

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ СВОЙСТВА МОСТИКОВЫХ КОНТАКТОВ ИЗ V_3Si

А. Н. Лыков

УДК 537.312.62

Изучался характер взаимодействия мостиковых контактов из V_3Si с электромагнитным излучением. На вольт-амперных характеристиках (ВАХ) контактов наблюдались характерные ступеньки тока. Показано, что вихревая модель хорошо описывает процессы в таких мостиках.

Сверхпроводящие интерметаллические соединения со структурой решетки типа Al_5 , к числу которых принадлежит и V_3Si , обладают рядом интересных свойств. Применительно к нестационарным свойствам важное значение имеют большие величины энергетических щелей в спектре элементарных возбуждений этих сверхпроводников. Так у V_3Si величина щели равна 2,5 мэВ /1/ (для сравнения ширина щели Nb равна 1,55 мэВ). Наша работа посвящена изучению вольт-амперных характеристик (ВАХ) мостиковых контактов из пленок V_3Si при воздействии на эти контакты электромагнитного излучения. Мостиковыми контактами называют структуры типа сверхпроводник - сужение микронных размеров - сверхпроводник.

Пленки готовились в вакууме $1 \pm 2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. методом электронно-лучевого распыления предварительно приготовленной капли из сплава ванадия с кремнием /2/. В качестве подложек использовались полированные пластины из рубина или сапфира. Толщина приготовленных пленок составляла $0,4 \pm 0,6$ мкм. Критическая температура T_c по началу перехода достигала 17 К при ширине перехода ~ 1 К. Для изготовления мостиков использовался метод двойного скрайбирования (процарапывания) /3/. Таким методом были приготовлены мостики шириной от 1 до 30 мкм и длиной 0,5-1 мкм. Измерения обычно проводились на мостиках шириной 10 ± 30 мкм, так как более узкие мостики имели заметно меньшее T_c .

ВАХ измерялись в интервале температур $I \pm 20,3$ К. В качестве хладагента использовался жидкий водород. При этом образец помещался внутри медного стакана вблизи петли, соединявшейся с коаксиальным кабелем, по которому подводилось СВЧ излучение частотой от 0,4 ГГц до 7,6 ГГц.

В отсутствие излучения ВАХ мостиков из V_3Si имели параболический вид, наблюдавшийся ранее при изучении мостиков из $Nb_3Sn/3/$. На рис. 1а приведен пример ВАХ (верхняя кривая) типичного контакта из V_3Si при температуре 14 К. Численный анализ ВАХ показал, что они с точностью в несколько процентов описываются формулой

$$I = \sqrt{V/C + I_C^2} + V/R_H. \quad (1)$$

Здесь I — ток через мостик, V — напряжение на нем, R_H — сопротивление контакта в нормальном состоянии, C — некоторый размерный коэффициент, зависящий от температуры, I_C — критический ток мостика.

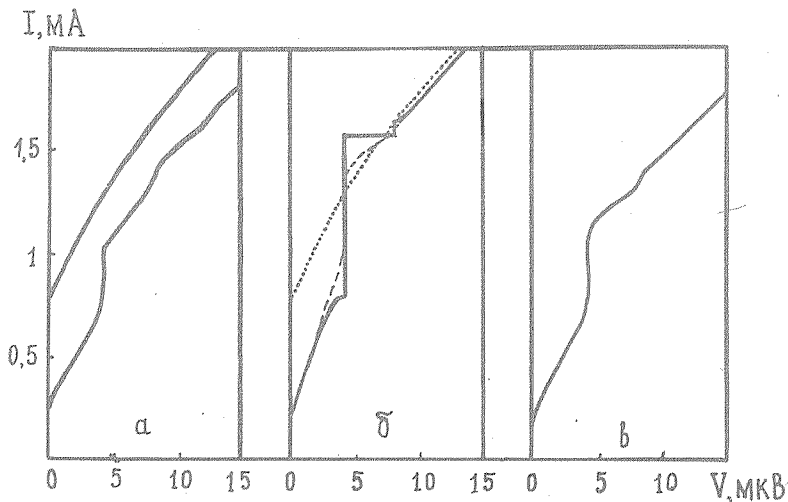
В поле СВЧ на ВАХ мостиков наблюдались ступеньки тока при напряжениях, определяемых Джозефсоновским соотношением $V_n = n\hbar\omega/2e$, где \hbar — постоянная Планка, e — заряд электрона, ω — частота внешнего электромагнитного поля и n — целое число (номер ступеньки). На рис. 1а (нижняя кривая) приведен пример подобной характеристики. На рисунке можно заметить три ступеньки тока, положение которых по напряжению определяется этим соотношением, причем первая наиболее ярко выражена. Подобные особенности на ВАХ можно было заметить при помещении контактов в электромагнитное поле с частотами от 0,5 ГГц до 5 ГГц. Обращает на себя внимание размытый характер ступенек.

Как показано в работах /3,4/, ВАХ мостиковых контактов из различных высокотемпературных соединений хорошо описываются вихревой моделью /5/. В рамках этой модели ВАХ в окрестности напряжения $\hbar\omega/2e$ описывается соотношением

$$I = I(\hbar\omega/2e) + I_\omega \sin \delta_m = -\frac{\bar{V}}{\omega} \frac{\partial I}{\partial V} \frac{\partial \delta_m}{\partial t}, \quad (2)$$

где $I(\hbar\omega/2e)$ — значение тока, соответствующее напряжению $\hbar\omega/2e$ в отсутствие переменного поля, I_ω — амплитуда тока, индуцируемого в контакте электромагнитным полем, δ_m — фаза тока в мо-

мент рождения n -го вихря. Уравнение (2) аналогично уравнению для разности фаз параметра порядка φ , описывающему в резистивной модели [6] поведение контакта, на который не действует электромагнитное поле



Р и с. 1. а - Пример экспериментальных ВАХ контакта без воздействия СВЧ (верхняя кривая) и под действием излучения с частотой 1,95 ГГц, $T = 14$ К, б - Кривая, показанная точками, - ВАХ, рассчитанная по формуле $V = c(I^2 - I_0^2)$, сплошная линия - ВАХ, рассчитанная с помощью формул (4) и (5). Пунктиром показан вид той же ВАХ с учетом флуктуаций, эффективная величина тока флуктуаций полагалась равной 100 мкА. в - ВАХ, рассчитанная с учетом нагрева мостика СВЧ излучением

$$I - I_C \sin \varphi = \frac{\hbar}{2eR_H} \frac{\partial \varphi}{\partial t}. \quad (3)$$

Пользуясь результатами резистивной модели, получаем, что уравнение (2) приводит к существованию при $v = \hbar\omega/2e$ ступеньки тока амплитудой равной $2I_0$, форма которой описывается гиперболой. Кроме того, пользуясь методами анализа влияния флуктуаций на решение уравнения (3), а следовательно и (2) [6], нетрудно

вычислить вид ступеньки тока в рамках вихревой модели с учетом флуктуаций.

Чтобы объяснить появление ступенек тока при напряжении $V = \hbar\omega/e$ и $3\hbar\omega/2e$, необходимо учитывать нелинейность отклика вихрей в контакте на воздействие переменного электромагнитного поля. Эта нелинейность возникает из-за нелинейного вида реальных ВАХ. Наиболее просто провести вычисление, пренебрегая вторым слагаемым в формуле (1). Это можно сделать, поскольку обычно $R_H \gg CI$. В этом приближении учет нелинейности приводит к появлению гармоники тока с частотой 2ω и амплитудой

$$\begin{aligned} A_{2\omega} &= \frac{\pi C}{2\omega} \frac{\partial I}{\partial V} \int_{-\pi/2\omega}^{\pi/2\omega} \left[(I + I_\omega \sin \omega t)^2 - I_C^2 \right] \cos 2\omega t \, dt = \\ &= -(I_\omega^2/4)(\hbar\omega/Ce + I_C^2)^{-1/2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Наличие этой гармоники тока естественно объясняет образование ступеньки тока при напряжении $\hbar\omega/e$ с высотой $2|A_{2\omega}|$. Кроме того, нелинейность ВАХ приводит к детектированию высокочастотного тока. В результате зависимость среднего напряжения от тока смещения без учета ступенек дается выражением

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{C}{\omega} \left\{ \left[2II_\omega + (I_\omega^2/2) \arcsin \left(\frac{I_C - I}{I_\omega} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{I_C - I}{I_\omega} \right)^2 \right]^{1/2} + \right. \\ &+ \left. \left(\frac{I_\omega^2}{2} + I^2 - I_C^2 \right) \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{I_C - I}{I_\omega} \right) \right] \right\} \text{ при } \left| \frac{I_C - I}{I_\omega} \right| < 1, \quad (5) \\ \bar{V} &= C \left(I^2 - I_C^2 + \frac{I_\omega^2}{2} \right) \text{ при } \left(\frac{I - I_C}{I_\omega} \right) \geq 1. \end{aligned}$$

На рис. 1б сплошной линией показана ВАХ, построенная на основе формул (4) и (5). При расчете параметр C подбирался таким образом, чтобы наблюдалось наилучшее согласие ВАХ, определяемой формулой $V = C(I^2 - I_C^2)$ (на рис. 1б она показана точками), с экспериментальной ВАХ (рис. 1а), I_ω определялась из условия равенства критических токов на рассчитанной и экспериментальной ВАХ. Учет флуктуаций по методу, описанному выше, приводит к размыванию ступенек тока (рис. 1б — пунктирная кривая). Как известно [6], минимальная частота, при которой на ВАХ контактов еще можно наблюдать

ступеньки тока, определяется шумовым напряжением. Исходя из этого соображения, ток флуктуаций полагался равным шумовому напряжению, деленному на среднее дифференциальное сопротивление контакта. Согласно с экспериментальной ВАХ еще более увеличивается при учете некоторого нагрева мостика СВЧ излучением (рис. 1в), при этом нами предполагалось, что величина перегрева растет пропорционально напряжению на контакте при изменении напряжения от 0 до $\hbar\omega/2e$, а далее не меняется с увеличением напряжения. Максимальная величина перегрева полагалась равной 0,2 К.

Результаты этой работы показывают, что нестационарные процессы в мостиковых контактах из высокотемпературных сверхпроводящих соединений хорошо описываются в рамках вихревой модели. Кроме того, предложенный нами метод позволяет оценить шумные свойства таких мостиков.

В заключение благодарю А. И. Головашкина и С. П. Прищепу за помощь при проведении работы и за обсуждение полученных результатов.

Поступила в редакцию
5 декабря 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. D. F. Moore, J. M. Rowell, M. R. Beasley, Solid. St. Comm., 20, 305 (1976).
2. Л. Т. Колдаева, Г. П. Мотулевич, А. А. Шубин, Краткие сообщения по физике ФИАН № 3, 36 (1977).
3. А. И. Головашкин, А. Н. Лыков, ЖЭТФ, 74, 214 (1978).
4. А. И. Головашкин, А. Н. Лыков, Е. В. Печень, Краткие сообщения по физике ФИАН № II, 6 (1978).
5. Л. Г. Асламазов, А. И. Ларкин, ЖЭТФ, 68, 766 (1975).
6. К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих, Системы с джозефсоновскими контактами, МГУ, М., 1978 г.