

05.5

Влияние диффузионного охлаждения на шумовую полосу сверхпроводникового NbN смесителя на горячих электронах терагерцового диапазона

© И.В. Третьяков^{1,2}, Н.С. Каурова¹, Б.М. Воронов¹,
В.А. Анфертьев², Л.С. Ревин², В.Л. Вакс², Г.Н. Гольцман¹

¹ Московский педагогический государственный университет

² Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

E-mail: ivantretikov@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 декабря 2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования шумовой температуры (T_n) и шумовой полосы (NBW) сверхпроводникового NbN смесителя на горячих электронах (Hot-electron bolometer (HEB) mixer) как функцию его температуры (T_b). Было обнаружено, что NBW смесителя значительно шире при температуре, близкой к критической (T_c), в сравнении с значениями, измеренными при 4.2 К. NBW смесителя, измеренная на частоте гетеродина 2.5 THz при T_b , близкой к T_c , составила ~ 13 GHz в сравнении с 6 GHz при $T_b = 4.2$ К. Этот эксперимент ярко демонстрирует ограничение теплового потока из NbN мостика при $T_b \ll T_c$ для смесителей, изготовленных в технологии *in situ*. Это ограничение близко по своей природе к андреевскому отражению на границе сверхпроводник/металл. При этом шумовая температура исследуемого смесителя увеличилась с 1100 до 3800 К.

Одним из результатов фундаментальных исследований в области неравновесной сверхпроводимости, проведенных в конце прошлого века, является открытие эффекта разогрева электронной подсистемы сильно разупорядоченной тонкой пленки сверхпроводника под действием электромагнитного излучения [1]. На основе этого эффекта была предложена концепция болометра на горячих электронах (Hot electron bolometer, HEB) для детектирования излучения терагерцового и субММ-диапазонов [1]. Как гетеродинный детектор, за счет чувствительности, быстродействия, неселективности по частоте и малой мощности

гетеродина [2,3], НЕВ смесители являются наиболее обещающими устройствами для применения в спектроскопии высокого разрешения терагерцового диапазона выше 1.4 THz в таких областях, как обеспечение безопасности и неинвазивная медицинская диагностика. Методы терагерцовой спектроскопии также используются в современных астрофизических исследовательских проектах. Совместный проект NASA и DLR инфракрасной обсерватории SOFIA включает в себя терагерцовый спектрометр GREAT, использующий НЕВ в диапазоне от 1.5 до 4.7 THz [4]. Важным ограничением в применении является быстродействие смесителя — порядка нескольких GHz, которое определяется энергетической релаксацией электронной системы сверхпроводящего мостика смесителя через электрон-фононное и/или диффузионное охлаждение. В работе [3] также говорится, что уменьшение длины мостика смесителя может привести к увеличению быстродействия за счет более ярко выраженной работы диффузионного канала. Такое поведение при температуре подложки смесителя T_b , близкой к его критической температуре T_c ($T_b \approx T_c$), было показано в работе [5]. Фундаментальная проблема, на решение которой направлена работа, это выяснение механизмов ограничения энергетической релаксации электронной подсистемы при различных режимах работы смесителя и возможность создания на их основе SmartНЕВ mixer, объединяющего в одном устройстве предельное быстродействие и чувствительность на частотах гетеродина выше $2\Delta/h$, где Δ — энергия щели сверхпроводника, h — постоянная Планка.

Исследуемые в работе образцы были изготовлены из пленки NbN толщиной 3.5–4 nm, осажденной *in situ* (последовательно в одном процессе, без открытия камеры), со слоем золота толщиной 20 nm. Электронная литография с последующими ионным и химическим травлением слоя Au до пленки NbN использовалась для задания длины будущего сверхпроводящего мостика смесителя, изменяемой от 0.1 до 0.4 μm . Внутренняя часть спиральной антенны формировалась электронной литографией с последовательным осаждением 70 nm слоя золота методом электронно-лучевого испарения. Внешняя часть антенны и компланарные контакты толщиной 120 nm формировались методами фотолитографии, электронно-лучевого испарения и процессом lift-off. Ширина мостика определялась шириной поверх осажденного слоя SiO, сформированного электронной литографией и стандартным процессом lift-off. Рис. 1 демонстрирует общую геометрию внутренней

части смесителя и планарной спиральной антенны, на правой части рисунка представлены схематическое изображение мостика смесителя и зависимость его сопротивления от физической температуры $R(T)$.

Как видно из графика, хороший контакт между пленкой сверхпроводника и нормальным металлом антенны приводит к появлению в зависимости $R(T)$ нескольких сверхпроводниковых переходов. Первый переход случается в районе 8.5 К и принадлежит центральной, непокрытой Au, части сверхпроводникового мостика. Сверхпроводимость в пленке NbN под *in situ* Au (NbN/Au bilayer) подавлена не полностью, второй переход на $R(T)$ при температуре 6.5 К принадлежит этой части смесителя. Третье падение сопротивления соответствует переходу NbN/Au multilayer в сверхпроводящее состояние. При температурах ниже второго сверхпроводникового перехода смеситель состоит из двух сверхпроводников — NbN мостика и NbN/Au bilayer с разными энергетическими щелями Δ и Δ' ; такое состояние назовем $S'SS'$ состоянием смесителя. Наблюдаемое после первого перехода плато сопротивления обусловлено процессом конверсии нормального тока электронов в ток куперовских пар в областях конверсии сверхпроводящего NbN мостика. В диапазоне температур между первым и вторым переходами NbN/Au bilayer находится в нормальном состоянии N, а NbN мостик в сверхпроводящем состоянии S, назовем это состояние NSN (Normal/Superconducting/Normal state) состоянием смесителя.

На рис. 2 представлены семейства ВАХ для этих двух состояний при разной мощности гетеродина на частоте 2.5 THz. ВАХ при температуре подложки $T_b = 4.5$ К с выключенным гетеродином ($S'SS'$ состояние) имеет три ярко выраженных перегиба. Наклон порядка 1Ω соответствует сопротивлению подводящих проводов. Учитывая строение смесителя, первый перегиб соответствует переходу в нормальное состояние NbN/Au multilayer части антенны, наклон в 3.3Ω есть сумма сопротивлений подводящих проводов и слоя Au антенны. Второй перегиб при превышении напряжения выше 0.7 мВ соответствует переходу в нормальное состояние NbN/Au bilayer части антенны. Таким образом, в диапазоне напряжений 0.7 – 0.8 мВ сверхпроводящий NbN мостик заключен между NbN/Au портами антенны в нормальном состоянии. Наклон порядка 13.3Ω складывается из последовательных сопротивлений подводящих проводов 1Ω , сопротивления NbN/Au multilayer части антенны 2.3Ω , сопротивления NbN/Au bilayer части антенны 3.75Ω и вклада сверхпроводящего NbN мостика. Дополнительный вклад по-

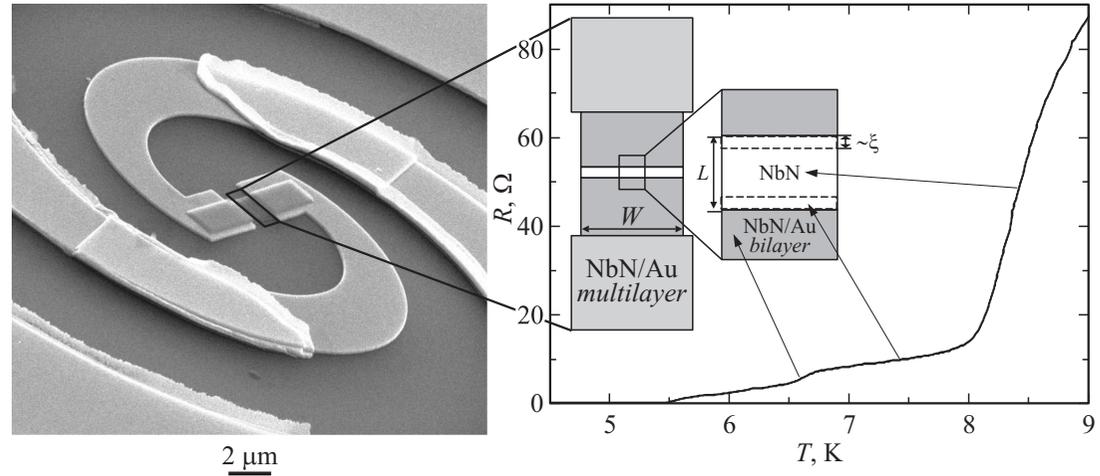


Рис. 1. *a* — SEM-изображение исследуемого смесителя. *b* — зависимость $R(T)$ смесителя и схематическое изображение геометрии NbN мостика смесителя с NbN/Au двухслойной (NbN/Au bilayer) и трехслойной (NbN/Au multilayer) структурой антенны. NbN/Au bilayer отмечен более темным цветом, NbN/Au multilayer — более светлым, не покрытый золотом NbN мостик не закрашен. Две стрелки связывают наблюдаемые сверхпроводниковые переходы на $R(T)$ с соответствующими частями смесителя: непокрыты NbN мостиком смесителя и NbN/Au bilayer структурой антенны. Третий переход, не отмеченный стрелкой, принадлежит NbN/Au multilayer антенны. Третья стрелка указывает на наблюдаемое после первого перехода плато сопротивления, обусловленное процессом конверсии нормального тока электронов в нормальной части смесителя в ток куперовских пар в сверхпроводящем мостике. Пунктирной линией выделены области конверсии, их длина близка к длине когерентности в материале ξ . Для пленки NbN толщиной 3.5–5 nm $\xi \sim 4$ nm.

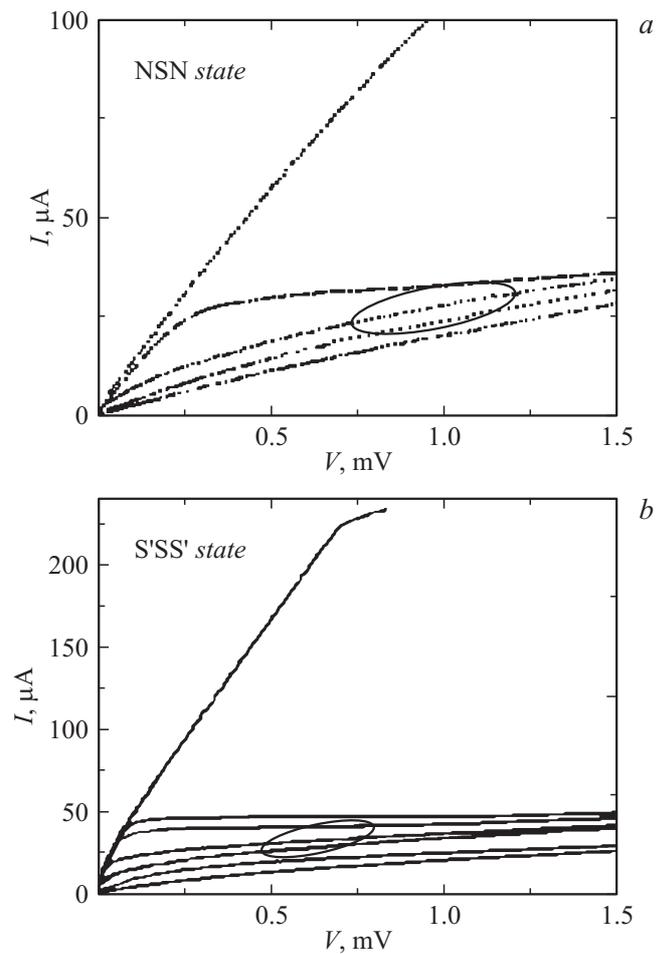


Рис. 2. ВАХ смесителя с шириной мостика $W = 0.19 \mu\text{m}$ при двух температурах подложки, при которых реализуется два режима работы $S'SS'$ и NSN при различной мощности гетеродина на частоте 2.5 THz на входе смесителя. На вставке эллипсами выделены оптимальные по шумовой температуре рабочие области.

рядка $13.3 \Omega - (1 + 2.3 + 3.75)\Omega = 6.25\Omega$ вносит NbN мостик, находящийся в сверхпроводящем состоянии. Природа этого дополнительного сопротивления заключается в хорошо изученном в 70-е годы прошлого века эффекте зарядового дисбаланса при конверсии нормального тока в сверхпроводящий ток. Следовательно, при температурах смесителя в диапазоне между критическими температурами NbN/Au bilayer и NbN мостика, вблизи NbN/Au bilayer, всегда существует резистивная область с конечным сопротивлением, величина которого определяется шириной W мостика. ВАХ смесителя при $T_b = 8$ К с выключенным гетеродином имеет лишь один наклон с сопротивлением, совпадающий с уровнем плато сопротивления на $R(T)$ после сверхпроводникового перехода NbN мостика, при этом образец находится в NSN состоянии.

Шумовая температура T_n и ее зависимость от промежуточной частоты была измерена на частоте гетеродина 2.5 THz при различных температурах подложки смесителя T_b . Методика измерения и экспериментальная установка подробно описаны в работах [5,6]. ВАХ и оптимальная рабочая область исследуемого смесителя представлены на рис. 2. В оптимальной рабочей области при $T_b = 4.5$ К не скорректированная на оптические потери T_n составила 1100 К. Из экспериментальных данных, представленных на рис. 3, рассчитана частота, на которой шумовая температура увеличивалась в 2 раза по сравнению со значением на нулевой IF, эта частота определяет шумовую полосу смесителя (NBW). Из рис. 3 видно, что NBW смесителя увеличивается с 5 до 13 GHz при переходе из $S'SS'$ в NSN состояние. Увеличение быстродействия более чем в 2 раза наглядно демонстрирует открытие дополнительного диффузионного канала охлаждения электронной подсистемы центральной части NbN мостика в NSN состоянии смесителя. Мы интерпретируем это как переход из состояния $S'SS'$, когда центральная горячая часть мостика отделена от холодных металлических контактов потенциальными барьерами для нормальных горячих электронов, в состояние NSN, в котором высота этих потенциальных барьеров много ниже и соизмерима с $k_B T$, при этом вероятность выхода горячего электрона существенно возрастает.

Как было показано показано Vercauysen [7], Pothier [8], Boogaard [9], существуют два эффекта, которые необходимо учитывать: 1) существуют два сверхпроводящих домена по сторонам горячей резистивной части в центре NbN мостика при протекании тока через мостик; 2) в сверхпроводящем мостике существует встроенное сопротивление, обу-

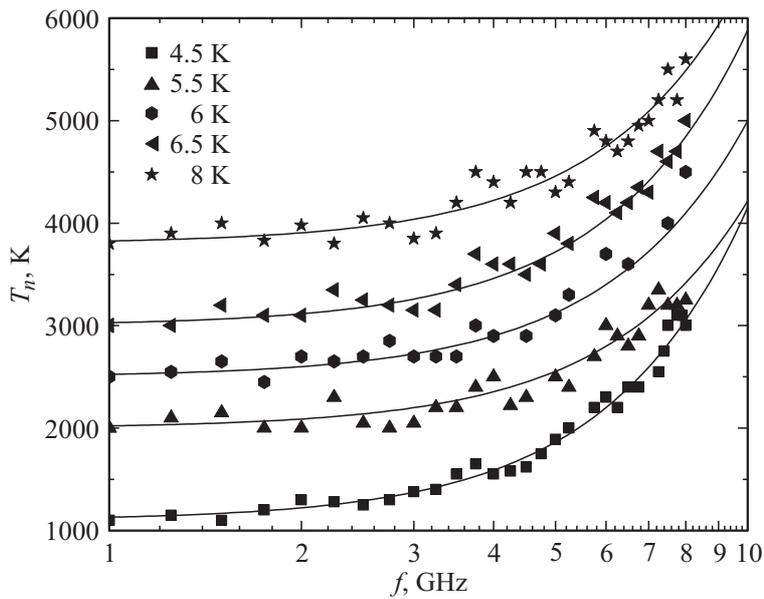


Рис. 3. T_n при различных значениях T_b смесителя с длиной NbN мостика $0.19\ \mu\text{m}$. Видно, что NBW смесителя увеличивается более чем в 2 раза с 5 до 13 GHz при увеличении температуры подложки смесителя от 4.5 до 8 K. Увеличение NBW происходит при переходе из $S'SS'$ в NSN состояние. Как и ожидалось, T_n смесителя при переходе в NSN состоянии увеличилось до 3800 K@2.5 THz.

словленное процессом конверсии нормального тока в сверхток вблизи нормальных контактов мостика [9] Полученные результаты находятся в хорошем согласии с работами [4] и [10]. Учитывая эти факты и представленные экспериментальные данные, получили подтверждение нашей гипотезы, предполагающей, что для смесителя с хорошим контактом между сверхпроводниковой пленкой и металлическими контактами, имеющего максимальную чувствительность при $T_b \ll T_c$, существует потенциальный барьер, препятствующий диффузии горячих электронов в металлические контакты, тем самым ограничивающий быстродействие смесителя. Измеренная NBW вблизи T_c в 13 GHz является результатом

совместной работы диффузионного и фононного каналов охлаждения электронной подсистемы мистика смесителя в NSN состоянии, невозможной в $S'SS'$ состоянии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-12-10035).

Список литературы

- [1] *Gershenzon E.M., Goltsman G.N., Gogidze I.G., Gousev Y.P., Elantiev A.I., Karasik B.S., Semenov A.D.* // *Sov. Phys. Superconductivity*. 1990. V. 3. P. 1582.
- [2] *Zhang W., Khosropanah P., Gao J.R., Kollberg E.L., Yngvesson K.S., Bansal T., Barends R., Klapwijk T.M.* // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 111 113.
- [3] *Prober D.E.* // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. 62. P. 2119.
- [4] <https://www.sofia.usra.edu>
- [5] *Ivan Tretyakov, Sergey Ryabchun, Matvey Finkel, Anna Maslennikova, Natalia Kaurova, Anastasia Lobastova, Boris Voronov, Gregory Goltsman* // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. P. 033 507.
- [6] *Baselmans J.J.A., Baryshev A., Reker S.F., Hajenius M., Gao J.R., Klapwijk T.M., Vachtomin Yu., Maslennikov S., Antipov S., Voronov B., Goltsman G.* // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. P. 163 503. *Vercryssen N., Verhagen T.G.A., Flokstra M.G., Pekola J.P., Klapwijk T.M.* // *Phys. Rev. B*. 2012. V. 85. P. 224 503.
- [7] *Vercryssen N., Verhagen T.G.A., Flokstra M.G., Pekola J.P., Klapwijk T.M.* // *Phys. Rev. B*. 2012. V. 85. P. 224 503.
- [8] *Pothier H., Guéron S., Birge N.O., Esteve D., Devoret M.H.* // *Phys. Rev. Lett.* 1997. V. 79. P. 18.
- [9] *Boogaard G.R., Verbruggen A.H., Belzig W., Klapwijk T.M.* // *Phys. Rev. B*. 2004. V. 69. P. 220 503(R).
- [10] *Tretyakov I., Maslennikov S., Semenov S., Finkel M., Ryabchun S., Kaurova N., Voronov B., Goltsman G., Klapwijk T.M.* // *ISSTT. Cambridge*, 2015. P. 228.