

05.4;12

**СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ $GdBaCuO$ БОЛОМЕТР
НА ЭФФЕКТЕ МАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ**

© В.Ю.Зеров, В.Н.Леонов, И.А.Хребтов,
Е.Штайнбайс, В.Мизалке

В настоящее время широко проводятся исследования по созданию высокочувствительных болометров с использованием в качестве чувствительного элемента тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Наиболее распространенными являются сверхпроводниковые болометры, основанные на температурной зависимости сопротивления [1,2]. В области перехода в сверхпроводящее состояние эта зависимость очень резкая, что позволяет достигнуть значительной вольт-ваттной чувствительности. Однако необходимостью пропускания тока через чувствительный элемент приводит к появлению токового шума типа $1/f$, где f — частота. Этот шум в основном и определяет эквивалентную мощность шума (NEP) болометров на низких частотах модуляции оптического излучения. Для болометра с использованием $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ пленки на Si-мембране была получена обнаружительная способность $D^* = 3.8 \cdot 10^9$ см \cdot Гц^{1/2}/Вт на частоте модуляции 100–300 Гц [1], однако на частотах < 10 Гц его чувствительность была ограничена $1/f$ шумом. Наивысшая обнаружительная способность $D^* = 6 \cdot 10^9$ см \cdot Гц^{1/2}/Вт на частоте модуляции 4 Гц [2] также еще в 3 раза меньше уровня, определяемого флуктуациями фона.

Как известно, кроме сопротивления, резкую температурную зависимость в области перехода имеет и вещественная часть магнитной восприимчивости $\chi(T)$ ВТСП, что объясняется эффектом Мейсснера. Для пленок эта зависимость наблюдается в магнитном поле, перпендикулярном плоскости пленки [3]. Таким образом, имеется потенциальная возможность создания болометра, основанного на температурной зависимости $\chi(T)$. Основным преимуществом такого болометра является отсутствие тока через сверхпроводящий чувствительный элемент и связанного с ним токового фликкер-шума как в самом элементе, так и в контактах к нему.

В работе [4] описан болометр, в котором ВТСП-пленка расположена внутри соленоидальной катушки, включенной в мост, работающий на переменном токе. Изменение магнитной восприимчивости ВТСП-пленки при ее нагреве па-

дающим излучением приводит к изменению индуктивности катушки и вызывает разбалансировку моста.

Мы сконструировали болометр на основе температурной зависимости магнитного экранирования ВТСП-пленки. Пленка располагается внутри соленоида, создающего переменное магнитное поле, перпендикулярное плоскости пленки. В непосредственной близости от пленки помещается плоская считывающая катушка, не имеющая теплового контакта с подложкой. В нормальном состоянии магнитное поле проходит сквозь пленку и на считывающей катушке возникает напряжение взаимной индукции $U = 2\pi f n A B$, где n — число витков считывающей катушки; A — средняя площадь ее витка; f , B — частота и амплитуда магнитного поля соответственно. В сверхпроводящем состоянии пленка эффективно экранирует магнитное поле, т. е. резко уменьшается магнитный поток, проходящий через считывающую катушку, а следовательно, уменьшается и напряжение на ней. В рабочем состоянии чувствительный элемент находится при температуре, соответствующей примерно середине перехода пленки в сверхпроводящее состояние по магнитной восприимчивости. Падающее излучение нагревает пленку, изменяя ее магнитную восприимчивость. Это приводит к увеличению магнитного потока, проходящего сквозь пленку, а следовательно, и через считывающую катушку. При этом на ней увеличивается напряжение взаимной индукции. При амплитудной модуляции мощности излучения на частоте $f_{\text{mod}} \ll f$ болометр модулирует по амплитуде магнитный поток, проходящий через считывающую катушку. Это вызывает амплитудную модуляцию напряжения на считывающей катушке с несущей частотой f .

Выражение для вольт-ваттной чувствительности такого болометра можно записать в виде

$$S = 2\pi f n A B d \chi G (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2} \chi_s d T, \quad (1)$$

где G — тепловая проводимость болометра, ω — круговая частота модуляции излучения, τ — постоянная времени болометра, χ_s — магнитная восприимчивость ВТСП-пленки в сверхпроводящем состоянии.

В эксперименте переменное магнитное поле создавалось соленоидальной катушкой с внутренним диаметром 15 мм и длиной 20 мм. В качестве чувствительного элемента использована пленка $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ толщиной ~ 0.2 мкм на подложке из сапфира толщиной 45 мкм и площадью 4×2.5 мм. Пленка приклеивалась к медному держателю и помещалась внутрь соленоидальной катушки (рис. 1). На расстоянии 30 мкм от ВТСП-пленки располагали считывающую катушку из медной проволоки диаметром 20 мкм. Катушка, содержащая 50 витков, имела эллиптическую форму и среднюю площадь витка 3.2 мм^2 . Медный держатель

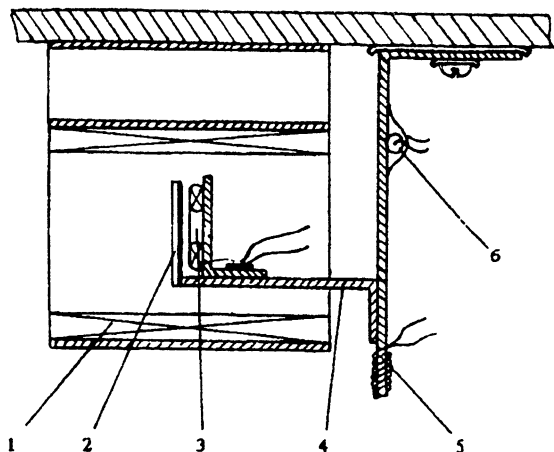


Рис. 1. Конструкция CdBaCuO болометра на эффекте магнитного экранирования: 1 — соленоидальная катушка, 2 — ВТСП-пленка на подложке из сапфира, 3 — считывающая катушка, 4 — медный держатель, 5 — нагреватель, 6 — термометр сопротивления.

с образцом и считывающей катушкой снабжался проволочным нагревателем для регулирования температуры болометра и полупроводниковым термометром сопротивления и крепился к дну резервуара с жидким азотом в вакуумной полости оптического криостата. Точность измерения температуры составляла 0.03 К. Входное окно криостата изготовлено из KRS-5 толщиной 2.5 мм. В качестве источников излучения применялись светодиод ЗЛ 107, с длиной волны 0.95 мкм, электрически модулированный меандром с частотой 0.01–15 Гц и лазер ЛГ-126 с длиной волны 0.063 мкм. Для улучшения поглощающей способности чувствительного элемента облучаемая сторона подложки (свободная от ВТСП-пленки) покрывалась черной краской ЕСР-2200 (Energy Control Products/3М, США). Толщина покрытия составляла около 20 мкм и обеспечивала поглощающую способность 96% в диапазоне длин волн 0.3–1.2 мкм.

Сигнал со считывающей катушки поступал на малошумящий предусилитель, уровень шума которого в используемой полосе частот составляет $2 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$. Сигнал с предусилителя подавался на селективный усилитель У2-8 со встроенным фазовым детектором. После выделения низкочастотной составляющей сигнала на частоте модуляции излучения, она подавалась на анализатор спектра С4-35.

Амплитуда и частота магнитного поля в оптимальном режиме составляли соответственно 1.1 Гс и 50 кГц. На рис. 2 приведены температурные зависимости магнитной восприимчивости по напряжению на считывающей катушке и выходного сигнала болометра при подаче оптического

$1 + 4\pi\chi$, arb.un.
 U_s , arb.un. 1.0

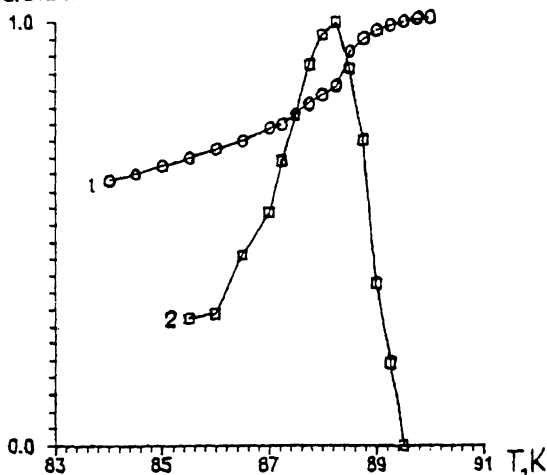


Рис. 2. Температурные зависимости характеристик болометра при магнитном поле $B = 1.1 \cdot 10^{-4}$ Тл с частотой $f = 50$ кГц: 1 — сверхпроводящий переход по магнитной восприимчивости, 2 — выходной сигнал считывающей катушки болометра на $f_{\text{mod}} = 1$ Гц.

го сигнала с частотой модуляции 1 Гц. При температуре $T = 88.25$ К, соответствующей максимуму чувствительности, была измерена зависимость чувствительности от частоты модуляции излучения (рис. 3, а). На рис. 3, а приведена также расчетная зависимость вольт-ваттной чувствительности $U_s = U_s(0)(+\omega^2\tau^2)^{-1/2}$, где $U_s(0)$ — чувствительность на немодулированном потоке. Спад сигнала до уровня $U_s = 0.707U_s$ соответствует постоянной времени болометра $\tau = 0.25$ с.

При использовании в качестве источника излучения непрерывного лазера ЛГ-126 мощность 6 мВт проведены измерения изменения магнитной восприимчивости, возникающего вследствие нагрева болометра за счет излучения. Коэффициент передачи оптического тракта составлял 64%. С учетом температурной зависимости магнитной восприимчивости (рис. 2) этот эксперимент позволил рассчитать перегрев ΔT болометра. Расчет тепловой проводимости болометра по формуле $G = \Delta P / \Delta T$ дает $G = 1.6 \cdot 10^{-2}$ Вт/К.

Полученная в эксперименте вольт-ваттная чувствительность болометра составляет $S_{\text{exp}} = 0.09$ В/Вт, что хорошо согласуется с расчетом по формуле (1), дающим $S_{\text{calc}} = 0.095$ В/Вт. В предположении, что избыточные шумы, обусловленные флуктуациями магнитного потока и измерительной схемой, отсутствуют, NEP, определяемая собственными шумами ВТСП-пленки болометра, будет ограничиваться фоновным шумом $4kT^2G$ тепловой проводимости

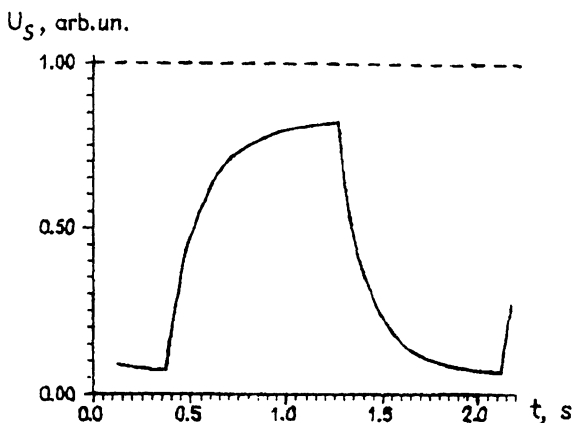
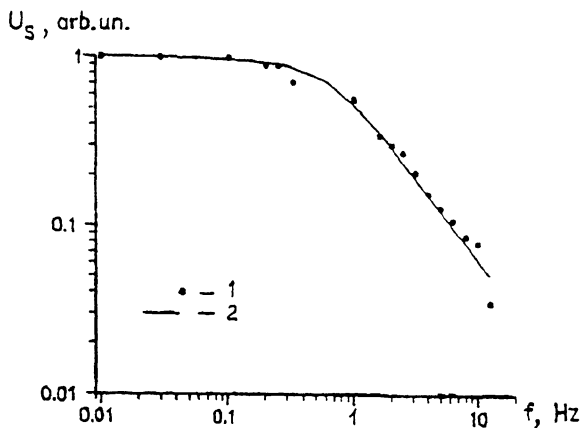


Рис. 3. Временные характеристики болометра: а — частотная зависимость выходного сигнала: 1 — эксперимент, 2 — расчет; б — осциллограмма выходного сигнала при подаче излучения с $f_{\text{mod}} = 0.55$ Гц. За единичный уровень принят отклик болометра на немодулированное излучение.

сти G . В нашем случае она составляет $NEP_{\text{phonon}} = 8.5 \times 10^{-11}$ Вт/Гц $^{1/2}$, что соответствует обнаружительной способности $D^* = 1.2 \cdot 10^9$ см·Гц $^{1/2}$ /Вт. В эксперименте не удалось выйти на уровень собственных шумов болометра из-за недостаточной чувствительности предусилителя и шума измерительной схемы. Для достижения этих величин необходим предусилитель с входным шумом $\sim 8 \cdot 10^{-12}$ В/Гц $^{1/2}$ на несущей частоте. Используя охлаждаемый высокочастотный трансформатор [5] на входе усилительного каскада с охлаждаемым до 200 К транзистором [6] можно достигнуть входного шума $\sim 10^{-10}$ В/Гц $^{1/2}$. По-видимому, такой уро-

вень шума может быть получен и без трансформатора с охлаждаемым до 110 К транзистором NJ3600L [7]. Поэтому потребуется еще на порядок увеличить чувствительность болометра, что может быть достигнуто за счет увеличения температурного коэффициента магнитной восприимчивости $\chi^{-1}d\chi/dT$ в пленках более высокого качества и большей толщины.

Дальнейшее улучшение параметров болометра с магнитной восприимчивостью связано с тепловой оптимизацией болометра, т. е. с уменьшением тепловой проводимости G . Но при этом для сохранения постоянной времени необходимо уменьшать теплоемкость болометра путем существенно уменьшения толщины подложки.

Результаты работы показали потенциальную возможность создания весьма чувствительных ВТСП-болометров на основе магнитной восприимчивости. При отсутствии избыточных шумов такие болометры, по-видимому, смогут конкурировать с обычными ВТСП-болометрами при больших площадках ($\sim 1 \text{ см}^2$) и на низких частотах модуляции ($< 1 \text{ Гц}$) или при работе на немодулированном потоке.

Работа выполнена в рамках российской программы "Высокотемпературная сверхпроводимость", проект 93-217, а также поддержана Министерством науки и технологии ФРГ, грант № 13 N 6027.

Список литературы

- [1] *Neff H., Laukemper J., Khrebtov I.A. et. al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. N 18. P. 2421-2423.*
- [2] *Brasunas J.C., Lakew B. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 6. P. 777-778.*
- [3] *Елесин В.Ф., Захарченко И.В., Иванов А.А. и др. // СФХТ. 1990. Т. 3. N 8. С. 1704-1707.*
- [4] *Brasunas J., Lelew B., Lee C. // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. N 7. P. 3639-3641.*
- [5] *Сосненко М.В., Ткаченко А.Д., Хребтов И.А. // ПТЭ. 1988. N 1. С. 202-203.*
- [6] *Pallottion G.V., Zirizzotti A.E. // Cryogenics. 1994. V. 34. N 12. P. 1045-1047.*
- [7] *Sassoli K., Ventura G. // Cryogenics. 1994. V. 34. N 4. P. 959-960.*

Государственный оптический
институт им. С.И. Вавилова
С.-Петербург
Институт физических
высоких технологий
Йена, ФРГ

Поступило в Редакцию
27 марта 1996 г.