

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР Nb-ОКИСЬ Nb – Pb ПРИ ПОМОЩИ СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Е.М.Голямина, А.М.Трояновский

С помощью сканирующего туннельного микроскопа исследована поверхность пленок ниобия, использовавшихся ранее для создания на их основе пленочных структур ниобий – окись ниобия – свинец. Полученные результаты хорошо согласуются с наблюдавшимися свойствами этих структур, содержащих джозефсоновские и туннельные контакты.

В последние годы большое количество работ было посвящено исследованию нелинейных свойств сверхпроводящих пленочных структур Nb – окись Nb – Pb. Изучались их туннельные и джозефсоновские характеристики, а также возможность применения их в качестве нелинейных элементов в ИК области спектра ¹⁻³. В зависимости от способа приготовления эти структуры имели различные вольт-амперные характеристики: одни были типично туннельными, а другие – характерными для сверхпроводящих микромостиков или точечных контактов. В работах ^{1,2} было сделано предположение, что полученные структуры на основе Nb представляют собой туннельные переходы с микромостиками, пронизывающими слой окисла. Существование микромостиков подтверждается следующими фактами. Во-первых, такие переходы обладают необычно большими критическими джозефсоновскими токами (≥ 10 mA). Во-вторых, в работе ² при измерениях в магнитном поле было установлено, что сверхпроводящий критический ток через переход представляет собой сумму двух токов: один осциллирует в магнитном поле и является чисто туннельным, а второй – медленно убывающий с ростом магнитного поля – является током через микромостики.

Представляло большой интерес исследовать поверхность самой ниобиевой пленки с тем, чтобы понять, каким образом микромостики возникают. Мы воспользовались для этой цели сканирующим туннельным микроскопом, созданным в Институте физических проблем АН СССР ⁴. Были получены профили поверхности ниобиевых пленок толщиной около 0,8 мкм, нанесенных на сапфировые и рубиновые подложки. Перед измерениями какой-либо обработки поверхности пленок не производилось, измерения проводились при давлении $0,01 \div 0,1$ мм рт. ст. Размер области сканирования микроскопа $\sim 10 \times 10$ мкм². В различных местах этой области записывались профили участков с размерами от 40×40 до 15000×15000 Å². Для количественной оценки качества поверхности, методом наименьших квадратов определялась оптимальная плоскость и вычислялось среднеквадратичное отклонение поверхности от этой плоскости; результаты приведены в таблице.

Участок, Å ²	Отклонение, Å	
	20° С	850° С
800 × 800	8,8	18,5
800 × 800	7,8	—
1500 × 1500	7,5	—
3000 × 3000	11,3	23
3000 × 3000	—	44
11000 × 11000	15,9	—

На рис. 1, а показан один из полученных профилей, на рис. 1, б показана запись потенциального рельефа участка, соответствующего рис. 1, а и характеризующего локальную работу выхода ϕ (величину потенциального барьера) нормальных электронов с поверхности плен-

ки. Запись получена посредством модуляции расстояния от сканирующего острия до пленки. Слой окисла проявляется в виде шума на поверхности и характеризуется более низкими значениями φ . Среднее значение φ было довольно высоким ~ 2 эВ, неоднородности составляли не более 20% от этой величины, поэтому изменение не может существенно исказить полученные профили поверхности (которые в действительности представляют собой запись поверхности посюстороннего туннельного тока). Из рисунка видно, что на пленке имеются выступы — кристаллиты высотой $40 \div 50$ Å, имеющие более высокое значение φ . Низкий уровень шума на поверхности выступа говорит о тонком слое окисла, или, возможно, о его отсутствии. Такие кристаллиты образуются при напылении Nb на горячую подложку, имеющую температуру 850° С и, по-видимому, могут служить микромостиками в слое окисла.

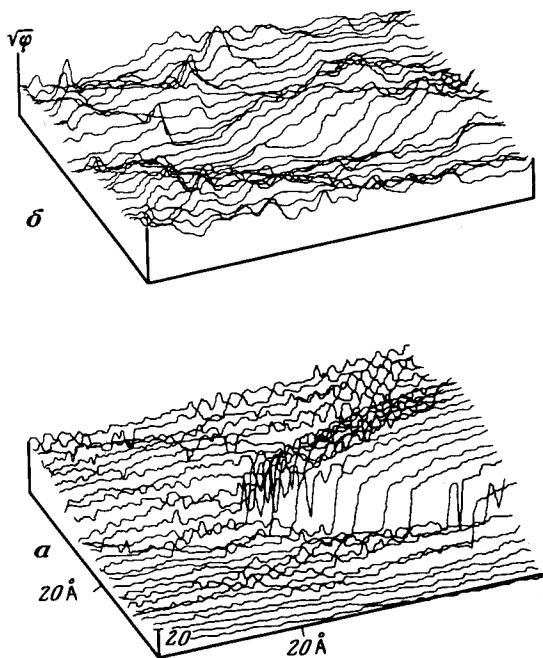


Рис. 1

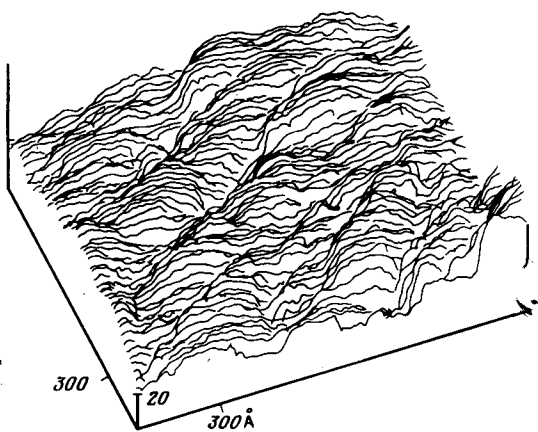


Рис. 2

Рис. 1. *a* — Профиль поверхности окисленной пленки Nb на участке с размерами $\sim 50 \times 50$ Å; *б* — потенциальный рельеф $\varphi^{1/2}$ на том же участке поверхности

Рис. 2. Профиль поверхности пленки Nb, напыленной без подогрева подложки; видны следы шлифовки подложки

Заметим, что так как расстояние от иглы СТМ до поверхности металлической пленки (в ходе описываемых опытов) около 10 Å, то и толщина слоя окисла на поверхности не должна превышать 10 Å. Отсюда следует оценка для среднего значения диэлектрической проницаемости ϵ внутри туннельных переходов на основе ниобия. Так как по данным работы¹ отношение ϵ/d (d — толщина диэлектрического слоя в переходе) меняется в пределах $(0,13 \div 0,64) \cdot 10^8$ см⁻¹, то среднее значение ϵ оказывается порядка нескольких единиц.

На профилях ниобиевых пленок, напыленных без подогрева подложки, упомянутые кристаллиты не наблюдались. Возникновение микромостиков в туннельных контактах на основе таких пленок, по-видимому, аморфной структуры, маловероятно.

При записи профилей поверхности пленок в меньшем масштабе, наблюдались плавные неровности поверхности, которые можно отнести на счет профиля подложки. На рис. 2 четко видны следы шлифовки подложки, где они выглядят, как ряд параллельных канавок, расположенных на расстоянии около 300 Å одна от другой.

Из сказанного следует, что наблюдаемая структура поверхности пленок ниобия, напыляемых на горячую подложку действительно создает основу для возникновения туннельных переходов с множеством микромостиков, пронизывающих слой окисла. Количество мостиков можно оценить исходя из следующих соображений. Средняя плотность критического тока J_c в структурах Nb — окись Nb — Pb по данным работы ¹ лежит в пределах от 1 до 10^2 А/см². Критическая плотность тока j_c для отдельного мостика из ниобия имеет порядок величины 10^5 А/см². Зная примерно размеры туннельного перехода ($S \sim 10^{-4}$ см²) и пренебрегая туннельным критическим током по сравнению с током через мостики, получим оценку для площади всех мостиков в переходе:

$$S = \frac{J_c}{j_c} S \approx 10^{-9} \div 10^{-7} \text{ см}^2.$$

Исходя из наблюдаемых размеров кристаллитов, площадь которых оказывалась порядка 10^{-13} см², получим оценку для полного числа микромостиков в туннельном переходе:

$$N \sim \frac{s}{10^{-13}} \sim 10^4 \div 10^6.$$

В среднем в переходе оказывается один мостик на площади $10^3 \text{ \AA} \times 10^3 \text{ \AA}$ или реже, что вполне сопоставимо с наблюдаемым рельефом поверхности (рис. 1), особенно если принять во внимание возможность того, что не все микрокристаллические выступы на поверхности могут образовывать микромостики.

Авторы благодарны А.С.Боровику-Романову за интерес к работе, М.С.Хайкину за предоставленную возможность использования туннельного сканирующего микроскопа, Ч.В.Копецкому за содействие работе, С.И.Веденеву и В.С.Эдельману за помощь и полезные дискуссии.

Литература

1. Веденев С.И., Голямина Е.М. ЖТФ, 1982, 52, 969.
2. Веденев С.И., Голямина Е.М., Погребняков А.В. Препринт ФИАН № 180, с. 52, 1980.
3. Беленов Э.М., Веденев С.И., Голямина Е.М. Квантовая электроника, 1981, 8, 211.
4. Хайкин М.С., Трояновский А.М. Письма в ЖТФ, 1985, 11, 1236.

Физический институт
Академии наук СССР

Институт Проблем Технологии Микроэлектроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
5 августа 1986 г.