

05.4; 06

© 1992

ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ (110) МОНОКРИСТАЛЛА НИОБИЯ С БАРЬЕРОМ ИЗ СОБСТВЕННОГО ОКСИДА НИОБИЯ

С.С. Г е л ь б у х, Ю.Я. Д и в и н,
В.И. П е т р о с я н

Детекторы и смесители электромагнитного излучения, использующие нелинейные эффекты в сверхпроводящих туннельных переходах, имеют весьма высокие значения чувствительности в миллиметровой области спектра [1]. Для продвижения высокочастотной границы ω_m чувствительности этих устройств в дальнюю инфракрасную область спектра недостаточно изготовить туннельные переходы из сверхпроводящих электродов с величиной энергетической щели $2\Delta \approx \hbar\omega_m$, но также необходимо сформировать туннельные барьеры с пониженными значениями произведения туннельного сопротивления R_T на емкость C ($R_T C < \omega_m^{-1} \approx \hbar/2\Delta$). Последнее условие на практике означает весьма малые толщины туннельных барьеров, что затруднительно изготовить на поверхности поликристаллических тонких пленок, наиболее часто используемых для создания джозефсоновских туннельных переходов. Кроме того, при понижении толщины барьера экспоненциально возрастает плотность туннельного тока, что при конечных напряжениях на переходе приводит к перегреву прибарьерных областей электродов [2]. Хотя к настоящему времени продемонстрирована возможность получения тонких и однородных туннельных барьеров на поверхности монокристаллических тонких пленок из Nb и NbN [3-5], степень совершенства тонкопленочных электродов из этих материалов еще недостаточно высока для ослабления тепловых эффектов. С другой стороны известно, что массивные образцы монокристаллов ниобия высокой чистоты обладают при низких температурах весьма значительной (≈ 10 Вт/Ксм) теплопроводностью [6]. Это обстоятельство может быть использовано при создании высокочастотных джозефсоновских переходов на поверхности монокристаллов ниобия с использованием туннельного барьера из собственного оксида ниобия.

В качестве исходных образцов нами использовались пластины монокристалла ниобия размером $10 \times 10 \times 1$ мм³ с ориентацией поверхности (110). Контроль дефектности кристаллической структуры Nb осуществлялся по отношению сопротивлений R_{300}/R_{10} при 300 К и 10 К. Анализ химического состава поверхности проводился в высоковакуумной установке с помощью Оже-анализатора квазиконического типа. Необходимые для количественной Оже-спектроскопии значения коэффициентов элементной чувствительности были

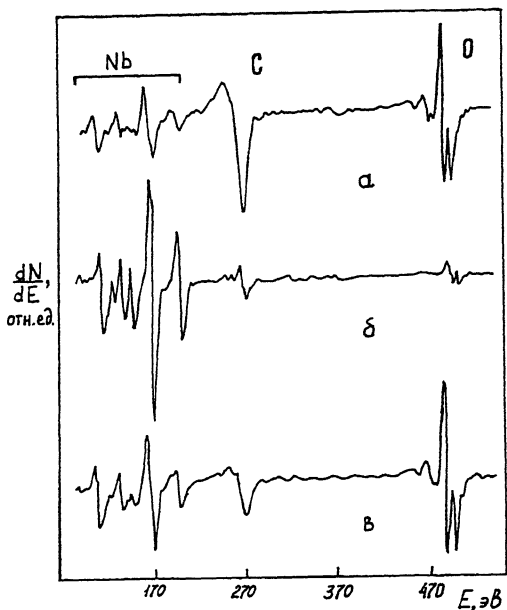


Рис. 1. Оже-спектры поверхности (110) монокристалла ниобия: а - исходная поверхность после электрохимической полировки, б - поверхность после высокотемпературного ($T > 2100^\circ\text{C}$) прогрева в высоком (10^{-7} Па) вакууме, в - поверхность ниобия после окисления в атмосфере кислорода.

определены нами экспериментально. Поверхность пластин из монокристаллического ниобия механически шлифовали и полировали, после чего применялась электрохимическая полировка при стабилизированном анодном потенциале [7]. На рис. 1 показаны Оже-спектры поверхности монокристалла ниобия на различных стадиях приготовления переходов. Исходный материал имел отношение $\rho_{300}/\rho_{10} \approx 20$, поверхность покрыта толстым слоем оксида ниобия и углеродсодержащих загрязнений (рис. 1, а). Для снижения дефектности кристалла и очистки поверхности образцы отжигались при температуре $>2000^\circ\text{C}$ в вакууме $\approx 10^{-7}$ Па за несколько циклов для обеспечения наилучших параметров материала. При отжиге использовался электронно-лучевой нагреватель. В результате получены значения $\rho_{300}/\rho_{10} \approx 200$, на поверхности при Оже-анализе фиксировалось наличие от 0.5 до 1 монослоя карбида ниобия, и оксида углерода, адсорбированного из остаточной атмосферы камеры за время остывания образца (рис. 1, б). После образования монослоя рост толщины кислородсодержащего слоя в вакууме пренебрежимо мал.

Туннельный барьер выращивался на очищенной таким образом поверхности ниобия путем окисления при 300 К и атмосферном давлении в кислороде. Толщины полученного слоя оксида ниобия, оце-

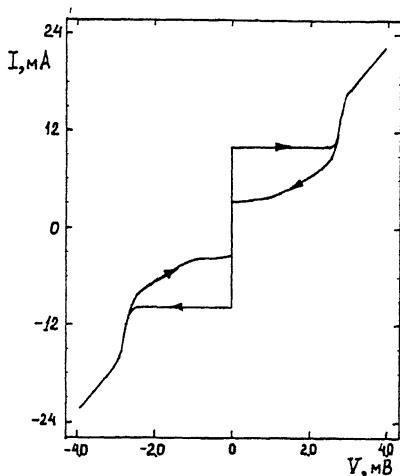


Рис. 2. ВАХ джозефсоновского туннельного перехода на основе Nb -монокристалла при температуре 4.5 К.

ненные по Оже-спектрам (рис. 1, в) в предположении формирования оксида Nb_2O_5 [4], лежали в диапазоне 0.5–2 нм для времени окисления от 2 до 200 часов.

Второй электрод туннельного перехода формировался на окисленной поверхности подложки методом фотолитографии по напыленной термическим распылением в вакууме пленке свинца толщиной до 0.4 мкм. Pb -электроды имели форму квадратов со стороной от 10 до 800 мкм. Получаемые таким образом туннельные переходы Nb -монокристалл/оксид/ Pb в нормальном состоянии имели нелинейные вольт-амперные характеристики (ВАХ), по которым согласно модели Симмонса [8], рассчитывались толщины барьеров. Сопоставление толщин барьеров, рассчитанных по Оже-спектрам и по ВАХ туннельных переходов, показывают, что оба метода дают близкие результаты и могут использоваться как взаимно дополнительные.

ВАХ типичного сверхпроводящего туннельного перехода Nb -монокристалл/оксид/ Pb , полученного по описанной выше методике, приведена на рис. 2. Критический ток I_C данного перехода составляет 8.3 мА, а сопротивление в нормальном состоянии $R = 0.2$ Ом. Величины энергетических щелей Δ для электродов из Nb и Pb определены по положению особенностей на зависимости дифференциального сопротивления переходов от напряжения и получено, что $\Delta_{Nb} = 1.5$ мэВ, а $\Delta_{Pb} = 1.25$ мэВ. На ВАХ получаемых переходов не наблюдается коленообразной структуры при напряжениях $V > (\Delta_{Nb} + \Delta_{Pb})/e$, что свидетельствует об отсутствии нормального слоя на поверхности монокристалла ниобия, подвергнутого высокотемпературному прогреву в сверхвысоком вакууме.

Кроме того, на ВАХ не наблюдается избыточный ток при смещениях $V > (\Delta N_B + \Delta P_B)/e$. Это обстоятельство указывает на отсутствие каналов с металлической проводимостью в барьерном слое.

Как видно из рис. 2, ВАХ в области шелевых напряжений не имеет отрицательного наклона, поэтому можно сделать вывод о том, что мощность $P \sim I_C (\Delta N_B + \Delta P_B)/e \sim 2 \times 10^{-5}$ Вт, рассеиваемая в переходе при смещении в области шелевой особенности, недостаточна для перегрева прибарьерных областей сверхпроводящих электродов. Следует отметить, что при такой же рассеиваемой мощности в туннельных переходах на основе поликристаллических пленок ниобия наблюдался значительный перегрев (см. работу [2], рис. 10). Таким образом, использование совершенного монокристалла ниобия в качестве базового электрода позволяет обеспечить эффективный теплоотвод из области перехода.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности создания качественных джозефсоновских туннельных переходов на основе чистых монокристаллов ниобия и собственного оксида ниобия методами сверхвысоковакуумной технологии с использованием электронной Оже-спектроскопии для контроля технологических параметров. Оптимизация приготовления оксидного барьера позволит повысить значения критической плотности тока и реализовать туннельные переходы с безгистерезисной ВАХ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Richards P.L., Hu O. // Proc. IEEE. 1989. V. 77. P. 1233-1242.
- [2] Huggins H.A., Gurvitch M. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 6. P. 2103-2109.
- [3] Talvassio J., Braginski A.I. // IEEE Trans. Magn. 1987. V. 32. N 2. P. 859-862.
- [4] Celaschi S., Geballe T.H., Lowe W.P. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N 8. P. 794-796.
- [5] Дивин Ю.Я., Зеленкевич Р.Л., Комашко В.А., Носков В.Л., Павловский В.В. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 13. С. 32-36.
- [6] Gladun A., Gladun C., Knorn M., Vinzelberg H. // J. Low Temp. Phys. 1977. V. 27. N 5/6. P. 873-886.
- [7] Севрюкова Л.М. // В сб.: Сверхпроводники и их использование в ускорительной технике. М.: Атомиздат. 1975. № 5. С. 1-5.
- [8] Simmons J.G. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. P. 238-245
- [9] Дивин Ю.Я., Надь Ф.Я. // ФНТ. 1978. № 9. С. 1105-1114.

Институт радиотехники и электроники
РАН, Москва

Поступило в Редакцию
26 февраля 1992 г.

Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов