

- [2] Александров К. С., Васильев А. Д., Звездинцев С. А. и др. Препринт ИФ СО АН СССР. № 475Ф. Красноярск, 1988. 31 с.  
[3] Лепишев А. А., Нагибин Г. Е., Тропин Ю. Д. // Физика магнитных полупроводников. Красноярск, 1980. С. 90—98.

Институт физики  
им. Л. В. Киренского СО АН СССР  
Красноярск

Поступило в Редакцию  
5 августа 1988 г.

11; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 8, 1989

## ПРИЛОЖЕНИЕ МЕТОДИКИ РОР С ПРЕЦИЗИОННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ К АНАЛИЗУ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК

О. Ф. Афонин, Б. В. Викторов, В. К. Еремин, Н. Б. Строкан

Среди ядерно-физических методов исследования состава и строения твердого тела наблюдение Резерфордского обратного рассеяния (РОР) является наиболее информативным из неразрушающих способов анализа приповерхностных областей многокомпонентных структур либо непосредственно пленок. В последнее время интерес к методу РОР возрос, что стимулировано задачами физики и техники структур с микронными и субмикронными слоями переменного состава. Такие структуры, как известно, лежат в основе современной микроэлектроники, а также сверхпроводящей техники ближайшего будущего. В этой связи определились перспективные требования к точности метода, связанные с разделением элементов с близкими массами, например In и Sb, Y и Sr, Ga и As, при разрешающей способности по глубине до десятков ангстрем.

Напомним, что уровень разрешающей способности метода по массе и координате слоя определяется двумя факторами: степенью монохроматичности пучка зондирующих ионов и разрешением по энергии спектрометра рассеянных частиц. Первое условие успешно реализовано как в оптимальных для практики линейных ускорителях Ван де Графа (монохроматичность пучка  $\sim 10^{-4}$ ), так и на изохронных циклических ускорителях. В результате ограничивающим фактором выступает уровень разрешающей способности спектрометра. В стандартных устройствах с поверхностно-барьерными детекторами величина энергетического разрешения не превосходит 15 кэВ [1] (при среднем значении 20—30 кэВ), что ограничивает диапазон определения атомов, отличающихся на 1 а. е. м. значениями массового числа  $\approx 35$  а. е. м., и обеспечивает локальность по глубине  $\geq 100 \text{ \AA}$  при энергии ионов гелия  $\approx 2$  МэВ. Ниже показано, что использование планарных Si детекторов со встроенным электрическим полем [2, 3] приводит к принципиальному улучшению аналитических возможностей метода.

В работе использовались отечественные детекторы с рекордной разрешающей способностью  $\approx 8$  кэВ для естественных  $\alpha$ -частиц при уровне шума 2.5—3 кэВ. Эксперименты были выполнены на пучке изохронного циклотрона МГЦ-20. Ускоренные до энергии 2.9 МэВ однозарядные ионы гелия-4 проводились через магнитный анализатор, снижающий энергетический разброс в пучке до значения 0.1 % ( $\leq 3$  кэВ), и направлялись в камеру рассеяния. Диаметр входного коллиматора 5 мм, расстояние от мишени до детектора 3 см. Угол регистрации рассеянных ионов составлял  $165^\circ$  относительно падающего по нормали пучка. Рабочий ток на мишень лежал в диапазоне 50—100 нА.

Спектрометр рассеянных ионов состоял из планарного Si детектора, изготовленного в ЛФТИ [2], зарядочувствительного и спектрометрического усилителей формы ORTEC типа 142А и 572 соответственно и амплитудного анализатора АИ-1024-95М либо АМА 02 Ф1 (8192 канала). Перед детектором были помещены две диафрагмы диаметром 1.5 мм, исключающие попадание рассеянных ионов и ультрафиолетового излучения, генерируемого пучком на мишени, на нерабочую область детектора. Аппаратурная ширина линии детектора, установленного в камеру рассеяния при работающем циклотроне, составляла по  $\alpha$ -частицам источника  $^{238}\text{Pu}$  ( $E_\alpha = 5499$  кэВ) 8.5 кэВ при ширине линии генератора 3.5 кэВ.

Существенное улучшение энергетического разрешения по сравнению со стандартным уровнем  $\approx 20$  кэВ дало возможность восстанавливать детали профиля распределения элементов по глубине мишени с точностью  $\approx 50 \text{ \AA}$ , не прибегая к сложным математическим алгоритмам. Наиболее эффективно это преимущество проявилось при анализе тонких слоев (до  $1000 \text{ \AA}$ ), когда разброс энергии частиц, обусловленный страгглингом, меньше аппаратурной пирины линии спектрометра. В качестве примера на рис. 1 представлен спектр обратного

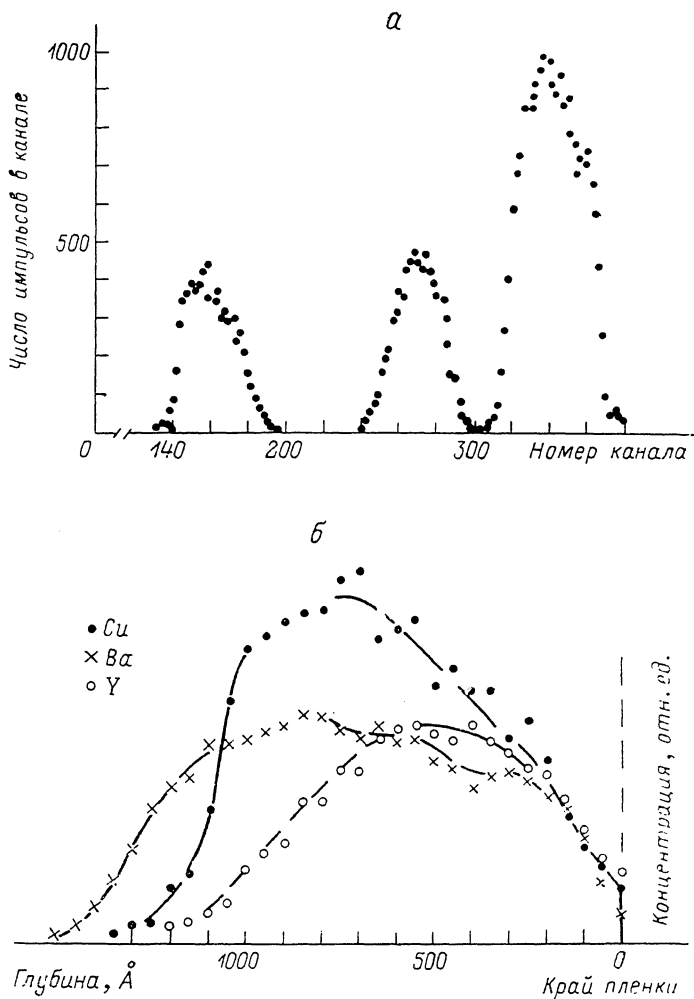


Рис. 1. Фрагмент спектра обратного рассеяния ионов  $\text{He}^+$  от пленки керамики состава  $\text{YBaCu}$  на кремниевой подложке (а) и восстановленные из формы пиков распределения элементов по глубине (б).

Начальная энергия ионов  $2.95 \text{ МэВ}$ , угол рассеяния  $165^\circ$ , падение пучка нормальное.

рассеяния от пленки керамики толщиной  $\approx 1000 \text{ \AA}$ . Отчетливо проявившиеся особенности в форме спектров элементов позволили, не прибегая к машинной обработке, получить распределение каждого «тяжелого» элемента пленки ( $\text{Y}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Cu}$ ) по ее глубине (рис. 1, б). Восстановленное распределение элементов выявило существенную неоднородность пленки по составу с сильным отклонением от требуемой стехиометрии  $\text{Y}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3$ .

Пример решения второй задачи — определения концентрации элементов с близкими массами в «толстых» пленках приведен на рис. 2. Спектр РОР слоя  $\text{Co-Mn}$  шпинели толщиной  $1 \text{ мкм}$ , нанесенной на ситаловую подложку, представлен на рис. 2, а. Для сравнения на рис. 2, б приведен также спектр, полученный на стандартном поверхностно-барьерном детекторе, имеющем разрешение  $\approx 25 \text{ кэВ}$ . Видно, что края спектров от  $\text{Co}$  и  $\text{Mn}$ , различающиеся по энергии на  $42.5 \text{ кэВ}$ , сильно замыты в случае поверхностно-барьерного, но уверенно разделяются на спектре планарного детектора. При этом появляется возможность проследить

за однородностью состава на глубине  $\approx 100 \text{ \AA}$  от поверхности. Представленные для двух типовых задач возможности планарных детекторов показывают их существенные преимущества по сравнению с традиционными поверхностно-барьерными. Очевидно, что приведенные

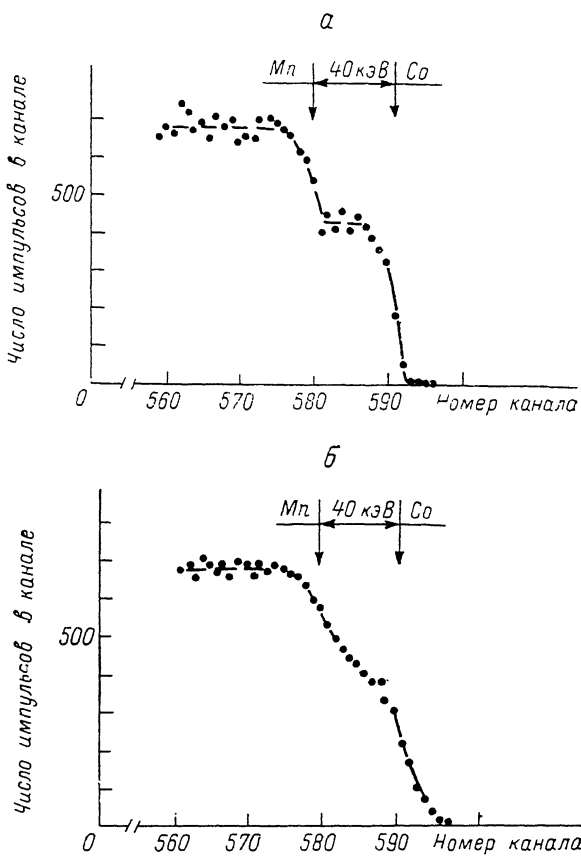


Рис. 2. Фрагменты спектра обратного рассеяния ионов  $\text{He}^+$  от пленки  $\text{Co-Mn}$  шпивели, полученные на планарном  $\text{Si}$  детекторе (а) и на стандартном поверхностно-барьерном детекторе типа ДКПсд-50-11А (б).

Разрешение детектора для  $E_\alpha = 5.499 \text{ МэВ}$  8.5 (а) и 25 кэВ (б).

примеры доказывают лишь перспективность таких детекторов, но не исчерпывают заложенных в их использовании потенциальных возможностей.

В заключение авторы выражают благодарность В. Л. Суханову и сотрудникам его группы за изготовление детекторных структур.

### Список литературы

- [1] Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Ташликов И. С. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. Минск, 1987. 256 с.
- [2] Еремин В. К., Вербицкая Е. М., Маляренко А. М. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 1987—1989.
- [3] Вербицкая Е. М., Еремин В. К., Маляренко А. М. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 9. С. 565—568.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
1 сентября 1988 г.