

# Концепция смесителя на основе болометра на холодных электронах

М. Тарасов<sup>+□1)</sup>, Л. Кузьмин\*□

<sup>+</sup>Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, Россия

\* Научно-исследовательский институт ядерной физики  
Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, 119899 Москва, Россия

□ Chalmers University of Technology, SE41296 Gothenburg, Sweden

Поступила в редакцию 27 декабря 2004 г.

После переработки 25 апреля 2005 г.

Предложен новый тип фазочувствительного терагерцового гетеродинного приемника на основе болометра на холодных электронах. В таком смесителе абсорбер в виде тонкой пленки нормального металла подключен к планарной антенне через туннельные переходы сверхпроводник–изоляторм–нормальный металл (СИН), образуя структуру СИНИС. СИНИС-смеситель объединяет достоинства болометра на горячих электронах (БГЭ): высокую частоту сигнала и малую мощность гетеродина с такими достоинствами СИС-смесителя, как низкий уровень шумов, высокая промежуточная частота, возможность работать в широком диапазоне температур вплоть до критической температуры сверхпроводника. В отличие от БГЭ и СИС такой смеситель менее чувствителен к внешним магнитным шумам и не имеет дополнительных шумов за счет сверхпроводящего перехода и эффекта Джозефсона.

PACS: 74.50.+г, 85.25.Pb

**Введение.** В настоящее время существуют два основных типа высокочувствительных сверхпроводниковых смесителей терагерцового диапазона. К первому относятся СИС-смесители (сверхпроводник–изоляторм–сверхпроводник), в которых достигают шумовых температур менее 100 К, что составляет несколько квантовых пределов шума  $T_n^q = hf/k$  на частотах ниже 1 ТГц [1]. Выше частоты 700 ГГц, соответствующей энергетической щели ниобия, или вдвое более высокой частоты для нитрида ниобия, шумовая температура СИС-смесителя резко возрастает. В болометре-смесителе на горячих электронах (БГЭ) [2] шумовые температуры составляют порядка 1000 К на частотах выше 1 ТГц и шумовую температуру можно приблизительно оценивать как  $T_n = 10hf/k$  [3]. Принцип действия БГЭ-смесителя принципиально отличается от традиционного модуляционного смесителя, каким является СИС-смеситель, в котором проводимость нелинейного элемента модулируется на частоте гетеродина. В БГЭ-смесителе проводимость не может быть промодулирована на столь высокой частоте, болометр слишком инерционен, чтобы следовать терагерцовой частоте гетеродина. Вместо этого медленный смеситель детектирует средний интерференционный сигнал, что делает его похожим на фурье-спектрометр, в котором акустооптический

или иной медленный детектор регистрирует сигнал на выходе интерферометра Майкельсона. Оба описанных типа смесителей имеют свои достоинства и недостатки по частотному диапазону, восприимчивости к тепловым и магнитным флуктуациям, избыточным шумам и потерям.

Недавно в [4] был предложен болометр на холодных электронах (БХЭ), который успешно испытан в качестве некогерентного детектора с мощностью, эквивалентной шуму  $10^{-18}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Он обладает целым рядом преимуществ, наиболее важным из которых является возможность электронного охлаждения, что приводит к возрастанию отклика и снижению шумов. Это открывает возможность создания малошумящих детекторов не только некогерентного, но и фазочувствительного типов. Такой смеситель-болометр на холодных электронах (СБХЭ) объединяет элементы СИС и БГЭ, он состоит из тонкой пленки абсорбера, подключенного к планарной антенне сверхпроводниковыми туннельными переходами сверхпроводник–изоляторм–нормальный металл (СИН). Отличием от некогерентного БХЭ, который работает при милливольтовых температурах, СБХЭ работает при обычных гелиевых температурах, что увеличивает частоту отклика с 10–100 МГц до 1–10 ГГц, что соответствует стандартным промежуточным частотам.

**Принцип действия болометра-смесителя.**  
Смеситель мощности можно рассматривать как

<sup>1)</sup>e-mail: tarasov@hitech.cplire.ru

комбинацию детектора мощности и интерферометра, в котором интерференция сигнала и гетеродина приводит к появлению интерференционной составляющей регистрируемой мощности. В обычном случае, когда мощность гетеродина много больше мощности сигнала, можно записать

$$\begin{aligned} E(t) &= \cos \omega t + \alpha \cos(\omega + \delta)t = \\ &= (1 - \alpha) \cos \omega t + \alpha [\cos \omega t + \cos(\omega + \delta)t] = E1 + E2. \end{aligned}$$

Рассмотрим второй член как для случая, когда обе амплитуды равны

$$\cos \omega t + \cos(\omega + \delta)t = 2 \cdot \cos \frac{2\omega + \delta}{2} t \cdot \cos \frac{\delta}{2} t; \quad (1)$$

этот интерференционный сигнал комбинации двух волн нагревает абсорбер болометра и выделяет мощность. Полная мощность для произвольного соотношения мощностей

$$\begin{aligned} P &= \frac{E_1^2}{R} + \frac{E_2^2}{R} = \\ &= \frac{(1 - \alpha)^2}{R} \cos^2 \omega t + \frac{4\alpha^2}{R} \cos^2 \left( \frac{2\omega + \delta}{2} t \right) \cdot \cos^2 \frac{\delta}{2} t = \\ &= \frac{(1 - \alpha)^2}{R} \left( \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) + \\ &+ \frac{4\alpha^2}{R} \left( \frac{1 - \cos(2\omega + \delta)t}{2} \right) \left( \frac{1 - \cos \delta t}{2} \right) \end{aligned}$$

после усреднения на сигнальной частоте дает величину

$$P(t) = \frac{(1 - \alpha)^2}{2R} + \frac{\alpha^2}{R} - \frac{\alpha^2}{R} \cos \delta t, \quad (2)$$

которая для случая равных мощностей сигнала и гетеродина принимает простую форму

$$P(t) = (\alpha^2/R)(1 - \cos \delta t). \quad (3)$$

то есть поглощенная мощность изменяется от нуля до максимума и ее средняя величина равна  $P = \alpha^2/2R + \alpha^2/2R = \alpha^2/R$ , что есть сумма равных исходных мощностей. Если же мощность промежуточной частоты (ПЧ) выше, то интерференционный член автоматически образуется только с его долей равной амплитуды. А это означает, что мощность гетеродина может быть столь же мала, как и мощность сигнала. Если же требуется иметь достаточно большой динамический диапазон, то мощность гетеродина следует увеличить до величины, равной максимально ожидаемому сигналу.

**Болометр на холодных электронах в качестве смесителя.** В случае работы при милливольтовых температурах отклик БХЭ оказывается достаточно медленным, не превышая нескольких мегагерц, поскольку электрон-фононное взаимодействие резко спадает с температурой. При повышении фононной температуры до уровня гелиевой взаимодействие возрастает и его мощность составит

$$P_{ep} = \Sigma \nu (T_e^5 - T_{ph}^5), \quad (4)$$

где  $\Sigma$  – постоянная материала,  $\nu$  – объем,  $T_{ph}$  – фоновая температура,  $T_e$  – электронная температура. Эффективную тепловую постоянную времени без электротермической обратной связи (электронного охлаждения) можно оценить из простого соотношения  $\tau_0 = C_\nu / G_{ep}$ ,  $\tau = \tau_0 / (L + 1)$ , где  $C_\nu = \nu \gamma T_e$  – теплоемкость абсорбера,  $G_{ep} = 5 \Sigma T e^4$  – электрон-фононная тепловая проводимость,  $L = G_{cool} / G_{ep}$  – коэффициент усиления петли электротермической обратной связи. Численные оценки тепловой постоянной времени составляют 10 мкс при температуре 100 мК и 150 пс при 4.2 К. Включение электронного охлаждения уменьшает эту величину от 10 до 100 раз, в зависимости от эффективности охлаждения. В итоге частота среза по промежуточной частоте (ПЧ) может достигать 10 ГГц, что соответствует диапазону частот усилителя промежуточной частоты (УПЧ) гетеродинных приемников для радиоастрономии, в которых шумовая температура не превышает 10 К.

Коэффициент преобразования можно оценить, исходя из основных соотношений для электронного охлаждения: если приходящая нагревающая мощность  $P_{sig}$  полностью компенсируется электронным охлаждением, то электронная температура поддерживается постоянной. Один электрон охлаждающего тока выносит энергию  $kT$ , а это значит, что  $P_{cool} = P_{sig} = kT \Delta I / e$  или  $I = eP_{sig} / kT$ . Мощность, рассеиваемую в ПЧ нагрузке, можно оценить из простого джоулева нагрева ПЧ током при напряжении смещения, близком к напряжению щели. Для двух последовательно соединенных СИИ-переходов это составит  $P_{IF} = 2V_\Delta \cdot \Delta I = 2eV_\Delta \cdot P_{sig} / (kT)$ , и в результате усиление по мощности

$$G = P_{IF} / P_{sig} = 2eV_\Delta / kT = eV_{2\Delta} / kT. \quad (5)$$

Эта величина отличается от минимума в 3 дБ потерь для любого классического смесителя и позволяет оценить возможный коэффициент усиления по мощности для ниобиевого болометра при гелиевой температуре  $G_{mix} = 9$ , то есть существенное усиление вместо потерь.

Шумовые характеристики в первом приближении можно получить из величины дробового шума СИН-перехода на выходе смесителя. Вход считаем нешумящим, поскольку для входного сигнала это просто согласованная резистивная нагрузка сопротивления пленки металлического абсорбера. Токовый шум на выходе составляет  $I_n^2 = 2eI \cdot \Delta f$  и может быть пересчитан в мощность  $P_n \approx 2eIR \cdot \Delta f \approx 2eV_{\Delta} \cdot \Delta f = kT_n \cdot \Delta f$ , откуда можно получить выходную шумовую температуру  $T_n^{\text{out}} = eV_{\Delta}/k$ , то есть около 30 К в случае ниобия. Если учесть рассчитанный выше коэффициент преобразования по мощности  $G = eV_{\Delta}/kT$ , то можно получить весьма оптимистическую величину для приведенной ко входу шумовой температуры  $T_n = T$ .

Отметим еще одно важное достоинство СБХЭ: согласование мощности по входному сигналу оказывается существенно проще, чем для СИС-смесителя. В нашем случае нет необходимости компенсировать внутреннюю емкость туннельных переходов, импеданс этой емкости значительно меньше действительного сопротивления металлического абсорбера, которое можно легко сделать равным действительному импедансу комплементарной планарной антенны на диэлектрике, составляющем около 70 Ом. Таким образом достигается точное согласование импедансов в широком диапазоне частот. Согласование по промежуточной частоте мало отличается от согласования для СИС и хорошо отработано для СИС-смесителей.

Для оценки сопротивлений и емкостей ниобиевых СИНИС-смесителей мы можем взять стандартные характеристики СИС-переходов с барьером из окиси алюминия [5], которые характеризуются произведением  $R_n A$  (где  $A$  – площадь,  $R_n$  – нормальное сопротивление перехода) в диапазоне 25–30 Ом·мкм<sup>2</sup>, что соответствует плотности тока 7–8 кА/см<sup>2</sup> и удельной емкости 70 фФ/мкм<sup>2</sup>. Для перехода площадью 1 мкм<sup>2</sup> сопротивление может составлять около 30 Ом и емкость 70 фФ. На промежуточной частоте 4.5 ГГц емкостный импеданс составит 500 Ом и нормальное сопротивление 30 Ом, тогда как сопротивление абсорбера составляет около 70 Ом для согласования с планарной антенной по сигнальной частоте. В результате на ПЧ нужно согласовать 130 Ом сопротивления СИНИС-структуры с 50 Ом стандартного охлаждающего УПЧ, что легко достигается применением четвертьволнового копланарного согласующего трансформатора с характеристическим импедансом 80 Ом. Если же применить технологию туннельного перехода с AlN-барьером [6], у которого  $R_n A = 1$  Ом·мкм<sup>2</sup>, то проблема согласования по ПЧ снимается, поскольку вклад от последовательного сопротивления тун-

нельного перехода снижается до единиц Ом и по ПЧ импеданс будет определяться сопротивлением абсорбера, которое выбирается равным 70 Ом для согласования с планарной антенной на частоте сигнала.

**Разработка и исследование болометра на холодных электронах.** Для исследования предельных характеристик было разработано первое поколение БХЭ в стандартной технологии термического туннельного напыления туннельных переходов через двухслойную подвешенную маску электронного резиста. Пленку алюминия напыляли под углом к подложке и окисляли для образования туннельного барьера, пленку меди абсорбера длиной 10 мкм напыляли под прямым углом к подложке. Образцы формировали на окисленных кремниевых подложках с использованием электронной литографии и последующего теневого термического напыления. Первым наносили слой Cr-Au-Pd толщиной 160 нм для формирования контактных площадок и планарных антенн. Затем в едином вакуумном цикле через двухслойную маску Copolymer-PMMA напыляли собственно болометр. Нижний слой сверхпроводящего алюминия термически напыляли со скоростью 0.3 нм в секунду до толщины 70 нм. Туннельный барьер создавали окислением алюминия в атмосфере кислорода при давлении 10 Па в течение 2 мин. Сверху напыляли слой абсорбера в виде пленки меди толщиной 70 нм. Туннельные переходы оказывались сформированными в области перекрытия окисленных алюминиевых электродов с пленкой абсорбера. Площадь переходов составляла 0.5 × 0.7 и 0.2 × 0.3 мкм.

Болометры были интегрированы с логопериодическими и двойными дипольными антennами. Общий вид СИНИС-структуры с логопериодичес-

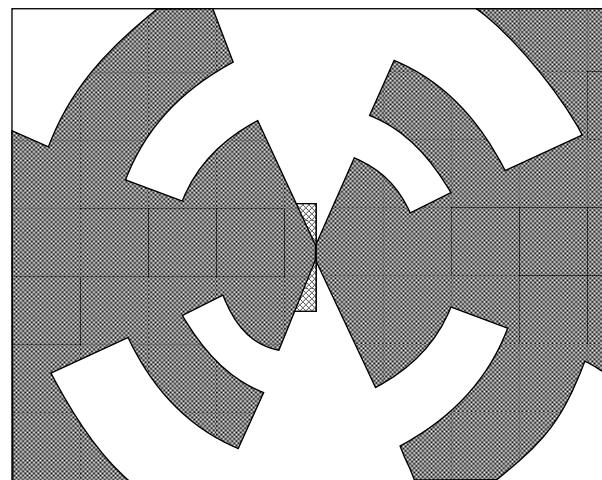


Рис. 1. Общий вид болометра, интегрированного в логопериодическую antennу. Светлое поле – металлизация

кой антенной представлен на рис.1 и детальный вид в районе туннельного перехода – на рис.2. Предельная мощность, эквивалентная шуму,

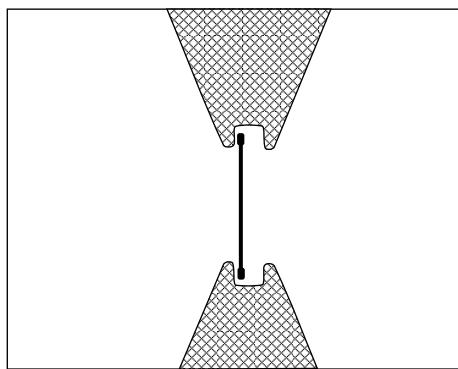


Рис.2. Центральная часть антенны с СИНІС болометром

$M_{\text{ЭШ}}=10^{-18} \text{ Вт}/\text{Гц}^{1/2}$ , была измерена на постоянном токе при температуре 50 мК в криостате растворения. Измерения отклика по току и напряжению и спектрального отклика (рис.3) проводили в криостате с оптическим окном при темпера-

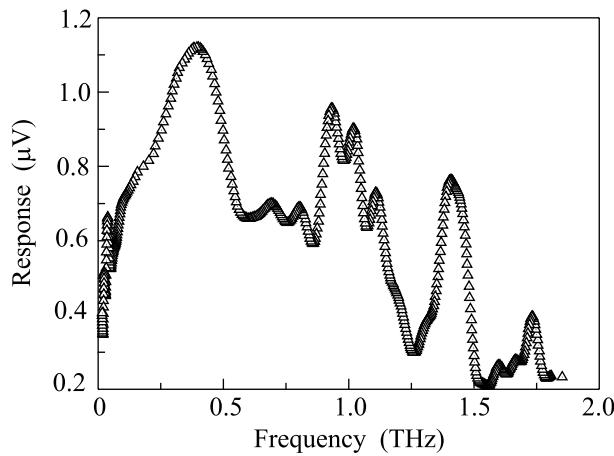


Рис.3. Спектральный отклик болометра в терагерцовом диапазоне

туре 280 мК. Эти зависимости иллюстрируют возможность СИНІС-болометра детектировать субмиллиметровое излучение на частотах до 2 ТГц, что намного превышает энергетическую щель алюминия. При этом мощность, эквивалентная шуму, состав-

ляет  $2 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}/\text{Гц}^{1/2}$  при 280 мК. Более подробно топология образцов и техника измерений описаны в [7]. Постоянная времени алюминиевых образцов, измеренная методом модуляции входного сигнала, при 280 мК составляла порядка микросекунды. Обычно для оценки времени электрон-фононной релаксации в меди используют соотношение  $\tau_{ep} = 20/T^3$  нс = 1 мкс при 300 мК, которое снижается до 0.36 нс при 4.2 К. Для увеличения промежуточной частоты СБГЭ во втором поколении СИНІС-структур мы планируем перейти от Al-AlOx-Cu- к Nb-AlOx-Pd структурам и измерять их характеристики при температуре жидкого гелия 4.2 К, что позволит увеличить промежуточную частоту выше 1 ГГц. Согласно нашим оценкам, изменение материала абсорбера, толщины пленки, применение электротермической обратной связи помогут увеличить ПЧ до 10 ГГц.

В заключение отметим, что мы экспериментально продемонстрировали применение СИНІС-структуры в качестве некогерентного детектора. На основании анализа характеристик такого болометра предложено применять БГЭ в качестве когерентного детектора терагерцового излучения. При этом снижаются требования к криогенному обеспечению и достигаются преимущества по частоте сигнала, отклику и шумам по сравнению с существующими СИС-смесителями и сверхпроводниковыми болометрами-смесителями на горячих электронах.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИНТАС # 01-686, а также шведских агентств VR, KVA.

1. A. Karrov, D. Miller, F. Rice et al, Proc. of SPIE **5498**, 616 (2004).
2. Е.М.Гершензон, М.Е.Гершензон, Г.Н.Гольцман и др., ЖТФ **59**, 111 (1989).
3. T. M. Klapwijk, R. Barends, J. R. Gao et al., Proc. of SPIE **5498**, 129 (2004).
4. L. Kuzmin, I. Devyatov, and D. Golubev, Proc. of SPIE **3465**, 193 (1998).
5. L. Filippenko, S. Shitov, P. Dmitriev et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 816 (2001).
6. H. Dmitriev, I. Lapitskaya, L. Filippenko et al., IEEE Trans. ASC **13**, 107 (2003).
7. М. Тарасов, Л. Кузьмин, Е. Степанцов и др., Письма в ЖЭТФ **79**, 356 (2004).