

УДК 537.312.62;621.385.6

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ И АЭРОСТАТНЫХ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

© 2016 г. В. П. Кошелец, М. А. Тарасов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва
E-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

Описаны сверхпроводниковые гетеродинные приемники на основе туннельных переходов типа сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) и болометрические приемники на основе переходов сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН). По шумовой температуре и эквивалентной мощности шумов такие приемники удовлетворяют требованиям как аэростатных телескопов TELIS, BOOMERANG, OLIMPO, LSPE, так и космических проектов SPICA, МИЛЛИМЕТРОН и др. Обсуждается возможность применения таких приемников в медицинской диагностике и средствах дистанционного контроля.

DOI: 10.7868/S0367676516040220

Детектирование слабых сигналов в терагерцевом частотном диапазоне (от 100 ГГц до 10 ТГц) — одна из областей, в которых первенство сверхпроводниковых приемных устройств неоспоримо. На частотах до 1.4 ТГц наилучшей чувствительностью обладают супергетеродинные приемники со смесительными элементами на основе переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС), а в области более высоких частот — болометры-смесители на основе тонких сверхпроводящих пленок. Именно поэтому сверхпроводниковые приемники используются на большинстве радиотелескопов мира, а также в современных радиоастрономических спутниковых инструментах. Возможность создания приемных устройств с рекордными параметрами на основе сверхпроводниковых туннельных наноструктур объясняется как чрезвычайно высокой характерной частотой и сильной нелинейностью таких элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными природой элементов и криогенной рабочей температурой. Использование методов нанотехнологии и интеграция отдельных элементов в единое устройство дают возможность создания компактных супергетеродинных приемных устройств с предельной (квантовой) чувствительностью, некогерентных широкополосных детекторов, а также устройств обработки сигналов с уникальным набором параметров, которые не могут быть достигнуты на основе традиционных подходов и технологий.

Однако большие габариты, вес и высокая стоимость традиционных генераторов гетеродина в субТГц-диапазоне являются основными факторами, ограничивающими широкое использование

супергетеродинных приемников. В Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН разработаны сверхпроводниковые интегральные генераторы гетеродина (СГГ) с уникальным набором параметров. Согласно предложенной и уже апробированной нами концепции [1, 2], все элементы приемника интегрированы на одной сверхпроводниковой микросхеме (см. рис. 1). Сигнал СГГ распределяется между двумя СИС-смесителями, один из них используется как приемный элемент с планарной антенной, в то время как второй работает в режиме гармонического смесителя, обеспечивая режим фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для СГГ. При подаче лишь постоянного питания от батарей данная микросхема работает как супергетеродинный приемник в субмиллиметровом диапазоне волн, не требуя никакого громоздкого дополнительного СВЧ-оборудования.

В настоящее время основными элементами низкотемпературной сверхпроводниковой элек-



Рис. 1. Микрофотография центральной части интегрального приемника, на которой представлены все основные элементы интегрального приемника (показана область $1.0 \times 0.4 \text{ мм}^2$).

троники являются туннельные СИС-структуры на основе ниобия и его соединений. Пленки из этих материалов обладают высокой механической прочностью, химической стабильностью, устойчивостью структуры к термоциклированиям и хорошей адгезией, а также достаточно высокой критической температурой для работы при температуре жидкого гелия ($T = 4.2$ К). Критическая температура пленки ниобия и его нитрида составляет 9.2 и 16 К соответственно. Туннельный барьер формируется путем окисления или нитридации тонкой пленки алюминия (5–7 нм), которая сплошным слоем покрывает поверхность ниобия, и позволяет получать сверхтонкие туннельные слои (толщиной порядка 1 нм). Возможность создания туннельных переходов с высокой плотностью тока и чрезвычайно малой утечкой, не меняющих свои характеристики в течение многих лет, является важнейшим фактором, обеспечившим широкое распространение и практическое применение переходов на основе ниобия.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в течение последних лет была разработана технология изготовления многослойных схем на основе структур Nb–AlO_x–Nb [3, 4], получаемых методом селективного травления и анодирования ниобия SNEAP (от англ. Selective Niobium Etching and Anodization Process). Был разработан целый ряд новых технологических процессов и методик изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов с рекордными параметрами. Переходы с высокой плотностью тока J_C позволяют повысить рабочую частоту СИС-приемников и расширить их полосу. Однако существует предел повышения прозрачности барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Этот предел имеет значение порядка 10–15 кА · см⁻², при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкая деградация качества переходов. Для того чтобы преодолеть это ограничение, была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb/Al–AlN/Nb и Nb/Al–AlN/NbN [4, 5] с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера путем нитридации поверхности Al в плазменном RF-разряде (J_C до 100 кА · см⁻²) с приемлемыми значениями параметра качества R_J/R_n .

Одним из ключевых элементов СИП является СГГ, который размещается на одной микросхеме со смесительным элементом (СИС-смесителем). СГГ представляет собой распределенный туннельный джозефсоновский СИС-переход, в котором приложенное магнитное поле и ток смещения создают однонаправленный поток квантов магнитного потока (флаксон). Таким образом, частота генерации управляется независимым заданием тока смещения и тока линии управления, создающей локальное магнитное поле в переходе. В настоящее время СГГ на основе распределенного

туннельного перехода представляются наиболее разработанными и изученными для интеграции с СИС-смесителем. Проведен цикл фундаментальных исследований, посвященных изучению физики процессов в таких структурах. СГГ на основе туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb и Nb–AlN–NbN были успешно испытаны на частотах от 250 до 700 ГГц (щелевой частоты ниобия), обеспечивая достаточную мощность для накачки СИС-смесителя (около 1 мкВт на частоте 450 ГГц). Как частота, так и мощность могут быть перестроены.

Для успешной работы СИП очень важно иметь возможность непрерывной перестройки частоты генерации СГГ. Для коротких переходов с маленьким волновым фактором затухания α расстояние между ступенями Фиске может быть настолько большим, что перестраивать СГГ можно будет только в некоторых “разрешенных” областях частот. Показано, что в СГГ на основе структур Nb–AlN–NbN ступени Фиске являются слегка наклонными из-за поверхностных потерь, поэтому при правильном выборе длины СГГ, а также токов питания и управления возможна реализация непрерывной перестройки частоты. По результатам данной разработки получен патент РФ [5, 6].

Для снижения ширины автономной линии генерации в диапазоне и для увеличения спектрального качества в режиме ФАПЧ были оптимизированы конструкция и топология сверхпроводникового генератора гетеродина. В результате на основе трехслойной структуры Nb/AlN/NbN были созданы сверхпроводниковые генераторы гетеродина с непрерывной перестройкой частоты в диапазоне 250–750 ГГц и шириной линии излучения менее 4 МГц. Это позволяет реализовывать спектральное качество сверхпроводникового генератора гетеродина в режиме ФАПЧ более 70% во всем диапазоне 250–750 ГГц (при соответствующем выборе типа структуры и ее топологии). Такие генераторы успешно использованы при создании интегральных спектрометров субТГц-диапазона для мониторинга атмосферы и медицинской диагностики.

Совместно с Институтом космических исследований Голландии разработан спектрометр, предназначенный для дистанционного исследования атмосферы с борта высотного аэростата в режиме лимбового сканирования (проект TELIS). Задача этого проекта – исследование химии и физики земной атмосферы в режиме зондирования в субтерагерцевом диапазоне. Для бортового интегрального приемника реализован частотный диапазон 490–630 ГГц, шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4–8 ГГц, диаграмма направленности с боковыми лепестками < –17 дБ, спектральное разрешение 1 МГц. Создана и апробирована концепция дистанционного управления интегральным спектрометром.

На полигоне “Esrang” (Швеция) были проведены три успешных запуска на высотном аэростате бортового интегрального спектрометра. Прибор TELIS устанавливается на одной аэростатной платформе с фурье-спектрометром MIPAS-B, разработанным ИМК (Институтом метеорологии и исследования климата Университета Карлсруэ, Германия); оба прибора ведут одновременные наблюдения за одной и той же областью атмосферы. Совместно они обеспечивают обнаружение широкого спектра атмосферных составляющих, которые могут использоваться для детального анализа химических моделей атмосферы, таких как моделирование циклов разрушения озона. В частности, были измерены вертикальные профили распределения ClO , BrO , O_3 и его изотопов, O_2 , изотопов HCl , HOCl , H_2O и ее изотопов, NO_2 , NO , N_2O , NO_2 , HNO_3 , CH_3Cl и HCN . Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура минус 90°C) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающей высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора [7–9].

В ходе полетов на высотном аэростате было записано несколько сотен лимбовых сканов, зарегистрированы спектры соединений хлора, брома и других соединений, ответственных за разрушение озонового слоя в атмосфере Земли; в течение полета измерялись суточные вариации различных компонентов атмосферы [8–10]. Исследованы дневные циклы концентрации монооксида хлора (рис. 2), участвующий в процессе каталитического разложения озона под воздействием хлорфторуглеродов; был измерен рост концентрации ClO и BrO после восхода солнца на различной высоте. Особо следует отметить измерения спектров BrO , интенсивность сигнала в этом случае составила всего лишь 0.3 К. Инструмент после посадки на парашюте прошел постполетную калибровку и был подготовлен к следующим полетам, первый из которых состоялся в сентябре 2014 года (полигон в арктической Канаде).

Сейчас во всем мире активно ведутся разработки устройств субТГц- и ТГц-частотных диапазонов для задач медицины и биологии. Связано это прежде всего с тем, что в этом диапазоне лежат наиболее сильные линии поглощения многих веществ (например, вода, аммиак, спирты). В терагерцевом диапазоне находятся частоты колебаний больших групп атомов, образующих молекулу и колебания водородных связей многих органических веществ, представляющих интерес для биологии и медицины (белки, молекулы ДНК). Кроме того, ТГц-излучение не является ионизирующим и, следовательно, опасным для биологических объектов, как часто используемое рентгеновское, что дает возможность использовать его *in vivo*.

Все эти факторы позволяют применять ТГц-спектрометры для медицинских исследований. В

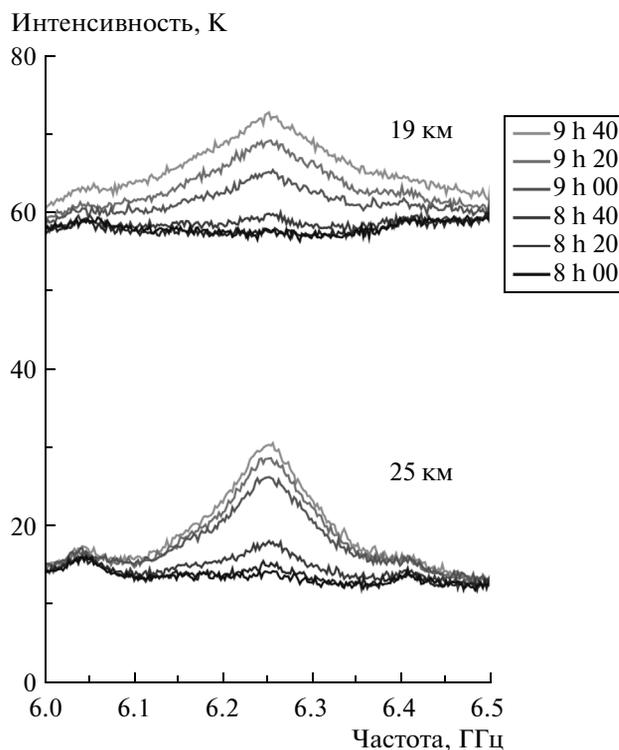


Рис. 2. Спектры, измеренные во время полета (высота аэростата 34 км, частота СГГ = 507.3 ГГц), показывающие рост концентрации ClO после восхода солнца. Измерения проводились для нескольких направлений зондирования (соответствующих разным высотам), на графике приведены данные для высот 19 и 25 км. Максимальный уровень ClO был измерен на высоте 23.5 км, он составил 2.1 ± 0.3 ppbv.

частности, спектроскопический анализ выдыхаемого воздуха в ТГц-диапазоне может быть эффективным неинвазивным диагностическим средством. Он позволяет на основе измерения концентрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе диагностировать целый ряд серьезных заболеваний. К их числу относятся хронический гастрит или пептическая язва желудка (в качестве маркера используется аммиак), различные легочные и онкологические заболевания (в выдыхаемом воздухе наблюдаются оксид азота, NO и другие соединения).

Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субммволн позволяет реализовать предельную чувствительность (ограниченную лишь квантовыми флуктуациями), высокое спектральное разрешение и малое энергопотребление; такой набор параметров недостижим при использовании традиционных технологий. По сравнению с разработанными к настоящему времени системами с близкими параметрами предлагаемый интегральный спектрометр имеет значительно больший диапазон входных частот (за счет уникально широкой перестройки частоты сверхпроводнико-

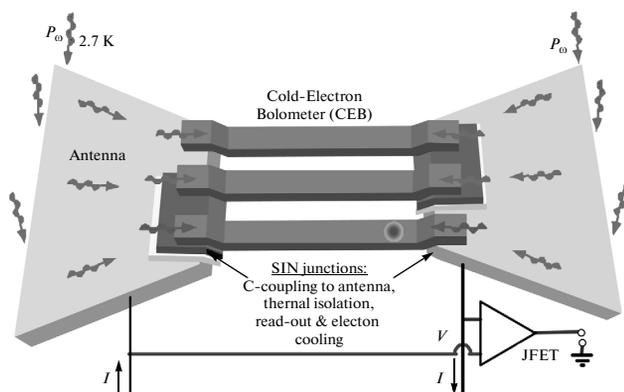


Рис. 3. Схематическое изображение последовательно-параллельной цепочки БХЭ.

вого генератора гетеродина), значительно меньшие габариты и энергопотребление, а также возможность однозначной идентификации маркеров заболеваний.

На базе интегрального спектрометра в ИРЭ РАН разработан и изготовлен макет измерительной криогенной установки для анализа выдыхаемого воздуха. Диапазон входных частот составляет 480–630 ГГц, шумовая температура на большей части диапазона составляет менее 150 К, разрешение лучше 1 МГц. Такие параметры позволяют регистрировать спектральные линии вращательных переходов большинства простых органических и неорганических соединений, присутствующих в выдохе человека. Был разработан измерительный стенд, включающий газовую кювету и систему напуска и откачки образцов газов и газовых смесей. В лабораторной кювете были проведены измерения газа OCS и NH_3 . Продемонстрирован четкий отклик на частоте линии поглощения газа при давлениях до 10^{-3} мбар. Показано, что измерения с достаточной точностью могут быть выполнены в течение нескольких секунд, что позволяет проводить диагностику пациента в реальном масштабе времени. Высокое спектральное разрешение прибора и предельная чувствительность позволяют однозначно измерять сверхмалые концентрации вещества. Все эти разработки могут быть использованы при создании приборов для неинвазивной медицинской диагностики, а также систем безопасности и противодействия терроризму.

Некогерентные сверхпроводниковые приемники, которые не имеют ограничения квантовыми шумами как гетеродинные, в реальных космических проектах представлены несколькими типами болометров: это болометры на краю сверхпроводящего перехода (БКП или TES), болометры на кинетической индуктивности сверхпроводящей полоски (БКИ или KID), болометры на холодных электронах (БХЭ или СЕВ). Последние получили развитие в ИРЭ РАН [11–16] и могут быть ис-

пользованы в планируемых аэростатных проектах BOOMERANG, OLIMPO, LSPE, космических проектах SPICA, МИЛЛИМЕТРОН, и др. Некогерентные приемники имеют свой круг задач, которые отличаются от задач, решаемых когерентными приемниками. В отличие от шумовой температуры, используемой для когерентных приемников, характерным параметром для болометров является эквивалентная шуму мощность (МЭШ или NEP), которая для современных сверхпроводниковых болометров не превышает $10^{-18} \text{ В} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$.

Болометры на холодных электронах (БХЭ) состоят из абсорбера в виде полоски нормального металла, подключенной через туннельные СИН-переходы к планарной антенне. В таких болометрах происходит электронное охлаждение абсорбера, что позволяет снизить электронную температуру, повысить отклик и снизить тепловые шумы приемника. Продемонстрированы приемные характеристики на частотах до 2 ТГц [16]. На частоте 350 ГГц при температуре 280 мК получены чувствительность до $10^9 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ и эквивалентная шуму мощность менее $10^{-17} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ [12]. Охлаждение до температур менее 100 мК позволяет повысить чувствительность на порядок и снизить МЭШ [11, 12]. Для оптимизации согласования импедансов болометра с входным сигналом, поступающим из планарной антенны, и системой считывания по низкой частоте, применяется последовательное по НЧ-сигналу и параллельное по ВЧ-сигналу соединение болометров (рис. 3). Такая последовательно-параллельная цепочка включается в планарную антенну. В наших измерениях обычно использовалась перекрестно-щелевая антенна.

Мощность излучения в таком болометре поглощается в полоске нормального металла (темная полоска на рис. 3), соединяющей два туннельных перехода сверхпроводник–изолятор–нормальный металл (СИН). Эти переходы одновременно выполняют несколько функций: электронного охлаждения, измерения температуры и согласования с источником сигнала. Электронное охлаждение позволяет не только улучшить чувствительность, но и расширить динамический диапазон приемника, поскольку поглощенная мощность выносится из абсорбера охлаждающим током. В отличие от нагрева током смещения БКП, в БХЭ происходит прямое электронное охлаждение, когда электронная температура становится меньше фоновой; при этом повышается вольт-ваттная чувствительность и снижаются тепловые шумы. Применение цепочек болометров позволяет распределить мощность между отдельными болометрами и увеличить мощность насыщения (по сравнению с одиночными элементами), т.е. расширить динамический диапазон.

Болометры изготавливаются по технологии теплового напыления с использованием прямой элект-

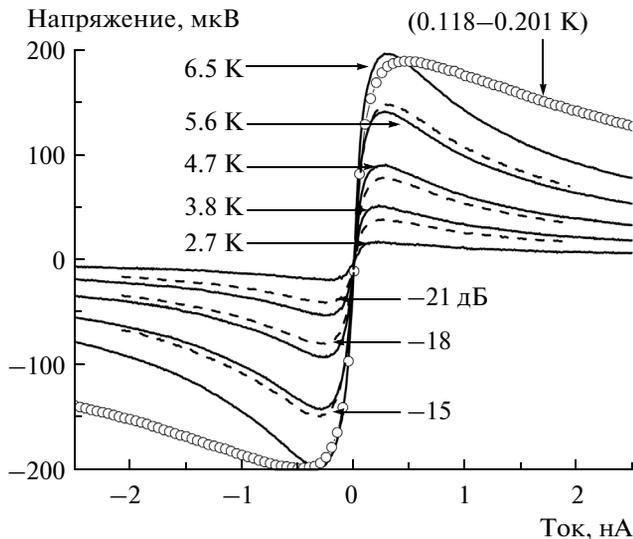


Рис. 4. Отклик цепочки болометров на изменение температуры образца (кружочки), температуру излучения черного тела (2.7–6.5 К) и излучение ЛОВ (ослабление в дБ).

тронной литографии. Туннельные переходы напыляются в одном вакуумном цикле и представляют собой трехслойную структуру $\text{CrAl}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ с несверхпроводящим слоем CrAl в качестве нормального металла. Кремниевая подложка с планарной антенной и болометрами располагается на плоской стороне удлиненной гиперполусферической линзы аналогично тому, как это делается и для квазиоптических СИС-смесителей. В ряде случаев вместо иммерсионной линзы используется многомодовый рупор. Оптический отклик болометров в лабораторных условиях измеряется с использованием источника излучения в виде черного тела с регулируемой температурой. Для измерения спектральных и динамических характеристик использована лампа обратной волны (ЛОВ) диапазона 258–375 ГГц. Результаты измерений приведены на рис. 4.

При температуре болометра 280 мК на частоте 345 ГГц и уровне сигнала 1 пВт получен отклик $10^8 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$, МЭШ = $2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$, температурная чувствительность $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ К} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$, динамический диапазон более 43 дБ. Понижение температуры ниже 100 мК и уровня фонового излучения менее 0.1 пВт позволяет получить увеличение отклика до $10^{10} \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$, МЭШ на уровне $10^{-18} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$.

При исследовании космического фонового излучения с температурой 2.7 К на частоте 350 ГГц и в полосе 100 ГГц мощность принимаемого излучения для однодиодного приемника составляет 0.1 пВт, что соответствует фотонному шуму $7 \cdot 10^{-18} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$, что и определяет предельную чувствительность приемника для этого класса экспериментов. Излучение облаков космической пыли с температурой 30 К в той же полосе составит уже 40 пВт, что соответствует фотонному шуму

му $1.25 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$, при этом важно не допустить насыщения приемника. С этой целью мы разработали и изготовили матрицы из 100 болометров, интегрированных в планарные антенны. Такая конструкция позволяет снизить мощность, поглощаемую в каждом болометре, и избежать насыщения и снижения отклика. Матрицы для проектов BOOMERANG и OLIMPO на частоты 345 и 145 ГГц размещают в плоскости выходного рупора конструкции холодной апертуры, представляющей собой два конических рупора, встречно соединенных через узкий волновод. Измерения с криогенным источником излучения черного тела и полоснопропускающими фильтрами подтвердили работоспособность матрицы до уровня входной нагрузки 80 пВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН (№ 14.613.21.0046) уникальный идентификатор RFMEFI161315X0046) и гранта для ведущих научных школ НШ-8168.2016.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koshelets V.P., Shitov S.V. // Supercond. Sci. and Technol. 2000. V. 13. P. R53.
2. Koshelets V.P., Shitov S.V., Ermakov A.B. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. V. 15. P. 960.
3. Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11. № 1. P. 816.
4. Dmitriev P.N., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13. № 2. P. 107.
5. Torgashin M.Yu., Koshelets V.P., Dmitriev P.N. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17. P. 379.
6. Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., Торгашин М.Ю. Криогенный генератор гетеродина на основе распределенного туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ. Патент на изобретение № 22325003, (Заявка № 2006 142 799 с приоритетом от 05.12.2006).
7. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. L. № 10–11. С. 935.
8. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen et al. // Supercond. Sci. Technol. 2010. V. 23. № 4. 045016 (8pp).
9. Kiselev O., Birk M., Ermakov A. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. P. 612.
10. de Lange A., Birk M., de Lange G. et al. // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5. P. 487.
11. Тарасов М., Эдельман В., Махашабде С., Кузьмин Л. // ЖЭТФ. 2014. Т. 146. Вып. 1(7). С. 123.
12. Tarasov M., Edelman V., Mahashabde S., Kuzmin L. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 26. Issue 6. P. 2400105.
13. Tarasov M., Kuzmin L., Edelman V. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. № 6. P. 3635.
14. Тарасов М., Кузьмин Л., Эдельман В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. Вып. 6. С. 460.
15. Тарасов М., Кузьмин Л., Каурова Н. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89. Вып. 12. С. 742.
16. Tarasov M., Kuzmin L., Stepanov E. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. Вып. 6. С. 356.