

05

©1995 г.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ В ТОНКИХ ВТСП ПЛЕНКАХ С ТРАНСПОРТНЫМ ТОКОМ

В.Н.Скоков, В.П.Коверда, Н.М.Семенова

Институт теплофизики Уральского отделения РАН,
620219, Екатеринбург, Россия
(Поступило в Редакцию 11 мая 1994 г.)

Экспериментально исследованы автоколебания нормальной зоны в тонкопленочных Y-Ba-Cu-O мостиках, включенных в цепь источника постоянного и переменного напряжения последовательно с индуктивностью. При наличии переменной составляющей напряжения наблюдался эффект захвата собственных колебаний на вынуждающей частоте. С увеличением расстройки частот происходили сложные апериодические колебания. При непосредственном контакте с жидким азотом образцов, включенных в цепь с источником постоянного напряжения, обнаружены эффекты синхронизации собственных автоколебаний и колебаний, вызванных осцилляциями тепловода при пузырьковом кипении азота. С повышением напряжения источника наблюдался срыв периодических колебаний и переход к хаосу через перемежаемость.

Введение

При фазовом переходе сверхпроводник-нормальный проводник в присутствии транспортного тока может возникнуть состояние тепловой бистабильности. Бистабильный сверхпроводник является примером физического объекта, в котором благодаря нелинейным тепловым свойствам протекают различные процессы самоорганизации и неравновесные фазовые переходы [1]. В частности, при включении сверхпроводника во внешнюю электрическую цепь с индуктивностью могут возникнуть релаксационные автоколебания нормальной зоны. Автоколебания неоднократно наблюдались экспериментально в "классических" низкотемпературных сверхпроводниках (см., например, [2,3]). Обычно сверхпроводник включался в цепь источника постоянного тока и шунтировался низкоомным шунтом с индуктивностью. Анализ такой схемы посвящены и имеющиеся теоретические работы [1,4,5]. Согласно теоретическим моделям, возникновение автоколебаний нормальной зоны в сверхпроводниках связано с бифуркацией Андронова-Хопфа и рождением предельного цикла.

При периодических вынуждающих воздействиях на систему в силу нелинейности к ней неприменим принцип суперпозиции свободных и вынужденных колебаний. Вместо этого возникают сложные аперiodические движения, в частности переходы от колебаний типа предельного цикла к квазипериодическим колебаниям с несоизмеримыми частотами и переходы к хаосу. Исследование таких процессов является актуальной задачей современной нелинейной динамики [6,7]. Сверхпроводник, включенный во внешнюю цепь, является частным случаем нелинейных систем, в которых возможны самовозбуждающиеся колебания. Однако к настоящему времени нам неизвестны работы, посвященные изучению нелинейных колебательных процессов в сверхпроводниках, включенных во внешнюю цепь с вынуждающей силой. Вопрос важен также с практической точки зрения в связи с необходимостью понимания динамических процессов в сверхпроводниках, работающих на переменном токе.

Кроме внешних воздействий, вызванных гармонической составляющей транспортного тока, к усложнению динамики фазового перехода сверхпроводник-нормальный проводник приводят нелинейные тепловые и гидродинамические процессы в жидком охладителе, связанные со стохастичностью теплоотвода при кипении. В отличие от жидкого гелия жидкий азот, являющийся охладителем высокотемпературных сверхпроводников, характеризуется широкой областью пузырькового кипения и большой интенсивностью возмущений из-за более высоких значений теплоты испарения. Поэтому при непосредственном охлаждении ВТСП элементов жидким азотом вследствие осцилляций теплоотвода с поверхности, вызванных генерацией и отрывом паровых пузырьков, можно ожидать появления особенностей динамики автоколебаний нормальной зоны, даже если сверхпроводник включен в цепь источника постоянного тока.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию автоколебаний нормальной зоны в тонких ВТСП пленках с транспортным током, включенных в цепь с источником постоянного и переменного напряжения, а также взаимодействию таких автоколебаний с фазовым переходом жидкость-пар на поверхности пленки.

Методика эксперимента и результаты

Тонкие пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ получали методом магнетронного распыления на постоянном токе мишени стехиометрического состава без последующего высокотемпературного отжига [8,9]. В качестве подложек использовали монокристаллы $SrTiO_3$ и $ZrO_2 (Y_2O_3)$. Температуры сверхпроводящего перехода составляли $T_c = 87-88$ К, плотности критического тока $j_c(77\text{ К}) \simeq 10^6$ А/см² для лучших образцов. Мостики изготавливали методом химической литографии. Размеры образцов: толщина 0.3 мкм, ширина 0.7-1.0 мм, длина 1.0-7.0 мм.

Образцы включали в электрическую цепь последовательно с нагрузочным сопротивлением и индуктивностью (рис. 1). Измерения на постоянном токе проводили при фиксированном напряжении источника. Для изучения влияния гармонической составляющей тока в цепь параллельно образцу и нагрузочному сопротивлению подключали дополнительный источник синусоидальных колебаний. Эксперименты

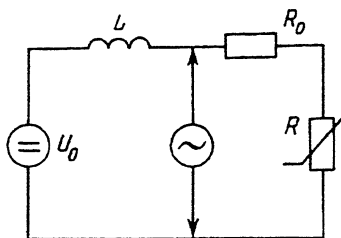


Рис. 1. Схема цепи с ВТСП пленкой.

проводили при охлаждении пленок как разреженным газом (без непосредственного контакта с жидким азотом), так и при погружении образцов в жидкий азот.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов регистрировали стандартным четырехконтактным способом на самописце Н-307. Осцилляции падения напряжения на потенциальных контактах и транспортного тока регистрировали на двух цифровых осциллографах С9-8, соединенных с персональным компьютером.

При пропускании транспортного тока выше критического образец переходил в резистивное состояние. В том случае, когда мощность джоулева тепловыделения превышает мощность теплоотвода, развивается тепловая неустойчивость, которая приводит к участкам ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением. На рис. 2 приведен участок стационарной ВАХ тонкопленочного ВТСП мостика в условиях развития тепловой неустойчивости (сплошная линия). ВАХ, представленная на рис. 2, получена в условиях фиксированного на-

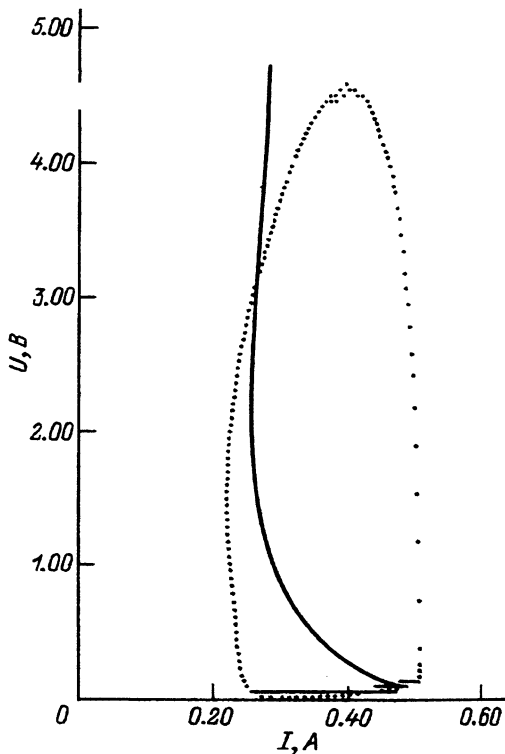


Рис. 2. Стационарная ВАХ тонкопленочного ВТСП мостика (сплошная линия) и фазовая траектория за один период автоколебаний (пунктир).

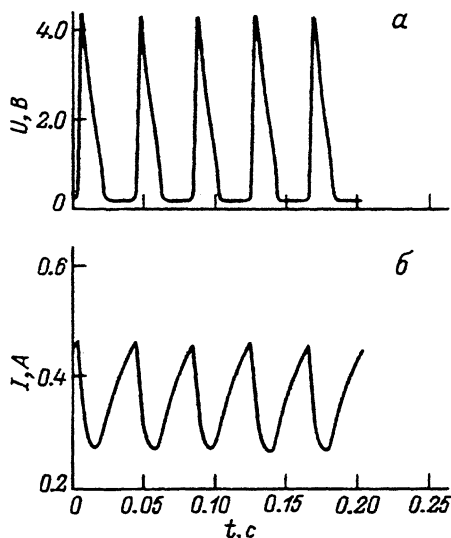


Рис. 3. Осциллограммы падения напряжения (а) и транспортного тока (б) при включении в цепь индуктивности $L = 180$ мГн.

пряжения источника при включении образца в цепь последовательно с нагрузочным сопротивлением без индуктивности. При включении в цепь индуктивности (рис. 1) на неустойчивом участке ВАХ возникали автоколебания. На рис. 3 приведены осциллограммы падения напряжения на потенциальных контактах и транспортного тока при подключении индуктивности $L = 180$ мГн. Пунктиром на рис. 2 показана фазовая траектория в плоскости $I-U$ за один период автоколебаний при фиксированном значении напряжения источника. На рис. 4 приведены зависимости периода колебаний от индуктивности и от посто-

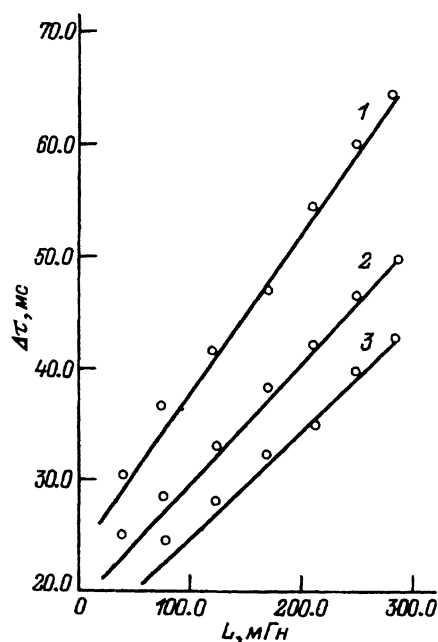


Рис. 4. Зависимости периода автоколебаний от индуктивности при различных значениях напряжения источника U_0 . 1 — $U_0 = 2.3$, 2 — 2.4, 3 — 2.5 В.

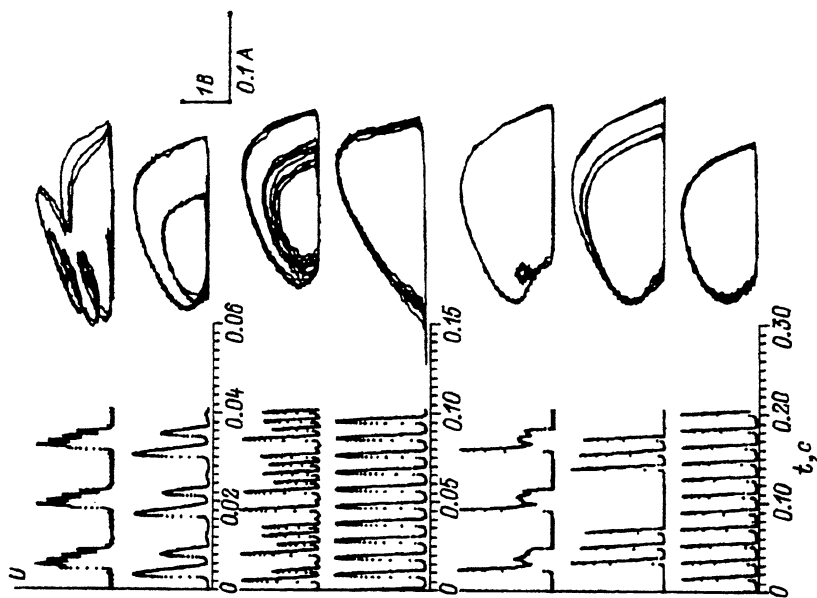


Рис. 6. Осциллограммы падения напряжения на потенциальных контактах и фазовые траектории в плоскости $I-U$ при различных значениях частоты внешних гармонических колебаний ω (увеличение ω снизу вверх).

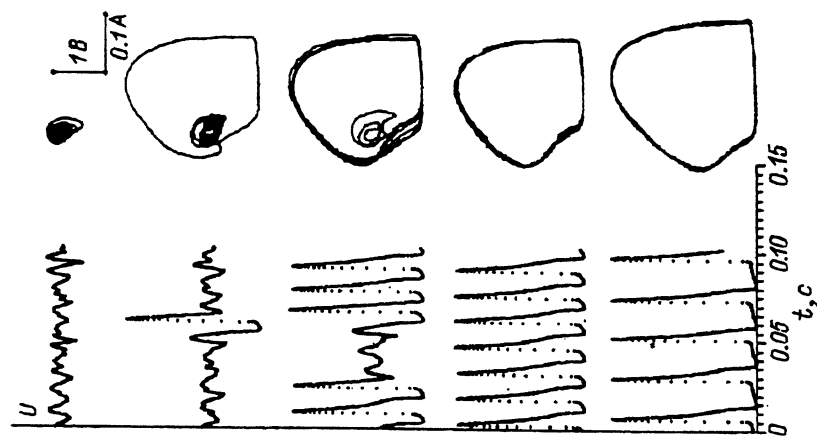


Рис. 5. Осциллограммы падения напряжения на потенциальных контактах и фазовые траектории в плоскости $I-U$ при различных значениях постоянного напряжения источника U_0 (увеличение U_0 снизу вверх).

янного напряжения источника. При некотором критическом значении напряжения источника автоколебания становились неустойчивыми и прекращались. В том случае, когда образец не находился в непосредственном контакте с жидким азотом, прекращение колебаний сопровождалось плавным уменьшением амплитуды.

При погружении исследуемых образцов непосредственно в жидкий азот джоулево тепловыделение вызывает фазовый переход жидкость-пар вблизи поверхности пленки. При этом наблюдались эффекты перегрева жидкого азота, пузырьковое кипение и переход к пленочному кипению (кризис кипения). Указанные теплогидродинамические процессы приводят к состоянию тепловой мультистабильности сверхпроводника с током. В режиме пузырькового кипения на ВАХ наблюдались стохастические осцилляции, вызванные генерацией и отрывом паровых пузырьков [9]. При включении образца в цепь постоянного тока с индуктивностью, охлаждаемого кипящим азотом, как и при охлаждении разреженным газом, возникали периодические релаксационные колебания нормальной зоны. Существенным моментом являлось то, что в режиме автоколебаний случайный процесс зарождения и отрыва паровых пузырьков упорядочивался, т.е. возникла синхронизация автоколебаний нормальной зоны с колебаниями теплоотода, вызванного кипением азота. Случайные теплогидродинамические осцилляции захватывались на частоте релаксационных автоколебаний. При увеличении напряжения источника происходил срыв периодических движений и наблюдалась картина перемежаемости периодических и хаотических колебаний. При дальнейшем увеличении напряжения источника в системе наблюдались лишь стохастические осцилляции, вызванные кипением. На рис. 5 приведена последовательность осциллограмм падения напряжения на потенциальных контактах при увеличении напряжения источника. Там же приведены фазовые траектории системы в координатах $I-U$.

Для исследования динамики автоколебаний при периодическом вынуждающем воздействии в схему подключался дополнительный генератор синусоидальных колебаний (рис. 1). Сначала с использованием только источника постоянного напряжения в системе вызывались автоколебания. Затем к постоянному напряжению добавлялась гармоническая составляющая. В том случае, когда вынуждающая частота была значительно ниже частоты собственных автоколебаний, влияние гармонической составляющей сводилось лишь к низкочастотной модуляции амплитуды собственных колебаний. При увеличении вынуждающей частоты наблюдались более сложные движения. Когда частота вынуждающих колебаний приближалась к собственной (но не совпадала), происходил захват собственных автоколебаний на вынуждающей частоте. При некотором пороговом значении частоты гармонического источника наблюдался срыв периодических колебаний и переход к более сложному аperiodическому движению. В том случае, когда вынуждающая частота значительно превосходила частоту собственных автоколебаний, как и при сильной расстройке частот. "снизу", возникали модулированные колебания. Наблюдаемая картина изображена на рис. 6. На этом же рисунке приведены фазовые траектории в плоскости $I-U$.

Обсуждение результатов

Возникновение автоколебаний в сверхпроводнике с S -образной ВАХ (в общем случае в бистабильном проводнике), включенном в цепь с индуктивностью, связано со сдвигом фаз тока и напряжении [1]. В случае, когда индуктивность $L = 0$, появление резистивного состояния в сверхпроводнике приводит к уменьшению тока, компенсирующему увеличение падения напряжения. Если $L = 0$, то возникающее изменение тока запаздывает по отношению к изменению падения напряжения. Динамика системы описывается уравнением теплопроводности и уравнением цепи

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \kappa \frac{\partial T}{\partial x} + j^2 \rho(T) - \alpha(T - T_0) \frac{P}{A}, \quad (1)$$

$$L \frac{dI}{dt} = U_0 - [R(T, I) + R_0] I, \quad (2)$$

где C и κ — соответственно теплоемкость и теплопроводность сверхпроводника, α — коэффициент теплоотдачи с единицы поверхности, P — параметр поперечного сечения, A — площадь сечения, ρ — удельное сопротивление, R — полное сопротивление сверхпроводника в резистивном состоянии, U_0 — напряжение источника, j — плотность тока, I — транспортный ток, T_0 — температура в объеме охладителя.

В двух предельных случаях — однородного перехода ($\partial T / \partial x = 0$) и автоволнового движения N - S -границы с постоянной скоростью уравнение теплопроводности (1) сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению и система (1), (2) определяет фазовый портрет точечной динамической системы. В том случае, когда отношение теплового и электромагнитного вре́мен релаксации $\beta = C A R_0 / \alpha P L < 1$, в динамической системе, описываемой уравнениями (1), (2), возможно возникновение автоколебаний [1,4,5]. Период таких автоколебаний описывается приближенной формулой [4]

$$\Delta \tau \simeq \left(\frac{L}{R_0} + \frac{L}{R_0 + R} \right) \ln \frac{U_0 / R_0 - I_p}{U_0 / R_0 - I_s}, \quad (3)$$

где I_p — минимальный ток распространения нормальной зоны (минимальный ток на участке ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением); I_s — ток, при котором начинает развиваться неустойчивость (максимальный ток на неустойчивом участке ВАХ).

Зависимости $\Delta \tau(L, U_0)$, рассчитанные по формуле (3), приведены на рис. 4 сплошными линиями.

При подключении дополнительного источника гармонических колебаний с частотой ω правая часть уравнения (2) становится явно зависящей от времени (из-за появления члена $U_1 \cos \omega t$), т.е. система (1), (2) становится неавтономной [6,7]. Обычно такого типа неавтономные системы сводятся к автономным введением новой динамической переменной $\vartheta \equiv t$. В этом случае для описания фазового портрета системы к двум уравнениям добавляется третье

$$d\vartheta/dt = \omega.$$

В динамических системах, описываемых тремя обыкновенными дифференциальными уравнениями, кроме периодических колебаний типа предельного цикла возможны более сложные движения, в частности хаотизация траекторий. Появление таких движений в сверхпроводнике, включенном в цепь с периодической вынуждающей силой, иллюстрирует рис. 6.

В том случае, когда сверхпроводник с током охлаждается кипящим азотом, мы также имеем дело с неавтономной динамической системой. В качестве дополнительной динамической переменной можно принять коэффициент теплоотдачи с поверхности $\alpha = \alpha(t)$. Зависимость $\alpha(t)$ является достаточно сложной и в общем случае должна определяться стохастическим уравнением, описывающим теплогидродинамические процессы при кипении жидкости на поверхности нагревателя. Принципиальным результатом настоящей работы является экспериментальное обнаружение взаимодействия различных нелинейных процессов, происходящих внутри ВТСП нагревателя и в объеме охладителя, приводящее к неравновесному фазовому переходу от периодических релаксационных колебаний типа предельного цикла к хаосу. Здесь, как и в случае экспериментов с гармонической вынуждающей силой, более сложные колебания захватываются более простыми.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследованы релаксационные автоколебания нормальной зоны в тонких ВТСП мостиках, включенных во внешнюю цепь с индуктивностью. Обнаружены эффекты синхронизации релаксационных колебаний с вынуждающими гармоническими колебаниями и с теплогидродинамическими осцилляциями, вызванными генерацией и отрывом паровых пузырьков с последующим переходом к хаотическому поведению. Указанные явления можно интерпретировать как неравновесные фазовые переходы в сложной нелинейной системе сверхпроводник с током, включенный во внешнюю цепь, — жидкий охладитель.

Авторы благодарны В.П.Скрипову за поддержку и интерес к работе, а также А.М.Искольдскому и Н.Б.Волкову за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Гуревич А.В., Минц Р.Г. // УФН. 1984. Т. 142. № 1. С. 61–98.
- [2] Еру И.И., Песковацкий С.А., Поладич А.В. // ФТТ. 1973. Т. 15. Вып. 7. С. 2228–2230.
- [3] Skocpol V.J., Beasley M.R., Tinkham M. // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 9. P. 4054–4066.
- [4] Беркович С.Я. // РЭ. 1965. Т. 10. № 4. С. 736–740.
- [5] Львовский Ю.М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 11. С. 2219–2228.
- [6] Мун Ф. Хаотические колебания. М.: Мир, 1990.
- [7] Шелль Э. Самоорганизация в полупроводниках. М.: Мир, 1991.
- [8] Скоков В.Н., Коверда В.П., Богданов Н.М. // СФХТ. 1992. Т. 5. № 1. С. 90–94.
- [9] Skokov V.N., Koverda V.P. // Cryogenics. 1993. Vol. 33. N 11. P. 1072–1076.