

05;07;12

## Оптимальная фильтрация широкополосного излучения в Гильберт-спектроскопии

© В.В. Широтов, Ю.Я. Дивин

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва  
E-mail: votoriw@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 января 2004 г.

Продемонстрирована возможность оптимальной фильтрации излучения ртутной лампы при работе с частотно-селективным джозефсоновским детектором в субтерагерцевой Гильберт-спектроскопии. Впервые с помощью Гильберт-спектроскопии измерен спектр пропускания фильтра высоких частот.

Гильберт-спектроскопия [1] основана на частотно-селективном детектировании электромагнитного излучения с помощью сверхпроводящих джозефсоновских переходов. Эта спектроскопия работает в широкой области частот, лежащей вокруг характерной джозефсоновской частоты  $f_c = 2eI_c R_n / h$  перехода, где  $I_c$  — критический ток и  $R_n$  — нормальное сопротивление перехода. При использовании переходов из высокотемпературных сверхпроводников рабочая область простирается от десятков гигагерц до единиц терагерц [2,3]. Ее низкочастотная граница  $f_l$  связана с конечной шириной  $\delta f$  линии джозефсоновской генерации и определяется соотношением  $f_l = \delta f(f_l) = (3f_0 f_c^2 / 2)^{1/3}$ , где  $f_0 = 4\pi(2e/h)^2 k T R_n$  является шириной линии джозефсоновской генерации при больших напряжениях  $V \gg I_c R_n$ , а  $T$  — температура перехода [3]. Высокочастотная граница  $f_h$  обусловлена уменьшением амплитуды джозефсоновской генерации из-за джоулева разогрева [2] или взаимодействия с оптическими фононами [3]. Вследствие классического детектирования и болометрического механизма при частотах, лежащих ниже и выше диапазона  $[f_l, f_h]$  соответственно, джозефсоновский переход может демонстрировать отклики, которые не несут спектральной информации и приводят к искажениям результатов Гильберт-спектроскопии.

Если спектр излучения шире области рабочих частот Гильберт-спектроскопии, как, например, в случае излучения ртутной лампы [4] или переходного излучения от релятивистских электронных пучков [5], то возникает необходимость устранения низкочастотных ( $f < f_l$ ) и высокочастотных ( $f > f_h$ ) составляющих. Целью представляемой работы было исследование возможности оптимальной фильтрации широкополосного излучения в Гильберт-спектроскопии.

В данной работе использовался частотно-селективный джозефсоновский детектор на основе тонкопленочного бикристаллического перехода из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  [6], который располагался в оптическом криостате с жидким азотом. Откачка паров азота позволяла достигать рабочих температур в диапазоне 77–50 К.

В качестве широкополосного источника использовалась ртутная лампа высокого давления с мощностью питания 200 W [7]. В области рабочих частот Гильберт-спектроскопии спектр излучения такого источника близок к спектру черного тела с эффективной температурой около 4000 К, а при более высоких частотах — около 1000 К [4]. Максимум спектральной плотности мощности данного источника находится в районе сотен терагерц. Тогда в рабочей области частот Гильберт-спектроскопии ниже единиц терагерц будет находиться лишь порядка  $10^{-3}$  суммарной мощности излучения лампы. Поэтому для эффективного устранения интенсивных высокочастотных компонент использовалась система отражающих и пропускающих фильтров.

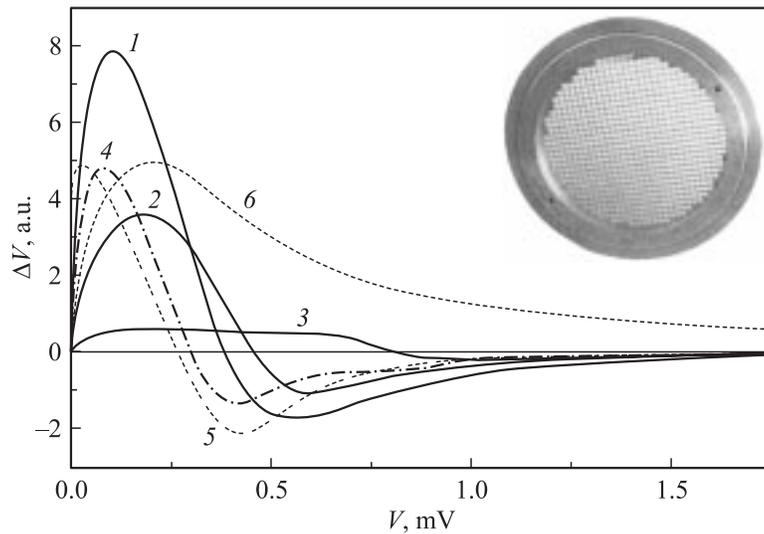
Ртутная лампа располагалась в первичном фокусе отражающего эллипсоида. Сначала излучение от ртутной лампы направлялось на позолоченный эшеллетт [4], расположенный под углом  $\alpha = 45^\circ$  к оптической оси системы. Эшеллетт имел угол блеска  $\varphi = 20^\circ$  и период  $d = 50 \mu\text{m}$ . При таких параметрах эшеллетта излучение с длинами волн  $\lambda > 2\lambda_b = 4d \cos \alpha \sin \varphi = 44 \mu\text{m}$  дифрагирует преимущественно в нулевой порядок [4], и это обстоятельство использовалось для предварительной отсеки высокочастотных составляющих. Дальнейшее их ослабление проводилось с помощью окна из фторопласта, расположенного на входе оптического криостата, и фильтра из кристаллического кварца, располагавшегося на азотном экране криостата.

Между лампой и криостатом с помощью параболических зеркал формировался пучок излучения с плоским волновым фронтом, в который помещались фильтры высоких частот с различными частота-

ми отсечки в субтерагерцевом диапазоне. При этом использовались специально изготовленные фильтры, представляющие собой „толстые“ металлические сетки с квадратной ячейкой и толщиной, равной периоду. Теория, описывающая свойства таких фильтров, развита в работах [8,9]. Фильтры имеют малое пропускание на низких частотах, которое в районе частоты отсечки  $f_{cut} = c/2b$ , где  $c$  — скорость света, а  $b$  — открытый размер ячейки, экспоненциально возрастает до величины порядка единицы и в некоторой области выше этой частоты отсечки имеет значение, близкое к единице. Далее, в районе частоты  $f_{opt} = c/a$ , где  $a$  — период ячейки, оно выходит на уровень оптического пропускания, определяемый отношением открытой к полной площади фильтра:  $T_{opt} = b^2/a^2$ . Для использовавшихся фильтров с периодами ячеек 1.0 и 0.5 mm частоты  $f_{cut}$  отсечек составляли 170 и 350 GHz, оптическое пропускание составляло 0.77 и 0.64, а частоты  $f_{opt}$  оптического пропускания составляли 300 и 600 GHz соответственно. Внешний вид одного из использовавшихся фильтров приведен на вставке на рис. 1.

Отклики одного из джозефсоновских переходов с параметрами  $R_n = 2.5\Omega$ ,  $I_c R_n = 1\text{ mV}$  при  $T = 50\text{ K}$  на широкополосное излучение при различной степени фильтрации „толстыми“ сеточными фильтрами представлены на рис. 1 (кривые 1–3). Кроме того, здесь даны зависимости откликов от напряжения на переходе для случаев классического детектирования (кривая 5) и болометрического механизма (кривая 6). Первая из них, по нашим оценкам, пропорциональна второй производной от вольт-амперной характеристики  $V(I)$  перехода, т.е.  $\Delta V \propto d^2V/dI^2$ , а вторая, при учете только уменьшения под действием тепла критического тока перехода, определяется выражением  $\Delta V \propto (1/I) \cdot dV/dI$ .

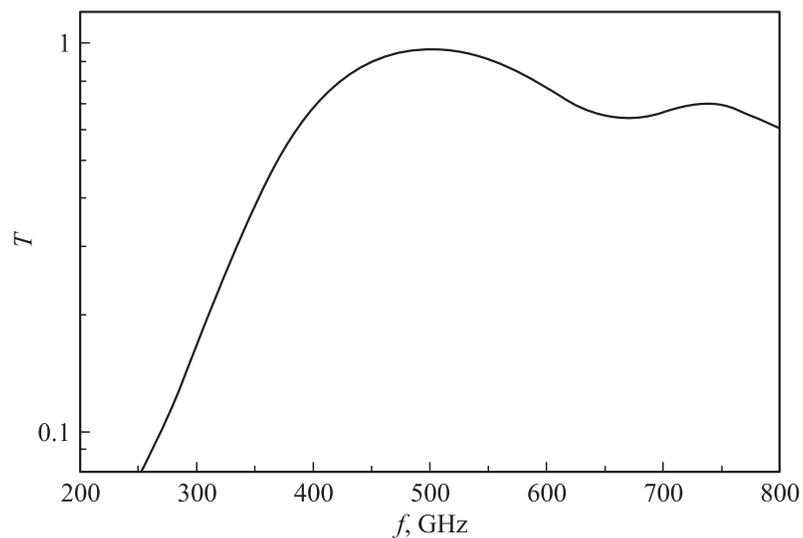
Очевидно, что во всех измеренных зависимостях откликов  $\Delta V(V)$  при практически неизменном уровне обрезания высокочастотных составляющих наблюдается изменение знака, что не характерно для кривой 6. Это говорит об отсутствии болометрического отклика и свидетельствует о том, что с помощью эшеллетта, фторопластового окна и кварцевого фильтра удалось полностью устранить вклад высокочастотных компонент излучения. Кроме того, по своему поведению кривые 1, 2 и 3 значительно отличаются от кривой 5, соответствующей случаю классического детектирования. Поэтому можно сделать вывод о значительном вкладе в данные отклики частотно-селективного джозефсоновского механизма детектирования.



**Рис. 1.** Отклики  $\Delta V$  джозефсоновского перехода на широкополосное излучение ртутной лампы при различной фильтрации „толстыми“ сеточными фильтрами в зависимости от напряжения  $V$  на переходе: 1 — без фильтров; 2 — с фильтром с периодом 1.0 mm; 3 — с фильтром с периодом 0.5 mm; 4 — разность между кривыми 1 и 2; 5 — расчетный отклик, связанный с классическим детектированием; 6 — расчетный болометрический отклик. На вставке — внешний вид фильтров.

Характерные частоты для использованного перехода имели следующие величины:  $f_c \approx 500$  GHz,  $f_1 \approx 140$  GHz. Тогда частота отсечки первого фильтра близка к нижней границе рабочей области частот Гильберт-спектроскопии, а характерные частоты второго фильтра находятся внутри этой области.

Из рис. 1 видно изменение формы откликов при изменении частотного состава широкополосного излучения путем изменения нижней частоты отсечки. Наблюдаемое перемещение точки изменения знака вдоль оси напряжений свидетельствует об изменении соответствующим фильтром спектрального состава излучения и о возможности его селективного детектирования с помощью джозефсоновского детектора. Форма представленного разностного сигнала (кривая 4) наиболее



**Рис. 2.** Спектральное пропускание  $T$  „толстого“ сеточного фильтра с периодом 0.5 mm, измеренное с помощью Гильберт-спектроскопии.

близка к зависимости, характеризующей отклик при классическом детектировании. Это подтверждает значительное ослабление первым фильтром низкочастотной части спектра, не входящей в рабочую область частот Гильберт-спектроскопии. Небольшое отличие между формой разностного сигнала и функциональной зависимостью отклика, вызываемого классическим детектированием, может быть связано с наличием частичного ослабления первым фильтром компонент излучения, лежащих внутри рабочей области частотно-селективного джозефсоновского детектора.

На рис. 2 представлено спектральное пропускание второго фильтра с периодом 0.5 mm, определенное с помощью Гильберт-спектроскопии. Для этого сначала по измеренным откликам были восстановлены спектры излучения при отсутствии и наличии фильтра, а затем второй спектр нормирован на первый. Как следует из приведенного графика, использованный „толстый“ сеточный фильтр имеет экспоненциальное обрезание низких частот с характерной частотой 370 GHz и высокочастотное пропускание, близкое к ожидаемому.

Спектральное пропускание „толстого“ сеточного фильтра, измеренное нами с помощью Гильберт-спектроскопии, качественно согласуется с характеристиками подобных фильтров, которые были получены с помощью спектроскопии временного разрешения терагерцевого диапазона, работающей с более мощными импульсными широкополосными источниками [10].

Таким образом, с целью определения условий оптимальной фильтрации широкополосного излучения в Гильберт-спектроскопии, проведены измерения спектрального пропускания фильтров высоких частот с различными частотами отсечки в субтерагерцевой области. Показано, что спектральное пропускание фильтров, измеренное с помощью Гильберт-спектроскопии, согласуется с известными литературными данными при частотах отсечки, превышающих ширину джоузефсоновской линии генерации.

Данная работа частично финансировалась Международным научно-техническим центром (МНТЦ, проект N 1912) и программой фундаментальных исследований ОФН РАН (Россия), а также Исследовательским центром г. Юлиха (Германия).

## Список литературы

- [1] Дивин Ю.Я., Полянский О.Ю., Шульман А.Я. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 17. С. 1056–1061.
- [2] Divin Y., Volkov O., ShirotoV V. et al. // Advances in Solid State Phys. 2001. V. 42. P. 301–313.
- [3] Divin Y.Y., Volkov O.Y., Liatti M.V. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13. N 2. P. 676–679.
- [4] Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра / Пер. под ред. Т.М. Лифшица. М., 1970. 399 с.
- [5] Harper U., Sievers A.J., Blum E.B. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. N 21. P. 2962–2965.
- [6] Дивин Ю.Я., Котелянский И.М., Губанков В.Н. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 10. С. 1238–1249.
- [7] Модель 6283, фирма LOT-Oriel.
- [8] Chen C.C. // IEEE Trans. on M.T.T. 1970. V. 18. N 9. P. 627–632.
- [9] Chen C.C. // IEEE Trans. on M.T.T. 1973. V. 21. N 1. P. 1–6.
- [10] Winnewisser C., Lewen F., Helm H. // Appl. Phys. A. 1998. V. 66. P. 593–598.