

## ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПАКЕТ ДЛЯ ЯДЕРНОГО МИКРОАНАЛИЗА

Д. Л. Коган, А. М. Казанцев, Л. Е. Кузьмин

*Реферат статьи, принятой к публикации журналом  
Nuclear Instruments & Methods in Physical Research*

Рассмотрен новый подход к обработке энергетических спектров ядерных реакций (ЯР) и резерфордовского обратного рассеяния (РОР) в ядерном микроанализе, реализованный в интегрированном пакете BEAM EXPERT 1.5 для IBM-совместимых компьютеров. В отличие от известной программы обработки спектров РОР, основанной на моделировании и ручной подгонке, BEAM EXPERT 1.5 требует только установки качественных начальных данных. Концепция пакета основана на универсальной математической модели, единым образом описывающей спектры ЯР и РОР и обеспечивающей возможность их совместной обработки. BEAM EXPERT 1.5 позволяет рассчитывать элементный состав, толщину слоев, профили концентрации элементов и дефектов по глубине многослойных многокомпонентных пленочных структур.

Интегральное уравнение для парциального спектра от каждого слоя и элемента включает функцию возбуждения ЯР или РОР, профиль концентрации, функцию отклика детектора, распределение потерь энергии на входном и выходном каналах ЯР или РОР. Полный спектр от многоэлементного и многослойного образца, являющийся суперпозицией парциальных спектров и шума измерений, в матричной форме имеет вид

$$Y = \sum_{l=1}^I \sum_{i=1}^{L_i} \sum_{j=1}^{J_{il}} A_{ilj}(c, b) c_{il} + v, \quad (1)$$

где  $Y$  – вектор исходного спектра длины  $N$ ;  $i = 1, 2, \dots, I$  – номер слоя,  $I$  – число слоев;  $l = 1, 2, \dots, L_i$  – номер элемента в слое  $i$ ;  $j = 1, 2, \dots, J_{il}$  – номер соответствующей ЯР или РОР;  $c_{il}$  – вектор профиля концентрации длины  $M_i$ ;  $A_{ilj}$  – матрица размерности  $N \times M_i$ ;  $b$  – вектор границ слоев длины  $I$ ;  $v$  – случайный вектор шума измерений длины  $N$ .

Решение уравнения (1) относительно  $c_{ij}$  и  $b$  представляет собой нелинейную некорректную задачу. Для ее решения разработан итеративный регуляризирующий алгоритм, основанный на методе редукции Пытьева. Каждая итерация включает решение линейной некорректной задачи и пересчет ее параметров. Одним из его достоинств является возможность получения погрешности в точке. Но главное преимущество метода редукции состоит в том, что он позволяет синтезировать регуляризирующий алгоритм с заданными свойствами, учитывающий априорные данные. Сходимость алгоритма была проверена на модельных и экспериментальных спектрах.

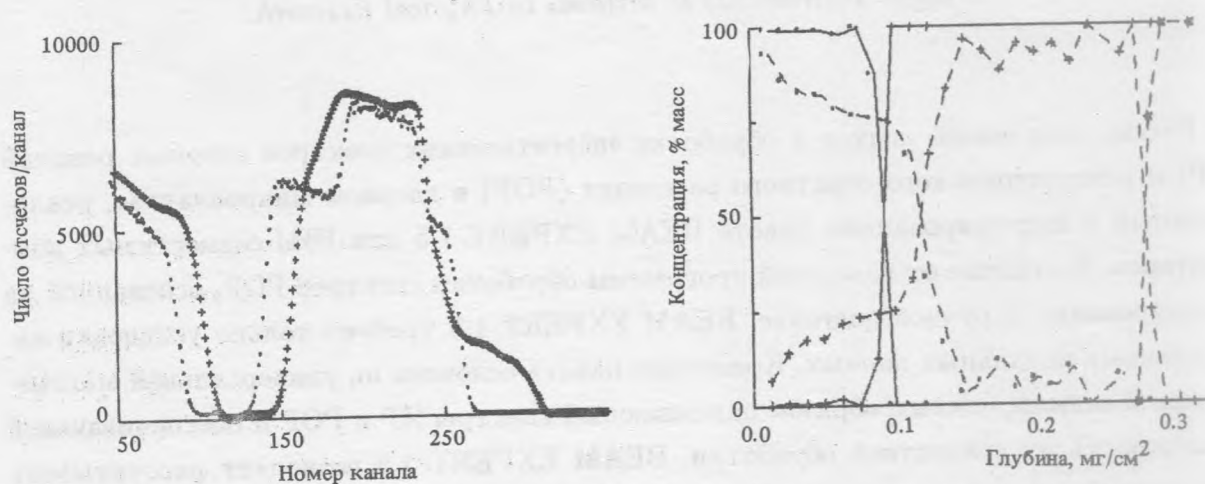


Рис. 1. Энергетический спектр ROP (1.45 МэВ He) от пленочной структуры на кремнии: 1 – без отжига; 2 – после отжига; сплошная линия – модельный спектр.

Рис. 2. Профили концентрации для спектра рис. 1: 1 – кремний; 2 – алюминий; 3 – титан; сплошная линия – без отжига; пунктир – после отжига.

Рассмотрено применение ВЕАМ EXPERT 1.5 для различных объектов. В качестве примеров на рис. 1 приведены спектры ROP ионов  ${}^4\text{He}^+$  (1.45 МэВ) от пленочной структуры  $\text{Al}(11.7 \text{ мкг}/\text{см}^2)$ ,  $\text{Ti}(16.4 \text{ мкг}/\text{см}^2)$  на кремниевой подложке до и после отжига при  $500^\circ\text{C}$  продолжительностью 10 мин. Соответствующие профили концентрации представлены на рис. 2. После отжига наблюдается взаимодиффузия компонентов структуры. На рис. 3 приведены спектры обратного рассеяния каналированных в направлении  $\langle 100 \rangle$  ионов  ${}^4\text{He}^+$  ( $E = 1.4 \text{ МэВ}$ ) для кремния, имплантированного ионами  $\text{Co}^+$  при энергии 290 кэВ, дозе  $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и различных временах отжига. На рис. 4 представлены соответствующие профили концентрации дефектов. Как видно из рисунков, с увеличением времени отжига наблюдается уменьшение толщины дефектной

пограничной области до величины проективного пробега  $Co^+$ .

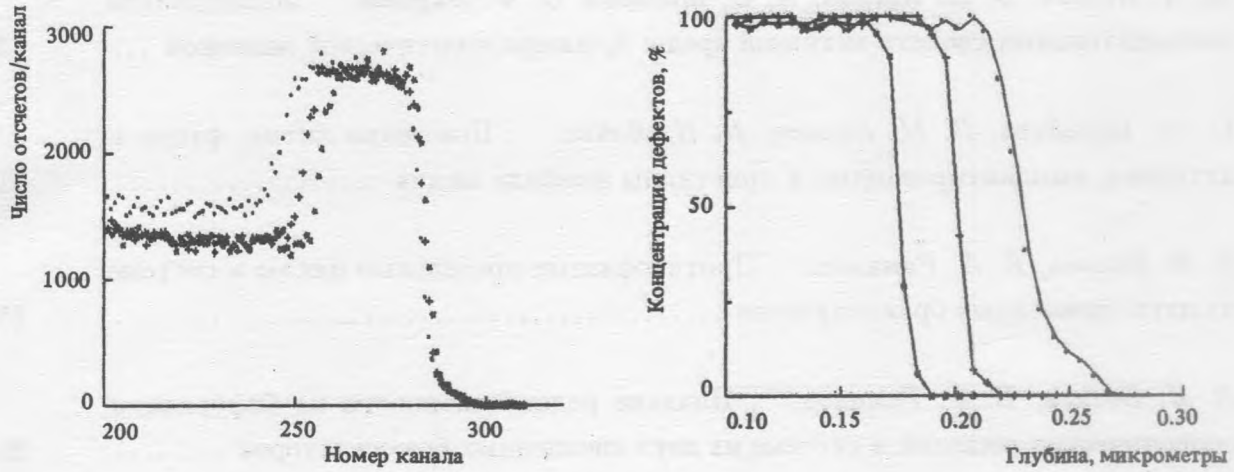


Рис. 3. Энергетический спектр РОР каналированных ионов He (1.4 МэВ) от Si имплантированного Co: 1 - без отжига; 2, 3 - после отжига длительностью 60 и 120 мин; сплошная линия - модельные спектры.

Рис. 4. Профили концентрации дефектов для спектров рис. 3: 1 - без отжига; 2, 3 - отжиг 60 и 120 мин соответственно.

Поступила в редакцию 8 декабря 1993 г.