15

Разработка магнетрона для напыления тонких пленок с увеличенной зоной эрозии на мишени

© Н.В. Загайнов, Е.С. Антюшин, В.Н. Полковников, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: kolazagaunow41@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 июня 2026 г.
В окончательной редакции 15 июня 2026 г.
Принято к публикации 15 июня 2026 г.

Предложены критерии разработки магнетронных распылительных систем с расширенной зоной эрозии мишени и высокой стабильностью параметров технологического процесса. Установлено, что форма зоны эрозии определяется областью преобладания тангенциальной составляющей магнитного поля над нормальной. Для формирования расширенной зоны требуется разбалансировка магнитной системы, при которой площадь центрального магнита меньше площади внешнего кольцевого. В качестве критерия локализации плазмы тлеющего разряда предложено использовать распределение модуля магнитного поля на заданной высоте над поверхностью мишени. На основе сформулированных критериев разработана улучшенная модель магнетрона. Высокая стабильность технологического процесса роста пленок экспериментально подтверждена получением многослойных зеркал Cr/Sc с периодом 1.6 nm и числом периодов $N = 300$. Дрейф периода за 4 h непрерывного процесса напыления составил менее 0.35 %.

Ключевые слова: тонкие пленки, магнетрон, магнетронное напыление, тлеющий разряд, магнитное поле, дифрактометр, коэффициент отражения, рентгеновское излучение.

DOI: 10.61011/JTF.2026.10.63636.221-26

Введение

Метод магнетронного напыления многослойных зеркал получил широкое распространение в мире. Синтезированные с развитием и усовершенствованием этого метода зеркала позволили достичь существенных успехов в различных областях науки и техники, таких как физика Солнца, изучение высокотемпературной лабораторной плазмы, проекционная рентгеновская литография, рентгеновская микроскопия и др.

Обзоры, посвященные физике и технике магнетронов для напыления тонких пленок, можно посмотреть, например, в [1–3]. Суть магнетронного метода сводится к следующему. Между двумя электродами зажигается тлеющий разряд, причем катодом служит мишень из распыляемого материала, а анодом — подложка, на которой осаждается тонкая пленка. Положительные ионы из плазмы тлеющего разряда, ускоряясь к катоду, ударяются о мишень и выбивают из нее атомы, которые затем осаждаются на подложке. Магнитное поле в прикатодной области необходимо для более эффективного горения разряда.

В магнетронах используется аномальный (т. е. занимающий всю площадь катода) тлеющий разряд, локализованный у поверхности мишени в неоднородных скрещенных магнитном и электрическом полях. Основным отличием метода магнетронного распыления от других типов катодного распыления является создание над определенными участками катода-мишени области плазмы тлеющего разряда низкого давления с более высокой по сравнению с диодным распылением плотностью путем наложения внешнего магнитного поля определенной формы на электрическое поле, направленное от катода к аноду.

Часто в магнетронах используется магнитное поле арочной конфигурации, позволяющее наиболее эффективно локализовать плазму у мишени за счет фокусирующих эффектов неоднородных полей [1]. При арочном магнитном поле осуществляется магнитная фокусировка электронов, поскольку электроны, эмиттированные с краев зоны распыления, имеют преимущественно продольную составляющую скорости, направленную вдоль линий магнитного поля к середине зоны распыления. Увеличение концентрации электронов в центральной части зоны приводит к увеличению интенсивности ионизирующих столкновений и к росту плотности плазмы в этой области. В результате плотность ионного тока на мишень в центре зоны распыления будет выше, чем на краях.

Ширина темного катодного пространства обратно пропорциональна плотности ионного тока. Следовательно, она имеет вогнутую форму, и ионы, ускоряющиеся в темном катодном пространстве, приобретают под действием электрического поля скорость в направлении к центру зоны распыления, испытывая электрическую фокусировку. Аналогичный эффект дополнительно проявляется по мере эрозии мишени, когда зона распыления становится также вогнутой, что приводит к снижению рабочего напряжения и увеличению тока разряда.

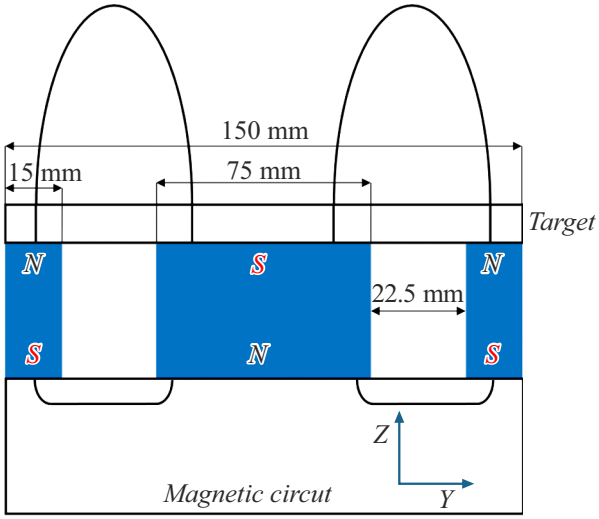

Рис. 1. Система магнитов в разрезе для магнетрона со сбалансированным магнитным полем. Показано расположение распыляемой мишени и магнитопровода, замыкающего магнитный поток между нижними полюсами магнитов. Дуговые линии над поверхностью мишени иллюстрируют арочную конфигурацию магнитного поля, в которой локализуется плазма тлеющего разряда.

Магнетроны ИФМ РАН представляют собой источники с кольцевым разрядом. На поверхности каждого магнетрона расположена мишень распыляемого материала диаметром 150 mm и толщиной от 2 до 8 mm, служащая катодом. Магнитная система магнетрона (рис. 1) состоит из внутреннего цилиндрического и внешнего кольцевого магнитов. Она создает в зазоре между полюсами постоянное магнитное поле арочной конфигурации напряженностью $(4-7)\cdot 10^{-2}$ T. Источниками питания магнетронов служат стабилизированные блоки на постоянном токе, разработанные в ИФМ РАН. Они позволяют варьировать ток разряда в пределах 100–2000 mA при напряжениях от 100 до 400 V. Для высокочастотного распыления мишеней используются радиочастотные блоки с частотой 13.56 MHz. В качестве рабочей среды используется высокочистый (99.998 %) аргон. Рабочее давление газа при технологическом процессе составляет $(8-13)\cdot 10^{-2}$ Pa.

Достоинством этих магнетронов является относительно небольшое значение напряжения магнетронного разряда. Пониженная относительно других магнетронов электрическая мощность позволила, например, в работе [4] напылить многослойное зеркало Cr/Sc с коэффициентом отражения на длине волны 3.12 nm $R = 21\,\%$ против 17 %, продемонстрированных на магнетронах с втрое большей электрической мощностью [5].

Однако эти магнетроны относятся к магнетронам со сбалансированным магнитным полем (площадь поверхности внутреннего магнита близка к площади поверхности внешнего). Это приводит к ярко выраженной „арочности“ магнитного поля, а та, в свою очередь, к формированию относительно узкой и глубокой зоны эрозии на мишени.

Такая форма зоны эрозии имеет несколько недостатков. Прежде всего, быстрая выработка материала мишени (т. е. изменение формы зоны эрозии) в ходе процесса изготовления многослойного зеркала приводит к изменению количества вещества, вылетающего из мишени в единицу времени. В таком случае при изготовлении многослойного зеркала с большим числом периодов, при неизменных внешних параметрах, будет происходить дрейф толщин слоев материалов, т. е. нижние слои зеркала будут отличаться по толщине от верхних. Так как основным принципом работы многослойной оптики является конструктивная интерференция, подобный дрейф приводит к уменьшению и к уширению брэгговского пика отражения [6].

Оценить допустимую величину дрейфа можно по следующей формуле:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx \frac{d}{\Delta d} \approx N_{\text{eff}},$$

где N_{eff} имеет смысл числа эффективно отражающих периодов. Отсюда можно оценить допустимое отклонение периодичности как $\Delta d = d/N_{\text{eff}}$. Если рассматривать зеркало с периодом $d = 1.58$ nm и $N_{\text{eff}} = 300$, то $\Delta d = 0.005$ nm. Эта величина накладывает жесткие условия на стабильность всех параметров технологического процесса, в том числе и на неизменность в пределах одного процесса формы зоны эрозии.

Кроме того, для дорогостоящих мишеней целесообразно увеличивать полезную выработку материала, т. е. расширять зону эрозии.

В настоящей работе решалась задача оптимизации магнитной системы магнетрона для уменьшения эффекта дрейфа периода при изготовлении многослойных зеркал. Этой цели соответствует разработка магнетрона, формирующего уширенную зону эрозии.

1. Моделирование магнитной системы магнетрона с увеличенной зоной эрозии

В данном случае мы ограничились первым приближением задачи оптимизации магнитной системы магнетрона, так как в моделировании учитывалось только влияние магнитного поля на плазму и не учитывалось влияние электрического поля.

На данный момент в магнетронах установок напыления тонких пленок [7] используется магнитная система, изображенная в разрезе на рис. 1.

Для дальнейшего моделирования важно определиться с критерием соотнесения формы зоны эрозии и магнитного поля над мишенью (т. е. в области разряда). Как показано в работах [8,9], за область зоны эрозии отвечает пространство, в котором тангенциальная составляющая магнитной индукции преобладает над нормальной.

Именно этот критерий мы и взяли за основу в своей работе.

Моделирование в нашей работе выполнялось в программном пакете COMSOL.

Для проверки справедливости выбранного критерия мы провели моделирования для магнитной системы, приведенной на рис. 1. Для этого была посчитана разность между модулями нормальной и тангенциальной составляющей напряженностей магнитных полей, создаваемых магнитной системой. Координатная система, взятая при расчете, совпадает с координатной системой, приведенной на рис. 1. Начало координат выбрано в середине магнитной системы на верхней поверхности центрального магнита. Ось Z направлена в сторону мишени. Так как в рассматриваемой системе есть магнитоактивные компоненты (магниты, магнитопровод), в качестве рассматриваемых величин магнитного поля была выбрана напряженность магнитного поля H. Результат расчета, а также фото мишени с выработанной зоной эрозии приведены на рис. 2.

Формируемая на таком магнетроне зона эрозии образует фигуру, напоминающую узкий и глубокий клин (рис. 2, *a*).

Вертикальными сплошными прямыми на рисунке обозначены границы магнитов. Центру магнетрона соответствует координата 0 mm на оси абсцисс. Область, в которой тангенциальная составляющая преобладает над нормальной, укладывается почти точно между центральным и внешним магнитами. Максимумы этой разности находятся на расстоянии ±47 mm от центра магнетрона.

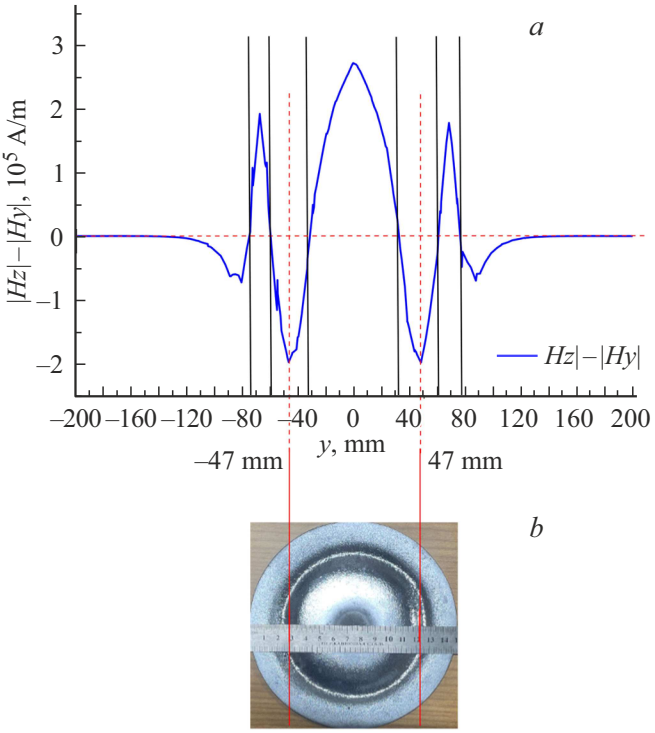

Рис. 2. *a* — разность между тангенциальной и нормальной составляющими напряженности магнитного поля для магнетрона со сбалансированным магнитным полем на высоте 20 mm от верхнего края магнита; *b* — фото мишени с зоной эрозии, образовавшейся на таком магнетроне.

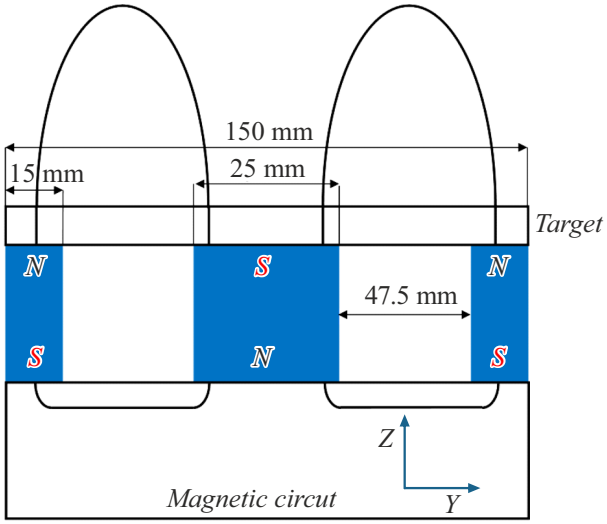

Рис. 3. Система магнитов в разрезе для магнетрона с несбалансированным магнитным полем.

Вычисленные параметры хорошо соотносятся с геометрией выработанной мишени, приведенной на рис. 2, *b*. Например, центральная, невытравленная часть мишени почти точно соответствует диаметру центрального магнита — 75 mm. Наиболее глубокая часть зоны эрозии соответствует положению минимумов *Hz-Hy* с точностью до 2 mm.

Таким образом, мы показали, что выбранный критерий соответствия магнитной системы и формы зоны эрозии справедлив с достаточной степенью точности.

Для увеличения ширины зоны эрозии магнитную систему магнетрона необходимо разбалансировать, уменьшив площадь центрального магнита. В этом случае, как ожидается, зона эрозии расширится в сторону центрального магнита вслед за смещением в этом направлении линий напряженности магнитного поля. Если диаметр центрального магнита уменьшить втрое (рис. 3), то нетрудно добиться существенного увеличения области преобладания тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля (рис. 4).

Здесь область зоны эрозии (или преобладания тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля) также занимает площадь между двумя магнитами. Если в магнетроне со сбалансированным магнитным полем она достигала 22 mm, то здесь уже — 47 mm. При этом можно ожидать, что ее глубина (или скорость вытравливания) будет существенно меньше, т. е. налицо экономия материала дорогостоящих мишеней и, что важно, замедление темпов изменения профиля зоны эрозии, т. е. бóльшая стабильность во времени количества распыляемого вещества.

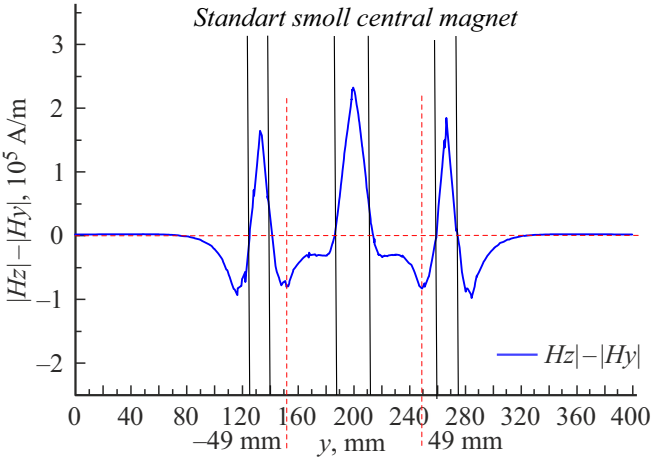

Рис. 4. Разность между тангенциальной и нормальной составляющими напряженности магнитного поля для магнетрона с несбалансированным магнитным полем.

Эти выводы подтверждаются на практике. Однако при такой разбалансировке магнитного поля возникает негативный побочный эффект. Линии магнитного поля, не имея возможности замкнуться на центральном магните, рассеиваются на значительное расстояние от поверхности мишени.

На рис. 5 приведены результаты расчетов пространственного распределения нормальной компоненты напряженности магнитного поля для сбалансированного (рис. 5, *a*) и несбалансированного (рис. 5, *b*) магнетронов. Здесь в центре рисунка изображен магнетрон с магнитной системой.

Очевидно, что магнитное поле для несбалансированного магнетрона распространяется на бóльшую высоту. Следствием этого является и большее пространственное распределение плазмы тлеющего разряда. В случае несбалансированного магнетрона она достигает поверхности подложки, подвергая ее бомбардировке заряженными частицами.

Исходя из всего вышесказанного, можно определить критерии для разработки новой магнитной системы:

1) образование „пологого“ профиля зоны эрозии;

2) удержание плазмы вблизи магнетрона;

3) сохранение радиальной симметрии магнитной системы.

Далее при проведении серии численных экспериментов были определены оптимальные параметры новой магнитной системы. При сохранении степени намагниченности магнитов наилучший баланс между сохранением уширенной зоны эрозии и локализацией плазмы достигается при следующих геометрических параметрах центрального и кольцевого магнитов:

1) малый центральный магнит диаметром 30 mm;

2) внешний кольцевой магнит с разностью большого и малого радиуса 8 mm.

На рис. 6 приведено продольное распределение нормальной компоненты напряженности магнитного поля для всех трех рассмотренных вариантов магнитных систем. Срез взят на высоте 100 mm между поверхностью мишени и подложкой.

Здесь видно, что величина *Hz* значительно выше именно для несбалансированного магнетрона с неоптимизированной магнитной системой. Оптимизация магнитной системы была направлена на локализацию плазмы. Соответственно величина нормальной составляющей магнитного поля на высоте 100 mm становится близкой к нулевым значениям. Можно ожидать большей локализации плазмы вблизи поверхности мишени.

На рис. 7 приведено сравнение расчетных величин *Hz-Hy* для несбалансированных неоптимизированного и оптимизированного магнетронов.

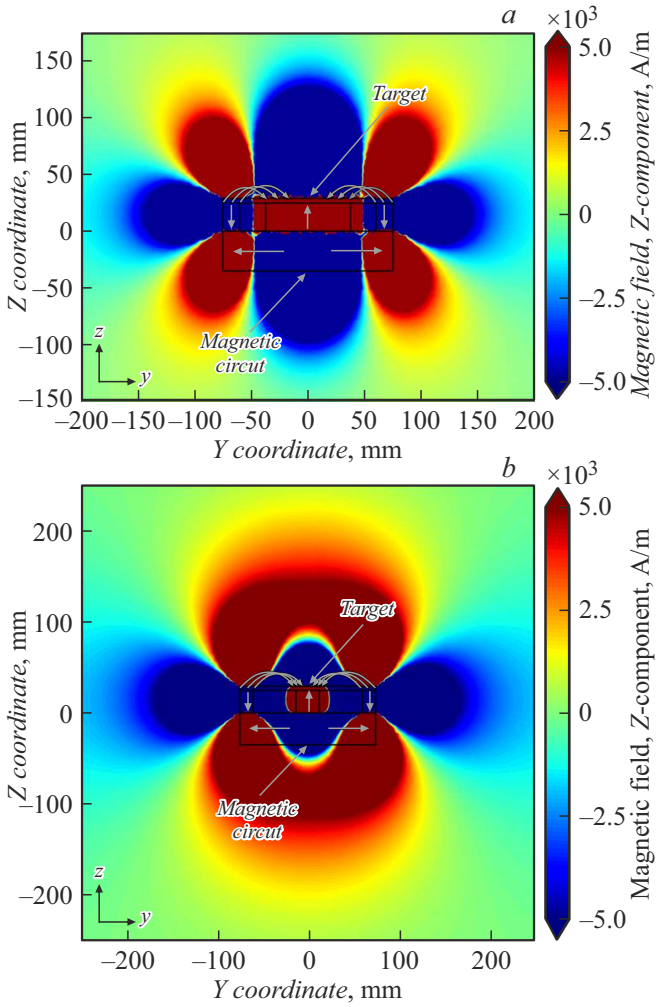

Рис. 5. Расчетное распределение нормальной компоненты магнитного поля для сбалансированного (*a*) и несбалансированного (*b*) магнетронов в зависимости от пространственных координат. Стрелки над мишенью, внутри магнитов и внутри магнитопровода схематично описывают силовые линии магнитной индукции. $Z = 0$ соответствует нижней поверхности магнитов.

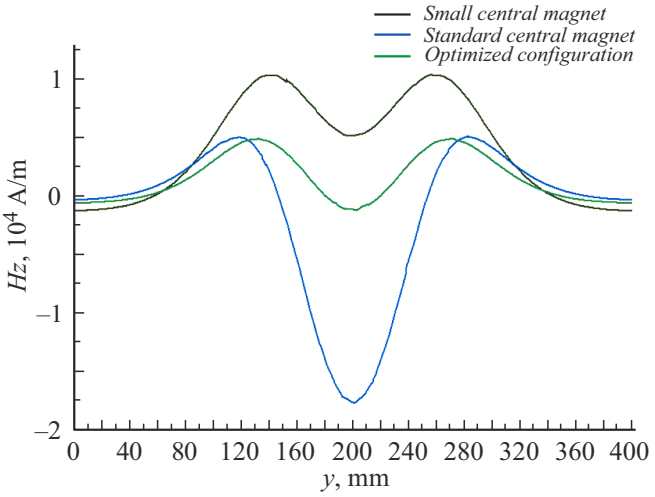

Рис. 6. Сравнение распределения магнитного поля для оптимизированных магнетронных систем на удалении 100 mm от поверхности мишени.

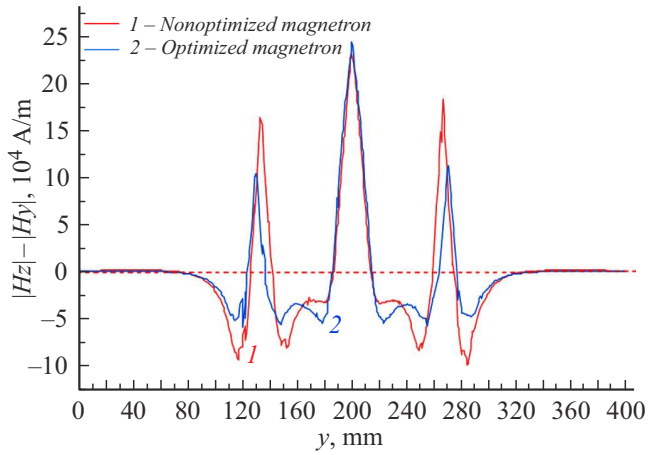

Рис. 7. Сравнение расчетных величин *Hz-Hy* для несбалансированных неоптимизированного и оптимизированного магнетронов.

Из приведенных зависимостей видно, для оптимизированного магнетрона ожидается более пологая, более равномерная форма зоны эрозии. При этом ширина зоны эрозии приблизительно одинакова и опять же укладывается между границами центрального и кольцевого магнитов.

Полученные в ходе моделирования результаты позволяют не только предсказать форму зоны эрозии, но и оценить динамику ее изменения в процессе длительной эксплуатации магнетрона. Для сбалансированной системы (рис. 1) область преобладания тангенциальной составляющей *Hz-Hy* имеет ширину около 22 mm и ярковыраженный максимум (рис. 2, *a*). Это приводит к локализованному ионному току высокой плотности, что вызывает быстрое углубление канавки в мишени. По мере выработки материала, конфигурация магнитного поля над мишенью искажается из-за изменения рельефа поверхности, что ускоряет дрейф рабочего напряжения и скорости распыления. В несбалансированной неоптимизированной системе (рис. 3, 4) ширина зоны эрозии увеличивается до 47 mm, однако максимум *Hz-Hy* остается достаточно резким (рис. 7, кривая *1*), а значительная нормальная компонента поля на высоте 100 mm (рис. 5, *b*, 6) ведет к нежелательной протяженной плазме. Оптимизированная конфигурация (центральный магнит — 30 mm, внешний кольцевой — 8 mm) позволяет сгладить профиль *Hz-Hy* (рис. 7, кривая *2*) практически без потери ширины зоны эрозии. При этом величина нормальной составляющей на удалении 100 mm снижается до значений, сравнимых со сбалансированным случаем (рис. 6).

Важно отметить, что „пологость“ профиля эрозии напрямую влияет на временну́ю стабильность потока распыляемого вещества. В рамках простой модели, когда скорость распыления пропорциональна локальной плотности ионного тока, а форма зоны эрозии определяется распределением *Hz-Hy*, интегрирование потока атомов по всей площади мишени дает зависимость полного выхода материала от глубины канавки. Для оптимизированной системы, благодаря более равномерному распределению, изменение интегрального потока при углублении зоны эрозии оказывается существенно меньшим для оптимизированной конфигурации, что следует из более равномерного распределения тангенциальной составляющей магнитного поля (рис. 7). Это означает, что даже при длительных процессах напыления (например, синтез зеркал с $N > 500$) дрейф периода остается в допустимых пределах. Кроме того, расширенная зона эрозии позволяет использовать мишень дольше до момента замены, что критично для дорогостоящих материалов (Sc, Ru, Rh и др.).

Предложенные критерии — разбалансировка площадей магнитов для уширения зоны эрозии и минимизация нормальной составляющей поля для локализации плазмы — являются универсальными. Они могут быть применены для разработки магнетронов с любым диаметром мишени и для различных материалов, включая магнитные (например, Ni, Co), где форма магнитного поля дополнительно искажается ферромагнетизмом мишени. В последнем случае предложенная методика позволяет заранее подобрать геометрию магнитной системы, компенсирующую влияние материала.

Для проверки расчетов были изготовлены как магнетрон с неоптимизированной магнитной системой, так и с оптимизированной. Визуальное наблюдение показывает, что при приблизительно одинаковых ширинах зоны эрозии шириной порядка 45 mm локализация плазмы для оптимизированного магнетрона действительно оказывается лучше (рис. 8).

На фото слева виден ярко выраженный столб плазмы, уходящий от поверхности мишени как минимум на 300 mm вверх. Это вполне соответствует расчетному значению, полученному на рис. 5, *b*. На фото справа

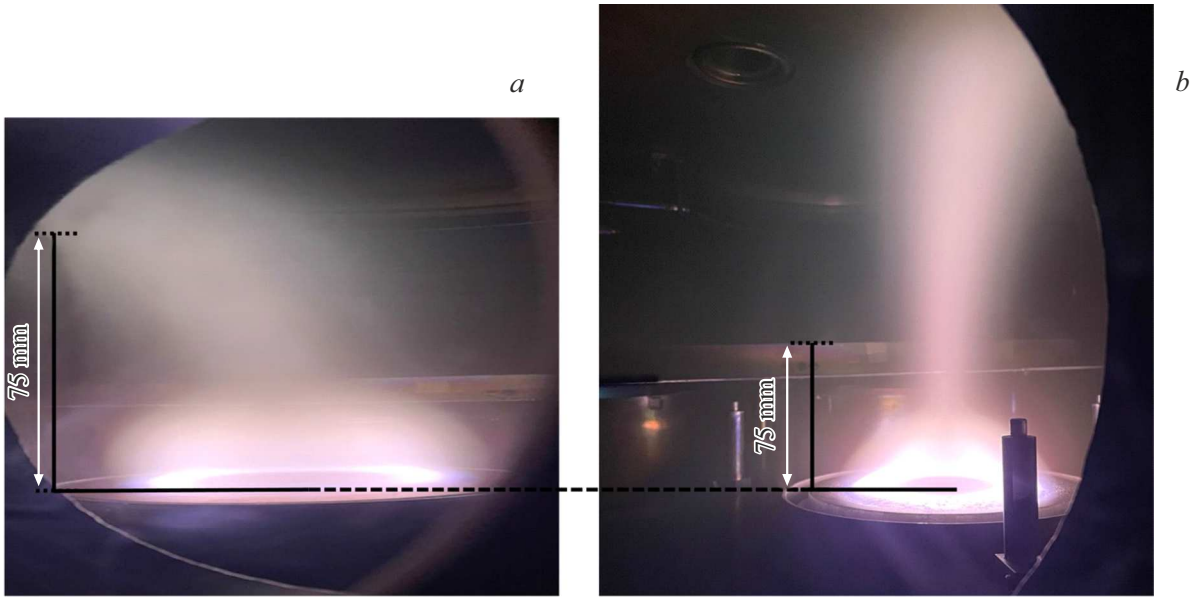

Рис. 8. Фотографии разрядов, горящих над оптимизированным (a) и оптимизированным (b) несбалансированными магнетронами.

плазма более прижата к поверхности мишени. Учитывая, что характерные расстояния от мишени до подложки составляют 80–100 mm, вариант неоптимизированной магнитной системы выглядит неприемлемым.

2. Исследование короткопериодных многослойных зеркал CR/SC, изготовленных с помощью магнетронов с несбалансированной оптимизированной магнитной системой

В разд. 2 пойдет речь об экспериментах с новыми магнетронами. Форма зависимости коэффициента отражения от длины волны $R(\lambda)$ или от угла падения излучения $R(\vartheta)$ многослойных зеркал (МЗ) существенным образом зависит от степени периодичности. А потому стабильность процесса напыления может быть оценена по снятой кривой отражения.

Предварительно нами изучались вольт-амперные характеристики новых магнетронов, а также зависимость напряжения на разряде от давления рабочего газа (Ar) в вакуумной камере. Эти зависимости приведены на рис. 9.

Прежде всего, из приведенных зависимостей следует, что получившиеся магнетроны также остаются магнетронами низких энергий, как и использовавшиеся в работе [4]. А значит, баллистический эффект (внедрение атомов одного материала в пленку другого) остается схожим. Кроме того, новые магнетроны довольно стабильно работают на относительно малых давлениях аргона ($p \leq 66 \cdot 10^{-3}$ Pa).

Чем меньше величина периода, тем чувствительнее форма кривой отражения к непериодичности. Очень хорошей тестовой структурой является МЗ Cr/Sc с периодом $d = 1.6$ nm.

В наших экспериментах мы изготовили два магнетрона с несбалансированной оптимизированной магнитной системой. Магнетроны были помещены в установку магнетронного напыления. На них установлены мишени Cr и Sc.

МЗ Cr/Sc изготавливались при постоянном токе. Количество периодов N составляло 300. Рабочие значения токов на магнетронах составляли 0.3 A для Sc и для Cr. Зеркала изготавливались в среде чистого Ar (99.998 %) при давлении ~ 0.1 Pa. Подача газа осуществлялась с помощью регулятора расхода газа РРГ-12. Контроль значения давления рабочего газа осуществлялся с помощью вакуумметра Pfeiffer PKR 251. Зеркала осаждались на гладкие (величина среднеквадратичной шероховатости ~ 0.2 nm) кремниевые пластины. Измерения малоугловой рентгеновской дифракции и измерения диффузного рассеяния на длине волны 0.154 nm проводились на лабораторном четырехкристальном дифрактометре Philips X'Pert PRO.

На рис. 10 приведены угловые зависимости коэффициента отражения для синтезированного МЗ Cr/Sc с периодом $d = 1.6$ nm для первого (рис. 10, a) и второго (рис. 10, b) порядков дифракции. Символами показаны результаты эксперимента, сплошными линиями — результат подгонки для модели зеркала с параметрами: период 1.6 nm, толщина слоя хрома 0.7 nm, толщина слоя скандия 0.9 nm, значение межслоевой шероховатости 0.3 nm и дрейф периода 0.35 % на всю глубину зеркала.

Полученные зависимости и параметры подгонки показывают хорошее качество полученного короткопериодного МЗ. Таким образом, эксперимент показал, что магнетроны с несбалансированной оптимизированной

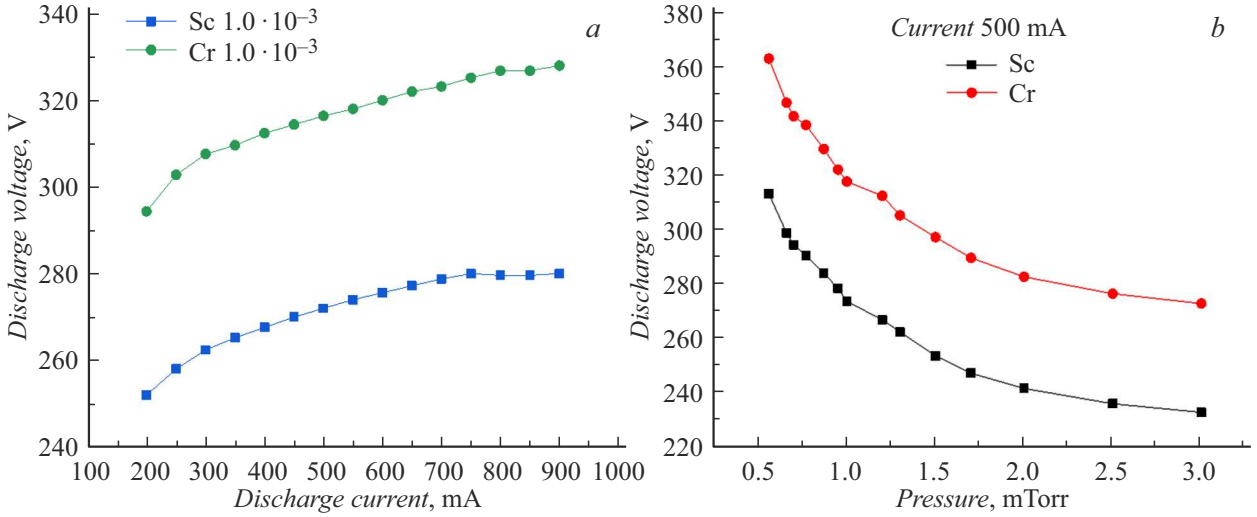

Рис. 9. Вольт-амперные зависимости (*a*) и зависимости напряжения разряда от давления в камере (*b*) для несбалансированных и оптимизированных магнетронов с мишенями Cr и Sc.

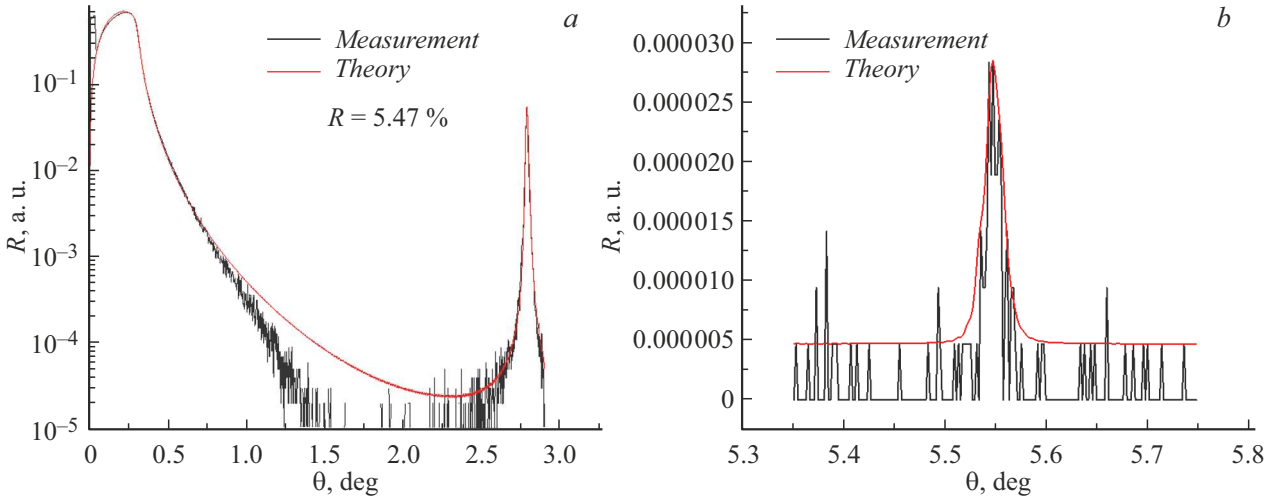

Рис. 10. Угловые зависимости коэффициента отражения для синтезированного МЗ Cr/Sc с периодом $d = 1.6$ nm для первого (*a*) и второго (*b*) порядков дифракции.

магнитной системой удовлетворяют заявленным выше критериям.

Выводы

В ходе работы был экспериментально подтвержден критерий соответствия зоны эрозии на мишенях магнетронов и конфигурации магнитной системы. Область преобладания тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля действительно определяет форму зоны эрозии с высокой степенью точности.

Магнетроны с несбалансированной магнитной системой (площадь центрального магнита меньше площади внешнего кольцевого магнита) обладают уширенной зоной эрозии. Ширина зоны эрозии определяется расстоянием между магнитами магнетрона.

Однако локализация плазмы магнетронного тлеющего разряда требует оптимизации магнитной системы. Критерием этой оптимизации является минимизация нормальной составляющей напряженности магнитного поля на заданной высоте над поверхностью мишени.

В результате была разработана улучшенная модель магнетрона с увеличенной зоной эрозии. Проведенные испытания показали, что магнетрон новой конструкции лишен недостатков магнетрона прежней конструкции при сохранении положительных факторов. В частности, экспериментально показано, что полученные на новых магнетронах многослойные зеркала Cr/Sc с периодами 1.6 nm обладают высокой, на уровне 0.35 %, степенью периодичности. В статье [10] показано, что уход периода

для МРЗ Cr/Sc с числом периодов 300 составил величину 0.69 % при напылении на старой (сбалансированной) конфигурации магнетронов.

Финансирование работы

Разработка, изготовление и исследование параметров магнетронов были выполнены при поддержке гранта РНФ 21-72-30029-П, напыление и исследование отражательных характеристик и внутренней структуры экспериментальных образцов Cr/Sc МЗ выполнены при поддержке гранта РНФ 21-72-20108-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Б.С. Данилин. Обзоры о высокотемпературной сверхпроводимости, **4** (8), 101 (1992).
[2] Б.С. Данилин, В.К. Сырчин. *Магнетронные распылительные системы* (Радио и связь, М., 1982)
[3] В.А. Лабунов, Н.И. Данилович, А.С. Уксусов, В.Е. Минайчев. Зарубежная электронная техника, **10**, 3 (1982).
[4] В.Н. Полковников, С.А. Гарахин, Д.С. Квашенников, И.В. Малышев, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, Р.М. Смертин, Н.И. Чхало. ЖТФ, **90** (11), 1893 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49980.143-20
[5] F. Schäfers, S. Yulin, T. Feigl, N. Kaiser. Proc. SPIE, **5188**, 138 (2003).
[6] C. Burcklen, S. de Rossi, E. Meltchakov, D. Dennetière, B. Capitanio, F. Polack, F. Delmotte. Opt. Lett., **42** (10), 1927 (2017).
[7] А.Д. Ахсахалян, Е.Б. Клюенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.В. Свечников, М.Н. Торопов, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, А.В. Щербаков. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 5 (2017).
[8] Ф.С. Федотов, А.М. Телегин. УФН, **10** (3), 301 (2022).
[9] V. Gorshanov. *Modeling of magnetic field distribution and optimization of a magnetron for magnetron sputtering technology* (Masters Thesis, 2019)
[10] R.M. Smertin, M. Barysheva, N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, I.V. Malyshev, V.N. Polkovnikov. Opt. Express, **32** (15), 26583 (2024).