

621.372.542.29

## **ШИРОКОПОЛОСНЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ФИЛЬТР ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ НАНОБОЛОМЕТРОВ**

**А. А. Кузьмин, О. В. Корюкин, С. В. Шитов, А. Г. Коваленко**

**Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН**

Получена 16 февраля 2011 г.

**Аннотация.** Разработана концепция, создана технология изготовления и проведены экспериментальные исследования нового распределенного широкополосного фильтра низких частот для криогенных наноболометров с полосой заграждения 0,1 – 20 ГГц на основе комбинации интегрального тонкопленочного конденсатора с демпфирующей линией передачи на основе витой пары из манганина. Уровень заграждения составил 50 дБ на частоте 1 ГГц и более 80 дБ на частоте 20 ГГц, что ставит новый фильтр на один уровень с лучшими мировыми аналогами, оставляя за новой разработкой преимущество в простоте изготовления и серийной повторяемости при использовании технологического цикла, совместимого с производством криогенных наноболометров.

**Ключевые слова:** фильтр помех, витая пара, сверхпроводниковый болометр, наноболометр, тонкопленочный конденсатор.

**Abstract** We report the developed concept, fabrication technology and experimental studies of the new distributed broadband low-pass filter for cryogenic nanobolometers with the bandwidth 0.1 - 20 GHz based on a combination of an integral thin-film capacitor with damping transmission line based on a manganese twisted pair. Attenuation reached 50 dB at 1 GHz and 80 dB at 20 GHz, which is the same as in the best world analogues, but fabrication is more simple and repeatable when using technology cycle that is compatible with the technology of cryogenic nanobolometers.

**Key words:** cryogenic filter, superconducting bolometer, thin-film capacitor.

## **Введение**

Для достижения предельно высокой чувствительности низкотемпературных болометров [1] необходимо самое тщательное подавление индустриальных помех в цепях смещения [2]. Необходимо также, чтобы сам фильтр имел как можно меньшую температуру и теплопроводность, тем самым не добавляя ни тепловой нагрузки криорефрижератору, ни электрических шумов в измерительный канал [3]. Ещё одним важным параметром является слабая зависимость характеристик фильтра от температуры, так как детальное тестирование такого устройства в условиях сверхнизких температур затруднительно. Попытки изготовить фильтр в виде компактного модуля могут приводить к утечке сигналов, особенно в области высоких частот, за счет паразитных реактивностей близко расположенных входных и выходных цепей, а также из-за внутренних резонансов.

## **Концепция фильтра**

Фильтр в целом является распределенным в области высоких частот, что препятствует возникновению как резонансных мод, так и паразитных утечек с его входа на выход. В качестве блокирующего конденсатора была использована тонкопленочная структура на подложке из кремния; она может быть выполнена на одном чипе с сенсором. Размеры планарного конденсатора выбраны так, чтобы в нужной нам области частот он не имел внутренних резонансов. В качестве демпфирующей линии, которая в пределе низких частот эквивалентна распределенному (проволочному) резистору, предложено использовать витую пару из высокорезистивного материала. Манганин был выбран благодаря тому, что его удельное сопротивление практически не зависит от температуры. Провод из манганина практически не создает термо-ЭДС с медью в отличие, например, от константана. Согласно расчетам, такой фильтр может создавать загашение 60 дБ на частоте 1 ГГц и, при этом, его характеристики не будут зависеть от температуры вплоть до температур порядка 0,1 К. Для сравнения

упомянем, что точный расчет характеристик ближайшего аналога, порошковых фильтров [4], весьма затруднен.

### Моделирование фильтра

Применялось стандартное программное обеспечение – пакет численного электромагнитного анализа. Структура, моделирующая конденсатор, имеет следующие параметры:

- Металлизация верхнего и нижнего слоя конденсатора – пленка из палладия толщиной 100 нм с удельным сопротивлением 0,1 мкОм·м.
- Изолирующий слой конденсатора - диоксид кремния толщиной 200 нм и диэлектрической постоянной 4,2.
- Подложка структуры - монокристаллический кремний с диэлектрической постоянной 12,9.
- Область перекрытия электродов конденсатора - 1000×1000 мкм.
- Ширина подводящих контактов - 100 мкм.
- Расчетная емкость конденсатора - 176 пФ на частоте 10 МГц.

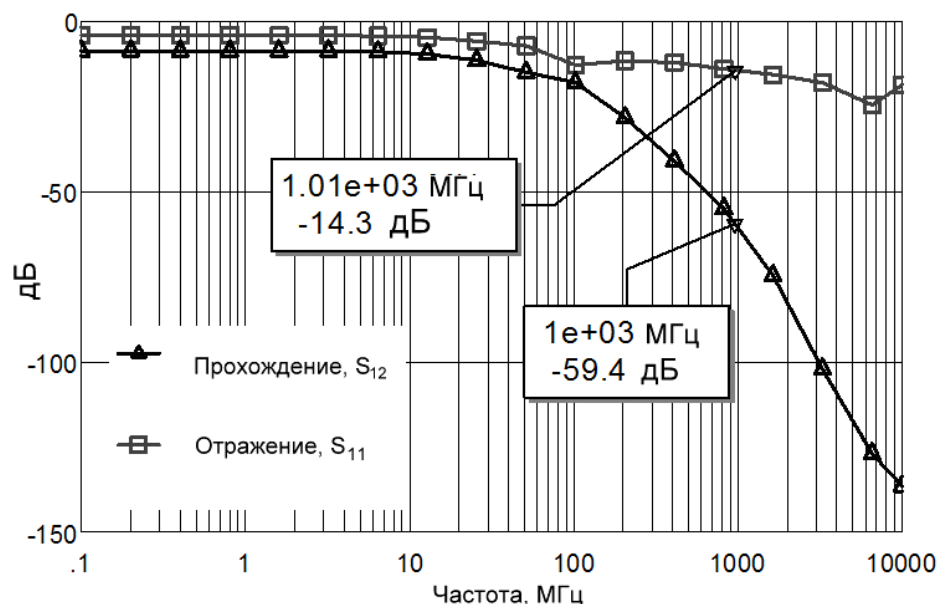


Рис.1 Расчетное значение ослабления и отражения сигнала при прохождении через фильтр.

## Изготовление фильтра.

Тонкопленочный конденсатор изготавливался с помощью методов электронно-лучевой литографии и магнетронного напыления. Был разработан цифровой шаблон приемного элемента с необходимой дополнительной инфраструктурой, необходимой для процесса электронной литографии, в виде выводов и маркерных крестов (Рис. 2).

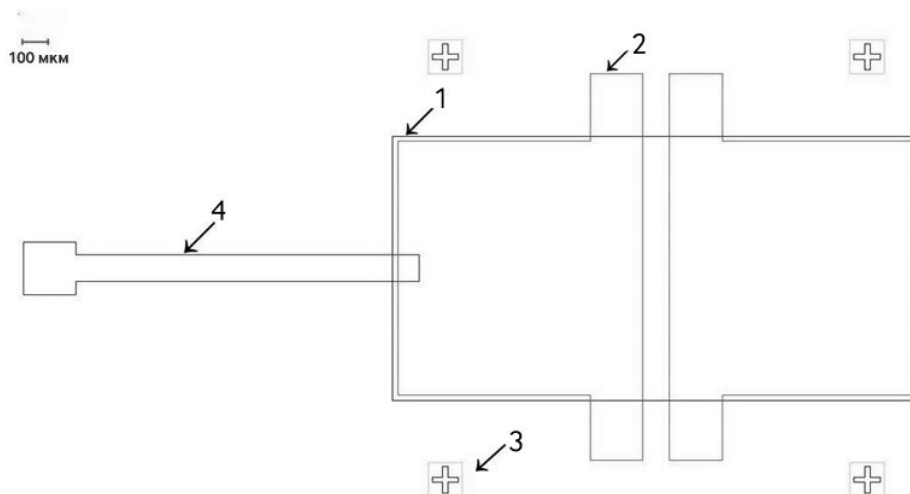


Рис. 2. Общий вид цифрового шаблона чип-конденсатора, предназначенный для электронно-лучевой литографии; 1 – нижний слой металлизации, лежащий непосредственно на подложке (не показана); 2 – верхний слой металлизации и контактные площадки для разварки входной (и выходной) витых пар; 3 – маркерные знаки совмещения для электронного литографа; 4 – контактный отвод от нижнего слоя металлизации для снятия плавающего потенциала (для предотвращения проникновения так называемой синфазной помехи).

Витая пара длиной один метр изготавливалась из манганинового провода диаметром 0,1 мм и удельным сопротивлением 0,49 мкОм·м. Плотность скручивания проводов составила 2 витка/см.

## Описание технологического процесса изготовления тонкопленочного конденсатора

В качестве подложки использовалась кремниевая пластина ориентации (100). Кремний подложки имеет высокое удельное сопротивление, 10 кОм·см, и работает в охлаждаемых цепях СВЧ аналогично высококачественному

диэлектрику. Типичный размер пластины – 15 x 15 мм. Готовый конденсатор представлен на рис. 3.

1. Формирование нижнего слоя металлизации:

- нанесение двух слоев резиста: РММА 2% и Sorolymet 6% при скорости вращения подложки 3000 об/с; сушка каждого слоя на нагреваемом столике при 160°C в течении 15 мин;
- экспонирование электронным лучом при ускоряющем напряжении 5 кВ, ток – 1 нА, поле – 2 мм<sup>2</sup>, площадная доза – 60 мкКл/см<sup>2</sup>;
- проявление в проявителе МІВК:ІРА (1:3) - 30 с, ополаскивание 10 с;
- магнетронное напыление двухслойной пленки Ti/Pd (0,5/100 нм); мощность магнетрона – 200 Вт, давление аргона - 6·10<sup>-3</sup> мбар, расстояние до мишени – 80 мм;
- взрывная литография в DMFA при одновременном ультразвуковом воздействии.

2. Формирование диэлектрического слоя:

- чистка подложки в разогретых органических растворителях при одновременном ультразвуковом воздействии;
- затенение области контактной площадки с помощью теневой маски;
- предварительная откачка до - 5·10<sup>-7</sup> мбар. чистка в ВЧ плазме аргона,
- магнетронное напыление SiO<sub>2</sub> (200 нм), мощность магнетрона – 200 Вт; давление аргона - 5·10<sup>-3</sup> мбар, расстояние до мишени – 80 мм, скорость напыления ~ 0,2 нм /с;
- взрывная литография в DMFA при одновременном ультразвуковом воздействии.

3. Формирование верхнего слоя металлизации:

- нанесение двухслойного резиста РММА 2% и Sorolymet 6% на скорости 4000 об/с. Сушка каждого слоя на hot plate в течении 15 мин. при 160° С;
- экспонирование с совмещением по маркерам на ускоряющем напряжении 10 кВ, ток – 1 нА, поле – 2 мм<sup>2</sup>, площадная доза – 80 мкКл/см<sup>2</sup>;

- проявление в проявителе МІВК:ІРА (1:3) - 30 с, ополаскивание 10 с;
- магнетронное напыление Ti/Pd (0,5/250 нм); мощность магнетрона – 200 Вт, давление аргона -  $6 \cdot 10^{-3}$  мбар, расстояние до мишени – 80 мм; Скорость напыления ~ 3 нм /с;
- взрывная литография в DMFA при одновременном ультразвуковом воздействии.

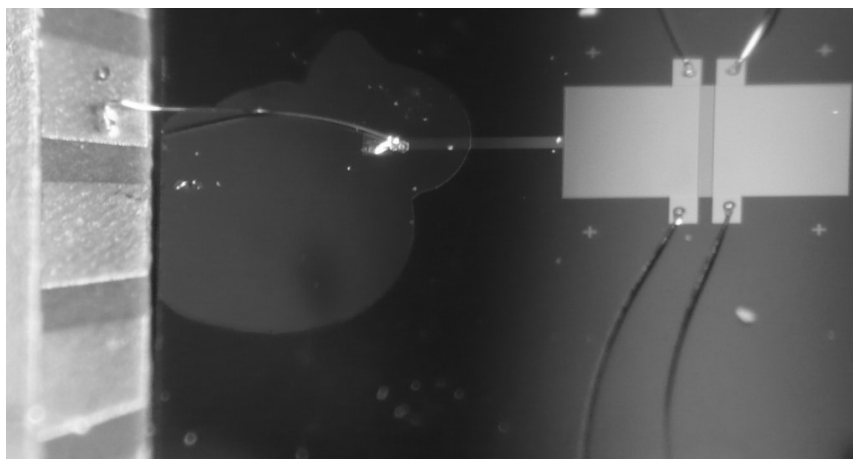


Рис.3. Общий вид чип-конденсатора через оптический микроскоп. Конденсатор установлен на плате-держателе и разварен с помощью алюминиевых бондов к контактным площадкам платы-держателя, к которым в свою очередь припаяны входная и выходная витые пары из манганина.

### **Экспериментальное исследование**

Прибор физически состоит из нескольких частей. Витая пара из манганина, подсоединенная с одной стороны к входному разъему (криостата), а с другой – к печатной плате-держателю чип-конденсатора, выполняет *дополнительную* роль межсоединения. Другая часть – это плата-держатель с чип-конденсатором, предназначенная для закрепления витой пары и последующей разварки ее проводников на тонкопленочный чип-конденсатор, а также для его заземления (см. рис. 3).

В сборе чип-конденсатор, установленный в плату-держатель, подключался к двум витым парам: к длинной (около 1 м) со стороны входа и к короткой (около 10 см) – со стороны выхода. К входному и выходному концам

витых пар припаивались коаксиальные разъемы типа SMA, с помощью которых фильтр в сборе подсоединялся к измерительной системе. Никаких корректировок на переход с симметричной волноведущей линии (витая пара) на не симметричную (коаксиальный кабель) не делалось.

Характеристики изготовленных тестовых RC-фильтров были исследованы на векторном анализаторе цепей Agilent PNA-X N5242A (диапазон рабочих частот 10 МГц – 26,5 ГГц). Частотные зависимости прохождения сигнала представлены на рис 4. Ослабление сигнала составило около -50 дБ на частоте 1 ГГц и более 80 дБ на частотах около 20 ГГц. Отметим, что измеренные характеристики соответствуют случаю отключенного электрода заземления (см. рис.2). В связи с этим синфазная мода, возникающая вследствие нескомпенсированного соединения линий с разной симметрией, скорее всего, приводит к значительному повышению уровня утечки, особенно в высокочастотной области диапазона. С высокой долей вероятности можно предположить, что при тщательной установке фильтра его характеристики окажутся лучше приведенных на рис. 4.

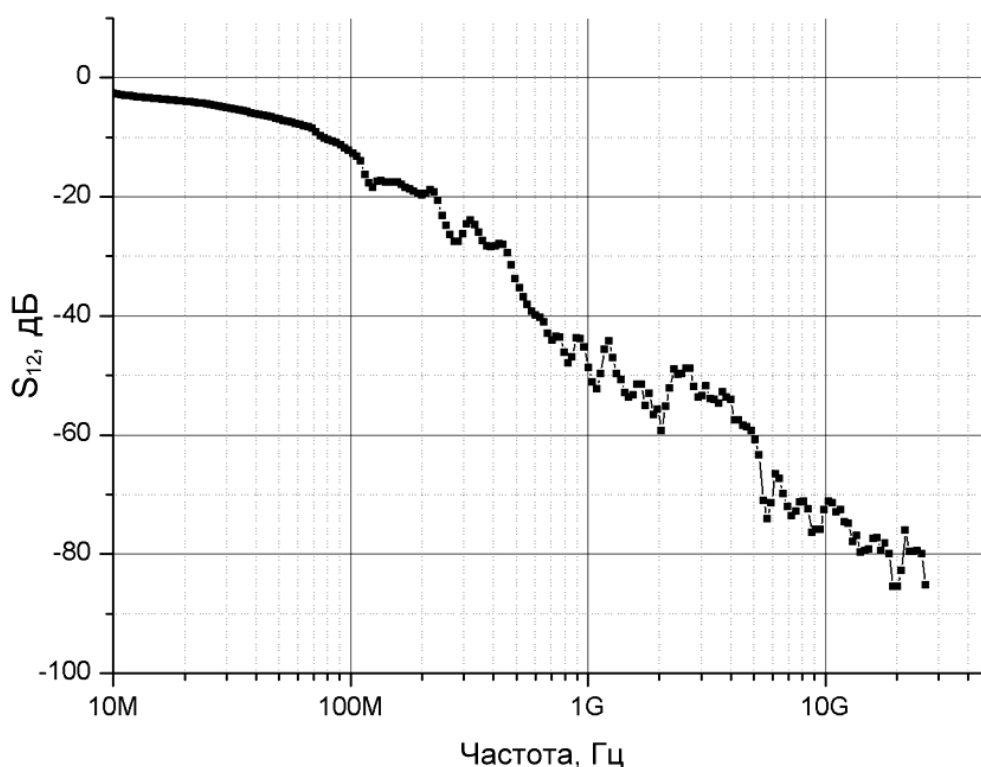


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента прохождения сигнала с порта 1 на порт 2 анализатора цепей ( $S_{12}$ ).

## Литература

1. *Karasik B.S., Pereverzev S.V., Wei J. et al.* Antenna-coupled hot-electron direct detectors for submillimeter astronomy // Proc. SPIE. 2008. V. 7020. Paper 7020-0E.
2. *K. D. Irwin.* An application of electrothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection // Appl. Phys. Lett. 66, 1998 (1995).
3. *Hélène le Sueur and Philippe Joyez.* Microfabricated electromagnetic filters for millikelvin experiments. // Rev. Sci. Instrum. 77, 115102 (2006).
4. *K. Bladh, D. Gunnarsson, E. Hürfeld, S. Devi, C. Kristoffersson, B. Smålander, S. Pehrson, T. Claeson, P. Delsing, M. Taslakov .* Comparison of cryogenic filters for use in single electronics experiments // Rev. Sci. Instrum. 74, 1323 (2003).