

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по НР Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования Национальный исследовательский
университет «Московский институт электронной техники»

д.т.н., проф. Паврилов С.А.



« 17 » 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 диссертации

Диссертационная работа Бабушкина А.С. посвящена комплексному исследованию влияния ионно-плазменной обработки с энергией ионов Ar ниже порога распыления на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов, а также практическому применению исследуемого эффекта.

Тонкие пленки металлов имеют широкое применение в оптике, микроэлектронике, микро- и наноэлектромеханических системах, а также в качестве защитных и функциональных покрытий. В процессе осаждения в пленках возникают остаточные механические напряжения, способные оказывать существенное влияние на их эксплуатационные характеристики, надежность и долговечность. В связи с этим, является важным развитие методов управления механическими напряжениями в тонких пленках металлов.

Одним из методов воздействия на механические напряжения является бомбардировка ионами инертных газов. Она может вносить как растягивающие, так и сжимающие напряжения, и поэтому предоставляет

широкие возможности по их регулированию. Как правило, для воздействия на остаточные напряжения используется энергия от 1 кэВ. Бомбардировка ионами с такой энергией может приводить к нежелательным эффектам, таким как распыление материала, увеличение шероховатости поверхности или внедрение ионов в структуру пленки. Диапазон меньших энергий малоизучен, однако бомбардировка ионами с энергией ниже порога распыления, который для большинства металлов имеет значения порядка десятков эВ, позволяет избежать негативных эффектов. Ее можно осуществить в реакторе плотной плазмы ВЧ индукционного разряда низкого давления, который позволяет независимо управлять энергией и плотностью ионного потока.

Во введении автором представлена актуальность, обоснован выбор направления исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость проводимых исследований, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный обзор современного состояния исследований по теме диссертационной работы. Рассматривается влияние остаточных механических напряжений в тонких пленках металлов на функционирование устройств, изготовленных на их основе. Представлено описание механизмов формирования механических напряжений в поликристаллических пленках в зависимости от параметров осаждения. Рассматриваются методы управления напряжениями в пленках, среди которых выделяется ионно-плазменная обработка с энергией ионов Ar ниже порога распыления и её преимущества.

Во второй главе описаны методы исследования механических напряжений в тонких пленках, использованные в данной работе. Представлена методика, которая по изменению средних напряжений и градиента, позволяет определить глубину модификации напряжений в тонкой пленке в результате ионной бомбардировки. В качестве тестовых структур использовались балки микрометровых размеров, изготовленные из исследуемой пленки. Для определения средних напряжений применялись микрометры, а для определения градиента напряжений микрокантилеверы.

Третья глава данной диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям влияния ионно-плазменной обработки на механические напряжения в тонких пленках Cr. Показано, что ионно-плазменная обработка пленок Cr позволяет управлять изгибом микромеханических структур, изготовленных на их основе. В зависимости от

исходных напряжений и параметров ионно-плазменной обработки, она может, как выпрямлять балочные структуры, изготовленные из пленки Cr, так и ещё сильнее их изгибать. В зависимости от цели можно подобрать соответствующий режим обработки. Исследовано изменение средних напряжений и градиента в зависимости от энергии ионов Ar, продолжительности обработки и исходного напряженного состояния. Установлено, что, не смотря на малые энергии ионов, глубина модификации напряжений сравнима с толщиной пленки.

Четвертая глава посвящена исследованию методом молекулярной динамики (МД) изменения механических напряжений в ходе осаждения поликристаллических пленок Cr и Cu и их бомбардировки ионами Ar. Особенностью модели является то, что вначале формировались полусферические монокристаллические островки, пространство между которыми было заполнено тонким слоем аморфной фазы. Три из четырех кристаллитов были повернуты относительно оси симметрии полусферы на углы -45° , 45° и 90° , в результате чего при осаждении зерна не срастались в единый монокристалл, а формировалась разупорядоченная межзеренная граница. В ходе моделирования осаждения пленок была исследована эволюция напряжений в зависимости от энергии осаждаемых атомов и скорости осаждения. Результат оказался в качественном согласии с известными экспериментальными и теоретическими 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. Также была исследована обратимая частичная релаксация сжимающих напряжений в ходе остановки осаждения. Моделирование показало, что релаксация обусловлена латеральным перераспределением атомов, проникших в межзеренные границы в ходе осаждения. Моделирование бомбардировки ионами Ar поликристаллических пленок Cr и Cu показало, что протекающие в ходе этого процессы аналогичны тем процессам, что протекают во время осаждения. Генерация адатомов и их проникновение с поверхности в межзеренную границу приводит к возникновению сжимающих напряжений. Латеральное перераспределение атомов межзеренной границы приводит к частичной релаксации сжимающих напряжений. Чем ближе к поверхности, тем активнее действует второй механизм, в результате чего формируется градиент напряжений.

В пятой главе продемонстрирована потенциальная возможности применения ионно-плазменной обработки. Возможность локально формировать существенный градиент напряжений в тонких металлических пленках позволяет осуществлять самосборку трехмерных микроструктур. Это открывает широкие возможности для разработки новых конструкций устройств в области микроэлектромеханических систем, пассивных элементов электроники, и др. В качестве тестовых структур представлены кубы микрометровых размеров, изготовленные путем самосборки за счет градиента напряжений, формирующегося в заданных участках пленки Cr в ходе ионно-плазменной обработки. Локальность воздействия обеспечивалась маской из пленки Si, осажденной магнетронным методом, которая в дальнейшем удалялась одновременно с Si подложки под вывешиваемыми участками конструкции в ходе травления в плазме SF₆.

В заключении сформулированы наиболее важные результаты и выводы диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанная методика позволяет определять изменение механических напряжений и глубину модификации в пленках в результате ионно-плазменной обработки, и применима также к процессам, не сопровождающимся распылением материала, например, облучения пучками электронов, фотонов и пр. 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. Моделирование осаждения пленок и их бомбардировки ионами Ar было проведено с использованием свободно распространяемого программного пакета для решения задач молекулярной динамики LAMMPS. Визуализация данных осуществлялась с помощью открытого программного обеспечения для анализа моделей на основе частиц OVITO. Основные положения и выводы диссертационной работы прошли апробацию на международных и российских научных конференциях и опубликованы в 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 Ar 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 Ar 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.

Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа Бабушкина А.С. является законченным актуальным исследованием с высоким уровнем научной новизны. Анализ выводов показывает, что все поставленные задачи были решены. Основные результаты работы обсуждались на 10 международных научных конференциях и опубликованы в 6 статьях, включая 3 статьи в российских журналах (входящих в перечень научных журналов ВАК при Минобрнауки России) и 3 статьи в зарубежных журналах (индексируемых WoS и/или Scopus), а также 1 разделе коллективной монографии.

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 диссертации.

В качестве **замечаний** к диссертационной работе можно отметить следующее:

1. В экспериментальной части работы не указана температура образца в ходе ионно-плазменной обработки.

2. Как правило ионная бомбардировка приводит к изменению шероховатости поверхности. Поэтому было бы желательно, если данные об изменении шероховатости поверхности пленок были отражены в работе.
3. Не указано, почему шаг МД моделирования 500 фс.
4. Отсутствует МД моделирование пленок с разным размером зерен. Эти данные представляют несомненный интерес, так как изменение напряжений в ходе ионной бомбардировки в работе связывается с процессами, происходящими в межзеренной границе.

Однако перечисленные замечания не снижают высокую оценку уровня научных исследований и полученных результатов. 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 заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа и настоящий отзыв обсуждены на заседании ученого совета Института нано и микросистемной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Протокол заседания № 10 от 17.04.2024 г.)

Директор Института НМСТ НИУ МИЭТ

Д.т.н., проф.  С.П.Тимошенко

Секретарь УС Института НМСТ  О.М.Бритков

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (НИУ МИЭТ).

Адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1

тел: +7 (499) 731-44-41; netadm@miee.ru : <https://www.miet.ru/>