

# НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РОСТА ПЛЕНОК ВОЛЬФРАМА И МЕДИ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ

И.С. Монахов, М.Г. Тюрганов

*Московский государственный институт электроники и математики (ТУ)*

E-mail: met@miem.edu.ru, ivmontt@rambler.ru

The technique of in-situ X-ray reflectometry is a powerful nondestructive method for nanoscale film parameters measurement. It allows to control such parameters as thickness, growth or etching rate, density and roughness of films directly during technological process of their overgrowth. Different combinations of film-substrate materials are available. W film generates very small islands on initial stages of their growth or forms layer by layer and Cu generates more significant islands.

В настоящее время производство изделий оптики и микроэлектроники требует формирования однослойных и многослойных композиций различного функционального назначения на диэлектрических, полупроводниковых и металлических подложках. Примерами таких структур могут служить оптические интерференционные покрытия, зеркала мягкого рентгеновского диапазона, полупроводниковые сверхрешетки. 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, определяемому механизмом конденсации материала пленки и их взаимной диффузией. В настоящее время различают три основных механизма роста пленок: островковый (по Франку и Ван Дер Мерве), послойный (по Фольмеру и Веберу) и смешанный (по Крастанову и Странскому) [1].

Состояние поверхности может быть экспериментально оценено различными оптическими и зондовыми методами, каждый из которых имеет свои достоинства и области применения. Общим недостатком является трудность анализа сверхгладких поверхностей и получение информации о состоянии скрытых границ раздела.

Одним из перспективных методов контроля является метод in-situ рентгеновской рефлектометрии [2]. 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.

Метод in-situ рентгеновской рефлектометрии основан на анализе интенсивности отраженного от поверхности образца рентгеновского пучка. 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.

На рис.1 представлены результаты, полученные в процессе магнетронного напыления вольфрама на кремниевые пластины – (рис.1-3) [3]. Процесс напыления был начат на 75 секунде работы регистрирующей программы и продолжался 148с. Первый интерференционный экстремум – максимум, т.к. плотность пленки превышает плотность подложки.

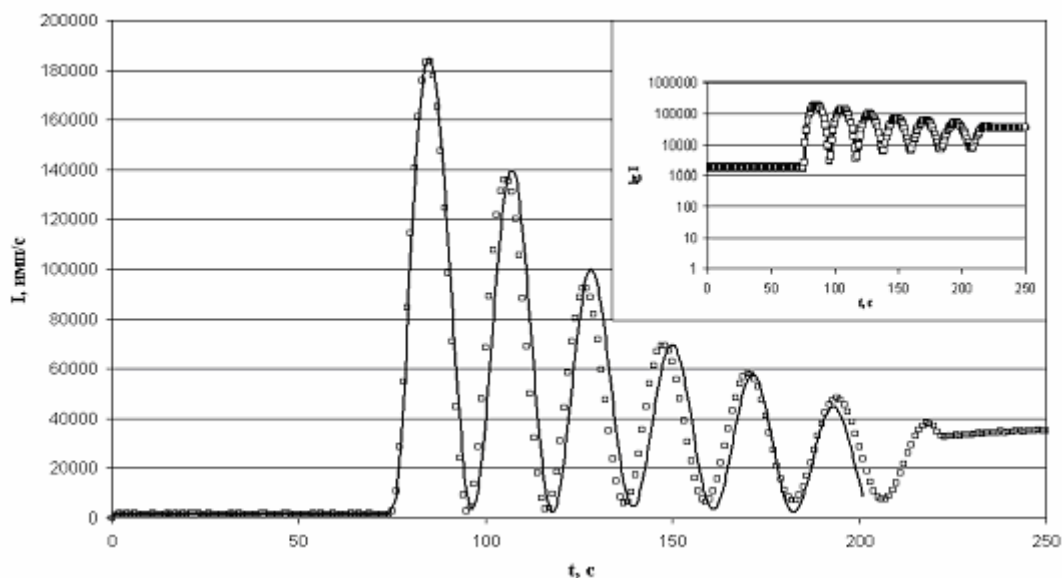


Рис.1: Зависимость интенсивности зеркально-отраженного рентгеновского излучения от времени:  $\square$  – экспериментальная кривая, сплошная линия - результат моделирования. Врезка в правом верхнем углу – экспериментальная кривая в логарифмическом масштабе [3]

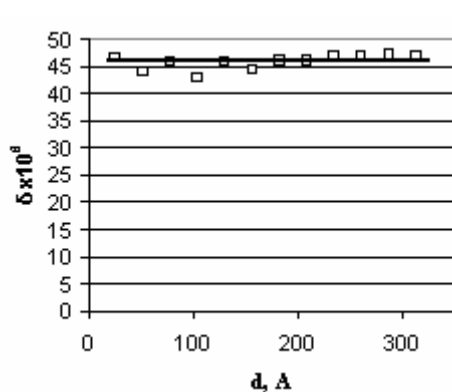
Его положение на временной зависимости соответствует толщине растущей пленки, равной  $26 \text{ \AA}$ . Период осцилляций наблюдаемой зависимости соответствует изменению толщины пленки на  $52 \text{ \AA}$ . При увеличении толщины пленки (времени напыления) интенсивность последующих максимумов монотонно уменьшается вследствие поглощения рентгеновских лучей в материале пленки и увеличения шероховатости ее поверхности. Процесс напыления был прекращен на 223 секунде, вследствие чего интенсивность в дальнейшем перестала меняться. Строгая периодичность расположения максимумов на рис.1 соответствует постоянной скорости напыления, которая составила  $2.2 \text{ \AA}/\text{с}$ . К моменту окончания напыления толщина слоя вольфрама достигла величины  $330 \text{ \AA}$ .

На рис.1 представлены также результаты машинного моделирования экспериментальных данных [4], с помощью которого были оценены зависимости декремента преломления (рис.2) и среднеквадратической шероховатости (рис.3) от толщины.

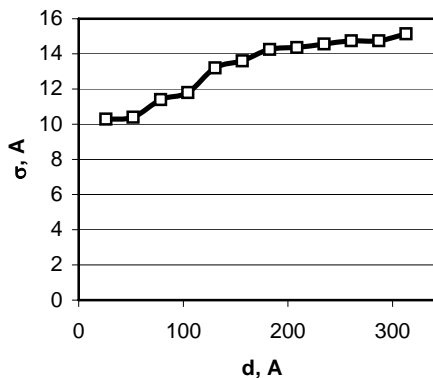
Декремент преломления  $d$  определяется плотностью материала  $s$  и связан с ней для одноэлементных веществ соотношением:

$$\rho = \frac{2\pi m c^2}{N_A e^2 \lambda^2} \delta \frac{A}{Z},$$

где  $m$  – масса электрона,  $e$  – заряд электрона,  $c$  – скорость света,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $A$  – атомная масса,  $Z$  – заряд ядра атома,  $\lambda$  – длина волны излучения.



*Рис.2. Зависимость декремента преломления материала пленки от толщины в процессе напыления*



*Рис.3. Зависимость среднеквадратической шероховатости поверхности пленки от толщины в процессе напыления*

Среднеквадратическая шероховатость поверхности пленки (рис.3) возрастает пропорционально  $d^{1/2}$ , что свидетельствует о развитии поверхностного рельефа. Из рис.2 следует, что декремент преломления в процессе роста пленки оставался практически постоянным ( $\sim 45 \times 10^{-6}$ ) и лишь немного отличается от значения, соответствующего плотности объемного материала ( $46.9 \times 10^{-6}$ ).

Медь стала все чаще использоваться в качестве материала для металлизации в интегральных схемах. Нами были проведены эксперименты по изучению процессов роста наноразмерных медных пленок на оптически полированных кремниевых и стеклянных подложках. Зависимость интенсивности зеркально-отраженного рентгеновского излучения от времени напыления для пленки меди на кремниевой подложке приведена на рис.4. Процесс напыления продолжался 350 секунд и пленка меди достигла толщины 1500 Е. Из рис.4 видно, что в отличие от вольфрама (рис.1) интенсивность первого максимума, положение которого соответствует 24 Е, меньше, чем интенсивность второго (72 Е). Это свидетельствует о пониженной плотности пленки меди на начальных стадиях роста. Такое понижение плотности, очевидно, связано с формированием на первом этапе достаточно крупных островков-зародышей, а растущая пленка до определенного момента остается несплошной. Повидимому, даже после слияния островков и образования слоя в нем могут присутствовать наноразмерные пустоты.

Методом электронной растровой микроскопии было получено изображение поверхности медной наноразмерной пленки (рис.5) при толщине,

соответствующей первому максимуму на рис.4 (24 Е). На этом рисунке заметна несплошность пленки меди.

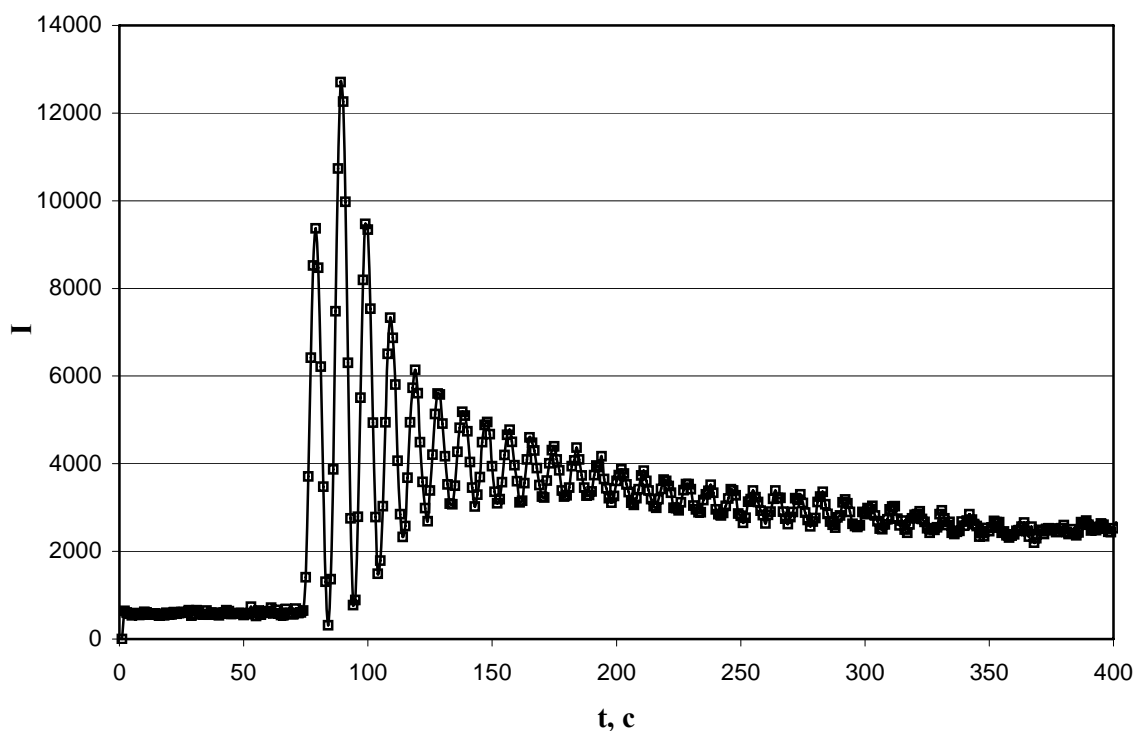


Рис.4: Зависимость интенсивности зеркально-отраженного рентгеновского излучения от времени напыления для пленки меди на кремниевой подложке

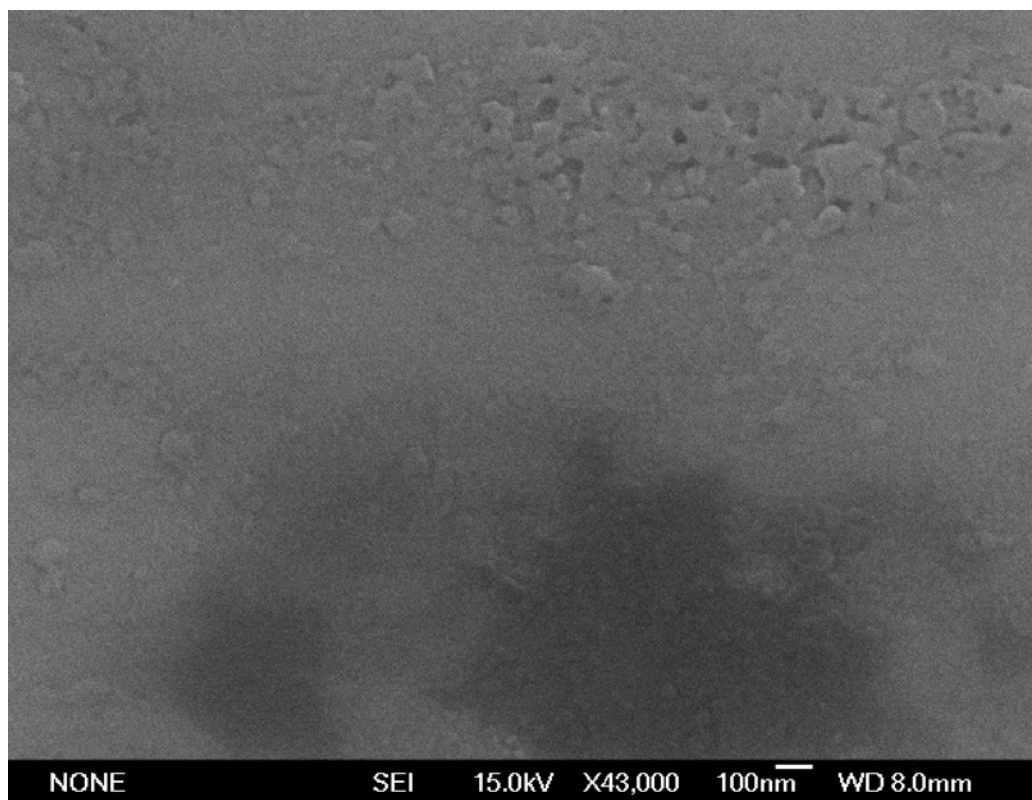


Рис.5: Поверхность медной наноразмерной пленки при толщине, соответствующей первому максимуму на рис.4

Из полученных результатов следует, что пленки вольфрама на начальных стадиях образуют очень мелкие быстро срастающиеся островки или конденсируются по послойному механизму. Пленки же меди конденсируются при магнетронном осаждении преимущественно по островковому механизму.

1. В.М. Иевлев, А.В. Бугаков, В.И. Трофимов “Рост и субструктура конденсированных пленок”. Воронеж, Изд-во ВГТУ, 2000, 386 с.
2. И.С. Смирнов, А.М. Баранов, П.Е. Кондрашев, Е.Г. Новоселова, И.С. Монахов “Метод in-situ рентгеновской рефлектометрии для контроля параметров поверхностных слоев”// Труды X Международного совещания “Радиационная физика твердого тела”, М.: НИИ ПМТ, 2000 г., с. 406-410.
3. И.С. Монахов, П.Е. Кондрашев, А.П. Лысенко, Е.Г. Новоселова, И.С. Смирнов “Изучение процессов роста пленок при магнетронном напылении методом in-situ рентгеновской рефлектометрии”// Труды XV Международного совещания “Радиационная физика твердого тела”, М.: НИИ ПМТ, 2005 г., с. 239-243.
4. А.В. Виноградов, И.А. Бристов, А.Я. Грудский, “Зеркальная рентгеновская оптика”, Л.: Машиностроение, 1989, с. 421-422.