

Инициирование разряда низкого давления в магнетроне при облучении катода магнетрона ионным пучком

А.П.Семёнов, И.А.Семенова

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН
670047 Россия, Улан-Удэ
e-mail: semenov@pres.bscnet.ru

Рассмотрено влияние ионного пучка, инжектируемого вдоль оси анодного электрода планарного магнетрона, на зажигание аномального тлеющего разряда низкого давления в магнетроне. Определены характеристики зажигания разряда при давлениях $< 8 \cdot 10^{-2}$ Па и свойства планарного магнетрона при облучении катода магнетрона пучком ионов аргона. Установлено, что напряжение зажигания разряда падает с повышением энергии ионов и пороговым образом зависит от тока ионного пучка. Показана перспектива расширения функциональных возможностей планарных магнетронов за счет согласования режимов распыления анода магнетрона ионным пучком и катода магнетрона плазменными ионами аномального тлеющего разряда.

Введение

Аномальный тлеющий разряд находит применение в магнетронных распылительных системах планарного типа, широко используемых для выращивания тонких пленок [1, 2]. Для этого разряда характерны, во-первых, постоянная площадь на катоде, в которую втекает ток (для увеличения катодного тока приходится повышать напряжение, что неминуемо сопровождается увеличением плотности тока на катоде [3]), и, во-вторых, возрастание тока разряда с повышением напряжения горения [4]. Разряд зажигается в скрещенных электрическом и магнитном полях, причем магнитное поле удерживает плазму разряда вблизи катода-мишени, что способствует повышению плотности плазмы и, как следствие, росту ионного тока на катод. Обычно разряд устойчиво зажигается и стационарно горит в диапазоне давлений рабочего газа 0.2–6 Па [4]. Однако при этих давлениях не выполняется необходимое для приготовления совершенных пленок методом катодного распыления соотношение $l \ll \lambda$, где l – расстояние катод–подложка, λ – длина свободного пробега атомов, покидающих катод в результате распыления катода

плазменными ионами, ускоренными в катодном слое.

Длину свободного пробега распыленных атомов в газе при давлении P можно рассчитать из соотношения

$$\lambda = \frac{4kT}{\pi P(\sigma_1 + \sigma_2)^2 \left(1 + \frac{M_1}{M_2}\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; P – давление газа; σ_1 , σ_2 и M_1 , M_2 – соответственно диаметр ($\sigma = 2r$, где r – газокинетический радиус) и масса атомов, покидающих катод, и атомов газа. При $P = 0.2$ –6 Па, $\sigma_1 = 2.56 \cdot 10^{-10}$ м (медный катод), $\sigma_2 = 3.84 \cdot 10^{-10}$ м (аргон), $M_1/M_2 = 1.6$ в приближении $T = 3 \cdot 10^2$ К следует, что свободный пробег атомов $\lambda = 1.3 \cdot 10^3$ – $4 \cdot 10^2$ м. В этих условиях расстояние катод–подложка l должно быть менее ~10 мм, что вряд ли допустимо, учитывая неконтролируемое влияние плазмы разряда на наращиваемую пленку и невозможность достижения ее однородной толщины. Кроме того, столкновительный перенос распыленных атомов затрудняет выращивание пленок с совершенной структурой и достижение требуемой

точности воспроизведения ростовых режимов.

Условие $l < \lambda$ легко выполняется при давлениях < 0.2 Па, для которых λ сравнительно велика, $\lambda > 10$ см. Однако при низких давлениях напряжение зажигания сильно зависит от давления [4], и разряд зажигается при относительно высоких напряжениях, > 10 кВ. Поэтому при низких давлениях часто возникает ситуация, когда напряжение зажигания разряда превышает напряжение источника питания и длина свободного пробега электронов λ_e оказывается много больше расстояния d между катодом и анодом магнетрона.

Известно, что для снижения напряжения зажигания разряда можно инжектировать в область заряда электроны, что способствует ионизации газа и частичному распылению материала электродов [5]. Инжектировать в газ низкого давления электроны можно с потоком проникающей газоразрядной плазмы [6]. Однако размещение на периферии магнетрона электродов вспомогательного разряда высокого давления затруднено конструктивно.

Альтернативой проникающей плазме может служить пучок ионов от дополнительного источника, инжектируемый вдоль оси анодного электрода магнетрона, причем роль ионного пучка может быть весьма существенной. Применение ионного пучка предполагает развитие процессов ионно-электронной эмиссии и сопутствующих электронной эмиссии процессов ионного физического распыления катода магнетрона. В этих условиях достигается совмещение процессов магнетронного распыления [1, 2, 4] и распыления ионным пучком [7]. При этом, наряду с распылением катода, становится возможным распыление ионным пучком анода магнетрона, обуславливающее новые, не свойственные обычным конструкциям планарных магнетронов

функциональные возможности. Возможность управления параметрами ионного пучка и мощностью магнетронного разряда упрощает регулирование долевого соотношения распыляемых компонентов по толщине наращиваемой пленки. Такой подход впервые был рассмотрен в [8] и получил развитие в работе [9].

Ниже представлены результаты исследования влияния продольной инжекции быстрых ионов в магнетрон на характеристики зажигания аномального тлеющего разряда низкого давления, < 0.10 Па, в условиях бомбардировки катода магнетрона ионным пучком.

Методика эксперимента

Конструкция экспериментального газоразрядного устройства схематически показана на рис. 1.

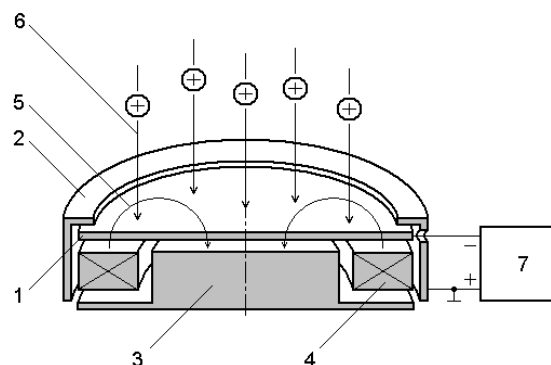


Рис.1. Схема газоразрядного устройства: 1 – катод; 2 – анод; 3 – полусферический наконечник; 4 – постоянный кольцевой магнит; 5 – силовые линии магнитного поля; 6 – пучок ускоренных ионов; 7 – высоковольтный выпрямитель

Аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях зажигается между медным катодом 1 диаметром 90 мм и кольцевым анодом 2 с апертурой диаметром 45 мм. Анод выполнен из нержавеющей стали. Расстояние между катодом и анодом 5 мм. Полусферические наконечники 3, скрепленные с торцами постоянного кольцевого магнита 4,

создают на периферии катода 1 замкнутое магнитное поле 5, проникающее в апертуру анода. Индукция магнитного поля в апертуре анода составляет $0.03 \cdot \text{Тл}$. На периферии магнетрона, вдоль оси анода 2 на расстоянии 100 мм, устанавливается разрядная камера плазменного источника ионов [10]. Пучок ионов 6 продольно ускоряется из катодной плазмы разрядной камеры ионного источника электрическим полем, проникает в апертуру анода 2 и падает на катод 1. Диаметр ионного пучка на катоде 1 магнетрона составляет 30 мм. Плазмообразующий газ аргон раздельно натекает в магнетрон через отверстие на боковой стенке анода 2 и в разрядную камеру ионного источника. Высокоточный выпрямитель 7 с выходным напряжением 0–3 кВ подключен к электродам по схеме, показанной рис. 1.

Результаты и их обсуждение

В первых экспериментах изучали результаты воздействия тех внешних факторов, которые могли бы вызвать зажигание разряда в магнетроне.

Так, при давлении аргона $< 0.2 \text{ Па}$ и подаче на электроды магнетрона электрического напряжения от выпрямителя 7 разряд не зажигался, хотя напряжение повышали до предельной величины 3 кВ. При постоянном напряжении на электродах магнетрона 3 кВ повышение ускоряющего напряжения U_i до 10 кВ также не приводило к зажиганию разряда в разрядной камере ионного источника. Таким образом, приложение этих двух электрических напряжений не приводило к пробое наполненного газом пространства между электродами магнетрона. При проверке возможности зажигания разряда эмитирующей плазмой разряда, стационарно горящего на периферии магнетрона в разрядной камере ионного источника, оказалось, что при $U_i=0$ ни горение разряда в камере ионного источника, ни

изменение в широком диапазоне, до 2 А, тока разряда не влияло на зажигание разряда в магнетроне. Вероятной причиной этого было малое поперечное сечение эмиссионного канала [10]. И только обеспечив направленную эмиссию ионов при приложении высокого напряжения удалось зажечь разряд низкого давления в магнетроне.

Рассмотрим условия зажигания разряда низкого давления в магнетроне при инжекции ионного пучка в магнетрон.

При слабом возрастании тока ионного пучка (рис. 2, кривая 1) с

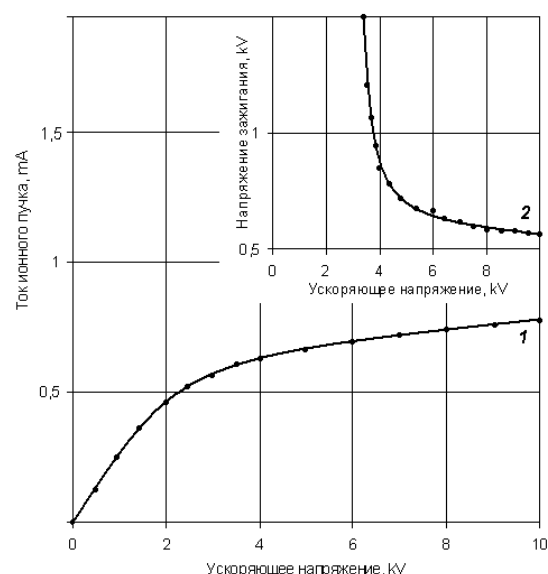


Рис. 2. Зависимости тока ионного пучка (1) и напряжения зажигания (2) от ускоряющего напряжения (энергии ионов). Ток разряда в ионном источнике 50 мА, давление аргона $8 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$

ростом ускоряющего напряжения U_i (энергии ионов E_i) напряжение зажигания (кривая 2 на рис. 2) падает с повышением энергии падающих на катод магнетрона ионов. Поскольку для однозарядных ионов $E_i = eU_i$, где e — заряд электрона, на рис. 2 приведена зависимость напряжения зажигания от ускоряющего напряжения U_i . Особенностью этой зависимости является резкое падение, от 1.5 до 0.67 кВ, напряжения зажигания в области ускоряющих напряжений 3.5–6 кВ в

условиях эксперимента (давление аргона 0.08 Па, ток разряда 50 мА, ток пучка ионов $0.5 \leq I_i \leq 0.7$ мА). Тенденция к насыщению наблюдается при $U_i > 6$ кВ и $I_i > 0.6$ мА. При ускоряющем напряжении $U_i < 3.5$ кВ разряд при бомбардировке ионами катода не зажигался во всем диапазоне напряжений до 1.5 кВ, подаваемых на электроды магнетрона, при этом ток пучка ионов $I_i < 0.5$ мА (кривая 1 на рис. 2).

Зависимость тока ионного пучка от тока разряда (напряжение ускорения 8 кВ) представлена на рис. 3 (кривая 1).

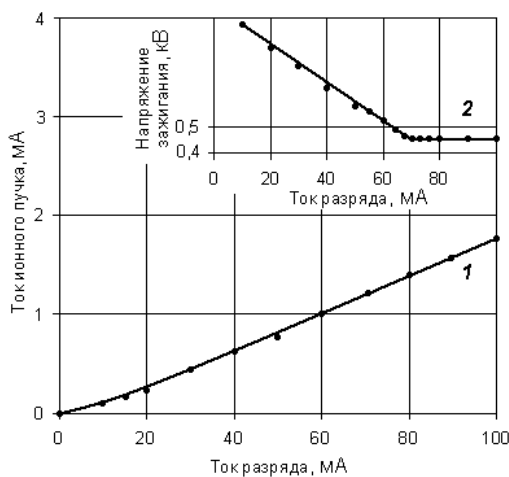


Рис. 3. Зависимости тока ионного пучка (1) и напряжения зажигания (2) от тока разряда (тока ионного пучка). Ускоряющее ионы напряжение 8 кВ, давление аргона $p = 8 \cdot 10^{-2}$ Па

Несмотря на то что при постоянной энергии ионов ток пучка монотонно увеличивается с ростом тока разряда (кривая 1 на рис. 3), наблюдается немонотонное изменение напряжения зажигания (кривая 2 на рис. 3) с увеличением тока ионного пучка. Поскольку ток ионного пучка однозначно зависит от тока разряда, а прямые измерения тока ионного пучка в процессе инициирования разряда в магнетроне затруднены, зависимость 2 представлена в координатах "напряжение зажигания – ток разряда". Видны два характерных участка: вначале быстрое падение напряжения зажигания (с повышением тока ионного пучка от 0.15 до 1.2 мА напряжение

зажигания уменьшается от 0.9 до 0.42 кВ) с последующей его стабилизацией (с повышением тока разряда от 1.2 до 1.75 мА). Пороговый характер зависимости напряжения зажигания от тока ионного пучка (тока разряда) (кривая 2 на рис. 3) свидетельствует о существовании нижнего предельного значения напряжения зажигания, в нашем случае ~ 0.42 кВ, меньше которого разряд не зажигается. Предельное напряжение зажигания в области малых токов разряда, $I_i < 0.15$ мА, ограничивалось значением 0.9 кВ. Это обусловлено тем, что устойчивый разряд с полым катодом [9] при малых токах затруднен. Разряд гасился в разрядной камере ионного источника после зажигания разряда в магнетроне. Причем даже при не «выключенном» высоком ускоряющем ионы напряжении 10 кВ поле катодного электрода ионного источника не влияло на режимы горения магнетронного разряда.

Таким образом, бомбардировка ускоренными ионами катода магнетрона влияет на пробой разрядного промежутка магнетрона. Пробойное напряжение, при котором зажигается аномальный тлеющий разряд, сильно зависит от энергии и тока ионного пучка. Чем больше скорость ионов и ионный ток, тем ниже напряжение зажигания. Очевидно, что в результате взаимодействия с газом и катодом магнетрона ионы пучка могут затрачивать свою энергию на ионизацию газа. Кроме того, в ионизации могут участвовать вторичные электроны и распыленные атомы, выбитые с катода магнетрона ионным пучком. Инициирование процесса электрического пробоя начинается с появления затравочных γ -электронов [3] в результате ионно-электронной эмиссии. Вероятен также процесс пеннинговской ионизации. Так, при распылении медного катода ускоренными ионами атомы меди (потенциал ионизации меди $U_i^{Cu} = 7.724$

В [11]), соударяясь с атомами аргона, возбужденными ионным пучком на метастабильный уровень $4s^3P_1$ (потенциал возбуждения аргона $U_a^{Ar}=11,5$ В [12]), могут быть ионизованы, поскольку выполняется условие $U_i^{Cu} < U_a^{Ar}$. Поэтому потенциал зажигания разряда будет определяться не ионизацией атомов аргона (потенциал ионизации аргона $U_i^{Ar}=15.759$ В), а возбуждением их на метастабильный уровень. При этом предполагается, что метастабильные атомы аргона в подавляющем большинстве «разряжаются», сталкиваясь с атомами меди.

Проанализируем, в какой мере и какие электроны в рассмотренных условиях могут вносить основной вклад в электрический пробой разрядного промежутка. Число электронов N_e , испускаемых медным катодом, определяется соотношением: $N_e \sim \gamma I_i / e$, где γ – коэффициент ионно-электронной эмиссии; I_i – ток ионного пучка; e – заряд электрона. В области энергий 3.5–10 кэВ при $\gamma \sim 0.35–0.58$ [13] $N_e \sim 10^{15}$. При соударении быстрых ионов пучка с атомами газа может иметь место ударная ионизация. Доля ионов N/N_i , которые пройдут путь $L=10$ см от ионного источника до катода магнетрона в газе, не испытав при этом ни одного столкновения, определяется выражением

$$\frac{N}{N_i} \sim e^{-L/\lambda_i}, \quad (2)$$

где λ_i – длина свободного пробега ионов.

Хотя в рассматриваемых условиях доля ионов, не претерпевших столкновений, мала, $N/N_i < 10^{-2}$, из всех (N_i-N) столкновений к ионизации приведет только часть из них: $(N_i-N)\omega_i$, где ω_i – вероятность ионизации. Расчет показывает, что при скоростях ионов $> 10^5$ м/с вероятность ω_i низка и сечение возбуждения атомов аргона мало. По-

видимому, доминирующим фактором, порождающим первичные электроны, является кинетическая ионно-электронная эмиссия, возбуждаемая с катода магнетрона ускоренными ионами. При этом появление затравочных электронов является необходимым, но недостаточным условием пробоя в вакууме: $\lambda_e \gg d$. В вакууме, где выполняется соотношение $pd < 10^{-3}$ Па·м, электроны пролетают короткий пробивной промежуток магнетрона без столкновений и не способны «спровоцировать» [12] возникновение электронной лавины. Поэтому особенностью электрического пробоя в вакууме является то, что пробой может развиваться только благодаря выделению электродами паров металлов в пробивной промежутке [14] в присутствии потока электронов. Очевидно, что по мере распыления ионным пучком медного катода пробивной промежуток заполняется парами меди. Это происходит более интенсивно с увеличением энергии и тока распыляющих ионов [15], что способствует газовому усилению. Давление паров меди растет с увеличением тока ионов и их энергии, что обуславливает низкие напряжения зажигания разряда для больших токов разряда и высоких ускоряющих ионы напряжений (см. рис. 2, кривая 2, и рис. 3 кривая 2).

На основе принципа инжекции ионного пучка в планарный магнетрон разработано устройство, сочетающее распыление ионным пучком [7] и магнетронное распыление [8]. В этом устройстве использован магнетрон с центральным анодом, причем центральный анод является дополнительной мишенью, распыляемой инжектируемыми ионами. Устройство (рис. 4 и 5) содержит катод 1 и анодные электроды 2 и 3, установленные соответственно по периметру и на оси устройства. Центральный анод 3

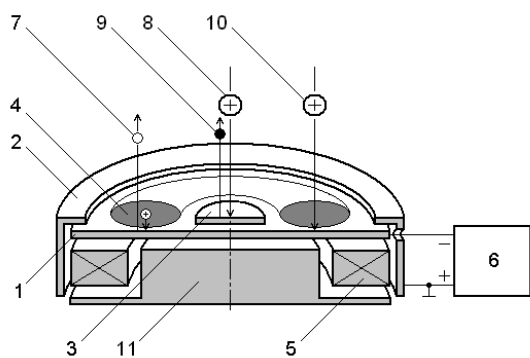


Рис. 4. Планарный магнетрон с инжекцией ионного пучка. 1 – катод (мишень); 2 – анод; 3 – анод (мишень); 4 – плазма аномального тлеющего разряда; 5 – кольцевой магнит; 6 – высоковольтный выпрямитель; 7 – частицы, образующие пленку; 8, 10 – инжектируемые ионы; 9 – частицы, добавляемые в наращиваемую магнетронным распылением пленку; 11 – полюсный наконечник

выполняет также функцию мишени. Плазма 4 аномального тлеющего разряда удерживается вблизи катода 1 магнитным полем кольцевого магнита 5. Разряд инициируется подачей напряжения от высоковольтного выпрямителя 6 и с помощью пучков ускоренных ионов 8, 10. Из распыляемых с катода частиц 7



Рис. 5. Общий вид планарного магнетрона

наращивается тонкая пленка. Часть инжектируемых ионов 8 падает на анод 3 и выбивает добавочные частицы 9, которые в требуемом долевом соотношении наполняют пленку в

процессе наращивания ее магнетронным распылением до требуемой толщины. Другая часть потока ионов 10 выполняет функцию, связанную с инициированием (зажиганием) аномального тлеющего разряда низкого давления. Общий вид устройства представлен на рис. 6.



Рис. 5. Общий вид устройства. 1 – плазменный источник ионов, 2 – планарный магнетрон.

Испытание планарного магнетрона с ионным источником показало высокую надежность разработанного устройства и стабильность параметров роста пленок. Наряду с расширенными возможностями инициирования аномального тлеющего разряда низкого давления, новая конструкция позволяет упростить управление элементарным и химическим составом наращиваемых пленок. Тонкое регулирование долевого соотношения примеси, вносимой распылением дополнительной мишени (центрального анода) ионным пучком, позволяет направленно воздействовать на внутреннее строение и фазовый состав пленок.

Примером конкретного применения рассмотренного устройства могут служить выращенные тонкие пьезоэлектрические пленки ZnO и AlN с параметрами: размер областей когерентного рассеяния 40–60 нм,

степень кристалличности 0.6, угол наклона оси $\langle 000n \rangle$ текстуры $0.2^\circ - 1^\circ$, разориентация зерен $1^\circ - 2^\circ$, рабочая частота 504.8 МГц, коэффициент электромеханической связи 0.1–0.12, скорость поверхностной акустической волны $(5.68 - 5.996) \cdot 10^3$ м/с. Были приготовлены также тонкие сверхпроводящие пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (критическая температура $T_o = 72 - 83$ К, ширина переходной области $\Delta T = 5$ К, критическая плотность тока $j_o = 1,5 \cdot 10^5$ А/см²), диэлектрические пленки Si_3N_4 и акустооптические пленки $PbMoO_4$.

Заключение

Экспериментально показана возможность снижения давления зажигания аномального тлеющего разряда низкого давления воздействием на катод планарного магнетрона ускоренными ионами, движущимися вдоль оси анодного электрода. Доминирующими процессами зажигания аномального тлеющего разряда низкого давления, $p < 8 \cdot 10^{-2}$ Па, в магнетроне являются ионно-электронная эмиссия и распыление катода магнетрона ионным пучком. Продольная инжекция ионного пучка в магнетрон сочетающая достоинства нового принципа построения газоразрядной техники выращивания тонких пленок в вакууме путем распыления мишеней плазменными ионами аномального тлеющего разряда и ионным пучком, существенно расширила функциональные возможности магнетрона и позволила

принципиально улучшить его технические характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке СО РАН проект № 2.7.2.2 и Фонда содействия отечественной науке.

Список литературы

- [1]. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982.
- [2]. Белянин А.Ф., Пашенко П.В., Семенов А.П. // ПТЭ. 1991. № 3. С. 220.
- [3]. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [4]. Семенов А.П., Батуев Б-Ш.Ч. // ПТЭ. 1991. № 5. С. 192.
- [5]. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
- [6]. Lee K. J., Musset A. // Patent 4,716,340 USA. Pre-ionization aided sputter gun. Dec. 29. 1987. 315/111.41 (H 01 j 7/24).
- [7]. Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 1999.
- [8]. Семенов А.П., Батуев Б-Ш.Ч. // А.с. 1832134 С 23 С 14/35 РФ// БИ. 1993. № 29. С. 26.
- [9]. Белянин А.Ф., Семенов А.П., Спицын Б.В. // ПТЭ. 1995. № 4. С. 185.
- [10]. Семенов А.П. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 2. С.131.
- [11]. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. М.: Мир, 1989.
- [12]. Левитский С.М. Сборник задач и расчетов по физической электронике. Киев: Изд-во КГУ, 1964.
- [13]. Брусиловский Б.А. Кинетическая ионно-электронная эмиссия. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [14]. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
- [15]. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Под редакцией Р. Бериша. М.: Мир, 1984.