

УДК 537.312.62

© 1991

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СВЧ ОТКЛИКА ПЛЕНОК ВТСП НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

В. Н. Богомолов, Ю. А. Кумзеров, С. В. Разумов, С. Г. Романов

Исследованы электрические свойства Bi -содержащих пленок ВТСП на диэлектрических подложках. Предложена интерпретация обнаруженной тонкой структуры вольт-амперных характеристик и отклика на СВЧ излучение в предположении, что подложка играет роль диэлектрического резонатора, связанного с джозефсоновской средой. По оценке, мощность джозефсоновского излучения пленки в резонирующей подложке составляет 10^{-6} Вт.

Появление высокотемпературных сверхпроводников вызвало новую волну работ по детектированию микроволнового излучения многосвязными джозефсоновскими средами (МДС) [1]. Этот интерес вызван, с одной стороны, возможностью практического использования СВЧ приборов на основе пленок ВТСП, а с другой — отсутствием адекватного физического описания процесса детектирования. Поэтому представляется важным рассмотрение физических аспектов взаимодействия СВЧ излучения с МДС.

В случае одиночных джозефсоновских контактов закономерности, определяющие их отклик на СВЧ излучение, хорошо изучены как теоретически, так и экспериментально [2]. Однако при переходе к неупорядоченным наборам джозефсоновских контактов происходит значительное изменение отклика, связанное, по-видимому, с перколяционным характером протекания тока через среду, усреднением отклика многих контактов и синхронизацией контактов как внешним, так и собственным излучением. В настоящее время получило наибольшее распространение представление, согласно которому каждый всплеск отклика МДС на внешний СВЧ сигнал есть аналог широкополосного детектирования одиночным переходом, а число таких всплесков определяется количеством групп слабых связей, имеющих приблизительно одинаковые параметры, сверхпроводящее состояние которых разрушается последовательно при увеличении тока через МДС [3]. Максимумы отклика в этом случае должны совпадать с максимумами дифференциального сопротивления. Однако такая однозначная зависимость наблюдается далеко не всегда.

В настоящей работе основное внимание было уделено исследованию тонкой структуры вольт-амперных характеристик (ВАХ) пленок ВТСП и изменений ее под действием внешнего СВЧ излучения. Проведено также сопоставление структуры ВАХ и особенностей отклика пленок на амплитудно-модулированный (АМ) СВЧ сигнал.

1. Объект и методика измерений

Все измерения были выполнены на Bi -содержащих пленках ВТСП состава 2212 ($T_c=85$ К, толщина ~ 1 мкм) и 4345 ($T_c=75$ К, толщина $10-30$ мкм), полученных на подложках из MgO методами лазерного

распыления и толсто пленочной технологии. В пленках присутствовали включения несверхпроводящей фазы $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$. Характерный размер гранул, по данным микроскопических измерений, был приблизительно равен толщине пленки.

С целью создания условий для лучшего протекания тока в измеряемом участке пленки, предотвращения перехода в резистивное состояние участков пленки между токовыми и потенциальными контактами и предоставления возможности управления величиной критического тока образца в центральной части пленки была сформирована перетяжка шириной w (рис. 1).

Данные по структуре ВАХ были получены на основе изучения зависимостей $I(U)$, измеренных четырехконтактным методом в режиме источника тока; первой и второй производных ВАХ $U_w(U)$ и $U_{2w}(U)$, измерен-

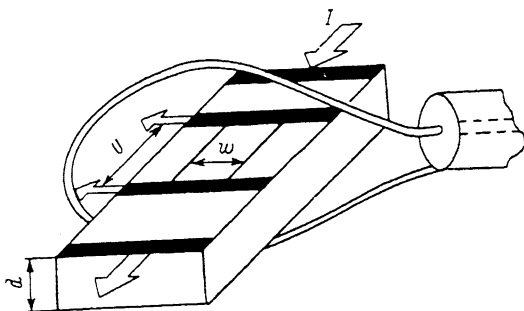


Рис. 1. Схема эксперимента.

ных по величине первой и второй гармоник напряжения, развиваемого на образце при модуляции тока смещения малым синусоидальным сигналом звуковой частоты. Внешнее электромагнитное поле частотой 0.05—10 ГГц прикладывалось посредством охватывающей образец петли, замыкающей коаксиальный тракт (рис. 1). Между образцом и генератором в тракт были включены коаксиальный вентиль, согласующий трансформатор и регулируемый аттенюатор.

Мощность СВЧ сигнала измерялась на выходе генератора, потери в тракте составляли около 10 дБ, а коэффициент связи петли возбуждения с образцом не превышал 10^{-2} — 10^{-3} . Амплитудная модуляция несущей частоты генератора производилась на частоте 8 кГц, глубина модуляции варьировалась от 10 до 70 %. Детекторный отклик образца был измерен на частоте модуляции СВЧ сигнала, напряжение отклика снималось с потенциальных (внутренних) контактов (тех же, что использовались при измерении производных ВАХ). Измерения были проведены при 4.2 К.

2. Структура ВАХ пленок ВТСП без облучения

ВАХ исследованных пленок ВТСП, как обычно, имели сильно сглаженную форму со значительным избыточным током, много большим критического. Типичные значения критического тока $I_c = 1$ —50 мА. Область существования резистивного состояния у образца с $I_c = 30$ мА простиралась до $I = 790$ мА. При этом токе наблюдается скачок напряжения с 50 до 740 мВ, соответствующий переходу пленки в нормальное состояние; избыточный ток для этого образца $I_{ex} = 625$ мА. Такие характеристики свидетельствуют о SNS типе слабых связей между составляющими пленки гранулами и экспоненциально большому разбросе параметров этих связей. Чтобы исключить влияние тепловых эффектов на результаты, измерения проводились на начальном участке ВАХ.

На ВАХ пленок имеются особенности типа ступеней напряжения (рис. 2, 1). Незаметные на статической ВАХ, эти ступени на зависимости

$U_{\omega}(U)$ дают последовательность хорошо выделенных максимумов (рис. 2, 2); кроме того, появляется еще ряд особенностей. Положение этих максимумов соответствует переходам через нулевую линию зависимости $U_{2\omega}(U)$ (рис. 2, 4).

Качественно зависимости $U_{2\omega}(U)$ представляют собой суперпозицию нескольких периодических по напряжению последовательностей всплесков (рис. 3, 1), причем всплески, следующие с большим периодом, имеют, как правило, большую амплитуду. Последовательное снижение критического тока за счет уменьшения ширины перетяжки у одной и той же

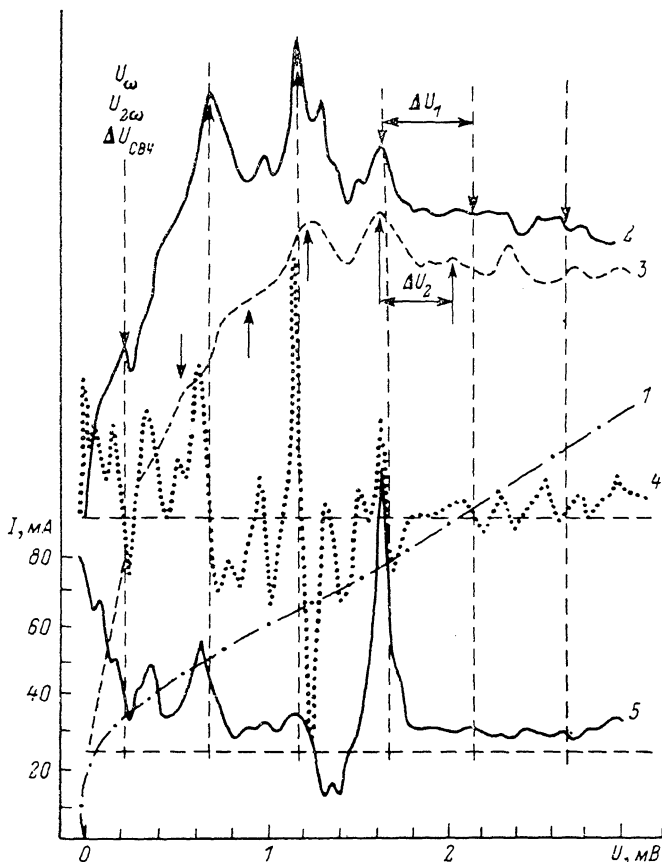


Рис. 2. Электрические характеристики пленки: ВАХ (1), $U_{\omega}(U) \sim \partial U / \partial I$ (2), $U_{\omega}(U)$ при воздействии внешнего СВЧ излучения с мощностью 1 Вт (3), $U_{2\omega}(U) \sim \partial^2 U / \partial I^2$ (4), отклик пленки на внешнее излучение с мощностью 1 мкВт (5).

пленки привело к увеличению периода повторения всплесков. (рис. 3, 1—3). Таким образом, имеется очевидная связь тонкой структуры ВАХ и характера протекания тока. Поскольку распределение тока в гранулярной среде контролируется имеющимися слабыми связями, то возрастание периода ΔU можно связать либо с увеличением количества джозефсоновских переходов N , либо с увеличением сопротивления переходов R_i в токонесящем пути (так как $\Delta U = INR_i$).

Тонкая структура ВАХ подобного типа наблюдается у всех образцов независимо от метода приготовления пленки; исключение составляют лишь образцы, нанесенные на подложки неправильной формы. В последнем случае зависимость $U_{2\omega}(U)$ имеет вид пологого максимума, расположенного в начальной части резистивного участка ВАХ.

В настоящее время известен ряд факторов, действие которых может привести к образованию особенностей на ВАХ джозефсоновской среды: переход из сверхпроводящего в нормальное состояние каких-либо состав-

ляющих МДС (токовые или тепловые эффекты), самодетектирование собственного джозефсоновского излучения, магнитные эффекты. Подвергая пленку ВТСП различным внешним воздействиям, оказывается возможным сузить круг рассматриваемых механизмов. Так, тонкая структура ВАХ оказалась устойчивой по отношению к ИК облучению мощностью около 10 мВт ($\lambda=800$ нм), а также к воздействию поперечного магнитного поля напряженностью до 150 Э, хотя при таком поле уже начинает изменяться структура начального участка ВАХ вследствие подавления критического тока. Положение особенностей на остальной части ВАХ остается неизменным. В то же время воздействие относительно слабого внешнего микроволнового поля мощностью, сравнимой с мощностью ИК излучения, при-

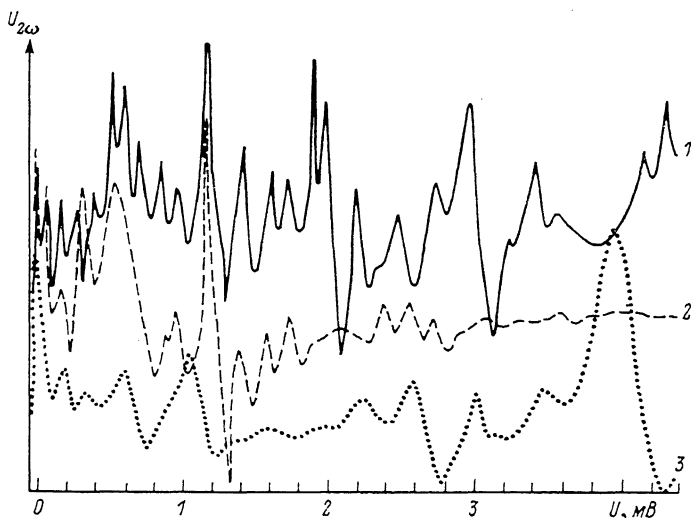


Рис. 3. Зависимость второй производной ВАХ от напряжения при уменьшении ширины перетяжки.

I_c , мА: 1 — 200, 2 — 20, 3 — 1.

водит к радикальной перестройке структуры ВАХ. Эти данные позволяют не принимать во внимание тепловые и магнитные процессы, ведущие к разрушению сверхпроводящего состояния, в качестве источника наблюдаемой структуры ВАХ, так как в противном случае действие ИК излучения или магнитного поля привело бы к сдвигу положения особенностей ВАХ в область меньших токов, что не наблюдается в эксперименте.

Естественно рассматривать нанесенную на подложку гранулярную пленку ВТСП как джозефсоновский генератор, сильно связанный с внешней резонансной электродинамической системой. Если такая пленка находится в резистивном состоянии, то на ней имеется напряжение смещения, U_0 , складывающееся из падения напряжения на отдельных контактах U_{0i} , а через слабые связи текут переменные токи $\tilde{I}_i = I_{ci} \sin(\omega_{ji}t)$, где ω_{ji} — джозефсоновская частота, связанная с напряжением U_{0i} на контакте $\omega_{ji} = 2eU_{0i}/\hbar$. При сканировании по ВАХ частота микроволнового излучения каждого контакта изменяется. В этом случае возможно возбуждение связанного с пленкой диэлектрического резонатора-подложки на собственных резонансных частотах ω_0 и соответственно увеличение напряженности электрического поля излучения данных частот, пропорциональное добротности резонатора. Тогда напряжение на МДС складывается из приложенного напряжения смещения U_0 и переменного напряжения, индуцируемого полем резонатора $U = A \cos \omega t$, под действием которого возникают токи с частотами $\omega = n\omega_j$, где n — целое [4].

Существенной чертой джозефсоновской системы в этом плане является возможность эффективной генерации гармоник с n до 10^3 [5]. Отличием многосвязной неупорядоченной среды от одиночного контакта является

синхронизация излучения отдельных контактов среды внешним по отношению к ним вынужденным излучением резонатора. Возникает самосогласованный процесс, определяющий мощность генерации: чем выше мощность, тем больше число N синхронизованных контактов, участвующих в генерации на данной частоте, но в то же время шире полоса генерации за счет большего разброса параметров синхронизованных контактов, в свою очередь полоса генерации ограничена добротностью резонатора.

Собственные частоты диэлектрического резонатора определяются его размерами и диэлектрической проницаемостью его материала, которая может быть анизотропной. Известно [6], что эффективность взаимодействия пленки с электромагнитной волной, возбуждаемой в резонаторе, обеспечивается тем, что электромагнитное поле имеет пучность на грани резонатора; следует учесть, что сама пленка сильно искажает распреде-

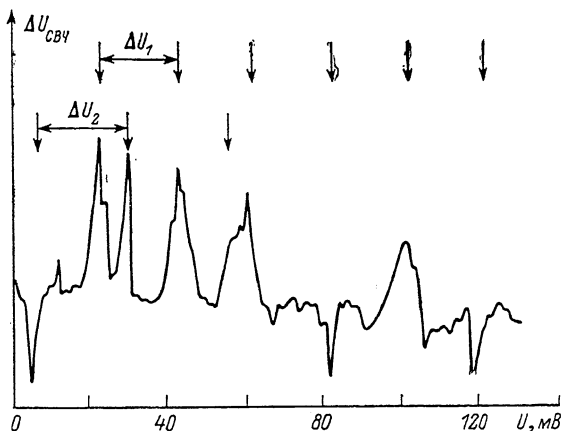


Рис. 4. Отклик пленки на облучение внешним СВЧ сигналом (периоды ΔU_1 и ΔU_2 соответствуют собственным колебаниям подложки).

ление поля, изменяя граничные условия на одной из граней. В качестве грубой оценки нижней собственной частоты прямоугольного призматического резонатора можно принять $\omega_0/2\pi = c/2d\sqrt{\epsilon}$ (c — скорость света в вакууме), что для образца (рис. 2) дает ≈ 25 ГГц (подложка из MgO имеет $\epsilon \approx 10$; в нашем случае $d \approx 1$ мм — наименьший размер резонатора). В общем случае собственные частоты резонатора распределены неэквидистантно, однако в их последовательности всегда можно выделить эквидистантный набор [4]. Рассмотрим генерацию излучения с этим набором.

Характерной чертой структуры ВАХ пленок ВТСП на призматических диэлектрических подложках (рис. 2) является наличие эквидистантных по напряжению особенностей. Неразличимые на исходной ВАХ, эти особенности проявляются в виде максимумов на фоне плавного хода первой производной и выделяются в чистом виде во второй производной. На рис. 2 положение особенностей с периодом 0.5 мВ отмечено вертикальными штриховыми линиями со стрелками. Таким образом, можно предположить, что вынужденное излучение в резонаторе синхронизует $N \approx 10$ последовательно включенных джозефсоновских переходов, что разумным образом согласуется с данными по структуре пленки (на длине перетяжки помещается около 30 гранул). На существенную роль подложки указывает связь числа наблюдаемых особенностей с формой подложки.

Помимо исследования производных, для анализа структуры ВАХ можно использовать и другой метод — измерение зависимости отклика МДС $\Delta U(U)$ на облучение внешним СВЧ сигналом предельно малой мощности, не вызывающим искажений ВАХ образца. В этом случае отклик только декорирует особенности невозмущенной ВАХ (рис. 4). В структуре этого отклика можно выделить 6 максимумов одной эквидистантной последовательности с периодом 20 мВ и 3 максимума с периодом 24 мВ, причем положение этих всплесков не изменяется при увеличении частоты

облучения, а их интенсивности зависят от резонансных условий в системе СВЧ тракт—образец. Увеличение мощности СВЧ облучения ведет к размыванию указанной структуры за счет неодинаковой зависимости максимумов от мощности и индуцирования новых особенностей.

3. Структура ВАХ пленок под облучением и ее взаимосвязь с откликом

Напряжение на МДС, связанной с подложкой-резонатором, под действием внешнего микроволнового излучения и при наличии транспортного тока складывается из постоянного напряжения смещения U_0 , переменного напряжения, индуцируемого внешним сигналом $A \cos \omega_c t$, и переменного напряжения, вызванного действием собственного джозефсоновского излу-

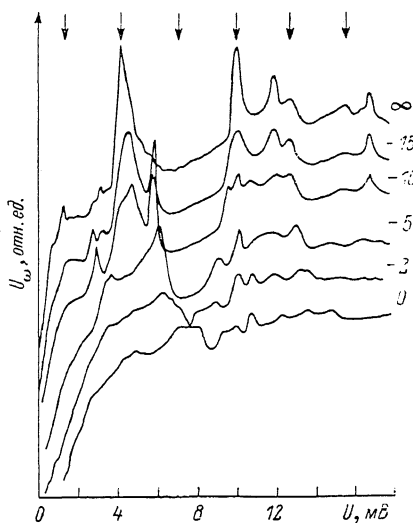


Рис. 5. Изменение структуры ВАХ в зависимости от мощности внешнего СВЧ облучения с частотой 1 ГГц (числа указывают ослабление в дБ, 0 дБ соответствует 1 Вт).

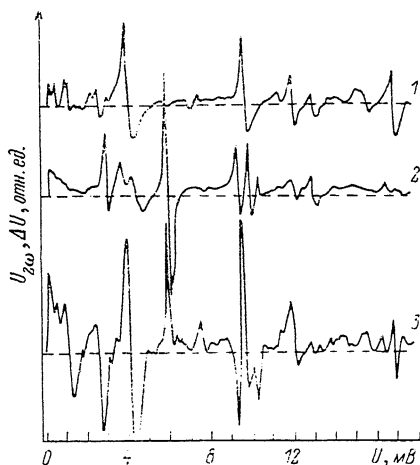


Рис. 6.

1 — $U_{2\omega}$ без облучения, 2 — $U_{2\omega}$ при воздействии СВЧ излучения с мощностью 1 мВт, 3 — отклик на СВЧ излучение с мощностью 1 мВт.

чения $v = U_0 + A \cos \omega_c t + B \cos \omega_j t$, причем последний член существует только на собственных резонансных частотах подложки. В первом приближении под действием этого напряжения в контактах МДС текут токи с частотами $\omega = n\omega_j + m\omega_c$; здесь мы пренебрегаем субгармоническими частотами. Принимая во внимание, что частота внешнего облучения $\omega_c/2\pi = 1$ ГГц много меньше частоты резонатора $\omega_0/2\pi = 25$ ГГц и много меньше частот джозефсоновской генерации контактов МДС при напряжении смещения, большем нескольких десятков микровольт, можно ожидать отсутствия на ВАХ особенностей, наведенных внешним сигналом согласно соотношению $U \sim m\omega_c$, и, таким образом, соответствия структуры ВАХ МДС под облучением и структуры невозмущенной ВАХ при облучении СВЧ полем, мощность которого недостаточна для подавления критического тока.

Детекторный отклик джозефсоновского контакта при таком соотношении частот должен соответствовать форме второй производной ВАХ $U_{2\omega}^{[2]}$.

Результаты измерений подтверждают эти предположения. Структура ВАХ (рис. 2) для образца с $I_{c0} = 22$ мА остается неизменной под действием излучения мощностью 1 мВт ($I_{c1}/I_{c0} = 1$). Воздействие излучения мощностью 1 Вт приводит к существенному, на первый взгляд, изменению структуры ВАХ (рис. 2, 3; $I_{c2}/I_{c0} = 0.41$), сглаживанию структуры,

в особенности на начальном участке, и изменению основного периода следования особенностей с 0.5 на 0.35 мВ. Однако оказывается, что новых особенностей не прибавилось, а произошло в основном перераспределение интенсивностей между существующими. Например, положение основных максимумов в $U_{\omega}(U)$ 0.72 и 1.25 мВ осталось неизменным.

Некоторые наиболее тонкие детали взаимодействия СВЧ излучения с пленкой ВТСП можно обнаружить при исследовании свойств образцов с меньшими критическими токами. Последовательность изменения структуры ВАХ в зависимости от мощности внешнего облучения представлена на рис. 5. Видно, что с увеличением мощности происходят замыкание структуры начального участка ВАХ, расщепление наиболее отчетливых максимумов $U_{\omega}(U)$ невозмущенной ВАХ (4.3, 10.05, 16.8 мВ), «возгорание» новых максимумов (2.8 и 5.8 мВ). С увеличением мощности облучения наблюдается сдвиг максимумов особенностей в сторону больших напряжений с одновременным уменьшением амплитуды особенностей, что означает увеличение частоты резонанса подложки и возрастание роли флуктуаций. Вероятное, на наш взгляд, объяснение возрастания резонансных частот состоит в том, что с ростом индуцированного в МДС тока уменьшается число сверхпроводящих контуров, что ведет к снижению вносимой в резонатор индуктивности гранулированной пленки. При облучении образца сигналом с большой мощностью происходит сглаживание тонкой структуры ВАХ за счет подавления сверхпроводимости в слабых связях наведенным током, в частности $I_c = 0$ при ослаблении P_c менее чем на 15 дБ. Как и в предыдущем случае, положение индуцированных особенностей произвольно, они всегда развиваются из имеющихся на невозмущенной ВАХ. Существенно, что особенности исходной ВАХ по-разному изменяются во внешнем поле; возможно, это связано с различным соотношением частот при преобразовании в системе пленка—подложка.

Помимо отмеченной зависимости структуры ВАХ от мощности внешнего облучения существует также и зависимость от его частоты: можно найти такую частоту сигнала, на которой индуцирование особенностей на ВАХ происходит при мощности, приблизительно на два порядка меньшей, чем при прочих. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики этого эффекта проявляется в полосе частот, составляющей доли процента от средней, т. е. наблюдается скорее всего резонанс K -й гармоники внешнего сигнала и собственной частоты подложки-резонатора. При этом индуцированная структура ВАХ (рис. 6, 2) полностью совпадает со структурой ВАХ (рис. 5).

Приведенные экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом: при облучении МДС происходит умножение частоты сигнала, в случае $\omega_c \ll \omega_0$ K -я гармоника попадает в резонансную полосу подложки, выделяется резонатором и, воздействуя на МДС, индуцирует на ВАХ особенность. В случае сигнала произвольной частоты высокая мощность необходима для создания в пленке токов с более высокой спектральной плотностью гармоник.

Представляет интерес возможность косвенно оценить мощность вынужденных СВЧ колебаний, возбуждаемых джоульсоновской генерацией пленки в подложке. Предполагая, что одинаковые по интенсивности резонансно индуцированные и исходные особенности ВАХ вызваны детектированием одинаковых по мощности СВЧ колебаний в подложке, получаем с учетом величины потерь в СВЧ тракте и коэффициента связи тракта с образцом величину мощности вынужденных колебаний в подложке-резонаторе на уровне 1 мкВт. Эта величина соответствует предельной мощности колебаний, которые могут возбудить в резонаторе синхронно работающие переходы с соответствующими эксперименту параметрами.

Отклик МДС на СВЧ сигнал $\Delta U(U)$ в целом хорошо соответствует структуре ВАХ $U_{2\omega}(U)$, как и должно быть при малой частоте внешнего сигнала [2] $\omega_c \ll \omega_0$ (рис. 2, кривая 5; рис. 6, кривая 3), хотя не все, в том числе и ярко выраженные, особенности ВАХ находят свое отражение в отклике. В частности, полностью соответствуют интенсивности

разнополярных выбросов второй производной всплески отклика. Это касается индуцированных особенностей, для которых отклик скорее соответствует виду первой производной ВАХ (рис. 5, 6). По-видимому, описание СВЧ отклика МДС должно отличаться от описания отклика отдельного контакта.

Таким образом, мы считаем, что ВАХ пленки ВТСП, нанесенной на диэлектрическую подложку правильной геометрической формы, имеет тонкую структуру, определяемую самодетектированием микроволнового излучения джозефсоновской среды, сильно связанной с внешним резонатором. Взаимодействие ВТСП с внешним СВЧ излучением в этом случае происходит опосредованно, на частотах, совпадающих с собственными частотами подложки.

Список литературы

- [1] Вережкин А. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 22. С. 2075—2077.
- [2] Лихарев К. К. // Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985.
- [3] Куликов В. А. и др. // Тез. докл. II Всес. конф. по высокотемпературной сверхпроводимости. Киев, 1989. Т. 1. С. 247—248.
- [4] Беленов Э. М., Веденеев С. Н., Усков А. В. // Тр. ФИАН. 1983. Т. 148. С. 192—219.
- [5] Blaney T. G., Knight D. J. E. // J. Phys. D. 1974. V. 7. № 6. P. 1882—1893.
- [6] Симонов Н. А. // РЭ. 1987. Т. 32. № 9. С. 1938—1946.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
13 марта 1990 г.
В окончательной редакции
12 июня 1990 г.