

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бабушкина Артема Сергеевича «Влияние ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Актуальность темы

В работе Бабушкина А.С. исследовано влияния ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов. Такие пленки широко используются в оптике, микроэлектронике, микроэлектромеханических системах (МЭМС), устройствах хранения информации, а также в качестве функциональных покрытий. Механические напряжения в пленках могут оказывать значительное негативное влияние на работу компонентов и устройств, изготовленных на их основе. С другой стороны, наличие напряжений в пленке может быть полезным, например, для изготовления трехмерных пленочных микроструктур. Механические напряжения в пленках могут быть использованы для самосборки микрокапсушек, антенн, а также различных МЭМС устройств. Поэтому развитие методов управления остаточными механическими напряжениями в тонких пленках является важным.

Известно, что бомбардировка пленок ионами инертных газов позволяет влиять на механические напряжения. В большинстве работ исследуется воздействие ионов с энергиями 0.5 кэВ-1 МэВ, а диапазон меньших энергий практически не изучен. Использование более плотных потоков ионов, но с меньшей энергией, также позволяет оказывать воздействие на напряжения, избегая распыления материала пленки. В связи с вышесказанным цели и задачи данной работы являются, несомненно, актуальными.

Оценка содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц, включая 57 рисунков, 2 таблицы и 157 библиографических ссылок. Содержание автореферата соответствует материалам диссертации.

Во введении автором сформулированы цель и задачи работы, обоснована актуальность темы диссертации, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, а также об апробации результатов исследования.

Первая глава представляет собой литературный обзор по теме диссертационной работы. Здесь автор рассматривает влияние механических напряжений в тонких металлических пленках на работу устройств, изготовленных на их основе. В данной главе рассматриваются причины возникновения остаточных механических напряжений и их зависимость от условий осаждения пленок. Проведено сравнение способов управления механическими напряжениями в тонких пленках, представленных в литературе. Описываются преимущества бомбардировки пленок ионами Ar в плазме высокочастотного индукционного разряда низкого давления.

Вторая глава посвящена методам исследования механических напряжений в тонких пленках, которые используются в данной работе. Автором предложена методика, позволяющая по изменению средних напряжений и градиента определить глубину модификации напряжений в тонкой пленке, вызванной ионной бомбардировкой. В качестве тестовых структур использовались балки микрометровых размеров, изготовленные из исследуемой пленки. Средние напряжения определялись по изгибу мостов, а градиент по изгибу кантилеверов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких пленках Cr. Изучается изменение средних напряжений и градиента в зависимости от параметров обработки и исходного напряженного состояния. Установлено, что глубина изменения напряжений сравнима с толщиной пленки, не смотря на малые энергии ионов. Продемонстрирована способность обработанных пленок Cr в плазме Ar высокочастотного индукционного разряда низкого давления изменять изгиб микромеханических структур изготовленных на их основе. В зависимости от исходных напряжений, энергии ионов и времени обработки, она может приводить как к выпрямлению балочных структур, изготовленных из пленок Cr, так и к ещё большему изгибу. В зависимости от цели можно подобрать соответствующий режим обработки.

Четвертая глава посвящена результатам молекулярно-динамического (МД) моделирования осаждения поликристаллических пленок Cu и Cr, а также их бомбардировки ионами Ar. Моделирование осаждения пленок с

разными энергиями осаждаемых атомов и скоростями осаждения продемонстрировало качественное согласие эволюции напряжений с литературными данными. Было подтверждено, что возникновение растягивающих напряжений происходит в результате формирования новых участков межзеренных границ, а возникновение сжимающих напряжений происходит в результате проникновения адатомов с поверхности в межзеренные границы. Исследование изменения механических напряжений в ходе остановки осаждения показало, что обратимая релаксация сжимающих напряжений обусловлена латеральным перераспределением атомов, проникших в межзеренные границы в ходе осаждения. Моделирование бомбардировки пленок ионами Ar показало, что протекающие процессы аналогичны тем, что происходят во время осаждения. Отличие лишь в том, что в ходе бомбардировки адатомы возникают вследствие выбивания атомов с поверхности.

В пятой главе продемонстрированы примеры применения ионно-плазменной обработки для самосборки трехмерных микроструктур на основе пленок Cr. Представлено изготовление микрокатушки, которая возникает за счет градиента напряжений, формируемого в результате обработки плоской заготовки в виде ленты с отверстиями в виде параллелограммов с углом у основания 60° . Также продемонстрирована возможность собирать трехмерные объекты с плоскими гранями на примере микрокубов. В данном случае воздействие на напряжения в пленке оказывалось локально за счет использования маски Si. Градиент напряжений формировался в участках не закрытых маской.

В заключении сформулированы наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость

Представленная в работе методика позволяет определять изменение механических напряжений и глубину модификации в пленках в результате ионно-плазменной обработки. Ионно-плазменная обработка в исследованных режимах позволяет управлять механическими напряжениями в тонких пленках металлов и изгибом МЭМС структур, изготовленных из них.

Полученные методом молекулярной динамики результаты расширяют представления о механизмах, обуславливающих эволюцию механических напряжений в тонких поликристаллических пленках металлов в ходе осаждения и последующей низкоэнергетической ионной бомбардировки.

Достоверность результатов.

Основные положения и выводы диссертационной работы прошли апробацию на 15 международных и российских научных конференциях и опубликованы в 6 научных изданиях, индексируемых РИНЦ, Scopus, Web of Science и рекомендованных ВАК.

Научная новизна результатов

1. Впервые экспериментально продемонстрирована возможность использования ионно-плазменной обработки с энергией ионов Ag ниже порога распыления в диапазоне 15-30 эВ для управления механическими напряжениями в тонких пленках Cr (200-300 нм).

2. Впервые представлена методика, позволяющая оценить не только величину изменения механических напряжений в тонкой пленке в результате ионной бомбардировки, но и глубину, на которой происходит данное изменение.

3. Методом молекулярной динамики впервые показано, что формирование сжимающих напряжений в ходе осаждения поликристаллических пленок Cr и Cu, а также в ходе их бомбардировки ионами Ag с энергией 15-30 эВ, обусловлено проникновением атомов с поверхности в межзеренную границу, а частичная релаксация сжимающих напряжений при остановке процессов обусловлена латеральным перераспределением атомов в межзеренных границах.

4. Впервые продемонстрирована возможность использования ионно-плазменной обработки для формирования трехмерных микроструктур на основе тонких пленок Cr.

Представленная Бабушкиным А.С. диссертационная работа является законченным научным исследованием с обоснованной актуальностью и новизной, однако имеется ряд **замечаний**:

1. В экспериментальной части не объясняется выбор таких параметров работы реактора как ВЧ мощность, рабочее давление и пр.
2. Не указаны причины, по которым экспериментальное исследование проведено только для пленок Cr, но не Cu, хотя последние изучаются методом молекулярной динамики.

3. Не указано, как меняется температура в МД модели при разных скоростях осаждения, а также в ходе бомбардировки ионами Ar.
4. Пленкам Si свойственен рост размера зерен в ходе осаждения пленок. В представленной в работе модели размер зерен не меняется с ростом толщины пленки.

Однако перечисленные замечания не снижают ценность научных исследований и полученных результатов. На основании вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Бабушкина А.С. «Влияние ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов» удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ №824 от 24 сентября 2013 года, а её автор, Бабушкин А.С., заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук по специальности 02.00.04 – Физическая химия ведущий научный сотрудник лаборатории поверхностных сил Учреждения Российской академии наук Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН

«15» апреля 2024  / Световой Виталий Борисович/

Подпись В.Б. Светового заверяю,

Секретарь ученого совета ИФХЭ РАН,

к.х.н. Варшавская И.Г.

