



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФТИАН им. К.А. Валиева РАН,
ил. корр. РАН

В.Ф. Лукичев,

«13» июня 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН) по диссертационной работе Бабушкина Артема Сергеевича на тему «Влияние ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа выполнена в лаборатории Технологии микро- и наносистемной техники Ярославского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской академии наук (ФТИАН им. К.А. Валиева РАН).

В 2014 году Бабушкин А.С. (1992 г.р.) окончил Физический факультет ЯрГУ им П.Г. Демидова, ему была присвоена квалификация «Физик-микроэлектронщик» по специальности «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы». В том же году поступил в очную аспирантуру ЯрГУ им. П.Г. Демидова по специальности 03.06.01 «Физика и астрономия», которую окончил в 2018 году, и ему была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Также, начиная с 2013 года работал в лаборатории Технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН в должности электроника, с 2014 года – стажера исследователя, с 2017 года – младшего научного сотрудника, с 2020

года – научного сотрудника. Кроме того, в 2022 году работал в ЯрГУ им. П.Г. Демидова в должности старшего преподавателя. С 2022 года работает в лаборатории технологий электронной и оптической литографии ФТИАН им. К.А. Валиева РАН в должности научного сотрудника.

Научный руководитель – Амиров Ильдар Искандерович доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Технологии микро- и наносистемной техники ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН.

ВЫПИСКА

Из протокола № 4-23 от 25 мая 2023 г. заседания научного семинара
«Перспективные технологии и устройства микро- и наноэлектроники» в
Физико-технологическом институте им. К.А. Валиева РАН

ПРИСУТСТВОВАЛИ: В работе семинара под председательством директора ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, чл. корр. РАН В.Ф. Лукичева приняли участие 12 человек: рук. лаборатории ФДМ, к.ф.-м.н. Мяконьких А.В.; рук. лаборатории ТЭОЛ, к.ф.-м.н. А.Е. Рогожин; рук. лаборатории ИЛТ, к.ф.-м.н. В.П. Кудря; ученый секретарь Института, к.ф.-м.н. И.А. Хорин, в.н.с., д.ф.-м.н. А.А. Ломов и другие, в том числе представители Ярославского филиала: директор ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН, д.ф.-м.н. Трушин О.С.; рук. лаборатории технологии микро- и наносистемной техники, д.ф.-м.н. Амиров И.И., в.н.с, к.ф.-м.н. Наумов В.В.

СЛУШАЛИ: Доклад по диссертационной работе Бабушкина Артема Сергеевича на тему «Влияние ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

В ходе обсуждения д.ф.-м.н. Амиров И.И, являющийся научным руководителем Бабушкина А.С., сообщил, что во время работы над диссертацией соискатель проявил себя как специалист, владеющий глубокими теоретическими знаниями, практическим опытом, а также навыком владения современными программными пакетами компьютерного моделирования. Бабушкин А.С. выполнил поставленные перед ним задачи самостоятельно. Опубликованные соискателем работы достаточно полно отражают содержание диссертации. По мнению Амирова И.И. работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее следует рекомендовать к защите.

С положительной оценкой работы также выступили:

- уч. секретарь, к. ф-м. н. А.А. Хорин;
- в.н.с., к.ф-м.н. В.П. Кудря;

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать диссертацию Бабушкина А.С. «Влияние ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния» и утвердить заключение, содержащее общую характеристику диссертационной работы.

Актуальность темы

Микроэлектромеханические системы (МЭМС), такие как переключатели, сенсоры и актюаторы, обычно изготавливаются по технологии поверхностной микрообработки. Эта технология включает нанесение на подложку тонких пленок, из которых впоследствии формируются структурные элементы МЭМС. В процессе осаждения в пленках возникают остаточные механические напряжения, способные оказывать существенное влияние на рабочие характеристики устройства. Это влияние, как правило, является негативным и может приводить к растрескиванию и

отслаиванию пленок. Наиболее часто наблюдается деформация структурных элементов, делающая их неработоспособными.

Однако наличие остаточных механических напряжений в пленке может иметь и положительный эффект. Растягивающие напряжения в микромостах и мембранах увеличивают их резонансные частоты, что важно для таких МЭМС устройств как сенсоры, переключатели, актюаторы, микрофоны и пр. Также напряжения могут использоваться для самосборки трехмерных микроэлектронных устройств. Как только происходит освобождение основной структуры от крепления к подложке, остаточные напряжения приводят к её выталкиванию в нужное положение и обретению требуемой формы. Кроме того, механические напряжения и создаваемые ими деформации в тонких пленках позволяют управлять электрическими, магнитными, оптическими и другими свойствами материалов. Исследованием этих явлений, а также созданием на их основе нового поколения устройств информационных и сенсорных технологий, занимается такое активно развивающееся направление физики как стрейнтроника.

В связи с этим, актуальным является развитие методов управления механическими напряжениями в тонких пленках.

Одним из методов воздействия на механические напряжения является ионная бомбардировка. Она может вносить как растягивающие, так и сжимающие напряжения, и поэтому предоставляет широкие возможности по их регулированию. Результат бомбардировки зависит от множества факторов: температуры подложки, структуры пленки и исходного поля напряжений. Одним из ключевых параметров является энергия ионов. Как правило, для воздействия на остаточные напряжения используется энергия порядка 1 кэВ. Однако использование ионов с такой энергией может приводить к нежелательным эффектам, таким как распыление материала или внедрение ионов в структуру пленки. Избежать этих эффектов позволяет бомбардировка ионами с энергией ниже порога распыления. Ее можно осуществить в реакторе

плотной плазмы ВЧ индукционного разряда низкого давления, который позволяет независимо управлять энергией и плотностью ионного потока.

Положения, выносимые на защиту

1. Ионно-плазменная обработка с энергией ионов ниже порога распыления в диапазоне 15-30 эВ оказывает существенное воздействие на механические напряжения в тонких пленках Cr (200-300 нм) на глубине, сравнимой с их толщиной. В зависимости от исходного напряженного состояния и условий обработки, она приводит как к выпрямлению балочных структур, изготовленных из этих пленок, так и, наоборот, к увеличению изгиба.

2. Ионно-плазменная обработка не способна оказывать воздействие на изгиб тестовых микромеханических структур, вывешивание которых путем плазмохимического травления Si под ними проводилось до обработки. Это свидетельствует, что для наличия воздействия обработки в пленке должны присутствовать исходные остаточные механические напряжения или их градиент.

3. Результаты МД моделирования показали, что в ходе бомбардировки ионами Ar поликристаллической пленки на поверхности зерен возникают адатомы, которые движутся по его поверхности и проникают вглубь межзеренных границ. Так же как в ходе осаждения пленки, проникновение адатомов в межзеренную границу в ходе ионной бомбардировки приводит к формированию сжимающих напряжений, а их более компактное перераспределение внутри межзеренных границ приводит к частичной релаксации сжимающих напряжений.

4. Управление градиентом напряжений в пленках позволяет осуществлять сборку трехмерных микроустройств, в частности микроиндукторов.

Практическая значимость работы

Разработанная методика позволяет определять изменение механических напряжений и глубину модификации в пленках в результате ионно-

плазменной обработки, и применима также к любым 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.

Личный вклад автора

Общая постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем автора Амировым И.И. Планирование исследований, теоретический анализ, обработка и интерпретация результатов экспериментов проводились соискателем самостоятельно. Автор принимал активное участие в проведении МД моделирования, основная часть расчетов была проведена им самостоятельно. Также самостоятельно соискателем было проведено моделирование методом конечных элементов. Автору принадлежит ключевая роль в большинстве работ, включенных в диссертацию.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 1, 4 и 6 паспорта специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Полнота изложения материалов в печати

Основные результаты работы опубликованы в 5 статьях, включая 2 статьи в российских журналах (входят в перечень научных журналов ВАК при Минобрнауки России) и 3 статьи в зарубежных журналах (индексируются WoS и/или Scopus), а также в тезисах 15 всероссийских и международных конференций.

Заключение

Научный семинар «Перспективные технологии и устройства микро- и нанoeлектроники» ФТИАН им. К.А. Валиева РАН после обсуждения диссертационной работы Бабушкина А.С. оценивает ее как научную квалификационную работу, которая по актуальности, объему, новизне и

значимости результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертационная работа Бабушкина А.С. отвечает всем требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям, так как является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знания.

Исходя из вышесказанного, следует рекомендовать диссертацию Бабушкина А.С. «Влияние ионно-плазменной обработки на остаточные механические напряжения в тонких поликристаллических пленках металлов» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в Диссертационный совет 24.2.326.07 при РТУ МИРЭА по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Ученый секретарь ФТИАН им. К.А. Валиева РАН
к.ф.-м.н.

И.А. Хорин

ФТИАН им. К.А. Валиева РАН,
117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект д.36 к.1
телефон: +7 (499) 129-54-92, факс: +7 (499) 125-38-26,
e-mail: ftian.director@bk.ru, lukichev@ftian.ru