

# **ВНУТРИКАМЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПАРАМЕТРОВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЁНОК НАПЫЛЯЕМЫХ МАГНЕТРОННЫМ МЕТОДОМ В РЕЖИМЕ ОСАЖДЕНИЯ КЛАСТЕРОВ**

А.А. Егоров

*Московский государственный институт электроники и математики (ТУ)*

E-mail: matan87@mail.ru

Особенностью современной электроники является использование все более тонких слоев и переход от микро- к наноразмерным пленкам. Применение таких покрытий предъявляет повышенные требования к качеству поверхности подложки, состоянию границ раздела между слоями и однородности отдельных слоев. В большинстве случаев контроль параметров наноразмерных пленок осуществляется после завершения процесса их формирования ex-situ методами, которые имеют ограничения, связанные с процессами адсорбции, окисления и диффузии на поверхности материалов после их извлечения из технологической камеры. Новым подходом является принцип измерения параметров выращиваемых пленок непосредственно в процессе их получения (in-situ методы). Поэтому в настоящее время в мире активно разрабатываются различные in-situ методы исследования и диагностики нанослоев: лазерная эллипсометрия, интерферометрия, внутрикамерная зондовая микроскопия. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, ограничивающие их применения. Так, методы, основанные на использовании лазерного излучения, не применимы для диагностики непрозрачных (металлических) слоев. Зондовая микроскопия сталкивается с большими трудностями, связанными с необходимостью размещения микроскопа внутри технологической камеры. Общим недостатком этих методов является невозможность анализа скрытых границ раздела между слоями. Одним из перспективных методов контроля является метод in-situ рентгеновской рефлектометрии [1]. Метод обладает рядом преимуществ: носит неразрушающий характер, измерения могут проводиться как в высоком вакууме, так и в среде рабочего газа, источник и детектор рентгеновского излучения вынесены за пределы вакуумного объема, контролируются такие параметры пленочного покрытия как толщина (скорость роста), плотность и шероховатость поверхности при любых сочетаниях материалов пленки и подложки.

In-situ рентгеновская рефлектометрия основана на анализе интенсивности отраженного от поверхности образца рентгеновского пучка, (рис.1) В результате изменения разности фаз волн, отраженных поверхностью растущей пленки и поверхностью подложки, интерференционная картина в точке наблюдения представляет собой осцилляции интенсивности рентгеновского излучения.

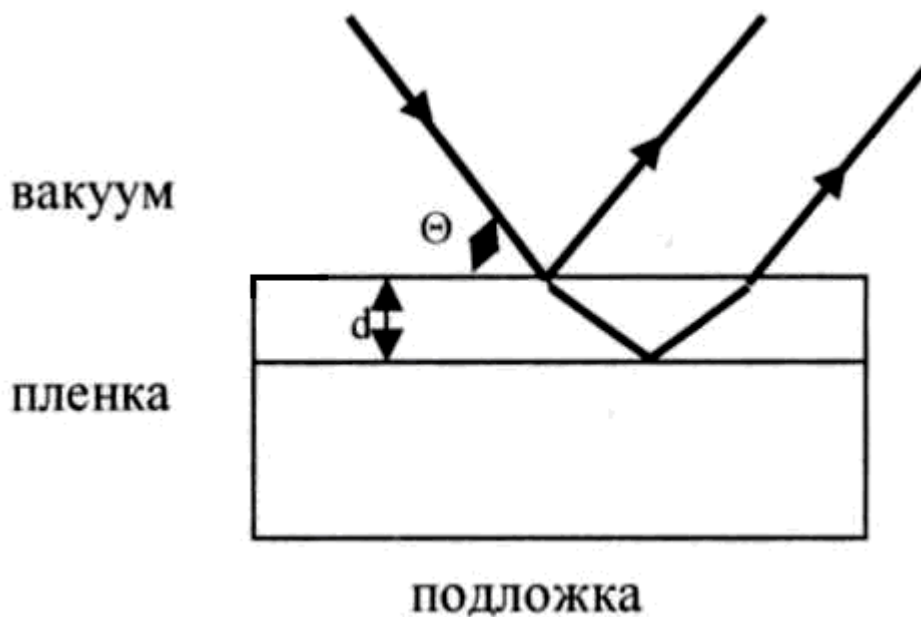


Рис. 1. Отражение рентгеновских лучей от системы растущая пленка-подложка в *in-situ* варианте.

Временная зависимость коэффициента отражения рентгеновских лучей регистрируется при углах скольжения, значительно превышающих значение критического угла полного внешнего отражения ( $\theta \gg \theta_c$ ). Это позволяет использовать кинематическое приближение для коэффициента отражения  $R$ . В предположении, что величины декремента преломления и шероховатости растущей пленки являются медленно изменяющимися функциями ее толщины, их можно принять постоянными на полупериоде осцилляции. На этой основе можно получить выражения для среднего значения  $\langle R \rangle$  и контрастности  $K = (R_{\max} - R_{\min}) / (R_{\max} + R_{\min})$  коэффициента отражения от системы пленка – подложка, что позволяет по экспериментальным значениям среднего коэффициента отражения и контрастности на полупериоде осцилляции определить усредненные по интервалу  $\Delta d = \lambda / 4 \sin \theta$  величины плотности и среднеквадратичной шероховатости пленки. Толщина пленки может быть найдена по формуле Вульфа-Брэгга с поправкой на преломление. Следует отметить, что параметры могут быть определены в реальном времени формирования пленки, так как описанный подход не требует решения обратной задачи рентгеновской рефлектометрии. На рис.2 представлены результаты, полученные в процессе магнетронного напыления кремния на стеклянную подложку, среднеквадратичная шероховатость которой составляла  $5 \text{ \AA}$ .

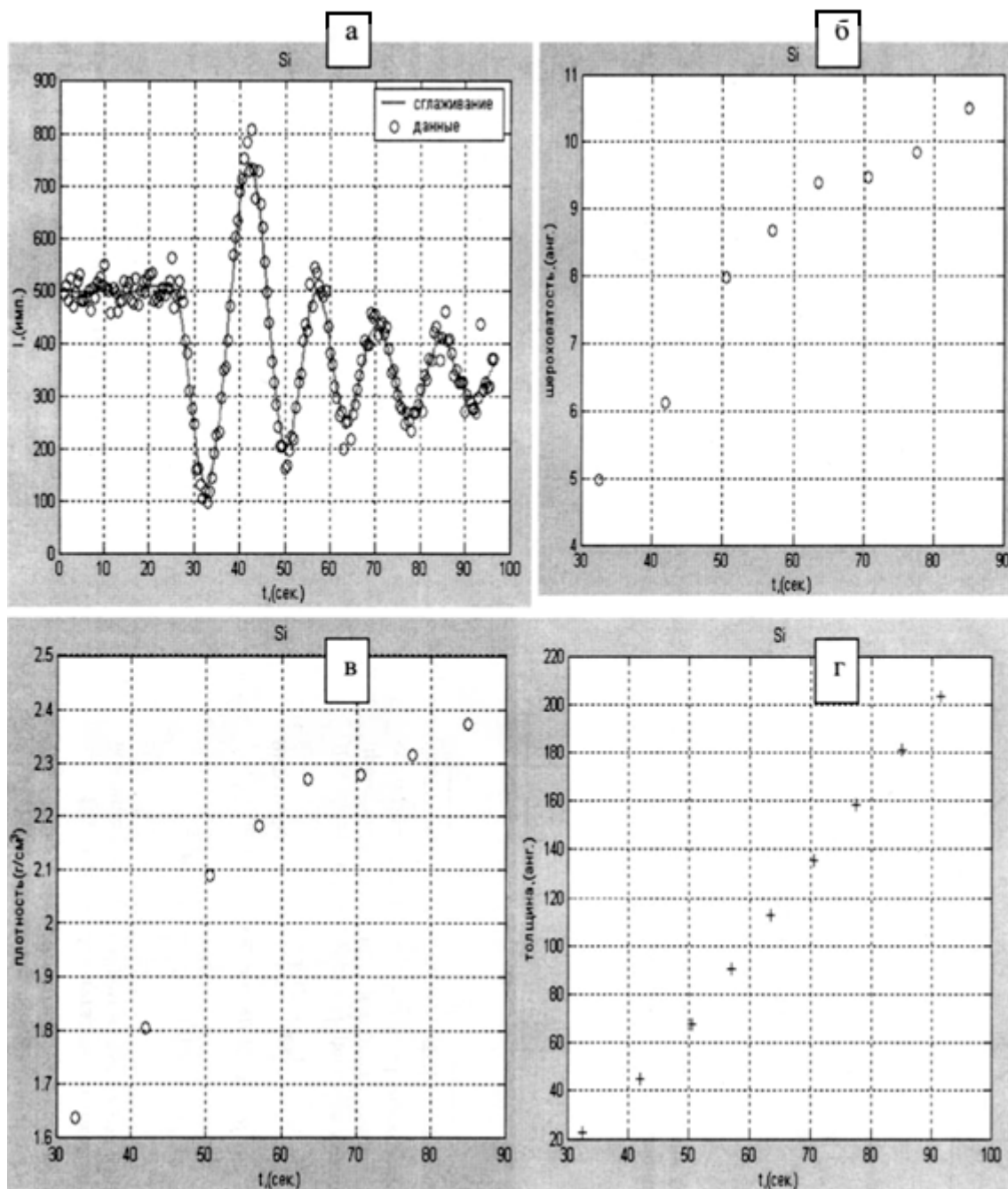


Рис.2. Экспериментальная зависимость интенсивности рассеянного излучения (а), шероховатости поверхности (б), плотности (в) и толщины (г) от времени напыления пленки.

Первый интерференционный экстремум – минимум, т.к. плотность пленки меньше плотности подложки. Его положение на временной зависимости соответствует толщине растущей пленки, равной  $26\text{\AA}$  (излучение  $\text{CuK}\alpha$ ,  $\theta = 1^\circ$ ). Период осцилляции наблюдаемой зависимости соответствует изменению толщины пленки на  $52\text{\AA}$ . При увеличении толщины пленки (времени напыления) интенсивность последующих максимумов монотонно уменьшается вследствие поглощения рентгеновских лучей в материале пленки и увеличения шероховатости ее поверхности. Периодичность расположения максимумов на рис.2(а) соответствует постоянной скорости напыления,

которая составила  $3\text{\AA}/\text{с}$ . К моменту окончания напыления толщина слоя кремния достигла величины  $290\text{\AA}$ .

Из полученных результатов можно сделать вывод, что параметры реально формируемой пленки при магнетронном напылении заметно отличаются от параметров идеально гладкой пленки кремния, послойно растущей на идеально гладкой подложке. Такие различия могут быть вызваны рядом факторов: изменением шероховатости поверхности пленки в процессе роста, наличием переходных слоев между пленкой и подложкой, участием кластеров в процессе осаждения пленки [2].

1. A.M.Baranov, P.E.Kondrashov, I.S.Smirnov, "In situ x-ray reflectivity for thin -film deposition monitoring and control", Solid State Technology, N5, 1999, p. 53-58.

2. П.В.Каштанов, Б.М.Смирнов, Р.Хипплер. Магнетронная плазма и нанотехнология. // Успехи физических наук, 2007, т. 177, № 5, с.473-510.