

Проблема управления ионным потоком в технологических установках плазменно-ионной обработки

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрена проблема управления энергией и плотностью ионного потока вдоль поверхности обрабатываемой подложки в технологических устройствах плазменно-ионной обработки. Проведен анализ современных технологических систем и методов управления параметрами ионного потока. Предложена классификация схем взаимодействия источников плазмы с подложкой, где определяющей является функция, которую выполняет подложка в процессе генерации плазмы. Для управления ионным потоком необходимо использовать магнитные ловушки электронов плазмы. В системах, где подложка является частью источника плазмы, конфигурация ловушки должна соответствовать схеме с магнитным удержанием плазмы, соответствующей конфигурации магнетронного распылительного устройства при использовании его катода в качестве подложки. В системах, где подложка не является частью источника плазмы, предложено создавать ловушки с магнитными зеркалами в области источника плазмы и подложки. Описан комплекс вопросов, которые необходимо рассмотреть для разработки метода управления плотностью и энергией ионов на подложку.

Ключевые слова: плазменно-ионная обработка, управление ионными потоками.

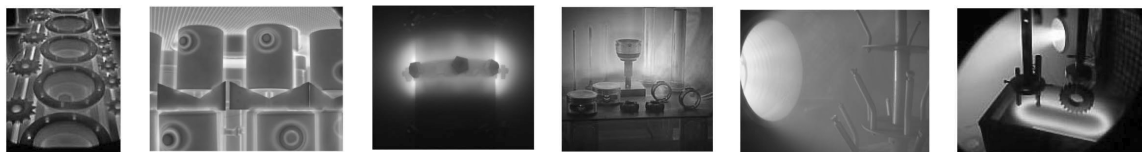
1. Введение

Возможность использования потоков ионов и плазмы для изменения поверхностных свойств материалов и образования необходимых структур на их поверхности была открыта еще во второй половине IX века [1]. Однако интенсивное развитие плазменно-ионных технологий отмечается начиная со второй половины XX века - основными причинами явились возросшие требования к ресурсу деталей машин и экономия дорогостоящих легирующих материалов (70 – 80-е гг.), производство полупроводниковой электроники (90-е гг.) [2, 3], а также планируемый переход на уровень нанотехнологий [4, 5].

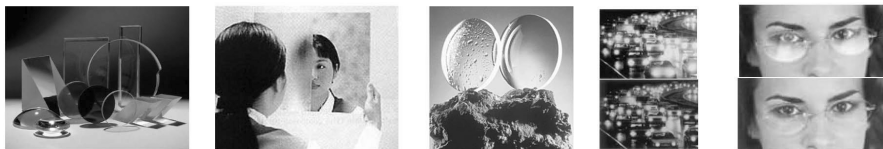
Традиционные технологии, не использующие плазму, существенно зависят от такого равновесного параметра системы, как температура. Однако возможность повышения температуры ограничена температурами фазовых переходов материала подложки, которые обычно составляют несколько сот градусов Цельсия, требованиями к предварительно упрочненному слою и рядом других причин. Наиболее удобным способом решения возникающих проблем является перевод вещества в состояние плазмы, которую относительно легко получить в технологических устройствах – как правило, ионизацией электронным ударом [6]. Вещество в состоянии плазмы обладает двумя основными преимуществами по сравнению с нейтральной фазой: значительно более высокой химической активностью и лучшей управляемостью потоками вещества. Последнее свойство объясняется способностью заряженных частиц реагировать на приложенные электрические и магнитные поля. Кроме того, плазменно-ионные технологии, как правило, реализуются в условиях пониженного давления, что позволяет понизить уровень нежелательных примесей в образующихся поверхностных слоях. Этим объясняется наличие широкого спектра технологических процессов травления, очистки, модификации, азотирования и легирования поверхностных слоев, а также осаждения покрытий (рисунок 1).

ПЛАЗМЕННО-ИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

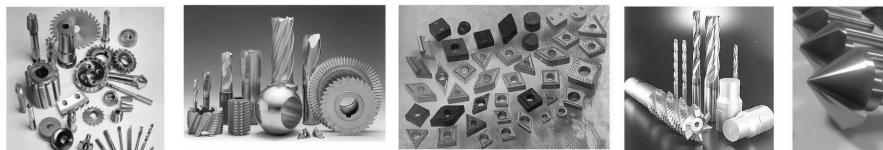
травления, очистки, модификации, азотирования, легирования поверхности и осаждения покрытий



Изменение оптических свойств поверхности



Повышение стойкости режущего инструмента



Увеличение ресурса изделий



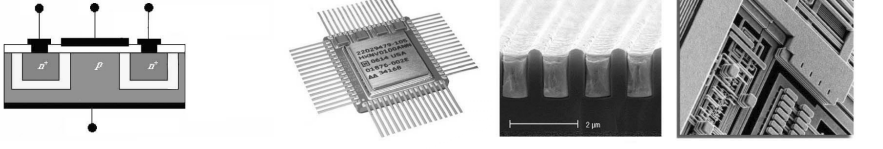
Создание биосовместимых материалов



Осаждение декоративных покрытий



Создание интегральных микросхем



Создание микро-электронных механических систем

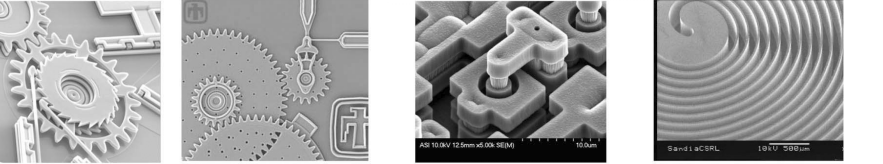


Рис. 1. Использование плазменно-ионных технологий в различных отраслях науки и техники

2. Влияние плотности ионного тока и энергии ионов на свойства поверхностного слоя

Основными параметрами ионного потока, обрабатывающего поверхность детали, являются плотность ионного тока и энергия ионов. Считается, что ионы подводят дополнительную энергию к атомам на обрабатываемой поверхности, обеспечивая, таким образом, их более высокую подвижность и более высокую вероятность образования прочных связей. Энергия ионов влияет на формирование структуры (зародышеобразование и уплотнение за счет баллистических эффектов), причем эффект от ионной бомбардировки зависит от энергии ионов [7]. Плотность ионного тока влияет на образование химических соединений в неравновесных условиях, а также на формирование текстуры [8]. Оба фактора влияют на образование химических соединений в равновесных условиях и формирование структуры (рост зерна и рекристаллизация) посредством изменения температуры поверхности. Все это определяет свойства поверхностного слоя (микротвердость, удельное электрическое сопротивление, плотность, коэффициенты преломления и отражения, адгезия, модуль упругости, внутренние напряжения, коэффициент трения, стойкость к износу, шероховатость, химический состав и толщина измененного слоя и др.) и производительность обработки (скорость распыления, насыщения легирующими элементами или роста покрытия).

Известно значительное количество экспериментальных работ, где рассмотрено влияние режимов обработки на характеристики поверхностного слоя в различных системах «ион/подложка». Так, в частности, Аксенов отмечал рост микротвердости вакуумно-дуговых покрытий в 2-3 раза в системах $Ti+N_2$, $Mo+N_2$ и $Al+O_2$ при увеличении энергии ионов от 150 до 250 эВ, изменение микротвердости покрытий TiN и MoN в 2-3 раза при увеличении плотности ионного тока от 0 до 120 A/m^2 , а также рост скорости осаждения Mo в 7 раз при увеличении плотности ионного тока от 30 до 120 A/m^2 [9]; Хуска (Houska) получил изменение микротвердости в пределах 25...45 ГПа при осаждении покрытия $Si-B-C-N$ на кремний методом магнетронного распыления при увеличении энергии ионов от 25 до 500 эВ [10]; Янг (Yang) отмечает изменение микротвердости в пределах 5...10 ГПа, износа в 7 раз и шероховатости в 3 раза при увеличении температуры подложки от 100 до 600 °С, а также изменение износа в 3 раза и шероховатости в 2,3 раза при изменении энергии ионов от 50 до 150 эВ при осаждении вакуумно-дугового покрытия $TiNi$ на аустенитную нержавеющую сталь [11]; Мартин (Martin) отметил изменение микротвердости в 1,5 раза, плотности в 1,25 раза и коэффициента преломления в 1,1 раза при осаждении покрытия Ta_2O_5 на кремний и стекло методом ионно-лучевого осаждения при увеличении плотности ионного тока от 0 до 200 мкА/см^2 [12]. Хуанг (Huang) получил изменение удельного электрического сопротивления до 10 раз покрытия TiN на кремниевой подложке методом ионно-лучевого осаждения при изменении энергии иона от 50 до 300 эВ и изменении температуры подложки от 25 до 300 °С [13], хотя Ю (Yu) отмечает изменение этого же параметра не более чем в 3 раза для этой же системы при осаждении покрытия вакуумно-дуговым методом при изменении только энергии ионов азота от 50 до 500 эВ [14]; Стрельницкий получил изменение удельного электрического сопротивления вакуумно-дугового углеродного алмазоподобного покрытия до 10 раз, плотности в 1,2 раза и коэффициента отражения в 2 раза при изменении энергии ионов углерода от 0 до 90 эВ [15]; Чен (Chen) отметил изменение этого параметра в 3 раза для покрытия ZrC , осажденного на кремнии методом магне-

тронного распыления при увеличении температуры подложки от 25 до 300 °С [16]; Гурувенкет (Guruvenket) получил изменение электросопротивления в 4 раза для покрытия TiN на кремнии (магнетронное распыление) при изменении энергии ионов от 0 до 60 эВ [17]. Шван (Schwan) отмечает изменение плотности углеродного покрытия (магнетронное распыление) на кварце при изменении энергии ионов от 20 до 160 эВ: в 1,25 раза – при увеличении плотности ионного потока в 5,4 раза и в 1,5 раза - при увеличении плотности ионного потока в 10 раз [18]; Чуа (Chua) обнаружил монотонный рост плотности вакуумно-дугового углеродного покрытия на кремнии на 10 % при увеличении плотности ионного тока от 0,2 до 0,6 мА/см² [19], а Шин (Shin) получил рост плотности покрытия TaN на SiO₂ (магнетронное распыление) на 20 % и изменение внутренних напряжений от -1 до +3 ГПа при увеличении плотности ионного тока в 11 раз [20]. Оптические свойства поверхности также зависят от параметров обработки. Так, Тэй (Tau) обнаружил, что коэффициент преломления вакуумно-дугового покрытия Al₂O₃ на кремнии изменяется на 1 % при изменении энергии ионов от 0 до 140 эВ и на 2 % при изменении температуры подложки от 120 до 500 °С [21], Плачидо (Placido) отметил изменение коэффициента преломления в 1,1 раза при осаждении покрытий TiO₂ и Ta₂O₅ на боросиликатное стекло (ионно-лучевое осаждение) при увеличении плотности ионного тока от 0,11 до 0,45 мА/см² [22]. Ли (Li) определил, что адгезия пленок карбонитрида на кремнии (магнетронное распыление) изменяется в 1,6 раза, а шероховатость поверхности - в 2,5 раза при изменении энергии ионов от 0 до 150 эВ [23]; Люо (Luo) отметил монотонное увеличение внутренних напряжений от -1 до -12 ГПа пленок карбонитрида в системе TiAlN-VN/MgO (магнетронное распыление) при изменении энергии ионов от 75 до 150 эВ [24]; Ульрих (Ulrich) выявил изменение внутренних напряжений от 0,5 до 2 ГПа покрытия CrAlN на кремнии (магнетронное распыление) и твердом сплаве при изменении энергии ионов от 25 до 250 эВ [25]. Лэйнг (Laing) определила увеличение критической нагрузки в 1,4 раза при испытании на износ покрытия TiN (магнетронное распыление) на быстрорежущей стали при увеличении плотности ионного тока от 23 до 70 А/м² [26]; Кок (Kok) установил изменение коэффициента трения в 2 раза и снижение износа в 6 раз покрытия CrC на быстрорежущей стали (вакуумно-дуговое и магнетронное осаждение) при изменении энергии ионов от 65 до 350 эВ [27]; Ваз (Vaz) отмечает возможность уменьшения шероховатости в 6,5 раз при осаждении покрытия ZrN_xO_y на быстрорежущую сталь (магнетронное распыление) при изменении энергии ионов от 0 до 75 эВ [28]; Занг (Zhang) получил изменение шероховатости вакуумно-дугового покрытия TiN на кремнии в пределах 10 % при изменении энергии ионов от 100 до 400 эВ [29]. Гаврилов увеличил толщину упрочненного слоя в 2 раза при увеличении плотности ионного тока от 15 до 50 А/м² и в 3 раза – при изменении энергии ионов от 100 до 300 эВ при ионном азотировании стали 12Х18Н10Т [30]; Майкула (Mikula) управлял химическим составом покрытия TiB_x на кремнии, быстрорежущей стали и твердом сплаве (магнетронное распыление), изменяя концентрацию бора в 1,3 раза при изменении энергии ионов от 10 до 90 эВ [31], а Мэйрхофер (Mayerhofer) определил возможность изменять концентрацию бора в 1,3 раза при увеличении в 25 раз плотности тока ионов аргона (магнетронное распыление) также при осаждении покрытия TiB_x на кремнии, быстрорежущей стали и твердом сплаве [32]. Схема, иллюстрирующая влияние параметров ионного потока на качественные характеристики поверхностного слоя и производительность плазменно-ионной обработки, представлена на рисунке 2.

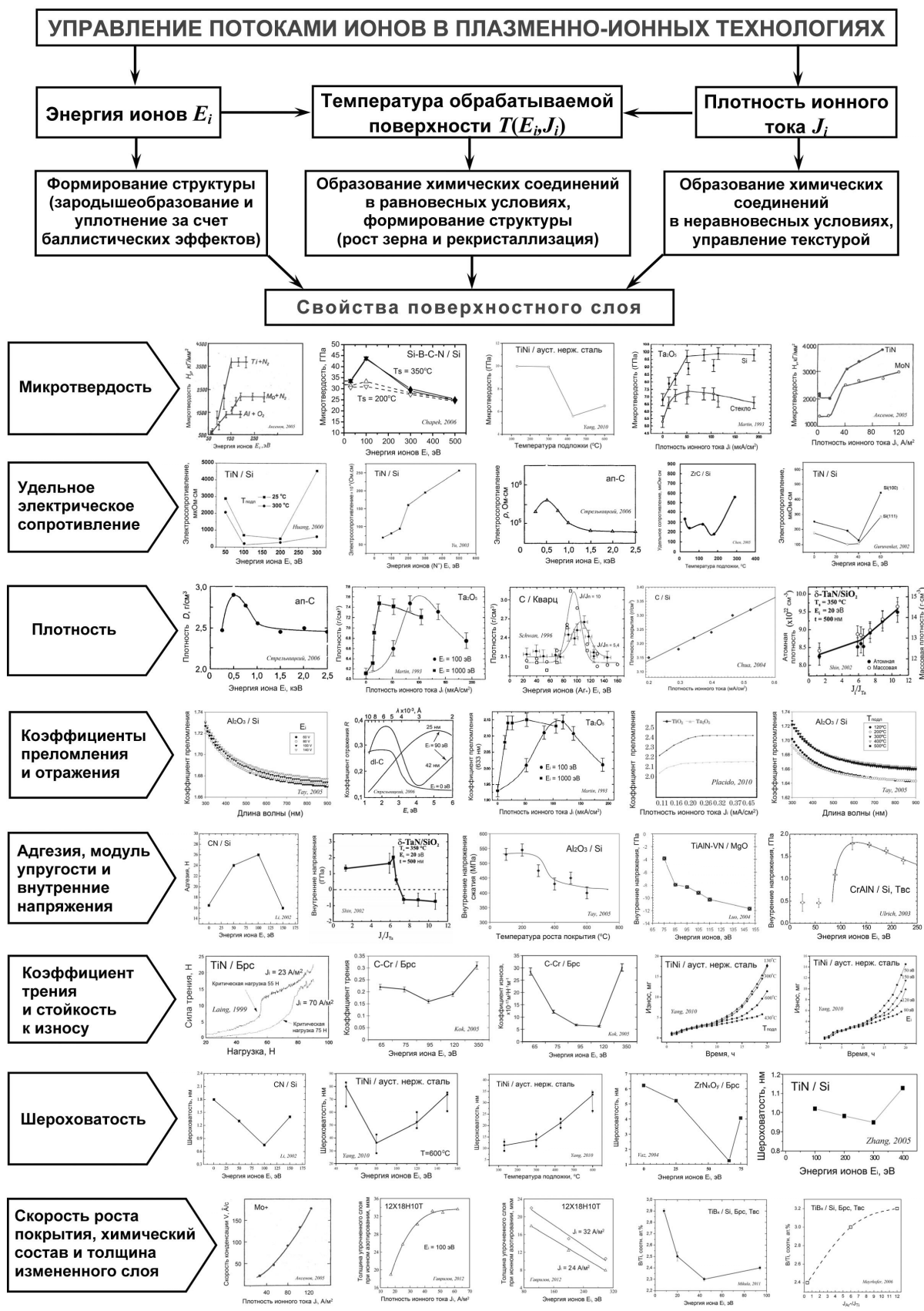


Рис. 2. Влияние параметров ионного потока на качественные характеристики поверхностного слоя и производительность плазменно-ионной обработки

3. Обзор современных технологических систем ионной обработки и методов управления энергией и плотностью ионного тока

Схемы современных технологических систем плазменно-ионной обработки, управление энергией и характерные распределения плотности ионного тока представлены на рисунке 3, а схемы управления плотностью ионного тока – на рисунке 4. Наиболее простым методом ионной обработки поверхности является генерация плазмы в тлеющем разряде и связанный с этим процесс распыления поверхности, подверженной воздействию плазмы [7]. В методе ионного распыления поверхность катода является источником паров металла. При нанесении покрытий методами ионно-плазменного распыления закрепленная на катоде мишень распыляется высокоэнергетическими ионами, частицы распыленного вещества конденсируются на подложке, закрепленной на аноде. При размерной обработке поверхности детали размещаются на катоде для удаления поверхностного слоя материала (рис. 3, а). Схема использования катода в качестве подложки обладает тем преимуществом, что при ограниченном диапазоне значений межэлектродной разности потенциалов возможно получение широкого диапазона значений плотности тока, которой можно управлять, изменяя параметры внешней электрической цепи. К недостаткам можно отнести, прежде всего, невозможность отдельного управления плотностью ионного тока и энергией ионов, поскольку межэлектродное падение потенциала, определяющее энергию, определяется вольт-амперной характеристикой. Данный недостаток устраняется путем разделения функций катода и подложки – в этом случае подложка перестает быть частью источника плазмы (катодом). Тогда при описании плотности тока и энергии ионов на подложку используются не вольт-амперные характеристики, а зависимости тока, извлекаемого на подложку, от потенциала смещения катода – процесс описывает отсечку электронного компонента из общего потока заряженных частиц на поверхность. Эта идея реализована в методе конденсации из потоков плазмы с ионной бомбардировкой (КИБ) [9], за рубежом широко известном также под названием Plasma Immersed Ion Implantation and Deposition (PIII&D) – плазмо-погруженная ионная имплантация и осаждение [7]. При этом возможно управление энергией ионов путем изменения в широком диапазоне потенциала смещения подложки, хотя зависимость тока от потенциала смещения имеет тенденцию к выходу в режим насыщения.

Таким образом, при разделении функций катода и подложки, плотностью ионного тока управляют, изменяя режим работы источника плазмы, а энергией ионов по методу КИБ. Для управления плотностью ионного тока в системах, где подложка с деталями выполняет функцию катода источника плазмы, используют схему полого катода (рис. 4, а) [33]. Другой возможностью управления является использование магнитного поля такой конфигурации, чтобы создавать условия для замкнутого дрейфа электронов. Эта идея нашла реализацию в концепции магнетронных распылительных систем, которые работают, как правило, в области аномального тлеющего разряда.

Магнетронные распылительные системы позволяют проводить процесс в высоком вакууме, они широко используются в промышленности. Их отличие от диодных и триодных распылительных систем является наличие скрещенных электрических и магнитных полей в области катода. Электроны, находящиеся в этой области, обеспечивают эффективную ионизацию реактивного газа, так как движутся по замкнутым траекториям и претерпевают многочисленные столкновения с

атомами. Высокая плотность плазмы обусловила наиболее широкое применение магнетронов в промышленности по сравнению с другими типами источников на постоянном токе.

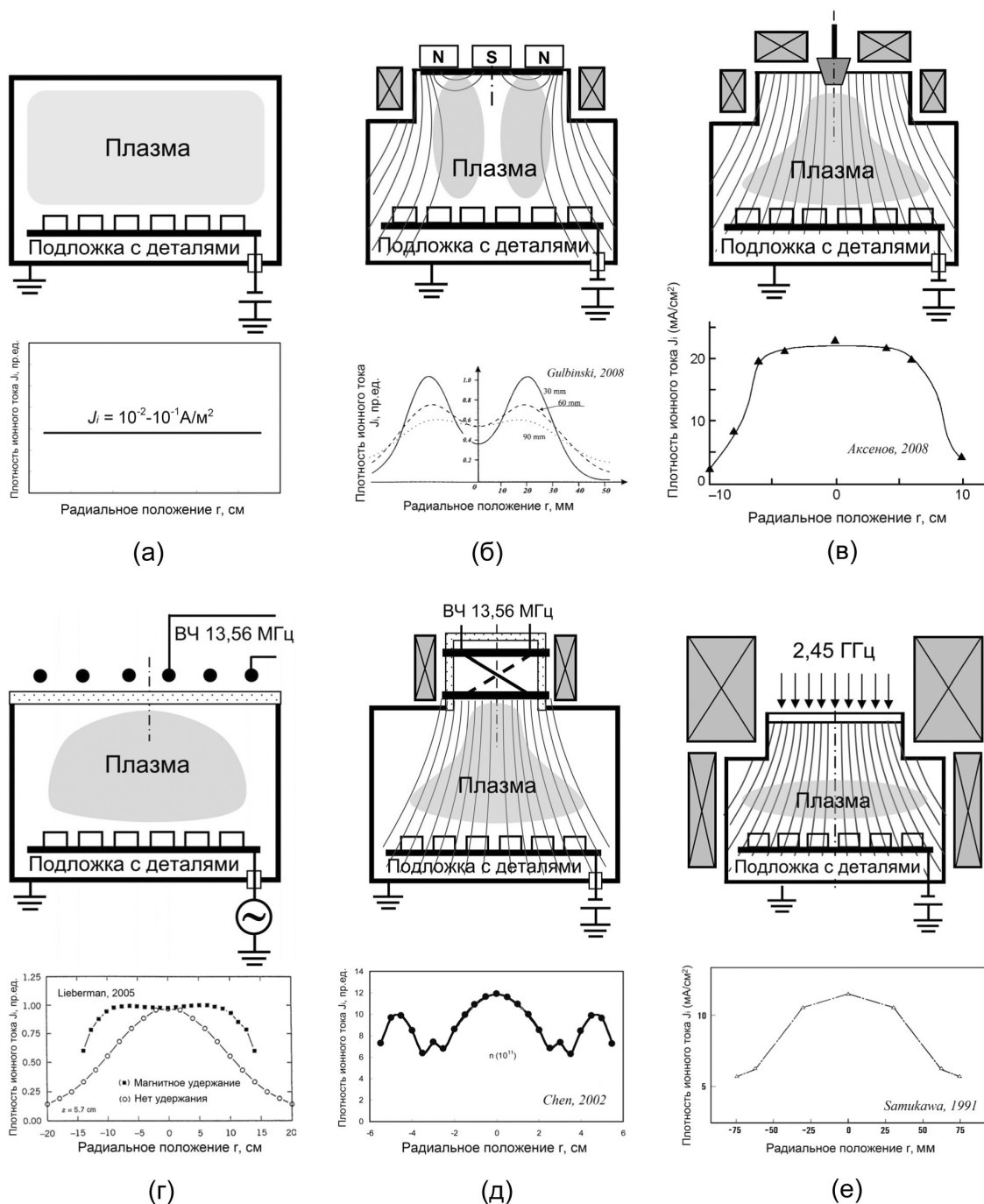


Рис. 3. Схемы современных технологических систем плазменно-ионной обработки, управление энергией и характерные распределения плотности ионного тока

Как правило, в технологических системах магнетронный источник используется в качестве источника паров металла, которые транспортируются к подложке (т.е. подложка и катод источника разделены) (рис. 3, б). Для управления плотностью ионного тока в такой системе изменяют интенсивность и конфигурацию маг-

нитного поля. Так, например, Виндоу (Window) и Саввидес (Savvides) предложили ослабить внутренний магнит относительно периферического таким образом, чтобы не все силовые линии магнитного поля замыкались между внешним и внутренним полюсами магнетрона [34-36]. Это позволило усилить поток ионов в сторону подложки, хотя распределение плотности ионного тока имеет характерную форму. Болмарк (Bohlmark) предложил использовать электромагнит по периметру вакуумной камеры (рис. 4, б), что позволяет несколько изменять форму распределения и интенсивность потоков ионов металла на подложку [37]. Однако известны системы, где катод магнетрона используется в качестве подложки. Так, Рамазанов использовал подобную конфигурацию для проведения ионного азотирования (рис. 4, в), хотя при этом отмечалась характерная сильная неоднородность распределения плотности ионного тока вдоль поверхности подложки-катада, присущая магнетронам [38].

Остальные системы, которые применяются в современной промышленности для получения потока ионов газа, используют токи высокой частоты. В системах высокочастотного распыления используется высокочастотный (ВЧ) емкостный разряд, плазма создается и поддерживается с помощью электромагнитного поля высокой частоты (13,56 МГц). Основной особенностью этого метода является возможность проводить распыление диэлектрических мишеней. Для этого типа источников также характерно использование магнитного поля возле подложки, как и в магнетронах на постоянном токе. Магнетронный ВЧ-разряд позволяет интенсифицировать процесс путем использования возле подложки конфигурации магнитных полей, характерной для магнетронного распылительного устройства [7]. Дополнительным эффектом от введения магнитного поля является возможность управления плотностью и распределением ионного тока вдоль поверхности обрабатываемой детали. Емкостный ВЧ-разряд можно также использовать как в системах с разделением катада и подложки, так и в системах, где подложка выполняет функцию катада источника плазмы.

В последнее время широкое применение получил индукционный ВЧ-разряд благодаря безэлектродному процессу генерации плотной плазмы газов (порядка 10^{17} м^{-3}) (рис. 3, г). Более поздние разновидности источников, основанные на использовании разряда этого типа, также используют и магнитное поле. Разновидностями индукционного ВЧ-разряда, использующими внешнее магнитное поле, являются геликонный разряд (рис. 3, д) и ЭЦР-разряд (разряд на электронно-циклотронном резонансе) (рис. 3, д). Геликонный разряд использует магнитное поле индукцией 0,005-0,02 Т и позволяет получать плазму с плотностью порядка 10^{19} м^{-3} . Разряд на электронно-циклотронном резонансе использует частоту микроволнового диапазона 2,45 ГГц, магнитное поле 0,0875 Т и позволяет получить плотность плазмы до 10^{18} м^{-3} [7]. Технологическим системам, использующим эти типы разрядов, также присущи характерные распределения плотности ионного тока вдоль поверхности подложки, которые сложно корректировать. Вследствие разделения функций катада и подложки, технологические системы, использующие эти типы разрядов, используют метод КИБ для управления энергией ионов, хотя процесс управления плотностью тока затруднен, поскольку режим работы источника плазмы не всегда удается изменить. Тем не менее разработан ряд способов воздействия на плотность ионного тока на подложку. Так, Хопвуд (Hopwood) предложил использовать вокруг подложки [39] схему магнитного мультиполя (рис. 4, г), разработанную Ченом (Chen) для удержания плазмы, а Каваи (Kawai) предложил изменять конфигурацию мульти-слот антенны (рис. 4, д) для управления формой

распределения потоков ионов газа [40]. Еще одной интересной разновидностью являются технологические системы, использующие индукционный ВЧ-разряд с нейтральным контуром (рис. 4, е), предложенный Учиды (Uchida), где для управления интенсивностью и частично пространственным распределением ионного потока используется система электромагнитов вокруг камеры [41].

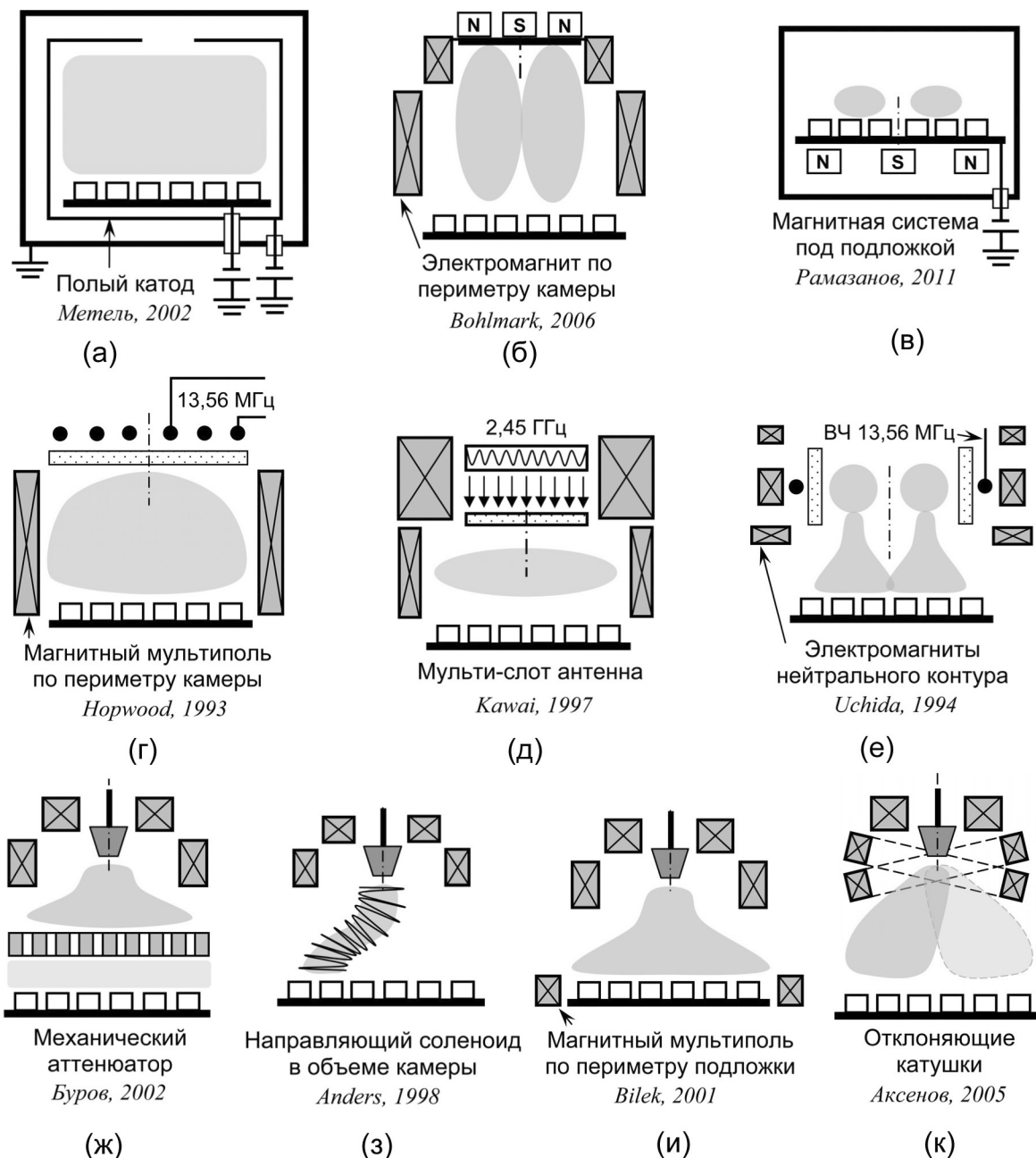


Рис. 4. Схемы управления плотностью ионного тока

Большое распространение получил процесс испарения металлов при прохождении через них больших токов. Основным инструментом в этой группе методов является электрическая дуга [9]. Производительность вакуумно-дугового метода на порядок выше производительности магнетронных методов. Основным недостатком метода является наличие капельной фазы в плазме, что требует до-

полнительных систем очистки (фильтры) и снижает КПД источника. Как правило, в технологических установках, использующих вакуумно-дуговые испарители, подложка не является катодом источника плазмы, что дает возможность использования метода КИБ, хотя здесь следует отметить работу [42], где исследовались процессы модификации поверхности катода под действием катодных пятен вакуумно-дугового разряда. Вакуумно-дуговым источникам плазмы присуще характерное (гауссово) распределение плотности ионного тока вдоль поверхности подложки, поэтому ряд исследователей предложили различные способы изменения формы распределения или управления плотностью ионного тока (рис. 3, в). Можно отметить работы Аксенова [9], который предложил использовать отклоняющие катушки как часть системы фокусировки источника плазмы для получения равномерного ионного потока с целью однородной обработки подложки (рис. 4, к), а также Бурова [43], который предложил использовать механический аттенюатор с той же целью (рис. 4, ж). Андерс (Anders) описал конструкцию направляющего соленоида (рис. 4, з), установленного в объеме вакуумной камеры, а Билек (Bilek) использовал ранее отмеченную схему магнитного мультиполя вокруг подложки для выравнивания распределения плотности ионного тока (рис. 4, и) [44].

Анализ схем управления параметрами ионного потока показывает недостаточность существующих методов управления, каждый из которых применим только для решения конкретной задачи (увеличение общей или локальной плотности ионного тока на подложку, создание равномерного распределения) в конкретной технологической системе. Таким образом, проблема управления ионными потоками состоит в отсутствии универсального метода управления плотностью ионного тока, который позволял бы на одном оборудовании проводить обработку потоками газовой и металлической плазмы различной интенсивности, создавать узкие и широкие потоки ионов при взаимодействии с различными типами источников плазмы. Наиболее перспективным путем решения проблемы управления ионными потоками представляется использование комбинации электрического и магнитного полей для создания самосогласованного электрического поля, которое влияет на распределение плазмы. Генерация такого поля возможна в «замагниченной» плазме, под которой обычно подразумевают плазму, где движение электронов направляется магнитным полем, которое подавляет подвижность электронов поперек магнитного поля, не влияя на подвижность вдоль поля. Изменение электрического потенциала от одной силовой линии магнитного поля к другой приводит к существованию электрического поля, которое может быть использовано для ускорения и изменения направления движения ионов. При определении конфигурации управляющего магнитного поля необходимо учесть рассмотренное разделение технологических систем плазменно-ионной обработки с точки зрения функции подложки в процессе генерации плазмы. Очевидно, целесообразными являются две конфигурации управляющего магнитного поля: 1) с магнитным удержанием плазмы, что соответствует конфигурации магнетронного распылительного устройства при использовании его катода в качестве подложки и 2) с ведущим магнитным полем с зеркалами в области источника плазмы и подложки. Первая схема позволит создавать интенсивные потоки плазмы газов с широким диапазоном регулирования по току, вторая – управлять потоками плазмы, созданными внешним по отношению к подложке источником плазмы с возможностью управлять энергией ионов в широком диапазоне. При этом возникает ряд проблем теоретического

и практического характера. К ним можно отнести недостаточное понимание процессов, происходящих при генерации плазмы в скрещенных электрических и магнитных полях, вопросы транспортировки плазмы в системе магнитных ловушек, а также отсутствие методик прогнозирования влияния магнитных полей различной конфигурации на параметры ионного потока в различных технологических системах.

4. Заключение

На основе проведенного анализа можно сделать вывод об актуальности проблемы управления ионным потоком в технологических системах. В рамках решения этой проблемы и разработки метода управления энергией и плотностью ионного тока при плазменно-ионной обработке деталей заданной номенклатуры представляется необходимым решение следующих задач:

1. Исследовать теоретические и практические возможности использования магнитного поля для управления энергией и плотностью тока ионов вдоль поверхности обрабатываемой подложки в современных технологических системах генерации и транспортировки плазмы.

2. Выявить рациональные схемы управления параметрами ионного потока и определить области их применения в различных технологических процессах плазменно-ионной обработки поверхности деталей.

3. Исследовать вопросы поджига и поддержания стационарного режима разряда, транспортировки ионов и электронов в скрещенных электрических и магнитных полях, а также удержания электронного компонента плазмы; описать генерацию электрических полей с целью управления ионными потоками.

4. Развить теоретическую модель влияния электрических полей на движение ионов плазмы при взаимодействии ионов с магнитными ловушками электронов плазмы.

5. Разработать и экспериментально проверить метод управления плотностью ионного тока и теорию управления энергией ионов при взаимодействии плазмы с магнитными ловушками электронов для различных технологических применений.

6. Создать технологическое устройство, определить рациональные режимы обработки и предложить методики прогнозирования и создания требуемых параметров ионного потока на основе предложенного метода.

Список литературы

1. Anders, A. From plasma immersion ion implantation to deposition: a historical perspective on principles and trends / A. Anders // *Surface and coatings technology*. – 2002. - №156. - P. 3 – 12.

2. Perry, A.J. An overview of some advanced surface technology in Russia / A.J. Perry, J.N. Matossian // *Metallurgical and materials transactions A*. – 1998. - V.29A. - P. 593 - 610.

3. Bogaerts, A. Gas discharge plasmas and their applications / A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gijbels, J. Mullen // *Spectrochimica acta*. – 2002. - Part B, №57. - P. 609 – 658.

4. Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon / S. Iijima // *Nature*. - 1991. – V.354, №7. - P. 56 - 58.
5. Ostrikov, K. Colloquium: Reactive plasmas as a versatile nanofabrication tool / K. Ostrikov // *Reviews of modern physics*. – 2005. - V.77. - P. 489 - 511.
6. Braithwaite, N. Introduction to gas discharges / N. Braithwaite // *Plasma sources science and technology*. - 2000. - №9. - P. 517-527.
7. Anders, A. Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition / A. Anders // New York: Wiley, 2000. – 736 p.
8. Petrov, I. Microstructural evolution during film growth / I. Petrov, P.B. Barna, L. Hultman, J.E. Greene // *Journal of vacuum science and technology A*. - 1986. - V.21, №5. - P. 117 – 128.
9. Аксенов, И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы [Текст] / И.И. Аксенов. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
10. Houska, J. Influence of substrate bias voltage on structure and properties of hard Si-B-C-N film prepared by reactive magnetron sputtering / J. Houska, J. Vlcek, S. Potocky and V. Perina // *Diamond and Related Materials*. - 2007. - №16. - P. 29 – 36.
11. Yang, L. Cavitation erosion resistance of NiTi thin films produced by filtered arc deposition / L.M. Yang, A.K. Tieu, D.P. Dunne, S.W. Huang, H.J. Li, D. Wexler, Z.Y. Jiang // *Wear*. - 2009. - №267. - P. 233 – 243.
12. Martin, P. Mechanical and optical properties of thin films of tantalum oxide deposited by ion-assisted deposition / P.J. Martin, A. Bendavid, M.V. Swain, R.P. Netterfield, T.J. Kinder, W.G. Sainty, D. Drage // *Materials research society symposium proceedings*. - 1993. – V.308. - P. 583 – 588.
13. Huang, J. Low energy ion beam assisted deposition of TiN thin films on silicon / J.H. Huang, C.H. Lin, C.H. Ma, H. Chen // *Scripta materialia*. - 2000. – №42. - P. 573 – 579.
14. Yu, G. Effects of N ion energy on titanium nitride films deposited by ion assisted filtered cathodic vacuum arc / G.Q. Yu, B.K. Tay, S.P. Lau, K. Prasad, L.K. Pan, J.W. Chai, D. Lai // *Chemical Physics Letters*. - 2003. – №374. - P. 264 – 270.
15. Стрельницкий, В.Е. Плёнки алмазоподобного углерода [Текст] / В.Е. Стрельницкий, И.И. Аксёнов. – Харьков: ИПП «Контраст», 2006.– 344 с.
16. Chen, C. Characterization of sputtered nano-crystalline zirconium carbide as a diffusion barrier for Cu metallization / C. Chen, C. Liu // *Journal of electronic materials*. - 2005. – V.34, №11. - P. 1408 – 1413.
17. Guruvenket, S. Effect of ion bombardment and substrate orientation on structure and properties of titanium nitride films deposited by unbalanced magnetron sputtering / S. Guruvenket, G.M. Rao // *Journal of vacuum science and technology A*. - 2002. – V.20, №3. - P. 678 – 682.
18. Schwan, J. Tetrahedral amorphous carbon films prepared by magnetron sputtering and dc ion plating / J. Schwan, S. Ulrich, H. Roth, H. Ehrhardt, S.R.P. Silva, J. Robertson, R. Samlenski, R. Brenn // *Journal of applied physics*. - 1996. – V.79, №3. - P. 1416 – 1422.
19. Chua, D. Correlation of surface, mechanical and microproperties of tetrahedral amorphous carbon films deposited under different magnetic confinement conditions / D.H.C. Chua, K.B.K. Teo, T.H. Tsai, W.I. Milne, D. Sheeja, B.K. Tay, D. Schneider // *Applied surface science*. - 2004. – №221. - P. 455 – 466.
20. Shin, C. Development of preferred orientation in polycrystalline NaCl-

structure δ -TaN layers grown by reactive magnetron sputtering: role of low-energy ion surface interactions / C.-S. Shin, D. Gall, Y.-W. Kim, N. Hellgren, I. Petrov, J.E. Greene // *Journal of applied physics*. - 2002. – V.92, №9. - P. 5084 – 5093.

21. Tay, B. Effects of substrate bias and growth temperature on properties of aluminium oxide thin films by using filtered cathodic vacuum arc / B.K. Tay, Z.W. Zhao, C.Q. Sun // *Surface and coatings technology*. - 2005. – №198. - P. 94 – 97.

22. Placido, F. High ion current density plasma source for ion-assisted deposition of optical thin films / F. Placido, D. Gibson // *Chinese optics letters*. - 2010. – V.8. - P. 49 – 52.

23. Li, J. Influence of substrate dc bias on chemical bonding, adhesion and roughness of carbon nitride films / J. Li, W.T. Zheng, Z. Jin, X. Lu, G. Gu, X. Mei, C. Dong // *Applied surface science*. - 2002. – №191. - P. 273 – 279.

24. Luo, Q. Transmission electron microscopy and x-ray diffraction investigation of the microstructure of nanoscale multilayer TiAlN/VN grown by unbalanced magnetron deposition / Q. Luo, D.B. Lewis, P.Eh. Hovsepian, W.-D. Munz // *Journal of materials research*. - 2004. – V.19. - P. 1093 – 1104.

25. Ulrich, S. Influence of low energy ion implantation on mechanical properties of magnetron sputtered metastable (Cr,Al)N thin films / S. Ulrich, H. Holleck, J. Ye, H. Leiste, R. Loos, M. Stuber, P. Pesch, S. Sattel // *Thin Solid Films*. - 2003. – №437. - P. 164 – 169.

26. Laing, K. The effect of ion current density on the adhesion and structure of coatings deposited by magnetron sputter ion plating / K. Laing, J. Hampshire, D. Teer, G. Chester // *Surface and coatings technology*. - 1999. – №112. - P. 177 – 180.

27. Kok, Y. Influence of the bias voltage on the structure and the tribological performance of nanoscale multilayer C/Cr PVD coatings / Y.N. Kok, P.Eh. Hovsepian, Q. Luo, D.B. Lewis, J.G. Wen, I. Petrov // *Thin Solid Films*. - 2005. – №475. - P. 219 – 226.

28. Vaz, F. Property change in ZrN_xO_y thin films: effect of the oxygen fraction and bias voltage / F. Vaz, P. Carvalho, L. Cunha, L. Rebouta, C. Moura, E. Alves, A.R. Ramos, A. Cavaleiro, Ph. Goudeau, J.P. Riviere // *Thin Solid Films*. - 2004. – №470. - P. 11 – 17.

29. Zhang, Y. Effects of substrate bias and argon flux on the structure of titanium nitride films deposited by filtered cathodic arc plasma / Y.J. Zhang, P.X. Yan, Z.G. Wu, W.W. Zhang, G.A. Zhang, W.M. Liu, Q.J. Xue // *Physica status solidi (a)*. - 2005. – №1. - P. 95 – 101.

30. Гаврилов, Н. Влияние параметров электронного пучка и ионного потока на скорость плазменного азотирования аустенитной нержавеющей стали [Текст] / Н.В. Гаврилов, А.И. Меньшаков // *Журнал технической физики*. - 2012. – Т.82, №3. - С. 88 – 93.

31. Mikula, M. The influence of low-energy ion bombardment on the microstructure development and mechanical properties of TiB_x coatings / M. Mikula, B. Grancic, T. Roch, T. Plecenik, I. Vavra, E. Dobrocka, A. Satka, V. Bursikova, M. Drzik, M. Zahoran, A. Plecenik, P. Kus // *Vacuum*. - 2011. – №85. - P. 866 – 870.

32. Mayrhofer, M. Microstructural design of hard coatings / P.H. Mayrhofer, C. Mitterer, L. Hultman, H. Clemens // *Progress in materials science*. - 2006. – №51. - P. 1032 – 1114.

33. Metel, A. Plasma immersion ion implantation based on glow discharge

with electrostatic confinement of electrons / A. Metel // Surface and coatings technology. - 2002. - V.156. - P. 38 – 43.

34. Window, B. Charged particle fluxes from planar magnetron sputtering sources / B. Window, N. Savvides // Journal of vacuum science and technology A. - 1986. – V.4, №2. – P. 196 – 202.

35. Window, B. Unbalanced DC magnetrons as sources of high ion fluxes / B. Window, N. Savvides // Journal of vacuum science and technology A. - 1986. - V.4, №3. - P. 453 – 465.

36. Savvides, N. Unbalanced magnetron ion-assisted deposition and property modification / N. Savvides, B. Window // Journal of vacuum science and technology A. - 1986. - V.4, №3. - P. 504 – 508.

37. Bohlmark, J. Guiding the deposition flux in an ionized magnetron discharge / J. Bohlmark, M. Ostbye, M. Lattemann, H. Ljungcrantz, T. Rosell, U. Helmersson // Thin Solid Films. - 2006. – №515. - P. 1928 – 1931.

38. Рамазанов, Р. Разработка способа ионного азотирования инструментальной стали X12 в скрещенных электрических и магнитных полях [Текст] / К.Н. Рамазанов, Р.К. Вафин // Вестник УГАТУ. - 2011. – Т.15, №41. - С. 101 – 104.

39. Hopwood, J. Electromagnetic fields in an rf induction plasma / J. Hopwood, C.R. Guarnieri, S.J. Whitehair, J.J. Cuomo // Journal of vacuum science and technology A. - 1993. - V.11, №1. - P. 147 – 151.

40. Kawai, Y. Production of Large Diameter ECR Plasma / Y. Kawai, Y. Ueda // Journal de physique. - 1997. - №4. - P. 235 – 246.

41. Uchida, T. Magnetically neutral loop discharged plasma sources and system / T. Uchida // Journal of vacuum science and technology A. - 1998. - V.16. - P. 1529 – 1536.

42. Takeda, K. Surface modification by cathode spots of a vacuum arc / K. Takeda, M. Sugimoto // IEEE transactions on plasma science. - 2001. - V. 29, №5. - P. 718 – 721.

43. Burov, I. Adjustment of the plasma density in the process of coating formation / I.V. Burov, A.A. Lisenkov, V.A. Pavlova // Plasma Devices and operations. - 2002. - V. 10, №1. - P. 9 – 15.

44. Anders, A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation / A. Anders // New York: Springer, 2008. – 550 p.

Рецензент: д.т.н., профессор Долматов А.И., заведующий кафедрой производства двигателей летательных аппаратов, декан факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета «ХАИ» им. Н.Е. Жуковского, Харьков

Поступила в редакцию 20.07.12

Проблема керування іонним потоком у технологічних пристроях плазмово-іонної обробки

Розглянуто проблему управління енергією і густиною іонного потоку вздовж поверхні підкладок у технологічних пристроях плазмово-іонної обробки. Проведено аналіз сучасних технологічних систем і методів управління параметрами іонного потоку. Запропоновано класифікацію схем взаємодії джерел плазми з підкладкою, де визначальною є функція, яку виконує підкладка в процесі генерації плазми. Описано комплекс питань, які необхідно розглянути для розроблення методу управління густиною і енергією іонів на підкладку.

Ключові слова: плазмово-іонна обробка, керування іонними потоками.

Problem of ion flux control in technological setups for plasma-ion processing

The problem of energy and ion flow density control over the surface of the processed wafers in technological devices at plasma-ion processing is considered. The analysis of modern technological systems and methods of ion flux parameters control is conducted. The classification schemes of interaction of the plasma source and the substrate, where a function of the substrate during plasma generation is a key feature, is proposed. A set of issues that should be addressed in order to develop a method of ion density and energy control over the substrate, is described.

Keywords: plasma-ion processing, ion flux control.