

Калориметрическая нагрузка для гиротронов малого среднего уровня СВЧ-мощности: разработка, аддитивное производство и экспериментальное тестирование

А.В. Кирсанов^{1,2}, А.А. Ананичев¹, В.Е. Котомина¹, А.А. Орловский^{1,3}, М.Д. Проявин¹

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

Аннотация: для измерения мощности гиротронов миллиметрового диапазона предложена, создана и экспериментально исследована конструкция проточного водяного калориметра, в котором составные части (корпус, волноводная вставка и крышка), изготовлены методом фотополимерной 3D-печати из пластика с применением технологии CMPS. Поскольку теплопроводность пластика на три порядка ниже, чем у традиционно используемых металлов, выход на стационар, как в процессе калибровки, так и в процессе проведения измерений мощности гиротронов, происходит в несколько раз быстрее, что и продемонстрировано экспериментально. Вследствие этого минимизируется влияние временных уходов температуры поступающей воды, что позволяет повысить точность проводимых измерений, что особенно важно в случае импульсных СВЧ-генераторов с малой средней мощностью.

Ключевые слова: гиротроны, калориметр, измерение мощности СВЧ излучения

1. Введение

В настоящее время гиротроны, использующие взаимодействие потоков вращающихся электронов с быстрыми волнами цилиндрических резонаторов, являются наиболее мощными (от киловаттного и вплоть до мегаваттного уровня) источниками стационарного излучения миллиметрового диапазона [1-3]. Важнейшим этапом в создании этих приборов является их настройка с целью достижения расчетных параметров, среди которых одним из основных является генерируемая мощность СВЧ-излучения. Для измерения мощности гиротронов как непрерывных, так и импульсных используются калориметры проточного типа, в которых в качестве поглощающей среды выступает дистиллированная вода со сравнительно малой (несколько десятков микрон в миллиметровом диапазоне) толщиной скин-слоя, за счет чего СВЧ излучение практически полностью поглощается, нагревая воду. Точная мощность излучения определяется по разнице температур входного и выходного потоков воды и измерения её расхода. Традиционно корпуса калориметров изготавливаются из металлов. Однако существенным недостатком таких систем являются большие теплотери вследствие высокой теплопроводности металла и, как следствие, – долгий выход на стационарное состояние, при котором проводятся измерения. Ввиду того, что температурные условия проведения эксперимента (температура входной воды, теплообмен со внешней средой и т.д.) за это время могут существенно изменяться, это приводит к значительным погрешностям измерений. Особенно ярко это выражается при измерениях импульсной мощности с высокой скважностью, где средняя энергия может достигать единиц джоулей. В этой связи перспективным представляется изготовление корпусов калориметров из полимерных материалов с низкой теплопроводностью. В то же

время механическая обработка сравнительно крупногабаритных изделий из полимеров является достаточно трудоемкой задачей.

В данной работе предложен и апробирован достаточно простой и эффективный способ изготовления корпуса калориметра миллиметрового диапазона на основе технологии 3D-печати из фотополимерного материала, теплопроводность которого на несколько порядков ниже (в 1000раз), чем у сплавов на основе алюминия. Проведено экспериментальное сравнение времени выхода на стационарную температуру при калибровке традиционного металлического калориметра и калориметра из пластика.

2. Дизайн и экспериментальное тестирование калориметра, изготовленного методом фотополимерной 3D-печати

Выходное излучение мощных гиротронов миллиметрового диапазона частот поступает в нагрузку с распределением, близким к гауссовому пучку и горизонтальной линейной поляризацией [4]. Для обеспечения транспортировки волнового пучка до поглощающей среды внутри калориметра должна быть создана проводящая поверхность. В настоящее время существует несколько технологий изготовления проводящих структур на основе 3D-печати, включая непосредственную печать из металлических порошков. Однако этот метод достаточно дорогой, особенно в случае печати медью, и не позволяет обеспечить качество поверхности, требуемое для высокочастотных применений (десятки и сотни ГГц). Указанных недостатков лишен альтернативный метод изготовления проводящих СВЧ компонентов, использующий печать из светоотверждающегося пластика с последующей металлизацией (омеднением) поверхности CMPS [5]. В данной работе именно этот метод использовался для изготовления калориметра.

На Рис. 1 представлена разработанная модель полимерного калориметра близкая по параметрам к традиционным измерителям мощности, изготавливаемым из металлов. Фланец корпуса калориметра присоединяется к выходному фланцу гиротрона. Волноводом является специальная омеднённая вставка, показанная на Рис. 1 красным цветом. В процессе ее изготовления на внутренней поверхности был

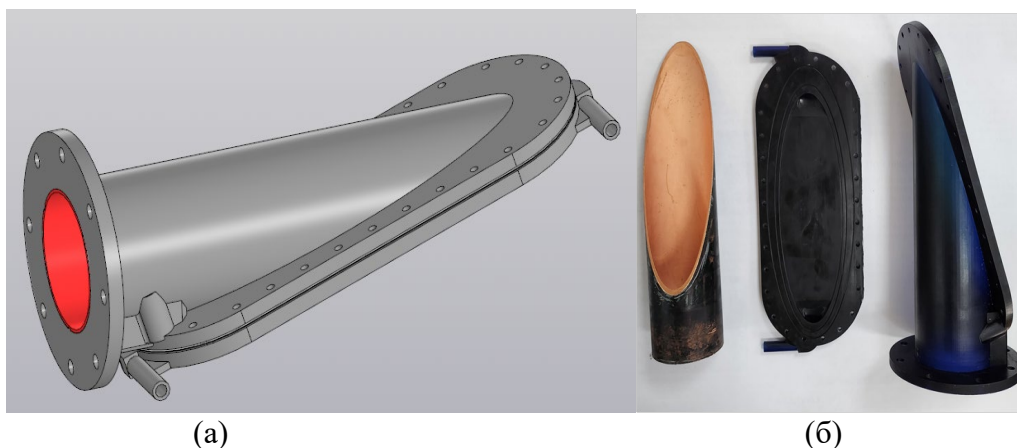


Рисунок 1. (а) Разработанная 3D модель калориметра и (б) подготовленные к сборке его составные части (волноводная вставка, крышка и корпус). На 3D модели красным показана омеднённая вставка-волновод.

наращен слой меди толщиной 0.1-0.15 мм. В отличие от нержавеющей стали, которую, в основном, используют в качестве материала для калориметров, медная поверхность практически без потерь и, соответственно, нагрева проводит СВЧ-излучение в область его поглощения в водяном канале. Подробно использованная технология омеднения полимерной поверхности изложена в [5]. В то же время,

тонкий слой меди не имеет теплообмена в связи с окружением диэлектрическим корпусом. Между волноводной вставкой с корпусом и крышкой с водяными патрубками была расположена пластина из фторопласта ФТ-4 толщиной 0.2мм, отделяющая поглощающую СВЧ воду от пространства волновода.

После изготовления деталей и сборки было проведено экспериментальное тестирование разработанного калориметра с целью сравнения времени выхода на стационарную температуру с традиционным калориметром, выполненным из металла. Перед калориметром были установлены входной датчик температуры воды и нагреватель для проведения калибровки. После выхода воды из калориметра температура измерялась выходным датчиком температуры. Расход воды выставляется специальным регулятором и контролируется расходомером с записью всех параметров установки в специальный файл.

На Рис. 2 приведены зависимости измеренной мощности при калибровке для двух разных калориметров. Для наглядности был выставлен разный проток воды при одинаковой мощности нагревателя калибровки. Результаты измерений фиксируются только после выхода системы на стационарное состояние. Видно, что выход на стационар для алюминиевого калориметра (верхняя синяя кривая) составляет примерно 5-7 минут, тогда как для пластикового калориметра это время существенно меньше и не превышает 1-1.5 минут. При такой разнице времени выхода на стационарное состояние снижается влияние изменений внешних параметров, таких как температура или напряжение в электрической сети, и ускоряется время проведения эксперимента в несколько раз.

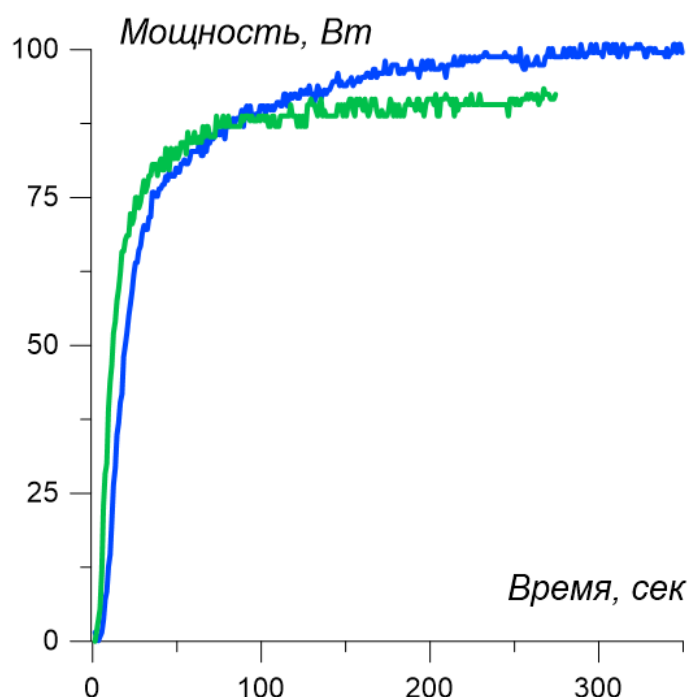


Рисунок 2. Временные зависимости измеренной мощности при калибровке для двух разных калориметров: синяя кривая показывает выход на стационар для калориметра из алюминия; зеленая кривая — для пластикового калориметра, изготовленного методом 3D печати. Для визуализации выставлен разный проток воды при одинаковой мощности калиброванного нагревателя.

3. Заключение

Таким образом, в данной работе разработан, изготовлен и успешно

протестирован новый вариант калориметров для измерения мощности гиротронов с малым средним уровнем мощности, для изготовления которого использован метод фотополимерной 3D печати с последующим омеднением отдельных элементов. Проведены сравнительные измерения времени выхода на стационарное состояние в процессе калибровки при использовании алюминиевого и пластикового калориметров. Заметно меньшие времена выхода на стационарное состояние для пластикового калориметра из-за существенно меньшей теплопроводности использованного материала позволяют ускорить время проведения измерений (особенно для режимов с включением и выключением СВЧ-мощности) и, следовательно, снизить влияние различных температурных уходов, что в конечном итоге должно существенно поднять точность измерений мощности.

Работы выполнены в рамках проекта ИПФ РАН **FFUF-2022–0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона»**.

Список литературы

1. M. Glyavin et al // J. IRMMTHzwaves. 2020. V. 41. No.8. P. 1022.
2. M.Yu. Glyavin et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2021. V.42. No.11. P. 1666.
3. M.D. Proyavin et al// IEEE Electron Dev. Lett. 2023. V. 44. No. 1. P.148.
4. А.А. Богдашов, Г.Г. Денисов // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47. № 4. С. 319.
5. Proyavin, M.D.; Kotomina, V.E. Patent RF RU2795771C1, 2023.