

05.4;09

## Использование эффекта экранирования магнитного поля пленками ВТСП для коммутации СВЧ-сигналов

© Т.М. Бурбаев, С.И. Красносвободцев, В.А. Курбатов,  
Н.П. Малакшинов, В.С. Ноздрин, Н.А. Пенин

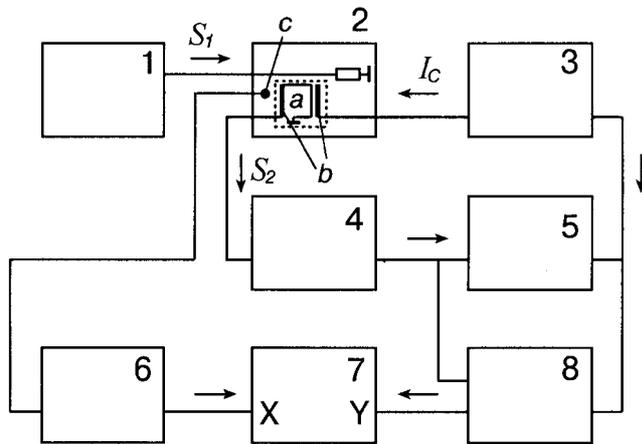
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Поступило в Редакцию 18 сентября 1997 г.

Проведены измерения эффективности экранирования переменного магнитного поля пленками YBCO вблизи сверхпроводящего перехода. В дециметровом диапазоне измерены характеристики коммутатора, действие которого основано на изменении экранирования переменного магнитного поля при сверхпроводящем переходе.

Использование сверхпроводящего перехода для коммутации СВЧ-сигналов подразумевает обычно устройство с тонкими сверхпроводящими перемычками, сопротивление которых в нормальном состоянии достаточно велико, чтобы обеспечить высокую величину параметра качества ключа и облегчить токовое управление коммутатором [1]. Сопротивление перемычек в нормальном состоянии тем не менее не превышает обычно  $1000 \Omega$ , что приводит к заметным,  $\geq 20\%$ , активным потерям. Это ограничивает величину коммутируемой мощности и соответственно область применения таких коммутаторов. Возможен, однако, иной способ применения сверхпроводникового перехода для коммутации сигналов, позволяющий в достаточно широком диапазоне частот практически устранить потери в ключе, — использование экранирующих свойств сверхпроводниковой пластины. В этом случае коэффициент переключения будет определяться различием в экранирующих свойствах в сверхпроводящем и в нормальном состояниях. В первом случае экранирование максимально, во втором — определяется проводимостью и частотой сигнала.

Сразу заметим, что экранирование нормально падающей на пластину сверхпроводника *электромагнитной волны* будет эффективным и в нормальном состоянии даже для очень тонких,  $d < 1000 \text{ \AA}$ , пленок.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 — генератор ВЧ, 2 — коммутирующее устройство, *a* — пленка сверхпроводника с токовыми контактами *b*, *c* — термопара, 3 — генератор импульсов тока управления, 4 — измерительный приемник, 5 — осциллограф, 6 — микровольтметр постоянного тока, 7 — двухкоординатный самописец, 8 — синхронный импульсный вольтметр.

Условием малого поглощения здесь является  $d \ll (2/z_0\sigma_0)$ , где  $z_0 = 377 \Omega$ ,  $\sigma_0$  — объемная проводимость образца на низких частотах. Для сверхпроводников это условие не может быть выполнено.

При экранировании *переменного магнитного поля*, направленного перпендикулярно к плоскости образца, ситуация иная.

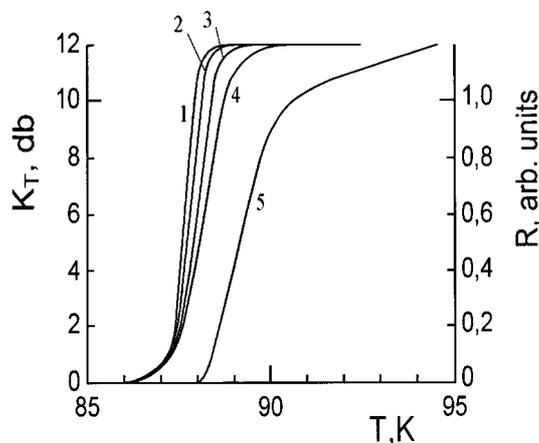
Пропускание магнитного поля образцом в нормальном состоянии определяется соотношением между толщиной образца и глубиной проникновения  $d_p = (2/\mu\mu_0\omega\sigma_0)^{1/2}$ . Это различие связано с граничными условиями на поверхности, где в последнем случае магнитное поле имеет пучность, а электрическое — узел [2]. Условие  $d \ll d_p$  приводит к неравенству  $f \ll (\pi d^2 z_0^2 \varepsilon_0)^{-1}$ , которое определяет частотный диапазон, где сверхпроводниковый образец в нормальном состоянии будет практически прозрачен для переменного магнитного поля. Для использованных нами пленок ВТСП оценка дает  $f \ll 1.7 \cdot 10^{13}$  Hz.

Изготовленный нами макет коммутатора представлял собой полосковую линию, снабженную петлей магнитной связи, которая экранирова-

лась пленкой ВТСП. Схематически коммутатор изображен на рис. 1, где приведена блок-схема измерительной установки. Конструктивно устройство выполнено в виде вставки в транспортный гелиевый сосуд Дьюара. Температура образца измерялась термопарой. Измерения коэффициента передачи  $K_T = (S_1/S_2)$  и коэффициента переключения  $K_s = (K_{TN}/K_{TS})$  проводились в диапазоне частот 0.01...300 МГц с помощью измерительных приемников SMV6.1, SMV8.5. Здесь  $S_1$  и  $S_2$  — сигналы на входе и выходе коммутирующего устройства,  $K_{TN}$  и  $K_{TS}$  — соответственно коэффициенты передачи в нормальном и сверхпроводящем состояниях пленки ВТСП. В качестве генератора сигналов использовался либо встроенный калибровочный генератор измерительного приемника, либо, когда были необходимы более высокие мощности, генератор типа Г4-37А. Схема, показанная на рис. 1, соответствует измерениям коэффициента переключения при управлении коммутатором импульсами тока. При измерениях коэффициента передачи сигнал с выхода измерительного приемника 4 подается непосредственно на вход  $Y$  самописца 7. Измерения коэффициента передачи в отсутствие образца  $K_0$  и при экранировании петли связи медной фольгой той же площади, что и образец ВТСП,  $K_{Cu}$  на частотах  $\geq 10$  МГц, на которых глубина проникновения меди существенно меньше толщины фольги, показали, что максимальная величина коэффициента переключения  $K_{S_{max}} = (K_0/K_{Cu})$  составляет 12 дБ. Это значение определяется особенностями конструкции и ограничивается главным образом "протечкой" магнитного поля под экраном через изолирующую подложку, на которой по разные ее стороны располагались образец и петля связи.

Нами исследовались пленки YBCO толщиной 1500 Å, изготовленные методом лазерного напыления [3] на подложках из титаната стронция. В использованном частотном диапазоне электрические свойства подложки практически не влияли на результаты — различия в величине коэффициента передачи при наличии образца в нормальном состоянии и при отсутствии образца не наблюдались.

На рис. 2 показаны температурные зависимости относительной величины коэффициента передачи устройства, измеренные на различных частотах. Абсолютная величина  $K_T$  возрастала с повышением частоты пропорционально ее квадрату и на частоте 100 МГц в открытом (нормальном) состоянии сверхпроводникового экрана равнялась (–30) дБ. На том же рисунке показана измеренная зависимость сопротивления пленки на постоянном токе.

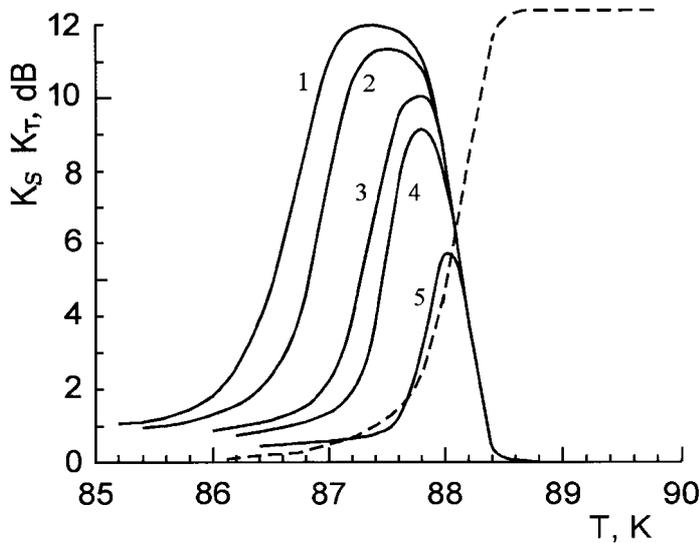


**Рис. 2.** Температурные зависимости коэффициента передачи на частотах: 1 — 1 MHz, 2 — 30 MHz, 3 — 100 MHz, 4 — 300 MHz, 5 — сопротивление пленки на постоянном токе.

Как видно на рисунке, по мере повышения частоты измерений начало экранирования, связанного с возникновением сверхпроводящей фазы при понижении температуры, смещается в сторону высоких температур. В то же время понижение сопротивления постоянному току по мере понижения температуры начинается при более высоких температурах, чем начинается проявление эффекта экранирования магнитного поля.

Наблюдаемые зависимости для пленок разных типов различаются видом изменений кривых экранирования по мере изменения частоты. Для пленок YBCO крутизна изменения пропускания магнитного поля возрастает с понижением частоты, тогда как для пленок и монокристаллов BiSrCaCuO вид зависимости почти не зависит от частоты — кривые смещаются по температуре без существенного изменения формы [4].

Проведенные нами измерения температурной зависимости электропроводности пленок на переменном токе не обнаружили заметных различий в кривых, полученных при разных частотах измерений, которые могли бы объяснить результаты по экранированию магнитного поля. Можно предположить поэтому, что наблюдаемый эффект частотного смещения связан с инерционностью поляризации переменным магнитным полем термовозбужденных вихрей, которые образуются в



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента переключения от температуры на частоте 100 МГц при величине тока управления: 1 — 1.6 А, 2 — 0.8 А, 3 — 0.4 А, 4 — 0.2 А, 5 — 0.08 А. Пунктиром показана температурная зависимость коэффициента передачи.

квазидвумерных сверхпроводниках [5] и связываются в пары с противоположными направлениями вращения при температуре несколько ниже температуры сверхпроводящего перехода.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента переключения, измеренные на частоте 100 МГц, для коммутатора с пленкой YBCO. Здесь же показана температурная зависимость коэффициента передачи на этой частоте. Сопоставление кривых показывает, что величина управляющего тока, необходимого для полного переключения, составляет 1.6 А при рабочей температуре коммутатора 87 К. Меньшие величины тока управления не обеспечивают полного переключения из-за конечной ширины сверхпроводящего перехода и весьма больших размеров пленки —  $10 \times 10$  мм. Пожертвовав скоростью переключения, можно, в принципе, понизить мощность управляющего сигнала, осуществляя управление температурой сверхпроводящего элемента.

Чтобы оценить возможности работы коммутатора при повышенных мощностях сигналов, была использована инверсная схема включения, при которой сигнал подавался в петлю связи и измерялся коэффициент передачи в основную линию. Это обеспечивало максимальный магнитный поток через сверхпроводниковую пленку и невысокую поглощаемую мощность в согласованной нагрузке, включенной в основной линии. Измерения, проведенные на частоте 400 МГц, не обнаружили существенного изменения температурной зависимости коэффициента передачи при повышении мощности сигнала до 2 Вт, за исключением небольшого, не превышающего 1 К, температурного сдвига кривой, что вызвано, очевидно, нагревом образца мощностью, рассеиваемой в нагрузке.

Полученные результаты показывают, что использование эффекта экранирования переменного магнитного поля сверхпроводниковыми пленками может представлять интерес для практических разработок сверхпроводниковых коммутаторов СВЧ-сигналов повышенной мощности.

Работа поддержана программой "Сверхпроводимость", проект № 96081.

## Список литературы

- [1] *Гайдуков М.М., Козырев А.Б., Осадчий В.Н., Врацких В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 18. С. 86–90.
- [2] *Гроссе П.* Свободные электроны в твердых телах. М.: Мир, 1982.
- [3] *Golovashkin A.I., Ekimov E.V., Krasnovobodtsev S.I. et al.* // Physica C. 1989. V. 162–164. P. 715–716.
- [4] *Бурбаев Т.М., Каложная Г.А., Курбатов В.А., Ноздрин В.С., Пенин Н.А.* // ФТТ. 1997. Т. 39. В. 2. С. 228–230.
- [5] *Ambegaokar V., Halperin B.I., Nelson D.R., Siggia E.D.* // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 40. N 12. P. 783–786.