

04

## Магнетрон с внешним магнитом для увеличения содержания ионов в потоке осаждаемых атомов

© В.Н. Пашенцев,<sup>1,2</sup> Е.В. Пашенцева<sup>3</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
115409 Москва, Россия<sup>2</sup>МИРЭА — Российский технологический университет,  
119454 Москва, Россия<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия

e-mail: pashentsev2001@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2024 г.

Принято к публикации 27 ноября 2024 г.

Исследован магнетрон с расположенным перед ним кольцевым магнитом NdFeB, изменяющим конфигурацию суммарного магнитного поля. Показано, что в результате образуется магнитная ловушка, в которой электроны удерживаются в области разряда, вследствие чего эффективность ионизации распыленных атомов возрастает, что, в свою очередь, приводит к увеличению ионного тока на порядок. Изучена зависимость формы плазменной границы и распределения плотности ионного тока в поперечном сечении от аксиального смещения внешнего магнита относительно магнетрона. На расстоянии 60–90 мм от магнетрона получена плотность ионного тока в диапазоне 0.1–0.55 mA/cm<sup>2</sup> при напряжении разряда 320–350 В и токе 150–300 мА. Установлено, что устойчивый разряд горит в среде аргона, кислорода и смеси аргона с азотом при давлении 0.3–0.5 Па.

**Ключевые слова:** магнетрон, магнитное поле, покрытия, магнетронное распыление, плотность тока.

DOI: 10.61011/JTF.2025.04.60004.302-24

### Введение

Магнетронное распыление используется в промышленных технологиях осаждения покрытий для получения тонких пленок с высокой твердостью, термостойкостью, износостойкостью, улучшенными антифрикционными свойствами. В микроэлектронике применяются технологические процессы металлизации на поверхности полупроводниковых пластин при производстве электронных приборов. Структура пленки, нанесенной на подложку, значительно зависит от температуры подложки и энергии осаждаемых атомов и ионов [1,2]. Эти параметры влияют на подвижность осаждаемых атомов в процессе роста пленки. При низкой температуре подложки может формироваться столбчатая и пористая структура покрытия. При высокой температуре растущей пленки совместно с интенсивной ионной бомбардировкой поверхности подвижность осаждаемых атомов увеличивается, что приводит к улучшению адгезии и росту более плотного покрытия.

Энерговклад осаждаемых ионов, которые движутся к подложке в потоке распыленных атомов, можно увеличить при отрицательном электрическом смещении подложки. Осаждение пленок с высокой однородностью по толщине на большой площади подложки получают при относительно большом удалении подложки от магнетрона. Однако количество ионов в потоке осаждаемых атомов будет незначительным, так как на ионизацию

атомов в промежутке между магнетроном и подложкой оказывает влияние незначительное количество электронов магнетронного разряда, сосредоточенного непосредственно перед мишенью магнетрона. Однако движением плазменных электронов можно управлять, изменяя конфигурацию силовых линий магнитного поля путем выбора конструкции и размеров магнитов разбалансированных магнетронов, или используя электромагнитную катушку [3–5].

Магнитное поле магнетрона быстро уменьшается при увеличении расстояния от мишени (катода), поэтому оно будет слабо влиять на движение плазменных электронов в области подложки и соответственно на процесс ионизации атомов. Для увеличения магнитного поля предлагается установить дополнительный кольцевой магнит между магнетроном и подложкой. Тогда более сильное внешнее магнитное поле будет значительно влиять на движение плазменных электронов между магнетроном и подложкой, так как магнитный поток внешнего магнита будет пересекать как подложку, так и плазменную область магнетрона, аналогично магнитному потоку несбалансированного магнетрона [1]. Соответственно, плазменные электроны, вращаясь вокруг силовых линий магнитного поля, будут достигать подложки, ионизируя на своем пути распыленные атомы металла и аргона. В результате более эффективной электронной ионизации увеличится концентрация ионов в осаждаемом потоке атомов. Целью настоящей работы является экс-

периментальное исследование влияния магнитного поля дополнительного кольцевого магнита, расположенного между магнетроном и подложкой, на плотность ионного тока и на его пространственное распределение.

## 1. Методика эксперимента

Схема магнетрона с внешним магнитом показана на рис. 1, *a*. Медный катод *1* диаметром 40 мм и толщиной 2 мм охлаждается водой.

В центре магнетрона установлен NdFeB магнит 2 диаметром 15 мм и толщиной 15 мм. Арочная конфигурация магнитного поля магнетрона формируется с помощью центрального цилиндрического магнита и магнитопровода в виде внешнего стального кольца. Анод магнетрона с отверстием диаметром 34 мм для выхода распыленных атомов имеет толщину 4 мм. Зазор между анодом и катодом составляет 2 мм. На анод магнетрона установлен цилиндрический анод 3 диаметром

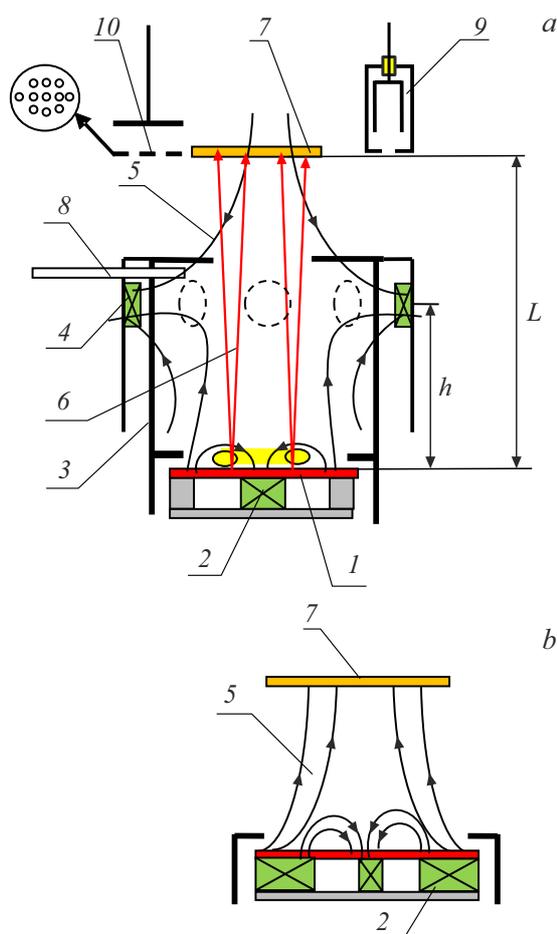
64 мм, изготовленный из нержавеющей стали. Внешний кольцевой магнит 4, расположенный над магнетроном, выполнен в виде 12 магнитов NdFeB диаметром 15 мм и толщиной 5 мм, которые равномерно расположены по периметру внешнего анодного цилиндра 4.

Чтобы не было перегрева магнитов, между ними и цилиндрическим анодом имеется вакуумный зазор. При низком рабочем давлении около 0.5–1 Па теплопроводность разряженного газа в промежутке между анодом и магнитами является незначительной, поэтому для обеспечения длительной (около 1 h) работы магнетрона между магнитами и цилиндрическим анодом по периметру была установлена теплоизолирующая фторопластовая полоска толщиной 2 мм и шириной около 20 мм, чтобы надежно защитить магниты от перегрева. Размагничивание магнитов в экспериментах не наблюдалось.

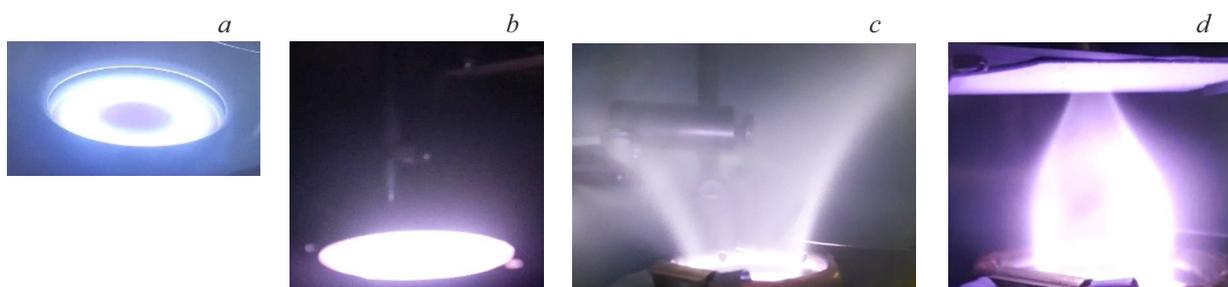
Одноименные полюса всех магнитов направлены внутрь распылительной системы. Они совпадают с полюсом центрального цилиндрического магнита магнетрона. В результате магнитные силовые линии внешнего магнита и магнетрона 5 создают магнитную ловушку пробочной конфигурации, в которой магнитное поле в центральной части анода слабее, чем на периферии. Поэтому магнитное поле ограничивает уход электронов из плазмы поперек силовых линий магнитного поля на стенки анода, обеспечивая более интенсивную ионизацию атомов в центре магнитной ловушки. Расстояние *h* между катодом и внешним кольцевым магнитом значительно влияет на величину ионного тока. Распыленные атомы *b* осаждаются на подложку 7.

В качестве рабочих газов использовались аргон, кислород и смесь аргона с азотом (40%/60%). Для получения металлических покрытий Cu и Al применялся аргон. Смесь аргона с азотом использовалась для получения пленок нитридов металлов [6–8]. Напуск рабочих газов происходил вблизи подложки, чтобы повысить концентрацию кислорода и азота для более эффективного образования нитридов и оксидов металлов на поверхности растущей пленки. Ввод газа 8 внутрь цилиндрического анода происходил через отверстие, расположенное над кольцевым магнитом. Для равномерного напуска газа в область разряда также использовался газовый душ в виде кольцевой трубки с шестью отверстиями диаметром 2 мм, расположенных по ее периметру.

Для измерения плотности ионного тока на расстоянии *L* от катода располагался зонд 9 диаметром 14 мм в виде цилиндра Фарадея с отрицательным смещением –50 В, при котором регистрировался ионный ток насыщения. Диаметр входного отверстия зонда составлял 4 мм. Внутренний цилиндрический коллектор тока имел внутренний диаметр 10 мм и длину 50 мм. Толщина осаждаемого покрытия и соответственно скорость осаждения измерялись с помощью профилометра Alpha-Step 200 по значению высоты ступеньки пленки на тонкой стеклянной или кремниевой пластине, когда ее часть была закрыта экраном из того же материала. Угловая расходимость потока атомов, осаждаемых на



**Рис. 1.** Схемы магнетронов: *a* — с внешним кольцевым магнитом над магнетроном, *b* — магнетрон с несбалансированными магнитами: 1 — катод, 2 — магнитная система магнетрона, 3 — цилиндрический анод, 4 — кольцевой внешний магнит, 5 — силовые линии магнитного поля, 6 — траектории распыленных атомов, 7 — подложка, 8 — газовая трубка, 9 — ионный зонд, 10 — коллиматор.



**Рис. 2.** Виды плазменного разряда: *a* — вид плазменного кольца в отверстии анода магнетрона без цилиндрического анода и внешнего магнита, *b* — фотография того же плазменного кольца высокой яркости в отверстии анода и темной области над ним, *c* — свечение плазмы над цилиндрическим анодом с внешним магнитом, *d* — свечение плазмы между цилиндрическим анодом с внешним магнитом и подложкой после установки на ней дополнительного постоянного магнита.

подложку, измерялась по размеру отпечатка атомов меди, прошедших через коллиматор в виде сетки отверстий диаметром 2 mm и шагом 10 mm в пластине из нержавеющей стали. Отпечаток медного покрытия регистрировался на ситалловой пластине на расстоянии 20 mm от отверстий коллиматора.

Подложка была заземлена. Так как плазма имеет положительный потенциал относительно заземленной подложки, поток ионов получал дополнительную энергию при осаждении на подложку.

Мощность источника питания магнетрона составляла 80–100 W. Перемещение постоянного магнита не влияло на ток и напряжение разряда. При работе магнетрона неизменным поддерживался ток разряда, который обычно составлял 160 mA. Напряжение разряда 320–350 V изменялось при смене катодов, выполненных из различных металлов. Результаты экспериментов не были связаны с изменением мощности разряда.

## 2. Результаты экспериментов и обсуждение

Магнитное поле внешнего магнита изменяет конфигурацию магнитного поля магнетрона. В зависимости от расстояния между магнитом и магнетроном меняется форма и размер плазменной границы около подложки, а также плотность ионного тока.

### 2.1. Влияние внешнего магнита на конфигурацию плазмы вблизи подложки

Эксперименты показали, что кольцевой магнит над магнетроном влияет на поток плазменных электронов, ионизирующих распыленные атомы металла и рабочего газа. Когда осаждение пленки происходит в отсутствие цилиндрического анода *з* с внешним магнитом, яркое свечение плазмы наблюдается внутри отверстия анода магнетрона непосредственно над поверхностью катода (рис. 2, *a*). Край анодного отверстия изображен в виде обода вокруг яркого плазменного кольца. Через окно вакуумной камеры плазменное кольцо отчетливо видно

при работе магнетрона с металлическими катодами из различных материалов. Его диаметр соответствует диаметру канавки на катоде, которая постепенно вырабатывается при длительной работе магнетрона. Без внешнего магнита плазма практически не выходит за пределы анода (рис. 2, *b*), так как отсутствует свечение плазмы, выходящей из магнетрона.

В экспериментах подложка обычно размещалась на расстоянии 60–90 mm от магнетрона, где осаждалось равномерное по толщине покрытие [9]. Однако на таких расстояниях плотность плазмы является низкой (рис. 2, *b*). После установки цилиндрического анода с внешним кольцевым магнитом область светящейся плазмы распространяется за пределы анода магнетрона, достигая подложки (рис. 2, *c*). Магнитное поле кольцевого магнита, суммируясь с магнитным полем магнетрона, изменяет форму силовых линий магнитного поля вблизи подложки. Электроны, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля по винтовой траектории, создают дополнительную ионизацию плазмы в области подложки. В результате на больших расстояниях от катода увеличивается плотность тока ионов, падающих на подложку. Если изменить полюс внешних магнитов на противоположный относительно полюса центрального магнита магнетрона, перевернув их на 180°, то давление, при котором горит разряд, увеличивается на порядок, а действие внешнего магнита становится незначительным.

Назначение магнитной системы магнетрона состоит в создании газоразрядной плазмы над поверхностью катода. Анодное магнитное поле магнетрона является поперечным относительно направления к подложке. Оно значительно спадает у поверхности магнетрона. Значение магнитного поля магнетрона на расстоянии 70–90 mm будет незначительным, поэтому оно не будет влиять на процесс осаждения пленки на подложку. Внешний кольцевой магнит находится ближе к подложке, поэтому он будет оказывать существенное воздействие на движение заряженных частиц к подложке по сравнению с магнитом магнетрона.

В магнетроне с внешним магнитом снижается рабочее давление газового разряда до 0.2 Pa из-за более

эффективного процесса электронной ионизации атомов. Без внешнего магнита рабочее давление магнетрона составляло 2.5 Pa. Преимущество магнетрона с внешним магнитом состоит в том, что он работает при более низком давлении разряда 0.2–0.5 Pa, когда длина свободного пробега атомов соизмерима с размером вакуумной камеры. Столкновения с атомами газа происходят реже, чем при работе при большем давлении. Качество покрытия на подложке улучшается, так как снижается рассеяние осаждаемых частиц на атомах рабочего газа.

Влияние конфигурации магнитного поля на движение электронов подтверждает рис. 2, *d*, на котором изображена форма светящейся плазмы, когда цилиндрический постоянный магнит диаметром 10 mm установили на верхнюю сторону подложки в виде тонкой пластины из нержавеющей стали. Постоянный магнит концентрирует магнитный поток внешнего кольцевого магнита. При смещении подложки с магнитом в горизонтальном направлении в сторону от оси магнетрона область светящейся плазмы искривляется, следуя за смещением магнита на большие расстояния.

Дальнейшие эксперименты показали, что изменение конфигурации магнитного поля слабо влияет на траекторию движения ионов, образовавшихся из распыленных атомов металла, из-за их большой массы по сравнению с массой электронов. Было видно, что форма и размер медного отпечатка на подложке незначительно изменяется при аксиальном смещении внешнего кольцевого магнита. Таким образом, с помощью постоянного магнита, расположенного непосредственно на подложке, можно увеличивать плотность ионизирующих электронов около подложки при условии, что подложка в технологическом процессе не будет нагреваться выше температуры размагничивания магнита.

## 2.2. Конфигурация магнитного поля магнетрона с внешним магнитом

Суммарное магнитное поле пробочной конфигурации между магнетроном и подложкой формируется магнитной системой магнетрона и кольцевым магнитом, расположенным над магнетроном. Магнетронный разряд создает плазму около поверхности катода, кольцевой магнит служит для эффективной транспортировки электронов к подложке для ионизации потока распыленных атомов.

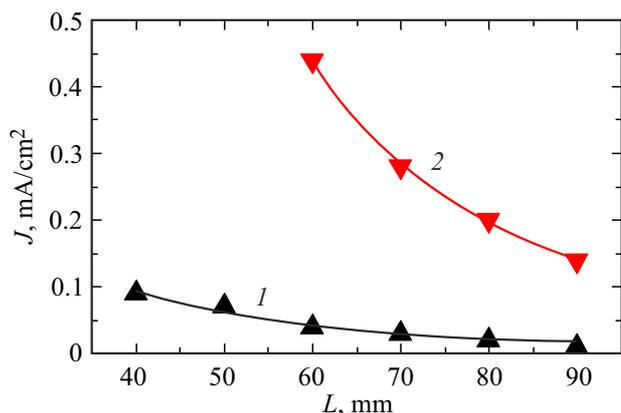
Магнитной системой магнетрона создается магнитное поле арочной конфигурации (рис. 1, *a*). Из плазменного кольца над катодом тяжелые ионы аргона ускоряются к катоду, выбивая из его поверхности атомы металла и электроны, которые после ускорения в катодном слое обеспечивают ионизацию атомов рабочего газа в области яркого плазменного кольца. Азимутальный дрейф электронов над катодом происходит в скрещенных электрических и магнитных полях. Электроны, двигаясь по циклоидальной траектории, дрейфуют

по круговой траектории над катодом, ионизируя атомы аргона. Циклоидальная траектория постепенно поднимается над катодом из-за потери энергии электронов на ионизацию. Атомы металла, распыленные ионами аргона, двигаются по прямолинейным траекториям от катода к подложке, формируя на ней тонкопленочное покрытие. При этом на металлическом катоде вырабатывается кольцевая канавка в области интенсивного распыления атомов металла. На количество осажденных атомов и качество нанесенного покрытия значительно влияют их потери в результате рассеяния на атомах рабочего газа. При высоком рабочем давлении газа распыленные атомы могут терять энергию из-за многократных столкновений с атомами газа до того, как они достигнут подложки. На большом расстоянии до подложки и при высоком давлении газа атомы металла, смешанные с атомами рабочего газа, могут не достигнуть подложки. Поэтому снижение рабочего давления влияет на плотность осаждаемой пленки и ее адгезию.

Внешний кольцевой магнит, установленный на анод магнетрона, изменяет конфигурацию магнитного поля, усиливая периферийное магнитное поле у стенок анода. Магнитная ловушка препятствует уходу электронов из этой области [10]. В результате эффективность электронной ионизации распыленных атомов возрастает на большом расстоянии от магнетрона.

На рис. 1 показаны также боковые линии магнитного поля внешнего магнита, направленные к катоду магнетрона и одновременно пересекающие цилиндрический анод и катод магнетрона. Вдоль краевых линий магнитного поля электроны могут двигаться к цилиндрическому аноду, однако эти линии магнитного поля пересекают катод на его периферии вне плазменного кольца. На краях катода плотность плазмы и соответственно плотность электронов низкая, так как плазма сосредоточена в области центрального кольца. Из краевой области катода электроны перемещаются на цилиндрический анод вдоль линий магнитного поля, однако их количество незначительно.

Аналогично формируется магнитное поле около подложки в несбалансированном магнетроне со слабым центральным цилиндрическим магнитом небольшого диаметра и сильным внешним кольцевым магнитом, когда часть периферийного магнитного потока пересекает подложку (рис. 1, *b*) [11–13]. Боковые силовые линии магнитного поля, пересекающие катод магнетрона и подложку, препятствуют поперечному уходу электронов из области разряда. В результате плотность ионного тока на подложку увеличивается. Предлагаемая магнитная система с кольцевым магнитом над магнетроном является более эффективной, так как можно сформировать оптимальную конфигурацию магнитного поля, перемещая кольцевой магнит в вертикальном направлении.



**Рис. 3.** Зависимость плотности ионного тока на различных расстояниях от катода. 1 — магнетрон без внешнего магнита, 2 — магнетрон с внешним магнитом.

### 2.3. Плотность ионного тока на подложку

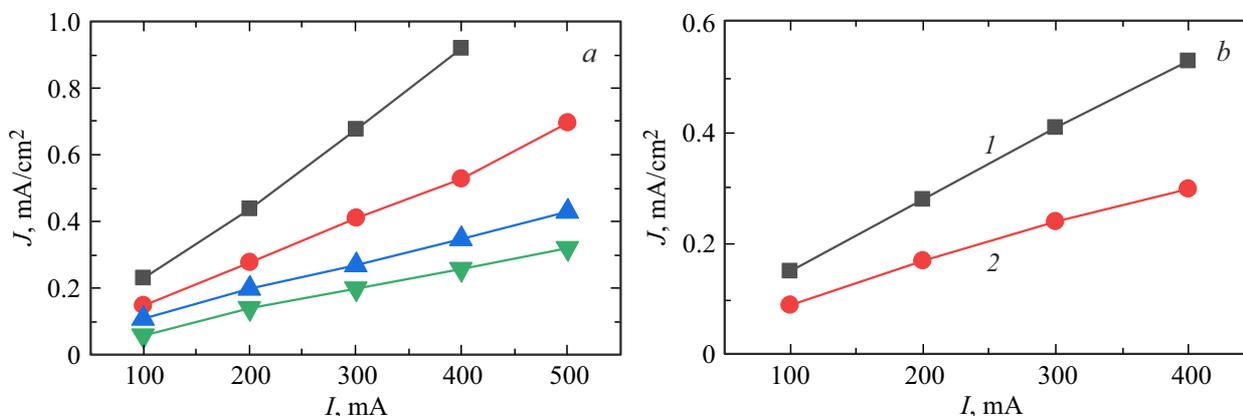
Увеличение плотности ионного тока подтверждают измерения с помощью ионного зонда в виде цилиндра Фарадея с отрицательным электрическим смещением  $-50\text{ V}$ . На рис. 3 показана зависимость плотности ионного тока вдоль центральной оси без магнита и с внешним магнитом, расположенным на высоте  $h = 24\text{ mm}$  от катода. Из рис. 3 видно, что с внешним магнитом плотность ионного тока увеличивается на порядок на расстоянии  $70\text{ mm}$  от магнетрона. Из-за расходимости ионного потока при удалении от магнетрона и перезарядки ионов на атомах газа интенсивность ионного потока снижается при увеличении расстояния от магнетрона.

Плотность ионного тока (рис. 4, *a*) увеличивается линейно в зависимости от тока магнетрона при напряжении разряда  $320\text{--}350\text{ V}$ , так как с увеличением мощности разряда возрастает плотность плазмы, генерируемой магнетроном.

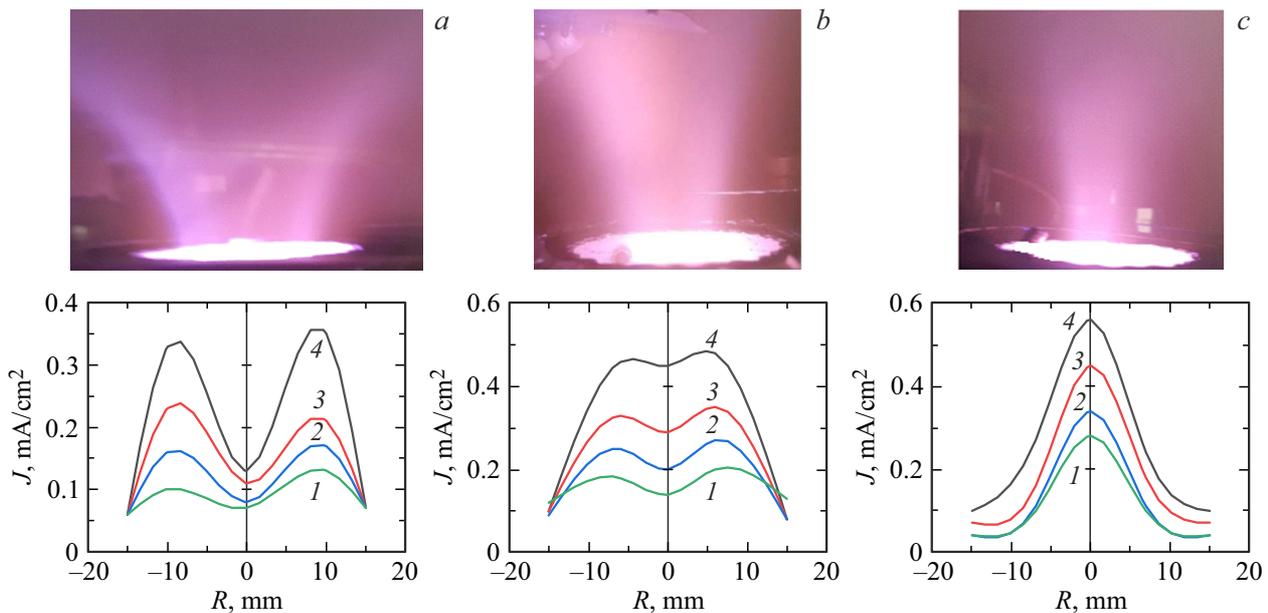
Магнетрон с внешним магнитом стабильно работал при давлении  $0.4\text{--}0.5\text{ Pa}$  с различными рабочими газами: аргон, кислородом и смесью аргона с азотом для получения пленок металлов (Cu, Al, Ti, Mo, Pt), оксидов и нитридов металлов. Для сравнения скоростей осаждения пленки меди и оксида меди вместо аргона использовался кислород [14].

Плотность ионного тока на подложку для этих пленок также возрастала с увеличением тока разряда (рис. 4, *b*). Скорость напыления меди была  $52\text{ nm/min}$  при распылении катода атомами аргона. Магнетронный разряд в среде кислорода при давлении кислорода  $0.5\text{ Pa}$  был стабильным. Толщина оксидного покрытия при скорости напыления  $7\text{ nm/min}$  составляла  $320\text{ nm}$ . Скорость напыления оксида меди была в несколько раз меньше по сравнению с медью из-за низкой скорости распыления медного катода более легкими ионами кислорода, а также из-за образования на поверхности катода оксидной пленки, которая изменяла коэффициент распыления. Аналогичные зависимости были получены при осаждении пленки AlN при использовании алюминиевого катода и смеси аргона с азотом.

Преимуществом магнетрона с внешним магнитом по сравнению с магнетроном без магнита является его стабильная работа при использовании кислорода в качестве рабочего газа. Обычно для осаждения пленок оксидов металлов используется смесь аргона с кислородом. Если для магнетронного разряда применять только кислород без аргона, то при разряде на постоянном токе происходит окисление металлической мишени с образованием оксидного слоя на ее поверхности. Из-за накопления поверхностного заряда на оксидном слое происходят искрения и частые электрические пробои. Диэлектрический слой также препятствует протеканию постоянного тока разряда. Снижается скорость напыления пленки. Магнетрон перестает стабильно работать. В смеси кислород/аргон ионы аргона, бомбардируя поверхность мишени, очищают ее от оксидов, распыляя атомы диэлек-



**Рис. 4.** Зависимость плотности ионного тока от тока разряда магнетрона: *a* — на различных расстояниях  $L$  от катода до подложки: ■ —  $60\text{ mm}$ , ● —  $70\text{ mm}$ , ▲ —  $80\text{ mm}$ , ▼ —  $90\text{ mm}$ ; *b* — разряд с медной мишенью в среде различных газов: 1 — аргон, 2 — кислород.



**Рис. 5.** Свечение плазмы между магнетроном и подложкой и распределение плотности ионов в поперечном сечении плазмы при различных расстояниях  $h$  внешнего магнита от катода:  $a$  — 20 mm,  $b$  — 24 mm,  $c$  — 34 mm на расстоянии  $L$  от магнетрона до подложки: 1 — 60 mm, 2 — 70 mm, 3 — 80 mm, 4 — 90 mm.

трической пленки. В результате магнетронный разряд становится стабильным, однако часть мощности разряда тратится на ионизацию атомов аргона, что снижает его эффективность.

В предлагаемом магнетроне с внешним магнитом разряд стабильно горит, когда в вакуумную камеру подавался кислород. Полного покрытия мишени оксидной пленкой на ее поверхности не происходит. Также магнетрон стабильно работал со смесью аргон/азот для получения пленок нитрида меди и нитрида алюминия.

#### 2.4. Пространственные распределения ионного потока при смещении внешнего кольцевого магнита

Форма светящейся плазмы изменялась при удалении внешнего кольцевого магнита от катода магнетрона (рис. 5).

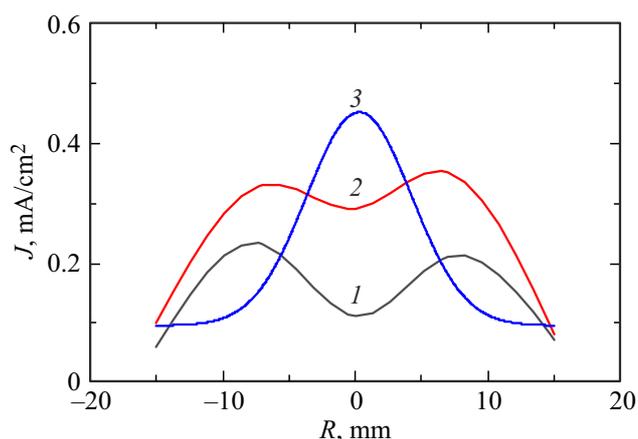
При увеличении расстояния  $h$  между магнитом и магнетроном поперечное сечение светящегося плазменного потока уменьшается. Для измерения распределения плотности ионного тока в поперечном сечении использовался зонд в виде цилиндра Фарадея с электрическим смещением, который мог перемещаться поперек плазменного потока. Положение анода относительно подложки не изменялось. Перемещался внешний магнит в вертикальном направлении.

Из рис. 5,  $a$  видно, что при  $h = 20$  mm формируется плазменное кольцо диаметром около 25 mm с низкой интенсивностью ионного потока в центре. Диаметр кольца практически равен диаметру плазменного кольца у катода, который соответствует диаметру кольцевой канавки на поверхности катода магнетрона. При смеще-

нии внешнего магнита от магнетрона изменяется форма силовых линий магнитной ловушки пробочной конфигурации в центре цилиндрического анода. На расстоянии  $h = 24$  mm от внешнего магнита до катода (рис. 5,  $b$ ) сечение плазмы уменьшается, плазма формируется вдоль оси магнетрона, улучшается однородность цилиндрического ионного потока в поперечном сечении. При дальнейшем удалении внешнего магнита от магнетрона ионный поток становится узким (рис. 5,  $c$ ). Максимальное значение плотности ионного тока увеличивается до  $0.55 \text{ mA/cm}^2$ . Вероятно, на небольшом удалении постоянного магнита от магнетрона (рис. 5,  $a$ ) на ионизацию ионов значительно влияет магнитное поле магнетрона. Видно, что размер сечения ионного потока у подложки на расстоянии 60–90 mm совпадает с размером плазменного кольца над катодом магнетрона. При большом смещении внешнего магнита от магнетрона (рис. 5,  $c$ ) на поток ионов вблизи подложки влияет магнитное поле внешнего магнита, так как струя плазменного потока сжимается к оси магнетрона в соответствии с силовыми линиями магнитного поля.

Другой особенностью магнетрона с внешним магнитом является увеличение плотности ионного тока на подложку на фиксированном расстоянии от магнетрона при увеличении смещения внешнего магнита от магнетрона (рис. 6). Рост плотности ионного тока происходит одновременно с сужением области плазмы относительно оси магнетрона. Вероятно, поток плазменных электронов концентрируется у оси магнетрона, что приводит к ионизации большего количества атомов в промежутке между магнитом и магнетроном.

При увеличении расстояния от внешнего магнита до катода от 20 до 34 mm кольцевой ионный поток



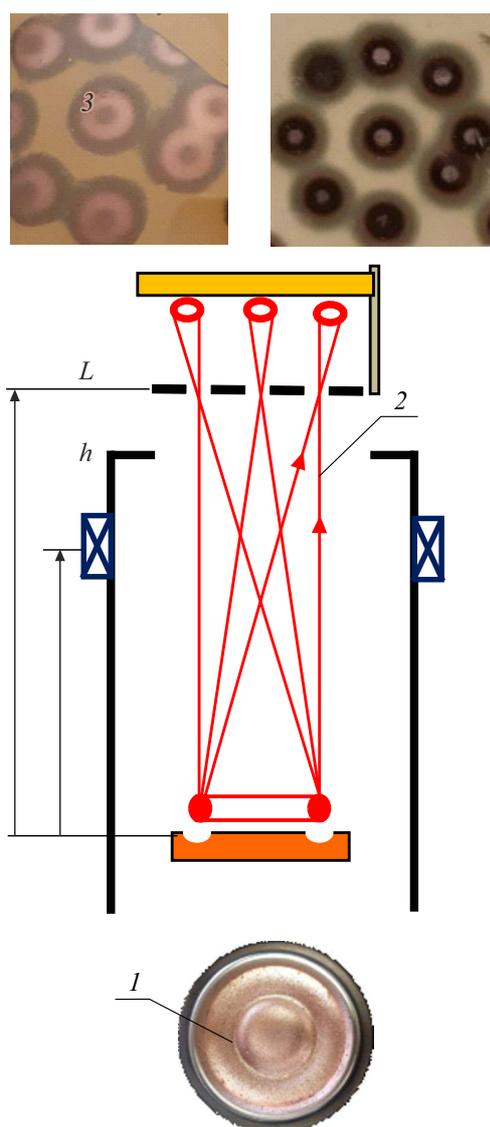
**Рис. 6.** Зависимости плотности ионного тока в поперечном сечении плазмы на одинаковом расстоянии 80 mm от катода и различном смещении  $h$  внешнего магнита: 1 — 20 mm, 2 — 24 mm, 3 — 34 mm.

трансформируется в аксиальный цилиндрический поток ионов. При этом плотность тока ионов в центре увеличивается от 0.12 до 0.45 mA/cm<sup>2</sup>. Таким образом, изменяя конфигурацию магнитного поля магнетрона с помощью внешнего магнита, можно регулировать сечение и плотность ионного тока.

### 3. Угловая расходимость распыленных атомов

Можно было бы предположить, что уменьшение диаметра светящейся плазмы приводит также к уменьшению угловой расходимости ионного потока на подложку. Для определения траекторий движения распыленных атомов использовался яркий отпечаток атомов меди на ситалловой подложке, получаемый за небольшой интервал времени осаждения покрытия. Угловое распределение распыленных атомов меди измерялось с помощью коллиматора по отпечатку на подложке (рис. 7). Диаметр небольших кольцевых отпечатков меди на подложке уменьшался при удалении коллиматора от магнетрона. Линии, проведенные через отверстие коллиматора от кольцевого отпечатка меди на подложке в сторону магнетрона, проходили через канавку катода, над которой образуется плазменное кольцо. Это соответствует прямолинейному движению распыленных атомов от мишени к подложке. Такие же кольцевые отпечатки оксида были получены при использовании кислорода в качестве рабочего газа (рис. 7). Размер отпечатков меди не изменялся при смещении внешнего магнита относительно магнетрона.

Таким образом, при работе магнетрона с внешним магнитом происходит электронная ионизация распыленных атомов вдоль траектории их движения к подложке. Магнитное поле незначительно влияет на прямоли-



**Рис. 7.** Схема измерения угловой расходимости распыленных атомов: 1 — медный катод магнетрона, 2 — траектории распыленных атомов меди, 3 — отпечаток на подложке атомов и ионов меди и оксида меди темного цвета, прошедших через отверстия коллиматора.

нейное движение ионов из-за их большой массы по сравнению с массой электронов.

### Заключение

Внешний постоянный магнит, расположенный над магнетроном, изменяет конфигурацию магнитного поля магнетрона. Электроны ионизируют распыленные атомы вдоль траектории их движения от магнетрона к подложке. На большом расстоянии от подложки увеличивается плотность ионов в потоке осаждаемых атомов. Установив внешний магнит на аноды магнетронов различной конструкции, можно повысить ионную компоненту

тока в потоке осаждаемых атомов, если необходима дополнительная ионная бомбардировка растущей пленки. Энергия падающих ионов регулируется изменением отрицательного напряжения смещения подложки.

В результате удержания электронов в суммарном магнитном поле внешнего магнита и магнетрона разряд в среде аргона, кислорода и смеси аргона с азотом горит стабильно при давлении около 0.3–0.5 Па. Уменьшение рабочего давления приводит к меньшему рассеянию осаждаемых атомов на атомах рабочего газа. С внешним магнитом, установленным перед магнетроном, плотность ионного тока на подложку на порядок больше, чем без внешнего магнита. Плотность ионного тока пропорциональна току разряда магнетрона. Это связано с увеличением плотности генерируемой им плазмы. Аксиальное смещение внешнего магнита относительно магнетрона значительно влияет на плотность ионного тока и сечение интенсивного ионного потока на подложку. Магнитное поле внешнего магнита повышает эффективность электронной ионизации атомов и не оказывает влияния на прямолинейную траекторию движения ионов к подложке из-за значительной разности масс ионов и электронов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P.J. Kelly, R.D. Arnell. *Vacuum*, **56** (3), 159 (2000). DOI: 10.1016/S0042-207X(99)00189-X
- [2] V.N. Pashentsev. *Intern. J. Surf. Sci. Eng.*, **11** (1), 36 (2017). DOI: 10.1504/IJSURFSE.2017.082950
- [3] P. Spatenka, I. Leipner, J. Vıcek, J. Musil. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **6**, 46 (1997).
- [4] А.А. Соловьев, А.Н. Захаров, С.В. Работкин, К.В. Оскомов, Н.С. Сочугов. *Физика и химия обработки материалов*, **2**, 58 (2009).
- [5] B. Window, G.L. Harding. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8** (3), 1277 (1990). DOI: 10.1116/1.576911
- [6] В.С. Фещенко, К.Н. Зяблук, Э.А. Сенокосов, В.И. Чукига, Д.А. Киселев. *Росс. технол. журн.*, **8** (1), 67 (2020). DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-1-67-79
- [7] E. Yazar, V. Hrkac, C. Zamponi, A. Piorra, L. Kienle, E. Quandt. *AIP Adv.*, **6** (7), 075115-1 (2016). DOI: 10.1063/1.4959895
- [8] M. Akiyama, K. Nagao, N. Ueno, H. Tateyama, T. Yamada. *Vacuum*, **74**, 699 (2004). DOI: 10.1016/j.vacuum.2004.01.052
- [9] В.Н. Пашенцев. *Прикладная физика*, **4**, 91 (2009). [V.N. Pashentsev. *Plasma Phys.*, **36**, 1215 (2010). DOI: 10.1134/S1063780X10130210]
- [10] C. Duquenne, P.Y. Tessier, M.P. Besland, B. Angleraud, P.Y. Jouan, R. Aubry, S. Delage, M.A. Djouadi. *J. Appl. Phys.*, **104** (6), 063301-1 (2008). DOI: 10.1063/1.2978226
- [11] P. Spatenka, J. Vlcek, J. Blazek. *Vacuum*, **55** (2), 165 (1999).
- [12] А.А. Соловьев, Н.С. Сочугов, К.В. Оскомов, С.В. Работкин. *Физика плазмы*, **35** (5), 443 (2009). [A.A. Solov'v, N.S. Sochugov, K.V. Oskomov, S.V. Rabotkin. *Plasma Phys. Rep.*, **35** (5), 399 (2009). DOI: 10.1134/S1063780X09050055]
- [13] А. Н. Захаров, К.В. Оскомов, С.В. Работкин, А.А. Соловьев, Н.С. Сочугов. *ЖТФ*, **80** (5), 127 (2010). [A.N. Zakharov, K.V. Oskomov, S.V. Rabotkin, A.A. Solov'ev, N.S. Sochugov *Tech. Phys.*, **55** (5), 719 (2010)]
- [14] A. Krumpmann, R.J. Snyders. *Vac. Sci. Technol. A*, **40**, 013412 (2022). DOI: 10.1116/6.0001423