

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ Nb-N,  
ПОЛУЧЕННОЙ ПУТЕМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

В. А. Дзвиня, Г. П. Мотулевич, Н. В. Аншуква

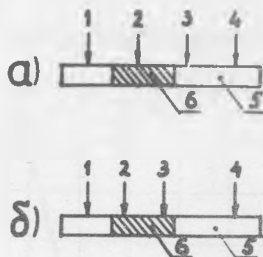
УДК 537.312.62

В работе исследована зависимость  $T_c$  системы Nb-N от условий имплантации. И для пленок, и для фольг максимальная  $T_c = 13,6^\circ\text{K}$  получена при высокой температуре облучения и дозе, значительно больше необходимой для создания концентрации  $n/\text{Nb} = 1/1$  на длине пробега ионов азота в ниобии.

В последнее время метод ионной имплантации все шире применяется в изучении сверхпроводимости. В частности, большой интерес вызывает исследование ниобия, облученного ионами азота. Предыдущие работы в этой области дали противоречивые результаты, в некоторых /1/ наблюдалось понижение критической температуры  $T_c$  сверхпроводящего перехода, в другой работе - /2/ повышение  $T_c$  до  $10^\circ\text{K}$ . В настоящей работе выполнено исследование пленок и фольг ниобия, облученных азотом. Исследованы зависимости  $T_c$  облученных образцов от дозы облучения, температуры мишени и толщины пленки.

Имплантация проводилась на установке "ИОЛЛА-2", специально приспособленной для данной задачи. Внедрялись ионы  $N_2^+$  с энергией 70 кэВ при плотности облучения от  $15 \text{ мка/см}^2$  до  $50 \text{ мка/см}^2$ . В качестве мишеней использовались как пленки ниобия толщиной от  $700 \text{ \AA}$  до  $3700 \text{ \AA}$ , так и ниобиевая фольга толщиной 15 мкм. Пленки ниобия напылялись на горячие сапфировые подложки в вакууме  $10^{-5}$  тор. Технология изготовления пленок описана в работе /3/. Толщины измерялись на микроинтерферометре с точностью  $50 \text{ \AA}$ . Во время облучения с помощью специального нагревателя задавалась с точностью  $\pm 20^\circ\text{C}$  температура мишеней, которая варьировалась от комнатной до  $800^\circ\text{C}$ . Сверхпроводящий переход регистрировался резистивным четырехконтактным методом. Использовались две схемы расположения контактов относительно облученной области, приве-

денные на рис. 1. Схема (а) использовалась для одновременной записи переходов облученной и необлученной зон, что позволяет в одном опыте определить как  $T_C$  облученной зоны, так и приращение

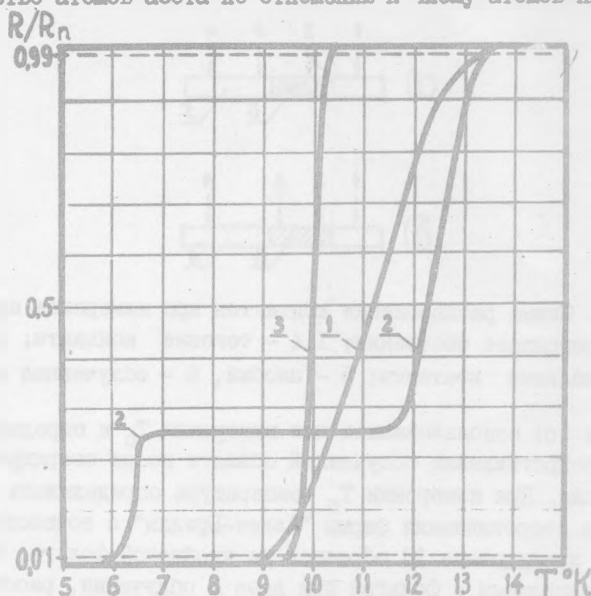


Р и с. 1. Схема расположения контактов при измерении переходов в сверхпроводящее состояние; 1,4 - токовые контакты; 2,3 - потенциальные контакты; 5 - ниобий, 6 - облученное место

$T_C$ . Схема (б) использовалась для измерения  $T_C$  и определения остаточного сопротивления облученной области после сверхпроводящего перехода. При измерении  $T_C$  температура определялась с помощью угольного сопротивления фирмы "Аллен-Брадди" с точностью  $\pm 0,05^\circ\text{K}$ .

Было исследовано 10 образцов на ниобиевой фольге. Первые опыты были выполнены с фольгой при дозе  $D$  облучения, рассчитанной таким образом, чтобы отношение числа атомов азота к числу атомов ниобия в слое, равном глубине проникновения, было близко к единице. Оценка пробегов ионов азота в ниобии получена пересчетом данных для комбинации азот-молибден из работы /4/ и равнялась  $1200 \text{ \AA}$  при энергии 35 кэв/ат; соответствующая доза  $D = 2,6 \cdot 10^{17}$  ион/ $\text{см}^2$ . Оказалось, что после облучения  $T_C$  либо не изменялась (для мишеней, облученных при комнатной температуре), либо слегка падала (для мишеней, облученных при высоких температурах  $600+800^\circ\text{C}$ ). Существенное повышение дозы до  $1,3 \cdot 10^{18}$  ион/ $\text{см}^2$  при температуре мишени  $t = 600^\circ\text{C}$  привело к повышению  $T_C$ , начало перехода было при температуре  $13,6^\circ\text{K}$ , конец - при температуре  $9,0^\circ\text{K}$ . Все это показывает, что в процессе облучения идет интенсивная разгонка примеси, и действительная глубина проникновения в несколько раз больше пробега ионов азота в ниобии. Работа с ниобиевыми фольгами требовала еще больших доз облучения, что вы-

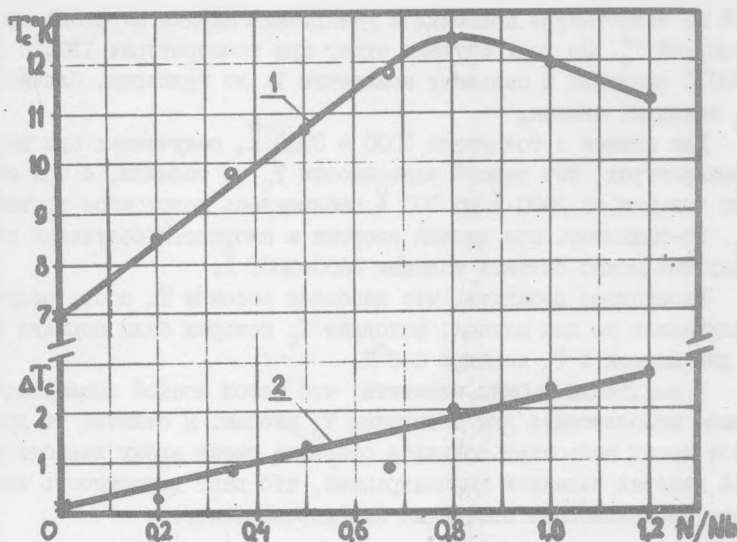
звало технические затруднения, поэтому мы начали работу с пленками ниобия. Доза облучения рассчитывалась таким образом, чтобы количество атомов азота по отношению к числу атомов ниобия на



Р и с. 2. Кривые переходов некоторых образцов. 1 - фольга,  $d = 15$  мкм,  $D = 1,3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>,  $t = 600^{\circ}C$ , измерения по схеме (б); 2 - пленка,  $d = 2000 \text{ \AA}$ ,  $D = 4,4 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>,  $t = 700^{\circ}C$ , измерения по схеме (а); 3 - пленка  $d = 2700 \text{ \AA}$ ,  $D = 8,6 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>,  $t = 20^{\circ}C$ , измерения по схеме (б)

всей толщине пленки составляло заданную величину. Было исследовано 17 пленочных образцов с начальными  $T_c = 6,9^{\circ}K$ . В 16 образцах наблюдалось повышение  $T_c$ , и лишь в одном - понижение. Переходы в сверхпроводящее состояние некоторых образцов приведены на рис. 2. Параметры образцов, толщина  $d$ , доза  $D$  и температура мишени во время облучения  $t$  приведены в подписи к рисунку. Из рисунка видно, что  $T_c$  начала перехода достигала значения  $13,6^{\circ}K$ ,  $T_c$  середины перехода  $12,45^{\circ}K$ . Ширина перехода у пленки значительно меньше, чем у фольги. Измерения, выполненные по схеме (б),

показывают, что переходы являются стопроцентными, т.е. остаточное сопротивление Nb-N после перехода равно нулю. Измерения по схеме (а) показывают, что приращение  $T_C$  значительно; так, для образца, данные которого приведены на рисунке, оно составило  $6^\circ\text{K}$ .



Р и с. 3. Зависимость  $T_C$  (кривая 1) и  $\Delta T_C$  (кривая 2) от атомного отношения  $N/Nb$

Для изучения зависимости  $T_C$  от концентрации атомов азота в образце была изготовлена специальная серия из 7 образцов на ниобиевых пленках с толщинами  $1800 \pm 2900 \text{ \AA}$  с начальными  $T_C$  от  $6^\circ\text{K}$  до  $8^\circ\text{K}$ . Облучение проводилось при температуре мишени  $700 \pm 750^\circ\text{C}$ . Зависимости  $T_C$  и ширины перехода  $\Delta T_C = T_C^N - T_C^K$  от атомного отношения  $N/Nb$  приведены на рис. 3. Из рисунка (кривая 1) видно, что максимальная  $T_C$  получилась для  $N/Nb = 0,8$ . При определении концентрации мы не учитывали распыление образца во время облучения, поэтому возможна небольшая систематическая ошибка в сторону ее занижения. Кривая 2 показывает, что  $\Delta T_C$  с увеличением дозы растет.

Исследование зависимости  $T_C$  от температуры мишени во время облучения показало, что оптимальными температурами для получе-

ния максимальных  $T_C$  являются температуры  $600-750^\circ\text{C}$ , при этом получаются  $T_C^H = 13,6^\circ\text{K}$  и  $T_C = 12,5^\circ\text{K}$  (для пленок). Последующий отжиг этих образцов в течение 30 мин в вакууме  $2 \cdot 10^{-6}$  тор при той же температуре приводил к уменьшению ширины перехода при неизменной  $T_C^H$ . Во всех случаях отжиг при температурах  $1100^\circ\text{C}$  и  $1600^\circ\text{C}$  приводил к сильному понижению  $T_C$  до величины, близкой к  $T_C$  исходных пленок.

Для пленок с толщинами  $2000 - 3700 \text{ \AA}$ , облученных при высоких температурах, нет резкой зависимости  $T_C$  от толщины, а при понижении толщины от  $2000 \text{ \AA}$  до  $700 \text{ \AA}$  наблюдалось монотонное понижение  $T_C$ . По-видимому, при данной энергии и плотности облучения оптимальными можно считать толщины  $2000-3000 \text{ \AA}$ .

Необходимо добавить, что наиболее высокие  $T_C$  после облучения получались не для пленок, исходные  $T_C$  которых были порядка  $9^\circ\text{K}$ , а для пленок с  $T_C$  порядка  $6-8^\circ\text{K}$ .

В заключение можно отметить, что метод ионной имплантации можно использовать для повышения  $T_C$  ниобия. В отличие от других, этот метод позволяет получать объемные смеси любых веществ с любой наперед заданной концентрацией, что дает возможность исследовать неравновесные состояния сверхпроводников.

Поступила в редакцию  
6 июня 1976 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. P. Crozat, R. Adde, J. Chaumont, H. Bernas. Appl. ion beams to met., New York-London, 1973, p. 27; O. Meyer, H. Mann and E. Philingos. Ibid, p. 15.
2. K. Masuda, A. Ohnawa, K. Gamo, M. Takai, S. Namba and A. Mizoluch. Japanese J. Appl. Phys., 14, 1831 (1975).
3. А. И. Головашкин, И. С. Левченко, Г. П. Мотулевич. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 13 (1972).
4. М. А. Кумахов, В. А. Муралев, Е. Г. Аверьянов, В. А. Симонов, Л. П. Хавкин. Проективные пробеги и разбросы пробегов для I240 комбинаций ион-мишень в интервале энергий  $20 \text{ кэВ} < E < 1000 \text{ кэВ}$ . МГУ, Москва, 1974 г., стр. 186.