

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОНКИХ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

К. В. Киселева, А. Г. Турьянский

УДК 548.732

В работе показана возможность исследования малых изменений плотности тонких приповерхностных слоев с помощью эффекта полного внешнего отражения рентгеновских лучей. В качестве иллюстрации приведены результаты измерения плотности приповерхностных слоев кремния, подвергнутых облучению ионами аргона.

Из теоретических расчетов и экспериментальных данных /1,2/, которые находятся в хорошем согласии с теорией, известно, что глубина проникновения потока излучения при полном внешнем отражении рентгеновских лучей (ПВО) весьма мала и колеблется при длине волны  $\sim 1 \text{ \AA}$  в пределах от нескольких десятков ангстрем для тяжелых материалов до нескольких сотен для легких. Указанное обстоятельство предполагает возможность изучения свойств тонкого поверхностного слоя, например, плотности. Однако реализация таких экспериментов существенно затрудняется громоздкостью вычислений и высокими требованиями к точности определения углового положения образца относительно рентгеновского пучка, так как эффект ПВО наблюдают в узком угловом диапазоне (обычно  $10' - 30'$ ), а смещение наиболее характерной точки  $\psi_{кр}$ , соответствующей критическому углу полного внешнего отражения, при изменении плотности  $\rho$  происходит по закону  $\psi_{кр} \sim 1/\rho$ .

В настоящей работе показано, что при определенных условиях удается значительно повысить точность и упростить обработку результатов измерений.

Известно /3/, что коэффициент отражения рентгеновских лучей при  $\lambda < \lambda_k$ , где  $\lambda_k$  - край поглощения K-электронов материала образца, может быть представлен в виде

$$R(\varphi) = \frac{[\varphi - a(\varphi)]^2 + [b(\varphi)]^2}{[\varphi + a(\varphi)]^2 + [b(\varphi)]^2}, \quad (I)$$

где 
$$[a(\varphi)]^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(\varphi^2 - 2\delta)^2 + 4\beta^2} + (\varphi^2 - 2\delta) \right],$$

$$[b(\varphi)]^2 = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(\varphi^2 - 2\delta)^2 + 4\beta^2} - (\varphi^2 - 2\delta) \right],$$

а  $\delta$  и  $\beta$  соответственно определяют действительную и мнимую части декремента показателя преломления. Рассмотрим поведение коэффициента отражения при изменении только плотности поверхностного слоя образца, например, в результате аморфизации при облучении поверхности быстрыми частицами. В таком случае при любых значениях плотности будет выполняться условие

$$\delta \sim \beta \sim \rho \sim \frac{\rho_0 + \Delta\rho}{\rho_0} = k. \quad (2)$$

Выражая  $\delta$  и  $\beta$  через исходные значения оптических констант в виде  $\delta = k\delta_0$ ,  $\beta = k\beta_0$  и подставляя их в формулу для коэффициента отражения, после алгебраических преобразований легко получаем

$$R_1(\varphi) = \frac{[\varphi/\sqrt{k} - a(\varphi/\sqrt{k})]^2 + [b(\varphi/\sqrt{k})]^2}{[\varphi/\sqrt{k} + a(\varphi/\sqrt{k})]^2 + [b(\varphi/\sqrt{k})]^2} \quad (3)$$

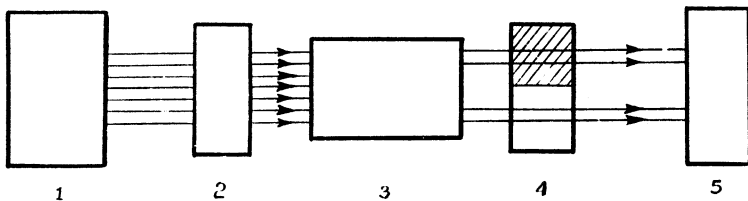
т.е. 
$$R(\delta_0, \beta_0, \varphi/\sqrt{k}) = R(\delta, \beta, \varphi) \quad (4)$$

Отсюда, используя соотношения /2/ и /4/, для малых изменений  $\rho$  находим связь между сдвигом зависимости  $R(\varphi)$  по оси абсцисс и изменением плотности  $\Delta\rho$  в виде

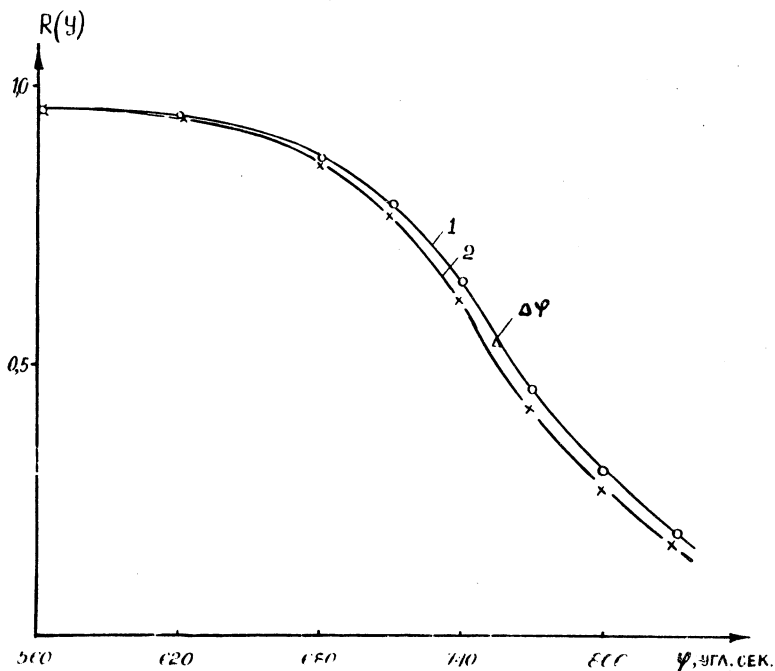
$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta\rho}{2\rho} \quad (5)$$

На рис. I схематически изображен общий вид рентгеновского рефлектометра, использованного в настоящей работе для измерений малых вариаций плотности.

Особенность приведенной схемы по сравнению с известными /2,4/ заключается в том, что измерения проводятся в дифференциальном режиме путем сравнения сигналов от контролируемой поверхности и эталона, причем эталоном и собственно контролируемой поверхностью являются два смежных участка, находящихся на тщательно выверенной на плоскостность измерительной пластине. Эталонной частью пластины является участок исходной поверхности, а



Р и с.1. Схема рентгеновского рефлектометра. 1 - источник излучения; 2 - кристалл-монокристалл; 3 - коллиматор; 4 - измерительная пластина; 5 - детектор излучения



Р и с.2. Угловая зависимость коэффициента отражения исходного (кривая 1) и облученного ионами аргона (кривая 2) участков кремниевой пластины

контролируемой - участок поверхности, подвергнутый какому-либо воздействию (например, бомбардировке быстрыми частицами). На измерительную пластину направляют два пучка, одновременно облучая контролируемый и эталонный участки. Измерения осуществляют вблизи  $\varphi_{кр}$  с тем, чтобы получить максимальное приращение  $R(\varphi)$ .

В качестве примера на рис.2 приведены зависимости  $R(\varphi)$  для кремниевой пластины: кривая 1 соответствует небомбардированному участку, кривая 2 - участку, бомбардированному ионами  $Ar^+$  при дозе  $\sim 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> и энергии  $\sim 30$  кэВ. Как видно из чертежа, в результате бомбардировки происходит снижение плотности поверхностного слоя ( $\Delta\varphi$  отрицательно), оцененное согласно /5/ величиной  $\sim 2,5$  %.

В заключение сопоставим значения ошибок измерения  $\delta\rho/\rho$  при последовательных измерениях со сменой образцов /2,4/ и по вышеуказанной схеме. Если точность измерения углового положения образца относительно рентгеновского пучка  $\delta\varphi$ , то согласно /5/ при  $\delta\varphi \ll \varphi$  имеем в первом случае  $\Delta\rho/\rho$  порядка  $2\delta\varphi/\varphi$ , а во втором  $2\delta\varphi\Delta\varphi/\varphi$ , где  $\varphi$  - угловая координата, относительно которой измеряется смещение абсциссы, а  $\Delta\varphi$  - собственно смещение, обусловленное изменением плотности. Из приведенных формул следует, что в идеальных условиях ошибка при измерениях с эталонном может быть уменьшена на несколько порядков. Однако для каждой конкретной схемы измерения приходится учитывать статистические флуктуации счета, неоднородность чувствительной области детектора, изменения геометрии съемки и т.п. Оценка ошибки, выполненная с учетом указанных факторов, показывает, что реальными для стандартного оборудования являются измерения с точностью  $0,05 + 0,01$  %.

Поступила в редакцию  
25 мая 1976 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. А. И. Алиханов, Л. А. Арцимович. ЖЭТФ, 3, II5 1933.
2. L. G. Parratt. Phys. Rev., 95, 359 (1954).
3. М. А. Илохин. Физика рентгеновских лучей, ГИИЛ, 1957 г., гл. 4, 5.
4. O. Kenner. Czech. J. Phys., B22, 1007 (1972).