

Оптимизация глубинного разрешения в экспериментах с применением РОР/К

И.С.Ташлыков

(НИИ ПФП при БГУ, г.Минск)

Обсуждаются возможности и эффективность оптимизации геометрии опытов, применения электростатических анализаторов в повышении глубинного разрешения при использовании резерфордовского обратного рассеяния ионов в сочетании с их каналированием. Показано, что в экспериментах с оптимизированной геометрией и применением ЭСА достижимы $\Delta x = 3 \dots 5$ и $0,5 \dots 1$ нм.

Метод резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием ионов (РОР/К) применяют для получения информации об элементном составе и совершенстве структуры, пространственном распределении элементов, а также нарушений в приповерхностных слоях твердых тел [1]. Использование для регистрации энергии рассеянных частиц поверхностно-барьерных детекторов с разрешением $\Delta E = 13 \dots 20$ кэВ позволяет в опытах со стандартной геометрией ($\theta_T = 0^\circ$, $\theta = 130 \dots 170^\circ$) достигать глубинное разрешение в разных мишенях $\Delta x = 10 \dots 30$ нм.

Эти условия вполне удовлетворяют требованиям при профилировании примесей или дефектов в слоях мишеней от $40 \dots 60$ нм и более, так как при этом выполняются условия 2...3-кратного превышения толщины слоя над глубинным разрешением анализирующей системы. Также практически отсутствуют ограничения по Δx при изучении интегральных характеристик мишеней, таких как слоевая концентрация примеси, дефектов. В качестве примера на рис. 1 приведены спектры ОР кристаллов $GaAs$, имплантированных ионами Se с $E = 80$ кэВ. Обработка экспериментальных спектров по методике [2] позволяет получить профили дефектов, однако они будут носить качественный характер, так как при $\Delta E_{дет} = 15$ кэВ, $\theta = 150^\circ$ и $\delta E = 4,545$ кэВ имеем $\Delta x = 21$ нм, $\delta x = 6,3$ нм, а глубина залегания максимума пика дефектов меньше, чем 20 нм. Вместе с тем, если нас интересуют механизмы повреждения, процессы, протекающие при аморфизации кристаллов, то приведенные на рис. 1 спектры позволяют, рассчитав слоевую концентрацию дефектов, построить требуемые кривые. Например, зависимости N_D от дозы внедренных ионов Zn^{2+} , As^+ и Se^+ , представленные на рис. 2 в логарифмических координатах, имеют при наборе соответствующей статистики во время снятия спектра неопределенность всего 1...3%. Ход кривых 1...3 на рис. 2 свидетельствует о наличии двух стадий в повреждении структуры $GaAs$ ионами Zn^{2+} и As^+ ($E = 60$ кэВ), и Se^+ ($E = 80$ кэВ). На первой из них наблюдается последовательное накопление дефектов, приводящее к аморфизации имплантированного слоя при дозах $1 \dots 2 \cdot 10^{14} Zn^{2+}/cm^2$, $1 \dots 2 \cdot 10^{15} As^+/cm^2$ и $7 \dots 9 \cdot 10^{13} Se^+/cm^2$, а на второй — слоевая концентрация дефектов увеличивается из-за утолщения аморфизованного слоя с дозой. В отличие от повреждения $GaAs$ легкими ионами, например, N^+ [3], Al^+ и P^+ [4] (когда для плотности выделенной в каскадах столкновений энергии реализуются условия $\eta < 0,02$ эВ/ат), которое осуществляется в три стадии по гомогенному механизму, фазовая перестройка структуры $GaAs$ при имплантации ионов As^+ и Se^+ ($\eta = 0,4$ и $0,5$ эВ/ат) осуществляется в соответствии с гетерогенным механизмом аморфизации [5]. Коэффициент наклона на первой стадии кривой 1 на рис. 2 $m = 5$ не соответствует ожидаемому ($m < 1$ при $T_{комн}$) для гетерогенной модели аморфизации полупроводников ускоренными ионами. Поэтому, чтобы установить механизм аморфизации $GaAs$ ионами Zn^{2+} , требуются дополнительные опыты, в частности, с изменением η или плотности ионного тока j [6].

Среди способов повышения глубинного разрешения известны: оптимизация геометрии эксперимента [7] и применение электростатического (ЭСА) или электромагнитного анализатора энергии рассеянных ионов [8]. В первом из них используют то, что $\Delta x \sim \Delta E / [E]$, где $[E]$ — фактор тормозного сечения, который определяется из

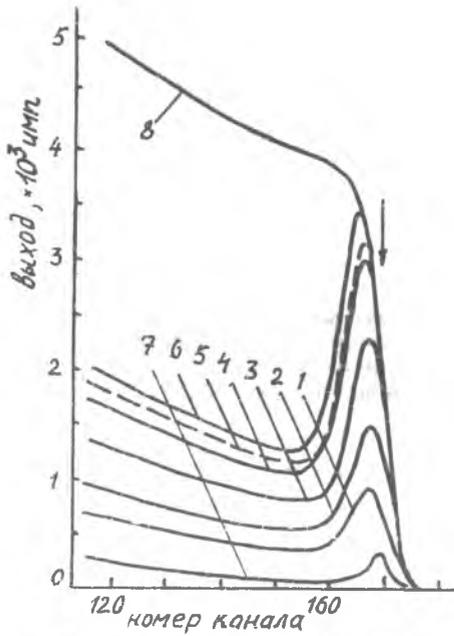


Рис. 1. Осевые спектры ОР ионов He^+ с $E_0 = 1$ МэВ ($\theta = 150^\circ$) кристалла (III) - $GaAs$, имплантированного при $T_{комн}$ ионами Se^+ с $E = 80$ кэВ доза-ми: 1 - $4,2 \cdot 10^{42} \text{ см}^{-2}$; 2 - $8,3 \cdot 10^{42} \text{ см}^{-2}$; 3 - $1,7 \cdot 10^{43} \text{ см}^{-2}$; 4 - $3,5 \cdot 10^{43} \text{ см}^{-2}$; 5 - $6,9 \cdot 10^{43} \text{ см}^{-2}$; 6 - $1,7 \cdot 10^{44} \text{ см}^{-2}$; 7 - исходный; 8 - рэндом

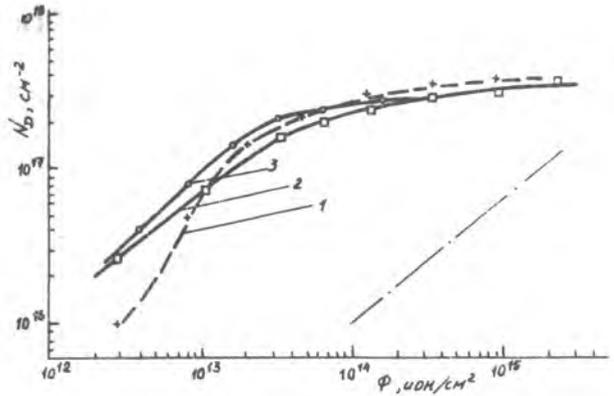


Рис. 2. Дозовая зависимость повреждения $GaAs$, имплантированного при $T_{комн}$ ионами с $E = 60$ кэВ: 1 - Zn , $j = 20 \dots 40$ нА/см²; 2 - As , $j = 20 \dots 60$ нА/см²; 3 - Se , $j = 4 \dots 8$ нА/см² $E = 80$ кэВ. Штрих-пунктирной линией обозначен наклон с $m = 1$

$$[\varepsilon] = \frac{1}{\cos \theta_1} \cdot k \cdot \varepsilon_{вх} + \frac{1}{|\cos \theta_2|} \varepsilon_{внх}$$

здесь $\varepsilon_{вх}$ и $\varepsilon_{внх}$ - значения тормозных сечений анализирующих ионов на влете и вылете из мишени. С подбором оптимальных θ_1 и θ_2 возможно доведение Δx до 3...5 нм. Во втором способе, не отвергая возможностей использования первого, применяют высокое разрешение по энергии, которое составляет в ЭСА около 0,5...0,7% в интервале энергии рассеянных ионов в несколько сот килоэлектронвольт. Поэтому на разных мишенях достижимо $\Delta x = 0,5 \dots 1$ нм.

Об эффективности оптимизации геометрии в улучшении Δx можно судить по спектрам ОР, представленным на рис. 3. При изменении стандартных условий снятия спектров ($\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 12$, $\theta = 168^\circ$) путем вращения образца вокруг вертикальной оси ($\theta_1 = 70$, $\theta_2 = 58$, $\theta = 168^\circ$) линейная ширина канала δx уменьшается с 4,2 нм/канал до 1,83 нм/канал ($\delta E = 5$ кэВ). В результате становится возможным определение таких параметров, как пробег ионов, в частности, серебра с $E = 40$ кэВ в никеле, страгглинг пробега. Изменения спектра 2 на рис. 3 в области 280...305 каналов связаны с повышением чувствительности к выходу ОР от атомов никеля, концентрация которых на поверхности меньше из-за частичного замещения внедренным серебром. Здесь же представлен спектр ОР, полученный в геометрии малоуглового рассеяния ($\theta_1 = 0$, $\theta_2 = 81$, $\theta = 99^\circ$), когда $\delta x = 1,03$ нм/канал. В этих условиях оказывается возможным проследить уже профиль распределения имплантированного в никель серебра. В частности, очевидно, что на профиле кроме максимума на глубине, соответствующей проекции пробега в никеле ускоренных ионов Ag^+ ($R_p = 9,5$; $\Delta R_p = 4,1$ нм), имеется пик на поверхности. Появление последнего объясняется накоплением серебра на поверхности из-за распыления никеля при дозах внедряемых ионов Ag^+ выше 10^{16} см^{-2} .

Весьма информативны данные о динамике и механизмах радиационного повреждения имплантированных структур, которые получаются в экспериментах с высоким глубинным разрешением. Например, при проведении экспериментов в условиях малоуглового рассеяния с каналированием было установлено, что при внедрении в арсенид галлия ионов P^+ с $j = 0,5$ мкА/см² формируется меньше радиационных нарушений, чем при $j = 5$ мкА/см², и они локализируются на поверхности при дозах ионов, когда еще отсутствует аморфизация имплантированного слоя [6].

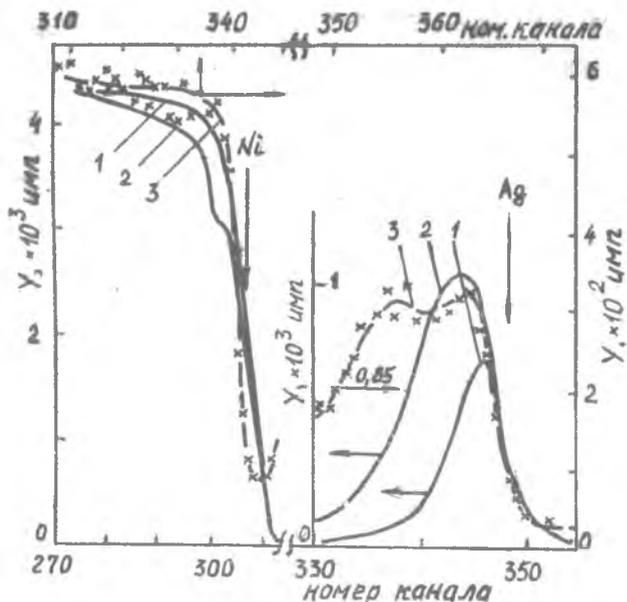


Рис.3. Спектры ОР ионов He^+ с $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ никеля, имплантированного ионами Ag^+ с $E = 40 \text{ кэВ}$ и $D = 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, полученные в условиях различного разрешения по глубине ($\Delta E = 22 \text{ кэВ}$, $\delta E = 5 \text{ кэВ}$): 1 - $\delta x = 4,2 \text{ нм}$; 2 - $\delta x = 1,83 \text{ нм}$; 3 - $\delta x = 1,03 \text{ нм}$

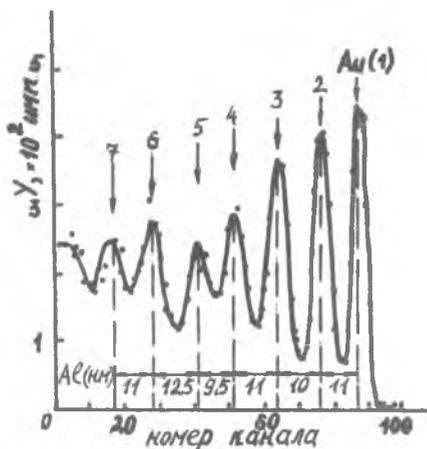


Рис.4. Спектр ОР ионов He^+ с $E_0 = 250 \text{ кэВ}$; $\Theta = 127^\circ$, многослойной структуры Au-Al [8]

Следует отметить, что глубинное разрешение в экспериментах с применением ОР ограничивается увеличением страгглинга энергии ионов гелия с глубиной и разброса их энергии из-за процессов многократного рассеяния и существенно ухудшается с глубиной анализа. Тестовые опыты со специальной многослойной мишенью, рис. 4, которая состояла из последовательно напыленных слоев Au и Al расчетной толщины 10 и 1 нм соответственно, показали, что сигнал от слоев золота разрешается до глубины только 70 нм, а Δx на этой глубине оценивается только 5...8 нм, когда на поверхности оно составляло 0,5 нм [8].

В заключение отметим, что имеется ряд особенностей в реализации того или иного пути снижения Δx . В частности, наряду с применением определенной формы диафрагм анализирующего пучка, плотностей тока ионов в пучке и других параметров, возникает необходимость предварительного точного ориентирования поверхности мишени, ее кризоащиты, а следовательно, создания специальной конструкции мишенной камеры с форкамерой и загрузочной мишенью с применением манипулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кумахов М.А., Ташлыков И.С. // Поверхность. физ.хим., механика, 1983. Т.2.С.5-20.
2. Bogh E. // J.Phys., 1968. Vol. 46. P. 653 - 659.
3. Ahmed N.A.G. // Rad.Eff., 1980. Vol. 52. P. 211 -224.
4. Дэвис Дж., Ташлыков И.С., Томпсон Д.А. // Физ.техн.полупр. 1982.Т.16.Вып.4.С.577-581.
5. Carter G., Elliman R.G. // Rad. Eff. Lett., 1983. Vol. 68, P.155 -161.
6. Ташлыков И.С., Картер Г., Нобс М. // Физ.техн.полупр., 1986.Т.20.Вып.5.С.785-788.
7. Williams J.S. // Nucl.Instr.Meth., 1975. Vol. 126. P. 205 - 215.
8. Feuerstein A., Grahmann H., Kalbitzer S., Oetzmann H. // Ion beam surface analysis. London, 1976, p. 471 - 481.

Статья поступила в редколлегию 20.02.1987
в редакцию 31.03.1987