

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ MgO МЕТОДОМ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО И РЕЗОНАНСНОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ИОНОВ

© В.М.Заводчиков, А.П.Кобзев, Ю.Ю.Крючков,
В.Ф.Пичугин, В.В.Сохорева, Т.С.Франгульян

Исследование воздействия ионного облучения на диэлектрики является важным с точки зрения возможности формирования слоев с отличными от исходного материала свойствами. Известно, что имплантация ионов приводит к формированию проводящих слоев непосредственно в диэлектрических подложках. При облучении кристаллов MgO и ряда окисных керамик ионами различного сорта с энергией 10–100 кэВ и выше и дозами в интервале 10^{15} – 10^{17} ион/см² был обнаружен эффект перехода их поверхностных слоев из диэлектрического в проводящее состояние [1]. Проводимость всех исследованных материалов после облучения достигает величины $(10$ – $10^{-3})$ Ом⁻¹. При этом энергия активации проводимости уменьшается от 1 до 0.03 эВ. Проводящее состояние, созданное ионным облучением, характеризуется высокой стабильностью по отношению к термическому отжигу в вакууме вплоть до 1300 К. Стабильность же наблюдаемого эффекта по отношению к отжигу на воздухе существенно хуже.

Слабая зависимость проводимости от сорта внедряемых ионов указывает на то, что определяющую роль в формировании таких слоев играют фундаментальные процессы их структурно-химической реконструкции под действием облучения, а не химическая природа бомбардирующих частиц. Поэтому в работе [2], с целью исследования структуры ионно-модифицированных слоев, методами резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с эффектом каналирования (метод ROP/K), оптического поглощения и дифракции рентгеновских лучей была получена информация о степени разупорядоченности и типах дефектов облученных ионами Fe ($E = 70$ кэВ, $D = 10^{16}$ – 10^{17} ион/см²) кристаллов MgO. Оказалось, что формирование проводящих слоев не связано ни с образованием центров окраски F- и V-типов, ни с разупорядоченностью решетки, вызванной смещением атомов из регулярных узлов; не было также обнаружено и формирования новых фаз.

Среди эффектов воздействия ионных пучков на структурное состояние MgO особое внимание следует обратить на возможность нарушения стехиометрии состава ионно-модифицированных слоев, что может самым кардинальным образом повлиять на свойства материалов. В связи с этим в данной работе приводятся результаты исследования состава приповерхностных слоев $\langle 100 \rangle$ монокристаллов MgO, имплантированных ионами Fe ($E = 70$ кэВ, $D = 10^{16}$ ион/см²) и Al ($E = 60$ кэВ, $D = 10^{17}$ ион/см²). В ионно-модифицированных слоях MgO методом Резерфордского обратного рассеяния (метод РОР) ионов гелия с энергией $E_0 = (1.8-3.2)$ МэВ измерены профили концентрации атомов магния и имплантированной примеси. В связи с низкой чувствительностью метода РОР к легким элементам профиль концентрации атомов кислорода измерен методом резонансного обратного рассеяния (метод РезОР) ионов ⁴He с изменением энергии в диапазоне $E_0 = 3.0-3.2$ МэВ с использованием узкого резонанса $E_r = 3.045$ МэВ [^{3,4}]. Ширина резонанса составляет 10 кэВ, а сечение в резонансе в 17 раз превышает резерфордское. Достоинство использования метода РезОР по сравнению с обычной методикой РОР заключается в том, что обеспечивается, во-первых, повышенная чувствительность из-за существенно большего сечения в резонансе и, во-вторых, более высокое разрешение по глубине из-за малой ширины самого резонанса. Сочетание этих двух методов в одном эксперименте показало свою высокую эффективность при исследовании основного состава ВТСП-керамик (YBa₂Cu₃O₇) [^{5,6}] и эпитаксиальных пленок гранатов (Y₃Fe₅O₁₂ и Gd₃Ga₅O₁₂), а также позволило обнаружить в составе последних неконтролируемые в процессе выращивания примеси тяжелых элементов (Pb и Pt) [⁸].

В методах, использующих обратное рассеяние, информацию о составе твердого тела и о концентрации примесных атомов в них извлекают из энергетических спектров обратно-рассеянных (ЭСОР) частиц. На рис. 1 приведены экспериментальные ЭСОР ионов ⁴He, рассеянных на угол 167.5° монокристаллом $\langle 100 \rangle$ MgO, имплантированного ионами Fe (1э) и Al (2э). Разрешение спектрометрического тракта составляло 20 кэВ для альфа-частиц от ²³⁸Pu с энергией 5.499 МэВ. Из рис. 1 видно, что области, соответствующие рассеянию на ядрах атомов ¹⁶O, Mg, Al и Fe, хорошо выделяются для энергии $E_0 = 3.045$ МэВ анализирующих ионов ⁴He. Сечение упругого рассеяния на ядрах атомов Al, Mg и Fe аналитически описывается формулой Резерфорда с поправкой на экранирование, так как кулоновский барьер вы-

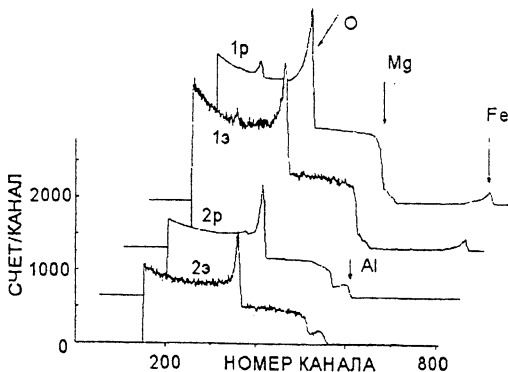


Рис. 1. Энергетические спектры обратнорассеянных ионов ${}^4\text{He}$ с начальной энергией $E_0 = 3.045$ МэВ от образцов $\text{MgO}(\text{Fe})$ (1э — экспериментальный, 1р — расчетный) и $\text{MgO}(\text{Al})$ (2э — экспериментальный, 2р — расчетный).

ше энергии падающих ионов. Сечение рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов ${}^{16}\text{O}$ носит уже нерезерфордовский характер, о чем свидетельствует форма соответствующей области спектра. Для обработки экспериментальных данных использовался компьютерный анализ спектров, в основе которого лежит методика моделирования ЭСОР для заданных параметров модели образца и последующего его сравнения с экспериментальным по критерию совпадения площади как на отдельных выделенных участках, так и в области перекрывающихся участков спектра [9]. На рис. 1 также приведены расчетные энергетические спектры (1р, 2р), соответствующие экспериментальным ЭСОР (1э, 2э). Получено хорошее согласие рассчитанных и экспериментальных энергетических спектров: достигнут критерий совпадения площадей 0.5%, а величина стандартного отклонения, характеризующая степень близости формы моделированного и экспериментального спектров, оказалась не хуже $5 \cdot 10^{-3}$.

Из экспериментальных ЭСОР, подобных приведенным на рис. 1 и полученных при изменении энергии анализирующего пучка ионов He в пределах от 3 до 3.2 МэВ, рассчитывались распределения (профили) атомов, входящих в состав рассматриваемых образцов. Полученные результаты представлены на рис. 2. Сравнение профилей показывает, что в результате ионного облучения происходит преимущественное убывание кислорода (не зависящее от сорта и дозы внедряемых ионов), приводящее к отклонению от стехиометрии основного состава приповерхностных слоев исследованных кристаллов. Так, при внедрении ионов Fe в поверхность

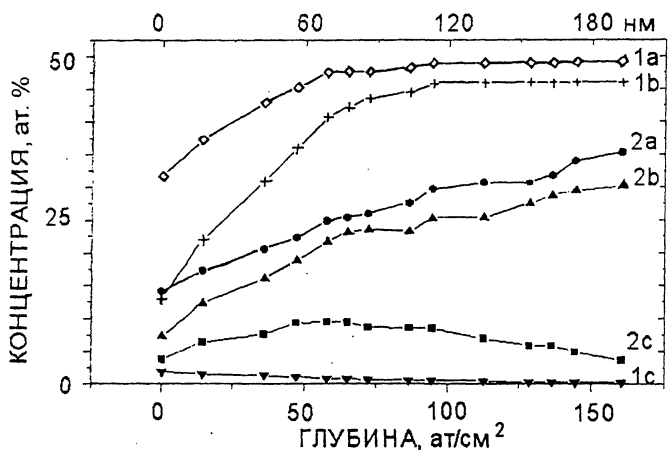


Рис. 2. Распределение атомов по глубине приповерхностного слоя в образцах MgO, имплантированных ионами Fe ($E = 70$ кэВ, $D = 10^{16}$ ион/см²): 1a — Mg, 1b — O, 1c — Fe; и Al ($E = 60$ кэВ, $D = 10^{17}$ ион/см²): 2a — Mg, 2b — O, 2c — Al.

ной области концентрация атомов ^{16}O составляет 15 ат.%, а Mg — 30%. При внедрении Al эти значения составляют 7.5 и 1.5% соответственно. Доказательством того, что изменение основного состава образцов связано с внедрением ионов, является разная толщина наблюдаемого обедненного слоя. Это объясняется тем, что при одной и той же энергии внедряемых ионов Fe и Al последние (кривая 2c) проникают в кристалл на глубину, более чем в 2 раза превышающую глубину внедрения первых (кривая 1c). Отметим также и тот факт, что внедрение более легких ионов Al приводит к большему обеднению атомами кислорода и магния модифицированного слоя, чем имплантация тяжелых атомов Fe.

Таким образом, использование методов РОР и РезОР ионов гелия с энергией $E_0 = (1.8-3.2)$ МэВ позволило определить изменение основного состава поверхностных слоев кристаллов (100) MgO, модифицированных внедрением ионов Fe и Al, и в совокупности с результатами, представленными в работах [1,2], установить, что для формирования проводящего состояния ионно-облученных слоев диэлектрических кристаллов необходимым условием является изменение стехиометрии состава за счет преимущественного убывания кислорода.

Список литературы

- [1] *Pichugin V.F., Feodorov A.N., Shmyrin A.J.* // Phys. Res. 1990. V. 13. P. 337-339.
- [2] *Pichugin V.F., Frangulian T.S., Kryuchkov Yu.Yu., Feodorov A.N., Riabchikov A.I.* // Nucl. Instr. & Meth. 1993. B80/81. P. 1203-1206.
- [3] *Cameron J.R.* // Phys. Rev. 1953. V. 90. P. 839-844.
- [4] *Буркова И.Е., Полянский В.Н., Ятис А.А.* // Труды XII ВСФВЗЧК. М.: МГУ, 1983. С. 239-242.
- [5] *Заводчиков В.М., Соторева В.В., Ятис А.А., Буркова И.Е.* // Тез. докл. VI Всесоюз. совещ. по примен. ускорит. в народ. хоз. М.: ЦНИАТОМИНФОРМ, 1988. С. 198-199.
- [6] *Кобзев А.П., Мазайдик Д., Шандрик Р., Широков Д.М., Заводчиков В.М., Соторева В.В., Ятис А.А.* // Сообщение ОИЯИ. P14-91-94. Дубна, 1991. 12 с.
- [7] *Боярко Е.Ю., Буркова И.Е., Евдокимов И.В., Дикарев О.Н., Крючков Ю.Ю., Малютин В.М.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 11. С. 69-72.
- [8] *Черненко Н.В., Черненко Н.Л., Широков Д.М.* Сообщение ОИЯИ. P3-93-11. Дубна, 1993. 14 с.

Поступило в Редакцию
14 августа 1995 г.