

ИОННО-АССИСТИРОВАННОЕ МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

Д.А. Голосов, И.В. Свадковский, С.М. Завадский

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013, Беларусь, г. Минск, ул. Бровки, 6, тел: +375-017-2-93-80-79, e-mail: dmqolosov@mail.ru

Разработана система ионно-ассистированного магнетронного распыления, в которой несбалансированный магнетрон (UBM) используется совместно с ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя (EHIS). Электронный поток из разряда UBM использовался в качестве источника электронов для поддержания разряда ионного и компенсации пространственного заряда EHIS. При включенном ионном источнике разряд UBM возникал при давлении 0.02 Па, что невозможно было достичь без ионного источника. Установлены соотношения баланса токов разрядной системы "UBM - EHIS". Установлено, что полная компенсация ионного потока источника достигается при токе разряда UBM порядка 0.75 от тока разряда ионного источника и давлении в рабочей камере более 0.085 Па. При более низких давлениях скомпенсированность разряда достигается при более низком от рабочего тока накального компенсатора.

Метод ионно-ассистированного магнетронного распыления позволяет с одной стороны выполнять низкоэнергетическую (порядка 10 эВ) ионную бомбардировку подложки в процессе роста пленок, а с другой – дает возможность независимо управлять структурно-фазовыми и адгезионными свойствами использованием дополнительной ионной бомбардировки ионами с энергией порядка 100 эВ.

Введение

Имея ряд преимуществ перед другими методами, метод магнетронного распыления широко используется для получения покрытий различного назначения. С другой стороны методы ионно-ассистированного нанесения покрытий получают все более широкое распространение в технологии тонких пленок. Ионная бомбардировка растущей пленки во многих случаях позволяет активно управлять процессом формирования пленок и, тем самым, обеспечивать условия для получения пленок с заданными структурно-фазовыми свойствами и воспроизводимостью параметров от процесса к процессу. При этом отношение потока ионов к потоку осаждаемого материала являются одним из основных параметров, во многих случаях определяющим структуру и свойства пленок наносимых методами ионного ассистирования [1]. С данной точки зрения метод несбалансированного магнетронного распыления имеет большие перспективы для ионно-ассистированного формирования пленок, поскольку наряду с высокими скоростями осаждения обеспечивает низкоэнергетическую ионную бомбардировку растущей пленки. [2]. Причем плотность ионного тока на подложке зависит от конфигурации магнитного поля на поверхности мишени [3], и при повышении скорости нанесения отношение ионного потока к потоку осаждаемых атомов на определенном расстоянии остается постоянным [4]. Однако комбинация магнетронного распыления с бомбардировкой энергетичными ионами из независимого ионного источника (*Ion-Beam Assisted Magnetron IBAM*) является более предпочтительным методом для формирования пленок с заданными свойствами, вследствие возможности независимого управления потоками энергетичных частиц. Основной проблемой реализации данного метода нанесения тонкопленочных покрытий является различие в диапазонах рабочих давлений магнетронных распылительных систем и ионных источников. Диапазон рабочих давлений ионных источников с замкнутым дрейфом электронов (ускорители с анодным слоем или торцевые холловские ускорители) обычно составляет 0.01 - 0.06 Па. При таких давлениях инициализация разряда традиционных магнетронов весьма за-

труднительна. Увеличение интенсивности магнитного поля позволяет снизить минимальное рабочее давление только до примерно 0.06 Па. Поэтому в данной работе была применена несбалансированная магнетронная распылительная система (UBM) [5, 6], минимальное рабочее давление которой составляло 0.03 Па, что достигнуто за счет использования магнитной системы с двумя источниками поля и оптимизации конфигурации силовых линий над поверхностью мишени [7].

Целью данной работы является исследование особенностей совместной работы UBM и EHIS для процессов ионного ассистирования.

Эксперимент

Схема экспериментальной установки для исследования совместной работы UBM и EHIS приведена на рис. 1. Установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-2МП. В UBM с дополнительным соленоидом основная магнитная система на постоянных магнитах формирует сбалансированную конфигурацию магнитного поля на поверхности мишени, величина которого составляет 0.065 Тл. Дополнительный соленоид используется для изменения распределения магнитных полей в области мишень – подложка. Увеличение индукции магнитного поля внешних магнитов приводит к формированию несбалансированной конфигурации магнитного поля с протяженной зоной в области мишень – подложка, где силовые линии перпендикулярны поверхности мишени UBM. В качестве мишени UBM использовались Ti диски Ø 80 мм и толщиной 5 мм. EHIS Ø 12 см располагался под углом 90° к оси UBM. Питание анодного напряжения EHIS осуществлялось от DC блока питания (0 – 250 В, 0 – 6.0 А). Для компенсации объемного заряда и поддержания разряда ионного источника был использован вольфрамовый накальный катод компенсатор. Подложка площадью 400 см² устанавливалась под углом 30° к оси источника и 60° к оси UBM на расстоянии 12 см от поверхности мишени магнетрона. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10⁻³ Па. Рабочий газ Ag подавался в область мишени магнетрона при давлении в камере 0.01 – 0.1 Па. Расход рабочего газа, пода-

ваемого в камеру, контролировался с помощью автоматического регулятора расхода газа РРГ-1. Для питания UBM использовался источник питания мощностью 2.0 кВт с возможностью работы в режимах стабилизации тока или мощности.

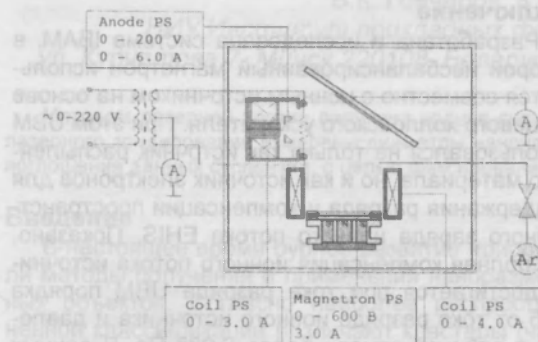


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования совместной работы UBM и EHIS

Результаты

Проведены исследования минимального давления возникновения разряда магнетрона при работе ионного источника. Для этого рабочий газ Ar подавался в область мишени магнетрона при общем давлении в камере 0.01 – 0.1 Па. Первоначально производилось включение EHIS с накаливаемым катодом компенсатором (ток соленоида $I_c = 1.0$ А, ток накального компенсатора $I_w = 16.0$ А). В зависимости от рабочего давления напряжение и ток разряда находились в пределах $U_a = 70 - 150$ В, $I_a = 1.0 - 1.5$ А. После этого производилось включение UBM. Напряжение разряда $U_i = 550 - 880$ В, ток разряда I_i до 2.0 А, коэффициент несбалансированности $K = 2.41$ [7].

Отмечено, что в режиме IBAM магнетронная распылительная система и ионный источник оказывали взаимное влияние на параметры разрядов. При включении EHIS за счет дополнительной ионизации газа происходила интенсификация разряда UBM и минимальное давление возникновения разряда UBM достигало 0.02 Па, что невозможно было достичь без ионного источника ($p_{min} = 0.03$ Па) [5, 7]. При возникновении разряда UBM происходило снижение напряжения и увеличение тока разряда EHIS. Кроме того, при возникновении разряда UBM происходила частичная или полная нейтрализация ионного пучка, генерируемого EHIS. В данном случае разряд UBM являлся источником электронов, необходимых для поддержания разряда и компенсации ионного пучка EHIS.

В UBM область распространения покинувших ловушку электронов ограничена усиленным боковым магнитным полем. Наличие вертикального магнитного поля заставляет электроны, покинувшие область разряда UBM, двигаться вдоль линий магнитного поля и одновременно двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля. При этом примерно на порядок возрастает концентрация электронов в области мишени подложка и увеличивается (примерно на порядок величины) электронная температура [8]. Таким образом, UBM

являются довольно эффективным источником электронов.

На основе полученных результатов установлено, что полная нейтрализация ионного пучка EHIS достигается только при давлении в рабочей камере более 0.085 Па. При этом ток разряда UBM должен быть не менее 0.75 от тока разряда ионного источника. При постоянном токе разряда EHIS ($I_a = \text{const}$) снижение тока UBM данного уровня первоначально приводило к неполной скомпенсированности разряда EHIS, а затем к его пропаданию. На рис. 2 представлена зависимость максимального тока разряда EHIS, при котором обеспечивается условие полной нейтрализации ионного пучка ионного источника, от тока разряда UBM. Данные получены при давлении в камере $p = 0.1$ Па, $K = 2.41$. Накальный катод-компенсатор не включался. На рис. 3. представлены вольт-амперные характеристики EHIS при работе без накального компенсатора при различном токе разряда UBM ($p = 0.1$ Па, $K = 2.41$).

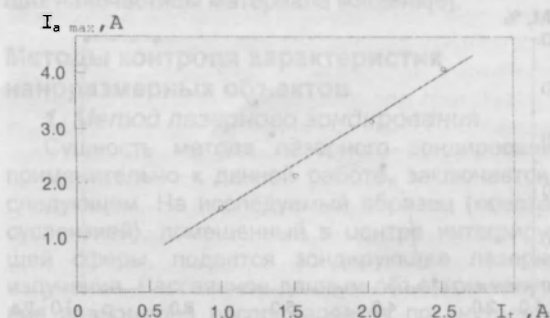


Рис. 2. Зависимость максимального тока разряда EHIS от тока разряда UBM

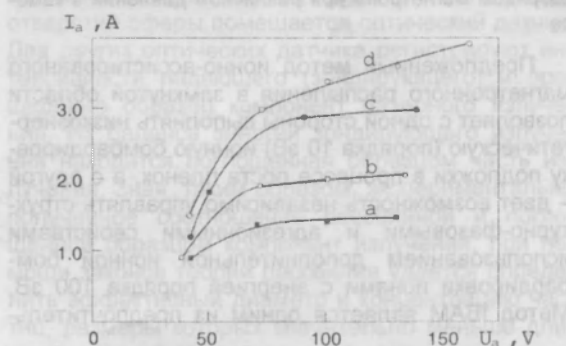


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика EHIS при работе без накального компенсатора при различном токе разряда UBM: (a) $I_i = 1.0$ А; (b) $I_i = 1.5$ А; (c) $I_i = 2.0$ А; (d) $I_i = 2.5$ А

При более низких давлениях ($p < 0.085$ Па) полная нейтрализация разряда ионного источника не достигалась при любых режимах работы UBM. Однако на данных режимах полной компенсации ионного пучка можно было добиться при более низком токе от рабочего накального компенсатора, т.е. разряд UBM частично нейтрализовал ионный пучок EHIS.

Для оценки степени компенсации разряда EHIS разрядом UBM одновременно с разрядными характеристиками системы измерялся ток эмиссии электронов накального компенсатора. Для этого цепь питания накала компенсатора (см. рис. 1) была оторвана от земли, и измерялся ток во

внешней цепи. При этом коэффициент компенсации разряда EHIS разрядом UBM оценивался по формуле

$$M(\%) = \frac{I_a - I_w^e}{I_a} \times 100$$

где I_a – ток разряда ионного источника, I_w^e – ток электронной эмиссии накаливаемого катода компенсатора. Данная формула базируется на результатах ранее проведенных исследований, когда было установлено, что ток электронной эмиссии любого типа компенсатора при работе EHIS в режиме полной компенсации ионного пучка равен току разряда источника [9]. На рис. 4 представлена зависимость степени компенсации разряда EHIS разрядом магнетрона при различном давлении в камере. В диапазоне давлений 0,03-0,085 Па наблюдалось снижение необходимого накала компенсатора и как следствие, увеличение его срока службы, особенно при использовании активных газов (O_2 , N_2 и т. д.) [10].

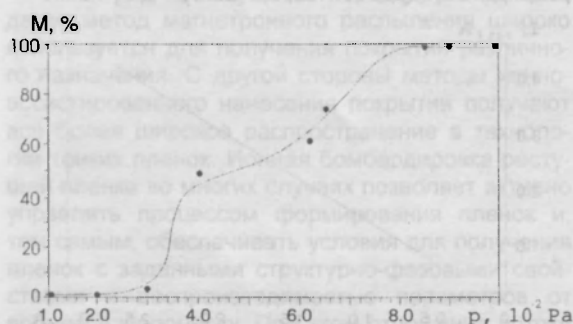


Рис. 4. Зависимость степени компенсации разряда EHIS разрядом магнетрона при различном давлении в камере

Предложенный метод ионно-ассистированного магнетронного распыления в замкнутой области позволяет с одной стороны выполнять низкоэнергетическую (порядка 10 эВ) ионную бомбардировку подложки в процессе роста пленок, а с другой – дает возможность независимо управлять структурно-фазовыми и адгезионными свойствами использованием дополнительной ионной бомбардировки ионами с энергией порядка 100 эВ. Метод IBAM является одним из предпочтитель-

ных методов нанесения многослойных и твердых покрытий. Реализация безнакального режима работы EHIS существенно расширяет возможности использования данной системы.

Заключение

Разработана и исследована система IBAM, в которой несбалансированный магнетрон используется совместно с ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя. При этом UBM использовался не только как источник распыленного материала, но и как источник электронов для поддержания разряда и компенсации пространственного заряда ионного потока EHIS. Показано, что полная компенсация ионного потока источника достигается при токе разряда UBM порядка 0.75 от тока разряда ионного источника и давлении в рабочей камере более 0.085 Па. В данных режимах торцевой холловский ускоритель может функционировать в безнакальном режиме работы, что существенно расширяет возможности использования метода CFIBAM для процессов ионно-ассистированного нанесения.

Список литературы

1. Kelly P.J., Amell R.D. // Vacuum.- 2000.- № 56, 159.
2. Kelly P.J., Amell R.D. // Surf. Coat. Technol.- 1999.- № 112, P. 170.
3. Голосов Д.А., Сवादковский И.В., Завадский С.М. // Электронная обработка материалов.- 2002.- № 6, С. 66.
4. Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. // III International Conference Plasma physics and plasma technology.- 2000.- Minsk, Belarus, № 2, P. 716.
5. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. // NEET' 2001 II international symposium.- 2001.- Kazimierz Dolny, Poland, P. 217.
6. Golosov D.A., Svadkovski I.V., Zavadski S.M. // 6th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flow.- 2002.- Tomsk, Russia, P. 148.
7. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. // Vacuum.- 2002.- № 68, P. 283.
8. Vlček J., Špatenka P., Musil J., Forejt L. // Surf. Coat. Technol.- 1998.- № 98, P. 1557.
9. Kauffman H.R., Robinson R.S. // Patent US 4.862.032.- 1989.
10. Маишев Ю.П. // Микроэлектроника.- 1977.- № 3, С. 31.

ION-ASSISTED MAGNETRON SPUTTERING

Dmitriy Golosov, Igor Svadkovskiy, Sergey Zavadskiy

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6, P. Brovka, Minsk, 220013, Belarus,
phone: +375-017-2-39-80-79, e-mail: dmqolosov@mail.ru

We have designed a ion- beam assisted magnetron sputtering system, in which unbalanced magnetron sputtering system is used with an independent end-Hall ion source. In case of joint operation the electron flux from UBM discharge was used as an electron source for space charge and current neutralization of EHIS beam. The dependence between the coefficient of EHIS discharge compensation and UBM discharge was investigated. The balance of electron currents of discharge system "UBM – EHIS" has been estimated. It was determined that the full compensation of ion source beam achieved at UBM current about 0.75 from EHIS discharge current and pressure into the chamber more than 0.085 Pa. At lower pressure discharge compensation was achieved only with the filament compensator EHIS operating. The CFIBAM method makes it possible on one hand to carry out the low-energy (in the region of 10 eV) ion bombardment of the film during growth, and, on the other hand to ensure independent control of the phase and adhesion properties by using additional ion bombardment with ion energy in the region of 100 eV from EHIS. The CFIBAM is a versatile method for the production of multilayer and hard coatings.