

12

Оптимальная поглощенная мощность гетеродина для терагерцового сверхпроводникового NbN смесителя на электронном разогреве

© И.В. Третьяков, С.А. Рябчун, Н.С. Каурова, П.А. Ларионов,
А.А. Лобастова, Б.М. Воронов, М.И. Финкель, Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет
E-mail: ivantretikov@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2010 г.

Представлены результаты измерений поглощенной мощности гетеродина маломощным широкополосным смесителем на эффекте электронного разогрева в резистивном состоянии сверхпроводниковой ультратонкой пленки NbN. Оптимальная поглощенная мощность гетеродина составила около 100 nW на частоте 2.5 THz.

Эффект электронного разогрева в ультратонких сверхпроводниковых пленках, благодаря сравнительной простоте реализации и неселективности по частоте, позволил разработать уникальные терагерцовые гетеродинные детекторы электромагнитного излучения — сверхпроводниковые смесители на эффекте электронного разогрева (НЕВ-смесители, hot-electron bolometer) [1]. В зависимости от механизма охлаждения электронной подсистемы НЕВ-смесители делятся на два типа: смесители с фоновым каналом охлаждения [1] и смесители с диффузионным каналом охлаждения [2]. Практическое применение в терагерцовой радиоастрономии в настоящее время нашли только смесители первого типа благодаря их низкой шумовой температуре и стабильности работы. Для наземных телескопов наблюдения на частотах выше 1 THz затруднены в связи с существенным ослаблением излучения за счет поглощения земной атмосферой. Чтобы избежать потерь предельно слабых сигналов, обсерватории размещают в верхних слоях атмосферы или в космосе (SOFIA [3], TELIS [4], Herschel [5]). При этом предъявляются высокие требования к массе, габаритам и энергопотреблению составных частей телескопа, поэтому в качестве

гетеродина для НЕВ-смесителя используются твердотельные источники терагерцового излучения. Однако подобные устройства существенно ограничены по мощности. В этой связи одним из важных параметров, определяющих работоспособность НЕВ-смесителя, является оптимальная поглощенная мощность гетеродина. Данная характеристика определяет минимальную мощность гетеродина, которую необходимо подать на вход НЕВ-смесителя, чтобы ввести его в рабочую область по току.

В работе исследовались смесители, изготовленные по технологии *in situ* (первые результаты использования технологии *in situ* в изготовлении НЕВ-смесителей приведены в работе [6]), позволяющей улучшить омический контакт между сверхпроводящим мостиком смесителя и планарной антенной. Сочетание малых омических потерь и уменьшение длины сверхпроводящего мостика до диффузионной реализует одновременно два канала охлаждения горячих электронов — фононный и диффузионный. Являясь в первую очередь смесителем с фононным каналом охлаждения, такой смеситель демонстрирует рекордно низкую шумовую температуру и хорошую стабильность. При этом достигается широкая полоса преобразования благодаря дополнительному диффузионному каналу охлаждения [6]. Однако параллельная работа двух каналов охлаждения электронной подсистемы сверхпроводящего мостика может привести к возрастанию необходимой мощности гетеродина. Таким образом, в данной работе измерялась зависимость оптимальной поглощенной мощности гетеродина от объема сверхпроводящего мостика смесителя.

НЕВ-смеситель изготавливался из двухслойной структуры NbN–Au, нанесенной на кремниевую подложку. Пленка NbN осаждалась на полированную высокоомную кремниевую подложку, в следующем процессе без разгерметизации камеры (*in situ*) на поверхность пленки NbN осаждалось золото. Далее с помощью электронной литографии изготавливались сверхпроводящие мостики длиной 0.1–0.4 μm . Из слоя Au формировалась спиральная антенна смесителя. С учетом сопротивления пленки NbN ($500 \Omega/\square$) выбирали отношение ширины к длине смесителя, равное 0.1, для согласования смесителя с антенной и трактом промежуточных частот. Смесители имели два сверхпроводниковых перехода: один вблизи 9 К — переход самого смесительного мостика и вблизи 7 К — переход части пленки под золотом антенны. Наличие второго перехода объясняется проявлением эффекта близости

Шумовая температура исследуемых НЕВ-смесителей

Length, μm	T_n , К
0.1	1000
0.2	950
0.28	950
0.3	1000
0.4	1000

между *in situ* золотом и сверхпроводником и говорит о хорошем электрическом контакте сверхпроводящего мостика с антенной.

При проведении радиоастрономических наблюдений выбирается рабочая точка, в которой смеситель имеет минимальную шумовую температуру. Измерение оптимальной поглощенной мощности гетеродина проводилось совместно с измерением шумовой температуры НЕВ-смесителя на частоте гетеродина 2.2 THz, при температуре 4.2 К.

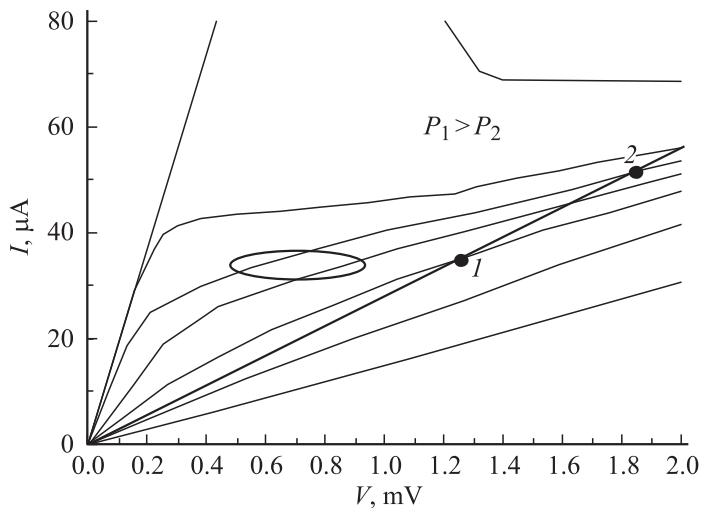


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики НЕВ-смесителя при температуре 4.2 К с размерами $0.1 \times 1 \mu\text{m}$ в плане при разной мощности гетеродина, при этом каждая нижележащая ВАХ соответствует большей мощности гетеродина. Овалом на ВАХ выделена рабочая область, также выполнены построения для вычисления оптимальной поглощенной мощности гетеродина.

Шумовая температура исследуемых НЕВ-смесителей близка к лучшим значениям на данной частоте гетеродина [7] и представлена в таблице. На рис. 1 представлено семейство вольтамперных характеристик (ВАХ) НЕВ-смесителя, снятых при разных уровнях мощности гетеродина. Область, оптимальная по шумовой температуре, выделена овалом.

В эксперименте смесительный блок с НЕВ-смесителем, закрепленным на эллиптической кремниевой линзе, устанавливался на холодную плату оптического гелиевого криостата с входным окном из полиэтилена высокой плотности толщиной 0.5 mm и инфракрасным фильтром, изготовленным из Zitex 106, на азотном экране. Для уменьшения эффекта прямого детектирования [8] использовался сеточный фильтр с полосой пропускания 2–3 THz, установленный на гелиевый экран криостата. Излучение от газоразрядного лазера на парах воды с линией генерации на частоте 2.5 THz, служащего гетеродином, совмещалось с излучением от абсолютно черного тела при помощи майларового делителя луча толщиной 6 μm и заводилось в криостат. Сигнал со смесителя через адаптер смещения поступал на охлаждаемый усилитель с коэффициентом усиления 30 dB в полосе 1–2 GHz. Усиленный сигнал с помощью коаксиального кабеля выводился из криостата и поступал через 3 dB аттенюатор на вход второй ступени усиления, состоящей из двух усилителей с коэффициентом усиления 30 dB каждый в полосе 0.01–2 GHz. Теплые усилители были разделены 3 dB аттенюаторами и перестраиваемым полосовым фильтром с полосой пропускания 50 MHz. После последней ступени усиления сигнал поступал на квадратичный детектор, выходное напряжение которого измерялось цифровым микровольтметром. Шумовая температура НЕВ-смесителя рассчитывалась из формулы

$$T_n = (T_{\text{hot}} - Y \times T_{\text{cold}}) / (Y - 1),$$

где T_{hot} и T_{cold} — яркостные температуры абсолютно черного тела 300 и 77 K соответственно, Y — отношение уровней мощности шума на выходе смесителя при горячей (300 K) и холодной (77 K) нагрузке на входе.

Поглощенная мощность гетеродина в оптимальной рабочей точке определялась в приближении эквивалентности разогрева смесителя током смещения и излучением гетеродина (изотермический метода [9]). Это приближение справедливо, когда разогрев током смещения преобладает над разогревом излучением, т.е. при значительно больших

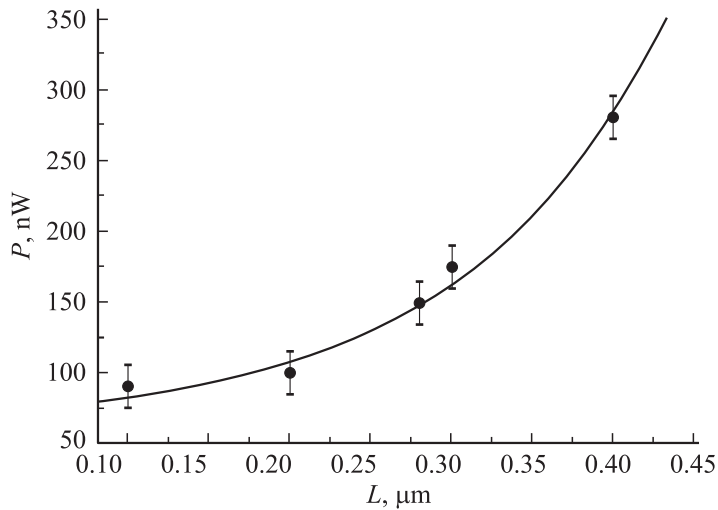


Рис. 2. Зависимость оптимальной поглощенной мощности гетеродина от длины мостика смесителя.

напряжения смещения, чем в оптимальной рабочей точке. Расчет поглощенной мощности производится следующим образом. Через начало координат проводится прямая линия, пересекающая оптимальную по мощности гетеродина ВАХ в точке 1 и ВАХ при мощности гетеродина в n раз больше в точке 2. Так как сопротивления в точках 1 и 2 равны, то и температура электронной подсистемы в этих точках практически одинакова. Следовательно, для поглощенной мощности гетеродина P_1 , P_2 , напряжений смещения V_1 , V_2 и транспортных токов I_1 , I_2 в этих точках выполняется равенство:

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

Поскольку переход от ВАХ с точкой 1 на ВАХ с точкой 2 осуществляется уменьшением в n раз мощности гетеродина, то получаем еще одно уравнение:

$$P_1 = n \times P_2.$$

Из полученной системы уравнений можно определить поглощенную мощность P_2 .

Для смесителя с размерами в плане $0.2 \times 2 \mu\text{m}$ оптимальная поглощенная мощность гетеродина 100 nW . На рис. 2 представлена зависимость поглощенной мощности от длины мостика смесителя. Оптимальная поглощенная мощность уменьшалась с уменьшением размеров смесителя, но затем, в пределах экспериментальной погрешности, практически не менялась при уменьшении размеров от $0.2 \times 2 \mu\text{m}$ до $0.1 \times 1 \mu\text{m}$ в плане.

Качественно это можно объяснить следующим образом. Поглощенная мощность пропорциональна объему смесителя, т.е. при постоянной толщине пленки пропорциональна площади его поверхности. Таким образом, уменьшая размеры в плане, можно уменьшить и требуемую мощность. Это будет продолжаться до некоторой длины, при которой становится эффективным диффузионное охлаждение, скорость которого обратно пропорциональна квадрату длины. Учитывая, что при изготовлении соблюдается определенное отношение длины смесителя к его ширине, уменьшение длины в q раз приведет к уменьшению поглощенной мощности в q^2 раз, но при этом и скорость оттока энергии возрастет в q^2 раз. Следовательно, в первом приближении уменьшение длины смесителя с целью уменьшить требуемую мощность эффективно лишь до определенного предела.

В работе была исследована зависимость оптимальной поглощенной мощности гетеродина от длины сверхпроводящего мостика НЭВ-смесителя. Оптимальная поглощенная мощность гетеродина составила 100 nW и практически не менялась при уменьшении размеров от $0.2 \times 2 \mu\text{m}$ до $0.1 \times 1 \mu\text{m}$ в плане.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию в рамках государственного контракта № П2020 и Федерального агентства по науке и инновациям в рамках государственного контракта № 02.740.11.0228.

Список литературы

- [1] Гершензон Е.М., Гольцман Г.Н., Гогидзе И.Г., Гусев Ю.П., Елантьев А.И., Карасик Б.С., Семёнов А.Д. // Сверхпроводимость: физика, химия, технология. 1990. № 10. Т. 3. С. 1711.
- [2] Prober D.E. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 2119.
- [3] SOFIA — Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy. — Internet 100 page. 2009. <http://www.sofia.usra.edu/>.

- [4] *TELLIS* — Terahertz and submillimeter Limb Sounder. Internet page. 2009. http://www.sron.nl/index.php?option=com_content&task=view&id=2037&Itemid=1900
- [5] *HERSCHEL*. Internet page. 2009. <http://www.esa.int/science/herschel>
- [6] *Ryabchun S.A., Tretyakov I.V., Finkel M.I., Maslennikov S.N., Kaurova N.S., Seleznev V.A., Voronov B.M., Gol'tsman G.N.* // ISSTT. Croningen. 2008. P. 62–67.
- [7] *Ryabchun S.A., Tretyakov I.V., Finkel M.I., Maslennikov S.N., Kaurova N.S., Selesnev V.A., Voronov B.M., Gol'tsman G.N.* // ISSTT. Charlottesville. 2009. P. 151–154.
- [8] *Vachtomin Yu.B., Antipov S.V., Maslennikov S.N., Smirnov K.V., Polyakov S.L., Kaurova N.S., Grishina E.V., Voronov B.M., Goltzman G.N.* // ISST. Massachusetts. 2004. P. 236–241.
- [9] *Elantev A.I., Karasik B.S.* // J. Low Temp. Phys. 1989. V. 15. P. 675–683.