

## КРИОГЕННЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ БОЛОМЕТРОВ

А. М. Чекушкин<sup>1,2</sup>, Р. А. Юсупов<sup>1,2</sup>, В. В. Завьялов<sup>3</sup>, Л. С. Кузьмин<sup>4</sup>, М. А. Тарасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), 141701,

Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва,

Моховая, д. 11-7

<sup>3</sup>Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

<sup>4</sup>Чалмерский технологический университет, 41296, Гётеборг, Швеция

Статья поступила в редакцию 19 января 2017 г.

**Аннотация:** В данной работе был разработан, изготовлен и измерен криогенный спектральный фильтр для выделения требуемой полосы частот при калибровке криогенных болометров и снятия спектральных характеристик с использованием планковского теплового источника излучения. Получена средняя добротность 25 и пропускание на резонансной частоте 50% в диапазоне частот 100-500 ГГц.

**Ключевые слова:** криогенный фильтр, субтерагерцовый диапазон, микроволновое излучение.

**Abstract:** In this paper we present a new type of cryogenic filter. This filter based on Fabry-Perot interferometer. We use quartz substrate covered by gold grid with low transmission coefficient. Thickness of quartz is 240 um and thickness of gold is 300 nm. The modeling of this filter was done in CST Studio.

Filter was tested in room temperature. Backward wave oscillator was used like GHz source and pyroelectric was used like detector. For the cryogenic experiments was used black body (NiCr film on sapphire substrate). Cold-electron bolometer was used for signal detection.

This filter can be inserted into cryostat and can be tuned mechanically. Q-factor is 25 and transmission 50% at frequency range from 100 GHz till 500 GHz were observed.

**Key words:** cryogenic filter, subTHz range, microwave radiation.

## 1. Введение

Для исследования космического микроволнового излучения в рамках таких проектов как BOOMERANG, OLIMPO, CORe с характерной мощностью эквивалентной шуму ниже  $10^{-17}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> приёмники должны быть охлаждены до температуры ниже 300 мК. Калибровка таких приемных устройств представляет сложность, потому что требует подавление фонового излучения комнатной температуры больше, чем на 3 порядка. В общем случае влияние фонового излучения должно быть на уровне излучения холодной ступени криостата. Это означает, что калибровка такого устройства должна быть сугубо криогенной. Для реализации такой задачи нам необходим планковский источник типа черного тела и постоянный или перестраиваемый спектральный фильтр.

## 2. Разработка конструкции фильтра

Естественным вариантом построения измерительной системы является использование широкополосного калиброванного криогенного теплового источника с перестраиваемым высокочастотным фильтром внутри криостата, что позволяет существенно упростить тракт и избавиться от многократных отражений и неоднородностей.

В качестве перестраиваемого фильтра была разработана конструкция сеточного фильтра типа интерферометра Фабри-Перо [1]. Одним из условий реализации такой конструкции является хорошая отражающая способность сеток. В нашем эксперименте в роли сеток выступают металлические фильтры высоких частот на кварцевых подложках [2]. Коэффициент пропускания одного такого фильтра в исследуемом диапазоне частот составляет не более 4 %.

Нами был произведен расчет частотной характеристики такого фильтра, настроенного на частоту 300 ГГц. Расчет производился в следующей конфигурации: сетки на подложках смотрят друг на друга, расстояние между сетками 500 мкм, что соответствует половине длины волны на данной частоте. В качестве материалов были выбраны оптический кварц для подложки и золото для материала решетки. Моделирование данной периодической решетки

производилось для характерной ячейки с периодическими граничными условиями. Размеры соответствуют изготовленным структурам. Размах креста 40мкм, ширина 5мкм, толщина 0.3 мкм, на подложке 240мкм. Расчет проводился в программном пакете CST STUDIO SUITE 2016, Рис.1.

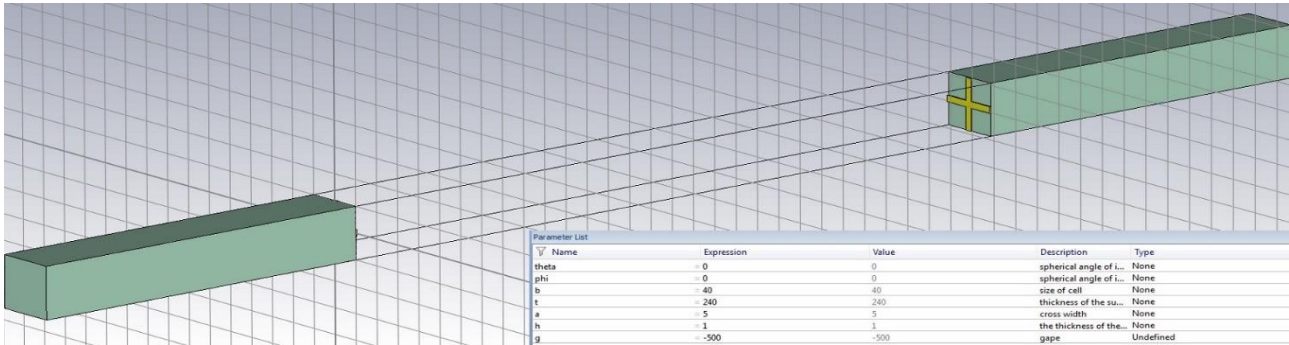


Рис.1. Вид рассчитываемой ячейки в программе моделирования с основными параметрами.

В результате моделирования получены спектры пропускания данной структуры в диапазоне частот 50-1000ГГц. Из данных графиков видны пики пропускания на частотах около 300ГГц и следующих кратных (600 и 900 ГГц). Смещение пиков относительно планируемой частоты связан с так называемым «эффектом провисания электрического поля в сетках» и более выражен на высоких частотах, Рис.2.

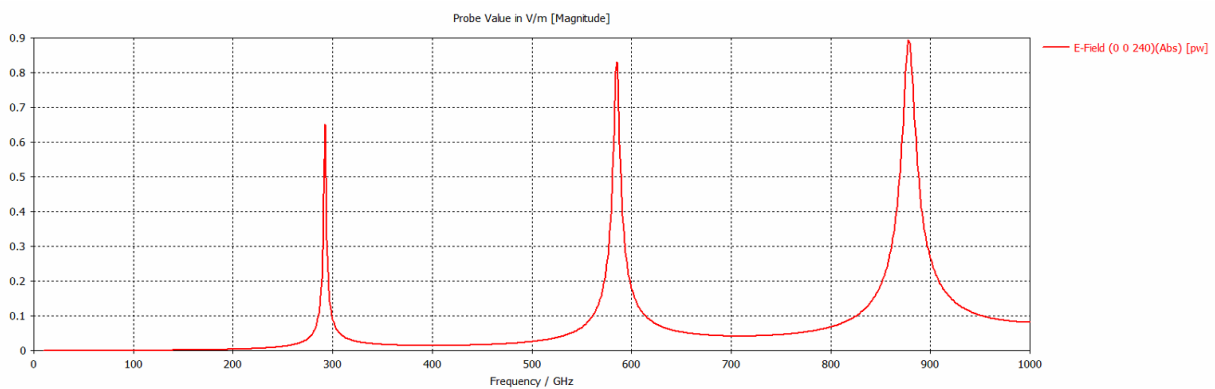


Рис.2. График расчетной зависимости пропускания сетчатого фильтра в линейном масштабе.

Для первого варианта фильтра были изготовлены сетки из золота на кварцевых подложках толщиной 240 мкм, диаметром 25 мм, толщина золота 300 нм, ширина полосок 5 мкм, период 40 мкм.

### 3. Измерения

Пропускание фильтра измерено методом замещения в просвечивающем ЛОВ-спектрометре. Рейтер с сетками устанавливали в четырехлинзовом тракте в перетяжке сформированного гауссова пучка, где фронт волны наиболее плоский. Фотография измерительного стенда представлена на Рис. 3.

Перестраиваемый фильтр состоял из двух металлических сеток, напыленных на кварцевые подложки, которые раздвигались вращением кольцевых диафрагм в резьбе M50x0.75. Использование магнитов для прижима сеток к винтовым кольцам позволило избежать люфтов при перемещении металлических частей. Один полный оборот кольца с сеткой соответствовал перемещению на 0.75 мм. Изначальный зазор между сетками 0.1 мм. Сетки располагались металлическими частями одна к другой и диэлектриком наружу. Была проведена проверка и калибровка ЛОВа при помощи сеточного заводского интерферометра.

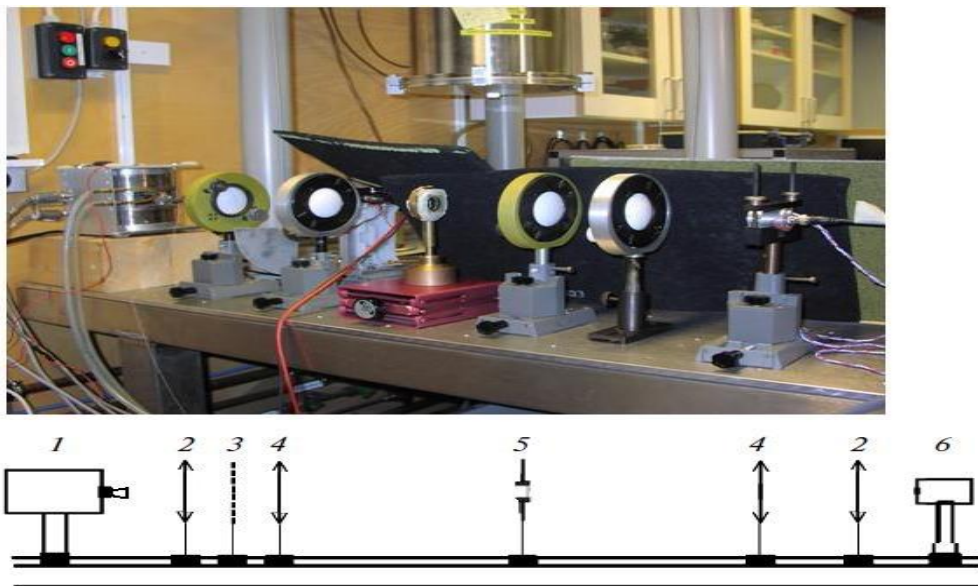


Рис.3. 1-ЛОВ, 2,4-линзы, 3-модулятор, 5-перестраиваемый фильтр, 6-пирозлектрический детектор.

На трех частотах измерена ширина полосы пропускания такого интерференционного фильтра, полученная при перемещении одной из сеток, см. таблицу 1.

Таблица 1. Пропускание фильтра на различных частотах

|                 |      |      |     |
|-----------------|------|------|-----|
| Частота, ГГц    | 123  | 180  | 229 |
| Расстояние, мм  | 1.22 | 0.85 | 0.7 |
| Полуширина, ГГц | 6.2  | 6.3  | 10  |
| Добротность     | 20   | 28   | 23  |

Проведен эксперимент по калибровке перестраиваемого фильтра. Для фиксированных частот на 232 и 95 ГГц, задаваемых ЛПД изменялось расстояние между сетками, Рис. 4.

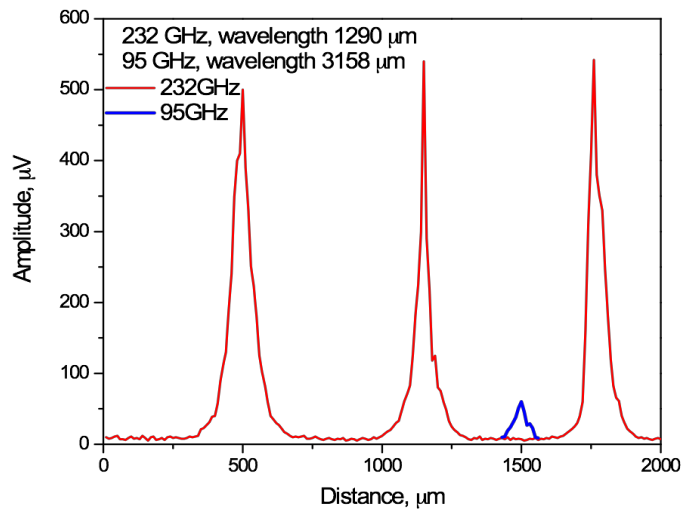


Рис.4. Измерения при комнатной температуре. ЛПД на 232 ГГц (красный) и на 95 ГГц (синий).

Для использования фильтра в астрофизическом проекте типа ESA требуется рабочий интервал частот от 75 до 125 ГГц. Нами был изготовлен и измерен тонкопленочный алюминиевый фильтр на стеклянной подложке для этого диапазона. Толщина стекла 150 мкм, толщина алюминия 200 нм, период

сетки 200 мкм. Фильтр был протестирован на двух лавинно-пролетных диодах на частотах 95 и 113 ГГц. Результаты измерений представлены на Рис.5.

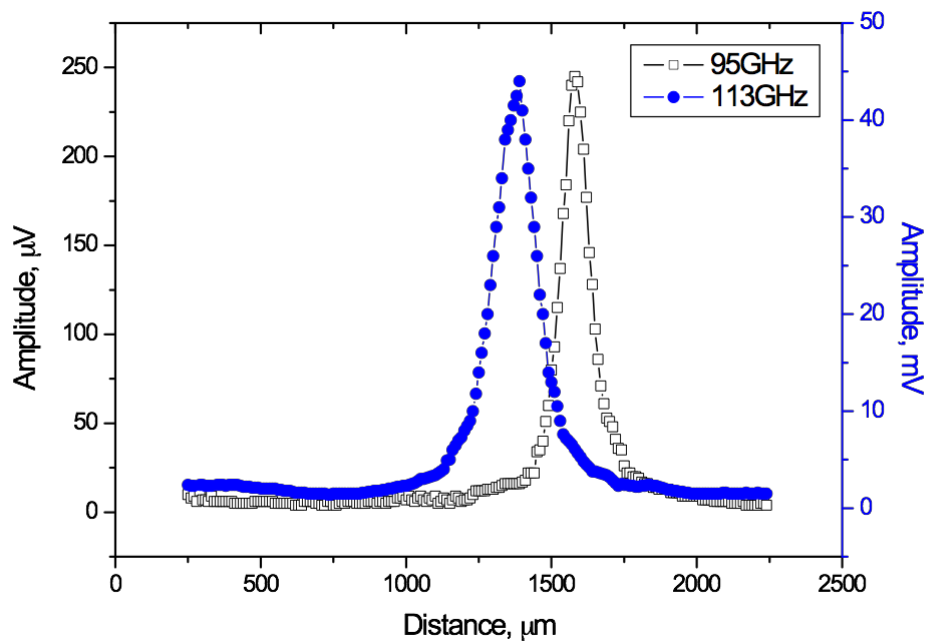


Рис.5. Алюминиевый фильтр на стеклянной подложке.

Измерения проводились путем изменения расстояния между сетками фильтра.

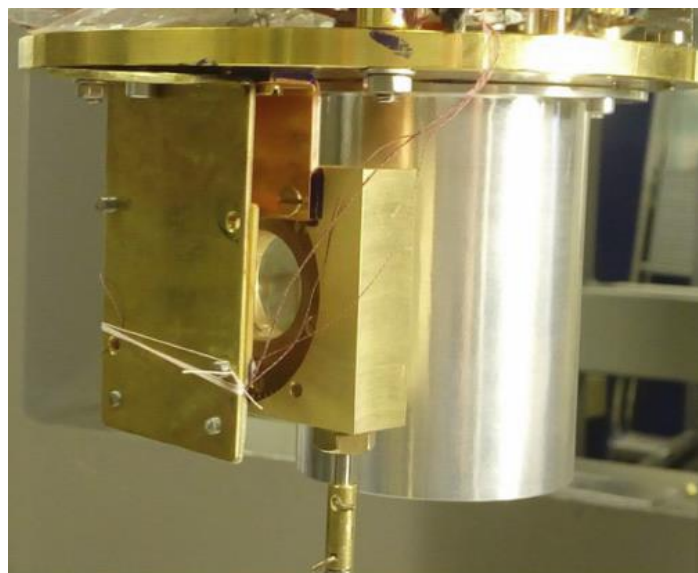


Рис.6. Черное тело, перестраиваемый фильтр, измеряемый образец внутри криостата.

Перестраиваемый спектральный фильтр был использован для измерения отклика болометра. В качестве излучателя было использовано быстрое черное тело на сапфировой подложке, что позволило работать при частоте модуляции 20 Гц.

Для перемещения сеток внутри криостата разработана конструкция червячного привода, подсоединенного к тяге фильтра длинным валом из тонкостенной нержавеющей трубки, Рис.6.

Был измерен отклик болометра при облучении черным телом внутри криостата, Рис. 7.

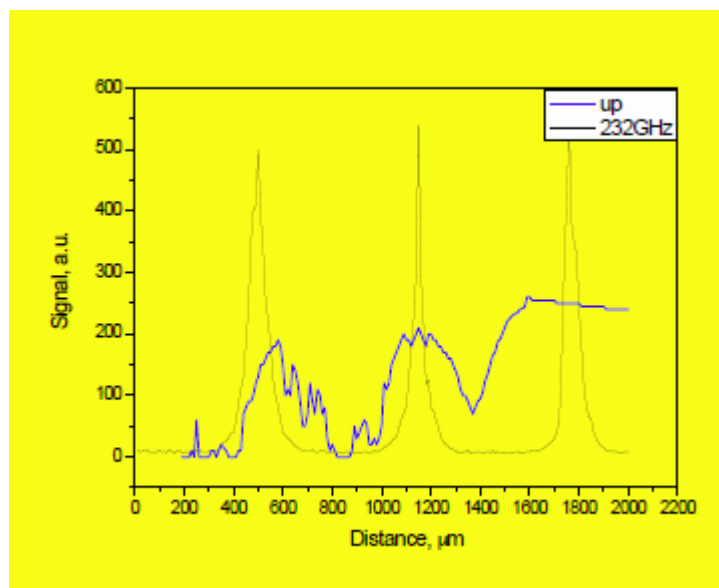


Рис.7. Отклик болометра при облучении черным телом в криостате при 0.273 К.

#### 4. Выводы

Нами был разработан и изготовлен перестраиваемый сеточный фильтр подходящий для работы с планковским источником черного тела на сапфировой подложке. Получена средняя добротность такого фильтра 25 и величина пропускания более 50% в полосе частот от 95 до 400 ГГц.

На частоте 300ГГц уровень пропускания при моделировании составил 0.65, что согласуется с экспериментом. Отличия от эксперимента, в первую очередь, объясняются тем, что в расчетах исследовалась бесконечная периодическая структура, не было потерь на краях и эффектов, связанных с неоднородностью поля.

Для перестройки фильтра внутри криостата мы использовали червячную передачу, которая позволила достичь точности перестройки 10 мкм/оборот (6ГГц/оборот).

### **Литература**

1. Culshaw, W. High Resolution Millimeter Wave Fabry-Perot Interferometer // Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions volume: 8 , issue: 2, p. 182 - 189

2. Ulrich, R. ; Renk, K.F. ; Genzel, L. Tunable Submillimeter Interferometers of the Fabry-Perot Type // Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, volume:11 , issue: 5, p. 363 – 371.

#### **Ссылка на статью:**

Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для калибровки высокочувствительных болометров. А.М.Чекушкин, Р.А.Юсупов, В.В.Завьялов, Л.С.Кузьмин, М.А.Тарасов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/11/text.pdf>