

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Дружинина Александра Владимировича  
«Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся  
наноразмерных слоев меди и вольфрама», представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика  
конденсированного состояния

Диссертационная работа Дружинина А.В. посвящена исследованию многослойных структур (МС) на основе чередующихся нанослоев двух фаз в системе Cu/W и их термической стабильности при температурах 700-800°C. В работе исследовано влияние толщины нанослоев Cu и W в МС на термическую стабильность. Постановка задачи в диссертационной работе актуальна, т.к. МС системы Cu/W имеют перспективное техническое применение.

В автореферате Дружинина А.В. приведены результаты, полученные современными методами исследования, а именно, рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии. МС были получены методом магнетронного распыления. Применение комплекса современных методов исследования не вызывает сомнения в адекватности полученных результатов.

Результаты работы достаточно хорошо апробированы на международных конференциях и опубликованы в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК.

Автор диссертационной работы лично выполнял экспериментальные исследования, проводил обработку и анализ экспериментальных данных, представлял результаты на конференциях и публиковал их в периодической печати.

Дружинин А.В. получил новые результаты относительно характера, величины и распределения упругих макронапряжений в МС в зависимости от соотношения толщин нанослоев меди и вольфрама, разработал методику определения упругих макронапряжений по глубине МС. В работе экспериментально выявлен физический процесс, а именно, выход атомов меди из МС, сопровождающий процесс релаксации упругих макронапряжений, определен коэффициент зернограничной диффузии меди в вольфраме. В работе установлены особенности деградации структуры МС системы Cu/W при отжигах при температурах 700-800°C.

При прочтении автореферата возник ряд вопросов к автору:

1. При описании методики рентгеновской дифракции во второй главе сказано, что «для определения упругих напряжений использовался скользящий пучок с волновым вектором в плоскости МС» (т.е. с углом скольжения, равным нулю), и «это позволило регистрировать сигнал дифракции от плоскостей, перпендикулярно расположенных к поверхности МС». Известно, что в методе скользящего пучка невозможно получить сигнал дифракции от атомных плоскостей, расположенных перпендикулярно к поверхности образца. Что имел ввиду автор?
2. В работе используется величина силы  $f$ , создаваемой межфазной границей раздела, на единицу длины. Очевидно, что размерность  $f$  равна [н/м]. Почему в работе для силы  $f$  используется размерность [Дж/м<sup>2</sup>]? Как правило, такая размерность используется для плотности энергии. При прочтении сразу возникает непонимание: автор под силой понимает плотность энергии?
3. В разделе «Основные результаты и выводы», пункт 1, написано, что «С ростом температуры отжига величина механических напряжений, создаваемых межфазными границами раздела, уменьшается и принимает нулевое значение после отжига при температуре 650 град.С». Однако из рис.12 видно, что при таком отжиге напряжения ненулевые, особенно в меди. А вот величина силы  $f$  при этом отжиге становится равной нулю, что хорошо видно из рис.5б. Неясно, в п.1 опечатка или что-то недосказано.



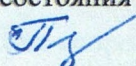
4. На рис.10 автореферата приведены кривые рентгеновской дифракции для МС с разным сочетанием слоев меди и вольфрама вблизи пика подложки. Стрелками показаны сателлитные пики только для МС 3 нм Cu /10 нм W. Для других МС с другим сочетанием толщин слоев пики при приближении к пику 110 W проблематично отнести к сателлитным, особенно для МС 5 нм Cu/5 нм W пик при  $2\theta=36$  град. Этот пик остается и после отжига при 800 град. С. Автор говорит, что исчезновение сателлитных пиков служит признаком деградации структуры МС (рис.10а). Получается, что пик при  $2\theta=36$  град не является сателлитным и принадлежит какой-то другой фазе. На рис.10б для МС 10 нм Cu/10 нм W пик при  $2\theta=36$  град. признается как сателлитный и свидетельствует о том, что деградации не произошло.

5. Автор говорит, что использовал также метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), однако в автореферате результаты ПЭМ не представлены. Ведь именно методом ПЭМ можно однозначно установить, являются нанослои в МС монофазными или многофазными.

Возникшие при прочтении автореферата вопросы не умаляют значимость полученных в работе результатов.

Считаю, что диссертационная работа «Термическая стабильность многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.13 г. № 842, а ее автор Дружинин Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Старший научный сотрудник лаборатории  
физики поверхностных явлений  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Института физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИФПМ СО РАН), доктор физ.-мат. наук по специальности  
1.3.8 (01.04.07)-физика конденсированного состояния  
**Перевалова Ольга Борисовна**

 14.12.2021

Адрес: 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4.  
e-mail: perevalova52@mail.ru,  
тел. 8-913-108-26-24, 8-382-2-286869

Подпись Переваловой О.Б. подтверждаю:

Ученый секретарь Института физики прочности  
и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
д.ф.м.н. **Матолыгина Наталья Юрьевна**



