

05.4

©1993 г.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКОМ ОХЛАДИТЕЛЕ НА ТЕПЛОВУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКУ ВОЛН ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ТОНКИХ ВТСП ПЛЕНКАХ

В.Н.Смоков, В.П.Ковсрда

Тепловая неустойчивость сверхпроводников с током возникает в тех случаях, когда джоулево тепловыделение в возникших по той или иной причине резистивных или нормальных областях не компенсируется теплоотводом в охладитель. Возникновение неустойчивости и динамика автоволновых процессов переключения определяют устойчивость рабочих режимов работы сверхпроводящих устройств. Тепловое разрушение сверхпроводящего состояния может сопровождаться нелинейными процессами, происходящими в охладителе. Так, хорошо известно влияние кризиса кипения жидкого гелия на тепловую устойчивость низкотемпературных сверхпроводников [1,2]. Возникновение состояния тепловой мультистабильности, связанное с тепловым разрушением сверхпроводимости и кризисом кипения охладителя, и возможность существования при этом нескольких типов автоволн исследовалась недавно теоретически [3,4].

Особенностью жидкого азота-охладителя высокотемпературных сверхпроводников является существование широкой области перегретого метастабильного состояния. Согласно экспериментальным данным [5], достижимый перегрев жидкого азота при атмосферном давлении может достигать $\Delta T = 34$ К, что выше характерных температур, при которых может развиваться гидродинамический кризис кипения. Поэтому необходимо учитывать возможность перегрева азота вблизи теплоотдающей поверхности и соответственно теплосъема за счет однофазной конвекции.

Перегрев жидкого азота вблизи поверхности высокотемпературных сверхпроводников с током наблюдался экспериментально [6,7]. Коэффициент теплоотдачи при однофазном конвективном теплообмене с перегретой жидкостью ниже коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении. Поэтому возникновение перегретого состояния приводит к понижению тепловой устойчивости сверхпроводников с током. Переход от перегретого состояния к пузырьковому кипению может сопровождаться распространением вдоль сверхпроводника автоволн. При этом должна существовать обратная связь между фазовыми переходами в охладителе и внутренними процессами формирования и развития диссипативных структур в сверхпроводнике.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования теплового разрушения сверхпроводящего состояния тонких ВТСП пленок с током в условиях смены режима теплообмена в жидком азоте.

Тонкие пленки системы Y-Ba-Cu-O получали методом магнетронного распыления на постоянном токе без последующего высокотемпературного отжига [8]. Подложками служили монокристаллы SrTiO₃ и ZrO₂(Y). Температуры сверхпроводящего перехода пленок составляли 86–88 К, плотности критического тока лучших пленок ~ 10⁶ А/см² при 77 К и нулевом внешнем магнитном поле. На поверхности пленок химически вытравляли мостики шириной 0.2–1 и длиной 3–7 мм.

Эксперименты проводили при погружении пленок непосредственно в жидкий азот. На рис. 1 приведена одна из вольтамперных характеристик (ВАХ) тонкопленочного мостика, снятая на постоянном токе в режиме фиксации напряжения источника. На участке АВ вольтамперной характеристики возникает устойчивое резистивное состояние. В точке В возникает тепловая неустойчивость — появляется резистивный домен (в общем случае — распределенная диссипативная структура). Участок ВС с отрицательным дифференциальным сопротивлением соответствует росту резистивного домена. Жидкий азот при этом вблизи поверхности перегревается и теплообмен осуществляется за счет однофазной конвекции. В точке С на ВАХ происходит вскипание азота на “слабом” месте с повышенным тепловыделением (вскипание азота наблюдалось визуально). В результате вскипания теплоотдача от греющей поверхности улучшается, перегрев жидкого азота снимается, что соответствует скачкообразному переходу из точки С в точку D вдоль нагрузочной кривой электрической схемы. Участок ВС на ВАХ, соответствующий теплообмену образца с перегретым жидким азотом, качественно воспроизводился на всех исследованных образцах. При этом, естественно, момент вскипания перегретого азота носил случайный характер. Согласно проведенным оценкам, наблюдаемый максимальный перегрев составлял 10–12 К. После вскипания азота вид ВАХ на различных образцах мог отличаться от приведенного на рис. 1. Участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением иногда чередовались с устойчивыми участками. На “плохих” образцах с невысокими критическими параметрами в режиме пузырькового кипения неустойчивые участки вообще могли не наблюдаться. Генерация пара на двух или более “слабых” местах приводила к появлению новых ветвей ВАХ и скачкам с одной ветви на другую. При кипении азота на ВАХ наблюдались осцилляции, частота которых соответствовала частоте отрыва пузырьков. На некоторых образцах при увеличении нагрузки наблюдался переход от режима пузырькового кипения к пленочному (кризис кипения) [7].

Из рис. 1 видно, что перегрев жидкого азота вблизи поверхности сверхпроводника понижает тепловую устойчивость высокопроводящего (сверхпроводящего или слаборезистивного) состояния. Неустойчивые участки ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением реализуемы лишь в режиме фиксации напряжения источника. В режиме фиксации тока им соответствуют скачки падения напряжения. Для исследования динамики разрушения сверхпроводимости образец переводится в состояние, соответствующее точке В (см. рис. 1). После этого в режиме фиксации тока снималась временная зависимость падения напряжения на потенциальных контактах $U(t)$. Зависимость $U(t)$ на одном и

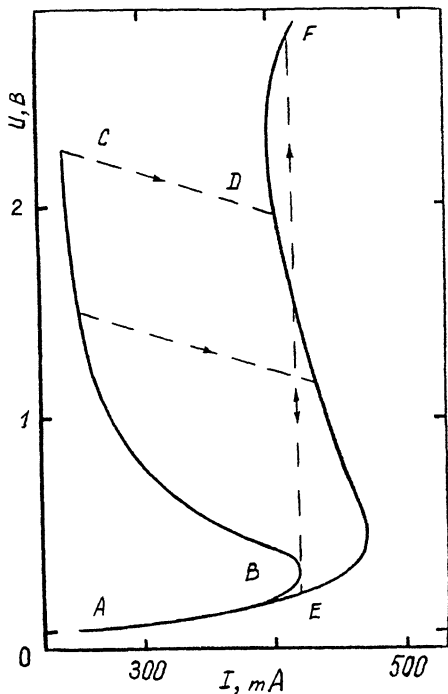


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика тонкопленочного мостика в жидком азоте

том же образце (ВАХ которого изображен на рис. 1) могла быть различной. Наблюдаемые зависимости $U(t)$ изображены на рис. 2. На кривой 1 (см. рис. 2) первоначальный рост $U(t)$ соответствует автоволновому процессу роста нормальной зоны в режиме, когда теплообмен осуществляется за счет однофазной конвекции с перегретым азотом. Максимум на кривой 1 соответствует моменту вскипания азота. При этом теплоотдача скачком возрастает и система возвращается в устойчивое состояние (точка E на ВАХ на рис. 1). На кривой 2 (см. рис. 2) моменту вскипания азота соответствует некоторое изменение наклона зависимости $U(t)$. При этом рост резистивного домена продолжается и образец целиком переходит в нормальное состояние (точка F на ВАХ на рис. 1).

Различие зависимости $U(t)$, изображенное кривыми 1 и 2 на рис. 2, объясняется тем, что вскипание перегретого азота является случайным актом и может происходить при различных перегревах. На рис. 3 схематично показаны температурные зависимости мощностей тепловыделения $Q(T, I)$ и теплоотвода $W(T)$. Зависимость $W_1(T)$ соответствует однофазному теплообмену с перегретым азотом. Зависимость $W_2(T)$ — теплообмену с азотом в режиме пузырькового кипения. Зависимость мощности тепловыделения $Q(T, I)$ на рис. 3 соответствует току, при котором в пленке появляется неустойчивый резистивный домен (точка B на ВАХ на рис. 1) и возникает автоволна, стремящаяся перевести систему в точку 3' (см. рис. 3). В процессе движения волны происходит вскипание и

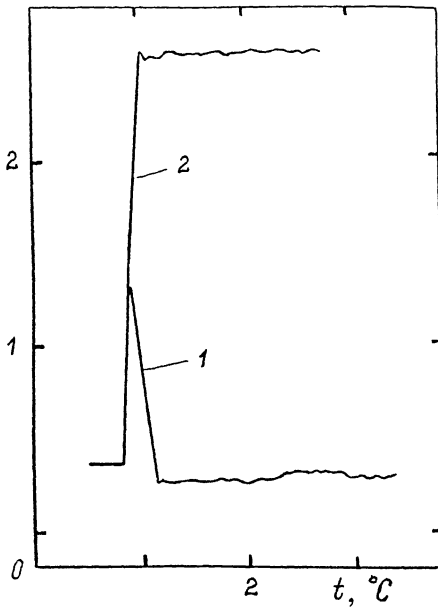


Рис. 2. Зависимость падения напряжения на потенциальных контактах от времени при разрушении сверхпроводящего состояния (режим фиксированного тока)

теплоотдача скачком возрастает. В том случае, когда в результате вскипания температура поверхности пленки оказывается ниже температуры неустойчивого равновесия домена с кипящим азотом (точка 2 на рис. 3), в системе зарождается встречная автоволна, переводящая образец в устойчивое высокопроводящее состояние (точка 1 на рис. 3). Если в результате вскипания температура поверхности оказывается выше температуры неустойчивого равновесия, то система переходит в точку 3 (см. рис. 3). При этом в момент вскипания изменяется скорость волны переключения (изменение наклона зависимости $U(t)$ на рис. 2). Изменение скорости связано с изменением движущей силы неравновесного фазового перехода. Следует отметить, что релаксация к нормальному состоянию в режиме пузырькового кипения очень часто сопровождается перегоранием тонкопленочного мостика, вплоть до механического разрушения подложки. Это создает большие экспериментальные трудности для исследования образцов при больших нагрузках, в частности, систематическое исследование перехода азота к кризису кипения [7].

Таким образом, существование перегретого состояния жидкого азота оказывает существенное влияние на устойчивость и динамику разрушения сверхпроводимости и приводит к увеличению возможных типов волн переключения.

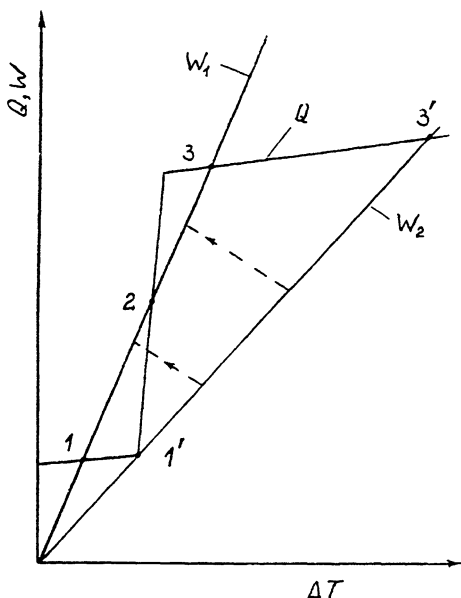


Рис. 3. Схематичное изображение температурных зависимостей мощностей тепловыделения и теплоотвода при тепловом разрушении сверхпроводящего состояния в жидком азоте.

Список литературы

- [1] Альтов В.А., Зенкевич В.Б., Кремлев М.Г., Сычев В.В. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. М.: Энергия, 1975. 328 с.
- [2] Гуревич А.В., Минц Р.Г. Тепловые автоволны в нормальных металлах и сверхпроводниках. М.: ИВТАН, 1987. 165 с.
- [3] Париж М.Б., Путов А.А. // ЖТФ. 1990. Т.60. Вып.3. С.22-30.
- [4] Vandos T.B. // Cryogenics. 1991. V.31. N 11. P.962-968.
- [5] Байдаков В.Г. // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. № 3(53). М.: ИВТАН. 1985. 93 с.
- [6] Игнатъева Т.А., Великодный А.Н., Тихоновский М.А. // Письма в ЖТФ. 1991. Т.17. Вып.2. С.61-65.
- [7] Скоков В.Н., Коверда В.П., Ивакин В.Б. // Письма в ЖТФ. 1992. Т.18. Вып.3. С.59-62.
- [8] Скоков В.Н., Коверда В.П., Богданов Н.М. // СФХТ. 1992. Т.5. Вып.1. С.90-94.

Институт теплофизики Уро РАН
Екатеринбург

Поступило в Редакцию
31 марта 1993 г.