

15418417

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Кустов Валерий Валентинович

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МАГНЕТРОНА В НЕСБАЛАНСИРОВАННОМ
РЕЖИМЕ

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и
молекулярная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1995

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Марахтанов М.К.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Савичев В.В.
кандидат технических наук,
доцент Паршов А.Ю.

Ведущая организация - ГНЦ ВИАМ

Защита состоится "16" октября 1995 г. в 14.00 часов
на заседании специализированного Совета по энергетическим уста-
новкам К.053.15.08 Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственного
технического университета имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
Москва, Лефортовская набережная, д.1. корпус "Энергомашинострое-
ние".

Библиотеке МГТУ имени

Н

1995 г.

по
но

просьба высылать
п. 5, МГТУ, уче-

спец

1548417

Хутуков Ю.Н.

1
2
3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Качество поверхности изделия во многом определяет его эксплуатационные свойства и срок службы. Нанесение тонких защитных покрытий на поверхность позволяет улучшить эти показатели. Развитие современной техники требует улучшения качества тонкопленочных покрытий, а также получения пленок с новыми свойствами.

1548417
Одним из перспективных направлений в технологии получения тонких пленок является нанесение покрытий с ионной бомбардировкой, сопутствующей напылению. Интенсивная низковольтная ионная бомбардировка (до 100 В) во многих случаях улучшает качество покрытия. Обычно процессы напыления и ионного подтраивливания выполняют двумя устройствами - магнетроном и дополнительным ионным источником, например ускорителем с азимутальным дрейфом электронов. Дополнительный источник ионов, а также его системы электропитания, газового снабжения, водяного охлаждения и т.д. значительно усложняют конструкцию и работу технологической установки в целом. Поэтому, большой интерес представляют технологические системы, в которых источник материала наносимого покрытия и источник "подтраивливающих" ионов могут быть объединены в единое целое. Таким устройством является, так называемый несбалансированный магнетрон, одновременно с напылением формирующий ионно-плазменную струю, идущую к подложке.

В настоящее время несбалансированные магнетронные системы начали появляться в промышленности, поэтому актуальной задачей становится изучение физических процессов, протекающих в плазме несбалансированного магнетрона, и оптимизация способов управления параметрами плазмы у изделия, а следовательно и технологическими характеристиками несбалансированного магнетрона. Актуальность работы заключается также в необходимости количественного определения понятия несбалансированности магнетрона.

Цель работы. Целью работы является определение параметров плазменной струи несбалансированного магнетрона, а также изучение способов управления ими и видов их связи с технологическими характеристиками несбалансированного магнетрона.

В диссертации решались следующие задачи:

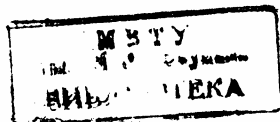
- определение количественного параметра - коэффициента несбалансированности магнетрона;
- теоретическое описание особенностей формирования плазменной

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1548417

Кустов В.В. Особенности ре



струи несбалансированного магнетрона;

- исследование параметров плазмы экспериментального несбалансированного магнетрона в различных режимах его работы;
- экспериментальное исследование связи условий нанесения и качества покрытий, получаемых несбалансированным магнетроном;
- получение рекомендаций для конструирования и эксплуатации несбалансированных магнетронных систем;

Научная новизна работы:

- предложена количественная мера несбалансированности магнетрона - коэффициент несбалансированности, определяющий интенсивность ионной бомбардировки изделия, сопутствующей нанесению покрытия;
- определено распределение локальных параметров плазменной струи несбалансированного магнетрона;
- исследовано изменение параметров плазменной струи в зависимости от коэффициента несбалансированности магнетрона, а также от давления плазмообразующего газа и величины электрического потенциала на изделии;
- установлено, что в струе вид функции распределения электронов по энергиям зависит от величины электрического потенциала на изделии;
- изучено влияние коэффициента несбалансированности магнетрона и электрического смещения на изделии на изменение режимов нанесения и качество покрытий;
- дано теоретическое описание особенностей формирования плазменной струи несбалансированного магнетрона при различных величинах электрического потенциала на изделии;
- предложен способ управления пространственным распределением ионного тока на изделии.

Практическая ценность работы.

1. Количественно определено понятие несбалансированности магнетрона, которое было заложено в основу предлагаемой классификации магнетронных распылительных систем.

2. Установлена прямая взаимосвязь между внешними, управляемыми в процессе эксплуатации, характеристиками несбалансированного магнетрона, локальными параметрами плазменной струи и технологическими характеристиками несбалансированного магнетрона.

3. Получены рекомендации для конструирования и эксплуатации несбалансированных магнетронных систем.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается тем, что они являются результатом прямых наблюдений и измерений по отработанным методикам с помощью стандартных приборов и оборудования, а результаты расчетов подтверждаются экспериментальными результатами настоящей работы и согласуются с литературными данными.

Апробация и публикация работы. Результаты исследований были доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры "Плазменные энергетические установки" МГТУ им. Н.Э.Баумана. Основные положения работы докладывались на VII Всероссийской конференции по физике газового разряда (21 - 24 июня 1994 г., Самара, СТАУ), на Международной конференции "Физика и техника плазмы" (13 - 15 сентября 1994 г., Минск, ИМАФ АНБ). По теме диссертации имеется 5 печатных работ и 1 изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 60 наименований. Работа содержит 136 страниц, включая 54 рисунка на 40 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цель и общие задачи исследований, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ использования несбалансированных магнетронов в технологических целях и научных исследованиях. Показано что, несбалансированные магнетроны находят широкое применение в промышленности, благодаря их способности совмещать в едином устройстве процесс нанесения покрытия и процесс ионной бомбардировки изделия. При помощи особой конфигурации магнитного поля над поверхностью катода здесь формируется плазменная струя, "растекающаяся" от катода вплоть до обрабатываемой подложки. У подложки образуется область повышенной ионизации газа. Подавая на подложку отрицательный потенциал, возможно осуществить интенсивную ионную бомбардировку растущего покрытия. В обзоре кратко рассмотрены эффекты изменения свойств покрытий, возникающие при низковольтной ионной бомбардировке изделия, сопутствующей напылению.

Однако, как следует из литературного обзора, до сих пор отсутствует количественное определение понятия несбалансированности. Это затрудняет классификацию магнетронов с точки зрения воз-

можной интенсивности ионной бомбардировки подложки, а также ограничивает возможности анализа влияния величины несбалансированности на технологические параметры магнетронов. Исследование несбалансированных магнетронов ограничено изучением их технологических характеристик: распределения ионного тока и плавающего потенциала на подложке. Недостаточно полно исследованы параметры плазменной струи несбалансированного магнетрона и способы управления ими. Указанные обстоятельства определили цель и задачи настоящего исследования.

Во второй главе проведен анализ распределения магнитной индукции в прикатодной области и на поверхности катода магнетрона (рис. 1). На его основе предложен количественный параметр - коэффициент несбалансированности магнетрона:

$$K_H = \int_{r_1}^{r_2} B_n r dr / \int_0^{r_1} B_n r dr,$$

где B_n - проекция вектора магнитной индукции, нормальная к плоскости катода, r_1 - радиус при котором B_n меняет знак, r_2 - радиус катода. Этот параметр является мерой, наполняющей количественным содержанием понятие "несбалансированность магнетрона". С увеличением коэффициента несбалансированности возрастает величина индукции осевого магнитного поля, восходящего над поверхностью катода с его периферии. Это приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки подложки. Взяв за основу коэффициент несбалансированности равный единице, можно разделить магнетронные распылительные системы на три группы: $K_H < 1$ - несбалансированные типа 1, $K_H = 1$ - сбалансированные, $K_H > 1$ - несбалансированные типа 2.

Также во второй главе проведен теоретический анализ движения заряженных частиц в плазменной струе несбалансированного магнетрона типа 2. Рассмотрены два случая. Первый, когда электрический потенциал на подложке равен потенциалу анода, и второй, когда подложка находится под отрицательным потенциалом относительно анода (рис. 2). Считалось, что подложка размещена на таком расстоянии от катода, где ларморовский радиус электронов намного меньше радиуса подложки.

При потенциале подложки, равном потенциалу анода, в аргоновой плазме струи обнаружено существование двух групп электронов

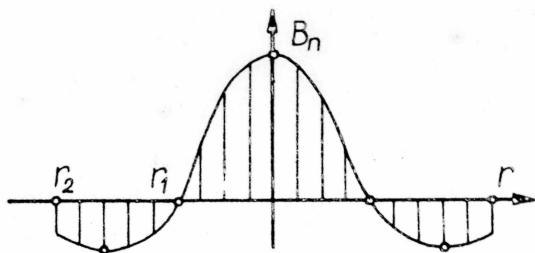


Рис. 1 Распределение по радиусу катода нормальной компоненты магнитной индукции B_n

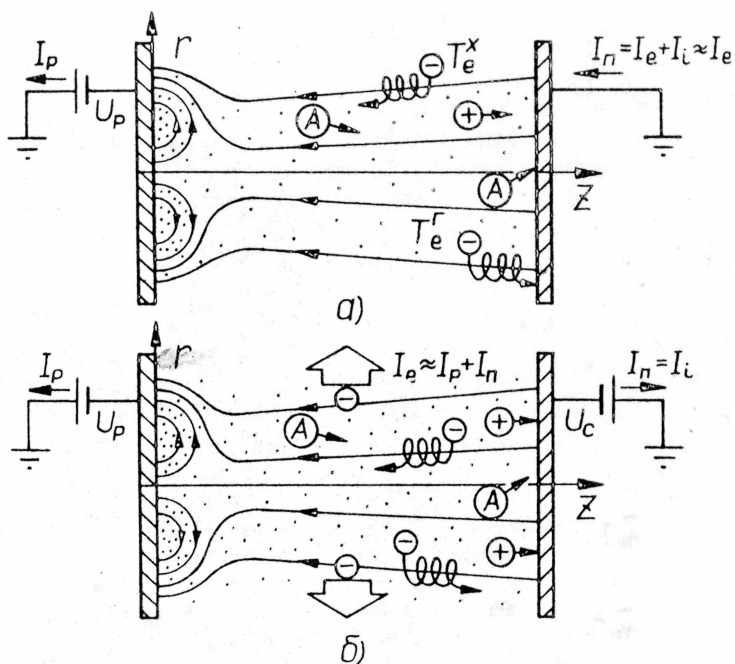


Рис. 2 Схема магнитных силовых линий и движения частиц в случае потенциала анода на подложке (а) и отрицательного потенциала подложки относительно анода (б)

с различными температурами. Этот факт установлен с помощью зондовых измерений. Температура "горячих" электронов, выраженная в электронвольтах, выше потенциала плазмы струи, а "холодных" - ниже. "Горячие" электроны движутся по винтовым линиям вдоль магнитного поля и уходят на анод. "Холодные" электроны удерживаются в струе благодаря отрицательному анодному падению потенциала и осциллируют между катодом и подложкой, образуя фоновую плазму. Длина свободного пробега электронов определяется их рассеянием на атомах плазмообразующего газа. При больших значениях коэффициента несбалансированности весь разрядный ток магнетрона течет на подложку.

Если потенциал смещения на подложке ниже потенциала анода и при этом его величина достаточна для отражения от подложки практически всех электронов струи, то электроны двигаются по винтовым траекториям вдоль силовых линий магнитного поля и осциллируют между подложкой и катодом. Осциляция электронов приводит к повышению степени ионизации нейтральных атомов и к увеличению концентрации плазмы. Как показывают результаты зондовых измерений, функция распределения электронов по энергиям в струе максвелловская. На подложку течет ионный ток, а электроны, составляющие ток разряда магнетрона, уходят через боковую поверхность струи на стенки камеры, являющиеся анодом. Таким образом, плазма несбалансированного магнетрона занимает цилиндрический объем, ограниченный по боковой поверхности продольным магнитным полем, а по торцам - плоскостями катода и подложки, находящимися под отрицательным потенциалом. Диффузия плазмы вдоль и поперек магнитного поля является амбипольной. Полагая осевое магнитное поле однородным и учитывая амагнитность только электронной компоненты, потоки заряженных частиц в плазме струи представим как

$$\vec{J}_i = -D_{ai} \nabla_{\parallel} n + \frac{\mu_i}{(\mu_i + \mu_{ei})} \frac{\vec{J}_{\parallel}}{e} - D_{a\perp} \nabla_{\perp} n + \frac{\mu_i}{(\mu_i + \mu_{ei})} \frac{\vec{J}_{\perp}}{e};$$

$$\vec{J}_e = -D_{ae} \nabla_{\parallel} n - \frac{\mu_{ei}}{(\mu_i + \mu_{ei})} \frac{\vec{J}_{\parallel}}{e} - D_{a\perp} \nabla_{\perp} n - \frac{\mu_{ei}}{(\mu_i + \mu_{ei})} \frac{\vec{J}_{\perp}}{e},$$

где $D_{a\parallel}$ и $D_{a\perp}$ - коэффициенты амбипольной диффузии плазмы вдоль и поперек магнитного поля, μ_e и μ_i - подвижности электронов и ионов. Как видно из уравнений, потоки частиц складываются из диф-

фузионных потоков и потоков, обусловленных протеканием электрического тока через струю несбалансированного магнетрона.

Поскольку в неравновесной плазме струи температура электронов T_e намного больше температуры ионов T_i , то отношение коэффициента амбиполярной диффузии плазмы вдоль магнитного поля к коэффициенту амбиполярной диффузии плазмы поперек поля можно привести к виду

$$D_{a\parallel}/D_{a\perp} = 1 + (\omega_e \tau_{ea})^2 \mu_e/\mu_i,$$

где $\omega_e \tau_{ea}$ - параметр Холла для электронов струи. Численные расчеты показали, что с увеличением коэффициента k_H несбалансированности магнетрона отношение $D_{a\parallel}/D_{a\perp}$ также возрастает, что характеризует несбалансированный магнетрон как устройство, эффективно транспортирующее плазму к изделию.

Третья глава посвящена описанию экспериментального оборудования и методов измерений. Приведены погрешности измерений.

В работе исследовался несбалансированный магнетрон, схема которого показана на рис. 3. Магнитная система магнетрона состоит из двух электромагнитов. Изменяя токи электромагнитов, можно менять коэффициент несбалансированности магнетрона. Внешний диаметр магнитопровода равен 54 мм, расстояние от среза магнитопровода до катода 5 мм. В работе использовались титановые и медные катоды толщиной 6 мм.

Эксперименты проводились в вакуумной камере объемом 500 л. Величины электрических токов и разностей потенциалов измерялись с помощью универсальных цифровых вольтметров В7-21А. Давление в вакуумной камере определялось вакууметром ВИТ-2. Определение локальных параметров плазменной струи проводилось одиночными ленточными зондами. Распределения ионного тока и плавающего потенциала на подложке измерялись с помощью зонда диаметром 120 мкм, имитирующего подложку, причем по радиусу этого зонда размещались меньшие зонды диаметром 8 мм. Распределение индукции магнитного поля по радиусу катода и вдоль оси нормальной к его поверхности измерялось теслаамперметром Ф-4354/1Т с применением двухкоординатного приспособления. Скорость нанесения покрытий измерялась взвешиванием титановых фольг до и после напыления на аналитических весах ВЛА-200г-М. Коэффициенты отражения покрытий в видимой части спектра измерялись спектрофотометром ФФ-1. Ис-

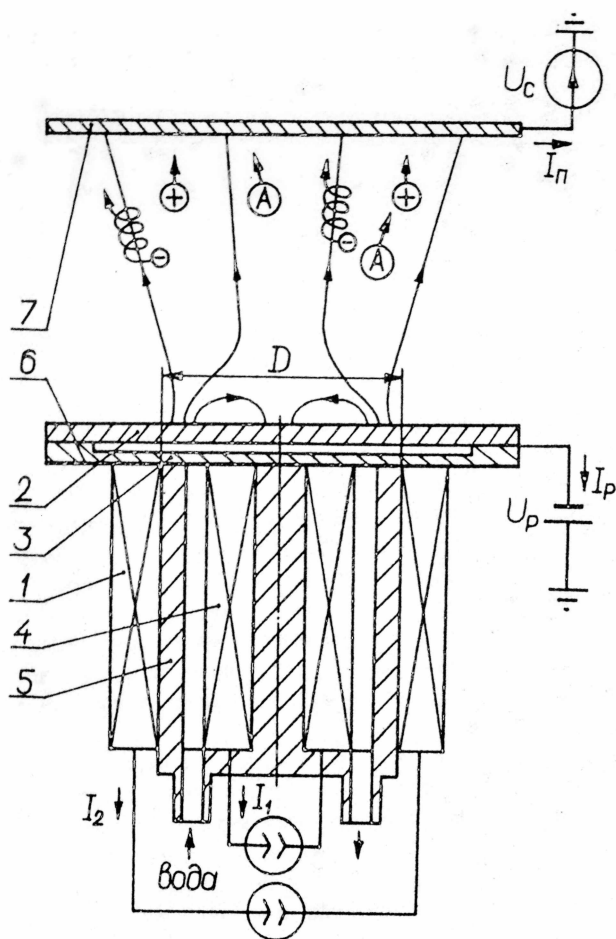


Рис. 3 Схема экспериментального несбалансированного магнетрона:
 1 - внешняя магнитная катушка; 2 - катод-мишень; 3 - корпус магнетрона; 4 - внутренняя магнитная катушка; 5 - магнитопровод; 6 - изолятор; 7 - подложка

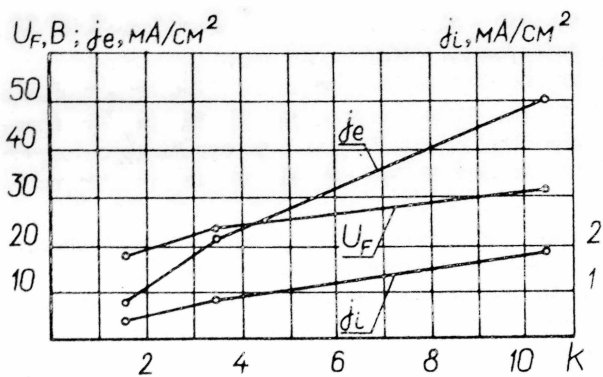
ледование состава полученных покрытий производилось методом микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе RS-340 с микрорентгеноспектральной приставкой. Для регистрации спектра плазменной струи несбалансированного магнетрона использовался дифракционный спектрограф ДФС-451 с фотографической регистрацией спектра. Полученные спектры фотометрировались на микрофотометре ИФО-452.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования несбалансированного магнетрона.

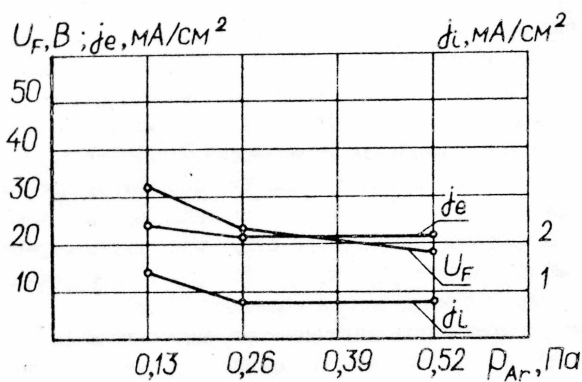
Коэффициент несбалансированности магнетрона менялся с помощью изменения тока I_2 во внешней катушке K2 (рис. 3). Ток I_1 в катушке внутреннего электромагнита K1 не менялся. Исследования проводились при значениях коэффициента несбалансированности магнетрона, равных 1.5, 3.4 и 10.4. Давление аргона составляло 0.13-0.52 Па, что наиболее часто используется в технологических процессах нанесения покрытий с помощью магнетронов. Разрядный ток магнетрона во всех режимах поддерживался равным 300 мА.

С увеличением коэффициента несбалансированности увеличивается индукция осевого магнитного поля над поверхностью катода. Магнитная индукция на оси магнетрона на расстоянии 100 мм от катода для коэффициента несбалансированности, равного 1.5, 3.4 и 10.4, составляет 0.001, 0.002 и 0.004 Тл, соответственно. Увеличение индукции приводит к фокусировке плазменной струи несбалансированного магнетрона. Фокусировка струи приводит к перераспределению плавающего потенциала U_f , ионного I_i и электронного I_e токов на подложке. Ионный ток на подложку возрастает, а электронный ток может достигнуть величины разрядного тока I_p магнетрона (рис. 4.а). С уменьшением давления аргона p_{Ar} возрастают ионный ток на подложку и ее плавающий потенциал (рис. 4.б). Если увеличивать расстояние между подложкой и катодом, то токи на подложку, а также ее плавающий потенциал уменьшаются и выравниваются по радиусу.

Плазменная струя несбалансированного магнетрона, исходящая из зоны кольцевого магнетронного разряда, исследовалась, когда магнетрон работал без подложки, когда он работал с подложкой и последняя находилась под потенциалом анода, а также в случае, когда подложка была под отрицательным потенциалом, равном 100 В относительно анода. На рис. 5 приведено распределение локальных параметров плазменной струи вдоль ее оси для трех указанных слу-



a)



b)

Рис. 4 Зависимость плотностей ионного j_i , электронного j_e токов и плавающего потенциала U_F в центре подложки от коэффициента несбалансированности (a) и давления аргона (б) ($z_n = 100$ мм)

чаев. Как видно из рис. 5, если подложка отсутствует или находится под потенциалом анода, то в струе наблюдаются две группы электронов с различными температурами. Потенциал плазмы составляет 1-3 В. Разность между потенциалом плазмы и потенциалом подложки определяет энергию ионов, бомбардирующих подложку. Из распределения потенциала плазмы вдоль оси струи определяется продольное электрическое поле E_z . Это так называемое самосогласованное поле, благодаря которому ионы движутся через плазму за более подвижными электронами. Концентрация плазмы струи в случае отрицательного смещения на подложке примерно в 5 раз выше, чем в случае потенциала анода на подложке. Это объясняется повышением вероятности ионизации плазмообразующего газа в результате осцилляций электронов между катодом и подложкой.

С ростом коэффициента несбалансированности k_n и снижением давления аргона увеличивается электронная температура плазмы (рис. 6). Это объясняется снижением эффективности магнитной ловушки магнетрона, в результате чего электроны покидают ее с большей энергией. Как показали эксперименты, увеличение разрядного тока магнетрона приводит к линейному росту концентрации плазмы. Электронная температура с ростом тока падает слабо.

Увеличение электронной температуры плазмы приводит к росту отрицательного плавающего потенциала подложки. Этот факт повышает эффективность нанесения диэлектрических покрытий. Ионный ток на подложку определяется концентрацией плазмы и электронной температурой у подложки в соответствии с зависимостью Бома. Полученная информация об изменении параметров плазмы при смене режима работы магнетрона позволяет прогнозировать изменение технологических параметров несбалансированного магнетрона, а следовательно, и управлять последними.

Часть экспериментальных исследований посвящена изучению процесса нанесения покрытий, а также изучению зависимости качества покрытий от потенциала U_c смещения на подложке и от коэффициента k_n несбалансированности. Показано, например, что вольт-эквивалент нагрева подложки ионным током составляет около 80% от потенциала смещения на подложке.

При $U_c = -100$ В скорость нанесения медной пленки уменьшается с увеличением коэффициента несбалансированности (рис. 7.а). Снижение скорости напыления объясняется ионным распылением наносимого покрытия. При $k_n = 10.4$ в центре подложки наблюдается до-

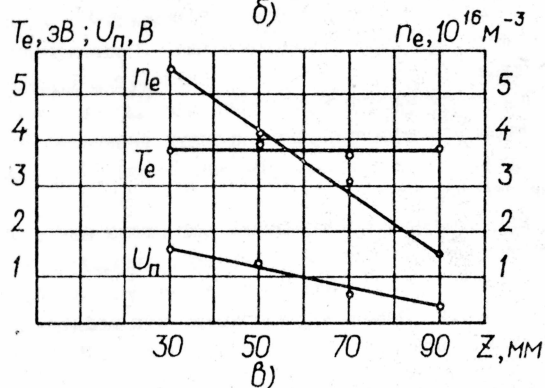
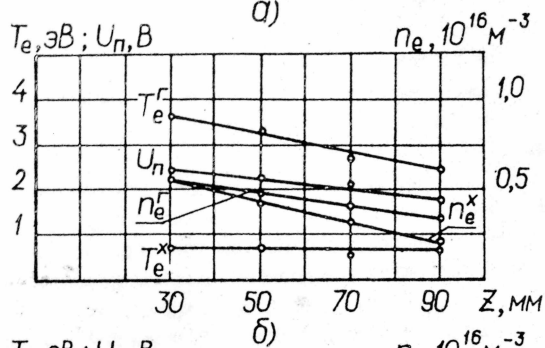
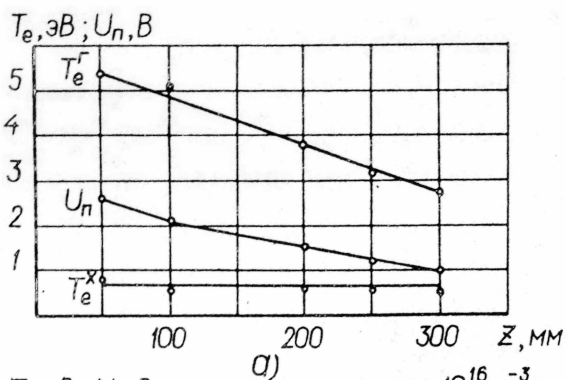


Рис. 5 Распределение локальных параметров плазмы вдоль оси струи в случае без подложки (а), с подложкой при $U_c = 0$ В (б) и при $U_c = -100$ В (в) ($K_H = 3.4$, $p_{Ar} = 0.26$ Па, $z_n = 100$ мм)

кальный минимум скорости нанесения покрытия. Пленки, нанесенные с интенсивной ионной бомбардировкой (т.е. при $U_c = -100$ В), имеют чистый медный цвет и блестящую поверхность. Покрытие, полученное при $U_c = 0$ В, матовое и часто имеет темные пятна. Покрытие, нанесенное с интенсивной ионной бомбардировкой, через месяц хранения в нормальных атмосферных условиях потемнеет значительно меньше, чем нанесенное на подложку с нулевым потенциалом. Это указывает на повышенную коррозионную стойкость пленок меди, наносимых с интенсивной ионной бомбардировкой.

При распылении титанового катода в атмосфере аргона, $p_{Ar} = 0.13-0.65$ Па и при разрядном токе $I_p = 300$ мА, на подложке образуется покрытие золотистого цвета. Это объясняется синтезом на подложке оксинитридов титана из остаточной атмосферы камеры. Остаточное давление воздуха $p = 0.03$ Па. Скорость роста покрытия возрастает с увеличением концентрации плазмы у подложки. Это происходит при увеличении коэффициента несбалансированности магнетрона, при уменьшении давления аргона, а также при переходе от потенциала смещения $U_c = 0$ В к $U_c = -100$ В (рис. 7.6). Содержание титана в покрытиях нанесенных при $k_n = 3.4$ и при $U_c = -100$ В, а также при $k_n = 3.4$ и $U_c = 0$ В, составляет 61% и 92% соответственно. Указанные данные получены методом микрорентгеноспектрального анализа.

Увеличение концентрации плазмы в струе при переходе от $U_c = 0$ В к $U_c = -100$ В подтверждается более интенсивным спектром излучения плазменной струи. В спектре появляются интенсивные линии излучения возбужденных ионов аргона и атомов титана. Это указывает на повышение активации осаждаемых атомов, а, следовательно, и на увеличение скорости реактивного напыления, что и наблюдалось в случае распыления титанового катода.

В работе исследовалось влияние внешнего магнитного поля на плазменную струю несбалансированного магнетрона. Для этого были испытаны три соленоиды. Один из них охватывал плазменную струю, другой - располагался за подложкой и третий - был размещен сбоку струи. В двух первых случаях соленоиды увеличивали осевое магнитное поле. Эффект от этих соленоидов был аналогичным эффекту увеличения коэффициента несбалансированности магнетрона. Боковое расположение соленоиды, как показывает опыт, позволяет отклонять плазменную струю на углы до 90° при индукции, создаваемой соленоидом на оси струи, приблизительно равной 0.005 Тл. При питании

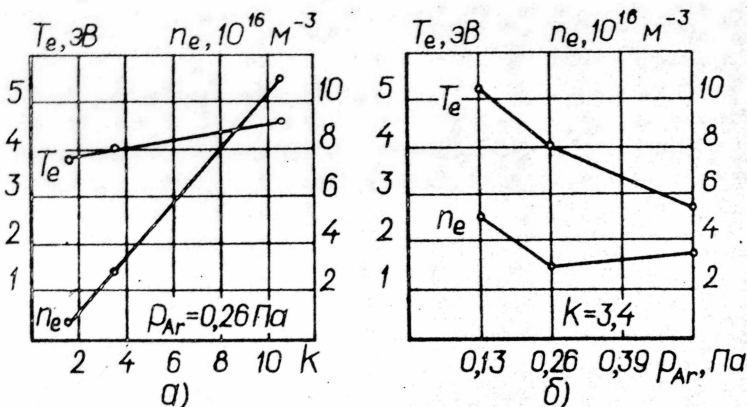


Рис. 6 Зависимость параметров плазмы струи от коэффициента несбалансированности (а) и давления аргона (б) ($U_c = -100 \text{ В}$, $z_n = 100 \text{ мм}$, $z = 70 \text{ мм}$)

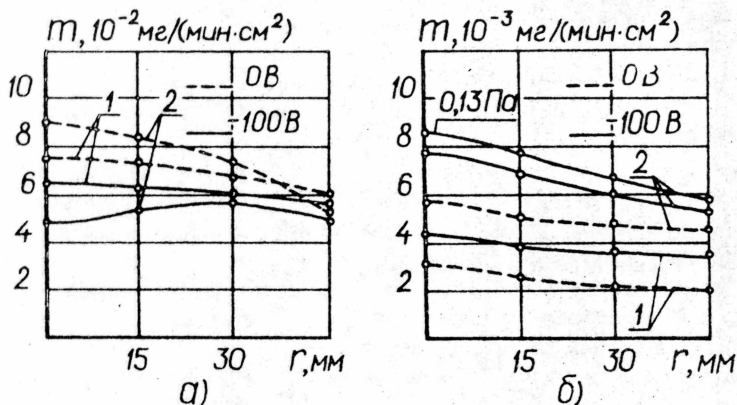


Рис. 7 Распределение скорости нанесения медного (а) и титанового (б) покрытий по радиусу мишени при различных потенциалах смещения на подложке и коэффициентах несбалансированности ($p_{Ar} = 0.26 \text{ Па}$, $z_n = 100 \text{ мм}$): 1 - $k_n = 3.4$; 2 - $k_n = 10.4$

соленоида переменным током появляется возможность осуществить сканирование струи по поверхности подложки. Последнее выравнивает распределение плотности ионного тока на подложке при нанесении покрытия несбалансированным магнетроном с одновременным ионным подтраиванием.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан экспериментальный несбалансированный магнетрон, позволяющий изменять величину несбалансированности магнетрона.

2. Предложен количественный параметр - коэффициент несбалансированности магнетрона, определяющий интенсивность ионной бомбардировки, сопутствующей нанесению покрытия.

3. Дано теоретическое описание движения заряженных частиц в плазменной струе несбалансированного магнетрона при отрицательном относительно анода потенциале смещения на подложке, а также при потенциале подложки, равном потенциалу анода. Оценено отношение коэффициентов амбиполярной диффузии плазмы струи вдоль и поперек магнитного поля при различных коэффициентах несбалансированности магнетрона.

4. Исследовано изменение таких параметров плазменной струи, как электронная температура, концентрация и потенциал плазмы, в зависимости от коэффициента несбалансированности магнетрона, электрического потенциала на подложке и от давления аргона. Получены распределения данных параметров в струе. Показано, что электронная температура в струе увеличивается с ростом коэффициента несбалансированности или со снижением давления аргона. Концентрация плазмы при смещении на подложке -100 В относительно анода примерно в 5 раз больше, чем в случае, когда потенциал подложки равен потенциалу анода.

5. Исследовано влияние электрического потенциала на подложке на изменение функции распределения электронов струи по энергиям. Показано, что в том случае, когда потенциал подложки равен потенциалу анода в плазме струи присутствуют две группы электронов с различными температурами. В случае потенциала на подложке, равного -100 В относительно анода, функция распределения электронов в плазме максвелловская.

6. Исследовано влияние электрического потенциала на подложке и коэффициента несбалансированности магнетрона на скорость нане-

сения и качество покрытий, получаемых при распылении титановой и медной мишеней. Показано, что несбалансированный магнетрон позволяет эффективно регулировать скорость генерации химически активных частиц в плазменной струе и соответственно - скорость роста и качество покрытий.

7. Исследовано влияние внешнего магнитного поля на распределения ионного тока и плавающего потенциала по радиусу подложки. Показано, что с помощью изменения магнитного поля можно сканировать плазменной струей несбалансированного магнетрона по поверхности подложки, выравнивая при этом интенсивность ионной бомбардировки подложки.

8. Сформулированы рекомендации для конструирования и эксплуатации несбалансированных магнетронных систем, в которых основным управляющим параметром является коэффициент несбалансированности магнетрона.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кустов В.В., Марахтанов М.К. Влияние подложки на температуру электронов в плазме несбалансированного магнетрона // Тезисы докладов VII Всерос. конф. по физике газового разряда.- Самара: СГАУ, 1994.- С. 205 - 206.

2. Кустов В.В. Особенности обработки подложки несбалансированным магнетроном // Физика и техника плазмы: Материалы межд. научно-техн. конф.- Минск, 1994.- Часть II.- С. 397 - 399.

3. Кустов В.В., Марахтанов М.К. Тепловое воздействие плазмы несбалансированного магнетрона на подложку // Физика химия обработки материалов.- 1995.- N 4.- С. 148 - 150.

4. Кустов В.В., Марахтанов М.К. Влияние подложки на температуру электронов в плазме несбалансированного магнетрона // Известия вузов. Машиностроение.- 1995.- N 1-3.- С. 57 - 64.

5. Кустов В.В., Марахтанов М.К. Пространственная неравномерность технологических характеристик дугового испарителя установки "Будат-6" // Физика и химия обработки материалов.- 1994.- N 6.- С. 171 - 173.

6. А.С. N 313418 СССР МКИ³ НОЗК 31/00. Катодный узел / Г.К. Клименко, М.М. Чурсин, В.В. Кустов (СССР).- Заявлено 10.07.89.- д.с.п.