

## ДЖОЗЕФСОНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ НА СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

М.Тарасов<sup>1)</sup>, А.Шульман, О.Полянский, А.Выставкин, Е.Косарев<sup>+</sup>,  
Д.Голубев\*, Е.Степанцов<sup>Δ</sup>, М.Дарула<sup>□2)</sup>, О.Харнак<sup>□2)</sup>, З.Иванов<sup>◇3)</sup>

Институт радиотехники и электроники РАН  
103907 Москва, Россия

<sup>+</sup> Институт физических проблем им. П.Капицы РАН  
117973 Москва, Россия

\* Физический институт им.П.Лебедева РАН, 117924 Москва, Россия

Δ Институт кристаллографии РАН, 117333 Москва, Россия

□ Исследовательский центр, 52425 Юлих, Германия

◇ Чалмерский технологический университе, S41296 Гетеборг, Швеция

Поступила в редакцию 6 июля 1999 г.

Разработан, изготовлен и экспериментально исследован джозефсоновский высокотемпературный сверхпроводящий (ВТСП) спектрометр субмиллиметровых волн. Интегральная приемная структура спектрометра включает УВСО джозефсоновский переход на бикристаллической границе, двухщелевую или логопериодическую антенну и низкоиндуктивный резистивный шунт. Селективный детекторный отклик и отклик на промежуточной частоте 1,4 ГГц измерялись при воздействии сигнала в диапазоне частот 350–1250 ГГц. В таком устройстве исследованы три метода спектроскопии: 1) реализован метод гильберт-спектроскопии при обработке детекторного отклика; 2) обнаружено, что в случае широкой линии джозефсоновской генерации промежуточной частоты (ПЧ) отклик имеет такую же форму, как и детекторный отклик, что позволяет получить спектр и ширину линии генерации из измерений ПЧ отклика; 3) в случае узкой линии джозефсоновской генерации отклик на ПЧ соответствует режиму преобразования с самонакачкой. Для вычисления спектра излучения предложен новый метод, состоящий из простых операций сдвига, суммирования и вычитания. Преимуществами метода являются простота, высокая чувствительность и разрешение.

PACS: 74.40.+k, 74.50.+g, 74.72.Bk

Спектрометры миллиметровых и субмиллиметровых волн на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) джозефсоновских переходов могут работать в температурном диапазоне  $4 \div 77$  К. По сравнению со спектрометрами, использующими диоды Шотки, джозефсоновские смесители могут иметь шумовую температуру в 2–3 раза ниже [1,2]. До настоящего времени был широко известен метод гильберт-спектроскопии [3], применяемый для обработки селективного детекторного отклика джозефсоновского перехода. Другим возможным методом спектроскопии с использованием джозефсоновского перехода может быть режим смесителя с внешней накачкой или с самонакачкой.

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

<sup>2)</sup> M.Darula, O.Harnack, Institute of Thin Film and Ion Technology, Research Center Juelich, Germany.

<sup>3)</sup> Z.Ivanov, Chalmers University of Technology, Gothenburgh, Sweden.

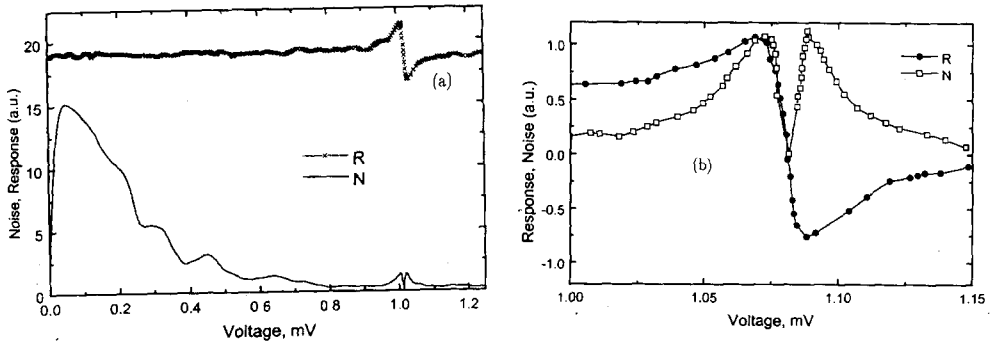


Рис.1. а) Шумы ( $N_p, N_a$ ) и ВАХ ( $I$ ), измеренные под действием облучения на частоте 0.5 ТГц ( $N_p$ ) и без облучения ( $N_a$ ). б) Селективный детекторный отклик  $R$  и шум  $DN$ , последний после вычитания автономных шумов и извлечения квадратного корня. Ширина линии генерации больше ПЧ

В смесителе с самонакачкой входной сигнал на частоте  $f_s$  смешивается с собственными джозефсоновскими колебаниями. Если входным является монохроматический сигнал, то ширина линии преобразованного сигнала на промежуточной частоте (ПЧ) будет соответствовать ширине линии джозефсоновской генерации  $\Delta f_J$ , что является естественной мерой спектрального разрешения такого спектрометра. Чтобы улучшить разрешение такого спектрального прибора, можно применять шунтирование перехода низкоиндуктивным резистивным шунтом. Согласно теоретическим оценкам минимальная двухполосная шумовая температура джозефсоновского смесителя с самонакачкой [1,2] соответствует физической температуре  $T$  для  $f < 0.2f_c$ , и уменьшается как  $8(f/f_c)^2$  при увеличении частоты выше  $f_c$ . Низкоиндуктивный шунт улучшает шумовую температуру смесителя с внешним гетеродином и разрешение смесителя с самонакачкой.

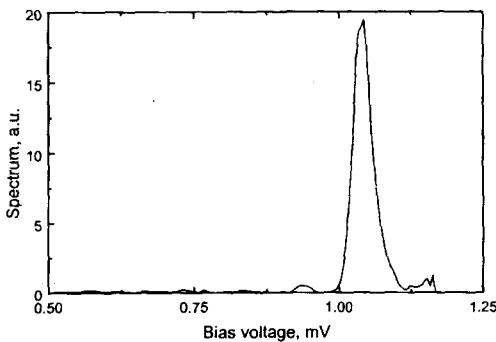


Рис.2. Спектр, полученный из детекторного отклика с использованием преобразования Гильберта

Интегральная приемная структура включала в себя  $YBaCuO$  джозефсоновский переход, сформированный на бикристаллической  $MgO$  или сапфировой подложке, и золотую комплементарную логопериодическую или двойную щелевую антенну. Пленку  $YBaCuO$  толщиной 80–100 нм наносили методом лазерной абляции. Переходы шириной 2 мкм при температуре 4,2 К имели нормальное сопротивление 10 Ом и критический ток 300 мкА. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованных переходов имели малую долю избыточного тока, фраунгоферову зависимость крити-

ческого тока от магнитного поля и осциллирующие зависимости ступеней Шапиро и критического тока от мощности СВЧ излучения. Для шунтирования переходов использовались либо интегральные шунты, напыленные на одну подложку с переходом, либо петли из золотой проволоки диаметром 5 мм и толщиной 50 мкм, приваренные ультразвуковой сваркой к контактным площадкам. Такие шунты имели сопротивление менее 0,1 Ом при 4,2 К и не шунтировали существенно на промежуточной частоте 1.4 ГГц.

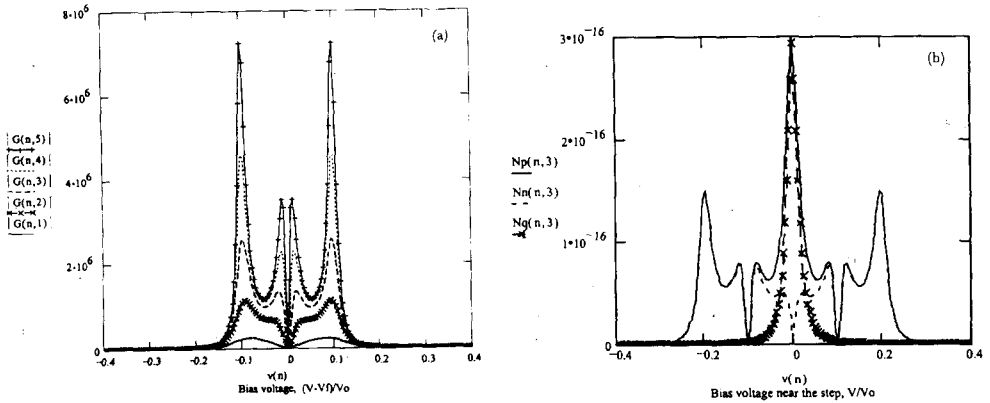


Рис.3. а) Расчет коэффициента преобразования  $G$  в районе ступени Шапиро. Максимум вблизи напряжения ступени ( $V = 0$ ) соответствует максимуму  $R_d$ , а расположенные дальше максимумы соответствуют смещению на напряжение промежуточной частоты  $|V - V_f| = V_{IF} = 0.1 V_0$ . б) Сумма  $Np$  и разность  $Nn$  сдвинутых зависимостей и восстановленный спектр  $Nq$

Подложка с приемной структурой размещалась на плоской поверхности удлиненной гиперполусферической  $MgO$  линзы, расположенной на холодной плате гелиевого криостата с оптическим окном. В качестве источников сигнала использовались лампы обратной волны (ЛОВ) диапазонов 350–650 и 880–1250 ГГц. В качестве источника широкополосного сигнала использовалось излучение холодной (77 К) и теплой (300 К) нагрузок. Широкополосный сигнал смешивался с излучением ЛОВ с помощью полиэтиленового расщепителя пучка. Для устранения влияния ИК перегрева образца на ступенях 77 К и 4 К использовались фильтры из черного полиэтилена и флюороголда (FLUOROGOLD™). Сигнал ПЧ через согласующую цепь подключался к охлажденному до 4,2 К усилителю с холодным циркулятором на входе.

Измерены зависимости селективного детекторного отклика и ПЧ сигнала под действием внешнего излучения на частотах до 1250 ГГц (рис.1). Обнаружено, что зависимости сигнала ПЧ аналогично детекторному отклику могут быть использованы для определения ширины линии генерации и частоты воздействующего сигнала (рис.1б), поскольку положения максимумов и минимумов детекторного отклика и отклика ПЧ совпадают в случае, когда ширина линии джозефсоновской генерации превышает промежуточную частоту. Расчет спектра сигнала методом преобразования Гильберта от модифицированного детекторного отклика известен как гильберт-спектроскопия [3], а предлагаемый метод отклика ПЧ можно рассматривать как его модификацию, которая позволяет упростить технику измерений и улучшить чувствительность и частотное разрешение. На частоте 1000 ГГц при температуре 4,2 К ширина линий генерации составила 34 ГГц для перехода с сопротивлением 20 Ом,

28 ГГц для перехода с сопротивлением 4 Ом и 4.5 ГГц для перехода с резистивным шунтом 0,7 Ом. Эти значения превышают в 6–8 раз простые оценки из расчетов на основе резистивной модели джозефсоновского перехода с тепловыми шумами в качестве основного источника флуктуаций  $\Delta f[\text{МГц}] = 40(R_d^2/R_n)T[\text{K}]$ , см. [1,2].

Восстановленный спектр при облучении на частоте 0,5 ТГц, полученный методом преобразования Гильберта из детекторного отклика, представлен на рис.3. Измеренные в случае широкой полосы собственной генерации ( $\Delta f_J > f_{IF}$ ) зависимости ВЧ отклика имеют максимумы и минимумы при тех же значениях напряжения смещения, что и детекторный отклик. Для этого случая значения ширины линии генерации и частоты сигнала могут быть получены аналогично случаю синхронного детектора. В случае, если ПЧ превышает ширину линии джозефсоновской генерации  $\Delta f_{IF} > f_J$ , положения максимумов сигнала ПЧ соответствуют сумме и разности напряжений частоты сигнала  $V_s = f_s \Phi_0$  и ПЧ  $V_{IF} = f_{IF} \Phi_0$ , такой режим преобразования детально исследован в [4]. Этот случай можно легко моделировать численно и с использованием аналитических соотношений. На рис.3 представлены рассчитанные зависимости коэффициента преобразования от напряжения смещения при разных значениях добротности. Качественно эти зависимости соответствуют измеряемым значениям на рис.1.

Для выделения спектра из таких зависимостей нами предложен простой метод численной обработки. Он включает в себя вычитание автономного значения шумов без сигнала  $Na(v)$  из значений, полученных при подаче сигнала  $Np(v)$ , при тех же значениях постоянного смещения (см. рис.4):

$$Ne(v) = Np(v) - Na(v). \quad (1)$$

Затем сдвигают эти зависимости по напряжению смещения на  $+v_{if}$  и на  $-v_{if}$ , где  $v_{if} = f_{iv} \Phi_0$

$$Ne(v + v_{if}) \quad \text{и} \quad Ne(v - v_{if}). \quad (2)$$

Из этих двух зависимостей получают суммарную и разностную зависимости:

$$Ns(v) = Ne(v + v_{if}) + Ne(v - v_{if}), \quad (3)$$

$$Nd(v) = Ne(v + v_{if}) - Ne(v - v_{if}). \quad (4)$$

Из двух последних получают искомый спектр:

$$S(v) = Ns(v) - |Nd(v)|. \quad (5)$$

Примеры такого расчета представлены на рис.3 для модельной теоретической кривой и на рис.4 для экспериментальной зависимости.

Положения максимумов детекторного отклика можно получить из аналитического выражения для ВАХ джозефсоновского перехода вблизи ступеней Шапиро в присутствии тепловых шумов нормального сопротивления  $R_0$ . Размытие ступени характеризуется безразмерным параметром

$$\gamma = 2ekT/\hbar I_{st}, \quad (6)$$

где  $I_{st}$  – полуширина ступени в отсутствие шума. Точные аналитические расчеты достаточно громоздки, но для практических оценок можно вывести упрощенные соотношения:

$$\Delta V \cong 1.92R_0 \sqrt{2ekTI_{st}/h} \quad \text{для} \quad \gamma \leq 1, \quad (7a)$$

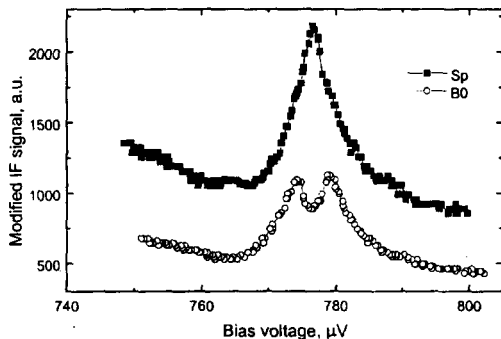


Рис.4. Экспериментальная зависимость выходного ПЧ сигнала (квадраты) и восстановленный спектр (кружки)

$$\Delta V \cong 4\sqrt{3}kTR_0/h \text{ для } \gamma \geq 1, \quad (7b)$$

$$\Delta V = 2f_{if}h/2e \text{ для } I_{st} \cong 0. \quad (7c)$$

Из этих соотношений видно, что когда ширина линии джозефсоновских колебаний превышает промежуточную частоту, положения максимумов детекторного отклика и ПЧ отклика совпадают. Для противоположного случая положение детекторного отклика остается вблизи максимума  $R_d$ , а максимумы ПЧ отклика располагаются в районе боковых полос смесителя с самонакачкой, то есть при напряжениях  $V_{maz} = (f_J \pm f_{if})\Phi_0$ . Чувствительность этих методов в первом приближении определяется чувствительностью усилителей. Для низкочастотного детекторного отклика чувствительность ограничена шумами со спектром типа  $1/f$  и приблизительная оценка шумов усилителя составляет около  $V_N = 5 \text{ нВ}/\Gamma\text{ц}^{1/2}$ . Шумовая температура охлаждаемого усилителя на ПЧ может составлять менее 10 К. С учетом коэффициента преобразования смесителя с самонакачкой  $0 \div 10 \text{ дБ}$  и измеренной шумовой температуры порядка  $T_N \approx 1000 \text{ К}$ , а также приняв чувствительность детектора  $\eta = 10^6 \text{ В/Вт}$  [5], можно сделать следующие оценки спектральной плотности шумов для детекторного и смесительного спектрометров:

$$S_{det} = V_N/\eta = 5 \cdot 10^{-9}/10^6 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}/\Gamma\text{ц}^{1/2}, \quad (8)$$

$$S_{spm} = k \cdot T_N = 1.4 \cdot 10^{-23} \cdot 1000 = 1.4 \cdot 10^{-20} \text{ Вт}/\Gamma\text{ц}^{1/2}. \quad (9)$$

Частотное разрешение обоих методов соответствует ширине линии джозефсоновской генерации, которую можно существенно улучшить применением низкоиндуктивного шунта. Такое шунтирование не изменит существенно ПЧ отклика, однако значительно уменьшит сигнал селективного детектора, что указывает на предпочтительность метода ВЧ отклика для улучшения разрешения и чувствительности спектрометра. Другим преимуществом ВЧ метода является его нечувствительность к размеру ступени, что позволяет значительно увеличить динамический диапазон устройства.

Таким образом, разработан, изготовлен и экспериментально исследован ВТСП джозефсоновский спектрометр субмиллиметровых волн. Предложен новый метод спектроскопии на основе режима смесителя с самонакачкой и предложен метод выделения спектра исследуемого сигнала из измеряемой величины ВЧ отклика. Предложенный метод спектроскопии с использованием джозефсоновского смесителя с самонакачкой на высокой промежуточной частоте позволяет существенно улучшить

чувствительность, спектральное разрешение и динамический диапазон джозефсоновского спектрометра.

Авторы выражают благодарность РНТП "Актуальные направления в физике конденсированных сред", Российскому фонду фундаментальных исследований, Миннауки РФ, Шведской Королевской академии наук за финансовую поддержку.

- 
1. К.К.Лихарев, В.В.Мигулин, Радиотехника и электроника **25**, 1 (1980).
  2. В.П.Завалеев, К.К.Лихарев, Радиотехника и электроника, **23**, 1268 (1978).
  3. Ю.Я.Дивин, О.Ю.Полянский, А.Я.Шульман, Письма в ЖТФ **6**(9), 454 (1980).
  4. В.П.Дьяков, К.К.Лихарев, М.А.Тарасов, Радиотехника и электроника **25**, 1736 (1980).
  5. В.А.Ильин, К.З.Фатыхов, В.С.Эткин, Письма в ЖТФ **6**, 649 (1980).