

УДК 531.383

© 1993 г. В. В. ФИЛАТОВ

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ГИРОСКОПАХ

Обсуждается возможность использования явлений высокотемпературной сверхпроводимости в гироскопических приборах, экспериментально исследуются экраны для скивдов и даются рекомендации для их применения в гироскопах.

1. Электрические и магнитные свойства сверхпроводников (СП) открыли уникальные возможности для прогресса в области гироскопии, разработано несколько перспективных криогенных гироскопов с использованием низких (гелиевых, 4К) температур.

Новые возможности появились в последние годы с открытием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), которые свои сверхпроводящие свойства проявляют уже при азотных (77К) температурах, что существенно упрощает ситуацию. В настоящее время получены ВТСП на основе оксидных керамик, ведутся интенсивные поиски новых ВТСП материалов пригодных для изготовления проводов, но уровень достигнутого в настоящее время позволяет изготавливать для гироскопического Ч. Э. лишь ротора, датчики съема информации и сверхпроводящие экраны. Элементы подвеса приходится делать из обычных, несверхпроводящих материалов и помещать их в «теплой» зоне гироскопа.

Вопрос повышения точности криогенного гироскопа во многом определяется точностью датчиков съема информации с гироскопа.

Наиболее точным таким датчиком является сверхпроводящий квантовый интерферометрический датчик (скивд), который является детектором магнитного потока с исключительной чувствительностью (сопротивление сверхпроводящего кольца осциллирует при изменении магнитного потока через него на квант). Будучи связанным с соответствующей схемой, он может служить для измерения самых различных физических параметров — напряжения, сопротивления, градиента магнитного поля, магнитной восприимчивости и механических смещений.

В настоящее время разработаны и применяются как низкотемпературные, так и ВТСП скивды.

Для работы скивда в поле магнитного подвеса гироскопа требуется его тщательное экранирование как от полей подвеса, так и от внешних магнитных полей, в том числе и от магнитного поля Земли, составляющего $\sim 0,5\text{Э}$. Физической основой работы сверхпроводящих (СП) экранов является эффект Мейсснера — Оксенфельда [1]. Внешнее магнитное поле убывает в сверхпроводнике согласно закону $B(x) = B(0) \exp(-x/\lambda)$, где $B(0)$ — магнитная индукция на поверхности сверхпроводника, x — расстояние от поверхности; λ — лондоновская глубина проникновения.

Для низкотемпературных сверхпроводников $\lambda \approx 10^{-7}$ м, поэтому слабые поля в сверхпроводники обычных размеров практически не проникают.

Если величина внешнего поля сравнима со значением критического поля СП, то он может перейти в промежуточное состояние, при этом образец разбивается на чередующиеся сверхпроводящие и нормальные области, и в него проникает магнитное поле. Поле, при котором образец из СП переходит в промежуточное

состояние, определяется его формой и критическими свойствами материала. Для цилиндрического экрана это поле можно определить в виде [2]

$$H_n = H_c [1/2 (1 - (b/a)^2)]^{1/2}$$

где H_c — критическое поле сверхпроводящего материала, a , b — внешний и внутренний диаметр цилиндра.

Напряженность аксиального поля, при котором толстостенный цилиндр переходит в промежуточное состояние, приближенно равна критическому полю материала $H_n \approx H_c$. Для низкотемпературных материалов значение H_c при температуре жидкого гелия обычно достигает нескольких сотен эрстед, и поэтому даже толстостенные экраны в земном поле не переходят в промежуточное состояние. Например, цилиндрические экраны из свинцовой фольги толщиной 0,3 мм, имеют коэффициент ослабления внешнего поля более 10^8 раз [3]. Ограничения на коэффициент экранирования накладывает поле, проникающее через горловину экрана. Так как значения H_c низкотемпературных СП высоки, то при экранировании такими СП-экранами основные трудности заключаются в уменьшении «замороженного» магнитного поля. Для этого либо уменьшают напряженность магнитного поля, в котором охлаждается СП-экран (используют магнитный вакуум), либо оптимизируют режим охлаждения экрана (используют эффект вытеснения магнитного поля).

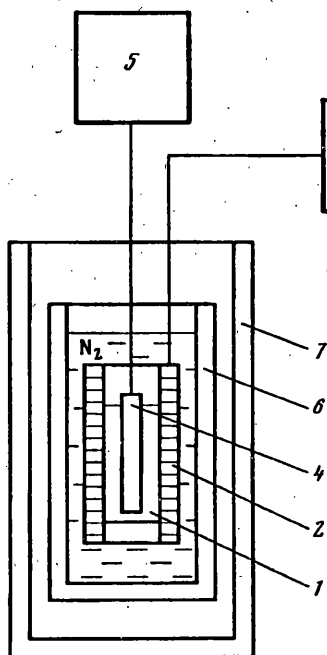
СП-экраны из ВТСП имеют существенные отличия от обычных (низкотемпературных) сверхпроводников, в первую очередь вследствие их гранулированной структуры и джозефсоновских свойств межгранульных границ. Экранирующие свойства ВТСП-керамик можно связать с величиной первого критического поля межгранульных связей, при котором начинается проникновение магнитного поля в ВТСП. Величина этого поля сильно зависит от технологии приготовления образца и в первом приближении она растет с ростом транспортного тока материала [4].

Экранирующие свойства ВТСП-керамик изучались на плоских образцах [5—7], и образцах цилиндрической формы [8—11]. Показано, что ВТСП-экраны могут успешно конкурировать с экранами из меди на частотах до сотен кГц [6, 7] и с экранами из μ -металла начиная с области очень низких частот [6]. При этом отмечается улучшение экранирующих свойств с увеличением критических параметров сверхпроводников [5]. Исследования цилиндрических образцов показали, что с помощью их можно уменьшить постоянное магнитное поле до очень малых величин и, возможно, вплоть до «магнитного вакуума». Наилучшее экранирование было получено для образца из $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [11], получены значительные габариты вплоть до 320 мм [12] и высокий коэффициент подавления внешнего магнитного поля 10^6 .

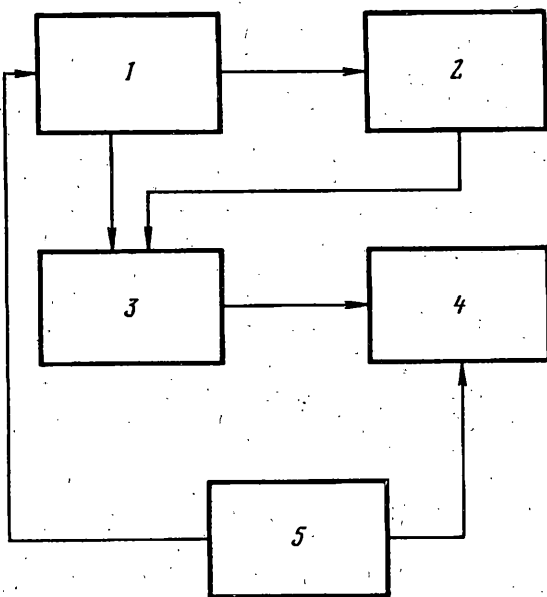
2. В публикуемой работе проведено экспериментальное исследование СП-экранов из ВТСП-керамики изготовленных на отечественном оборудовании с целью определения возможности их применения в гироскопических Ч. Э.

Исследовались экраны в форме цилиндра с дном, длиной 100 мм, с внешним диаметром 24 мм, толщиной стенок 2 мм и толщиной дна 3 мм, изготовленные из иттриевой ВТСП-керамики с добавлением серебра и из висмутовой керамики. Допирование серебром иттриевой керамики повышает её критические параметры, что, как указывалось выше, должно улучшить качество экранов из этого материала.

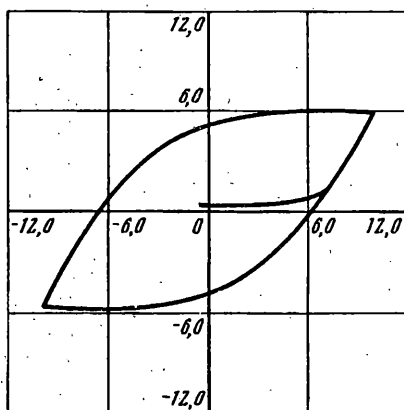
Керамика $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} \times Ag$ (система 123) готовилась традиционным механокерамическим способом из порошков оксидов. На завершающем этапе в порошок ВТСП добавлялся порошок сплава $Ag-Sn-Cu$ (70% Ag) в количестве 9—11%. Серебро повышает длину когерентности материала в межзеренных границах, а олово (Sn) способствует формированию пиннинговых центров. Смесь тщательно перемешивалась и прессовалась гидростатически в эластичной форме при давлении 10^9 Па. Затем прессовка спекалась при температуре 950—960° С



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

в течение 6—8 часов и подвергалась окислительному отжигу при температуре 400° С в токе кислорода в течение 4—6 часов.

Экраны из висмутовой керамики $\text{Bi}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_3$ (система 2223) изготавливались аналогичным способом, спекались при температуре 840—850° С в течение 20—30 часов, охлаждались со скоростью 1° С/мин до комнатной температуры в воздушной атмосфере.

Схема установки для исследования сверхпроводящих экранов представлена на фиг. 1.

Исследуемый образец 1, помещается внутри соленоида 2, задающего внешнее магнитное поле. Длина соленоида 160 мм, внешний диаметр 32 мм, число витков — 180. Соленоид запитывается постоянным стабилизированным током от источника 3. Внутри образца находится феррозонд 4 магнитометра МФ-1—5 для измерения магнитного поля внутри экрана. Феррозонд является магниточувст-

вительным элементом с диапазоном измерения постоянных однородных полей от 0,02 до 5 А/см и расширенный диапазон до 10 А/см.

Чувствительный элемент феррозонда состоит из двух ферроэлементов, каждый из которых представляет собой катушку с пермаллоевым сердечником. Два ферроэлемента вместе со вторичной обмоткой трансформатора генератора прямоугольных импульсов образуют мостовую схему, к диагонали которой подключен фильтр второй гармоники. Переменный ток частотой 100 Гц с генератора прямоугольных импульсов подается на обмотки феррозонда и периодически перемагничивает его сердечники до состояния близкого к магнитному насыщению. При воздействии на феррозонд постоянным магнитным полем в составе ЭДС появляются четные гармоники, амплитуды которых пропорциональны напряженности измеряемого магнитного поля.

Вся система (соленоид, ВТСП-экран и феррозонд) помещаются в сосуд Дьюара 6, заполненный жидким азотом (77К), который в свою очередь устанавливается внутри пятислойного пермаллового экрана 7 с коэффициентом подавления внешнего магнитного поля 1200.

Для того, чтобы избежать возникновения замороженных магнитных полей в материале ВТСП-экрана, захлаживание системы (заллив азота) производится после того, как вся система помещена внутрь пермаллового экрана 7.

Тарировка соленоида проводилась с помощью измерителя магнитной индукции Ш1-8, в котором измерение магнитного поля производится с помощью датчика Холла. Напряжение Холла пропорционально усредненному значению индукции поля в пределах площади, ограниченной поверхностью преобразователя. Структурная схема измерителя магнитной индукции Ш1-8 приведена на фиг. 2, где 1 — генератор и усилитель мощности, 2 — преобразователь Холла, 3 — компенсатор, 4 — усилитель, 5 — выпрямитель.

На фиг. 3 получена зависимость индукции магнитного поля внутри ВТСП-экрана из висмутовой керамики (в Гауссах) от внешнего магнитного поля (в Эрстедах). Видно, что данный образец характеризуется низким уровнем критического поля порядка шести эрстед, цикл перемагничивания симметричен. Аналогичная зависимость получена для экрана изготовленного из иттриевой керамики с добавлением серебра (критическое поле составило 12 Э).

Коэффициент подавления внешнего магнитного поля оценивался как частное от деления величины поля начала проникновения к чувствительности аппаратуры и составил более 10^5 — 10^6 . По-видимому его действительная величина превышает указанное значение (ограничивают возможности измерения).

Для ответа на вопрос: не проникает ли со временем магнитное поле в ВТСП-экран? Были проведены длительные испытания ВТСП-экрана в течение 24 ч при стабильном значении внешнего магнитного поля равном половине критического поля. За указанное время не обнаружено проникновения магнитного поля внутрь экрана.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что в настоящее время ВТСП-экраны могут быть использованы в гироскопических приборах, в которых магнитные поля не превышают критических полей используемой керамики (~10 Э) (акселерометры, градиентометры и т. п.). Для криогенного гироскопа с магнитным подвесом ротора, для которого магнитное поле составляет сотни эрстед, ВТСП-керамика пока не применима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карцев В. П. Сверхпроводники в физике и технике. М.: Знание, 1965. 48 С.
2. Бондаренко С. И., Шеремет В. И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1982. 74 с.
3. Васильев Б. В., Игнатович В. К., Кольчева Е. В. Экранирование слабых магнитных полей сверхпроводящими оболочками//Ж. техн. физики. 1978, Т. 48. Вып. 9, С. 1934—1940.

4. Мейлихов Е. З. Диамагнитные свойства ВТСП-керамик//Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1989. Т. 2. С. 5—28.
5. Okada T., Takahata K., Nishijima S. Applidability of Oxide Superconductor to Magnetic Shielding//IEEE Trans. on Magn., 1989. V. 25. No. 2. P. 2270—2272.
6. Ohshima S., Okuyama K. Magnetic Shielding Effect of Ba₂YCu₃O_{7- δ} Plates//Jpn. J. Appl. Phis. 1990. V. 29. No. 11. P. 2403—2406.
7. Russel G. J., Taylor K. N. R. The Shielding Effectiveness of Yttrim Barium Superconductors//J. Appl. Phys. 1989. V. 66, No. 11, P. 5498—5402.
8. Willis J. O., McHenry M. E., Maley M. P., and Sheinberg H. Magnetic Shielding by Superconducting Y—Ba—Cu—O Hollow Cylinders//IEEE Trans. on Magn. 1989. V. 25. No. 2. P. 2502—2505.
9. Заварицкий В. Н., Заварицкий Н. В. Сверхпроводящие интерференционные магнитометры и магнитные экраны из керамики YBa₂Cu₃O₇, работающие при азотных температурах//Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 19, С. 1791—1794.
10. Shigematsu K., Ohta H., Hoshino K., Takayama H., Yagishita O., Yamazaki S., Takahara H., and Aono M. Magnetic Shield of High—T_c Oxide Superconductors at 77 K.//Jpn. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. No. 5. P. 813—815.
11. Gui G. J., Wang S. G., Jang H. M., Li J. Z., Li C. Y., Lin C. D., Lin R. Z., Zheng Q. L., Fu Y. S., Luo Z. L., Qiao W. C. A Superconductive Shielding can for High T_c SQUID//IEEE Trans. on Magn. 1989. V. 25. No. 2. P. 2273—2275.
12. Kazimoto Hoshino et al. Large Vessel of High—T_c Bi—Pb—Sr—Ca—Cu—O Superconductor for Magnetic Shield//Jap. J. of Appl. Phys. 1990. V. 29. No. 8. P. 1435—1438.

Москва

Поступила в редакцию
3.III.1993