

05.4; 10; 11; 12

© 1992

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ  
ИОНАМИ НА СВОЙСТВА  $YBa_2Cu_3O_{7-6}$   
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОКЕ.В. И л ь и ч е в, Ю.И. К о в а л ь,  
А.А. И в а н о в, С.Г. Г а л к и н

Формирование структур в ВТСП пленках с размерами порядка микрометра и меньше является важной задачей криоэлектроники. Возможность успешного применения для этих целей ионно-лучевого травления (ИЛТ) была продемонстрирована в работе [1]. Использование ИЛТ для микроструктурирования в ВТСП пленках связано с бомбардировкой материала пленок ионами, энергия которых составляет несколько сот электронвольт. Этой энергии достаточно для внесения значительных радиационных повреждений, которые условно можно подразделить на два типа: первый – изменение свойств приповерхностного слоя на глубину несколько длин среднего проективного пробега ионов из-за выбивания атомов решетки; второй – радиационно-стимулированная диффузия дефектов в объем с облучаемой поверхности. Глубина и характер распространяемых дефектов определяются условиями облучения. Изучение влияния бомбардировки ионами на свойства ВТСП пленок представляется важным с точки зрения формирования микроструктур без деградации свойств материала пленок по следующей причине. Свойства пленки могут меняться не только на открытых для облучения местах, но и под маской. Это может быть вызвано как радиационно-стимулированной диффузией, так и непосредственным проникновением рассеянных ионов и выбитых атомов под маску. Поэтому определение глубины и характера повреждений ВТСП пленок при облучении дает косвенную информацию о минимально возможном латеральном размере структур, которые удастся достичь при использовании ИЛТ.

В настоящей работе представлены результаты по изучению влияния бомбардировки ионами  $Kr^+$  и  $O_2^+$  на температурную зависимость сопротивления пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-6}$ .

Были использованы эпитаксиальные тонкие пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-6}$ , синтезированные методом импульсного лазерного напыления [2]. Мишень из спеченой керамической таблетки стехиометрического состава распылялась излучением эксимерного лазера  $KrF$  ( $\lambda = 248$  нм, плотность энергии  $\approx 3$  Дж/см<sup>2</sup>). Распыляемое вещество осаждалось на нагретую до 750 °С подложку  $SrTiO_3$  (100) до образования пленки толщиной  $\approx 2000$  Å. Критическая температура пленки составляла 90 К с шириной перехода менее одного градуса. Критическая плотность тока в жидком азоте была порядка  $10^5$ – $10^6$  А/см<sup>2</sup>.

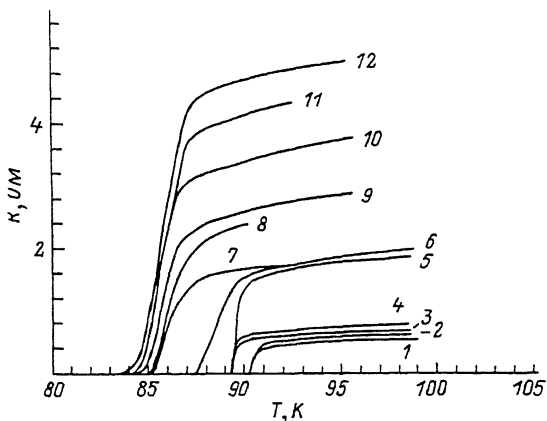


Рис. 1. Зависимость сопротивления  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленки от температуры, полученные для: 1 - исходного образца, 2 - облученного дозой  $10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> (практически совпадает с  $1.3 \cdot 10^{18}$ , которая не показана), 4 - после общей дозы облучения  $3 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>; 5 -  $6 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, 8 -  $6.5 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, 10 -  $6.7 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, 11 -  $6.9 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, 12 -  $7 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>; 3, 6, 9 - отогретого до комнатной температуры; 7 - образца после контакта с атмосферным воздухом.

Экспериментальная установка представляет собой вакуумный пост с подсоединенным ионным источником типа Кауфмана. Держатель образца позволяет охлаждать образец до температуры жидкого азота. Это дает возможность проводить измерения свойств образца непосредственно в вакуумной камере, что является важным с точки зрения разделения влияния таких факторов как облучение, нагрев образца и воздействие воздуха на свойства пленки.

Перед облучением образец устанавливался на держатель, и с помощью экранов оставлялась узкая полоска ( $\approx 1$  мм) между двумя парами контактов (см. рис. 2, б). Измерения проводились четырехточечным методом. Измерительный ток менялся от 100 до 15 мА в зависимости от сопротивления образца. Перед и во время облучения образец поддерживался при температуре жидкого азота. После набора необходимой дозы ионный источник выключался, прекращалась подача жидкого азота и в процессе отогрева держателя в течение  $\approx 15$  мин измерялась температурная зависимость сопротивления образца. Температура столика контролировалась термпарой медь-константан. Отогрев осуществлялся на  $\approx 20^\circ$ , после чего возобновлялась подача жидкого азота, и образец охлаждался.

На рис. 1 показан набор  $R(T)$  образца, снятых при облучении  $Kr^+$  с энергией 500 эВ. Наблюдается небольшой скачок ( $\approx 10\%$ )

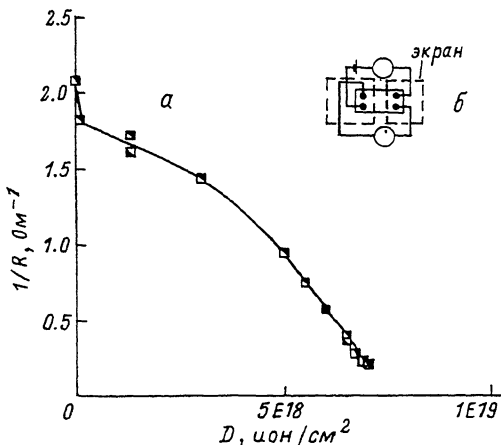


Рис. 2. Зависимость проводимости образца от дозы облучения при 93 К (а); схема расположения контактных площадок, экранов, защищающих образец от облучения и участка пленки, подвергающегося бомбардировке (б).

сопротивления после первой дозы облучения  $1 \cdot 10^{17}$   $\text{ion/cm}^2$  (кривая 2) по сравнению с исходным образцом. Этот скачок нельзя объяснить уменьшением толщины пленки за счет распыления в силу малой дозы. Скорость ИЛТ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  в наших условиях составляет около  $100 \frac{\text{Å}}{\text{мин}} \frac{\text{см}^2}{\text{МА}}$ , или около 26 Å на каждые  $10^{17}$   $\text{ion/cm}^2$ . Это чуть более 1% начальной толщины пленки. С другой стороны, дозы  $10^{17}$   $\text{ion/cm}^2$  вполне достаточно для значительного повреждения поверхностного слоя толщиной несколько десятков ангстрем за счет проникновения ионов криптона и выбитых атомов материала пленки. Кроме того, значительное количество радиационных дефектов, образующихся на поверхности, могут проникать на некоторую глубину, также ухудшая свойства пленки. По нашему мнению, именно эти процессы можно считать ответственными за резкий рост сопротивления. Дальнейшая бомбардировка приводит к плавному уменьшению проводимости. Это показано на рис. 2, а, на котором приведена зависимость проводимости образца от дозы облучения. В силу того, что облучению подвергалась не вся поверхность пленки, а лишь узкая полоска между контактами (см. рис. 2, б), из приведенной зависимости можно сделать вывод, что после доз больше  $5 \cdot 10^{18}$   $\text{ion/cm}^2$  сопротивление участка, подвергаемого бомбардировке, становится много больше сопротивления пленки, закрытой экранами. Об этом свидетельствует практически линейное падение проводимости образца от дозы. Температура сверхпроводящего перехода  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  пленки тоже

меняется при облучении. Однако зависимость  $T_C$  от дозы слабо выражена. При этом сильное влияние на  $T_C$  оказывает отогрев в вакууме до комнатной температуры после облучения. На рис. 1 кривые 3, 6, 9, полученные после отогрева, сдвинуты относительно кривых 2, 5, 8, снятых сразу после облучения на 0.5–1 градус. Отогрев, кроме уменьшения  $T_C$ , приводит также к некоторому увеличению сопротивления пленки. Можно предположить, что скорее всего, низкая температура образца при облучении сдерживает диффузию дефектов вглубь пленки, и до отогрева  $T_C$  определяется объемом пленки. При повышении температуры дефекты разгоняются, и свойства пленки изменяются по всей толщине. Это приводит к значительному уменьшению  $T_C$  одновременно с некоторым ростом сопротивления. Однако наиболее чувствительной  $T_C$  оказалась к выносу образца на воздух (кривая 7 рис. 1) после облучения и отогрева в вакууме. Эта операция понизила температуру перехода на  $\approx 2$  градуса. При этом механизм, ответственный за это, не ясен. Аналогичные результаты были получены при облучении  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  пленки ионами  $O_2^+$  с энергией 500 эВ. И хотя наблюдаются некоторые особенности, прежде всего в форме  $R(T)$  зависимости, основные закономерности поведения пленки остаются теми же, что и при бомбардировке ионами  $Kr^+$ .

Таким образом, можно сказать, что бомбардировка ионами, как  $Kr^+$ , так и  $O_2^+$ , приводит к значительным изменениям характеристик пленки. Эти изменения связаны со многими факторами и, безусловно, для выяснения механизмов происходящих процессов требуют дополнительных исследований. Однако облучение ионами в наших условиях не приводит к потере сверхпроводящих свойств  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  эпитаксиальных пленок даже при дозах больше  $7 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup>, достаточных для многократного уточнения. А оставшаяся после облучения пленка толщиной менее 500 Å имеет критическую температуру значительно выше температуры жидкого азота с шириной перехода менее 3 градусов. Это позволяет сделать вывод, что создание субмикронных структур (менее 1 мкм) в эпитаксиальных пленках  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с использованием ИЛТ возможно. А также дает основание полагать, что пределом размеров структур в сторону их уменьшения может служить величина не более 0.1 мкм.

В заключение мы хотели бы поблагодарить руководителя фирмы „Микрон“ Я.Б. Пояркова за предоставленные подложки  $SrTiO_3$ .

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] И л ь и ч е в Е.В., К о в а л ь Ю.И., И в а н о в А.А.,  
М и н у ш е н к о в А.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18.  
[2] I v a n o v A.A., G a l k i n S.G. et al. // Phy-  
sica. 1991. С. 180.

Поступило в Редакцию  
25 июня 1992 г.