УДК 538.945

СМЕСИТЕЛИ НА ЭФФЕКТЕ ЭЛЕКТРОННОГО РАЗОГРЕВА С IN SITU КОНТАКТАМИ

И. В. Третьяков¹, М. И. Финкель¹, С. А. Рябчун¹, А. И. Кардакова¹, С. В. Селиверстов¹, Д. В. Петренко¹, Г. Н. Гольцман^{1,2}

¹ Московский педагогический госуниверситет, г. Москва;

 2 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

В работе приводится обзор последних достижений в области разработки смесителей на эффекте электронного разогрева в сверхпроводниках для супергетеродинных приёмников терагерцового диапазона. Рассматриваются области применения таких приёмников и требования к основным характеристикам смесителей. Основные характеристики смесителей (шумовая температура, полоса преобразования, шумовая полоса, требуемая мощность гетеродина) за последние несколько лет существенно улучшились благодаря интенсивной работе как в части качества изготовления элементов, так и в части понимания физики процессов, протекающих в смесителях на электронном разогреве. Ключевую роль в работе смесителя играют контакты между сверхпроводниковым мостиком и планарной антенной. Повышение качества контактов приводит одновременно к понижению шумовой температуры и увеличению полосы преобразования смесителя.

ВВЕДЕНИЕ

Обнаруженный в сверхпроводниковых плёнках (NbN, Nb, NbTiN, MoRe и др.) эффект электронного разогрева позволил разработать уникальные детекторы электромагнитного излучения, обладающие рекордной чувствительностью и быстродействием, а именно, сверхпроводниковые болометры и смесители на эффекте электронного разогрева (hot-electron bolometer (HEB) mixer) [1]. Терагерцовая астрономия является одной из областей применения смесителей на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих плёнках.

Важнейшими параметрами таких смесителей являются шумовая температура и полоса преобразования, поскольку именно они определяют чувствительность приёмника, и, следовательно, круг исследовательских задач, которые могут быть решены при помощи данного инструмента. Поэтому уменьшение шумовой температуры смесителя и увеличение его полосы преобразования важно как для широкополосных, так и для спектральных наблюдений. Так, смесители, используемые в инструментах HI-FI, CASIMIR, GREAT, обладают полосой преобразования, не превышающей 3,5 ГГц [2]. Для увеличения полосы преобразования улучшают акустическое согласование плёнки сверхпроводника и подложки путём подбора материала и толщины буферного слоя, что позволяет расширить полосу преобразования до 4 ГГц у квазиоптических смесителей [3]. Дальнейшее уменьшение толщины сверхпроводящей плёнки для сокращения времени ухода неравновесных фононов в подложку позволяет достичь полосы преобразования 5,2 ГГц [4].

Шумовая полоса определяется как диапазон частот, где шумовая температура не превышает в 2 раза своего минимального значения, и для смесителей на электронном разогреве обычно шире, чем полоса преобразования: для смесителя с полосой преобразования 4,7 ГГц она составляет 5,6 ГГц [3, 4]. На современном уровне развития цифровой обработки сигнала именно шумовая полоса определяет рабочий диапазон приёмника, поскольку даже значительные изменения коэффициента преобразования легко выравниваются цифровыми фильтрами в реальном времени. Качество контактов играет ключевую роль в снижении шумовой температуры смесителя. Это

И. В. Третьяков, М. И. Финкель, С. А. Рябчун и др.

было впервые показано в работе [5], где чистка сверхпроводниковой плёнки NbN перед осаждением металлических контактов, а также дополнительный буферный слой сверхпроводника для предотвращения эффекта близости позволили снизить шумовую температуру в 2 раза. На частоте гетеродина 2,5 ТГц шумовая температура составила 950 К [5]. Следующим шагом улучшения контактов стало осаждение плёнки сверхпроводника (NbN) и слоя металла (Au) в одном процессе, без разгерметизации технологической камеры (in situ), что гарантирует отсутствие дополнительного загрязнения границы между сверхпроводником и нормальным металлом [6]. В дальнейшем из двухслойной структуры NbN—Au формируется планарная антенна, в центре которой селективно стравливается золото, что открывает мостик NbN, который и служит активным болометрическим элементом смесителя.

В данной статье представлены результаты исследования основных характеристик смесителей на горячих электронах, изготовленных по технологии in situ. Модернизация контактов сверхпроводникового мостика и нормального металла антенны помимо уменьшения потерь и снижения шумовой температуры позволяет также реализовать в смесителе второй канал охлаждения, связанный с диффузией разогретых электронов в холодные металлические берега (диффузионный канал). Этот канал охлаждения действует параллельно с фононным охлаждением, и суммарное охлаждение позволяет реализовать смесители с рекордными полосой преобразования и шумовой полосой. Уменьшение контактного сопротивления между сверхпроводящим мостиком и антенной позволило получить шумовую полосу 9 ГГц при двухполосной шумовой температуре $T_{\rm n}^{\rm DSB} = 600$ К и полосу преобразования вблизи критической температуры $\Delta B = 6,5$ ГГц.

1. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СМЕСИТЕЛЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Ранее было показано, что шумовая температура и полоса преобразования смесителя на горячих электронах могут быть улучшены с помощью очистки поверхности сверхпроводящей плёнки в местах нанесения малых контактных площадок [3, 4]. При развитии этого направления исследований оказалось возможным также отказаться от непосредственной чистки плёнки NbN, объединив в единый процесс напыление плёнки NbN и осаждение слоя Au, из которого в дальнейшем формируется внутренняя часть спирали антенны смесителя [6].

Плёнка NbN осаждается реактивным магнетронным распылением Nb на постоянном токе в атмосфере Ar и N₂ на полированную высокоомную кремниевую подложку (удельное сопротивление $3\div5$ кOm · cm), нагретую до 830 °C; давление Ar и N₂ составляло $5 \cdot 10^{-3}$ мбар и ($8\div12$) × $\times 10^{-5}$ мбар соответственно. На следующем этапе без разгерметизации камеры на поверхность полученной плёнки NbN с толщиной 3,5 нм осаждается слой золота с толщиной 20 нм. В результате получается двухслойная структура NbN—Au на кремниевой подложке. Далее на поверхность золота наносится слой позитивного электронного резиста и с помощью электронно-лучевой литографии формируются окна для образования мостиков NbN с длиной $0,1\div0,35$ мкм. С учётом сопротивления квадратной плёнки NbN, равного 500 OM, выбирают отношение ширины к длине смесителя, равное 10, для согласования смесителя по сопротивлению с трактом промежуточных частот (сопротивление тракта 50 OM) и импедансом системы кремниевая линза—спиральная антенна. Золото в полученных электронной литографией зазорах удалялось с помощью ионного травления и селективного химического травления. На рис. 1 изображена фотография, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа, внутренней части смесителя, включающей смесительный элемент и часть спиральной антенны.

Смесители, изготовленные по технологии in situ, имеют два сверхпроводящих перехода: вблизи 9 К (переход самого́ смесительного мостика, т.е. открытой части плёнки NbN) и вблизи 7 К

И. В. Третьяков, М. И. Финкель, С. А. Рябчун и др.



Рис. 1. Фотография внутренней части смесителя. На врезке изображён зазор со сверхпроводящим мостиком



Рис. 2. Зависимость сопротивления смесителя от температуры. Цифрой 1 отмечен переход в сверхпроводящее состояние двухслойной структуры NbN—Au (внутренняя часть антенны), цифрой 2 — переход NbN-мостика

(переход части плёнки под золотом внутренней части антенны). Характерная зависимость сопротивления смесителя R от температуры T изображена на рис. 2. Появление второго перехода с пониженной критической температурой объясняется проявлением эффекта близости между золотом контактов и сверхпроводником и свидетельствует о хорошем электрическом контакте сверхпроводящего мостика с внутренней частью антенны. Плотность критического тока смесителя составляет $4.5 \cdot 10^6 \text{ A/см}^2$, нормальное сопротивление $75 \div 100 \text{ Om}$.

2. ДВУХПОЛОСНАЯ ШУМОВАЯ ТЕМПЕРАТУРА И ШУМОВАЯ ПОЛОСА

Эксперименты по измерению двухполосной шумовой температуры смесителя и шумовой полосы обычно выполняются по методике Y-фактора: шумовая температура рассчитывается по формуле

$$T_{\rm n}^{\rm DSB} = (T_{\rm hot} - YT_{\rm cold})/(Y-1),$$

где $T_{\rm hot} = 300$ К и $T_{\rm cold} = 77$ К — физические температуры горячей и холодной нагрузок типа абсолютно чёрного тела, Y — отношение уровней мощности шума $P_{\rm hot}/P_{\rm cold}$ на выходе смесителя при горячей и холодной нагрузках на входе болометра.

Блок со смесителем, закреплённым на эллиптической кремниевой линзе, устанавливается в криостат с входным окном из полиэтилена высокой плотности (толщина 0,5 мм) и инфракрасным фильтром из материала «Zitex 106» на азотном экране для подавления тепловой радиационной нагрузки на смеситель и криостат. Для уменьшения эффекта прямого детектирования [7] используется полосопропускающий сеточный фильтр с полосой пропускания 2÷3 ТГц, установленный на гелиевый экран. Излучение гетеродина совмещается с излучением абсолютно чёрного тела с помощью майларового делителя луча с толщиной 6 мкм. Схема установки изображена на рис. 3.

Сигнал со смесителя через широкополосный адаптер смещения поступает на холодный усилитель (HEMT) с полосой 1,0÷7,5 ГГц и коэффициентом усиления 30 дБ. Усиленный сигнал с помощью коаксиального кабеля с сопротивлением 50 Ом выводится из криостата и поступает на вход второй ступени усиления, состоящей из двух усилителей «Miteq» с полосой 1÷10 ГГц и коэффициентом усиления 30 дБ каждый, разделённых перестраиваемым фильтром с полосой пропускания 50 МГц. Выход второго усилителя нагружен на квадратичный кристаллический де-



Рис. 3. Принципиальная схема установки по измерению шумовой температуры и шумовой полосы

тектор или измеритель мощности. Сигнал с детектора считывается цифровым милливольтметром. Далее полученные данные обрабатываются по алгоритму быстрого преобразования Фурье.

По полученному спектру вычисляется средний уровень сигнала, соответствующий амплитуде на нулевой частоте, и амплитудное значение на частоте модулятора. Из этих данных рассчитывается Y-фактор и шумовая температура смесителя. Также в процессе эксперимента оценивается вклад прямого детектирования. В случае использования охлаждаемого полосового квазиоптического фильтра на входе эффект прямого детектирования отрицательный (увеличивающий измеряемое значение шумовой температуры), и его влияние на оценку шумовой температуры не превышает 5 %, что соизмеримо с погрешностью эксперимента.

Для измерения шумовой полосы используется широкополосный холодный усилитель, не оборудованный вентилем на входе, поэтому между выходом смесителя и входом холодного усилителя образуется стоячая волна из-за различия в импедансах. В результате спектр выходного шума смесителя на промежуточной частоте в рабочей точке имеет резонансную структуру, частотный интервал между максимумами температуры соответствует электрической длине от выхода смесителя до входа холодного усилителя. С помощью анализатора спектра определяются положения максимумов, и для полученных промежуточных частот измеряется Y-фактор. На рис. 4 изображены вольт-амперные характеристики смесителя и его рабочая область. В оптимальной рабочей точке напряжение V составляет 0,6 мВ, ток — 35 мкА. Шумовая температура на промежуточной частоте 2 ГГц равна 600 К. Измеренная в той же рабочей точке зависимость шумовой температуры от промежуточной частоты показывает шумовую полосу не менее 8 ГГц.

Аппроксимация экспериментальных результатов выражением

$$T_{\rm N}^{\rm DSB}(f_{\rm IF}) \propto 1 + (f_{\rm IF}/B_{\rm N})^2$$

даёт подъём шумовой температуры в 2 раза на частоте $B_{\rm N} = 9$ ГГц. Исходя из ширины шумовой

И. В. Третьяков, М. И. Финкель, С. А. Рябчун и др.



Рис. 4. Вольт-амперные характеристики смесителя болометра на горячих электронах при различной мощности лазера на частоте 2,5 ТГц: меньшая сила тока соответствует большей мощности лазера (*a*). Чёрным овалом обозначена рабочая область образца. Шумовая температура приёмника в зависимости от промежуточной частоты $f_{\rm IF}$ для лучшего (кружки) и худшего (квадраты) смесителей одной партии (δ)

полосы и длины сверхпроводящего мостика и сравнивая её с характерными временами для смесителей с фононным каналом охлаждения, можно сделать вывод, что в механизме релаксации температуры электронной подсистемы плёнки появился дополнительный диффузионный канал охлаждения электронной подсистемы. Дополнительные доказательства такой интерпретации будут даны в следующем разделе статьи.

3. ПОЛОСА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Полоса преобразования смесителей с длиной 0,12÷0,35 мкм и шириной 1÷3 мкм измеряется методом смешения сигналовдвух монохроматических источников, близких по частоте. В качестве сигнального и гетеродинного источников излучения используются лампы обратной волны или иные перестраиваемые источники терагерцового излучения. Если энергия кванта излучения гетеродина меньше удвоенной энергии щели сверхпроводникового материала смесителя, то для введения смесителя в рабочее резистивное состояние необходимо подогреть смеситель до температуры сверхпроводящего перехода. При этом энергетическая щель сверхпроводника практически подавлена, поэтому частота гетеродина не так важна [8], и реализуется однородный электронный разогрев. В этом случае изменение температуры плёнки относительно подложки мало, и в уравнении теплового баланса можно ограничиться линейным приближением. Это позволяет из полученных зависимостей эффективности преобразования от промежуточной частоты определять характерные времена энергетической релаксации смесителей и болометров. Излучение от гетеродина и сигнального источника совмещается с помощью майларового делителя луча. Схема такой экспериментальной установки представлена на рис. 5.

Полученные экспериментальные данные обрабатываются с учётом калибровки тракта промежуточных частот. На рис. 6 представлены результаты полосовых измерений для образцов с длиной сверхпроводящего мостика 0,12 мкм (треугольники) и 0,35 мкм (квадраты). Аппроксимация экспериментальных результатов с помощью закона

$$P(f_{\rm IF}) = P_0 / [1 + (f_{\rm IF} / f_{3\,\rm dB})^2]$$

И. В. Третьяков, М. И. Финкель, С. А. Рябчун и др.



к анализатору спектра

Рис. 5. Принципиальная схема установки по измерению полосы преобразования смесителя на горячих электронах

даёт часто́ты отсечки 6,5 ГГц и 3,5 ГГц для длин 0,12 мкм и 0,35 мкм соответственно, здесь $f_{3\,\mathrm{dB}}$ — частота среза смесителя. Полоса преобразования 3,5 ГГц типична для NbN-смесителя с фононным каналом охлаждения на кремниевой подложке без буферного подслоя MgO.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ СМЕСИТЕЛЯ БОЛОМЕТРА НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

Увеличение полосы преобразования для смесителя с длиной 0,12 мкм объясняется включением диффузионного канала охлаждения электронной подсистемы. Включение диффузионного канала стало возможным благодаря уменьшению длины сверхпроводящего NbN-мостика до диффузионной и улучшению контакта между плёнкой NbN и планарной антенной. Предположение о включении дополнительного канала охлаждения хорошо согласуется с работой [9], на основании которой для постоянной времени смесителя с диффузионным каналом охлаждения можно записать

$$\tau_{\rm diff} = L^2 / (\pi^2 D),\tag{1}$$

где D — коэффициент диффузии материала. В случае смесителя с дополнительным диффузионным каналом полная теплопроводность будет определяться как $G_{\rm tot} = G_{\rm ph} + G_{\rm diff}$, откуда временная постоянная смесителя равна

$$\tau_{\rm m} = C_{\rm e}/G_{\rm tot} = (1/\tau_{\rm diff} + 1/\tau_{\rm ph})^{-1},$$
(2)

где $C_{\rm e}$ — электронная теплоёмкость. Замена соответствующих параметров в выражениях (1) и (2) даёт частоты отсечки 7,2 и 3,5 ГГц для длин мостиков 0,12 и 0,35 мкм соответственно. Исследования в терагерцовом диапазоне частот [9] показывают, что ширина полосы преобразования хорошо согласуется с выражением (2). На рис. 7 показана полоса преобразования смесителя ΔB на эффекте электронного разогрева как функция длины сверхпроводящего мостика L; также показана зависимость, полученная из выражения (2).



Рис. 6. Мощность сигнала на промежуточной частоте $f_{\rm IF}$

Рис. 7. Зависимость полосы преобразования от длины сверхпроводящего мостика

Полоса преобразования смесителя на электронном разогреве ограничивается временем электрон-фононного взаимодействия и временем ухода неравновесных фононов в подложку. Уменьшение омических потерь в малых контактах и уменьшение длины смесительного мостика до диффузионной позволило увеличить полосу преобразования и шумовую полосу NbN смесителя на эффекте электронного разогрева за счёт включения дополнительного диффузионного канала охлаждения.

5. ПОГЛОЩЁННАЯ МОЩНОСТЬ ГЕТЕРОДИНА

Измерение оптимальной поглощённой мощности гетеродина проводится совместно с измерением шумовой температуры смесителя на частоте гетеродина, поскольку обычно представляет интерес мощность гетеродина, соответствующая именно оптимальной по шумовой температуре рабочей точке. На рис. 8 представлено семейство вольт-амперных характеристик смесителя на эффекте электронного разогрева, снятых при разной мощности гетеродина. Область, оптимальная по шумовой температуре, выделена овалом.

Поглощённая мощность гетеродина в оптимальной рабочей точке определяется в приближении эквивалентности разогрева смесителя током смещения и излучением гетеродина (изотермический метод [10]). Это приближение справедливо, когда разогрев током смещения преобладает над разогревом излучением, т. е. при значительно бо́льших напряжениях смещения, чем в оптимальной рабочей точке. Расчёт поглощённой мощности проводится следующим образом. Через начало координат проводится прямая линия, пересекающая оптимальную по мощности гетеродина вольт-амперную характеристику в точке 1 и вольт-амперную характеристику при мощности гетеродина в n раз меньше в точке 2. Поскольку сопротивления в точках 1 и 2 равны, то и температуры электронной подсистемы в этих точках практически одинаковы. Следовательно, для поглощённых мощностей гетеродина P_1 , P_2 , напряжений смещения V_1 , V_2 и транспортных токов I_1 , I_2 в этих точках выполняется равенство

$$P_1 + V_1 I_1 = P_2 + V_2 I_2.$$

Поскольку переход от вольт-амперной характеристики с точкой 1 на вольт-амперную характеристику с точкой 2 осуществлялся уменьшением в n раз мощности гетеродина, то получаем ещё

0.5

L, мкм







Рис. 9. Зависимость поглощённой мощности гетеродина от длины сверхпроводящего мостика

одно уравнение:

$$P_2 = P_1/n.$$

Из получившейся системы уравнений легко определяется поглощённая мощность P_2 .

Для смесителя с размерами $0,2 \times 2$ мкм оптимальная поглощённая мощность гетеродина равна 100 нВт. На рис. 9 представлена зависимость поглощённой мощности от длины мостика смесителя. Оптимальная поглощённая мощность сначала уменьшается с уменьшением размеров смесителя пропорционально объёму, затем в пределах экспериментальной погрешности практически не меняется при уменьшении размеров от $0,2 \times 2$ мкм до $0,1 \times 1$ мкм.

Качественно это можно объяснить следующим образом. Поглощённая мощность пропорциональна объёму смесителя, т.е. при постоянной толщине плёнки пропорциональна площади его поверхности. Таким образом, уменьшая размеры в плоскости, можно уменьшить и требуемую мощность. Это будет продолжаться до некоторой длины мостика, при которой становится эффективным диффузионное охлаждение, скорость которого обратно пропорциональна квадрату длины. Учитывая, что при изготовлении соблюдается определённое отношение длины смесителя к его ширине, уменьшение длины в q раз приведёт к уменьшению поглощённой мощности в q^2 раз, но при этом и скорость оттока энергии возрастёт в q^2 раз. Следовательно, в первом приближении уменьшение длины смесителя с целью уменьшить требуемую мощность эффективно лишь до определённого предела охлаждения.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Смеситель на горячих электронах, изготовленный по технологии in situ, демонстрирует рекордно низкую двухполосную шумовую температуру 600 К на частоте гетеродина 2,5 ТГц, что составляет $5h\nu/k_{\rm B}$. Здесь $h\nu/(2k_{\rm B})$ — минимум шумовой температуры, определяемый квантовой природой излучения, h — постоянная Планка, ν — частота, $k_{\rm B}$ — постоянная Больцмана. Шумовая полоса такого смесителя составляет 9 ГГц. Измерения полосы преобразования вблизи критической температуры перехода дали значение 6,5 ГГц. Достижение таких результатов стало возможным благодаря уменьшению контактного сопротивления между поверхностью сверхпроводящего мостика и внутренней частью спиральной антенны и уменьшению длины сверхпроводящего мостика до диффузионной.

И. В. Третьяков, М. И. Финкель, С. А. Рябчун и др.

Исследование частично поддержано Министерством образования и науки РФ (договор 14.В25.31.0007), грантом Президента РФ (договор 16.120.11.4005-МК) и РФФИ (грант 13–02– 91159-ГФЕН а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гершензон Е. М., Гольцман Г. Н., Гогидзе И. Г. и др. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1990. Т. 3, № 10. Р. 2143.
- 2. http://www.sofia.usra.edu.
- 3. Cherednichenko S., Drakinskiy V., Baubert J., et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. Art. no. 124508.
- Malo I., Gallego J. D., Diez C., et al. // Proc. 20th Int. Symp. on Space Terahertz Technology, Charlottesville, USA, 2009. P. 300.
- 5. Baselmans J. J. A., Hajenius M., Gao J. R., et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 1958.
- 6. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. Art. no. 033507.
- 7. Baselmans J. J. A., Baryshev A., Rekel S. F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. Art. no. 163503.
- 8. Perrin N., Vanneste C. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28. P. 5150.
- 9. Burke P. J., Schoelkopf R. J., Prober D. E. // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 1644.
- 10. Elantev A. I., Karasik B. S. // J. Low Temp. Phys. 1989. V. 15. P. 675.

Поступила в редакцию 18 июня 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

HOT-ELECTRON BOLOMETER MIXERS WITH IN SITU CONTACTS

I. V. Tretyakov, M. I. Finkel, S. A. Ryabchun, A. I. Kardakova, S. V. Seliverstov, D. V. Petrenko, and G. N. Goltsman

We report on the latest achievements in the development of superconducting hot-electron bolometer mixers for terahertz superheterodyne receivers. We consider application ranges of such receivers and requirements for the basic characteristics of the mixers. Main features of the mixers, such as noise temperature, gain bandwidth, noise bandwidth, and required LO power, have been improved significantly over the past few years due to hard work, both in terms of the element fabrication quality and in terms of understanding of the physics of the processes occurring in the hot-electron bolometer mixers. Contacts between the superconducting bridge and the planar antenna play a key role in the mixer operation. Improvement of the contacts leads at the same time to a decrease in the noise temperature and an increase in the gain bandwidth of a mixer.