

05.4;06

©1994

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАБОТЫ МОНОКРИСТАЛЛА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА В КАЧЕСТВЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

А.Ю.Волков, К.Е.Каменцев, А.А.Буш

В настоящее время стало ясно, что возможность широко-масштабного использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) лежит на пути разработки новых технологий и устройств, учитывающих уникальные структурные особенности и связанные с ними специфические квазидвумерные свойства [1-5] этих материалов. На этом пути наряду с несомненными технологическими трудностями открываются и интересные возможности для создания сверхпроводниковых управляемых переключающих элементов (ПЭ) — криотронов.

Разработка криотронов является важной задачей, так как на основе этих переключающих элементов строится множество устройств криоэлектроники: преобразователи тока, запоминающие ячейки, логические элементы [6,7]. Существующие в настоящее время криотроны [6-9] состоят из специально подобранной пары низкотемпературных (охлаждаемых гелием) сверхпроводников с разными критическими значениями плотности тока и напряженности магнитного поля при данной рабочей температуре. При этом управляющий сверхпроводник (затвор) имеет более высокие критические параметры по сравнению со вторым, называемым вентилем. Оба сверхпроводника разделены изолятором, подключены к разным электрическим цепям и взаимодействуют друг с другом через магнитное поле. При работе криотрона необходимо сохранять затвор в сверхпроводящем состоянии.

Большинство криотронов имеет относительно низкое быстродействие, обусловленное конечной скоростью возникновения, распространения и релаксации нормальной фазы в вентиле. В последнее время более перспективными считаются джозефсоновские криотроны, представляющие собой, например, сверхпроводящую пленочную структуру, содержащую распределенный туннельный контакт (вентиль), управляемый магнитным полем размещенной свер-

ху шины-затвора [7]. До сих пор область применения этих устройств ограничивалась необходимостью их охлаждения дорогим жидким гелием.

В настоящей статье приведены предварительные результаты экспериментальной проверки возможности создания кроссотрона — ПЭ нового типа на эффекте $3D - 2D$ кроссовера в квазидвумерном монокристалле ВТСП.

Предположение о возможности создания такого ПЭ на основе монокристалла ВТСП впервые было высказано в [10,11]. Оно основывалось на том, что с формальной точки зрения направление оси c монокристалла соответствует вентилю, а плоскость (a, b) , имеющая более высокие критические параметры сверхпроводника, — затвору обычного криотрона. При этом учитывалось, что монокристаллы ВТСП (особенно системы $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ и $Ti-Ba-Ca-Cu-O$) являются структурными аналогами искусственных сверхпроводящих сверхрешеток (ИСС) [3-5] и проявляют квазидвумерные сверхпроводящие свойства. Следовательно, возможность управления переключением в таких системах может быть связана с подавлением взаимодействия между слабосвязанными сверхпроводящими слоями [12-14].

Другими словами, предполагаемая работа кроссотрона основана на эффекте $3D - 2D$ кроссовера — управляемом переходе квазидвумерной слоистой сверхпроводящей системы из трехмерного в двумерное состояние с прерыванием сверхпроводящего рабочего тока по оси c и с сохранением сверхпроводимости в плоскости (a, b) .

Принцип работы предложенного в [10-14] кроссотрона в некоторой степени напоминает туннельный криотрон. Однако в кроссотроне предполагалось использовать сильную анизотропию длины когерентности, пиннинга вихрей и критических параметров вдоль и поперек слоев (a, b) монокристалла для того, чтобы подавить слабое межслоевое взаимодействие сверхпроводящим током, текущим в этих слоях.

Для подтверждения этого предположения, а также для выяснения особенностей взаимодействия сверхпроводящих слоев и процесса переноса зарядов в разных направлениях сверхпроводящей квазидвумерной слоистой структуры, было изучено влияние параллельного слоям тока на транспортные свойства структуры в перпендикулярном слоям направлении [15]. Несмотря на большое количество исследований на монокристаллах ВТСП, проведенных в мире за последнее время, авторам не удалось обнаружить описание подобных экспериментов.

Таким образом, целью описанного здесь эксперимента являлась проверка возможности работы монокристалла ВТСП в качестве ПЭ.

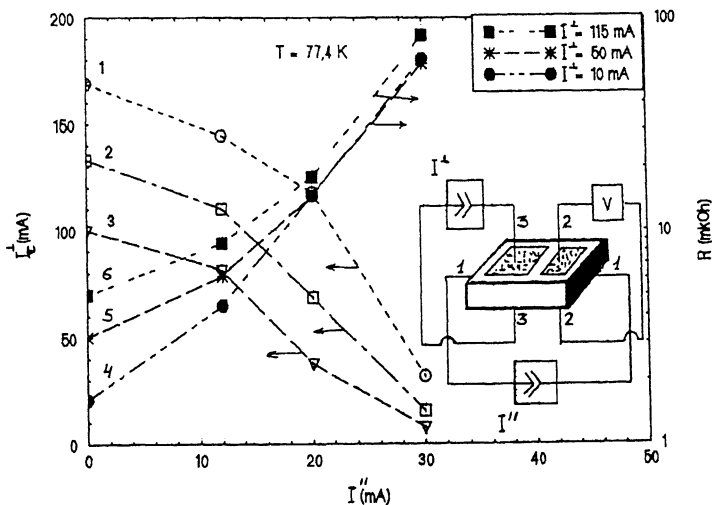


Рис. 1. Зависимости критического тока I_c^{\perp} (1, 2, 3) и сопротивления R^{\perp} (4, 5, 6) вдоль оси с кристалла от величины тока I^{\parallel} , параллельного плоскости (а, б). Кривые 1, 2, 3 соответствуют критериям сверхпроводимости 0,5, 1 и 2 мкВ для I_c^{\perp} . Кривые 4, 5, 6 ($R^{\perp} = f(I^{\parallel})$) получены при значениях $I^{\perp} = 10, 50$ и 115 соответственно.

На вставке — схема эксперимента с кроссовером: подключение к его управляющим (1), потенциальным (2) и токовым (3) контактам.

Заметим, что эффект $3D - 2D$ кроссовера давно рассматривается теоретически и изучается экспериментально на разных слоистых системах. Однако вопрос о его практическом использовании в сверхпроводящих ключах был поставлен нами совсем недавно [12-14].

Эксперимент

В измерениях использовался монокристалл фазы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ размером $5.5 \times 2 \times 0.2$ мм, выделенный из текстурированного слитка, выращенного методом бестигельной оптической зонной плавки [16-18]. Эта фаза отчетливо проявляет квазидвумерные свойства, близкие к свойствам ИСС [3-5], и поэтому рассматривалась в [12-14] как наиболее привлекательная для создания нового переключающего элемента.

В основу эксперимента положен модифицированный 6-контактный метод, предложенный в [12] для изучения нового ПЭ. Расположение управляющих (1), потенциальных (2) и токовых (3) контактов показано на вставке рис. 1.

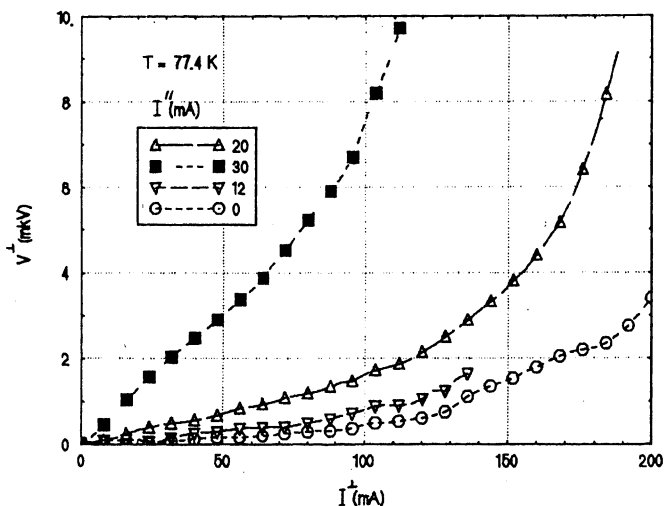


Рис. 2. Семейство вольт-амперных характеристик $U^{\perp} = f(I^{\perp})$ монокристалла в направлении оси c при различных управляющих токах I^{\parallel} .

Ток, перпендикулярный сверхпроводящим слоям I^{\perp} , создавался управляемым от ЭВМ источником В5-47, а ток, параллельный слоям I^{\parallel} , а также программно-управляемый при помощи ЭВМ, создавался источником, состоящим из 16-разрядного ЦАП и усилителя мощности У7-5.

Напряжение на образце измерялось нановольтметром Р341 с точностью 0.1 мкВ, аналоговый сигнал с выхода нановольтметра измерялся цифровым вольтметром В7-35, который соединялся с ЭВМ. Такая установка позволяла проводить измерения вольт-амперных характеристик при медленном изменении температуры. Время "автоматического" измерения ВАХ не превышало 10 с. За это время температура менялась не больше чем на 0.01 К вблизи T_c .

На рис. 2 показано семейство вольт-амперных характеристик кристалла в направлении оси c при температуре 77.4 К ($T_c = 81.3$ К) и при различных значениях параллельного слоям (a, b) управляющего тока I^{\parallel} . По этим ВАХ были построены зависимости критического тока поперек слоев I_c^{\perp} от величины управляющего тока I^{\parallel} (на рис. 1 приведены эти зависимости для трех случаев, когда критический ток определялся по критериям 0.5, 1 и 2 мкВ). Видно, что с нарастанием I^{\parallel} снижается значение I_c^{\perp} и увеличивается сопротивление R^{\perp} (кривые 4, 5 и 6 на рис. 1).

Обсуждение

Полученные кривые являются фазовыми управляющими характеристиками ПЭ и соответствуют границе между сверхпроводящим состоянием вентиля (ниже кривой) и состоянием, характеризующимся появлением сопротивления (выше кривой). Эти кривые дают довольно полную информацию о данном ПЭ при заданной температуре и поэтому представляют ценность с точки зрения конструирования переключающих элементов и схем на их основе [6].

Для того чтобы ПЭ (в нашем случае — кроссотрон) был пригодным для логических схем, управляющий ток, необходимый для подавления сверхпроводимости в вентиле, должен быть меньшим, чем ток, который можно пропустить через сам вентиль. Иначе говоря, необходимо, чтобы выполнялось условие $I_c(\text{упр.}) < I_c(\text{вент.})$ [6]. В этом случае элемент будет обладать усилением по току и может включаться в каскадные схемы без необходимости регенерировать сигналы. Коэффициент усиления определяется как $G = I_c(\text{вент.})/I_c(\text{упр.})$.

Следовательно, в нашем случае G определяем из управляющих характеристик как $G = I_c^\perp/I_c^\parallel$ и получаем величину ~ 3.3 (0.5 мкВ) или ~ 4.7 (2.0 мкВ). По данным [19], для использования переключателей в наиболее удобных схемах двухпроводной логики желательно при выпуклой форме характеристики иметь усиление по току $G > 2$. На практике найдево, что $G > 3$ является оптимальным для логических элементов сверхпроводниковой электроники [7]. Из наших данных видно, что кроссотрон на основе монокристалла фазы Bi-2212 удовлетворяет этим требованиям.

Большой коэффициент усиления G важен по многим причинам: это возможность разветвления по выходу, смягчение требований на разброс критических токов, снижение времени переключения.

Заключение

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение возможности создания на основе монокристалла ВТСП фазы Bi-2212 переключающего элемента нового типа — кроссотрона. Впервые получены управляющие характеристики кроссотрона, по которым рассчитан коэффициент усиления по току ($\sim 3.3 - 4.7$). Форма управляющей характеристики и величина коэффициента усиления позволяют, в первом приближении, сделать вывод о возможности работы кроссотрона в качестве базового элемента разветвленных логических схем сверхпроводниковой микроэлектроники.

- [1] *Artemenko S.N., Latyshev Yu.I.* // Modern Phys. Lett. 1992. V. B6. N 7. P. 367-382.
- [2] *Schmitt P., Kummeth P., Schultz L., Saemann-Ischenko G.* // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. N 2. P. 267-270.
- [3] *Миронов О.А., Савицкий Б.А., Сипатов А.Ю.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. В. 2. С. 100-102.
- [4] *Миронов О.А., Чистяков С.В., Скрылев И.Ю.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. С. 300-303.
- [5] *Fastampa R., Giura M., Marcon R., Silva E.* // Phys. Rev. Lett. 1991. T. 67. N 13. P. 1795-1798.
- [6] *Бремер Дж.* Сверхпроводящие устройства. М.: Мир, 1964. 240 с.
- [7] *Алфеев В.Н., Бахтин П.А., Васенков А.А.* и др. / Под ред. Алфеева В.Н. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках. М.: Радио и связь, 1985. 232 с.
- [8] *Алфеев В.Н.* Полупроводники, сверхпроводники и параэлектрики в криоэлектронике: Свойства и применение в криоэлектронных интегральных схемах и приборах структур на основе контактов полупроводников, сверхпроводников и параэлектриков. М.: Сов. радио, 1979. 408 с.
- [9] *Бак Д.А.* // Патент США № 2936435, 1960.
- [10] *Волков А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 4. С. 11-14.
- [11] *Волков А.Ю.* // Патент СССР № 1828726, 1988.
- [12] *Волков А.Ю.* // СФХТ. 1990. Т. 3. N 11. С. 2646-2649.
- [13] *Волков А.Ю., Лебедев С.Я., Лисичкин Ю.В.* // Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. "Актуальные проблемы фундаментальных наук". МГТУ, 1991. Т. 3. С. 178-180.
- [14] *Волков А.Ю.* Тез. докл. 29-го Совещания по физике низких температур. Казань. 1992. Ч. 1. С. 195.
- [15] *Дробинин А.В., Волков А.Ю., Буш А.А.* Материалы 1-й Межгосударственной конф. "Материаловедение высокотемпературных сверхпроводников". Харьков. 1993. Т. 3. С. 12-13.
- [16] *Буш А.А., Сиротинкин В.П., Гордеев С.Н.* и др. // СФХТ. 1989. Т. 2. № 5. С. 71-75.
- [17] *Буш А.А., Дубенко И.С., Мрост С.Э.* и др. // СФХТ. 1990. Т. 3. № 3. С. 432-441.
- [18] *Буш А.А., Романов Б.Н., Куликов М.А., Титов Ю.В.* // СФХТ. 1990. Т. 3. № 8. Ч. 2. С. 1879-1889.
- [19] *Лизарев К.К., Ульрих Б.Т.* Системы с джозефсоновскими контактами. М.: МГУ, 1978. С. 447.

Поступило в Редакцию
23 июня 1994 г.