

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации **Егорова Григория Петровича** на тему «Механические напряжения в металлических пленках при магнетронном осаждении», представленной на соискание ученой степени по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» и состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 18 декабря 2018 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 08.10.2018, протокол №03.

Диссертация выполнена на кафедре №16 «Физики прочности» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Волков Андрей Александрович.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 03 от 08.10.2018) в составе:

1. д.ф.-м.н. Карпов Александр Владимирович (НИТУ «МИСиС») – председатель комиссии;
2. д.ф.-м.н. Векилов Юрий Хоренович (НИТУ «МИСиС»);
3. д.т.н. Никулин Сергей Анатольевич (НИТУ «МИСиС»);
4. д.ф.-м.н. Шаркеев Юрий Петрович (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН);
5. д.ф.-м.н. Иевлев Валентин Михайлович (ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»);

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- экспериментально проверены модели формирования напряжений для различных стадий формирования пленок, полученных магнетронным осаждением;
- экспериментально определены значения критических напряжений и деформаций, приводящих к отслоению пленок для случаев осаждения Al, Ti, Cu, Ta на медную подложку, а также для случая осаждения Ta на стеклянную подложку;
- установлены закономерности формирования напряжений в пленках Ta, Al, Ag в процессе осаждения на медную подложку;
- предложено объяснение механизма развития отслоения тонких пленок, осажденных на поликристаллическую подложку.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- применительно к магнетронному методу осаждения выявлен поэтапный механизм формирования механических напряжений в плёнках, для каждого этапа установлен преобладающий механизм роста напряжений. А именно: на начальных стадиях роста: в случае отсутствия химического взаимодействия атомов пленки и подложки – модель поверхностного натяжения пленка/подложка (островковая модель); при наличии химического взаимодействия – образование химического соединения; на стадиях формирования сплошной пленки: поверхностная несовместимость собственных деформаций по границам зерен.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны методика и устройство, позволяющие проводить измерения напряжений (удельных усилий) в тонких пленках «in-situ», непосредственно во время их осаждения; предлагаемое измерительное устройство отличается от традиционного емкостного датчика повышенной чувствительностью измерений;
- определены критические значения напряжений $\sigma_{\text{крит}}$ и соответствующие им уровни деформаций $\Delta\epsilon_{\text{крит}}$, при достижении которых наблюдалось отслоение для пленок Ti ($\sigma_{\text{крит}} = 170$ МПа), Cu ($\sigma_{\text{крит}} = 75$ МПа) и Ta ($\sigma_{\text{крит}} = 395$ МПа), осажденных на медную подложку, а также для пленок Ta ($\sigma_{\text{крит}} = 1495$ МПа), осажденных на стеклянную подложку.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- все полученные результаты и выводы обеспечены детальным рассмотрением физических явлений и процессов, определяющих формирование напряжений в пленках, физической обоснованностью применяемых приближений, применением современных методов обработки экспериментальных данных, а также корреляцией полученных данных с результатами других исследователей.

Личный вклад соискателя состоит в том, что:

все представленные в диссертации экспериментальные и теоретические результаты получены непосредственно автором или при его равноправном участии; автором лично разработаны: методика измерения напряжений в тонких пленках «in-situ», включающая в себя экспериментальную установку по осаждению тонких пленок с атомарно-

диспергирующей системой и устройство для измерения напряжений в тонких пленках в процессе их осаждения; лично проведены все экспериментальные измерения напряжений, возникающих при формировании тонких пленок; обработаны и проанализированы полученные экспериментальные данные; автор принимал равноправное участие: в исследовании топографии поверхности полученных пленок после осаждения, в расчете распределения давления в системе подачи газа атомарно-диспергирующей системы, подготовке материалов конференций, публикаций.

Соискатель представил 5 опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях из перечня, утвержденного Минобрнауки России, 2 из них опубликованы в изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science, Scopus.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени не нарушен.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Егорову Григорию Петровичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за – 5, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель Экспертной комиссии
д.ф.-м.н.

А. В. Карпов А.В. Карпов

18.12.2018