

## ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

*Антоненко С.В., Безотосный И.Ю., Григорьев А.И., Дегтяренко Н.Н.,  
Евстигнеев В.В., Елесин В.Ф., Жучков В.Е., Захарченко И.В.,  
Молчанов А.С., Шавкин С.В., Головашкин А.И.,  
Красносвободцев С.И., Печень Е.В.*

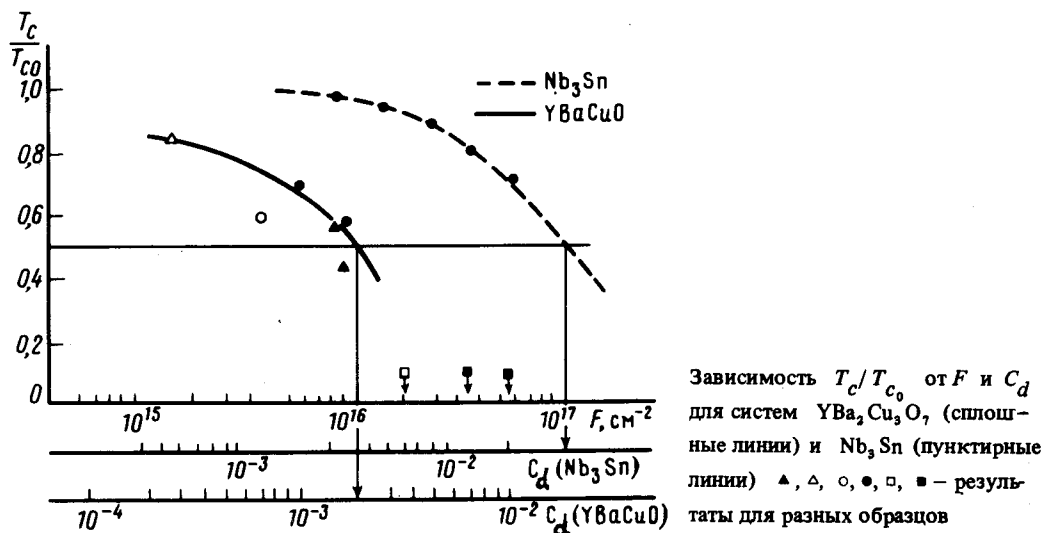
Пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ , полученные методом лазерного распыления были облучены ионами  $He^{++}$  с энергией 6,7 МэВ. Установлено, что при облучении изменяются сверхпроводящие и структурные характеристики пленок и эти пленки гораздо более чувствительны к облучению, чем пленки  $Nb_3Sn$ .

Методом импульсного лазерного распыления приготовлены практически однофазные пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ . В качестве мишеней использовались спеченные таблетки керамики необходимого состава. Для распыления применялся лазер с длительностью импульса 10 нс, энергией в импульсе  $\sim 0,02$  Дж, частотой следования 50 Гц. Осаждение проводилось в атмосфере кислорода на подложки из сапфира и титаната бария, нагреваемые до  $700-850^\circ\text{C}$ . Параметры решетки основной фазы:  $a = 3,828 \pm 0,001 \text{ \AA}$ ,  $b = 3,887 \pm 0,001 \text{ \AA}$ ,  $c = 11,699 \pm 0,002 \text{ \AA}$ . Толщина пленок 1,5–2,0 мкм. Лучшие пленки имели критическую температуру  $T_c = 83 \text{ K}$ , начало перехода 95 K и полную сверхпроводимость при температуре  $T > 80 \text{ K}$ .

Величина  $T_c$  измерялась индуктивным методом, что позволило определять  $T_c$  в разных точках поверхности пленок. До и после облучения образцы изучались также методом рентгеновской дифрактометрии.

Образцы облучались в вакууме ионами  $\text{He}^{++}$  с энергией 6,7 МэВ и флюенсами  $1,0 \cdot 10^{15} \div 7,0 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>. Погрешность в определении флюенса  $\pm 5\%$ . Держатель образца охлаждался водой. Для контроля за изменением свойств пленок облучалась только часть их поверхности; при этом критическая температура необлученной части уменьшалась незначительно.

На рисунке приведены экспериментальные результаты по зависимости  $T_c/T_{c0}$  ( $T_{c0}$  – критическая температура в исходном состоянии) пленок от флюенса облучения  $F$  и числа смещений на атом  $C_d$ . По результатам исследований можно отметить следующее: при флюенсах больше  $2,0 \cdot 10^{16}$  критическая температура падает ниже 4,2 К; с ростом флюенса увеличивается ширина сверхпроводящего перехода ( $\Delta T_c$ ); в облученных образцах наблюдается увеличение параметров и объема элементарной ячейки (например, для флюенса  $4,0 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup> параметры возрастают:  $a$  до 3,839 Å,  $b$  до 3,891 Å,  $c$  до 11,707 Å, и объем увеличивается с  $174,1 \text{ \AA}^3$  до  $174,9 \text{ \AA}^3$ ); для облученных образцов не зарегистрировано уширение дифракционных линий; обнаружено уменьшение отношения интенсивностей дифракционных линий основной и примесных фаз в облученных образцах; переход в тетрагональную фазу в облученных образцах не наблюдался; оксидные сверхпроводящие пленки гораздо более чувствительны к ионному облучению, чем станид ниобия.



Образец, облученный до флюенса  $4,0 \cdot 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>, был отожжен в атмосфере кислорода при температуре 900°C в течение 2 часов. После отжига критическая температура и объем элементарной ячейки образца вернулись к исходному состоянию.

Рассчитано число смещений на атом при ионном облучении пленок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Расчеты проводились с помощью программы "Ион", позволяющей найти электронные и ядерные потери, полный и проективный пробеги, профиль повреждений. При описании ядерных столкновений использовались сечения, вычисленные для потенциала Томаса – Ферми или в соответствии с работой <sup>1</sup>; электронные потери учитывались по соотношениям работы <sup>2</sup>. Получено, что при облучении тонких пленок числу смещений  $C_d = 1$  соответствует флюенс  $5,7 \cdot 10^{18}$  ион/см<sup>2</sup> ионов гелия с энергией 6,7 МэВ. Как видно из рисунка это значительно меньше аналогичной величины для  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Таким образом, для того, чтобы критическая температура в результате облучения уменьшилась в два раза, в керамике необходимо иметь число смещений на атом в 20 раз меньше, чем в станиде ниобия (соответственно  $2,0 \cdot 10^3$  и  $4,0 \cdot 10^2$ ).

Рассмотрим возможные причины деградации критической температуры оксидных сверхпроводников после облучения. Прежде всего отметим, что в наших экспериментах можно пренебречь влиянием радиационного нагрева. Подложки из монокристаллического сапфира

обладают высокой теплопроводностью и, как показали многократные измерения, при хорошем контакте с водоохлаждаемым медным держателем при облучении возникает перегрев пленок не более, чем на несколько десятков градусов. Кроме того, так как пробег ионов гелия с энергией 6,7 МэВ (12 мкм) много больше толщины пленок ( $< 2$  мкм), то тепло выделяется в основном в подложке. К тому же исследовалось влияние отжига в вакууме на свойства керамики  $Y-Ba-Cu-O$ . Установлено, что  $T_c$  начинает падать только при температурах выше  $300^\circ C$  и при этом наблюдается переход из ромбической структуры в тетрагональную (тетрагональная фаза характеризуется меньшим по сравнению с ромбической содержанием кислорода). Поскольку при облучении структурного перехода не наблюдалось и  $T_c$  необлученной части пленки изменилась слабо, то можно считать, что радиационный нагрев был незначительным и на  $T_c$  существенного влияния не оказал.

Возможной причиной изменения свойств керамики при облучении является создание в ней точечных дефектов. Хотя прямых доказательств этого пока нет, имеется ряд данных, указывающих на возможность такого механизма. Так при введении в  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$  примеси железа концентрацией  $\approx 1$  ат.% наблюдается падение  $T_c$  в два раза. Как было показано с помощью гамма-резонансных измерений атомы железа замещают атомы меди, т.е. создают дефекты в подрешетке меди. Теперь, если предположить, что для барий-иттриевой керамики коэффициент связи между числом дефектов и числом смещений на атом такой же, как и в  $Nb_3Sn$ <sup>3</sup>, то точки зависимости  $T_c/T_{c0}$  от концентрации железа хорошо лягут на зависимость  $T_c/T_{c0}(F, C_d)$  на рисунке. Поэтому можно предположить, что в результате ионного облучения создаются повреждения в подрешетке меди в структуре  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ , что и приводит к падению критической температуры барий-иттриевой керамики. Основные результаты были представлены ранее<sup>4</sup>.

### Литература

1. Kang H.J., Kawato E., Shimizu R. Jap. Journ. of Appl. Phys., 1984, 23, 262
2. Montengro E.C., Crug S.A. Phys. Lett., 1982, 92A, 195
3. Дегтяренко Н.Н., Дежурко К.И., Елесин В.Ф., Жучков В.Е., Захарченко И.В. и др. Радиационные дефекты и сверхпроводимость интерметаллида. Препринт МИФИ 009-85, стр. 1, 1985.
4. Антоненко С.В., Евстигнеев В.В., Елесин В.Ф. и др. Рабочее совещание по проблемам высокотемпературных сверхпроводников, Свердловск - Заречный, 7-10 июля 1987 г.