

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы  
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 Александра Владимировича Дружинина посвящена исследованию термической стабильности многослойных структур на основе чередующихся наноразмерных слоев меди и вольфрама. Актуальность данной тематики связана со все более широким распространением многослойных структур в перспективных разработках.

На основе исследования микроструктуры и остаточных напряжений в изготовленных автором системах с бислоями различных толщин и конфигураций и их релаксации в процессе отжига получен ряд новых результатов, среди которых наиболее интересными представляются закономерности поведения остаточных механических напряжений в многослойной структуре и их зависимости от толщины слоев меди и вольфрама. Впервые экспериментально оценено значение величины силы, создаваемой межфазной границей раздела Cu(111)/W(110), которая оказывает сжимающее действие на слои.

Кроме того, автор экспериментально доказал, что в образцах с одним типом бислоев количество медных кристаллитов зависит от толщины слоев меди и вольфрама, а в образцах с двумя типами бислоев интенсивность оттока зависит от характера укладки бислоев в объеме многослойной структуры. С началом деградации кристаллиты исчезают – атомы меди диффундируют обратно в объем многослойной структуры. Был проведен *in situ* анализ кинетики диффузии методом Оже-электронной спектроскопии и была получена температурная зависимость коэффициента зернограничной диффузии меди в вольфраме;

Достоверность полученных результатов обусловлена применением современных методов исследования и прецизионного структурного анализа, при этом основные результаты диссертационной работы изложены в 7 статьях, в том числе в высокорейтинговых международных изданиях с высоким импакт-фактором, а также апробированы на 11 конференциях, что подтверждает также их актуальность и научную значимость.

В качестве замечания можно указать следующее:

В работе упомянуто, что появление механических напряжений, одинаково действующих на бислои многослойных структур, обусловлено воздействием подложки, однако доказательств этого утверждения и анализа его природы в автореферате не приводится.

В то же время данное замечание не снижает высокую оценку работы и не ставит под сомнение основные выводы и положения, выносимые на защиту.

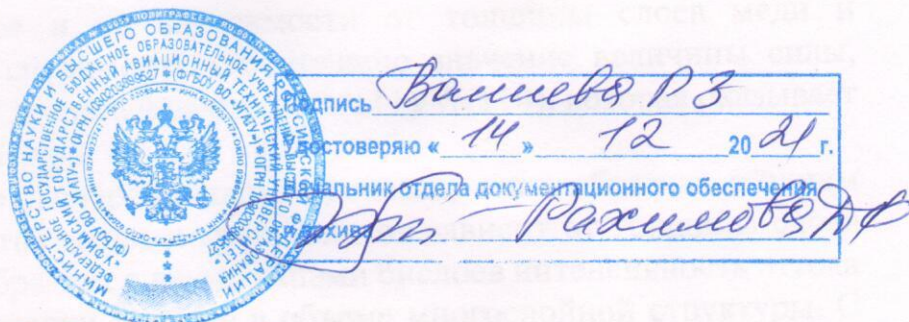
В целом, работа Александра Владимировича Дружинина выполнена на высоком научном уровне. Считаю, что она соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния, а её автор, А.В. Дружинин, достоин присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

д. ф.-м. н., профессор,  
заслуженный деятель науки РФ и РБ,  
Директор НИИ ФПМ ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный авиационный  
технический университет»

Докторская диссертация защищена  
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния



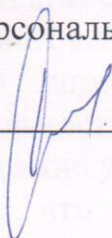
Р.З. Валиев



Адрес организации: 450008, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12  
Рабочий телефон: 8(347) 273-34-22  
Адрес эл. почты: [ruslan.valiev@ugatu.su](mailto:ruslan.valiev@ugatu.su);  
09.12.2021 г.

Даю согласие на обработку персональных данных

Руслан Зуфарович Валиев



« 14 » 12 2021 г.