

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(25 октября 1998 г.)

25 октября 1998 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии РАН. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Елесин В.Ф.** (Московский инженерно-физический институт, Москва), **Конаев Ю.В.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва) *Униполярные полупроводниковые лазеры.*

2. **Снигирев О.В.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва) *Сверхчувствительная сквид-магнитометрия.*

Краткое сообщение по второму докладу публикуется ниже.

PACS numbers: 07.55.+x, 07.60.Ly, 74.70.-b

Сверхчувствительная сквид-магнитометрия

О.В. Снигирев

1. Введение

Из всех, достаточно многочисленных устройств сверхпроводниковой нелинейной электроники, базирующейся на эффекте Джозефсона, в настоящее время наиболее широко известны магнитометры на основе сверхпроводниковых квантовых интерферометров, так называемых сквидов (см., например, [1]).

При современной тонкопленочной технологии изготовления квантовый интерферометр представляет собой плоский сверхпроводящий замкнутый контур с характерным размером внутреннего отверстия около 50 мкм [2], обеспечивающим индуктивность интерферометра на уровне 10^{-10} Гн, что необходимо для оптимизации режима работы магнитометра в целом [3]. Именно малые пространственные размеры интерферометра в сочетании с достаточно высокой прямой чувствительностью (порядка 1 пТл Гц^{-1/2}) к магнитному полю, получаемой без использования входных трансформаторов магнитного потока, породили в начале 90-х гг. идею визуализации магнитного поля с помощью сквида.

Хотя по своей схематехнике сквид-микроскоп как прибор реализующий эту идею (рис. 1) казался достаточно простым, для его создания оказалось необходи-

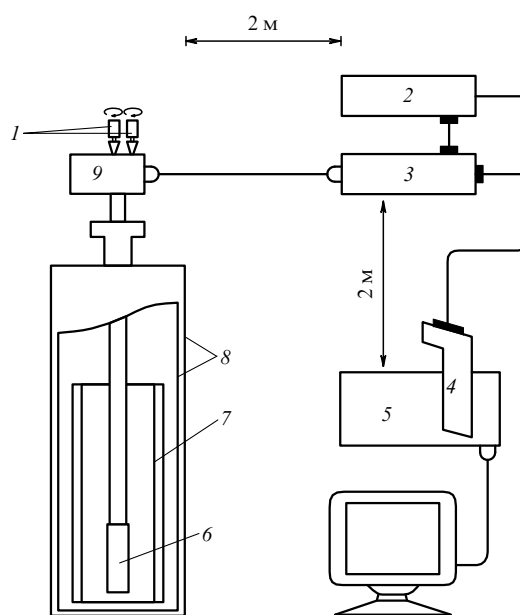


Рис. 1. Функциональная схема сквид-микроскопа: 1 — шаговые двигатели, 2 — синхронный усилитель, 3 — блок электроники, контролирующей работу систем прибора, 4 — аналого-цифровой преобразователь, 5 — персональный компьютер, 6 — криогенный сканирующий механизм и квантовый интерферометр микроскопа, 7 — криостат, 8 — магнитные экраны, 9 — электроника сквида.

мым решить ряд задач. Во-первых, учитывая высокую чувствительность сквида, было необходимо разработать сканирующий механизм из магнито-чистых материалов, обеспечивающий X - Y поле обзора порядка 1×1 см² с воспроизводимым шагом сетки пространственных отсчетов на уровне 10 мкм при температуре 4,2 К или 77 К. Поскольку пространственное разрешение сквид-микроскопа определяется наибольшей из двух величин — линейным размером интерферометра и его расстоянием ΔZ от плоскости объекта, к сканирующему механизму предъявлялось требование обеспечения сканирования при значениях ΔZ в диапазоне 10–100 мкм.

Во-вторых, естественное желание работать с объектами при верхних значениях поля подмагничивания порядка 100 А м^{-1} , обеспечивающих сопоставление получаемых результатов с результатами, например, магнитооптических [4] или холловских [5] измерений,

приводило к весьма жестким требованиям на размеры джозефсоновских переходов в интерферометре, особенно в случае использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП).

Наконец, в-третьих, наличие компьютера, шаговых двигателей и разветвленных электрических цепей с типичной протяженностью 1–2 м потребовало тщательной отработки всей схемы фильтрации наводок на интерферометр с целью сохранения его высокой чувствительности.

Несмотря на все отмеченные трудности, первые прототипы приборов были созданы в 1991–1993 гг. [6, 7] и опробованы на тривиальных объектах типа змеек из проводников с током. Целью настоящего доклада является сообщение о современном состоянии разработок в данной области и применениях сканирующих сквид микроскопов (ССМ) в физических исследованиях.

2. Сканирующий механизм и пространственное разрешение

В связи с тем, что многие потенциальные объекты исследований с помощью сквид-микроскопов имеют размеры в единицы миллиметров, а для установления нуля шкалы отсчетов необходимо удаление датчика ССМ (квантового интерферометра) на сравнимое расстояние был выбран клинопружинный вариант сканирующего механизма (см. рис. 2). Перемещение столика с образцом производится шаговыми двигателями; при этом вращательное движение их валов с помощью микрометрических винтов и подпружиненных толкателей передается на "X" и "Y" платформы. Аналогичный принцип использован и для подвода сквида к образцу. При 400 шагах на один оборот и обычной микрометрической головке (500 мкм на 1 оборот) минимальный шаг может составлять 1,2 мкм по координате Y и 0,6 мкм по координате X, поскольку движение на X-платформу передается через клиновую пару с соотношением 2:1. Наличие механического гистерезиса на уровне 10 мкм,

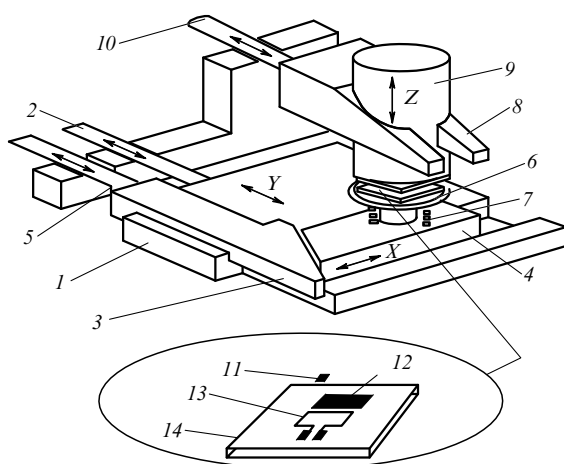


Рис. 2. Схематическое изображение криогенного узла сканирующего сквид-микроскопа: 1 — Y-платформа, 2 — толкатель Y-платформы, 3 — клин привода X-платформы, 4 — X-платформа, 5 — толкатель X-платформы, 6 — столик образца, 7 — пружины столика, 8 — клиновидная вилка механизма Z-координаты, 9 — держатель сквида, 10 — толкатель Z — держателя сквида. В выносе показаны в увеличенном масштабе расположение сквида и образца: 11 — сквид, 12 — образец, 13 — калибровочный виток, 14 — подложка.

линейные размеры датчика и требование минимизации времени сканирования приводят к оптимальному шагу 4,8 мкм.

Для обеспечения малого пространственного разделения ΔZ между сквидом и образцом используется контактная мода сканирования, в которой подложка со сквидом крепится к "Z"-платформе так, что ее плоскость образует малый угол α ($\leq 5^\circ$) с плоскостью образца. При приближении сквида к образцу, прикрепленному к подпружиненному столику с калибровочной токовой петлей, выходной сигнал сквида перестает увеличиваться в момент касания подложки и образца. В таком случае $\Delta Z \approx l_1 \alpha$, где l_1 — расстояние от края подложки до сквида.

В модернизированном варианте ССМ учтены недостатки сканирующего механизма, выявленные в процессе работы с прибором-прототипом, внесены соответствующие конструктивные изменения. При сохранении поля сканирования минимальный шаг уменьшен до 2 мкм и предусмотрен режим работы "ZOOM" в поле $0,6 \times 0,6$ мм в любой точке раstra с шагом 0,2 мкм.

3. Датчики ССМ

Общая архитектура ССМ позволяет работать с квантовыми интерферометрами-датчиками на основе низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников. Датчик на основе джозефсоновских переходов Nb/AIO_x/Nb, выполненный в семислойной технологии, подробно описан в [8]. Общий вид датчика ССМ на основе межгранульных переходов в пленке YBa₂Cu₃O_{7-x} на бикристаллической подложке показан на рис. 3а, а увеличенное изображение его рабочей части, содержащей два интерферометра с электрической разводкой и общей шиной обратной связи электроники сквида, приведено на рис. 3б.

Эффект фокусировки магнитного поля электродами однослойных ВТСП джозефсоновских переходов [9] приводит к тому, что эффективная площадь перехода типа "мостик" ширины W есть $W^2/1,84$, а не произведение W на сумму лондоновских глубин проникновения, λ_L , в электродах. Поэтому наиболее сильное ограничение действует на максимальную величину поля намагничивания образца, приложенного перпендикулярно плоскости интерферометра. При оптической фотолитографии мостиков с размером 5 мкм первый минимум зависимости критического тока от магнитного поля, в котором исчезает сигнальный отклик интерферометра, наблюдается в полях порядка 100 А м^{-1} . В этой связи, для работы в перпендикулярных полях порядка 1000 А м^{-1} требуются переходы субмикронных размеров, получаемые электронной литографией.

В параллельном поле подмагничивания эффективная площадь ВТСП переходов порядка $2\lambda_L^2$ и датчики нормально работают до значений поля порядка $50\,000 \text{ А м}^{-1}$. То же самое относится и к ниобиевым датчикам, для которых именно параллельное поле является наиболее критичным.

4. Сравнение с другими типами приборов

В семействе приборов, позволяющих визуализировать магнитное поле, сканирующий сквид-микроскоп занимает свою определенную нишу. На диаграмме, по оси абсцисс которой отложено пространственное разрешение, δx , а по оси ординат — разрешение по магнитному

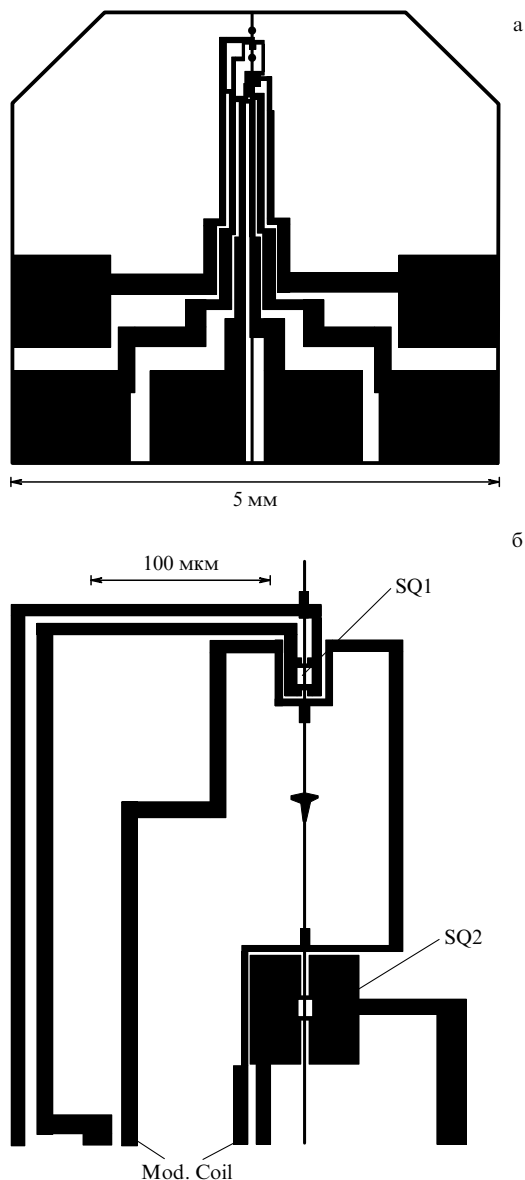


Рис. 3. Датчик сквид-микроскопа на основе высокотемпературного сквида постоянного тока. Общий вид бикристаллической подложки и тонкопленочной структуры на ней с контактными площадками (а). Увеличенное масштабное изображение рабочей части, содержащей два квантовых интерферометра SQ1 и SQ2 с общей шиной цепи обратной связи (Mod. Coil) (б).

полю δB , ССМ займет место в нижнем правом углу [10]. При этом оба основных параметра оказываются связаны соотношением $\delta B \times (\delta x)^2 = S_{\Phi n}$, где $S_{\Phi n}$ есть спектральная плотность эквивалентного шумового магнитного потока интерферометра.

Наиболее близкими приборами к ССМ на такой диаграмме окажутся магнитооптические устройства с пленками [4] и холловские датчики на двумерном электронном газе [5]. Уступая этим устройствам примерно на порядок по пространственному разрешению, ССМ превосходит их примерно на три порядка по разрешению по полю в единичной полосе частот. Кроме того, ССМ является единственным прибором, работающим в полях подмагничивания менее 50 A м^{-1} и не имеет ограничения снизу на величину этого поля.

Необходимо отметить также, что ССМ позволяет, при соответствующей калибровке, определять количественно полный магнитный момент образца M и его объемную восприимчивость. При этом типичное разрешение по моменту обычно лучше, чем $10^{-15} \text{ A м}^2 \text{ Гц}^{-1/2}$, что на два-три порядка превосходит чувствительность хорошо известных измерителей магнитной восприимчивости на основе сквидов.

Уникальная чувствительность ССМ в сочетании с достаточно высоким разрешением по координате делают этот прибор привлекательным для физических экспериментов с экстремально малым количеством вещества в слабых магнитных полях при температуре образца 4,2 или 77 К.

5. Заключение

Разработанные физические основы тонкопленочной технологии сверхпроводниковых материалов и формирования джозефсоновских переходов на основе низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников позволили создать новый уникальный прибор — сканирующий сквид-микроскоп.

Применение разработанного прибора и, соответственно, методик магнитной сканирующей сквид-микроскопии позволяет получать изображение пространственного распределения одной из компонент магнитного поля ультратонких пленок магнитных материалов, а также других плоских объектов и определять с высокой точностью, недоступной другим устройствам, значения их локальной намагниченности в области малых значений воздействующих полей. В настоящее время разрабатываются версии ССМ с переменной и комнатной температурой образца.

Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 96-02-19250 и № 96-02-18127а, и грантами INTAS № 93-2777-ext и ВМВФ № 13N6898, подпрограммой "Сверхпроводимость" Российской ГНТП АНФКС.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность С.А. Гудошникову, К.Е. Андрееву, А.М. Тишину, М. Muck, J. Dechert, С. Heiden, J. Bohr, А.С. Калабухову, С.А. Чупахину, С.И. Красносвободцеву, Л.В. Матвеец, А.В. Паволоцкому, И.Г. Прохоровой, С.Н. Полякову, Н.Н. Уханскому, И.И. Венгурсу, Д.Е. Кириченко, за участие в различных этапах работы.

Список литературы

1. Clarke J *Sci. Am.* (Aug. 1994) p. 36
2. Ketchen M B *IEEE Trans. Magn.* **MAG-27** 2916 (1991)
3. Danilov V V, Likharev K K, Snigirev O V, in "SQUID'80" (Eds H G Hahlbohm, H Lubbig) (Berlin, New-York: Walter de Gruyter, 1980) p. 473
4. Indenbom M V et al. *Physica C* **222** 203 (1994)
5. Oral A, Bending S J, Henini M *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** 1202 (1996)
6. Matnai A et al. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1) 2609 (1993)
7. Gudoshnikov S A et al. *Cryogenics* (UK) **34** (Suppl. issue) 883 (1994)
8. Кириченко Д Е и др. *ЖТФ* (1999) (в печати)
9. Rosenthal P A et al. *Appl. Phys. Lett.* **59** 3482 (1991)
10. Vu L N, Van Harlingen D J *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1) 1918 (1993)
11. Snigirev O V et al. *Phys. Rev. B* **55** 14429 (1997)
12. Снигирев О В и др. *ФТТ* **40** 1681 (1998)
13. Gudoshnikov S A et al. *Appl. Supercond.* **5** (7–12) 313 (1998)