

УДК 535.36.2:535.34.62-408.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДВУХВОЛНОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

© 2003 г. Н. Л. Попов, Ю. А. Успенский, А. Г. Турьянский, И. В. Пиршин, А. В. Виноградов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 25.07.2002 г.

В работе описан метод определения шероховатости поверхности по рассеянию рентгеновского излучения с использованием двух длин волн. Показано, что данный метод позволяет отделить диффузное рассеяние рентгеновских лучей, вызванное шероховатостью поверхности, от зеркального отражения лучей от искривленной поверхности. Эта информация дает возможность определить радиус кривизны поверхности и, путем выбора направления с наименьшей кривизной, позволяет минимизировать погрешность определения шероховатости. Опробование данного метода, проведенное на сверхгладких пластинах кремния, дало результаты, находящиеся в хорошем согласии с данными атомно-силовой микроскопии.

ВВЕДЕНИЕ

Современная электроника и рентгеновская оптика предъявляют высокие требования к качеству подложек для изготовления полупроводниковых гетероструктур и многослойных рентгеновских зеркал. Одной из важнейших характеристик качества является уровень шероховатости поверхности [1–3]. Повышенная шероховатость ведет к снижению подвижности носителей заряда в гетероструктурах, а в оптике – к уменьшению коэффициента отражения и ухудшению качества изображения. Это диктует необходимость в быстром и неразрушающем методе контроля, позволяющем измерить корреляционную функцию “шероховатость–шероховатость” или ее фурье-образ – спектральную функцию (в английской терминологии – “power spectral density (PSD) function”).

Для практики наиболее важны значения спектральной функции в интервале $0.001–100 \text{ мкм}^{-1}$, который включает характерные импульсы, переданные при рассеянии электронов, $\sim 50–100 \text{ мкм}^{-1} \sim k_F$ (k_F – импульс Ферми в полупроводнике), и величины обратных длин волн, типичных для рентгеновской оптики. На сегодня не существует прибора, который мог бы измерить спектральную функцию во всем этом диапазоне. Атомно-силовые и сканирующие туннельные микроскопы определяют спектральную функцию при больших значениях импульса ($0.5–2 \cdot 10^4 \text{ мкм}^{-1}$), а оптические профилометры – при малых ($0.002–5 \text{ мкм}^{-1}$). Метод рассеяния рентгеновских лучей используется в наиболее важной средней части этого интервала. Нижний предел импульсов, которые он обеспечивает, теоретически равен: $p_{\min} = 2\pi \sin \theta_0 \Delta \theta_0 / \lambda$, где θ_0 – угол скользющего падения, $\Delta \theta_0$ – расходи-

мость падающего пучка, а λ – длина волны. Для типичных значений параметров $\lambda = 0.154 \text{ нм}$, $\theta_0 = 0.2^\circ$ и $\Delta \theta_0 = 40''$ величина $p_{\min} = 0.03 \text{ мкм}^{-1}$. Значение максимального импульса зависит от мощности источника излучения. При использовании рентгеновской трубки с потоком 10^6 фот./с величина максимального измеряемого импульса составляет $\sim 20 \text{ мкм}^{-1}$. Дополнительными преимуществами рентгеновского метода являются сравнительно малое время сбора данных (несколько минут) и возможность исследования межслоевых границ наноструктур.

При определении спектральной функции рентгеновским методом следует различать два эффекта: диффузное рассеяние излучения, обусловленное шероховатостью поверхности, и угловую расходимость зеркально отраженного луча, вызванную слабым искривлением поверхности (типичный радиус кривизны $10–100 \text{ м}$). Игнорирование искривления поверхности ведет к совершенно неверным значениям спектральной функции при малых импульсах и к существенно завышенной величине средней шероховатости. Четких критериев, позволяющих отделить один эффект от другого, пока не выработано, и при обработке результатов измерений исследователям приходится полагаться только на интуицию.

В настоящей работе показано, что данные эффекты могут быть легко разделены при одновременном измерении рентгеновского рассеяния на двух длинах волн. При этом оказывается возможным не только корректно отделить вклад зеркального отражения и определить радиус кривизны поверхности, но и минимизировать влияние этого