

01; 10; 11

© 1991

МИКРОТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЭМ

А.В. Бронников, А.Е. Булышев,
Т.А. Гаврилова

Использование растрового электронного микроскопа (РЭМ) для определения пространственной структуры микрообъектов было предложено в [1, 2]. В этих работах изменение энергии зондирующего луча позволяло менять глубину слоя, с которого идет сигнал отраженных электронов, и качественно определять пространственную структуру микрообъекта. В настоящей работе предложена схема измерения и алгоритм обработки, позволяющие количественно оценивать микроструктуру объектов. Исследование проведено на математической модели и на специально изготовленном тестовом образце. Для простоты рассмотрен слоистый объект и исследуется его структура в направлении по нормали к поверхности. В приближении однократного рассеяния можно записать уравнение, связывающее концентрацию рассеивающих ядер с током отраженных электронов:

$$I(\theta, E) = \int_0^{\infty} K(\theta, x, E) n(x) dx; \quad (1)$$

$I(\theta, E)$ – ток отраженных электронов в зависимости от угла падения и энергии электронов зондирующего луча, x – координата вглубь образца, $n(x)$ – концентрация рассеивающих ядер. Вообще говоря, ядро уравнения (1) зависит от концентрации $n(x)$ и от заряда ядер Z . Линейное приближение будет справедливо лишь для случая, когда исследуемая структура вносит небольшой вклад в общее затухание зондирующего электронного луча и измеряется разница тока от однородного фона и от исследуемой структуры. В результате вышесказанного ядро уравнения может быть представлено в виде:

$$K(\theta, x, E) = I_0 \int \exp(-\chi(x, E) \times \left(\frac{1}{\cos \theta} + \frac{1}{\cos \varphi} \right) \times \sigma(x, E, n)) d^2 n, \quad (2)$$

где I_0 – ток пучка первичных электронов,

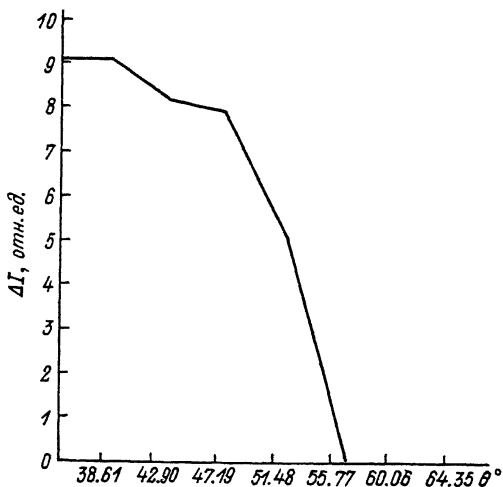


Рис. 1.

$$\chi(x, E) = \int_0^x \alpha(x', E) dx', \quad (3)$$

α – коэффициент ослабления пучка, φ – угол выхода электронов через поверхность образца, σ – сечение рассеяния электронов с энергией E , n – единичный вектор рассеяния. Предполагается, что многократно рассеянные электроны отсекаются за счет энергетической сепарации регистрируемых частиц.

При регистрации тока отраженных электронов можно варьировать энергию зондирующего луча [1, 2], а можно и угол падения луча на поверхность образца. Второй путь нам представляется предпочтительнее, так как изменение угла в нужном диапазоне и на значительном числе точек проще, чем изменение энергии. Модельные вычисления показывают, что наилучший результат дает одновременное изменение и того и другого параметра.

Изменение тока отраженных электронов в зависимости от угла падения зондирующего луча можно легко объяснить, полагая, что луч затухает на определенной длине, определяемой в основном фоном. В этом случае пучок электронов при нормальном падении проникает максимально глубоко в объект, и сигнал рассеяния придет от слоя максимального размера. При изменении угла глубина проникновения будет уменьшаться и, соответственно, рассеяние электронов будет происходить с более близких слоев. Наконец, при скользющем падении рассеяние будет приходиться с поверхностного слоя.

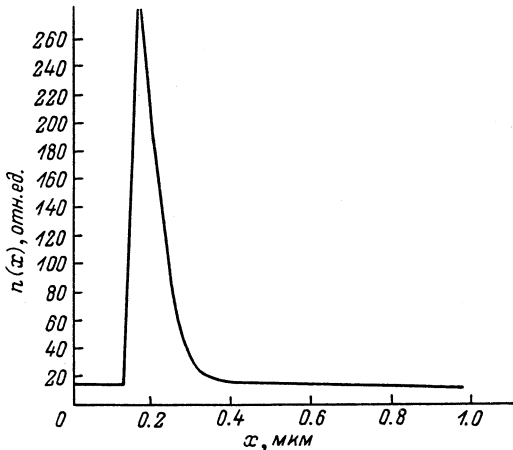


Рис. 2.

Аналогичная картина будет происходить и при варьировании энергии первичного пучка. Пучок с наибольшей энергией будет проникать максимально глубоко, с уменьшением энергии будут рассеивать все более поверхностные слои.

Проводилось численное решение уравнения (1), точнее сказать, его алгебраизованного аналога с использованием метода регуляризации. В качестве модельных решений были взяты трех- и пятислойные структуры. Модельные вычисления подтвердили работоспособность алгоритма решения и позволили выяснить приемлемые значения углов падения и энергий зондирующего луча.

Был проведен эксперимент по определению угловых зависимостей сигнала РЭМ в отраженных электронах от слоистого объекта. С этой целью был изготовлен образец дисилицида фольфрама в кремнии. Измерения проводились при одной энергии при восьми углах наблюдения. Для правильного измерения контраста фотографировалась область, включающая интересующую структуру и фоновое пространство. Фоновое значение потом вычиталось. Кривая зависимости тока от угла наблюдения приводится на рис. 1. Угловая зависимость обязана присутствию более тяжелого вещества в легком.

Было проведено решение уравнения (1) с экспериментально измеренными $I(\theta)$. Результат восстановления приведен на рис. 2. Согласие этих данных с независимой оценкой слоев следует считать удовлетворительным.

Таким образом, реализована томографическая схема исследования микрообъектов с помощью РЭМ. Достигнуто в достаточно простой постановке выделение слоя размером 0.1μ на глубине 0.2μ .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А р и с т о в В.В., Д р е м о в а Н.Н., З а й ц е в С.И. и др. // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 3. С. 611.
- [2] А р и с т о в В.В., Д р е м о в а Н.Н., З а й ц е в С.И., Р а у Э.И. // УП Всес. симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Тез. докл. М., 1991. С. 68.

Поступило в Редакцию
2 октября 1991 г.