

- [3] Г и л и н с к и й И.А., Щ е г л о в И.М. Препринт № 17. Новосибирск. ИФП СО АН СССР. 1987.
- [4] Д е Ж е н П.Ж. Сверхпроводимость металлов и сплавов. М.: Мир. 1968.
- [5] Г о р ь к о в Л.П., Э л и а ш б е р г Г.М. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. В. 2. С. 612-626.
- [6] Ц а р е в с к и й С.Л. // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. В. 5. С. 1903-1910.
- [7] С у х у Р. Магнитные тонкие пленки. М.: Мир. 1967.
- [8] Ф и л и п п о в Б.Н. Препринт № 80/1. Свердловск. ИФМ УНЦ АН СССР. 1980.

Институт радиотехники
и электроники АН СССР

Поступило в Редакцию
6 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 11

12 июня 1989 г.

11; 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ФЕРРИТ-ГРАНАТОВ МЕТОДОМ POP

Е.Ю. Б о я р к о, И.Е. Б у р к о в а,
И.В. Е в д о к и м о в, О.Н. Д и к а р е в,
Ю.Ю. К р ю ч к о в, В.М. М а л ю т и н

За последние десятилетия оптические системы связи завоевали прочное место на мировом рынке. Этот успех обусловлен развитием и внедрением разнообразной по функциональным возможностям элементной базы, особое место в которой занимают устройства на основе магнитооптических явлений. В первую очередь к ним относятся оптические вентили, циркуляторы и переключатели. Эти устройства объединяет наличие фарадеевского элемента, изготавливаемого с помощью прогрессивной технологии эпитаксиального выращивания монокристаллических пленок, замещенных редкоземельными элементами феррит-гранатов иттрия. Такая технология позволяет синтезировать эпитаксиальные структуры с заранее заданными магнитооптическими характеристиками. Однако для прогнозирования этих характеристик необходимо точно определять и контролировать состав пленок.

В данной работе изучалась возможность использования метода обратного резерфордского рассеяния ионов (POP) для определения состава эпитаксиальных пленок феррит-гранатов и их однородности по глубине. Экспериментальные исследования проводились на циклотроне У-120 НИИ ЯФ при Томском политехническом институте. В качестве анализирующего использовался пучок ионов ${}^4\text{He}^+$ с энергией $E_0 = 4.5-5$ МэВ и энергетическим разбросом в пучке

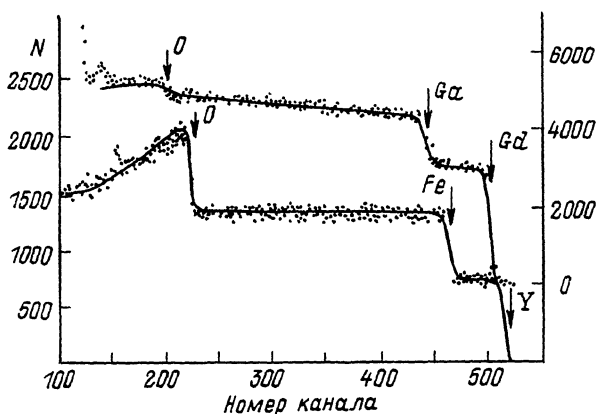


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и моделированные (сплошные линии) спектры РОР для монокристаллов $Y_3Fe_5O_{12}$ (нижний) и $Gd_3Ga_5O_{12}$ (верхний). Стрелками отмечены каналы, соответствующие рассеянию с поверхности на указанных элементах.

1%. Угол рассеяния составлял $\theta = 170^\circ$. Выбор угла рассеяния и энергии обусловлен улучшением массового разрешения метода с ростом θ и E_0 , что позволило значительно повысить информативность экспериментальных спектров. Для исключения возможности влияния каналирования на форму энергетического спектра обратного рассеянных частиц образцы во время проведения эксперимента вращали вокруг направления $\langle 111 \rangle$.

На рис. 1 приведены экспериментальные спектры монокристаллов иттриевого феррит-граната ($Y_3Fe_5O_{12}$) и галлий-гадолиниевого граната ($Gd_3Ga_5O_{12}$), использовавшихся в качестве эталонных образцов. Из рисунка видно, что «ступеньки» парциальных спектров хорошо выделяются для всех элементов, что важно при проведении многоэлементного анализа. Сечение упругого рассеяния на ядрах тяжелых элементов в данном случае аналитически описывается формулой Резерфорда с поправкой на экранирование, т.к. кулоновский барьер взаимодействия выше энергии падающих ионов, а сечение упругого рассеяния на ядрах кислорода носит уже нерезерфордовский характер, о чем свидетельствует форма соответствующего парциального спектра. Это создавало некоторые трудности при интерпретации экспериментальных данных, но позволило повысить чувствительность в определении наиболее легкой компоненты – кислорода, т.к. при $E = 4.5$ МэВ $\sigma/\sigma_{Ruth} = 2.5$, а при $E = 4.95$ МэВ $\sigma/\sigma_{Ruth} = 9.1$ [1].

Для обработки экспериментальных данных использовался компьютерный анализ спектров, в основе которого лежит методика моделирования спектра РОР для заданных параметров модели образца и последующего его сравнения с экспериментальным по критерию

совпадения площади как на отдельных выделенных участках („ступеньках“), так и в области перекрывающихся участков спектра. За окончательный вариант модели образца принимается тот, для которого модельный спектр совпал с экспериментальным с заданным критерием согласия. Для алгоритмизации процесса подгонки спектров использовалось соотношение $N_i^{\text{ЭК}} - N_i^{\text{МОД}} \sim \Delta x_i$, и новое значение относительной атомной доли i -й компоненты задавалось в виде $x_i^{(n)} = x_i^{(n-1)} + \Delta x_i$. Энергетический спектр POP генерируется в приближении однократного рассеяния с использованием аналитических выражений для энергии рассеяния [2] и полуэмпирических формул для вычисления тормозных способностей [3]. Методика учитывает влияние на форму спектра страгглинга энергетических потерь ионов в образце, многократного рассеяния ионов, экранирования ядра электронами (поправка к сечению резерфордовского рассеяния), а также конечного энергетического разрешения спектрометрического тракта и нелинейности энергетической шкалы анализатора. Сечения рассеяния ионов ядрами легких элементов корректируются на основе табулированных значений соотношения G/G_{Ruth} в заданном диапазоне энергий. Дополнительно в процедуру анализа спектров включена предварительная обработка экспериментальных данных, необходимая для создания исходной модели образца, в основу которой положен метод обратной итерации, когда все парциальные спектры информационно значимы.

Анализ эталонных образцов позволил проверить работоспособность методики моделирования с коррекцией сечений рассеяния на ядрах кислорода. Моделированные спектры для составов $Y_3Fe_5O_{12}$ и $Gd_3Ga_5O_{12}$ также представлены на рис. 1. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными: достигнут критерий совпадения площадей 0.5%, а величина стандартного отклонения (СО), характеризующая степень близости формы моделированного и экспериментального спектров, оказалась не хуже $5 \cdot 10^{-3}$ по всему спектру.

На следующем этапе был проведен анализ эпитаксиальных феррит-гранатовых пленок с исходными стехиометрическими формулами: $Bi_{0.6}Y_{2.4}Ga_{4.1}Fe_{3.9}O_{12}$ и $Y_3Fe_5O_{12}$. На рис. 2 приведены экспериментальные спектры POP, полученные для этих образцов. „Ступеньки“ парциальных спектров хорошо выделяются для всех элементов кроме Ga , что обусловлено его низким содержанием. Поэтому точность определения содержания Ga ниже по сравнению с другими элементами. Моделированный спектр для состава $Bi_{0.6}Y_{2.4}Ga_{4.1}Fe_{3.9}O_{12}$ (кривая А) не удовлетворяет заданному критерию согласия. В качестве оптимального с точки зрения соответствия площадей и величины СО для данного образца был определен равномерный по глубине состав: $Bi_{0.5}Y_{2.5}Ga_{0.8}Fe_{4.2}O_{12}$ (кривая Б). Анализ второй пленки показал наличие в ее составе неконтролируемой технологической примеси Pt . С помощью метода обратной итерации найдена начальная модель образца с содержанием Pt 0.09 формульных единиц. Последующие расчеты показали, что экспериментальный спектр хорошо описывается спектром, смоделированным для равномерного по глубине состава

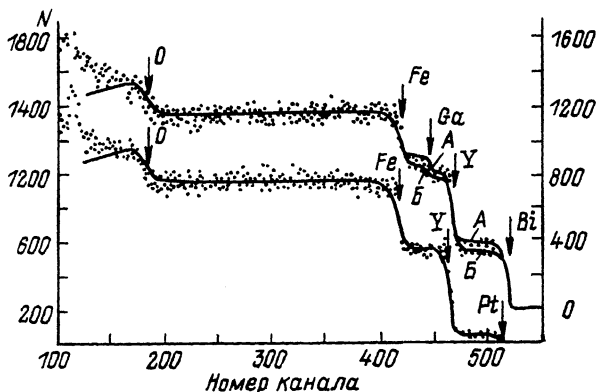


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и моделированные (сплошные линии) спектры РОР для эпитаксиальных пленок с исходными составами $Y_3Fe_5O_{12}$ (нижний) и $Bi_{0.6}Y_{2.4}Ga_{1.1}Fe_{3.9}O_{12}$ (верхний). Стрелками отмечены каналы, соответствующие рассеянию с поверхности на указанных элементах.

$Pt_{0.07}Y_{2.93}Fe_5O_{12}$. Для пленок феррит-гранатов было достигнуто совпадение площадей 1%, а величина СО составила $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Глубина анализа пленок методом РОР составляла 0.8–1 мкм.

Таким образом, использование метода РОР в сочетании с математическим моделированием позволило определить основной относительный атомный состав эпитаксиальных пленок, определить содержание неконтролируемых технологических примесей тяжелых элементов и их распределение по глубине. Необходимо отметить, что массовое разрешение метода РОР ухудшается с ростом A , поэтому при проведении анализа состава феррит-гранатовых пленок, содержащих атомы двух и более тяжелых элементов (Bi, Pt, Pb, Au и т.д.), необходимо наряду с РОР использовать и другие методы неразрушающего анализа для идентификации этих элементов.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] L e a v i t t J.A., S t o s s P., C o o p e r D.B., et al. // Nucl. Inst. & Meth. 1986. В 15. P. 296-299.
- [2] C h u W.K., Z i e g l e r J.F. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. P. 2768.
- [3] Z i e g l e r J.F. Helium Stopping Powers and Ranger in All Elements. Pergamon Press. Oxford, 1977.

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте им. С.М. Кирова

Поступило в Редакцию
11 апреля 1989 г.