

ing capacity, characteristic time of flux penetration and values of electro moving force in second coil are presented.

УДК 537.312.62

Высокотемпературный датчик магнитного поля на основе поликристалла $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

А. И. Головашкин

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Н. Д. Кузьмичев

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск, Россия

В. В. Славкин

Саранский кооперативный институт Центросоюза РФ, г. Саранск, Россия

На основе исследований магнитных свойств поликристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ разработан высокочувствительный датчик магнитного поля. Датчик обладает чувствительностью, близкой к параметрам сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (СКВИД), значительно большей, чем чувствительность феррозонда. В отличие от СКВИДов датчик позволяет измерять непосредственно величину напряженности магнитного поля, имеет широкий диапазон измерений магнитных полей и обладает выраженной диаграммой направленности. Он проще конструктивно и более надежен, чем СКВИДы.

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости дало возможность более широко внедрению в повседневную практику различных сверхпроводящих устройств с высокой чувствительностью [1–4]. Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) несмотря на то, что они имеют малую длину когерентности, обладают высокой чувствительностью к содержанию кислорода и сильной анизотропией электронных свойств [5–7]; благодаря высоким критическим параметрам и возможности работать при температуре жидкого азота или с относительно простыми рефрижераторами являются весьма привлекательными для применения в различных областях электроники и электротехники. Если для фундаментальных физических исследований необходимы качественные монокристаллы или пленки ВТСП, то для целого ряда приложений необходима простота изготовления, и для таких применений вполне пригодны поликристаллические образцы. В некоторых случаях параметры поликристаллических образцов даже предпочтительнее соответствующих характеристик монокристаллов и эпитаксиальных пленок.

Одно из самых распространенных направлений прикладной сверхпроводимости — это использование СКВИДов как в различных технических областях, так и в научных исследованиях [8]. Примером использования в этой области поликристаллических образцов являются работающие при азотных температурах керамические ВТСП СКВИДы [9], которые наряду с высокой

чувствительностью обладают хорошей технологичностью и могут быть достаточно легко изготовлены в лабораториях. Технология ВТСП СКВИДов быстро совершенствуется. Из-за проблемы температурных шумов низкотемпературные СКВИДы, работающие при гелиевых температурах, имеют определенное преимущество перед СКВИДами, функционирующими при азотных температурах. Но область использования ВТСП СКВИДов значительно расширяется за счет упрощения эксплуатационных проблем. Криогенная система азотного уровня более надежна в эксплуатации, значительно дешевле и доступнее, а поскольку высокая чувствительность ВТСП СКВИДов вполне достаточна для многих приложений, некоторый выигрыш в чувствительности низкотемпературных СКВИДов для этих целей не является существенным преимуществом.

Известно, что на практике широко применяются датчики магнитного поля. Разработан целый ряд таких датчиков. Физический принцип работы полупроводниковых датчиков поля основан на эффекте Холла [10–12]. Феррозонды [13, 14] обладают более высокой чувствительностью по сравнению с датчиками Холла, но являются более громоздкими устройствами. Основным недостатком существующих датчиков — относительно невысокая чувствительность. Наиболее перспективным методом повышения чувствительности датчиков магнитного поля считается использование нелинейных свойств сверхпро-

водников и, в частности, для многих приложений — использование сверхпроводящего состояния ВТСП материалов.

В работах [15–19] исследовался нелинейный магнитный отклик поликристаллов $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBaCuO) на переменное магнитное поле с амплитудой напряженности $h \leq 50$ Э. Подробные измерения нелинейного отклика образцов YBaCuO при разных значениях величины напряженности постоянного магнитного поля H_0 в зависимости от глубины модуляции h поля выполнены в работе [19]. Результаты вышеуказанных работ показывают, что при помещении поликристаллического образца YBaCuO во внешнее синусоидальное переменное магнитное поле откликом является сигнал сложной формы, резко отличной от формы гармонического входного сигнала, связанный с нелинейностью намагниченности поликристалла. Нелинейность намагниченности обуславливает наличие гармоник намагниченности, амплитуда которых M_n пропорциональна амплитудам ε_n гармоник ЭДС-сигнала отклика образца. Измерения проводились с использованием компенсационной методики при температуре жидкого азота $T \approx 78$ К. Поликристаллические ВТСП — образцы YBaCuO изготавливались по обычной технологии твердофазного синтеза. Они имели критическую температуру $T_c = 91,5$ К и ширину перехода в сверхпроводящее состояние $\Delta T \approx 1$ К.

Полученные данные были объяснены на основе модели критического состояния Джозефсоновской среды [20–22]. Результаты работ [15–19] указывают на высокую чувствительность амплитуд высших гармоник намагниченности ВТСП на основе YBaCuO к внешнему магнитному полю. В этой связи результаты проведенных фундаментальных исследований представляют большой интерес для использования в разработке высокочувствительных датчиков магнитного поля.

В области магнитных полей $H_0 \leq 10$ Э при работе датчика магнитного поля целесообразно использовать зависимости напряжений нечетных гармоник сигнала отклика поликристаллического образца $\varepsilon_{2n-1}(H_0)$, например зависимости $\varepsilon_3(H_0)$ или $\varepsilon_5(H_0)$. Использование $\varepsilon_5(H_0)$ вместо $\varepsilon_3(H_0)$ повышает чувствительность датчика, так как $\varepsilon_5(H_0)$ имеет более крутую зависимость от величины поля, чем $\varepsilon_3(H_0)$ [19].

Для магнитных полей $H_0 \leq 3$ Э при работе датчика целесообразнее использовать четные гармоники сигнала отклика. Это объясняется тем, что хотя при $H_0 = 0$ четные гармоники не наблюдаются из-за того, что $M(H_0) = M(-H_0)$ (т. е. при $H_0 = 0$ амплитуда $\varepsilon_{2n} = 0$), однако при $H_0 \neq 0$ они появляются. Наличие даже незначи-

тельного постоянного магнитного поля, например магнитного поля Земли, приводит к появлению четных гармоник в сигнале отклика образца. Величины амплитуд четных гармоник возрастают практически линейно от поля вплоть до полей $\sim 2\text{--}4$ Э (рис. 1). Величины их амплитуд превышают амплитуды близких нечетных гармоник. Следовательно, применение четных гармоник сигнала отклика в случае слабых полей дает более чувствительный метод определения значения H_0 . Кривые $\varepsilon_{2n}(H_0)$ и $\varepsilon_{2n+1}(H_0)$ смещаются вправо на величину напряженности магнитного поля Земли $H_{\text{ear}} \sim 0,2\text{--}0,4$ Э [19]. Таким образом, используя квазилинейные зависимости амплитуд гармоник $\varepsilon_n(H_0)$ ($n = 2, 4, \dots$) в пределах малых полей $0 < H_0 < 3$ Э можно изготовить (с использованием "нуль-методики") очень чувствительные датчики магнитного поля.

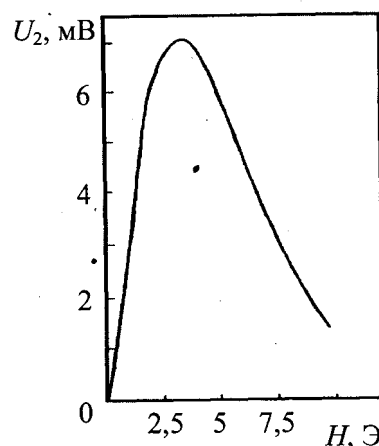


Рис. 1. Зависимость величины напряжения второй гармоники сигнала отклика поликристалла YBaCuO от постоянного магнитного поля

Принцип работы датчика магнитного поля [23] основан на нелинейности намагниченности поликристаллов YBaCuO . Цель создания датчика — повышение чувствительности по сравнению с существующими устройствами, расширение диапазона измерений магнитных полей и непосредственное измерение поля в отличие от СКВИДов. В основу датчика магнитного поля был взят ферроимпульсионный зонд [13, 14], который применяется для измерения слабых магнитных полей.

На рис. 2 приведена схема датчика магнитного поля. Датчик содержит катушку возбуждения 1 и измерительную катушку, выполненную в виде двух равных встречно включенных катушек 2 и 3, в одной из которых расположен сердечник 4, выполненный из поликристаллического высокотемпературного сверхпроводника YBaCuO . На рис. 3 приведен вариант конструкции датчика магнитного поля.

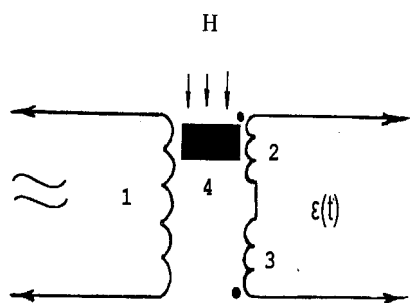


Рис. 2. Схема датчика магнитного поля

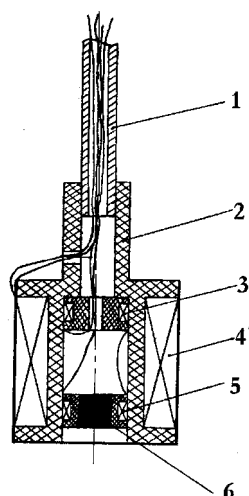


Рис. 3. Конструкция датчика магнитного поля:

1 — трубка-держатель; 2 — немагнитный диэлектрический каркас; 3, 5 — выходные катушки; 4 — катушка возбуждения (входная); 6 — сердечник из ВТСП YBaCuO

Устройство для измерения магнитного поля — магнитометр (рис. 4) работает следующим образом. На катушку 1 датчика (см. рис. 2) подается синусоидальный ток частотой f от генератора для создания переменного магнитного поля амплитудой напряженности h . В силу нелинейности намагниченности сердечника 4 на концах измерительных катушек 2 и 3 наводится негармоническая ЭДС $\varepsilon(t)$ пропорциональная производной по времени намагниченности dM/dt . ЭДС содержит большое число высших гармоник. В отсутствии включения двух одинаковых катушек 2 и 3 сигнала на выходе не будет. Амплитуды четных гармоник ε_{2n} вначале растут с ростом поля H_0 , а затем уменьшаются (см. рис. 1). Зависимость амплитуды второй гармоники $\varepsilon_2(H_0)$ от внешнего постоянного магнитного поля H_0 имеет вид [20]:

$$\varepsilon_2(H_0, h) = 2\mu_0\omega NS \times \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!(n+2)!} \left(\frac{h}{2}\right)^{2n+2} \overline{M}^{(2n+2)}(H_0) \right\} \approx (1)$$

$$\approx \frac{1}{2} \mu_0 NS \omega h^2 \overline{M}^{(2)}(H_0) \approx \frac{1}{2} \mu_0 NS \omega h^2 \left(\frac{d\chi_d}{dH} \right)_{H_0},$$

где μ_0 — магнитная постоянная;
 N — число витков катушки 2 (см. рис. 2);
 S — сечение YBaCuO сердечника;
 $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота модуляции;
 $\overline{M}^{(k)}(H_0)$ — производная порядка k от средней кривой намагниченности;
 χ_d — дифференциальная восприимчивость YBaCuO сердечника.

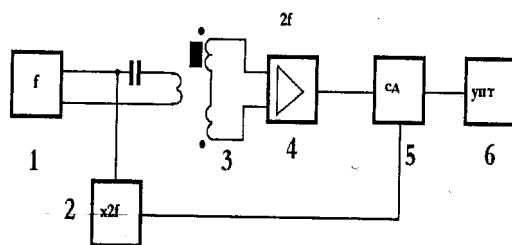


Рис. 4. Блок-схема магнитометра:

1 — задающий генератор (возбуждения); 2 — удвоитель частоты; 3 — ВТСП-зонд (датчик магнитного поля); 4 — избирательный усилитель, настроенный на удвоенную частоту генератора; 5 — синхронный детектор; 6 — усилитель постоянного тока (регистрирующее устройство)

Используя полученный в [21–22] аналитический вид зависимости $M(H_0)$ и выражение (1), имеем:

$$\varepsilon_2 \approx \mu_0 NS \omega M_0 \left(\frac{h}{H^*} \right)^2 \frac{th \left(\frac{H_0}{H^*} \right)}{ch^2 \left(\frac{H_0}{H^*} \right)} \Big|_{H_0 \ll H^*} \approx (2)$$

$$\approx \mu_0 NS \omega M_0 \left(\frac{h}{H^*} \right)^2 \frac{H_0}{H^*} \propto H_0,$$

где величина M_0 — намагниченность насыщения, а параметр H^* для зависимости $\varepsilon_2(H_0)$ (см. рис. 1) равен $H^* \approx 4,7$ Э. Величина $H^* \approx 1,5 H_0^{\max}$, где $H_0^{\max}$ — является значением H_0 , при котором $\varepsilon_2(H_0)$ имеет максимум.

Чем выше номер используемой гармоники, тем выше чувствительность датчика магнитного поля. На четных гармониках, например $n = 6$, с использованием "нуль-методики" порог чувствительности датчика можно увеличить в два-три раза. На чувствительность датчика также влияет амплитуда модуляции магнитного поля h . Оптимальная амплитуда модуляции находится в интервале полей $h = 0,5-10$ Э [19]. При работе в магнитных полях $H_0 \leq 5-20$ Э датчик гистерезисных свойств, связанных с захватом магнитного потока, не обнаруживает, поэтому не нужно переводить сверхпроводящий сердечник в нормальное состояние [23]. В случае попадания датчика в магнитные поля $H_0 > 10-50$ Э сверхпроводящий сердечник (YBaCuO поликристалл) захватывает магнитный поток, и чувствительность датчика снижается примерно в 1,5–2 раза.

Чувствительность датчика можно восстановить путем перевода YBaCuO сердечника в нормальное состояние. Можно отградуировать датчик на случай замороженного магнитного потока и работать не переводя сверхпроводящий поликристалл в нормальное состояние, так как нелинейные свойства намагниченности сохраняются [15–22]. Следовательно, значительные перегрузки не влияют на надежную работу датчика магнитного поля. Длительная эксплуатация сверхпроводящего сердечника приводит к постепенной деградации нелинейных магнитных свойств. В этом случае можно применить самоподстраивающееся устройство для автоматической подстройки датчика магнитного поля.

Таким образом, выделяя и усиливая с помощью избирательного усилителя 4 (см. рис. 4) ЭДС какую-то гармонику, и определяя ее величину посредством регистрирующего устройства 6, можно определить величину внешнего постоянного магнитного поля H_0 , предварительно производя градуировку устройства. В нашем магнитометре используется вторая гармоника сигнала отклика.

Чувствительность предлагаемого датчика магнитного поля определяется вольтовой чувствительностью $\Sigma = \delta\epsilon_2/\delta H_0$. Из (2) и рис. 1 имеем, что $\Sigma \approx 3 \text{ мВ/Э}$. Чувствительность с учетом шумов в расчете на единичный интервал частот определяется по следующей формуле:

$$D = \frac{1}{\Sigma} \sqrt{\frac{U_{\text{noise}}^2}{\Delta f}},$$

где U_{noise}^2 — среднеквадратичное напряжение шумов;

Δf — полоса пропускания усилителя.

Учитывая, что основной вклад в U_{noise}^2 дает шум Найквиста $U_{\text{noise}}^2 = 4kTR\Delta f$, где k — постоянная Больцмана, T — температура ($T \approx 78 \text{ К}$), R — эквивалентное сопротивление датчика ($R \sim 100 \text{ Ом}$) получим: $D \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ Э/Гц}^{1/2}$.

Оптимизируя устройство путем подбора рабочей частоты ($0 < f < 10^8 \text{ Гц}$) тока, подаваемого на катушку возбуждения 1, числа витков в катушках 2 и 3 и номера рабочей гармоники можно добиться чувствительности $\sim 10^{-8} \text{ Э/Гц}^{1/2}$ и выше. Для сравнения чувствительность обычного СКВИДа $\sim 10^{-9} \text{ Э/Гц}^{1/2}$ [24, 25], а у лучших феррозондов $\sim 10^{-5} \text{ Э/Гц}^{1/2}$ [13, 14]. Кроме высокой чувствительности магнитометр обладает широким диапазоном измеряемых полей от $\sim 10^{-6}$ до 10 Э ($\approx 160 \text{ дБ}$) и выраженной диаграммой направленности. Датчик магнитного поля, обладая чувствительностью, близкой к чувствительности СКВИДов, имеет ряд преимуществ. Например, датчик реагирует непосредственно на величину

напряженности самого магнитного поля, а не на его изменение, как СКВИД. Датчик работает в интервале температур, при которых сердечник является сверхпроводником.

Таким образом, датчик магнитного поля (ВТСП-зонд) обладает всеми преимуществами феррозонда (диаграмма направленности, непосредственное измерение напряженности магнитного поля и широкий диапазон измерения полей), но имеет на два-три порядка большую чувствительность. Разработанный на основе поликристаллического ВТСП YBaCuO датчик является конструктивно проще, более надежен и долговечен в отличие от СКВИДов, изготовленных из пленок ВТСП. СКВИДы из обычных сверхпроводников работают только при гелиевых температурах, что усложняет конструкцию криостатов и сильно повышает их стоимость.

Рассматриваемый датчик магнитного поля в виду высокой чувствительности ($10^{-7} \text{ Э/Гц}^{1/2}$ и выше) и широкого диапазона измерений магнитных полей (от $\sim 10^{-7}$ до $\sim 10 \text{ Э}$) можно использовать в прецизионном приборостроении. Можно также использовать датчик в сочетании с полупроводниковыми приборами или устройствами для улучшения параметров последних. Перспективным представляется внедрение датчика магнитного поля в новые разработки магнитометрических систем неразрушающего контроля, необходимых в авиационной, космической и атомной промышленности, а также для медицинской диагностики (магнитокардиография и магнитоэнцефалография) и в других прикладных областях.

На рис. 5 представлены датчик магнитного поля в азотном криостате и измерительный блок.

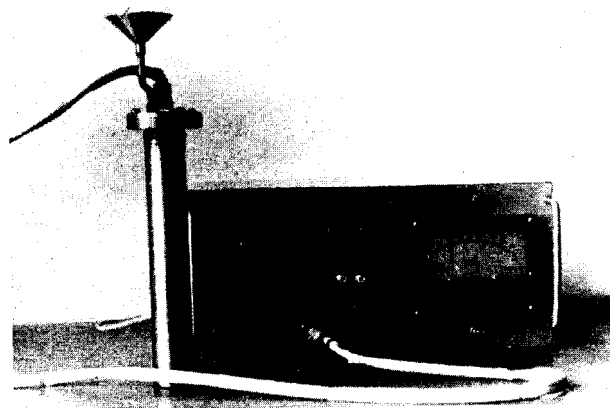


Рис. 5. Внешний вид датчика магнитного поля в азотном криостате и измерительного блока

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-02-16455) и Минобрнауки.

Литература

1. Лутидзе Ш. И., Джафаров Э. А. Сверхпроводящие трансформаторы. — М.: Научтехлитиздат, 2002.
2. Lindgren M., Zorin M. A., Trifonov V. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65 № 26. P. 3398.
3. Бахвалов Ю. А., Бочаров В. И., Винокуров В. А. и др. Транспорт с магнитным подвесом. — М.: Машиностроение, 1991.
4. Матвеев В. А., Полуценко О. Л., Нижельский Н. А. и др. // Первая международная конференция "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" (ФПС 04). 2004. С. 315.
5. Жуков А. А., Мошалков В. В. // СФХТ. 1991. Т. 4. С. 850.
6. Мелихов Е. З., Шапиро В. Г. // Там же. № 8. С. 1437.
7. Хирный В. Ф., Козловский А. А. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 285.
8. Головашкин А. И., Гуденко А. В., Жерихина Л. Н., Иваненко О. М., Мицен К. В., Цховребов А. М. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. В. 8. С. 595.
9. Vasiliev B. V. Review of High T_c Ceramics SQUID's. // Intern. Workshop of Physics and Technology of HTS Artificial Structures for Josephson Electronics. — Tokyo, Japan, 1991. P. 4.
10. Вакулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Наука, 1980.
11. Олемской А. И. // УФН. 1996. Т. 166. С. 697.
12. Грошев А. Г., Новокионов С. Г. // ФТТ. 2000. Т. 42. В. 7. С. 1322.
13. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
14. Сергеев В. Г., Шихин А. Х. Магнитоизмерительные приборы и установки. — М.: Энергоиздат, 1982.
15. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В. Препринт № 41. — М.: ФИАН. 1989.
16. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В. Препринт № 151. — М.: ФИАН. 1989.
17. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 233.
18. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В. // Там же. 1990. Т. 32. № 5. С. 1374.
19. Головашкин А. И., Кузьмичев Н. Д., Левченко И. С., Мотулевич Г. П., Славкин В. В. Препринт № 163. — М.: ФИАН. 1990.
20. Кузьмичев Н. Д. // ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 22. С. 63.
21. Кузьмичев Н. Д. // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. В. 5. С. 291.
22. Кузьмичев Н. Д. // ФТТ. 2001. Т. 43. С. 1934.
23. Пат. 1827653 от 23.03.93 г. Датчик магнитного поля. Кузьмичев Н. Д., Славкин В. В., Васютин М. А., Головашкин А. И., Левченко И. С., Мотулевич Г. П.
24. Волков А. Ф., Заварицкий Н. В., Надь Ф. Я. Электронные устройства на основе слабосвязанных сверхпроводников. — М.: Советское радио, 1978.
25. Кларк Дж. Слабая сверхпроводимость. Квантовые интерферометры и их применение. — М.: Мир, 1980.

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2005 г.

High-temperature detector of magnetic field on the base of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ polycrystal

A. I. Golovashkin

P. N. Lebedev Physical institute RAS, Moscow, Russia

N. D. Kuzmichev

N. P. Ogarev Mordvinian state university, Saransk, Russia

V. V. Slavkin

Saransk cooperative institute of Central Union RF, Saransk, Russia

High-sensitive detector of magnetic field has been elaborated on a basis of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ polycrystal magnetic properties studying. The detector has sensitivity near the SQUID's parameters, much higher than sensitivity of ferrozonds. Such detector, as difference from SQUID's, can measure directly the magnitude of magnetic field, has wide scope of measured magnetic fields, and possesses very pronounced directional diagram. It is simpler in construction and more reliable than SQUID's.