

УДК 537.534.2; 621.384.637

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ СИСТЕМЫ

Д.А. КОТОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 24 сентября 2003*

Интегрированная система ионно-ассистированного магнетронного распыления была разработана для расширения возможностей управления параметрами осаждаемых пленок. Преимуществом предлагаемого способа нанесения является высокая скорость роста покрытия с заданной структурой и соответственно физико-химическими свойствами. Приведена схема устройства и результаты исследований вольтамперных характеристик магнетронной распылительной системы в зависимости от давления в вакуумной камере. Установлены особенности электромагнитной совместимости ионно-лучевой и магнетронной распылительной систем. Выявлены возможности значительного снижения пробойного потенциала магнетрона и генерации его разряда при пониженных рабочих давлениях посредством стимуляции ионным пучком. Изучено влияние различных конфигураций ионно-плазменного процесса на инициализацию и устойчивость магнетронного разряда. Отмечены особенности компенсации положительного объемного заряда ионного пучка.

*Ключевые слова:* ионно-ассистированное осаждение, магнетронная распылительная система, источник ионов

### Введение

Аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях находит широкое применение в магнетронных распылительных системах планарного типа для формирования тонкопленочных структур [1, 2]. Вместе с тем бомбардировка растущей пленки высокоэнергетичными электронами создает дефекты структуры растущего покрытия и ухудшает его параметры, а также составляет значительную температурную нагрузку на подложку. При осаждении диэлектрических покрытий на поверхности растущей пленки образуется заряд, что способствует ее пробоя [3]. Одним из путей устранения таких недостатков является воздействие на поверхность конденсации направленных пучков положительно заряженных частиц. Так бомбардировка поверхности растущей пленки низкоэнергетичными ионами из автономного источника позволяет управлять параметрами зародышеобразования, морфологией, химическим составом, микроструктурой и внутренними напряжениями в пленке [4, 5].

Возможность сочетания достоинств плазменных и пучковых методов в едином технологическом процессе приводит к значительному расширению технологических приемов выращивания тонких пленок и улучшению общетехнических характеристик оборудования, обеспечивая многообразие режимов, недоступных как обычному магнетронному распылению, так и распылению ионным пучком [6]. Поэтому представляется перспективным совместное функционирование магнетронной распылительной системы и автономного источника ионов для проведе-

ния процесса ассистированного осаждения пленок, позволяющего в полной мере проявить достоинства этих методов.

### Экспериментальная часть

На основе двухлучевого источника ионов и планарного магнетрона разработана интегрированная ионно-плазменная система (ИИПС). Ее схематическое изображение представлено на рис. 1. Конструктивно ИИПС состоит из двух автономных устройств: магнетронной распылительной системы сбалансированного типа и двухлучевого кольцевого ионного источника с коническими пучками, расположенного между магнетроном и подложкой так, что внутренняя ступень источника направлена на мишень-катод, а внешняя на подложку. Для исследования особенностей взаимодействия разрядов магнетрона и внешней ступени источника, а также варьирования перекрытием ионно-плазменных потоков у подложки была предусмотрена возможность продольного перемещения катодного узла вдоль оси конструкции.

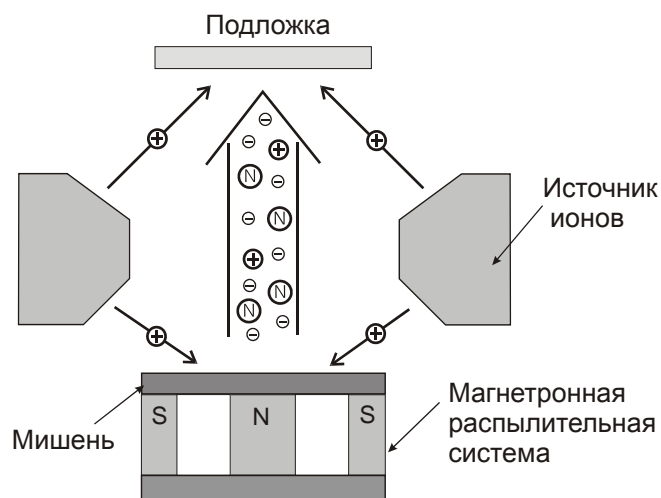


Рис. 1. Схематическое изображение интегрированной ионно-плазменной системы

Магнетронная распылительная система (МРС) представляет собой катодный узел с магнитной системой на постоянных магнитах. Два отдельных блока наборных магнитов формируют внутренний и внешний магнитные полюса и арочную конфигурацию поля над поверхностью катода. Для снижения магнитных потерь с обратной стороны от мишени блоки магнитов устанавливаются на диск из магнитомягкой стали. Диаметр мишени-катода составляет 80 мм. Магнитная система имеет прямое охлаждение проточной водой, а катод для удобства смены мишени и исключения при этом попадания воды внутрь вакуумной камеры охлаждается косвенно, через медную мембрану. Подача рабочего газа осуществлялась через газораспределитель ионно-лучевого устройства.

Ионный источник фланцевой конструкции разработан на основе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Внутренняя распыляющая ступень источника выполнена в конфигурации ускорителя с анодным слоем. Пучок ионов имеет форму конуса и наклон под углом в  $30^\circ$  к поверхности мишени. Средняя энергия ионов варьируется в диапазоне от 300 до 1500 эВ при токе пучка до 200 мА. Внешняя, ассистирующая ступень ионного источника может функционировать в конфигурации ускорителя с анодным слоем и торцевого холловского ускорителя. Это определяется величиной и вектором направленности магнитного потока в ускорительном канале, которые определяются в свою очередь геометрическими параметрами магнитопроводов и ускорительного электрода в разрядной области. В конфигурации торцевого холловского ускорителя формируется поток ионов со средними энергиями порядка 40–150 эВ при разрядном токе более 1 А.

Магнитная система ионного источника представляет собой торообразный корпус-магнитопровод из магнитомягкой стали с соленоидом внутри. Экстракция пучков ионов происходит через два кольцевых канала. Катушка соленоида находится вне объема вакуумной каме-

ры. Подача газа в разрядные области ионного источника осуществляется через двусекционный газораспределитель, состоящий из системы радиальных каналов, где происходит его равномерное распределение по периметру кольцевой разрядной камеры. Охлаждение системы анодов осуществляется через водяные дроссели, для исключения электрического пробоя охлаждающей воды высоким напряжением.

### Результаты и их обсуждение

Благодаря проведенным экспериментальным исследованиям были определены вольт-амперные характеристики магнетрона при различных конфигурациях включения ИИПС. На рис. 2 представлены вольтамперные зависимости МРС при автономном включении от давления в вакуумной камере. Подача рабочего газа осуществлялась в разрядную область через газораспределитель распыляющей ступени ионно-лучевого источника.

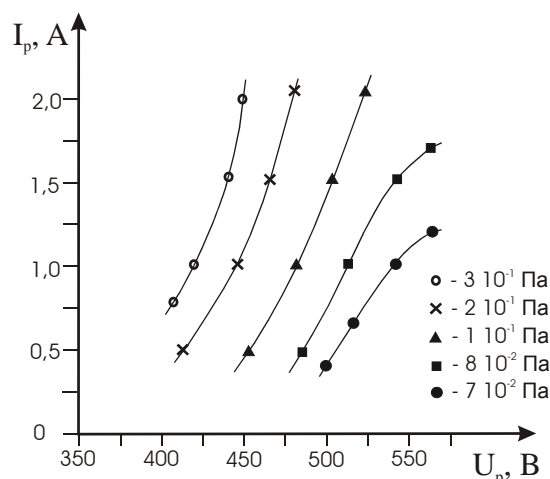


Рис. 2. Вольтамперные характеристики МРС при автономном включении в зависимости от рабочего давления

Из графиков видно, что в диапазоне разрядных напряжений ( $U_p$ ) от 400 до 560 В наблюдается устойчивая работа МРС с варьированием разрядного тока ( $I_p$ ) от 0,5 до 2,0 А. При давлении в камере  $1 \cdot 10^{-1}$  и выше ток разряда превышает 3 А, однако такие режимы ограничиваются возможностями системы охлаждения. В то же время с повышением рабочего давления возрастает и минимальный разрядный ток магнетронного разряда. При снижении давления разрядный ток магнетрона уменьшается до 1,0 А. Кроме того, с уменьшением давления до  $7 \cdot 10^{-2}$  Па значительно увеличивается пробойный потенциал инициации разряда МРС и достигает 1000 В.

На рис. 3 представлены вольтамперные зависимости МРС в конфигурации с распыляющей ступенью ионно-лучевого устройства. Ток разряда источника устанавливался в размере 150 мА. При такой конфигурации наблюдается значительное снижение пробойного потенциала магнетрона вплоть до 170–320 В в зависимости от давления в камере. Устойчивый ионно-стимулированный магнетронный разряд с приемлемыми токами (до 1,3 А) существует при давлении до  $6 \cdot 10^{-2}$  Па. Необходимо отметить также снижение разрядного напряжения в целом, что происходит вследствие внесения ионным потоком дополнительной электронной компоненты, возникающей как при распылении материала мишени, так и при увеличении степени ионизации рабочего газа и распыленных атомов в области пролета ионов.

На рис. 4 представлены вольтамперные характеристики при работе с двумя ступенями ионного источника. Ток разряда распыляющей ступени составлял 150 мА, а ассистирующей ступени — 300 мА. Можно отметить дальнейшее снижение напряжений инициации и разрядного при одинаковом токе разряда. Область насыщения вольтамперной кривой, соответствующей давлению  $6 \cdot 10^{-2}$  Па, наступает при разрядном токе более 1,5 А. Было установлено, что при

ионной стимуляции магнетронный разряд может существовать до давления  $2 \cdot 10^{-2}$  Па. Однако ток разряда в таких случаях не превышает нескольких сотен мА.

Совместное функционирование источника ионов и МРС позволяет интенсифицировать разряды и обеспечить их высокую стабильность. Особенно такой эффект проявляется в конфигурации магнетрона с внутренней ступенью источника ионов.

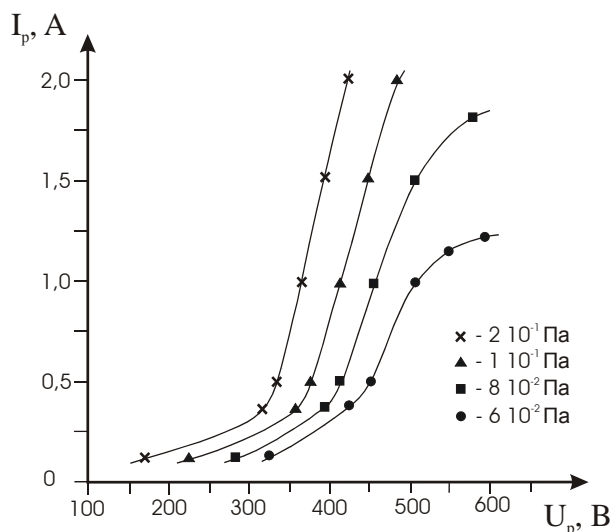


Рис. 3. Вольтамперные характеристики МРС при работе с распыляющей ступенью источника ионов в зависимости от рабочего давления

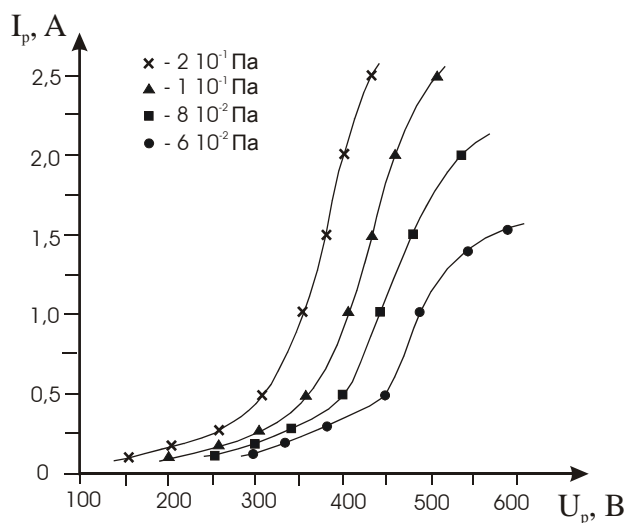


Рис. 4. Вольтамперные характеристики МРС при работе с двумя ступенями источника ионов в зависимости от рабочего давления

Установлено, что снижение рабочего напряжение наблюдается в случае, когда конфигурация магнитной ловушки у поверхности мишени-катода позволяет получить наибольшее значение горизонтального вектора магнитного интеграла в области формирования разряда. На эту величину оказывает влияние также и полярность подключения электромагнита ионного источника. Разница составляет 20–25 В, что можно объяснить изменением условий перемещения электронов вблизи выходного канала ионно-лучевого устройства.

В конфигурациях с внешней ступенью в виде торцевого холловского источника установлена возможность полной компенсации положительного пространственного заряда ионов потоком электронов от МРС. В таком режиме был достигнут разрядный ток в тестовой ступени источника ионов более 1 А, в то время как при автономном включении разряд без внешнего катода-нейтрализатора не загорался.

## Заклучение

Представленные экспериментальные зависимости максимально отражают достоинства конструктивного и функционального объединения МРС и ионно-лучевого источника. На основании этого можно выделить ряд достоинств ИИПС:

одновременное функционирование МРС и ионно-лучевого источника позволило расширить диапазон рабочих давлений МРС;

интенсифицировать процесс распыления мишени;

увеличить разрядный ток магнетрона особенно при давлениях ниже  $8 \cdot 10^{-2}$  Па;

исключить необходимость пробойного потенциала и уменьшить напряжения горения магнетронного разряда.

Работа в составе ИИПС магнетрона и источника низкоэнергетичных ионов (30–150 эВ) позволила реализовать процесс ионно-ассистированного магнетронного осаждения без применения специальных устройств для компенсации положительного объемного заряда. Более того, в перспективе открываются возможности оперативного управления потенциалом ионно-плазменного потока и, как следствие, потенциалом на поверхности конденсируемой пленки.

Испытания ИИПС показали ее высокую надежность, простоту и оперативность управления, стабильность рабочих параметров.

## RESEARCH THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF THE ION-PLASMA SYSTEM

D.A. KOTOV

### Abstract

The integrated ion-assisted magnetron deposition system was developed to improve parameter control capabilities for the thin films deposition. The advantage of the suggested deposition method is a high growth rate of the film with the specified structure and accordingly physical and chemical properties. The diagram of the ion-plasma system is presented as well as the research data for current-voltage characteristics of the magnetron sputtering system depending on the pressure in the vacuum chamber. The electromagnetic compatibility features for the ion-beam and magnetron sputtering systems were established. The capabilities for considerable decreasing of the magnetron breakdown potential and generating a discharge under low pressure with the aid in its stimulating by an ion beam are discovered. The influence of various configurations of the ion-plasma process on initialization and stability of the magnetron discharge was studied. The compensation features of a positive ion-beam space charge were emphasized.

### Литература

1. *Musil J.* // Vacuum. 1998. Vol. 50, No. 3–4. P. 363–372.
2. *Данилин Б.С., Сырчин В.К.* Устройства со скрещенными полями и перспектива их использования в технологии микроэлектроники. М., 1991.
3. *Габович М.Д.* Компенсированные ионные пучки. М., 1980.
4. *Bradley R.M., Harper J.M.E., Smith D.A.* // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60 (12). P. 4160–4164.
5. *Cong Y., Collins R.W., Messier R.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. Vol. 9, № 3. P. 1123–1128.
6. *Белянин А.Ф., Семенов А.П., Спицын Б.В.* // Тез. докл. IV Всероссийской конференции по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. Томск, 1996. С. 410–412.