

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НИОБИЕВЫХ МИКРОСТРУКТУР ДЛЯ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ БОЛОМЕТРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

А. В. Уваров, А. А. Кузьмин, С. В. Шитов, А. Г. Коваленко

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

Получена 24 февраля 2011 г.

Аннотация: Предложено использовать комнатный ниобиевый болометр для электродинамического замещения криогенного приемника в интегральной антенной структуре с целью проведения натуральных измерений по исследованию свойств и настройке квазиоптических систем высокочувствительных приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Разработана технология изготовления, изготовлены и изучены свойства опытных образцов болометров, на основе тонкопленочного ниобия.

Ключевые слова: ниобиевый болометр, миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн, интегральная иммерсионная линзовая антенна, электронно-лучевая литография.

Abstract: We report the fabrication technology and investigation of room temperature niobium micro bolometer for electrodynamic substitution of cryogenic detector in integrated immersion lens antennas to study their radiation patterns, properties and configuration of quasi-optical systems.

Key words: niobium bolometer millimeter and sub millimeter wavelengths, the integrated immersion lens antenna, electron-beam lithography.

Введение

Подход к конструированию высокочувствительных приемников и детекторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн основанный на использовании интегральной компоновки, в том числе с применением интегральных планарных антенн [1], активно развивается в

настоящее время. Известны опытные образцы смесителей на основе сверхпроводниковых туннельных переходов типа СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) и смесителей на болометрах с горячими электронами, которые являются наиболее чувствительными преобразователями частоты вниз в диапазонах 100-1000 ГГц и 1-5 ТГц соответственно, а также детекторов на эффекте высокочастотной кинетической индуктивности и болометров на краю перехода в сверхпроводящее состояние, интегрированных в планарные антенны. Исследование и оптимизация характеристик, как самой подобной антенны с интегрально включенным охлаждаемым чувствительным элементом, так и квазиоптической системы приемного устройства в целом – непростая задача, которая осложняется необходимостью проведения измерений в криогенных условиях, при температурах от 4К и ниже.

В работе [1] свойства интегральной иммерсионной линзовой антенны исследовались с помощью болометра на основе тонкой пленки висмута, включенного в антенну. Использование в качестве чувствительного элемента интегрально включенного в планарную антенну прямого детектора обосновано значительно более простой схемой смещения и считывания сигнала по сравнению с гетеродинным приемником. Наиболее чувствительными прямыми детекторами миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн на сегодняшний день являются диоды с барьером Шотки, болометры, работающие на эффекте температурной зависимости сопротивления таких материалов как ниобий или висмут. Последние являются более простым в изготовлении решением, обеспечивающим чувствительность достаточную для проведения измерений с типичными лабораторными источниками излучения субмиллиметрового диапазона, такими как лампа обратной волны или диод Ганна. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию детекторов на основе болометра, выполненного в виде тонкой пленки ниобия. Выбор ниобия в качестве материала болометра обусловлен меньшим вкладом в эквивалентную шумовую мощность $1/f$ -шума, продемонстрированного в работе [2], большим накопленным опытом работы с этим материалом, в том числе

отработанной технологией нанесения и изготовления структур субмикронных размеров. Подобный детектор интегрируется в планарные интегральные антенны и хорошо подходит для электродинамического замещения высокочувствительных охлаждаемых детекторов, позволяя проводить целый комплекс исследований по изучению свойств антенно-фидерной системы и ее юстировки при комнатной температуре.

Описание принципа работы

В работе [2] предложен болометр, представляющий собой тонкую пленку ниобия площадью $\sim 1 \text{ мкм}^2$ нанесенную на кремниевую подложку с теплоизолирующим слоем диоксида кремния (SiO_2). Принцип работы болометра заключается в следующем. При прохождении СВЧ сигнала через пленку ниобия за счет наличия сопротивления его температура будет увеличиваться, вследствие этого будет меняться и само сопротивление микропленки. Это изменение сопротивления наиболее легко наблюдать по изменению напряжения на болометре при подаче через него постоянного стабилизированного тока смещения.

Вольт-ваттная чувствительность болометра может быть оценена согласно [3] из соотношения:

$$S_A = \frac{\alpha/R_0}{G_e \sqrt{1+(\omega_S \tau_e)^2}} \approx \frac{\alpha/R_0}{G_e} \approx \beta J, \quad (1)$$

где R_0 , $\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ и τ_e – сопротивление, температурный коэффициент (далее по тексту – ТКС) сопротивления и характерная постоянная времени микромостика болометра, J – ток смещения, G_e – эффективная теплопроводности термо-шунта болометра, ω_S – круговая частота модуляции болометра, β – вольт-ваттная чувствительность болометра приведенная к единичному току смещения. Вклад в эффективную теплопроводность термо-шунта вносит как теплопроводность (G) отдельных элементов крепления (подвеса) болометра: подложки и подводящих контактных берегов, – так и эффект положительной

обратной связи [3], возникающий вследствие дополнительного разогрева болометра токовым смещением вызванного изменением его сопротивления под действием детектируемого СВЧ излучения:

$$G_s = G - \alpha R_0 J^2 \quad (2)$$

Конструкция и технология изготовления опытных образцов болометра

Экспериментальные структуры болометров были изготовлены на кремниевых пластинах покрытых 430 нм слоем SiO₂, который формировался магнетронным распылением. Слой диэлектрика необходим для предотвращения образования барьера Шотки и для улучшения термоизоляции болометра.

Болометр формировался из ниобиевой пленки толщиной 20 нм, которая осаждалась с помощью магнетронного напыления. Топология болометра формировалась методом взрывной литографии (lift-off) который является весьма простым и удобным. Маска создавалась в резисте PMMA электронно-лучевым экспонированием на РЭМ JEOL JSM6460 с внешним литографическим расширением NanoMaker. Золотые контакты к ниобиевым пленкам изготавливались так же с помощью взрывной литографии и магнетронного напыления. Для улучшения адгезии контактов перед напылением золота в одном вакууме напылялся подслоя титана.

Одним из критичных этапов процесса изготовления оказалась постэкспозиционная сушка резистной маски для напыления ниобия. При магнетронном напылении резистная маска из PMMA заметно нагревается. В результате нагрева резиста происходит его частичная декомпозиция и выделение летучих углеводородов и CO₂. Это приводит к загрязнению ниобиевой пленки и изменению ее удельного сопротивления. Длительная постэкспозиционная сушка PMMA при температуре 105°C значительно уменьшает эффект контаминации тонких ниобиевых пленок. Так же удельное сопротивление оказалось чувствительно к остаточному давлению в камере

перед напылением. Для получения пленок необходимого качества, камера предварительно откачивалась до 10^{-8} мбар.



Рис. 1. Фотография центральной части тестовой структуры, сделанная в оптическом микроскопе. Видены ниобиевый мостик размером 2×1 мкм и золотые подводящие контакты.

Процесс изготовления структур является двух стадийным *ex-situ* процессом и поэтому для формирования интерфейса с малым контактным сопротивлением производилась чистка поверхности ниобиевой пленки от естественного окисла. Для этого перед напылением контактов в камеру напускался аргон до давления $5 \cdot 10^{-3}$ мбар и зажигалась ВЧ плазма с напряжением смещения 100 В. Таким образом производилась чистка медленным распылением в течение 3 мин. (soft etching).

Метод измерения и характеристики болометра

Как показано в работе [3] в приближении слабой обратной связи ($\beta J^2 \ll 1$) дифференциальное сопротивление болометра может быть представлено в виде:

$$Z(J) = \frac{R(1+\beta J^2)}{(1-\beta J^2)} \approx R(1 + 2\beta J^2) \quad (3)$$

Таким образом, приведенная вольт-ваттная чувствительность может быть найдена как тангенс угла наклона графика зависимости дифференциального сопротивления болометра от тока смещения: $Z = Z(J^2)$. Для точного измерения

дифференциального сопротивления при различных режимах работы болометра по току смещения была собрана схема изображенная на рис. 2. Подача токового смещения на болометра осуществлялось с выхода АЦП лабораторного синхронного детектора SRS SR830, обозначенного на схеме как AUX OUT через ограничительный резистор R_1 , а переменного измерительного тока с выхода внутреннего генератора синусоидального сигнала Sine OUT, через резистор R_2 . Измерение дифференциального сопротивления выполнялось с помощью синхронного детектора напряжения методом сравнения с падением напряжения на калиброванной сопротивлении R_3 . Используемый метод позволил измерить дифференциальное сопротивление болометра с точностью $\sim 0,5\%$ и ток смещения с точностью $\sim 2\%$.

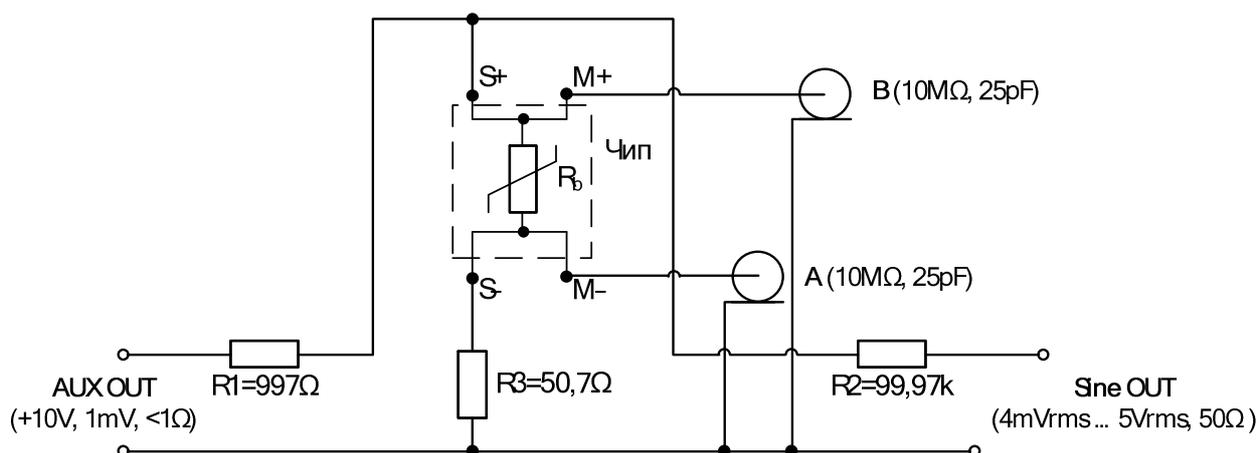


Рис. 2. Схема включения образцов болометров для измерения вольт-ваттной чувствительности с помощью лабораторного цифрового синхронного детектора Stanford Research Systems SR830.

Измерение сопротивления микро-пленки ниобия и ее температурного коэффициента сопротивления осуществлялось за счет измерения дифференциального сопротивления при нулевом токе смещения и внешнем подогреве микросхемы с болометром. Оценка эффективной теплопроводность термо-шунта болометра производилась с помощью соотношения (1) с использованием найденных в ходе предыдущих экспериментов величин (сопротивления, ТКС и приведенной чувствительности болометра).

Приведенное на рис. 3 сравнение экспериментальной зависимости дифференциального сопротивления болометра от тока смещения с модельной подтверждает применимость выбранного приближения. Итоговые значения характеристик болометра приведены в таблице 1.

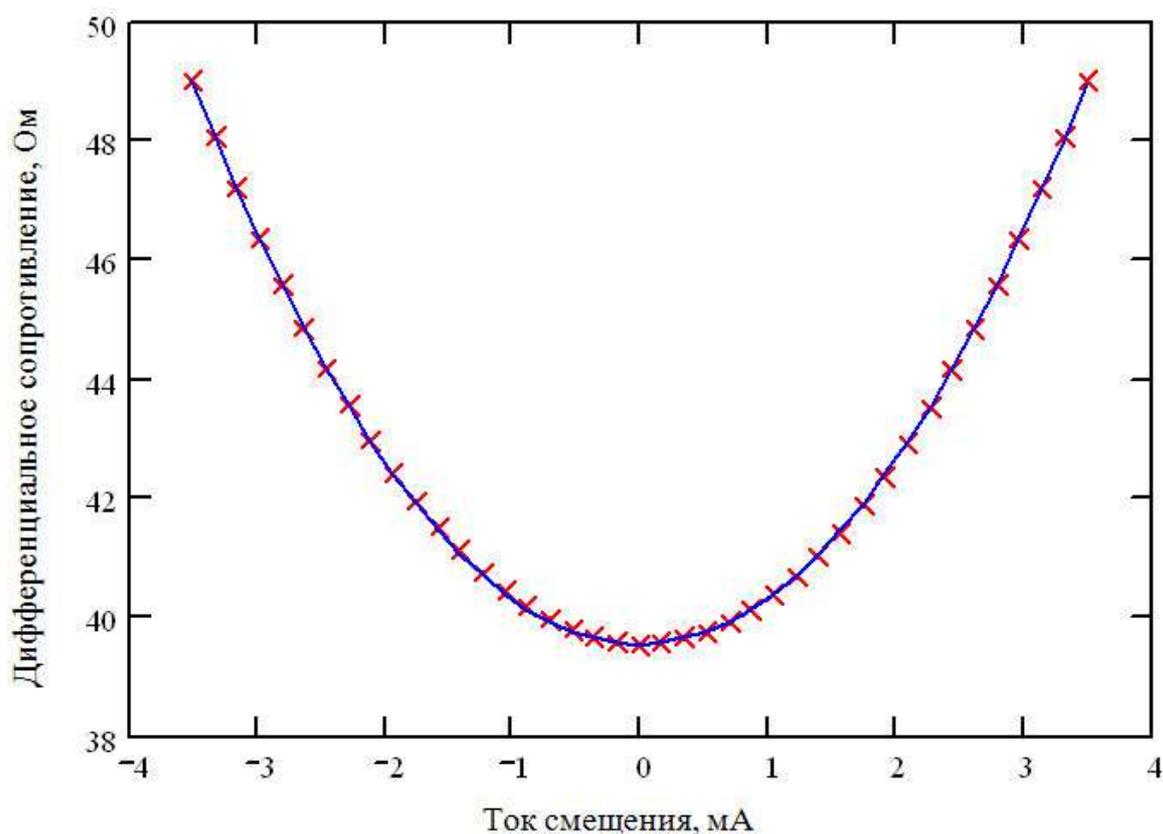


Рис. 3. График зависимости дифференциального сопротивления болометра от тока смещения. Сплошная линия соответствует модельной характеристике, маркерные перекрестия – измеренные значения.

Заметим, что измеренное сопротивление на квадрат площади поверхности пленки ниобия оказалось равным 20 ± 5 Ом, что находится в хорошем соответствии с результатами, полученными в работе [2] и превышает табличное значение сопротивления объемного образца ниобия в ~ 3 раза. В свою очередь измеренное значение ТКС – в ~ 3 раза меньше ТКС объемного образца. Значительное увеличение сопротивления микро-образцов относительно табличного значения объясняется наличием большого количества дефектов в пленке, формируемой на достаточно шероховатой подложке из осажденного

Таблица 1. Параметры и характеристики экспериментального образца тонкопленочного ниобиевого болометра.

Параметр	Значение
Размеры болометра (длина × ширина × толщина)	1мкм × 2мкм × 20нм
Слой изоляции	430 нм (SiO ₂)
Сопротивление, R_0 (при комнатной температуре)	39,5±0,2 Ом (20±5 Ом на квадрат)
ТКС, α	(1,4±0,1)·10 ⁻³ 1/К
Приведенная чувствительность, β	(9,7±0,3)·10 ³ В/(Вт·А)
Ток смещения, I_{bais}	3 мА
Дифференциальное сопротивление в рабочей точке (при токе смещения I_{bais})	46,5 Ом
Вольт-ваттная чувствительность $S_e = \beta \cdot I_{bais}$	29 В/Вт
Рабочая температура (при I_{bais}) $T = (Z - R_0) / \alpha R_0 + T_0$	125 °С
Теплопроводность термо-шунта болометра $G_s = (\alpha R_0) / \beta$	(5,7±0,4)·10 ⁻⁶ Вт/К
Постоянная времени (оценка из табличного значения теплоемкости объемного образца)	0,02 мкс
Эквивалентная шумовая мощность, NEP	$NEP_J = 3,3 \cdot 10^{-11}$ Вт/Гц ^{1/2} $NEP_{ph} = 7,8 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц ^{1/2} $NEP_{1/f} = 3,1 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц ^{1/2} (при $f_s = 100$ Гц)

магнетронным напылением оксида кремния. Пропорциональное отличие измеряемых значений ТКС и сопротивления от табличных может быть объяснено при рассмотрении нескольких механизмов рассеяния квази-импульса электрона: на дефектах пленки ниобия и за счет электрон-фононного взаимодействия. В таком случае удельное сопротивление микро-пленки болометра может быть записано в виде:

$$\rho = \frac{m^*}{ne^2} \left(\frac{1}{\tau_{def}} + \frac{1}{\tau_{e-ph}} \right), \quad (4)$$

где m^* , n и e – эффективная масса, концентрация и заряд электронов, а τ_{def} и τ_{e-ph} – характерное время рассеяния квази-импульса на дефектах пленки и фононах соответственно. Очевидно, что производные по температуре удельного сопротивления объемного образца (ρ_{bulk}) и тонкой пленки ниобия (ρ_{film}) будут равны: $\frac{d\rho_{bulk}}{dT} = \frac{d\rho_{film}}{dT}$, – так как от температуры зависит только характерное время релаксации импульса на фононах, которое в первом приближении можно считать одинаковым для пленки и объемного образца материала. Откуда получается наблюдаемое на практике соотношение между значениями ТКС и сопротивления объемных образцов и пленок ниобия:

$$\frac{\alpha_{bulk}}{\alpha_{film}} = \frac{\rho_{film}}{\rho_{bulk}} \quad (5)$$

Как показано в работах [2],[3] основной вклад в шумы болометра обусловлен следующими факторами: Джонсоновским шумом (далее обозначается индексом – J), дробовым шумом фононной теплопроводности (ph) и $1/f$ – шумом ($1/f$). С учетом этого эквивалентная шумовая мощность болометра может быть записана в виде:

$$NEP = S_v^{bol}/S_A = \sqrt{(S_v^J)^2 + (S_v^{ph})^2 + (S_v^{1/f})^2} / S_A, \quad (6)$$

где спектральные плотности шумового напряжения (среднеквадратичного отклонения) выражается соотношениями:

$$S_v^J = \sqrt{4kTR_0}, \quad (7)$$

$$S_v^{ph} = S_A \sqrt{4kT^2 G}, \quad (8)$$

$$S_v^{1/f} = m \cdot \frac{IR_0}{\sqrt{f_s}}. \quad (9)$$

Вклады Джонсоновского (теплового) и фононного шумов в эквивалентную шумовую мощность болометра могут быть оценены исходя из измеренных значений параметров болометра (таблица 1). Для оценки вклада $1/f$ -шума было проведено измерение зависимости спектральной плотности шумового напряжения от тока смещения. В качестве малошумящего источника токового смещения использовалась батарея напряжением 9,6 В с последовательно включенным магазином ограничительных сопротивлений. Измерение

спектральной плотности шумового напряжения на болометре производилось так же с помощью цифрового синхронного детектора Stanford Research SR830 на частоте модуляции 8 Гц. При этом шумы самого синхронного детектора (малозумящего усилителя входного каскада) составили $\sim 20 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Итоговая зависимость спектральной плотност шумового напряжения на болометре скомпенсированная на шумы измерительной системы от тока смещения приведена на рис. 4 и описывается эмпирическим соотношением:

$$S_v^{1/f} = 0,77 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{I_{R_0}}{\sqrt{f_s}} \quad (10)$$

Итоговая оценка вклада 1/f-шума в эквивалентную шумовую мощность детектора выполнена для частоты модуляции в 100 Гц – как наиболее просто реализуемой для большинства измерительных систем.

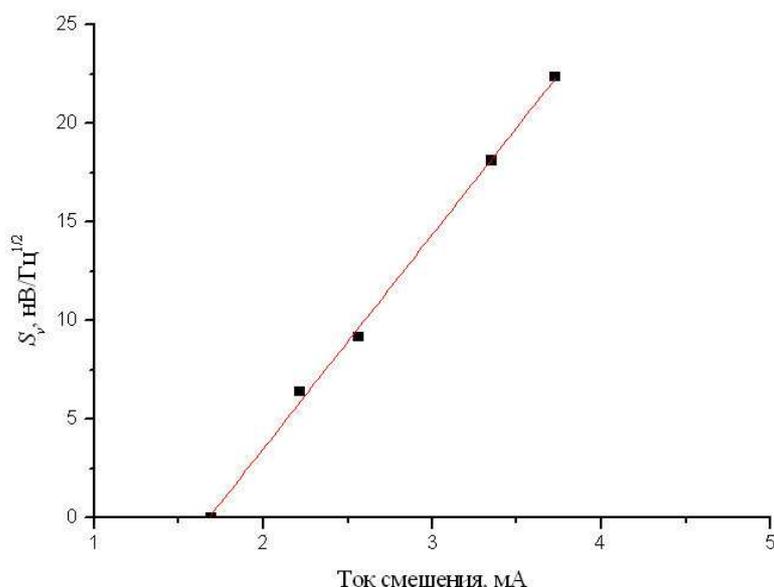


Рис. 4. Зависимость спектральной плотности шумового напряжения на болометре от тока смещения. Измерения проводились при частоте модуляции 8 Гц.

Заключение

Разработан прототип поглотителей на основе тонкопленочного ниобиевого микромостика для болометра, работающего при комнатной температуре и предназначенного для электродинамического замещения низкотемпературных болометров терагерцового диапазона при тестировании и настройке квазиоптической системы радиометра. Приведенная к единичному току смещения электрически измеренная чувствительность прототипа

составила $\sim 10^4$ В / Вт А, что при токе смещения 3 мА обеспечивает вольт-ваттную чувствительность 30 В/Вт. Оцененная предельная шумовая мощность составила $\sim 10^{-10}$ Вт / Гц^{1/2}, что сравнимо с чувствительностью оптоакустического преобразователя (ячейки Голея) и позволяет изготовить детектор для широкого класса задач, включая лабораторные исследования, медицинскую диагностику и безопасность.

Литература

1. *Filipovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M., Double-Slot Antennas on Extended Hemispherical and Elliptical Silicon Dielectric Lenses // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1993. V. 41. No. 10. Pp. 1738-1749.*
2. *MacDonald M. E., Grossman E. N. Niobium Microbolometers for Far-Infrared Detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1995. Vol. 43. N. 4. Pp. 893-896.*
3. *Richards P.L., Bolometers for Infrared and Millimeter Waves // Journal of Applied Physics. 1994. Vol. 76. No. 1. Pp. 1-24.*