Journal of Surface Physics and Engineering, 2018, vol. 3, No. 3, pp. 89-99

УДК 621.739+548.735

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ DC И RF МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В. В. Буранич[1], И. В. Шелест[1], А. А. Гончаров[1], А. Н. Юнда[1], С. А. Гончарова[1]

[1]*Сумской государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина*

E-mail: o.goncharov@mss.sumdu.edu.ua

Поступила в редакцию 11.07.2018

Проведен анализ технологических особенностей процессов DC- и RF- магнетронных разрядов. Показано, что различия в образовании и поддержании плазменной оболочки оказывают различное воздействие на распыляемый и осаждаемый материал. Потенциалы плазмы и потоки частиц на подложку являются основными факторами энергетической бомбардировки подложки, и сильно зависят от технологических особенностей распылительной системы.

Ключевые слова: магнетрон, тлеющий разряд, потенциал плазмы, ионный ток.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ DC ТА RF МАГНЕТРОННОГО РОЗПОРОШЕННЯ

В. В. Бураніч[1], І. В. Шелест[1], О. А. Гончаров[1], А. М. Юнда[1], С. А. Гончарова[1]

[1]*Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна*

Проведено аналіз технологічних особливостей процесів DC- і RF- магнетронних розрядів. Встановлено, що відмінності в утворенні та підтримці плазмової оболонки по-різному впливають на матеріал, який розпорошується та на який осаджується покриття. Потенціали плазми і потоки частинок на підкладинку є основними факторами енергетичного бомбардування підкладинки, і сильно залежать від технологічних особливостей розпилювальної системи.

Ключові слова: магнетрон, тліючий розряд, потенціал плазми, іонний струм.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF DC AND RF MAGNETRON SPATERING

Volodymyr Buranich[1], Igor Shelest[1], Oleksandr Goncharov[1], Andriy Iunda[1], Svitlana Goncharova[1]

[1]*Sumy State University, 2, Rimsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine*

The analysis of technological features of DC- and RF-magnetron discharges processes was carried out. It is shown that distinctions in the formation and maintenance of the plasma sheath have different effects on the sputtered and deposited material. Plasma potentials and particle fluxes onto the substrate are the main factors of the energy bombardment of the substrate, and are highly dependent on the technological features of the sputtering system.

Keywords: magnetron, glow discharge, plasma potential, ion current.

ORCID IDs

Volodymyr Buranich: https://orcid.org/0000-0002-5831-8754
Igor Shelest: https://orcid.org/0000-0002-5699-0360
Oleksandr Goncharov: https://orcid.org/0000-0002-0653-4754
Andriy Iunda: https://orcid.org/0000-0002-8628-4547
Svitlana Goncharova: https://orcid.org/0000-0002-1824-3639

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ионно-плазменные методы получения пленок с заданными свойствами вновь представляют исследовательский интерес, что связанно как с модернизацией технических особенностей распылительных систем, так и более глубоким пониманием влияния энергетики и кинетики процессов массопереноса при осаждении пленок. Большинство современных установок для

@ В. В. Буранич, И. Н. Шелест, А. А. Гончаров, и др., 2018

получения покрытий характеризуются определенным набором внешних и внутренних параметров, за счет которых можно оказывать определенное воздействие на образование плазмы, распыление и осаждение. В зависимости от определенной связи между данными параметрами изменяются характеристики плазмы, что в конечном итоге приводит к формированию конкретной структуры, состава и свойств.

Магнетронное распыление – способ получения покрытий при помощи катодного распыления в плазме диодного разряда скрещенных электрического и магнитного полей. Основными преимуществами магнетронного распыления можно считать: высокую скорость распыления и адгезию, хорошую чистоту, простоту автоматизации и отличную однородность на поверхностях больших площадей, а также способность наносить покрытия на чувствительные к нагреву подложки. Пленки, полученные методом магнетронного распыления, имеют стехиометрию лучше представляющую состав материала мишени, чем состав, полученный методом термического испарения. Использование двойных магнетронных систем позволяет осаждать несколько покрытий за один технологический цикл.

Многочисленная вариативность конфигураций магнетронных систем, а также технических решений, что играют существенную роль, как при формировании газового разряда, так и при процессе распыления, поэтому для создания оптимальных условий роста пленок с заданными свойствами необходимо учитывать принципы формирования разряда и его основные параметры, описанные в данном обзоре.

1. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ. СРАВНЕНИЕ DC И RF РАСПЫЛЕНИЯ

Для процесса распыления все катодные процессы (диодный, триодный и магнетронный) требуют наличие плазмы тлеющего разряда, что может быть сгенерирована как при подаче постоянного тока, так и ВЧ-мощности.

Область возникновения тлеющего разряда подробно проиллюстрирована на рисунке 1. Участок от F до G называется нормальным тлеющим разрядом. В данной области напряжение относительно не зависит от общего тока, протекающего в разрядной области, а плотность тока, достигающая электрода, также практически не зависит от общего тока. Плазма находится в контакте с малой частью поверхности катода при низком токе. Контактирующая поверхность заполняет все больше и больше площадь сечения катода по мере увеличения тока, пока в точке G, на границе аномального свечения, плазма не покроет всю поверхность катода, чтобы обеспечить необходимую постоянную плотность тока. В области аномального тлеющего разряда напряжение значительно возрастает с увеличением общего тока, плотность тока катода устанавливается выше его естественного значения. Электроды становятся достаточно горячими, для эмиссии электронов из катода в термодинамической точке H. Затем разряд переходит в дуговой, если источник питания постоянного тока имеет достаточно низкое внутреннее сопротивление [1].

Диодный тлеющий разряд постоянного тока (DC) формируется путем приложения разности потенциалов (от нескольких сотен В до нескольких кВ) между двумя электродами, в объеме заполненном газом (инертным или реактивным), при давлении в диапазоне от нескольких мТорр до атмосферного [2, 3]. Из-за разности потенциалов электроны ускоряются от катода и сталкиваются с атомами и молекулами газа. При столкновениях проявляются различные физические процессы, такие как, к примеру: возбуждение, ионизация, диссоциация. Ускоренные ионы выбивают вторичные электроны при бомбардировке поверхности катода. Эти вторичные электроны ускоряются от катода, и могут вызвать больше ионизационных столкновений. Столкновения, в свою очередь создают ион-электрон пары, данный процесс разложения ионов-электронов называют са-

моподдерживающейся плазмой (selfsustaining plasma) [4].

Такая конфигурация может вызвать проблемы, когда один из электродов является непроводящим, поскольку из-за постоянного тока электроды заряжаются и приводят к выгоранию тлеющего разряда [3]. Данная проблема преодолевается путем применения переменного напряжения между двумя электродами в емкостно или индуктивно связанном высокочастотном (RF) тлеющем разряде.

Как и в случае DC– распыления, RF пропускает энергетическую волну через инертный газ в вакуумной камере, которая становится ионизированной. Осаждаемый материал мишени (катод) бомбардируется высокоэнергетическими ионами, распыляя атомы в виде узкого потока на подложку. Со временем на поверхности мишени, за счет ионного воздействия, начинается накопление положительного заряда, который в определенный момент может отделить целый слой распыляемых атомов. Чередованием электрического потенциала с RF-распылением поверхность катода очищается от накопленного заряда с каждым циклом на частоте источника (как стандарт 13,56 МГц для питания радиочастотного оборудования), затем ионная бомбардировка продолжается. Это позволяет избежать появления капельных фаз и микродуг на поверхности мишени.

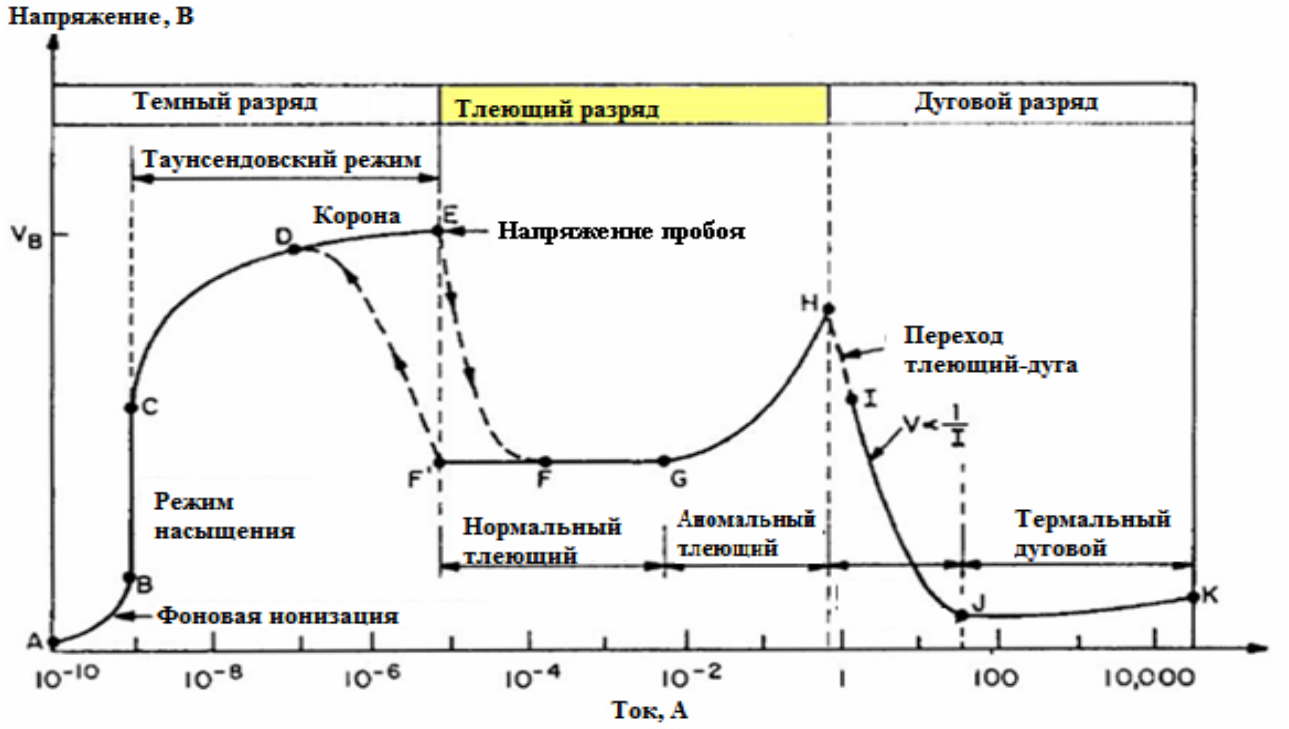


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики электрического разряда постоянного тока низкого давления [1]

В отличие от распыления на постоянном токе плазма имеет тенденцию распространяться по всей вакуумной камере, а не концентрироваться вокруг катода. Плазма может поддерживаться при более низких давлениях 1-15 мТорр. Другим преимуществом RF-распыления есть исчезновение «анодного» эффекта, когда подложка становится изолированной и приобретает заряд, а все поверхности вырабатывают плазменный разряд в результате того, что электроны движутся намного быстрее чем ионы из-за их меньших размеров и кинетической энергии. Однако в результате модуляции переменного тока на радиочастотах материал подложки также разряжается при каждом полупериоде и становится изолированным, что со временем может привести к прекращению процесса осаждения пленок [5].

В дальнейшем речь пойдет о разновидности тлеющего разряда, а именно магнетронном разряде. Он представляет собой плазменный разряд со скрещенными магнитными и электрическими полями. В магнетронном

разряде электроны циркулируют по спирали вокруг линий магнитного поля и создают более интенсивную ионизацию. Следовательно, магнетронные распылительные системы обычно работают при более низких давлениях и высоких токах в сравнении с диодными и триодными.

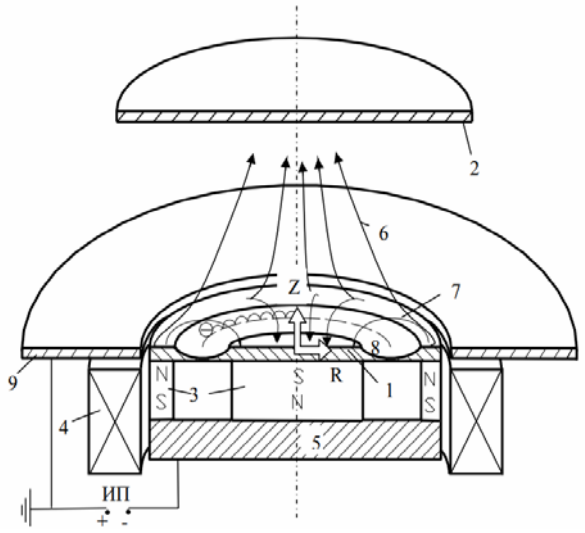
2. ВНУТРЕННЕЕ УСТРОЙСТВО МАГНЕТРОНА И ЕГО ОСНОВНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ

Устройство магнетрона рассмотрим на примере типичной планарной распылительной системы с круглым катодом. Как и в случае диодного тлеющего разряда, магнетронный разряд загорается между катодом и анодом, либо заземленными стенками вакуумной камеры (рис. 2а). Ионы разреженного газа ускоряются и бомбардируют мишень из напыляемого материала, вследствие чего происходит его распыление и формирование потока осаждаемых нейтральных частиц и ионов на подложку. Электрон попадает в магнитную ловушку у поверхности анода и успевает многократно ионизировать атомы рабочего газа, прежде чем достигнет анода.

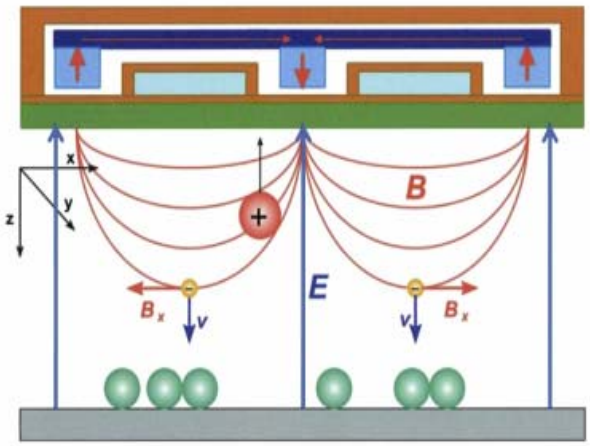
В поле, сгенерированном постоянными магнитами на ферромагнитном основании (рис. 2б) электроны захватываются силой Лоренца $F_л = e(v\times B)$, которая достигает максимума в области, где B_x (компонента, параллельная поверхности мишени) достаточно велика. Она уменьшается по направлению к центру и внешним участкам поверхности мишени ($B \parallel v$). Траектории электронов обусловлены дифференциальным уравнением:

$$m_e\times dv/dt = e\times E + e(v \times B). \qquad [1]$$

Это повышает локальность плазмы, за счет чего достигается высокая плотность ионного тока (на два порядка выше, чем в обычных диодных системах распыления) и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени. Увеличение скорости распыления с одновременным снижением рабочего давления позволяет значительно снизить загрязнения пленок посторонними включениями. Локализация электронов вблизи мишени предотвращает бомбардировку ими подложек, что снижает температуру и радиационные дефекты в создаваемых структурах.



а



б

Рис. 2. Упрощенная схема магнетронной распылительной системы [7] (а) и принципиальное распределение магнитных линий [8] (б): 1 – распыляемый катод, 2 –подложка, 3 – постоянные магниты, 4 - электромагнит, 5 – магнитопровод, 6 – несбалансированные линии магнитного поля, 7 – сбалансированные линии магнитного поля, 8 - зона распыления катода, 9 – анод (крепежный фланец), ИП – источник питания магнетрона

2.1. Типы магнетронов

В зависимости от распределения линий магнитного поля магнетроны бывают конвенциальные (сбалансированные) и несбалансиро-

ванные двух типов (рис. 3). Не смотря на незначительную разницу в конструкции эффективность данных конфигураций сильно различается. В обычном магнетроне плазма связана с областью мишени (± 60 мм от ее поверхности), и ее влияние на подложку не значительно (ионный ток порядка 1 мА/см^2), следовательно данный тип практически не вносит изменения в структуру получаемых пленок (с учетом того что абсолютно сбалансированного магнетрона не существует). Однако энергия ионов может быть увеличена за счет увеличения отрицательного смещения на подложке, но это может привести к дефектам в пленках и увеличенным макронапряжениям. Также сильно затрудняется процесс осаждения плотных покрытий на массивные или комплексные подложки.

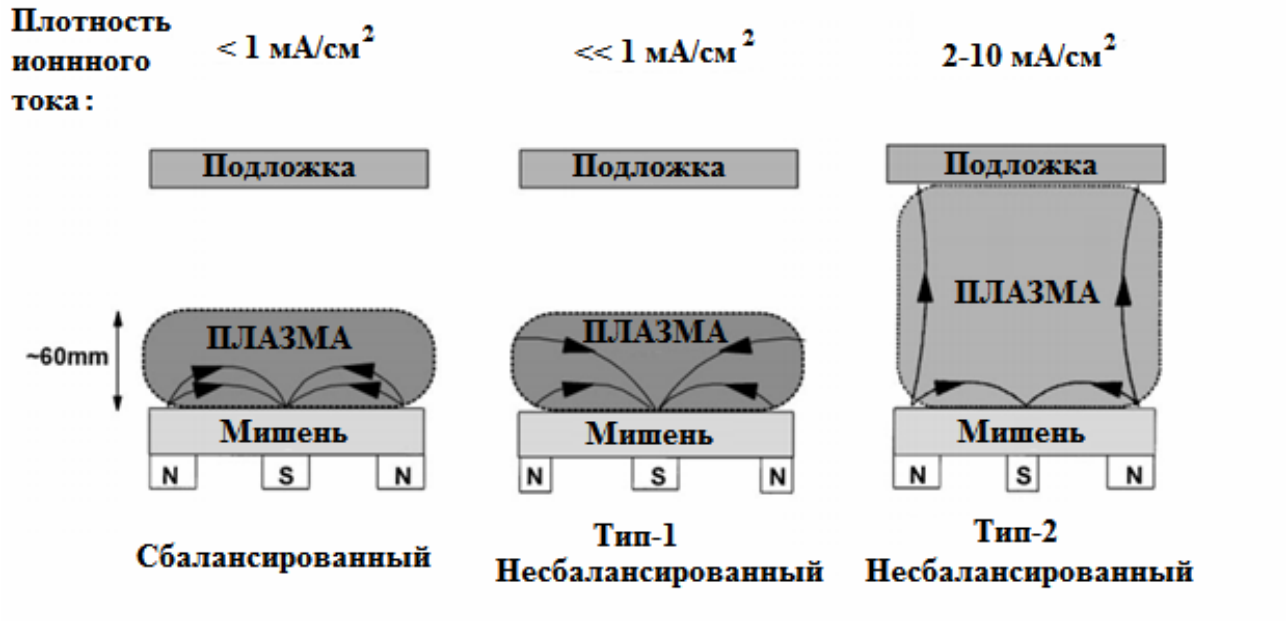


Рис. 3. Основные конфигурации магнетронов [9]

В несбалансированном магнетроне (тип 2) внешнее кольцо магнитов усиливается относительно центрального полюса, часть магнитных линий замыкаются между центральным и внешним полюсами магнетрона, а другая часть остается направленной на подложку. В таком случае плазма становится частично связанной с областью мишени, но также и с подложкой, что дает возможность получать плотные пленки, при высоком ионном ассистировании и без необходимости в дополнительном отрицательном смещении. В несбалансированном магнетроне (тип 1) применяется обратный случай, центральный полюс усилен относительно внешнего, что приводит к тому, что линии поля направлены к стенкам камеры. Эта конфигурация неприменима при получении плотных покрытий, поскольку плотность плазмы в области подложки очень мала, однако может быть использована для создания высокопористых пленок [9, 10].

2.2. Отличительные особенности RF-магнетронного распыления

Как уже говорилось в прошлом разделе, высокочастотное распыление характеризуется наличием осциллирующих в объеме с определенной частотой ускоренных электронов, ионы слишком тяжелые и реагируют лишь на высокие значения, генерируемые в системе. Когда RF-мощность подается на мишень, та должна быть емкостной, чтобы потенциал оболочки постоянного тока мог развиться на поверхности мишени. На высокой частоте, ионы и электроны имеют совершенно разные мобильности в флуктуирующем поле. Это означает, что они физически перемещаются на разные расстояния в течение каждого полупериода. Данный эффект иллюстрируют вольт-амперные характеристики плазмы,

изображенные на рис. 4а, где избыточный электронный ток формируется из-за данной разницы в мобильности частиц. Однако в емкостной системе никакой чистый заряд не может быть передан, так что электрод смещается отрицательно для компенсации (рис. 4б), так что на поверхности катода возникает отрицательное напряжение. Именно за счет емкостной связи высокочастотное распыление позволяет распылять мишени из непроводящих материалов, что является его несомненным преимуществом [5].

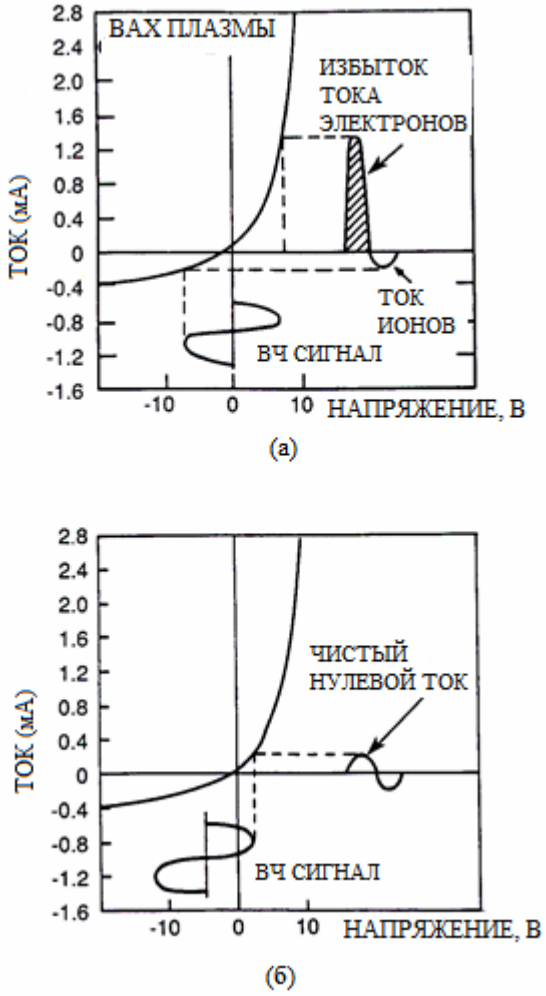


Рис. 4. Формирование отрицательной оболочки на емкостно-связанном катоде высокочастотного разряда (а) Чистый ток / нулевое напряжение смещения. (б) Нулевой ток / ненулевое напряжение смещения [5].

При RF-магнетронном распылении магнитное поле образует граничный «туннель», который улавливает электроны вблизи поверхности мишени, улучшая эффективность образования инертных ионов и ограничивая разряд плазмы. Таким образом, высокочастотное магнетронное распыление поддерживается при более высоких токах и давлениях газа. Поддерживать плазму с гораздо более низким давлением получается за счет кинетической энергии, возникающей в результате ускорения и пробега электронов на достаточное расстояние в плазме. Разница в массе между частицами ионизированного газа и электронами позволяет поддерживать плазму независимо от захвата вторичных ионов над материалом мишени, как при обычном магнетронном распылении [11].

На высокой частоте снижается скорость осаждения из-за отсутствия вторичных электронов, захваченных над мишенью, как при DC-магнетронном распылении, что вызывают механизм дополнительной ионизации газа. При всех типах распыления плазма поддерживается разрушением и ионизацией инертного газа, такого как аргон, который наиболее широко используется из-за его большей массы по сравнению с другими инертными газами, гелием и неоном.

Также стоит учесть несколько важных аспектов. Поскольку RF-распыление использует радиоволны вместо постоянного тока, скорость осаждения становится значительно ниже, чем на постоянном токе и требует значительно более высоких напряжений, что зачастую приводят к перегреву. Другая сложность заключается в том, что RF-токи проходят по поверхности проводников, а не через них. Это означает, что специальные кабели, разъемы и их согласование играют решающую роль в процессе распыления [12].

3. ПОТЕНЦИАЛ ПЛАЗМЫ И ПЛАВАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ

При получении качественных пленок с заданной структурой и свойствами физическим методом распыления необходимо поддерживать определенную энергию ионов воздействующих на ростовую поверхность. Распределение ионов по энергиям в магнетронном разряде неравновесно [7]. Они имеют максимумы, соответствующие термализованным частицам, ионизированным при

плазменном потенциале. Основным процессом, который влияет на распределение ионной энергии, является «столкновительный» перенос энергии от распыленных частиц к атомам газа.

Энергия положительных ионов, падающих на подложку, определяется в основном средним потенциалом плазмы U_p и потенциалом поверхности подложки, который может находиться в трех различных режимах: при плавающем потенциале ($U_S = U_f =$ const) заземлении ($U_S = 0$), под позитивным или негативным смещением ($U_S = U_f + U_{sb}$). В данном разделе описываются средний потенциал плазмы U_p и потенциал электрически изолированной подложки или плавающий U_f. Обе данные величины определяются параметрами распылительной системы и связующими элементами ее блока питания, но имеются определенные закономерности их формирования.

Внутренними параметрами, влияющими на смещение при RF разряде являются: давление, RF-мощность и частота источника, тип газов в камере, геометрия разряда, дополнительное позитивное смещение. Рассмотрим подробнее некоторые аспекты в контексте влияния на плазменные потенциалы.

Давление обратно пропорционально смещению, а мощность прямо пропорциональна, это легко объясняется физикой процесса ионизации плазмы. При частоте ниже 50 кГц RF–магнетронное распыление проходит как при DC на всех электродах в контакте с разрядом. Когда частота превышает 50кГц становится достаточно электронов для ионизации газов, и начинается процесс высокочастотного распыления, как правило используют общепринятую радиочастоту 13.56 МГц [13].

3.1. Геометрия разряда

Исходя из эквивалентной схемы разряда [14] потенциал плазмы определяется относительными емкостями оболочки мишени, оболочками на плоскости подложки и стенками вакуумной камеры. Параметром, определяющим размеры ионной оболочки, выступает отношение площади мишени к общей площади всех других поверхностей находящихся в контакте с тлеющим разрядом R. На рисунке 5 представлены зависимости потенциала плазмы от данного фактора при тлеющем разряде при ВЧ-распылении углеродной мишени U_t. В случае набора электродов с одинаковой площадью (площадь мишени равна площади всех других поверхностей находящихся в контакте с разрядом) $R = 1$, все поверхности получат ионную бомбардировку, и процесс осаждения будет блокирован, также данная ситуация проявляется при ПТ, когда мишень является электрически проводящей [15].

На рисунках 6 и 7 показана степень влияния геометрии разряда на формирование плазменного потенциала.

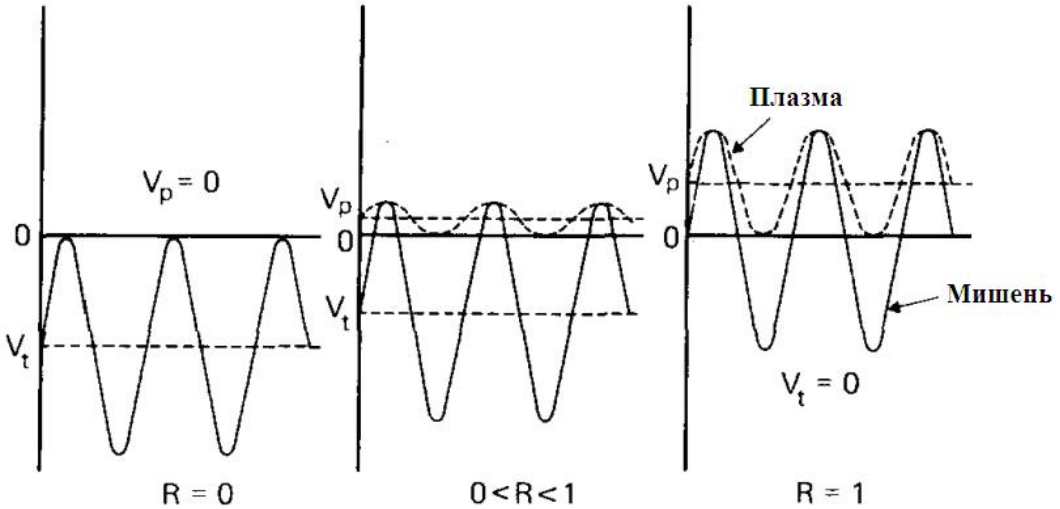


Рис. 5. Приближенные формы сигнала мишени и плазменного напряжения в тлеющем разряде с заземленными стенками (R - отношение площади мишени к стенке) [15].

В каждом случае максимальная используемая прямая мощность составляла приблизительно 100 Вт. Наклоны прямых линий построены с отношением площадей *R* на рис. 7. Вставка показывает случай при равных площадях относительно точки (1; 1).

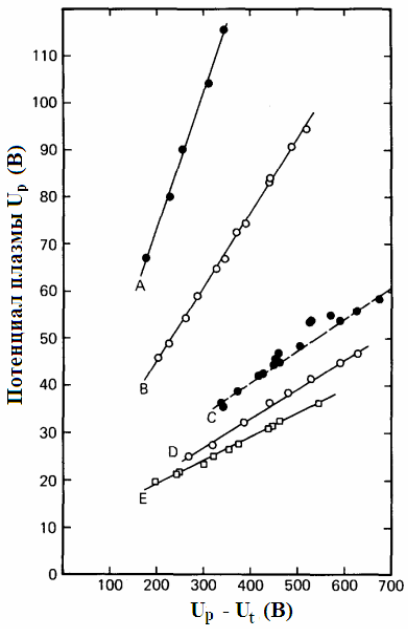


Рис. 6. Плазменный потенциал U_p по сравнению с напряжением постоянного тока через плазменную оболочку мишени ($U_p - U_t$) для пяти ограничивающих цилиндров; давление аргона = 50 мТорр; межэлектродное расстояние = 1. 88 см. Кривая A: R = 0.289, наклон = 0.298; B: R = 0,208, наклон = 0,160; C: R = 0,142, наклон ~ 0,07; D: R = 0,114, наклон = 0,06; E: R = 0,092, наклон = 0,05 [15]

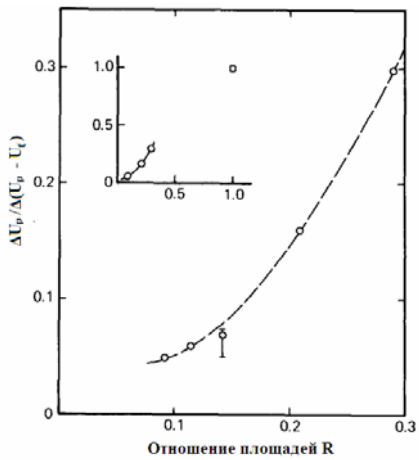


Рис. 7. Крутизна графиков U_p от $U_p - U_t$ относительно *R* [15]

Чтобы определить энергию положительных ионов, падающих на электрически изолированные от земли подложки, необходимо знание плавающего потенциала в разряде. Поскольку заземленные и плавающие поверхности получают от разряда отрицательные/электронные и положительные/ионные токи, то рационально предполагать, что обе поверхности будут иметь примерно одинаковый потенциал. Следствием того, что плавающий потенциал близок к потенциалу земли в данном типе разряда, есть бомбардировка изолированных подложек положительными ионами обладающими энергиями характерными для потенциала плазмы.

3.2. Влияние позитивного смещения

В подавляющем большинстве случаев, когда методы распыления подложки используются в системах распыления, отрицательное напряжение применяется к подложкам для повышения ионной бомбардировки растущей пленки. Время от времени положительные напряжения смещения используются [9, 15] для устранения бомбардировки положительных ионов и увеличения электронной бомбардировки или термического воздействия на поверхность. Кроме этого, положительные напряжения смещения используются в кислородной плазме для анодирования плазмы. Известно, что отрицательно смещенный электрод не влияет на потенциал плазмы, тогда как положительно смещенный электрод вызовет увеличение потенциала плазмы.

Несмотря на то, что невозможно получить большие положительные напряжения смещения, очевидно, что приложение положительного напряжения на вспомогательный электрод является простым способом увеличения потенциала плазмы. Все заземленные поверхности подвергаются бомбардировке положительными ионами, обладающими энергиями, характерными для плазменного потенциала, так же как и в геометрически ограниченном разряде.

Суммируя выше сказанное: энергия ионов, падающих на заземленные подложки, может быть увеличена путем подачи положительного напряжения к электроду, находящемуся в контакте с разрядом. Данная

процедура не оказывает существенного влияния на энергию ионов падающих на электрически изолированные подложки.

4. ПЛОТНОСТЬ ИОННОГО ТОКА И СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ

Наряду с плазменными потенциалами главнейшими факторами определяющими рост и формирование покрытий при условиях магнетронного распыления являются распределения потоков нейтральных и ионизированных частиц мишени, что характеризуются плотностью ионного тока j_S и скоростью осаждения a_D [11, 16]. Эти фундаментальные параметры сгруппированы в данном разделе, так как не могут изменяться независимо, таким образом, при нормальных условиях варьировать их получается лишь в ограниченном диапазоне. Однако, как показывает практика, этот диапазон совпадает с оптимальными уровнями ионной бомбардировки для получения плотных покрытий, независимо от материала мишени [7, 17].

Данные параметры характеризуются типом распыляемого материала, давлением рабочего и реактивного (в случае реактивного распыления) газов, мощностью разряда и расстоянием от подложки до мишени. Логично, что скорость осаждения уменьшается при увеличении расстоянии до подложки, и возрастает при увеличении потребляемой магнетроном мощности. Компонентный состав мишени и отношение давлений газов представляют собой более сложные зависимости, поскольку на тлеющий разряд влияют проводимость и температурный диапазон частиц.

В несбалансированных магнетронах энергичные электроны вылетают по спиральной траектории из области мишени вдоль силовых линий, чтобы продвинуться к подложке и подвергнуться ионизирующим столкновениям с атомами газа. Следовательно, вторичная плазма не ограничена областью мишени от этих ионизирующих столкновений, но также может вытекать в направлении подложки, и из этой вторичной плазмы могут быть извлечены большие ионные токи. Исследования других плоских неуравновешенных магнетронов также показали зависимость ионного тока от тока разряда. Таким образом, ионный ток на подложке, пропорционален току мишени (I_T).

Скорость осаждения также увеличивается с увеличением тока разряда и уменьшается с ростом давления. Однако наиболее значимым фактором является расстояние мишени от подложки [18 – 20].

На рис. 8 приведены зависимости плотности ионного тока на подложке и скорости осаждения в зависимости от расстояния подложка - мишень.

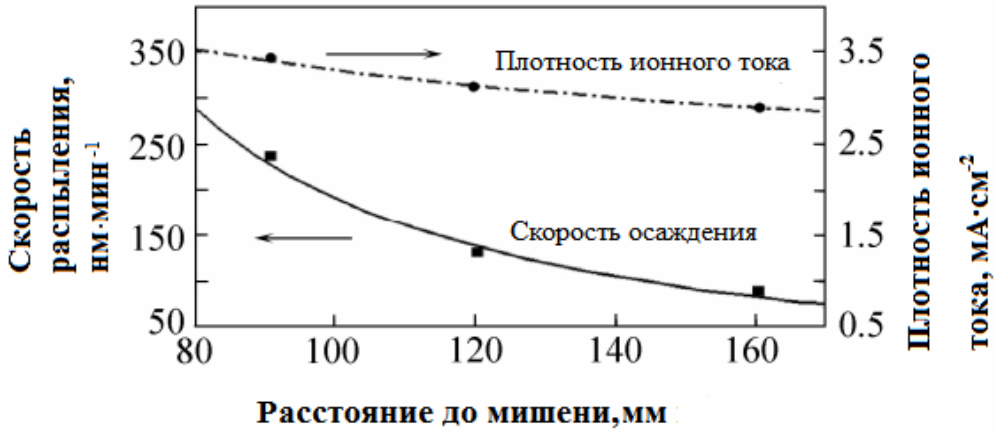


Рис. 8. Сравнение изменений плотности ионного тока и скорости осаждения с разделением подложки на мишень при использовании несбалансированной магнетронной системы [19]

Весомый вклад в образование потоков частиц вносит вариация магнитного поля, положение магнитных линий и степень сбалансированности магнетрона (см. раздел 3).

Рисунки 9 и 10 иллюстрируют на примере различных материалов поведение плотности ионного тока и скорости распыления при изменении конфигурации магнитного поля путем усиления тока соленоида расположенного аксиально к оси несбалансированного магнетрона.

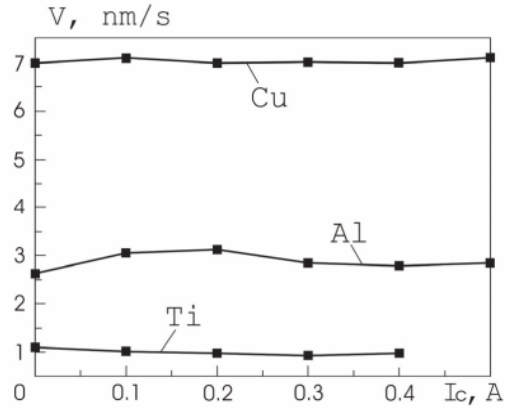


Рис. 9. Скорость осаждения относительно дополнительного тока катушки для различных типов материалов (ток мишени 2А) [20]

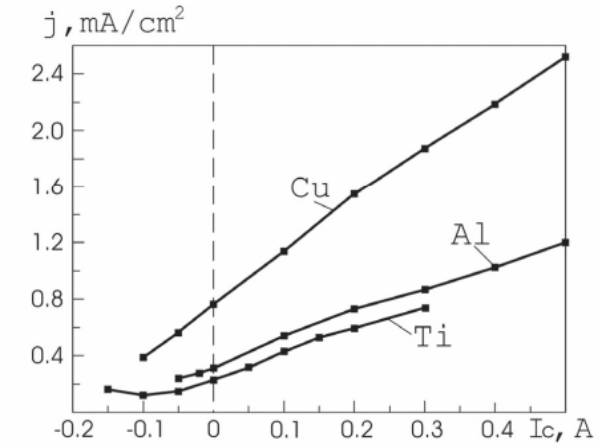


Рис. 10. Плотность ионного тока на оси магнетрона как функция дополнительного тока катушки для различных типов материалов (ток мишени 2А) [20]

При увеличении тока катушки происходил переход ко 2-му типу несбалансированного магнетрона, что характеризуется высокой степенью воздействия на область подложки.

Как видно из данных зависимостей скоростей осаждение практически не зависит от уровня разбалансированности магнетрона, тогда как плотность ионного тока возрастает с увеличением степени несбалансированности.

ВЫВОДЫ

Проанализированы технологические особенности магнетронного распыления, как базиса для получения покрытий с заданными свойствами, что имеет отличные перспективы прикладного использования, за счет многовариантного контроля «внутренних» и «внешних параметров» распылительной системы. Показано влияние различия физических процессов генерации, стабилизации и переноса частиц в условиях RF и DC магнетронных разрядов на процесс осаждения покрытий. Приведены основные конфигурации одиночных магнетронов, и их обсуждение с точки зрения воздействия на пленку что формируется на подложке. Обусловлена роль потенциалов плазмы и потоков частиц на подложку, как факторов стимулирующих ионную бомбардировку, а также их зависимость от технологических параметров распыления.

REFERENCES

1. Roth J. R. Industrial Plasma Engineering, Volume 1: Principles. – Institute of Physics, 1995.– 339 pp.
2. Bogaerts A. The glow discharge: an exciting plasma «Invited Lecture» // J. Anal. At. Spectrom. – 1999. – Vol. 14. – P. 1375-1384.
3. Llewellyn-Jones F. The Glow Discharge and an introduction to Plasma Physics. – London, 1966. – 211 p.
4. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. – Canada, 2005. – 757 p.
5. Swann S. Magnetron sputtering // Phys. Technol. – 1988. – Vol. 19. – P. 67
6. Wright M., Beardow T. Design advances and applications of the rotatable cylindrical magnetron // J. Vac. Sci. Technol. – 1986. – Vol. 4. – P. 388-392.
7. Solov'ev A. A., Sochugov N. S., Oskomov K. V. Investigation of plasma characteristics in an un-

balanced magnetron sputtering system // Plasma Phys. Rep. – 2009. – Vol. 35. – P. 399-408.
8. Brauer G. Magnetron sputtering // Comprehensive materials processing. – 2014. –Vol. 4. – P. 57-73.
9. Window B., Sawides N. Charged particle fluxes from planar magnetron sputtering sources // J. Vac. Sci. Technol. – 1986. – Vol. 4. – P. 196-202.
10. Kelly P. J., Arnell R. D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // Vacuum. – 2000. – Vol. 56. – P. 159-172.
11. Coburn J.W., Kay E. Positive ion bombardment of substrates in rf diode glow discharge sputtering // J. App. Phys. – 2003 – Vol. 43. – P. 49-65.
12. De Bosscher W., Lievens H. Advances in magnetron sputter sources // Thin Solid Films. – 1999. – Vol. 351. – P. 15-20.
13. Köhler K., Horne D. E., Coburn J. W. Frequency dependence of ion bombardment of grounded surfaces in rf argon glow discharges in a planar system // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58. – P. 33-50.
14. Koenig H. R., Maissel L. I. Application of RF discharges to sputtering // IBM J. Res. Dev. – 1970. – Vol. 14. – P. 168-171.
15. Köhler K., Coburn J. W., Horne D. E., Kay E., Keller J. H. Plasma potentials of 13.56 MHz rf argon glow discharges in a planar system // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 57. – P. 59-66.
16. Ekpe S. D., Dew S. K. Theoretical and experimental determination of the energy flux during magnetron sputter deposition onto an unbiased substrate // J. Vac. Sci. Technol. – 2003. – Vol. 21. – P. 476–483.
17. Zhou J., Wu Z., Liu Z. Influence and determinative factors of ion-to-atom arrival ratio in unbalanced magnetron sputtering systems // J. Univ. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 15. – P. 775–781.
18. Habib S. K., Rizk A., Mousa I. A. Physical parameters affecting deposition rates of binary alloys in a magnetron sputtering system // Vacuum. – 1998. –Vol. 49. – P. 153-160.
19. Arnell R. D., Kelly P. J. Recent advances in magnetron sputtering // Surf. Coat. Technol. – 1999. – Vol. 112. – P. 170-176.
20. Golosov D. A. Effects of Magnetic System Unbalance on Magnetron Sputtering Characteristics // Plasma Phys. Technol. – 2014. – Vol. 1, 2. – P. 61-63.