

Теоретическое и экспериментальное изучение межфазной границы в многослойном зеркале Mo/V₄C до и после введения барьерного слоя W

А. В. Бугаев^{1,*}, С. С. Сахоненков¹, Р. А. Шапошников², В. Н. Полковников²,
Е. О. Филатова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, 3, Петергоф, Санкт-Петербург, 198504

²Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, 7, д. Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., 603087

*bugaev.sasha99@mail.ru

В работе рассмотрено взаимодействие слоев Mo и V₄C. Обнаружено формирование протяженного слоя MoV_xC_y, приводящего к ухудшению оптического контраста границ раздела. В качестве барьерного слоя был выбран W. Показано, что введение барьерного слоя W приводит к образованию промежуточного тонкого слоя Mo_xW_y, а также к сильному возрастанию внутренних напряжений и, как следствие, к деградации пленки.

Введение

В настоящее время метод экстремальной ультрафиолетовой литографии, основанный на использовании системы многослойных зеркал нормального падения для передачи изображения шаблона на поверхность кремниевой пластины, является наиболее перспективной основой для производства интегральных микросхем следующего поколения. Эффективность таких схем в значительной степени зависит от того, насколько точно фотолитографический процесс может воспроизводить узкие детали с четкими границами. От данного факта напрямую зависит плотность транзисторов в интегральных схемах.

Существующая на данный момент тенденция ускорения производственных процессов в индустрии производства интегральных схем и повышения разрешающей способности литографического оборудования требует уменьшения рабочей длины волны. Предполагаемое дальнейшее уменьшение длины волны техпроцесса менее 13,5 нм требует продолжения активного исследования и совершенствования структуры многослойных зеркал, рассчитанных на работу в литографическом диапазоне (6–13 нм). Зеркало на основе пары материалов Mo/V₄C является одним из перспективных кандидатов для применения в области длины волны 6,63 нм.

Многослойная структура на основе пары материалов Mo и V₄C обладает достаточно высоким теоретическим коэффициентом отражения (около 60%). Несмотря на то что в исследуемом диапазоне длин волн многослойное зеркало на основе La и V₄C демонстрирует более высокий теоретический коэффициент отражения (выше 70%), данная пара материалов очень сильно взаимодействует друг с другом [1] и быстро деградирует со временем. Одним из главных преимуществ структуры Mo/V₄C является термоустойчивость: система после отжига при температурах до 900 °С не разрушается, а коэффициент отражения уменьшается лишь на единицы процентов [2].

Однако взаимодействие слоев Mo и V₄C на межфазной границе все-таки имеет место быть. Оно сопровождается формированием протяженного слоя MoV_xC_y [3], в результате фактический коэффициент отражения достигает едва ли половины от своего теоретического значения. Хорошим способом предотвращения перемешивания слоев на межфазной гра-

нице является введение в систему барьерного слоя. Таким образом, основной задачей данной работы было проведение теоретических и экспериментальных исследований с целью поиска оптимальной конфигурации зеркала Mo/V₄C, а также материала барьерного слоя, ограничивающего перемешивание основных слоев при сохранении высокой термической стабильности системы.

Результаты

Измерения в представленной работе проводились методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. При изучении взаимодействия между слоями Mo и V₄C использовались 2 группы образцов. В первой группе исследовались образцы с одинаковым параметром Г (отношение толщины поглотителя – слоя Mo – к толщине бислоя) равным 0,46 и различными

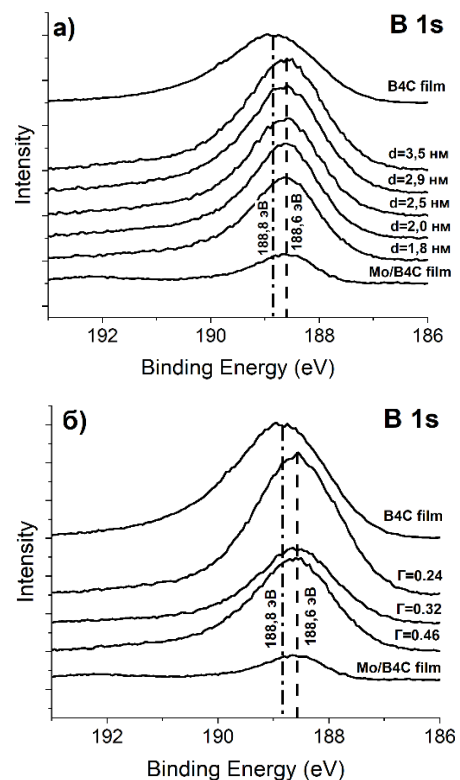


Рис. 1. Фотоэлектронные спектры (в 1s): а – образцов с $\Gamma = 0,46$ и различной толщиной периода; б – образцов с $d = 3,5$ нм и различным параметром Γ

величинами периода: 1,8; 2,0; 2,5; 2,9 и 3,5 нм. Во второй группе анализировались фотоэлектронные спектры образцов с одинаковой толщиной периода равной 3,5 нм и различными параметрами Γ : 0,24; 0,32; 0,46.

Анализ фотоэлектронных спектров показал, что в обеих группах образцов вне зависимости от параметра Γ и толщины бислоя слой V_4C сильно перемешивается с Mo, формируя протяженный слой MoV_xC_y . Данный факт хорошо виден из фотоэлектронных спектров $V\ 1s$ исследуемых групп образцов (рис. 1). Все пики имеют максимумы при энергии 188,6 эВ, что соответствует соединению Mo/ V_4C и отсутствию чистого V_4C .

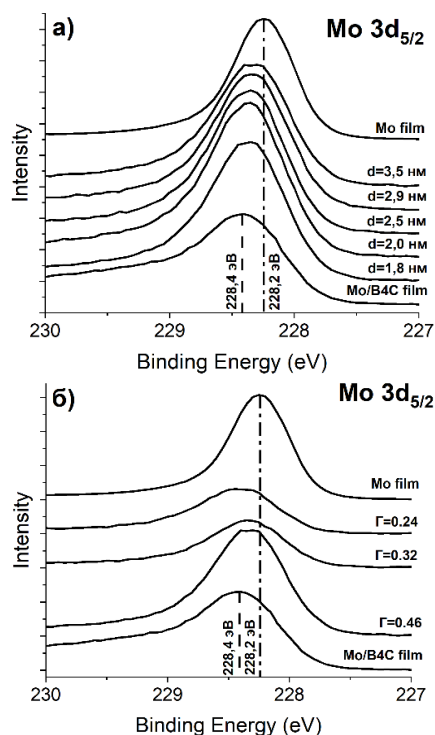


Рис. 2. Фотоэлектронные спектры ($Mo\ 3d_{5/2}$): *a* – образцов с $\Gamma = 0,46$ и различной толщиной периода; *b* – образцов с $d = 3,5$ нм и различным параметром Γ

Из $Mo\ 3d_{5/2}$ фотоэлектронных спектров данных образцов (рис. 2) видно, что часть чистого Mo сохра-

няется, причем с ростом параметра Γ прослеживается увеличение содержания чистого Mo.

В качестве барьерного слоя был выбран W. Руководствуясь правилом Ларрукерта, тонкий слой W наносили только на V_4C . Анализ фотоэлектронных спектров данного образца показал образование промежуточного защитного слоя Mo_xW_y . При этом промежуточное соединение MoV_xC_y формируется не так активно, как это было в отсутствие барьерного слоя. Однако после введения слоя W в исследуемых образцах наблюдалась сильная деградация многослойного покрытия вследствие увеличения внутренних напряжений.

Выводы

До введения барьерного слоя W между слоями Mo и V_4C наблюдалось сильное взаимодействие с образованием протяженного слоя MoV_xC_y . Введение барьерного слоя ведет к формированию слоя Mo_xW_y , уменьшающего перемешивание основных слоев. В то же время наличие слоя W приводит к росту внутренних напряжений, что влечет за собой деградацию пленки.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-72-20125-П. Авторы также выражают свою благодарность междисциплинарным ресурсным центрам СПбГУ по направлению «Физические методы исследования поверхности» и НИЦ «Курчатовский институт» (лабораторный модуль ЭСХА) за проведенные исследования.

Литература

1. I. A. Makhotkin, E. Louis, R. W. E. van de Kruijs, A. E. Yaksin, E. Zoethout, A. Yu. Seregin, E. Yu. Tereschenko, S. N. Yakunin, F. Bijkerk // *Phys. Status Solidi A*. 2011, 208, 11, 2597–2600.
2. M. Bartlmes, S. Bajt // *Proc. SPIE 8077, Damage to VUV, EUV, and X-ray Optics III*. 2011, 807710.
3. A. F. Jankowski, P. L. Perry // *Thin Solid Films*. 1991, 206 (1–2), 365–368.