



На правах рукописи
УДК 621.382

Осипов Александр Владимирович

**НАУЧНОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАНЕСЕНИЯ
УПРОЧНЯЮЩИХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

**Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2004

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Панфилов Ю.В.
Научный консультант: кандидат технических наук,
доцент Булыгина Е.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Белянин А.Ф.
кандидат технических наук
Шитов В. А.

Ведущая организация: ОАО «НИИ ТОЧНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»

Защита состоится «9» декабря 2004 г. в _____ часов на заседа-
нии диссертационного совета Д212.141.18 при Московском Государственном
Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я
Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью, просьба
направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им.
Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.18.

Автореферат разослан «5» ноября 2004 г.

Телефон для справок: (095) 267-09-63

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Цветков Ю. Б.

Подписано в печать 11.11 2004 г. Заказ № 228. Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

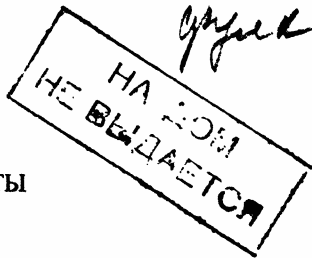
104



1698511

Осипов А.В. Научное и техн

-512



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее время во многих областях науки и техники возрос интерес к многослойным покрытиям с толщиной слоев менее 1 мкм, а также произошло расширение области их применения. Это обусловлено возможностью значительной модификации или даже принципиального изменения свойств известных материалов, а также новыми возможностями создания материалов и изделий из структурных элементов нанометрового размера.

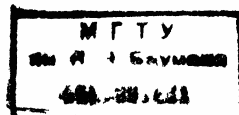
Варьируя толщиной пленок можно независимо от химического состава управлять свойствами материалов, например, получать диэлектрические или полупроводниковые характеристики у металлов, достигать более высокой прочности и микротвердости, например, меди и алюминия по сравнению с титаном или сталью, а используя многокомпонентные, многофазные и многослойные пленки, можно формировать нанокompозитные материалы с очень широким диапазоном функциональных назначений.

Многослойные тонкопленочные покрытия используются в качестве элементов сверхбольших интегральных микросхем (СБИС), рентгеновских зеркал, устройств с эффектом гигантского магнитного сопротивления (ГМС), микроэлектромеханических систем (МЭМС) – микродвигатели, зубчатые микромеханизмы, микротурбины, микропинцеты и др., кантилеверов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), обрабатывающего инструмента (сверла для печатных плат и керамики, пробойники для перфорации и т.п.). В качестве материалов таких покрытий используются металлы, например, Ti, Nb, Al, Cu, W, Pt, Au, а также алмазные и алмазоподобные пленки, нитриды, карбиды, оксиды и силициды металлов.

Одновременно с резким расширением ассортимента используемых материалов произошла переоценка требований к их параметрам, в частности, необходимым условием становится обеспечение совокупности функциональных характеристик использующихся материалов: кристаллохимической и термохимической совместимости, механической, тепловой и электрической стойкости, биосовместимости, низкой механической и термохимической усталости и электрической деградации.

При получении слоев с толщиной нанометрового диапазона возникают принципиальные трудности физического и технологического характера, в том числе, связанные с методами исследования материалов и контроля изделий.

Исследованиями многослойных тонкопленочных покрытий занимались Ковалев Л. К. (квантовая электроника), Одинокое В. В. (микроэлектроника), Марахтанов М. К. (теплозащитные покрытия), Лучинин В. В. (микросистем-



ная техника) и другие ученые. Однако в их работах не акцентировалось внимание на упрочняющие свойства наноразмерных многослойных покрытий, от которых зависит работоспособность СБИС, МЭМС, СЗМ, а также обрабатывающего инструмента для изделий электронной техники.

На сегодняшний день в области получения многослойных тонкопленочных покрытий с улучшенными механическими свойствами остаются открытыми вопросы выбора материала, толщины и количества слоев, формирования заданной структуры пленок, подготовки поверхности подложки перед осаждением покрытия и т.д.

Таким образом, возникла необходимость в создании научных основ формирования упрочняющих наноразмерных многослойных тонкопленочных покрытий и измерения их характеристик для выявления взаимосвязей между структурными параметрами тонких пленок, морфологией границ раздела и свойствами нанокompозитного материала в целом, а также для определения граничных условий формирования тонкопленочных структур с необходимыми функциональными характеристиками.

Цель работы

Создание научных основ выбора методов и режимов формирования наноразмерных тонких пленок и многослойных структур с повышенными механическими свойствами и измерения их характеристик.

Научная новизна работы

1. Впервые для ряда металлических (Al, Cu, Ti, Nb) и углеродных алмазоподобных (α -C:H) пленок получены количественные характеристики повышения механических свойств (микротвердость) наноразмерных тонких пленок (наноэффект) по сравнению с пленками микрометрового диапазона и массивными материалами.

2. Экспериментально обнаружено, что независимо от метода осаждения с уменьшением толщины пленки проявляется наноэффект повышения микротвердости, однако степень ее повышения от метода осаждения зависит.

3. Впервые для таких материалов электронной техники, как Ti и Nb экспериментально установлено, что обеспечить высокую твердость многослойной композиции на основе наноразмерных пленок возможно при объединении в одном многослойном покрытии сверхтонких пленок с толщиной не более 10...15 нм.

Практическая ценность работы

1. В результате анализа существующих методов нанесения тонкопленочных покрытий установлено, что для формирования широкого спектра многофункциональных тонкопленочных покрытий наиболее перспективно объединение методов магнетронного распыления, импульсного дугового и ионно-лучевого осаждения в одном технологическом цикле.

2. Получены технологические режимы и показана практическая возможность одновременного функционирования нескольких источников с принципиально различными методами осаждения тонких пленок, такими как магнетронное распыление и ионно-лучевое осаждение.

3. В результате исследований установлено, что в многослойных композициях рекомендуется объединять слои и пленки материалов, которые значительно отличаются по механическим характеристикам (твердость), обладают высокой стабильностью свойств и обеспечивают прочную связь (адгезия) между слоями, например, Ti и α -C:H.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследований современной технологии тонких пленок, согласно которым наиболее перспективными методами формирования многослойных наноразмерных тонкопленочных покрытий с повышенными механическими свойствами являются магнетронное распыление и ионно-лучевое осаждение, реализуемые в едином вакуумном цикле модернизированного или вновь созданного технологического оборудования.

2. Результаты исследования взаимосвязей между технологическими факторами формирования тонкопленочных покрытий и их свойствами, согласно которым повышение механических свойств (наноэффект) проявляется на тонких пленках (10...150 нм) независимо от материала пленки, материала и температуры основы (в пределах 373...623 K).

3. Результаты исследований механических свойств многослойных наноразмерных тонкопленочных покрытий посредством микро- и наноиндентирования, согласно которым создание в пленочных материалах дислокационных барьеров (межфазные поверхности раздела) и регулирование расстояний между ними позволяют управлять прочностью и пластичностью этих покрытий.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной молодежной научной конференции «XXVII Гагаринские чтения» (Москва, 2001), на 4-ом Международном симпозиуме «Вакуумные технологии и оборудование» (Харьков, 2001), на 6-ом Всероссийском совещании семинаре «Инженерно – физические проблемы новой техники» (Москва, 2001), на III Всероссийской научной конференции «Молекулярная физика неравновесных систем» (Иваново, 2001), на VII, VIII, IX Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» (Москва, 2001-2003), на VIII, IX, X научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Москва, 2001-2003), на 14, 15-ом Международном симпозиуме «Тонкие пленки в оптике и электронике» (Харьков, 2002-2003), на 8-ой Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва, 2002), на NATO-Russia Advanced Research Workshop «Nanostructured Thin Films and Nanodispersion Strengthened Coatings» (Moscow, 2003), на XVI Международном симпозиуме «Тонкие пленки в электронике» (Москва, 2004).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ в научных журналах, а также в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 78 наименований и 1 приложения. Работа содержит 186 страниц машинописного текста, в том числе 20 таблиц и 103 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность; определена цель и поставлены задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа состояния, тенденций развития и перспективных направлений применения многослойных наноразмерных тонкопленочных покрытий, а также особенностей оборудования и технологий их формирования.

Показано, что наноструктурные пленки обладают комплексом уникальных характеристик: ультравысокими твердостью и прочностью, высокой упругостью восстановления и вязкостью, повышенной коррозионной стойкостью. Многослойные тонкопленочные покрытия и технологии их формирования получили широкое распространение и занимают весьма обширную область, включающую в себя целый ряд направлений физики, химии, биологии, электроники, медицины и других наук.

До недавнего времени требования к процессам формирования и к самим многослойным покрытиям, применяющимся в электронике, оптике и других областях, назначались с целью обеспечения заданных целевых свойств многослойной структуры и не распространялись на механические свойства покрытий. Однако, анализ литературы показал, что практически ко всем многослойным структурам, независимо от их целевого назначения, предъявляются требования по стойкости к механическому воздействию. Многослойная структура должна обладать не только заданными функциональными показателями, но и высокими адгезионными (прочность сцепления с основой) и механическими (твердость, износостойкость) свойствами (табл.1).

Формирование многослойных тонкопленочных структур на основе нанопленок ионно-плазменными методами требует модернизации существующей технологии. Наиболее востребованными и перспективными для получения наноразмерных пленок являются технологии формирования тонкопленочных покрытий, позволяющие за один рабочий цикл воспроизводимо изменять толщину в широком диапазоне (1...500 нм) и количество слоев до нескольких тысяч.

В результате анализа существующих методов нанесения тонкопленочных покрытий установлено, что для формирования широкого спектра многофункциональных тонкопленочных покрытий наиболее перспективно объединение методов магнетронного распыления, импульсного дугового и ионно-лучевого осаждения в одном технологическом цикле.

В настоящее время для формирования многофункциональных покрытий используется оборудование различного класса – от недорогих установок периодического действия до автоматических линий и оборудования кластерного типа. Существующее оборудование, ориентированное на электронную промышленность, при соответствующей модернизации может быть быстро перестроено на другое направление производства широкого спектра изделий.

Таблица 1.

Назначение и требования к многослойным тонкопленочным структурам

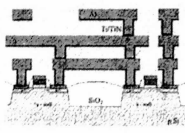
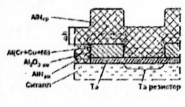
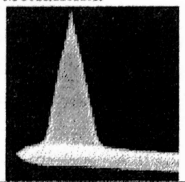
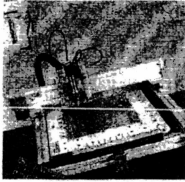
Область применения	Материал и толщина слоя	Назначение	Требования	Метод нанесения
Микро-электроника   	$Ti(0,035-0,04)+Al$ $Ti(0,02)/TiN(0,05)$ $+W$ $Ti(0,03)/AlCu(1,3)$ $Ti(0,03)/AlCu(1,3)$ $Ti(0,03)/AlCu(1,2)$ $/TiN(0,05)$ $AlN_{ам}(0,2-0,4)/$ $/Al_2O_{3ам}(0,2-0,4)/$ $/AlN_{кр}(2-3)$	Защитная металлизация многослойных полупроводниковых структур Защитная металлизация тонкопленочных матриц термопечатающих головок	Стойкость к механическому воздействию Стойкость к механическому воздействию	Ионно-плазменный, магнетрон на постоянном токе Ионно-плазменный, Реактивное магнетронное распыление
Микроэлектро-механика 	W_2C , TiN , TiO , W , Cr	Защитное покрытие для зондовых игл кантилеверов	Высокая электропроводность, стойкость к механическому воздействию	Импульсный дуговой разряд, магнетронное распыление
Оптика 	$TiO_2(0,02-0,06)/$ $/Zn(0,002)/$ $/Ag(0,02)/$ $/NiCr/Si_3N_4$ $(0,02-0,06)$ $TiO_2(0,02-0,06)/$ $/Zn(0,002)/$ $/Ag(0,02)/Ti/$ $/Si_3N_4(0,02-0,06)$	Низкоэмиссионные покрытия Низкоэмиссионные покрытия	Однородность оптических свойств, стойкость к механическому и химическому воздействию	Ионно-плазменный, магнетрон TwinMag (40 кГц)

Таблица 1 (продолжение)

Машино- строение 	Ti(0,02-0,06)/ /TiC/C(1,5-2)	Износо- стойкое покрытие	Стойкость к механи- ческому воздейст- вию	Импульс- ный дуго- вой разряд
	Ti(0,01-0,02)/Ti+ +TiN(0,01-0,02)/ /TiN(3-5) Ti+TiN/TiN/ /Ti+TiN Zr/ZrN/ZrTiN/TiN	Износо- стойкое покрытие	Стойкость к механи- ческому воздейст- вию	Магне- тронное распыле- ние
Примечание. Слои материалов в многослойных структурах указаны слева направо, последовательно от подложки (основы). Через запятую перечислены материалы, взаимозаменяющие друг друга. Цифры, указанные в скобках, соответствуют толщине отдельного слоя в мкм.				

При формировании слоев с размерами 10...100 нм возникают принципиальные трудности физического и технологического характера, в количественном измерении характеристик отдельных пленок и многослойных структур. Интерпретация свойств наноразмерных тонких пленок является достаточно сложной задачей из-за большого разнообразия факторов, влияющих на характеристики пленок. Подробному исследованию, проработке и обоснованию подлежат такие вопросы, как: выявление оптимального количества слоев в покрытии, определение оптимальной толщины нанопленок, определение порядка чередования слоев (более толстые нанопленки из пластичных материалов со сверхтонкими из супертвердых материалов или наоборот), подготовка поверхности перед нанесением (шероховатость, микрорельеф).

Во второй главе представлены физико-химические аспекты формирования многослойных тонкопленочных наноразмерных структур и освещены проблемы измерения механических свойств тонких пленок посредством микро- и наноиндентирования.

Аналитические исследования процесса формирования тонких пленок, влияния их структуры, границ раздела поверхностей и самой поверхности пленки на ее механические свойства показали, что современными ионно-плазменными методами можно получить высокие прочностные показатели двумя прямо противоположными способами: снижая концентрацию дефектов структуры (в пределе приближаясь к идеальному монокристаллическому со-

стоянию) или, наоборот, увеличивая ее вплоть до создания мелкодисперсного нанокристаллического или аморфного состояния.

Другими словами, регулируя количество дефектов можно увеличивать прочностные показатели материала (твердость) и одновременно с этим сохранить для данного материала высокий уровень пластичности и вязкости разрушения. Одним из путей повышения прочности материала при сохранении или даже увеличении пластичности, является формирование многослойных наноразмерных тонкопленочных покрытий.

Теоретически обоснована зависимость прочности многослойных тонкопленочных композиций от энергии связи (адгезии) пластичных и хрупких (упрочняющих) слоев. Обоснован избирательный подход к выбору материалов, которые войдут в состав композиционного материала. Показано, что с помощью выбора материала и температуры подложки можно варьировать величину и знак внутренних напряжений в пленках.

В результате анализа методов и условий осаждения тонких пленок с повышенными прочностными свойствами, были выявлены технологические факторы, оказывающие существенное влияние на формирование неравновесной структуры пленок. В результате аналитических исследований установлено, что в многослойных композициях рекомендуется объединять слои и пленки материалов, которые значительно отличаются по механическим характеристикам, обладают высокой стабильностью свойств и обеспечивают прочную связь (адгезия) между слоями.

Проведен анализ существующих теоретических моделей расчета твердости. Показано, что многочисленные попытки смоделировать структуру многослойного покрытия приводят к системам уравнений, в которых присутствует значительное количество допущений, приближений и для которых не существует аналитического решения. Поэтому результаты теоретической

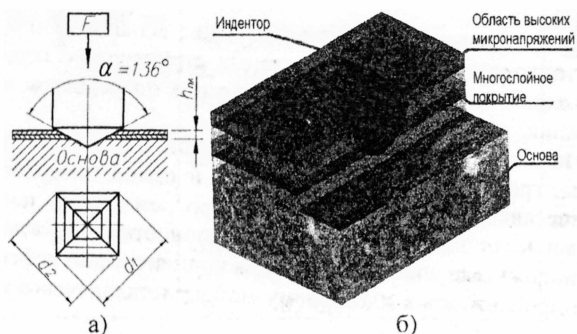


Рис.1. Методы микро- (а) и наноиндентирования (б)

оценки структурных параметров покрытия сопровождаются проведением экспериментов и исследования тонких пленок носят эмпирический характер.

Исследованы проблемы измерения твердости тонких пленок посредством микро- и наноинден-

тирования (рис.1). Показано, что стандартный метод Виккерса не может быть использован для измерения твердости покрытий с толщинами менее 5,6 мкм и в том числе субтонких, нанометровых пленок и слоев.

С помощью метода наноиндентирования установлено, что создание в пленочных материалах дислокационных барьеров и регулирование расстояний между ними позволяют управлять прочностью и пластичностью. При неизменном объемном содержании пластичных и хрупких слоев прочностью многослойных композиций можно управлять путем изменения их толщины.

Третья глава посвящена разработке технологического оборудования для нанесения многослойных тонких пленок.

Разработаны технологические и конструкционные варианты (рис.2), реализованные на модернизированном и специально созданном многопозиционном оборудовании для нанесения тонких пленок в вакууме (рис.3, 4).

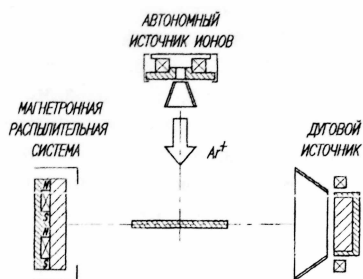
Экспериментально подтверждено, что несколько принципиально различных методов осаждения тонких пленок могут быть успешно объединены в одном технологическом цикле, что позволяет расширить спектр формируемых многофункциональных тонкопленочных покрытий.

Формирование покрытий проводилось на трех экспериментальных и одной промышленной установках с помощью следующих методов нанесения тонких пленок в вакууме: резистивного термического испарения, магнетронного распыления, дугового, ионно-лучевого и газозафазного осаждения.

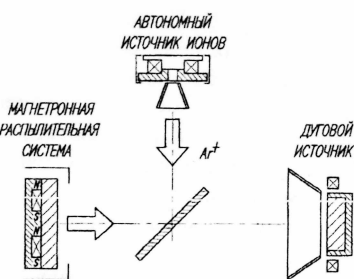
На данном оборудовании отрабатывались технологические режимы нанесения однослойных пленок гидрогенизированного аморфного углерода (алмазоподобного углерода – α -C:H) в атмосфере циклогексана, формирование Al и Cu пленок различной толщины (0,05...1 мкм), осаждение Ti (0,01...1 мкм), Nb (0,015...1 мкм) и α -C:H (0,03...0,5 мкм) пленок, а также композиций на их основе. Пленки Ti и Nb формировались методами магнетронного распыления и дугового осаждения в вакууме. Осаждение Ti (0,025...0,2 мкм) и Al (0,1...0,8 мкм) пленок, а также композиций на их основе с толщиной 0,45...2,6 мкм и количеством слоев до 7 осуществлялось методом магнетронного распыления на постоянном токе.

Источник на основе магнетронного разряда с полым катодом был введен в конструкцию вакуумного стенда для формирования многослойных покрытий с содержанием α -C:H слоев методом ионно-лучевого осаждения.

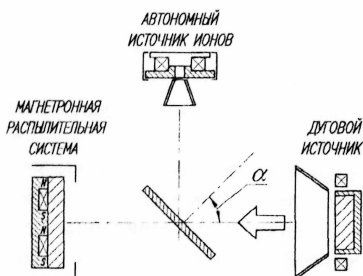
Конструктивное расположение источников на данном оборудовании позволяет одновременно наносить покрытие посредством магнетрона или дугового источника и обрабатывать поверхность подложки ионным пучком с помощью автономного источника ионов (АИИ).



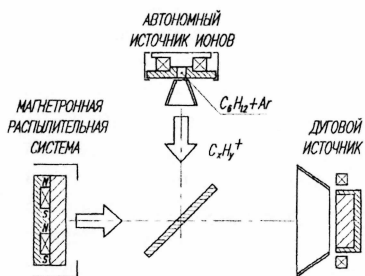
а) Активация поверхности подложки перед осаждением



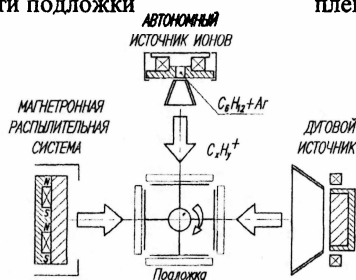
б) Осаждение ионным распылением с ассистированием ионного пучка



в) Осаждение дуговым разрядом под углом к поверхности подложки



г) Нанесение многокомпонентных пленочных структур



д) Формирование многослойного покрытия с нанесением углеродных α -C:N пленок

Рис.2. Варианты формирования многослойных и многокомпонентных покрытий

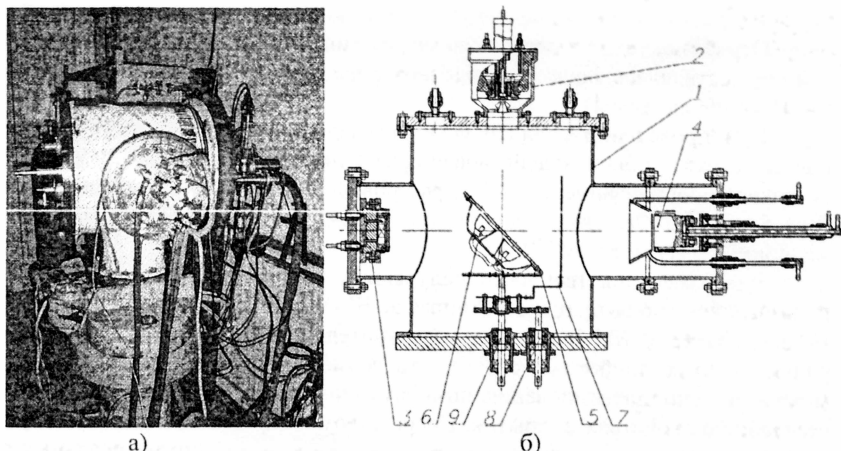


Рис.3. Вакуумный универсальный пост, общий вид (а) и ориентация источников (б): 1 – вакуумная камера, 2 – автономный источник ионов, 3 – магнетрон на постоянном токе, 4 – дуговой источник с холодным катодом ИД-200-01, 5 – подложкодержатель, 6 – галогенные лампы с расширенным инфракрасным спектром, 7 – защитный экран, 8 – вал вращения экрана, 9 – вал вращения подложкодержателя

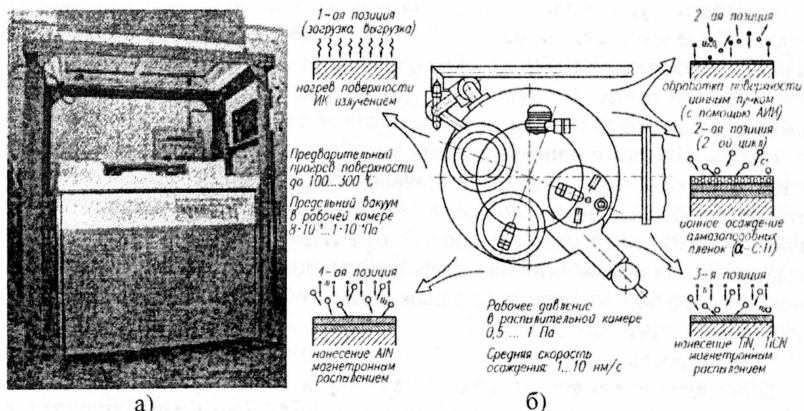


Рис.4. Модернизированная промышленная установка «Оратория-5», общий вид (а) и вариант распределения технологических операций по позициям (б)

Обработка технологии и режимов формирования многослойных покрытий осуществлялась также на модернизированной промышленной установке 01НИ-7-006 (см. рис.4).

При проведении аналитических исследований полученных тонкопленочных структур было задействовано различное оптико-электронное и измерительное оборудование, а именно растровый электронный микроскоп «Cam-Scap S4-88DV100», сканирующий туннельный микроскоп «СММ-2000Т» и микроинтерферометр «МИИ-4».

Для измерения твердости полученных тонкопленочных покрытий использовались микротвердомер Shimadzu HМV-2000 и нанотвердомер Nano-Hardness Tester (CSM Instruments). Сравнительный анализ результатов измерений на этих приборах показал, что совместное исследование методами микро- и наноиндентирования позволяет получить наиболее полное представление о свойствах покрытия. Посредством микроиндентирования осуществляется интегральная оценка твердости всей композиции на реальных образцах, а посредством наноиндентирования можно оценить твердость каждого слоя, но только на специальных образцах (кремний, ситалл и т.п.).

В четвертой главе представлены результаты исследований одно- и многослойных наноразмерных пленочных структур, полученных на экспериментальном оборудовании.

Эффект упрочнения материала при его нанометровых размерах (наноэффект) исследовался на однослойных Al (0,08...1 мкм), Cu (0,05...0,8 мкм), Ti (0,06...1 мкм), Nb (0,09...1 мкм) пленках, сформированных на Al основе.

В результате исследований было подтверждено, что механические свойства материала пленки (в данном случае твердость) сильно зависят от ее размеров. Пленки с нанометровыми толщинами обладают твердостью, которая в несколько раз превышает значение твердости обычных массивных материалов. Исследования показали, что наноэффект проявляется на тонких пленках (0,01...0,15 мкм) независимо от материала пленки и материала основы (рис.5). На проявление наноэффекта для однослойных металлических пленок практически не оказывает влияния температура предварительного нагрева основы в пределах 373...623 К.

Интересным феноменом, обнаруженным впервые, является влияние метода осаждения тонких пленок на характер и величину наноэффекта. Механические свойства пленок (твердость) из одного и того же материала, сформированные на одной и той же основе, но принципиально различными методами осаждения, существенно отличаются друг от друга.

Влияние толщины (0,01...0,8 мкм) отдельного слоя и количества слоев (2...7) на твердость многослойного покрытия исследовалось на Ti/Al, Ti/Cu,

Ti/Nb, Ti/ α -C:H многослойных образцах, сформированных на однофазных Al и Si подложках, а также подложках сложного химического состава из коррозионно-стойкой (17X18H9) и инструментальной (Р6М5) стали.

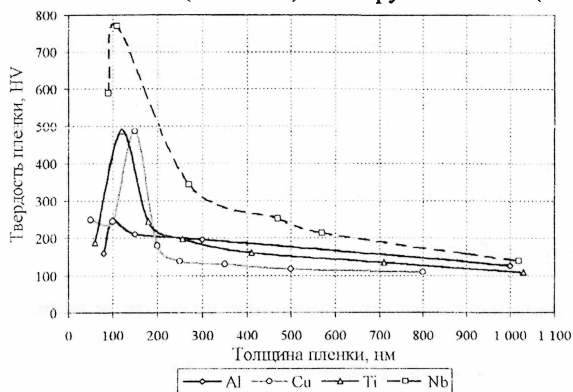


Рис.5. График зависимости твердости нанопленок от толщины

Впервые для ряда материалов экспериментально установлено, что сохранить высокую твердость многослойного покрытия на основе наноразмерных пленок возможно при объединении слоев с толщиной не более 10...15

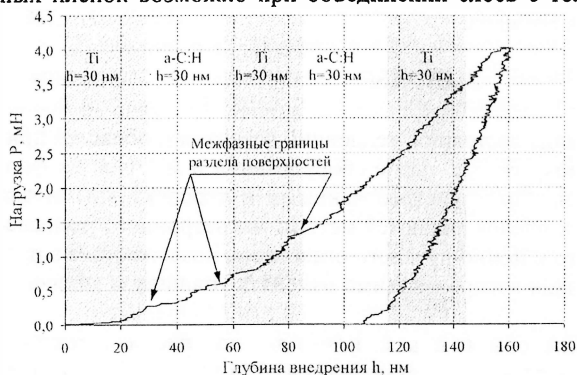


Рис.6. Межфазные границы раздела многослойной тонкопленочной структуры Ti/ α -C:H/Ti/ α -C:H/Ti с толщиной слоев 0,03 мкм

В процессе экспериментов было установлено, что в многослойном покрытии может происходить разупрочнение сверхтонких пленок при выборе материалов составляющих слоев случайным образом. Для сохранения нанозффекта в многослойном покрытии необходимо избирательно подходить к определению толщины каждого конкретного слоя.

нм. Для многослойных композиций на основе металлических пленок было установлено, что с увеличением процентного содержания (толщины слоя) более пластичной составляющей, твердость покрытия повышается.

В результате исследований посредством микро- и наноиндентирования установлено, что с увели-

чением толщины пластичного слоя возрастает значение критической нагрузки, т.е. композиция становится менее хрупкой и восприимчивой к высокой скорости деформации.

Исследования показали, что посредством наноиндентирования можно обнаружить межфазные границы раздела между слоями в многослойном покрытии при достаточно низких скоростях деформирования. На рисунке 6 представлена кривая наноиндентирования, соответствующая силе нагружения 4 мН и скорости 8 мН/мин, и обозначены межфазные границы раздела между слоями многослойной структуры $Ti/\alpha-C:H/Ti/\alpha-C:H/Ti$.

Внедрение результатов работы:

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы:

1. В ОАО ЦНИТИ «Техномаш» при разработке технологических режимов формирования многослойных тонкопленочных покрытий, включающих слои алмазоподобного углерода, различного функционального назначения, в том числе для изделий электронной техники.

2. В ОАО «Московский завод «Спринт» при модернизации и запуске промышленной многопозиционной установки 01НИ-7-006.

3. В учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ состояния, тенденций развития и областей применения многослойных покрытий, а также оборудования и методов их формирования показал, что наиболее востребованными и перспективными для получения наноразмерных пленок являются методы магнетронного распыления, импульсного дугового и ионно-лучевого осаждения, позволяющие в пределах одного рабочего цикла воспроизводимо изменять толщину и количество слоев.

2. Проведенные исследования показали, что для повышения механических свойств (микротвердость) ряда металлических (Al, Cu, Ti, Nb) и углеродных алмазоподобных ($\alpha-C:H$) пленок необходимо уменьшать их толщину до нанометровых размеров (10...150 нм), при которых независимо от материала пленки, материала и температуры основы (в пределах 373...623 К) микротвердость повышается в 1,5...4 раза (нанозффект) по сравнению пленками микрометровой толщины и монолитным материалом.

3. В результате исследований установлено, что в многослойных тонкопленочных покрытиях рекомендуется объединять слои материалов, которые значительно отличаются по механическим характеристикам, обладают высокой стабильностью свойств и обеспечивают прочную связь (адгезия) между слоями, например, Ti и α -C:H.

4. Посредством микро- и наноиндентирования получены результаты исследований многослойной структуры Ti/ α -C:H/Ti/ α -C:H/Ti, согласно которым для управления прочностью и пластичностью тонких пленок необходимо создавать в пленочных материалах дислокационные барьеры (межфазные поверхности раздела) и регулировать расстояние между ними.

5. Впервые для таких материалов электронной техники, как Ti и Nb экспериментально установлено, что для повышения твердости многослойной композиции на основе наноразмерных пленок необходимо объединение в одном многослойном покрытии сверхтонких пленок с толщиной не более 10...15 нм.

Основные результаты работы отражены в публикациях:

1. Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Влияние температуры нагрева поверхности подложки и толщины покрытия на микротвердость // Гагаринские чтения.: Тез. докл. 27-ой Международной молодежной научно-техн. конф. – М., 2001. – С. 70-71.

2. Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Физическая сущность прочности нанокомпозитных тонкопленочных покрытий // Инженерно-физические проблемы новой техники.: Сб. докл. 6-ого Всерос. совещания-семинара. – М., 2001. – С. 93-94.

3. Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Изучение природы прочности тонких пленок // Молекулярная физика неравновесных систем.: Сб. докл. 3-ей Всерос. научной конф. – Иваново, 2001. – С. 255-261.

4. Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Повышение механических свойств тонких пленок // Высокие технологии в промышленности России.: Сб докл. 7-ой Международной научно-техн. конф. – М., 2001. – С. 110-114.

5. Авцинов Р.И., Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Синтез тонкопленочных покрытий с повышенными прочностными свойствами // Вакуумная наука и техника.: Сб. докл. 8-ой научно-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. – М., 2001. – С. 145-150.

6. Исследование твердости сверхтонких пленок / М.К. Бойченко, Е.В. Булыгина, Ю.А. Быков и др. // Тонкие пленки в оптике и электронике.: Сб. докл. 14-ого Международного симпозиума. – Харьков, 2002. – С. 144-146.

7. Булыгина Е.В., Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Исследование микро- твердости многослойных пленок нанометровой толщины // Высокие технологи в промышленности России.: Сб. докл. 8-ой Международной научно-техн. конф. – М., 2002. – С. 42-47.

8. Булыгина Е.В., Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Измерение твердости пленочных структур // Состояние и проблемы измерений.: Сб. докл. 8-ой Всерос. научно-техн. конф. – М., 2002. – С. 111-112.

9. Булыгина Е.В., Осипов А.В. Технологические и конструкционные варианты упрочнения пленки в оптике и электровакуумной технике // Тонкие пленки в вакууме: Тонкие пленки в оптике и электровакуумной технике. – Харьков, 2003. – С. 111-112.

10. Осипов А.В., Панфилов Ю.В. Научное и технологическое обеспечение нанесения упрочняющих наноразмерных тонкопленочных покрытий... coatings for strengthened machinery needs // Nanotechnology Coatings. NATO-Russia Advanced Research Workshop, 2003. – Р. 211.

11. Osipov A.V., Panfilov Y.V. Coatings for strengthened machinery needs // Nanotechnology Coatings. NATO-Russia Advanced Research Workshop, 2003. – Р. 211.

1
крытий
в элект
С. 343-
1
тан/гид
дентир
ник. Ил

Осипов А.В.
У1698511
Научное и технологическое
обеспечение нанесения
упрочняющих наноразмерных
тонкопленочных покрытий...
2004
0-00

1698511

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока
