне поперечного сечения резонатора и узкой стенки волновода приведен на рис. 1б, форма отверстий оптимизирована для лучшей связи с модами H_{01n} .

Для частоты около 54.5 ГГц цилиндрический резонатор диаметром 7.9 мм и длиной, изменяемой в пределах 0–12 мм, может настраиваться на моды H_{011} , H_{111} , H_{211} , H_{311} , H_{012} , H_{112} , H_{212} , E_{011} , E_{111} , E_{012} , E_{112} . Рабочими модами для нас являются H_{011} и H_{012} , при этом в интересующий нас диапазон 54–55 ГГц при настройке на моду H_{01p} (где $p = 1, 2$) попадает только мода E_{11p} с точно такой же частотой, а побочных провалов на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) не должно возникать. Сдвиг резонансной частоты на 1 МГц происходит при смещении поршня на 0.4 мкм для моды H_{011} и на 0.8 мкм для моды H_{012} .

Конструктивно фильтр собран из четырех деталей и резьбовых поршней, выполненных из нержавеющей стали, как это можно видеть на рис.

1а. Две детали формируют волновод с отверстиями связи таким образом, что разрыв тока оказывается в середине широкой стенки волновода, что позволяет снизить потери при распространении излучения. По бокам от волновода установлены еще две идентичные детали, каждая из которых содержит полость резонатора и регулировочную резьбу для установки поршня. Для регулировки используется обычная метрическая резьба М4, в пластиковой детали она формируется непосредственно при печати. Такое решение достаточно грубо, но в целом с точностью до 10 МГц позволяет проводить регулировку.

ПРОИЗВОДСТВО NOTCH-ФИЛЬТРОВ ПО ТЕХНОЛОГИИ CMPS

В ИПФ РАН успешно применяется и развивается аддитивная технология Chemical Metallization of Photopolymer based Structures (CMPS) для создания СВЧ-компонентов [11], позволяющая на порядки сократить время и стоимость производства таких изделий. Данная технология неоднократно подтверждала возможность ее использования в различных частотных диапазонах (до 700 ГГц) [12, 13], а также в условиях высокого вакуума и интенсивных электронных потоков [14, 15]. Она может использоваться для создания изделий как с толстым слоем меди (для работ с большими уровнями мощности и тепловой нагрузки), так и с тонким слоем — порядка 10–30 мкм. Последний вариант исполнения деталей отличается крайне малыми временными и финансовыми затратами, что позволяет быстро проходить путь от прототипа к реальному прибору, проверяя в “холодных” экспериментах корректность научных теоретических и конструкторских идей. В любом случае в качестве начального шага, согласно технологии SLA (Stereolithography) или MJM/MJP (Multi Jet Modeling/Multi Jet Printing), печатается фотополимерная заготовка. Затем ее поверхность химически очищается и подготавливается для дальнейшей активации и металлизации. В случае толстого слоя меди при необходимости полимерный каркас может быть удален, после чего остается требуемый рельеф поверхности элемента. Ввиду химической стойкости фотополимеров данная задача является весьма нетривиальной. Для элементов с тонким слоем меди изменение размеров за счет медного покрытия можно заложить в допуски модели или же вообще ничего не менять, если для используемого частотного диапазона такие погрешности не критичны.

Качество рабочей поверхности получаемых элементов в основном определяется погрешностями изготовления полимерной оправки. Технология создания медного слоя оптимизирована таким образом, что по качеству первичный слой полностью соответствует поверхности заготовки,

повторяя ее форму, а металлический слой по свойствам пренебрежимо мало отличается от обычной медной детали. Помимо косвенных результатов, наблюдаемых в экспериментах, безусловно, нами были проведены исследования качества поверхности на векторных анализаторах цепей в различных диапазонах частот в процессе отработки технологии. На определенном этапе сравнения покрытых медью деталей с цельнофрезерованными чувствительности аппаратуры не хватало для выявления различия в потерях проходящего СВЧ-элемент полезного сигнала, что связано как с высокими показателями меди в СВЧ-технике, так и с малой разницей качества образцов. Было проведено отдельное исследование с использованием высокочастотной электродинамической системы, которая показала увеличение потерь проходящего сигнала примерно на 30% относительно смоделированного идеального образца. Однако, если говорить о границах применимости данной технологии, стоит обратить внимание на непрерывно улучшающиеся свойства печати.

На данный момент мы используем SLA-принтеры с матрицей с разрешением 8K на экранах разных размеров. Таким образом, размер пикселя составляет от 20 до 40 мкм (плоскость XY). Минимальная величина слоя составляет 10 мкм (Z-координата). Соответственно очень важно правильным образом ориентировать деталь в печатной области для достижения минимальных погрешностей при изготовлении. Оптимальным с точки зрения печати является геометрия модели, включающая в себя элементы плоскостей, строго перпендикулярных или параллельных плоскости стола. При этом слои детали, имеющие плоскости, параллельные плоскости печати, должны иметь под собой опору (чтобы при печати они не висели свободно в воздухе). Это могут быть как предыдущие слои модели, так и специально сгенерированные поддержки. Последнего стоит избегать, так как любые поддержки, за исключением используемого в технологии MJP в качестве поддержек выплавленного воска, оставляют следы после механического удаления, что сильно портит качество поверхности. Для качественной SLA печати производитель рекомендует избегать углов наклона поверхности детали относительно печатного стола менее 60°. В случае малого угла наклона поверхности детали к плоскости печати на относительно большой ее длине (в проекции на плоскость печатного стола) слоистость структуры становится более выраженной.

Помимо корректной ориентации, важное влияние на качество поверхности оказывают параметры засветки фотополимерной смолы. Это связано с тем, что итоговая поверхность имеет микропериодическую структуру, связанную с максимумами диаграммы направленности каждого из пиксе-

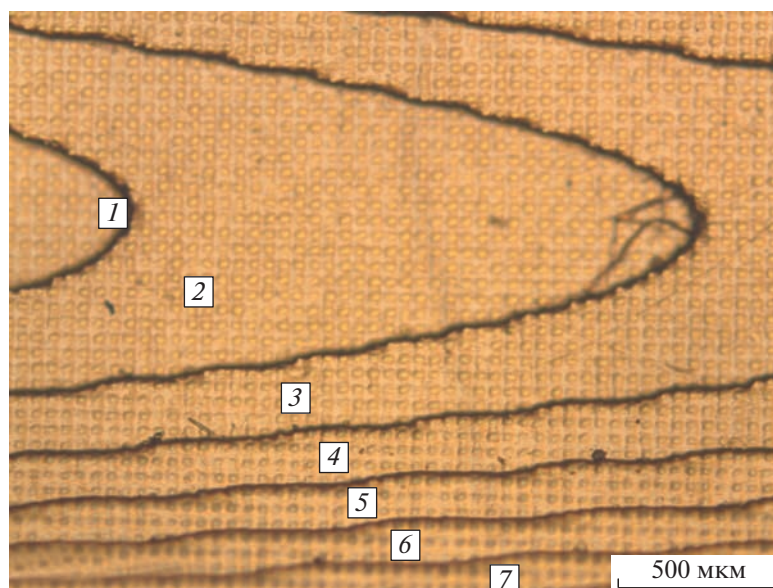


Рис. 2. Полученная на микроскопе фотография структуры первично омедненной 3D-печатной фотополимерной детали. Геометрия поверхности имеет плавный угол наклона относительно горизонтальной плоскости (плоскость поверхности печати), что при печати слоем 20 мкм демонстрирует ступенчатость поверхности от слоя 1 с минимальной толщиной до слоя 7 с максимальной толщиной. Ширина выпуклости периодической структуры 23 мкм, высота 5 мкм.

лей. Несмотря на относительно большой размер пикселя, основной вклад в шероховатость поверхности изделия вносит высота подъема такой неоднородности. При правильно подобранном времени засветки границы между бугорками “замываются”, что приводит к уменьшению амплитуды периодической структуры до 4–5 мкм. Пример увеличенной под микроскопом структуры поверхности с первичным омеднением представлен на рис. 2. Таким образом, точно определить электродинамические потери в конкретном элементе сложно, так как существует сильная зависимость качества поверхности (шероховатость и погрешность изготовления) от ее сложности и от возможностей оптимизации печати заготовки.

Применительно к изготовлению notch-фильтров выбор толщины покрытия определяется условиями тепловой нагрузки. На установках, использующих мощные непрерывные гиротронные комплексы, исполнение фильтра должно предполагать качественную систему охлаждения. В случае, если требуется термостатирование, целесообразно использовать жидкостное охлаждение. В таком случае производство notch-фильтра рассматриваемым методом усложняется. Требуется создание фотополимерной заготовки, которая повторяет форму будущих пустот фильтра и удаляется после покрытия толстым слоем меди.

В случае, если ожидаемая тепловая нагрузка мала, можно использовать тонкое покрытие на полимерном основании, что существенно экономит временные и финансовые затраты. При до-

статочно малом интегральном уровне мощности (в случае коротких импульсов) СВЧ-нагрев медного слоя будет невысок и легко нивелируется теплопроводностью тонкого металлического слоя, выходящего на открытую поверхность. Небольшой нагрев медного слоя в случае качественной адгезии с полимером не вызовет деформаций и отслоений вследствие большой разницы в коэффициентах теплового расширения между используемыми материалами. Тонкий слой меди и толстостенная фотополимерная оболочка формируют малочувствительный к внешним тепловым воздействиям notch-фильтр, частотные параметры которого могут меняться в зависимости от резкого изменения температуры окружающей среды. При этом с точки зрения электродинамики толщина покрытия практически не играет роли: для частот излучения гиротрона толщина скин-слоя в меди существенно меньше 1 мкм.

В экспериментах на установке ГДЛ важность теплоотвода нивелируется относительно малыми мощностью гиротронного комплекса (меньше 0.5 МВт) и длительностью импульса (не превышающей 10 мс). В силу этого для прототипа было выбрано тонкое, 30 мкм, покрытие. Если считать, что принимаемая мощность рассеянного излучения ≤ 1 Вт [9], то нагрев покрытия окажется в пределах 1°C, даже если большая часть мощности поглотится в одном резонаторе.

Корпус notch-фильтра с двумя резонаторами состоит из четырех напечатанных частей с медным покрытием, фотографии которых представ-

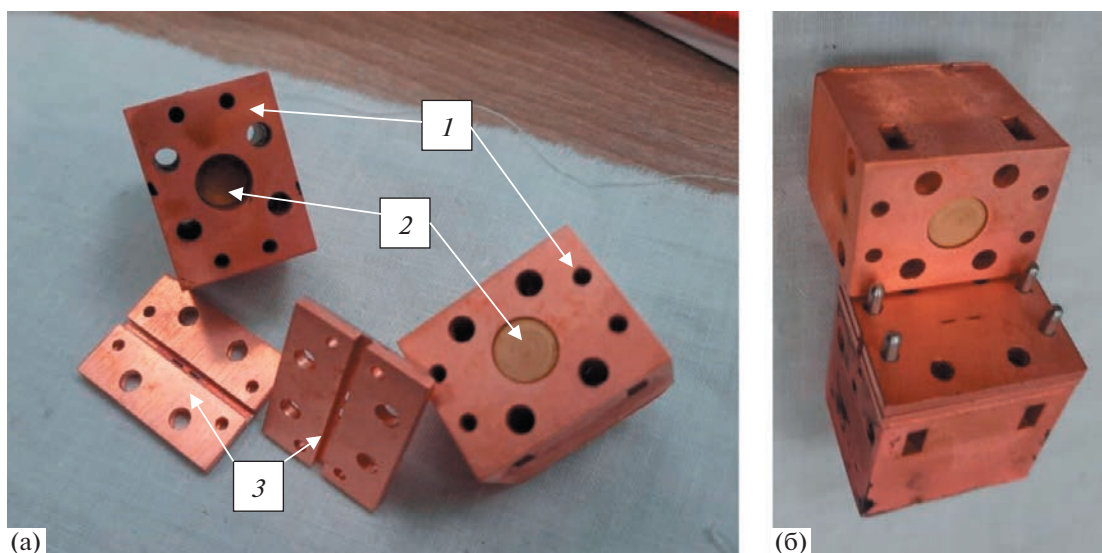


Рис. 3. Слева — вид разборного notch-фильтра, созданного по технологии CMPS (1 — резонаторные блоки, 2 — подвижные поршни для подстройки частоты, 3 — половинки волновода с отверстиями связи с резонатором); справа — частично собранный notch-фильтр.

лены на рис. 3. Данная конфигурация максимально упрощает печать и дальнейшую металлизацию элементов, а также контроль качества медного покрытия. Кроме того, в дальнейшем таким способом можно масштабировать количество резонаторов и обеспечивать соответствие их размеров друг другу. Для обеспечения лучшей проводимости регулировочные поршни из нержавеющей стали были химически покрыты тонким слоем меди и золота.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ А.Ч.Х. ПРОТОТИПА ПЛАСТИКОВОГО NOTCH-ФИЛЬТРА

Измерения проводились при помощи анализатора спектра Agilent E4407B с внешним смесителем, в качестве источника зондирующего гармонического сигнала использовался генератор Г4-142. Сигнал с генератора проходил через notch-фильтр и подавался на анализатор спектра. В ходе каждого измерения частота генератора плавно менялась в диапазоне 54.5 ± 0.1 ГГц, а анализатор спектра при этом фиксировал во всем этом диапазоне максимальный уровень мощности, измеряемый в децибелах. Измерения проводились для различных настроек регулировочных поршней: в каждом резонаторе поршень либо настраивался на моду H_{011} или H_{012} для частоты 54.5 ГГц, либо прижимался к отверстиям связи, полностью отключая резонатор от волновода. При измерении, когда оба поршня были прижаты и notch-фильтр работал как волновод, определялась мощность генератора в зависимости от частоты, в дальнейшем эта величина вычиталась из

результатов остальных измерений, чтобы получить непосредственно степень ослабления излучения, вносимую настроенным фильтром. Настройка поршней осуществлялась в два этапа: сначала выбранный поршень грубо устанавливался в окрестность первой или второй моды по измерению длины (характеризует длину резонатора и, соответственно, частоту) выступающей из корпуса части стержня с резьбой, затем частота генератора выставлялась на 54.5 ГГц по данным анализатора спектра, и аккуратной подстройкой поршня достигался минимум принимаемой мощности.

Снятые экспериментально АЧХ приведены на рис. 4. Сплошными линиями изображены АЧХ, соответствующие настройке обоих резонаторов на определенную моду, штриховыми — только одного резонатора, черные линии обозначают настройку на первую моду, серые — на вторую.

Как видно, наилучшие результаты дает настройка обоих резонаторов на моду H_{011} : максимальное подавление порядка 25 дБ, подавление в полосе ± 10 МГц составляет 15 дБ; АЧХ, соответствующая настройке на вторую моду (H_{012}), оказывается менее глубокой и более узкой. Логично, что большая добротность моды H_{012} снижает ширину полосы режекции, но, судя по всему, она еще и приводит к худшему согласованию с волноводом. При этом максимальное подавление сигнала на резонансной частоте, обеспечиваемое одним настроенным резонатором, оказывается существенно больше половины максимального подавления двумя резонаторами как для моды

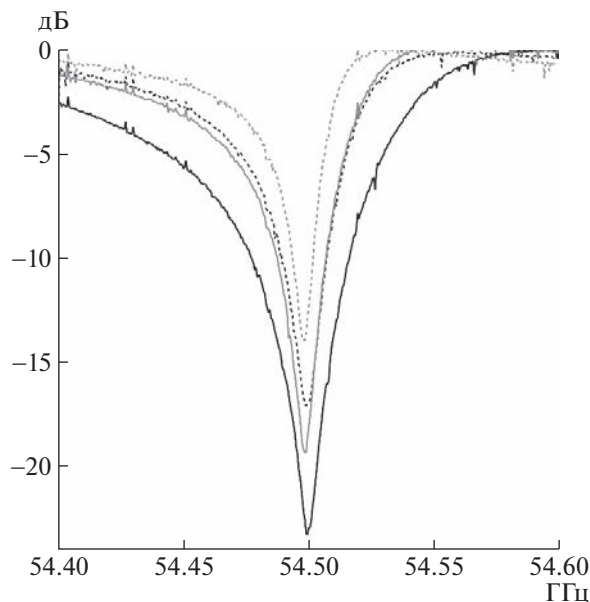


Рис. 4. Измеренные экспериментально АЧХ notch-фильтра при разных настройках резбовых поршней: сплошные линии — характеристики notch-фильтра с двумя резонаторами, штриховые — с одним резонатором — при настройке на моду H_{011} (черные линии) и на моду H_{012} (серые линии).

H_{011} , так и для моды H_{012} . Это говорит о возможности дальнейшей оптимизации конструкции.

Изготовленный прототип фильтра также был испытан в ходе экспериментальной кампании по исследованию спектров коллективного томсоновского рассеяния на установке ГДЛ. Фильтр был подключен ко входу одного из приемников [8], что позволило увеличить подавление паразитного сигнала (рис. 5) примерно на 20 дБ. При этом, поскольку фильтр был расположен до любых других подавляющих элементов приемной системы, он принимал на себя основную долю тепловых нагрузок в течение всех экспериментов, проводимых с использованием гиротрона, однако при этом не было замечено никаких изменений его характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что применение технологии CMPS для изготовления СВЧ-компонентов позволяет создать конструкцию многорезонаторного режекторного фильтра, удовлетворяющего требованиям экспериментов по коллективному томсоновскому рассеянию, проводимых на установках УТС. Новая технология обеспечивает изготовление деталей фильтра с требуемой точностью, с меньшими затратами труда и материалов по сравнению с традиционным подходом. Соответственно, это не только

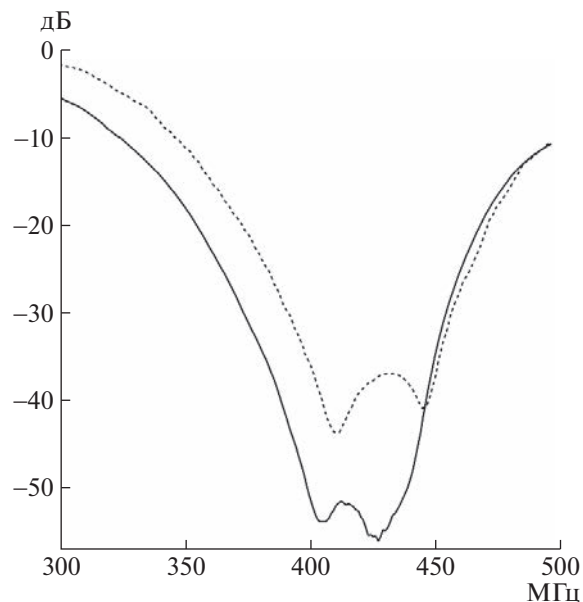


Рис. 5. Штриховая линия — АЧХ приемной системы на промежуточной частоте, сплошная линия — АЧХ приемника с добавленным фильтром. АЧХ снимались при помощи генератора Г4-142 аналогично рис. 4, но вместо анализатора спектра с внешним смесителем для записи характеристики использовался осциллограф Tektronix MSO54, подключенный к приемнику коллективного томсоновского рассеяния.

позволяет снизить стоимость и время изготовления готового изделия, но также открывает возможности для моделирования — оперативно вносить изменения в конструкцию и проводить экспериментальные исследования по ее оптимизации.

В перспективе представляет интерес использование данной технологии для изготовления деталей, используемых в коротковолновой части миллиметрового диапазона, соответствующей электронно-циклотронному нагреву на современных установках по исследованию УТС. Однако при этом важным вопросом остается ограничение по мощности принимаемого излучения, что потребует дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Изготовление фильтра и первичные испытания поддержаны проектом РНФ № 21-19-00884, разработка конструкции и работа в ходе экспериментальной кампании в Новосибирске выполнены в рамках проекта РНФ № 19-72-20139.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Denisov G.G., Litvak A.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Zapevalov V.E. // Nucl. Fusion. 2008. V. 48. P. 054007. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/48/5/054007>

2. Ковалев Н.Ф., Резников М.Г., Слуцкер Я.З. // ПТЭ. 1979. № 1. С. 120.
3. Denisov G.G. // 18th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. Colchester, United Kingdom, 1993. V. 2104. P. 21044Z. <https://doi.org/10.1117/12.2298611>
4. Geist T., Bergbauer M. // Int. J. of Infrared and MM Waves. 1994. V. 15 (12). P. 2043. <https://doi.org/10.1007/BF02096276>
5. Dryagin Yu., Skalyga N. and Geist T. // Int. J. of Infrared and MM Waves. 1996. V. 17. P. 1199. <https://doi.org/10.1007/BF02088905>
6. Danilov Y.Y., Denisov G.G., Khozin M.A., Panin A., Rodin Y. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. V. 42 (6). P. 1685. <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2318352>
7. Лубяко Л.В., Суворов Е.В., Буров А.Б., Штанюк А.М., Дрягин Ю.А., Кукин Л.М., Скалыга Н.К. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 8. С. 54.
8. Лубяко Л.В., Шалашов А.Г., Андриянов А.Ф., Божков В.Г., Господчиков Е.Д., Дорожкина Д.С. // Известия вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 373. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_05_373
9. Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Lubyako L.V., Solomakhin A.L., Viktorov M.E. // JINST. 2021. V. 16. P. 07007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07007>
10. Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., Lubyako L.V., Solomakhin A.L., Yakovlev D.V. // Phys. Plasmas. 2022. V. 29. P. 080702. <https://doi.org/10.1063/5.0101751>
11. Проявин М.Д., Котомина В.Е. Заявка на изобретение № 2022120582 РФ от 26.07.2022.
12. Proyavin M.D., Vikharev A.A., Fedotov A.E., Sobolev D.I., Peskov N.Yu., Makhlov P.B., Shmelev M.Yu., Kuzikov S.V. // Radiophys Quantum Electronics. 2020. V. 63. P. 469. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10072-0>
13. Gashturi A.P., Palitsin A.V., Goykhman M.B., Gromov A.V., Panin A., Proyavin M.D., Rodin Y.V. // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567076>
14. Morozkin M., Manuilov V., Proyavin M., Kotomina V., Kamenskiy M., Orlovskiy A. // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 2022. P. 55. <https://doi.org/10.1109/APEDE53724.2022.9912957>
15. Peskov N.Y., Abubakirov E.B., Denisenko A.N., Ginzburg N.S., Martyanov I.V., Proyavin M.D., Vikharev A.A., Zaslavsky V.Y. // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). IEEE, 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567272>