

## НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 537.86

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР<sup>1</sup>

© 2016 г. К. И. Рудаков<sup>1,2,\*</sup>, М. Е. Парамонов<sup>1</sup>, П. Н. Дмитриев<sup>1</sup>,  
А. М. Барышев<sup>1,3</sup>, А. В. Худченко<sup>1,4</sup>, В. П. Кошелец<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая 11, стр. 7

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)  
Российская Федерация, 141700 Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

<sup>3</sup>Астрономический институт университета Гронингена, Нидерланды, 9747 Гронинген, Ландлевен, 12

<sup>4</sup>Нидерландский институт космических исследований Нидерланды, 9747 Гронинген, Ландлевен, 12

\*E-mail: kirill.i.rudakov@gmail.com

Поступила в редакцию 18.07.2016 г.

Спроектированы и изготовлены образцы СВЧ планарных устройств, позволяющие определить параметры изготавливаемых слоев, которые необходимы для корректного численного моделирования на основе теории Матгиса–Бардина и могут отличаться от табличных параметров используемых материалов.

DOI: 10.7868/S0033849416120214

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в мировом научном сообществе отмечается интерес к разработкам и исследованию приемных элементов и источников терагерцевого излучения ( $10^{11} \dots 10^{13}$  Гц), что соответствует длинам волн начиная от миллиметровых и заканчивая дальним ИК-диапазоном. Столь высокий интерес к терагерцевым технологиям можно объяснить широтой и актуальностью возможных областей их применения. В работе приведены примеры различных терагерцевых приемных устройств, разрабатываемых в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

В 2006 г. Нидерландским институтом космических исследований в рамках проекта CHAMP был разработан для телескопа APEX (Atacama Pathfinder Experiment) высокочувствительный приемник. Прибор, установленный на радиотелескопе в Чили, состоял из двух семипиксельных матриц [1, 2] гетеродинных приемников, работающих в диапазонах 600...720 и 790...950 ГГц, которые соответствуют окнам прозрачности атмосферы. В качестве высокочувствительных элементов приемников верхнего частотного диапазона были использованы смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) Nb–AlN–Nb [3], которые были

расположены в микрополосковой линии, образованной пленками NbTiN и Al. Существующие в настоящее время приемники верхнего частотного диапазона имеют сравнительно высокую шумовую температуру – порядка 400 К. Для улучшения чувствительности радиотелескопа был начат проект CHAMP\_HI+, цель которого – создание гетеродинного сверхпроводникового приемника диапазона 790...950 ГГц с шумовой температурой порядка 200 К.

Несколько лет назад в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках международного проекта Terahertz Limb Sounder (TELIS) [4, 5] был создан полностью сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) на основе структур Nb–AlN–NbN, который обеспечивает возможность плавной перестройки частоты интегрального генератора гетеродина в широком диапазоне частот (500...650 ГГц). В настоящее время ведется работа по повышению рабочих частот интегрального приемника до значений порядка 1 ТГц.

Для проведения расчета СВЧ-схем [6, 7] необходимо знать эффективные параметры изготавливаемых пленок, такие как удельная диэлектрическая проницаемость изолирующего слоя в микрополосковой линии, лондоновская глубина проникновения  $\lambda_L$ , проводимость сверхпроводника в нормальном состоянии по постоянному току (direct current – DC) в окрестности температуры перехода и температура перехода в сверхпроводящее со-

<sup>1</sup> Работа удостоена премии на конкурсе молодых ученых им. Ивана Анисимкина.

стояние ( $T_c$ ). Для моделей с учетом частотно-зависимых потерь [7, 8] требуются параметры  $T_c$  и DC-проводимость, а для моделей без учета СВЧ-потерь —  $\lambda_L$ ; эти параметры являются связанными друг с другом.

Названные параметры сильно зависят от используемой технологии изготовления образцов и часто отличны от табличных данных. Например, слой изолятора может состоять не из чистого диоксида кремния, а из смеси оксида и диоксида кремния в неизвестной пропорции, кроме того, имеющийся переходный слой между металлом электрода и диэлектриком изменяет эффективную диэлектрическую проницаемость.

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Для определения диэлектрической проницаемости было изготовлено несколько тестовых образцов (рис. 1) в виде плоских конденсаторов на основе структуры Nb–SiO<sub>2</sub>–Nb. Для коррекции ошибок определения диэлектрической проницаемости планарные емкости были изготовлены с разной площадью и одинаковой для каждого образца подложки, толщиной.

Для измерения толщины диэлектрического слоя использовали профилометр Tencor Alpha Step 200 Profilometer. В прецизионных прямых измерениях площади не было необходимости, так как относительная ошибка линейных размеров при изготовлении составила менее 1%.

Образец закрепляли в измерительной головке на конце длинной металлической трубки-“макалки” и погружали в дьюар с жидким гелием. Ввиду того, что измерения проводили по двухточечной схеме на частотах порядка сотен гигагерц, потребовалось учесть влияние сопротивлений и паразитной емкости проводов в опускаемой в гелий штанге. Использованным мультиметром генерировали низкочастотный сигнал фиксированной амплитуды и измеряли сопротивление внешней цепи. Оценочная емкость изготовленных конденсаторов составляла сотни пикофард, поэтому влияние сопротивлений подводящих проводов и контактов на частоте 100 Гц было незначительным. Для учета паразитных емкостей были проведены измерения собранной установки в гелии, но без исследуемого образца. Затем были проведены измерения калибровочной емкости величиной 330 пФ при гелиевой температуре (паразитная емкость подводящих проводов, металлической штанги и измерительной головки составила 100 пФ). На основании полученных результатов была определена относительная диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика. Она составила 4.1, что физически обоснован-

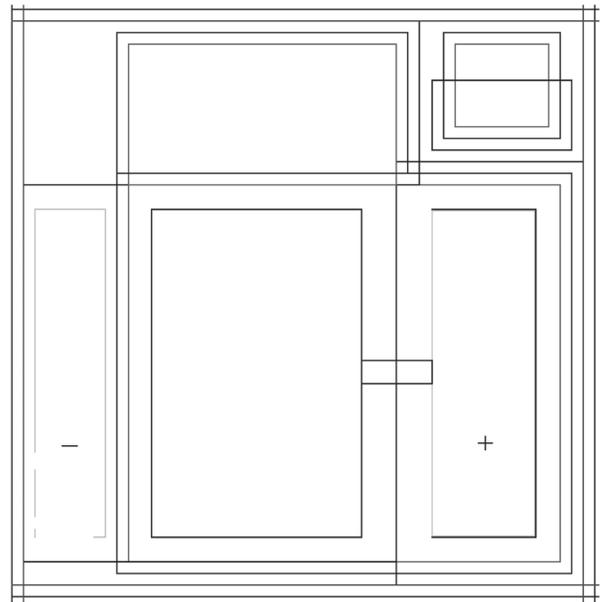


Рис. 1. Схема тестовой планарной емкости.

но, так как диэлектрическая проницаемость чистого оксида кремния составляет 5.6, а диоксида 3.8.

### 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ DC-ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК Al, NbTiN, Nb

Важнейшими параметрами являются также DC-проводимость сверхпроводника (Nb или NbTiN) и нормального металла (Al) в окрестности температуры перехода (для Nb и NbTiN) и величина  $T_c$ . Для определения этих параметров были изготовлены наборы тестовых полосок различной толщины на основе пленок Nb и NbTiN, напыляемых на буферный подслоя Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или SiO<sub>2</sub> на кремниевой подложке. Толщину и ширину образца измеряли профилометром, а сопротивление — по четырехточечной схеме. Полученные значения проводимости приведены в таблице. Для определения  $T_c$  в измерительную головку был встроен полупроводниковый термометр (см. таблицу).

Значения проводимости сверхпроводника и нормального металла

Образец	$T$ , К	DC-проводимость, См/м	$T_c$ , К
Nb	10	$2.21 \times 10^7$	9
NbTiN	15	$9 \times 10^5$	14
Al	4.2	$1.89 \times 10^8$	—

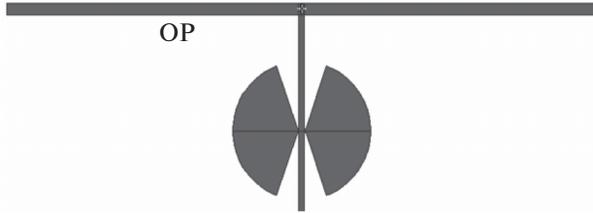


Рис. 2. Топология микрополоскового резонатора длиной 308 мкм для определения лондоновской глубины проникновения.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОНДОНОВСКОЙ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Физическая идея метода [9, 10] основана на том, что собственные частоты микрополоскового резонатора определяются его геометрическими размерами, а также погонной емкостью, которая была вычислена в предыдущем эксперименте, и индуктивностью. Это позволяет подобрать в расчете резонансной частоты линии значение лондоновской глубины проникновения, которое обеспечивает наилучшее согласие резонансной частоты с экспериментом. В качестве источника и приемника СВЧ-сигнала использовали один и тот же туннельный СИС-переход  $\text{Nb}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ , расположенный в центре резонатора. Согласно второму закону Джозефсона СИС-переход генерирует СВЧ-излучение, при совпадении частоты генерации с частотой собственной моды резонатора происходит резкое изменение окружающих туннельный переход граничных условий, что приводит к появлению особенностей на ВАХ. Типичная схема структуры приведена на рис. 2, общий вид чипа с несколькими резонаторами – на рис. 3.

Для успешной реализации описанного подхода потребовалось корректно включить туннельный СИС-переход в резонатор, а также подобрать параметры туннельного перехода таким образом, чтобы значение плазменной частоты было достаточно низким (чтобы иметь возможность регистрировать резонансы на относительно низкой частоте). Для этого необходимо было выбрать оптимальные размеры и плотность туннельного перехода и обеспечить его согласование с волновым сопротивлением микрополосковой линии, поскольку возбуждающий СИС-переход является генератором СВЧ-тока. Из общефизических принципов следует, что в резонансных структурах генератор тока следует располагать там, где находится минимум. Поэтому была выбрана схема включения туннельного СИС-перехода в резонанс последовательного типа. Критическая плотность тока СИС-перехода выбиралась таким образом, чтобы оценочная частота плазменных

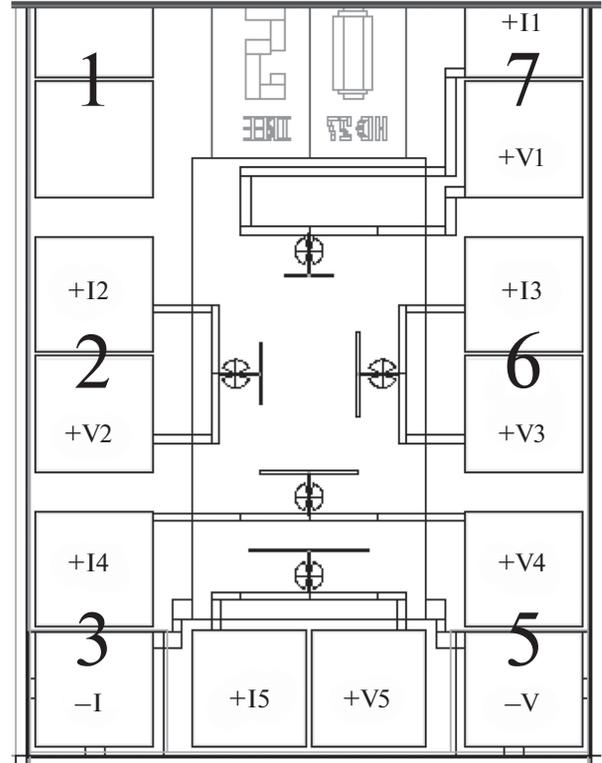


Рис. 3. Схема тестового образца для измерений резонансным методом; задание магнитного поля внешнее.

колебаний была ниже необходимой резонансной частоты, а размеры резонатора – чтобы импеданс половины резонатора был того же порядка, что и дифференциальное сопротивление перехода на резонансной частоте структуры. Для обеспечения максимальной добротности микрополоскового резонатора необходимо правильно подключить к нему измерительные контакты, поэтому выходы резонатора подключены к контактным площадкам через радиальный замыкатель. Таким образом, линия для измерений по постоянному току устроена так, что на “рабочей” частоте резонатора происходит преобразование низкого волнового импеданса электромагнитной волны в области подключения радиального замыкателя в большой волновой импеданс (виртуальный разрыв) в окрестности подключения к резонатору. При таком включении токоподводящие линии также образуют дополнительный резонатор, но его резонансные частоты значительно выше частот “основного” резонатора (ОР, см. рис. 2)

Измерения ВАХ туннельного СИС-перехода, включенного в резонатор, проводились в режиме как задания тока, так и напряжения, при различных значениях температуры и магнитных полей. Магнитное поле задавалось внешней катушкой, находящейся внутри магнитного экрана в гелиевом дьюаре.

Изменение магнитного поля позволяет изменять критический ток туннельного СИС-перехода и, как следствие, его импеданс и плазменную частоту. Как показал эксперимент, в случае достаточно хорошего согласования туннельного СИС-перехода с резонатором и при оптимальных величинах магнитного поля на ВАХ появляются существенные особенности, находящиеся на напряжениях, соответствующих джозефсоновской генерации на собственных частотах резонатора. Поскольку ток сверхпроводящих носителей обеспечивает джозефсоновскую генерацию, то увеличение магнитного поля, понижающее величину критического тока, снижает амплитуду генерируемого СВЧ-сигнала, и при задании слишком большого магнитного поля особенности на ВАХ существенно уменьшаются и становятся трудно регистрируемыми (рис. 4а).

Другим методом наблюдения особенностей на ВАХ является “подогрев” образца. При повышении температуры СИС-перехода уменьшается значение плазменной частоты, кроме того, экспоненциально растет его ток утечки, что изменяет импеданс СИС-перехода и облегчает наблюдение резонансов. Отметим, что даже незначительное изменение температуры способно существенно изменить согласования СИС и резонатора. При отличном согласовании СИС и микрополосковой линии резонатора особенности на ВАХ перехода проявляются даже без приложения внешнего магнитного поля (рис. 4б).

#### 4. РАСЧЕТ, ИЗМЕРЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА СНАМР\_Н1+

Для разработки и моделирования приемного элемента необходимо знать значения перечисленных выше параметров, а также удельную емкость туннельного СИС-перехода ( $C_{sp}$ ). При разработке первого прототипа точное значение  $C_{sp}$  не было известно. Были спроектированы и изготовлены на одной подложке несколько приемных элементов различного дизайна, каждый из которых был оптимизирован на одно из заданных значений  $C_{sp}$ .

Экспериментальный отклик каждой приемной структуры измеряли с помощью фурье-спектрометра (ФС, *англ.* – Fourier transform spectrometer, FTS) на основе интерферометра Майкельсона. В качестве широкополосного источника терагерцевого излучения использовали резистивный нагреватель – “глобар”. Значительная часть квазиоптического тракта находилась при атмосферных условиях, что привело к появлению двух резких и глубоких провалов на ФС, вызванных поглощением терагерцевого излучения парами воды.

С помощью параметров слоев, полученных указанными выше методами, удалось снизить количество неизвестных в численной модели с ше-

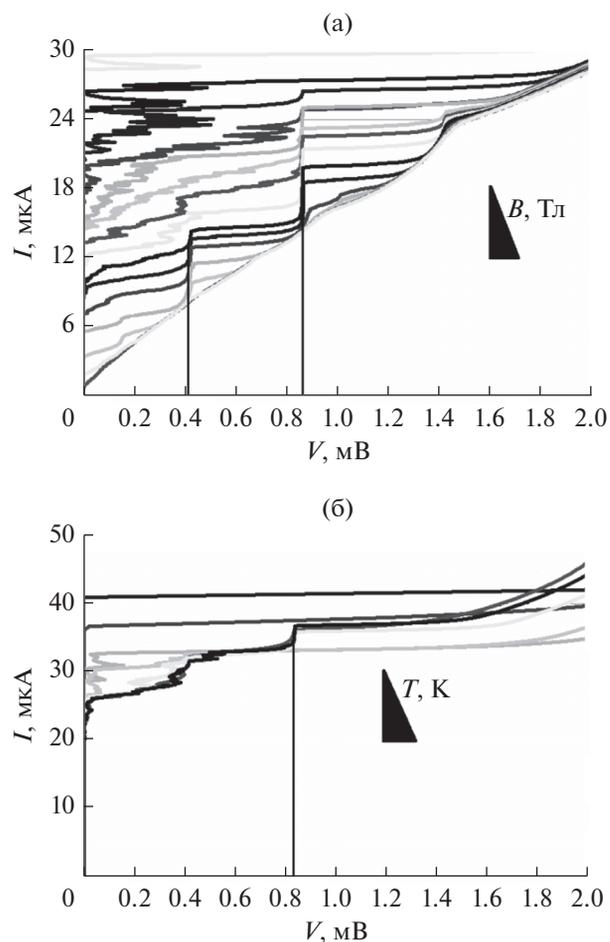
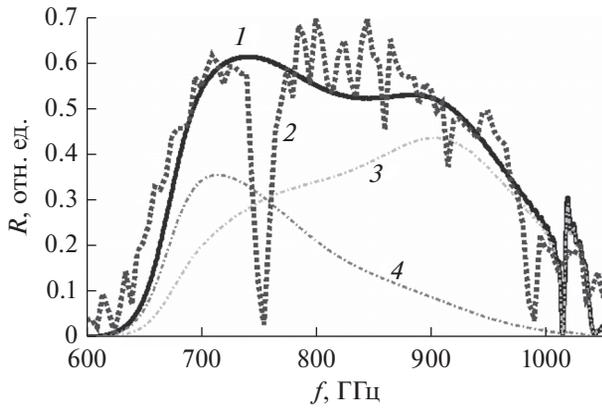
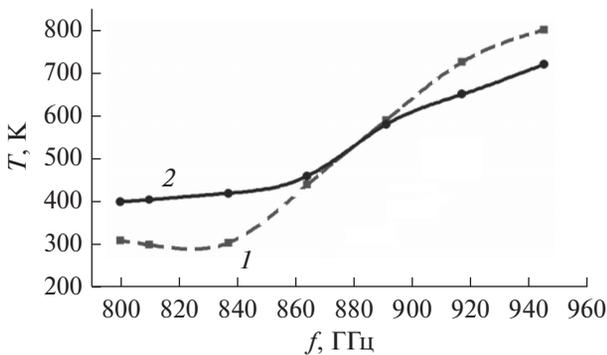


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики СИС-перехода в резонаторе длиной 308 мкм в режиме задания тока (возрастающая ветвь) при разных значениях внешнего магнитного поля (кривые расположены сверху вниз от слабых до сильных значений магнитного поля) (а) и при различных температурах (кривые расположены сверху вниз от низких до высоких значений температур) (б).

сти до одного, что позволило варьированием удельной емкости в расчетной модели добиться наилучшего согласования теоретической модели с экспериментальными кривыми отклика. На рис. 5 представлены экспериментальный и теоретический отклики приемного элемента на основе структуры с двумя СИС-переходами, а также удельный вклад каждого туннельного перехода в суммарный отклик. Анализ полученных результатов показал, что приемный элемент на основе одиночного СИС-перехода будет иметь более низкую шумовую температуру из-за лучшего согласования и снижения дробового шума, но в более узкой полосе частот, чем приемный элемент на основе двух туннельных переходов. Тем не менее, ширина отклика приемного элемента на основе одиночного СИС-перехода будет достаточна для “перекрытия” диапазона 790...950 ГГц.



**Рис. 5.** Теоретический (1) и экспериментальный (2) отклик  $R$  приемного элемента, а также теоретические отклики  $R$  каждого из туннельных переходов (3, 4) в условных единицах.



**Рис. 6.** Шумовая температура приемных элементов на основе одного (кривая 1) и двух СИС (2).

С учетом полученных значений параметров был сконструирован, изготовлен и измерен приемный элемент на основе одиночного СИС-перехода. Первые эксперименты показали, что ввиду чрезвычайной чувствительности такого приемного элемента к отклонениям в технологическом процессе, весьма затруднительно добиться необходимой полосы отклика в рабочем диапазоне 790...950 ГГц. Результаты первых измерений шумовой температуры приемных элементов (изготовленных на одной и той же подложке) на основе одного и двух туннельных переходов представлены на рис. 6.

Приемный элемент на основе двух туннельных переходов оказался менее чувствителен к техно-

логическим изменениям размеров элементов при изготовлении. В результате оптимизации технологических операций изготовления приемного элемента на основе двух СИС-переходов удалось достичь еще более низкой шумовой температуры приемника, которая на частоте 725 ГГц составила 120 К, что лишь в три раза превышает квантовый предел  $hf/k_B$  [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения электрофизических параметров пленок, используемых для изготовления сверхчувствительных приемных элементов терагерцевого диапазона. С помощью найденных параметров были проведены расчеты новых дизайнов СВЧ приемных элементов терагерцевого диапазона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.607.21.0100; идентификатор RFMEFI60714X0100).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasemann C., Güsten R., Heyminck S. et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6275. P. 62750N.
2. Güsten R., Booth R., Cesarsky C. et al. // Proc. SPIE. 2006. V. 6267. P. 626714.
3. Khudchenko A.V., Baryshev A.M., Rudakov K.I. et al. // IEEE Trans. 2016. V. TST-6. № 1. P. 127.
4. Koshelets V.P., Shitov S.V., Ermakov A.B. et al. // IEEE Trans. 2005. V. AS-15. № 2. Pt. 1. P. 960.
5. Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Faley M.I. et al. // IEEE Trans. 2015. V. TST-5. № 4. P. 687.
6. Рудаков К.И., Кошелец В.П. // Нелинейный мир. 2014. № 2. С. 20.
7. Kerr A.R. Surface Impedance of Superconductors and Normal Conductors in EM Simulators. MMA Memo 245. Charlottesville: Nat. Radio Astronomy Observatory, 1999 (<http://legacy.nrao.edu/alma/memos/html-memos/alma245/memo245.pdf>).
8. Zhou S., Jabbar A., Bao J.-S. et al. // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. № 7. P. 2789.
9. Cybery M.E., Weikle R.W., Lichtenberger A.W. // Proc. 21st Int. Symp. on Space Terahertz Technology. Oxford. 23–25 Mar. 2010. Charlottesville: Nat. Radio Astronomy Observatory, 2010. P. 261.
10. Kawakami A., Uzawa Y., Wang Z. // Physica C: Superconductivity. 2004. V. 412–414. Pt. 2. P. 1455.
11. Рудаков К.И., Кошелец В.П., Барышев А.М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 8–9. С. 692.