

18. В.А. Быков, В.К. Егоров, Е.В. Егоров. Формирователь малорасходящихся потоков излучения // Российский патент RU№2486626 с приоритетом от 29.04.2010.
19. А.С. Куприн, В.А. Белоус, В.в. Брык и др. Вакуумно-дуговые хромовые покрытия для защиты сплава Zr1Nb от высокотемпературного окисления на воздухе // Вопросы атомной науки и техники. №2(96), 2015, С. 111-118.
20. S.A. Johanson, J.L. Campbell, K.G. Malquist. Principles particle induced X-ray emission spectrometry (PIXE). New York: Wiley, 1995, 451 p.
21. H. Hofsas. Forward Recoil spectrometry. New York: Plenum, 1996, 278 p.
22. В.К. Егоров, Е.В. Егоров, М.С. Афанасьев. Возможности ионно-пучковой диагностики тонкопленочных эпитаксиальных и неориентированных структур // Изв. РАН, Серия физическая. Т78(6), 2014, С. 700-704.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ МИШЕНИ ПЛАНАРНЫХ МРС

PREDICTION OF TARGET EROSION OF PLANAR MSS

А.Г Колесников¹, / torgcentr2004@mail.ru
Т.А Смолянин¹, Н.В Горбунов², Ю.А. Крюков¹

A. G Kolesnikov, T. A. Smolyanin, N. V. Gorbunov, Yu. A. Kryukov

¹ГБОУ ВО Московской области «Университет «Дубна», Московская обл.

²Международная межправительственная научно-исследовательская организация «Объединенный институт ядерных исследований», г. Дубна, Московская обл.

Предложена упрощенная модель магнетронного разряда с выводом полуэмпирических формул, позволяющих, зная или вычисляя распределение магнитного поля над поверхностью мишени с помощью программы ELCUT для расчёта полей, прогнозировать форму эрозии мишени МРС. Разработана программа вычисления Pretarger на основе MATLAB. Необходима обкатка программы на сравнение прогнозируемой эрозии с выработанными мишенями для разнообразных магнетронов.

A simplified model of the magnetron discharge is proposed with the output of semi-empirical formulas that allow, knowing or calculating the distribution of the magnetic field over the target surface using the ELCUT program for calculating fields, to predict the shape of the MSS target erosion. A calculation program called Pretarger based on MATLAB has been developed. It is necessary to run the program to compare the predicted erosion with the developed targets for various magnetrons.

Ключевые слова: магнетронная распылительная система, эрозия мишени, магнетронный разряд, магнитная система магнетрона.

Keywords: magnetron sputtering system, target erosion, magnetron discharge, magnetic system of the magnetron.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование магнетронных распылительных систем (МРС) находит всё более расширяющиеся области применения. Конструкционная особенность магнитной системы магнетронов является причиной неоднородного распыления материала с поверхности мишени, характеризующегося неоднородной эрозией мишени.

Параметром, характеризующим форму профиля эрозии, является коэффициент использования материала мишени (КИММ) K_u :

$$K_u = \frac{m_0 - m_k}{m_0} * 100\%,$$

где m_0 – начальная масса мишени, m_k – масса мишени при её утилизации. Масса распылённого материала мишени определяется шириной и формой эрозионной канавки мишени. Значения K_u для типовых магнетронов лежат в диапазоне $K_u = 10 \dots 25\%$. При использовании обычных металлических мишеней очень часто величина K_u не представляет важности. При нанесении тонкоплёночных покрытий из драгоценных и дорогостоящих материалов, например керамических мишеней, спечённых из дорогих порошковых смесей, очень важно использование МРС с максимально возможной эффективностью использования материала мишени. Это, в первую очередь, зависит от конструкции магнитной системы магнетрона. Совершенствуя магнитную систему можно достичь значений $K_u = 65 \dots 80\%$. При этом ширина эрозионной канавки приближается к ширине мишени, а форма приближается к П-образной форме. Расширение эрозионной канавки увеличивает площадь распыления материала и повышает однородность и равномерность получаемого слоя плёнки. Поэтому прогнозирование формы профиля эрозии, определяющей эффективность магнетрона по использованию распыляемого материала и длительность его непрерывной работы, до начала использования магнетрона имеет большой практический интерес, особенно при разработке новых конструкций магнетронов.

В работе [1] с целью прогнозирования формы эрозии мишени предлагается метод расчёта, основанный на предположениях:

- 1) нижняя граница y_0 области ионизации (области магнетронного разряда) определяется тёмным катодным пространством;
- 2) верхняя граница y_{max} области ионизации ограничена значением параллельной поверхности мишени величины компоненты B_x вектора B магнитной индукции равной 0,02 Тл;
- 3) концентрация $n_e(x,y)$ ионизирующих рабочих газ электронов во всем объеме плазмы считается величиной постоянной;
- 4) количество актов ионизации в пространстве области ионизации пропорционально скорости дрейфа электронов и определяются величиной $\frac{B_x(x,y)}{B^2(x,y)}$.

При этих предположениях авторы считают, что профиль $h(x)$ глубины эрозии мишени определяется выражением:

$$h(x) \sim \int_{y_0}^{y_{max}} \frac{B_x(x,y)}{B^2(x,y)} \cdot n_e(x,y) dy \quad (1)$$

Для компьютерной реализации данной модели авторы предлагают использовать программу моделирования и расчета магнитного поля, с помощью которой по размерам конструкции магнетрона и магнитной системы выполняется расчет распределения магнитной индукции B и ее компоненты B_x над поверхностью мишени. На основе данных величины индукции B и ее компоненты B_x по формуле (1) вычисляется двумерная матрица, сложение столбцов которой даёт прогнозируемый профиль эрозии мишени, для упрощения расчётов представляемый в относительных единицах. В описании метода сообщается, что погрешность совпадения зоны выработки мишени с рассчитанным профилем эрозии составляет 25%, что объясняется тем, что лежащие в основе метода предположения и формула (1) создают модель магнетронного разряда, лишь отдалённо соответствующего экспериментальным исследованиям.

Целью работы является построение простой модели магнетронного разряда, основанной на многочисленных экспериментальных и теоретических данных, разработка методики прогнозирования эрозии мишени для любого многообразия конструкций планарных магнетронов и реализация её в виде компьютерной программы расчёта. Входными данными прогнозирования является распределение магнитного поля над поверхностью мишени, получаемое либо прямыми измерениями, используя магнитометр,

либо расчётами модели магнетрона по конструкции магнетрона и его магнитной системы, используя программу моделирования и расчета физических полей.

МОДЕЛЬ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

МРС представляют собой разновидность распылительных систем на основе тлеющего газового разряда в режиме аномального разряда, содержащих магнитную систему, удерживающую электроны плазмы у катода для многократного столкновения электронов с атомами рабочего газа до максимального расхода кинетической энергии электронов на ионизацию атомов рабочего газа. Удержание электронов в замкнутой области скрещенного электрического и магнитного полей происходит за счёт силы Лоренца, заставляющей электроны двигаться параллельно поверхности катода-мишени по циклоидным замкнутым траекториям, образуя в дрейфовом приближении замкнутый ток Холла. Планарные МРС имеют туннелеобразное замкнутое магнитное поле, имеющее в сечении арочный вид (рис. 1г), в которой лишь верхняя часть свода имеет область, где вектор магнитной индукции параллелен поверхности катода. Так как электрическое поле направлено перпендикулярно поверхности, то такая форма магнитного поля воздействует на электроны не одинаково, что приводит к неоднородности плотности ионизирующих электронов и, соответственно, к неодинаковой плотности образования ионов рабочего газа, производящих неоднородное распыление катода-мишени. Наблюдения показывают на то, что конфигурация магнитного поля, распределение яркости свечения плазмы разряда, плотность тока по поверхности катода и распыление (эрозия) катода-мишени взаимосвязаны. На рис. 1 [2] наглядно видна эта связь, представленная в таблице 1.

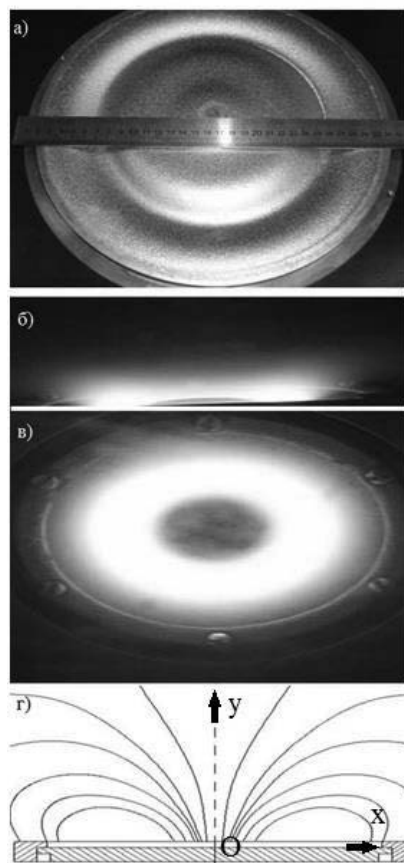


Рис. 1. Связь формы эрозии мишени магнетрона с свечением плазмы и конфигурацией магнитного поля а) фотография выработанной мишени; б) светящаяся плазма с торца мишени; в) вид под углом на светящуюся плазму; г) форма силовых линий магнитного поля в сечении.

Таблица 1.

Сравнение эрозии мишени со свечением плазмы и конфигурацией магнитного поля.

| | эрозия мишени, рис. 1а | свечение плазмы с торца, рис. 1б | свечение плазмы под углом, рис. 1в | конфигурация магнитного поля, рис. 1г |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| границы области | начало на небольшом расстоянии от центра, окончание ограничено прижимным кольцом | начало совпадает с границами свечения плазмы | начало совпадает с границами свечения плазмы | начало ограничено значением $B_x \approx 0$ |
| форма основной области эрозии | имеет плавное увеличение глубины эрозии от центра и краёв к середине мишени, вида $1/x^2$ | плавное нарастание светящегося облака как по толщине, так и по яркости от центра и краёв к середине мишени | плавное нарастание светящегося облака как по толщине, так и по яркости от центра и краёв к середине мишени | увеличение составляющей B_x от центра и краёв к середине как по величине, так и по высоте столбца перпендикулярно мишени |
| Эрозионная канавка | максимальная глубина канавки в середине мишени с плавным уменьшением к краям, вида гауссианы | максимальная яркость светящегося «шнура» приходится на середину мишени с резким ослаблением к центру и краям | максимальная яркость светящегося «шнура» приходится на середину мишени с резким ослаблением к центру и краям | максимальной высоты столбец, где составляющая B_x максимальна, приходится на середину мишени с резким ослаблением к центру и краям |
| Распределение плотности | — | максимальная плотность свечения всей плазмы у поверхности с монотонным ослаблением при удалении от мишени | свечение ослабевает к центру и краям | Максимальное значение величины B_x на поверхности мишени с общим монотонным ослаблением при удалении от мишени |

Анализ таблицы 1 и рис. 1 показывает, что форма эрозии прямо связана с распределением яркости свечения плазмы и конфигурации магнитного поля, определяющего распределение компоненты B_x вектора B магнитного поля. Из анализа следуют выводы:

- 1) основные процессы ионизации рабочего газа, ответственные за распыление и эрозию катода-мишени происходят в приповерхностном слое;
- 2) максимальная яркость свечения плазмы, сосредоточена в приповерхностном слое, совпадает с наибольшей глубиной эрозии мишени;
- 3) границы области эрозии определяются границами свечения плазмы и границами величины B_x отличной от нуля;

- 4) эрозионную область можно условно разделить на область общей эрозии и эрозионную канавку;
- 5) форма области общей эрозии согласуется со свечением плазмы без учёта наиболее яркого свечения плазмы в виде «шнура» и проекцией распределения величины B_x ;
- 6) центр эрозионной канавки совпадает с максимальной яркостью «шнура» плазмы и верхней областью приповерхностных куполообразных силовых линий магнитного поля, там, где вектор индукции параллелен поверхности катода-мишени;
- 7) яркость свечения плазмы ослабевает так же, как ослабевает компонента B_x вектора B магнитного поля.

На основе многолетних исследований магнетронного разряда, обобщённых в работе [2], можно магнетронный разряд разбить на три характерные области: катодный слой, область частично замагниченной плазмы и анодный слой. На рис. 2 схематично показано магнитное поле, электрическое поле и характерные области плазмы. В магнетронном разряде для типичных МРС величина B индукции магнитного поля находится в пределах 0,1 – 0,001 Тл.

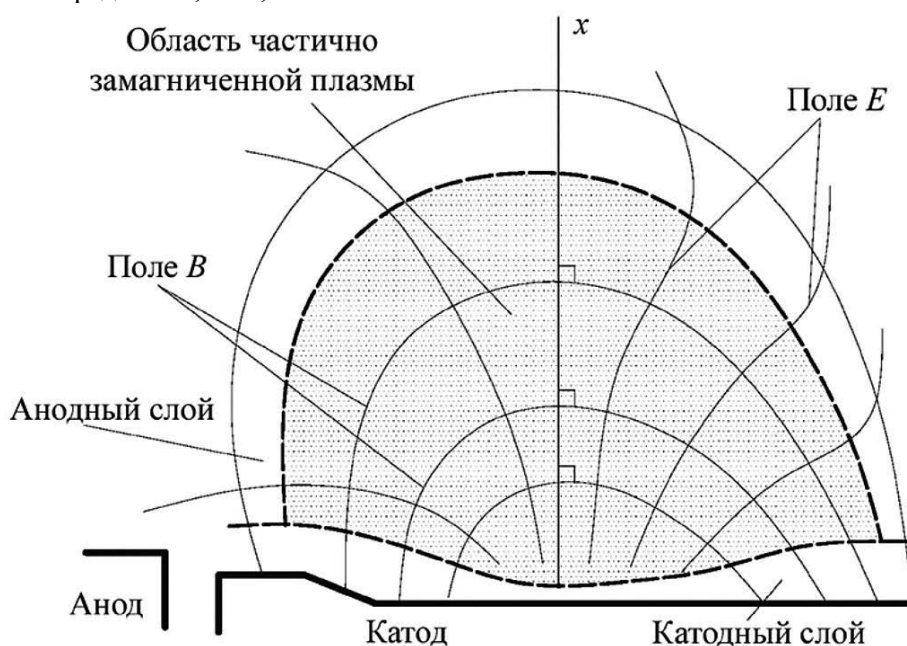


Рис. 2. Схема расположения характерных областей разряда в МРС.

Катодный слой начинается от поверхности катода-мишени. Толщина слоя имеет величину 0,1 – 10 мм и определяется радиусом циклоидного ускоряющегося движения электрона, который в свою очередь определяется приложенным разрядным напряжением U и величиной компоненты B_x вектора B магнитной индукции. В этом слое происходит основное падение напряжения, составляющее 80 – 90% от разрядного напряжения U . Напряженность электрического поля имеет высокое значение $8 \cdot 10^6$ В/м, резко спадающее на краю границы слоя менее $4 \cdot 10^4$ В/м. В катодном слое не происходит ионизации рабочего газа, так как имеется насыщение, определяемое током разряда и ионный ток равен току разряда: $I_i = I$, значит перенос тока разряда осуществляется ионами. Отсутствие процессов ионизации объясняет отсутствие свечения, поэтому катодный слой называют тёмным катодным пространством, ТКП. Здесь концентрация ионов имеет максимальную величину $n_i = n_{max}$, определяемую условием устойчивости магнетронного разряда: $\alpha \cdot \beta = 1$, где $\alpha = 0,001 \div 0,1$ – коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии, зависящий от состава рабочего газа и материала мишени, β – коэффициент электронной ионизации рабочего газа (в связи с малостью величины автоэлектронной и термоэлектронной эмиссией можно пренебречь). Вторичные электроны не составляют ток разряда, а лишь

обеспечивают устойчивость разряда. Так как концентрация вторичных электронов определяется выражением $n_e = \alpha \cdot n_i$, то присутствующий в ТКП электронный ток вторичной электронной эмиссии меньше ионного тока и определяется: $I_e = \alpha \cdot I_i$. Необходимо понимать, что в этой области наряду с электронно-ионным равновесием рабочего газа присутствуют выбитые из мишени-катода атомы, молекулы и кластерные образования материала катода, которые подвергаются перезарядке – ионизации на оба заряда и рекомбинации, а молекулы могут разваливаться на атомы и ионизоваться, собираться в более устойчивые соединения с реакционным газом, молекулы которого разваливаются, ионизируются и вступают в молекулярные связи с материалом мишени. Именно в тонком катодном слое происходят реактивные процессы, а ионы рабочего газа приобретают основную энергию, необходимую для распыления мишени посредством её бомбардировки. Магнетронное распыление очень энергоёмко и составляет около 500 эВ на один атом мишени. Так, на выбивание атомов из мишени всего расходуется энергия 15 – 40 эВ, состоящая из пороговой энергии распыления (энергии связи), составляющей 15 – 30 эВ, и энергии распылённых атомов, лежащей в пределах 1 – 10 эВ. Остальная энергия идет на нагрев мишени. Напряжение магнетронного разряда находится в пределах 250 – 800 В. При увеличении напряжения увеличивается энергия бомбардирующих ионов и возрастает коэффициент распыления, но при этом усиливается также процесс имплантации (внедрения) ионов в кристаллическую решётку мишени, приводящий к её деформации, объёмному искажению и, как следствие, нагреву мишени, требуя эффективное охлаждение.

Область частично замагниченной плазмы примыкает к катодному слою и начинается там, где заканчивается ион-электронное равновесие рабочего газа и вышедшие из мишени электроны закончили набор энергии и начинают расходовать её на ионизацию. Наличие ионизации объясняет свечение этой области. По мере удаления от мишени количество электронов, способных к ионизации уменьшается, уменьшая количество актов ионизации, чем объясняется ослабление свечения плазмы. Начиная от границы с катодным слоем число столкновений настолько частое, что выполняется соотношение $\omega_e \cdot \tau_e \gg 1$; $\omega_i \cdot \tau_i < 1$, где ω_e , ω_i – циклотронные частоты для электронов и ионов; τ_e , τ_i – время между столкновениями для электронов и ионов. Если это условие выполняется, то эквипотенциали электрического поля совпадают с силовыми линиями магнитного поля и справедливо соотношение: $\vec{E} \times \vec{B} = 0$ [3, 4], означающее, что силовые линии электрического поля становятся перпендикулярными силовым линиям магнитного поля. Таким образом, магнитное поле оказывает определяющее влияние на движение электронов, а на ионы ($\omega_i \cdot \tau_i < 1$) нет, они движутся беспрепятственно к катоду вдоль сформированных силовых линий электрического поля. Поэтому эту область разряда и называют частично замагниченной. По мере удаления от мишени, магнитное поле спадает, и указанные условия, постепенно ослабляясь, пропадают. Этим определяются границы распространения области частично замагниченной плазмы, характерные до ослабления поля до 0,001 Тл, где $\omega_e \cdot \tau_e \sim 30 \dots 90$. Эксперименты показывают, что переходная зона начинается там, где величина индукции спадает до величины около 0,02 Тл. Толщина этой области составляет от 10 до 100 мм, а падение напряжения – 10 ... 15% от напряжения U магнетронного разряда. Напряжённость электрического поля по мере удаления от мишени изменяется от $2 \cdot 10^4$ В/м в пограничном слое, сначала спадая быстро, затем всё более плавно и приближается до значений, близких к нулю. Особенностью этой области является существование двух встречно направленных потоков заряженных частиц: ионного, представляющего ионы, образованные ионизацией рабочего газа электронным ударом, и электронного, состоящего из электронов, выбитых из атомов газа при ионизации, которые вместе с ионами составляют разрядный ток, и высокоэнергичных вторичных электронов, энергия которых ослабевает по мере удаления от катода-мишени. Поэтому в отличие от образующихся ионов газа, свободно начинающих ускоренное движение вдоль силовых линий электрического поля в направлении катода, электроны удерживаются воздействием

магнитного поля, заставляющего их двигаться по циклоидным траекториям вдоль поверхности мишени. Движение в сторону анода происходит лишь при столкновении с атомами газа, которое приводит к перескоку электрона на более удалённые от мишени траектории. Если энергия электрона достаточна для ионизации, то происходит перескок и ионизация атома, если энергия электрона недостаточна для ионизации, то перескок происходит в результате упругого столкновения. Поэтому на границе с анодным слоем ток плазмы в основном состоит из электронов, а на границе с катодным слоем – из ионов.

Анодный слой непосредственно примыкает к аноду и служит для транспортировки электронов к аноду. Падение напряжения на анодном слое мало и составляет величину порядка одного-двух потенциалов ионизации рабочего газа, для аргона около 15...30 В. Разрядный ток в анодном слое осуществляется электронами.

Для математического описания формы эрозии мишени систему координат располагаем в плоскости арочного магнитного поля (рис. 1г) и связываем начало O координат с центром мишени магнетрона так, что ось Ox направлена вдоль поверхности мишени, а ось Oy – перпендикулярно поверхности. Вторичные электроны, вылетающие перпендикулярно плоскости мишени, под воздействием электрического поля двигаются с ускорением параллельно оси Oy , воздействие магнитного поля отклоняет электроны перпендикулярно плоскости xOy по циклоиде, радиус которой определяется выражением: $r = \frac{m E}{e B_x^2}$, где $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, $e=1,6 \cdot 10^{-9}$ К. Считая, что высота d ТКП равна r , выполняем её вычисление, исходя из величины компоненты B_x индукции и величины напряжённости электрического поля, которая определяется из соотношения $E = \frac{U}{d}$. В рассматриваемом сечении ускоренные электроны входят в область частично замагниченной плазмы параллельно оси Oy . Благодаря очень частым ионизирующим столкновениям электронов электрическое поле изменяет свою конфигурацию и становится перпендикулярным силовым линиям магнитного поля. Происходит разделение электронов: часть движется перпендикулярно магнитным силовым линиям, часть вдоль силовых линий. Количество первых, удерживаемых воздействием на них магнитного поля, приводящего к вращению по окружности, зависит от угла между вектором скорости электронов и вектором магнитной индукции, который определяется отношением B_x/B . Эти электроны вызывают ионизацию области частично замагниченной плазмы и формируют поле эрозии, глубина которого зависит от количества захваченных электронов, а относительная глубина h_e определяется:

$$h_e(x) \sim \int_{y=d(x)}^{y_{max}} n(x, y) \frac{B_x(x, y)}{B(x, y)} dy, \quad (2)$$

где $d(x)$ – высота ТКП, $n(x, y)$ – концентрация актов ионизации. Другая часть электронов вдоль силовых линий устремляется к верхней точке свода куполообразного поля, где вектор индукции параллелен поверхности мишени. Вследствие этого, в верхней области свода концентрируется большое количество электронов, плотность распределения которых подчиняется распределению Гаусса. Ионизация этими электронами ответственна за формирование эрозионной канавки, ширина которой определяется плотностью тока магнетронного разряда, а глубина – количеством захваченных электронов. Относительная глубина профиля h_g канавки определяется:

$$h_g(x) \sim \int_{y=d(x)}^{y_{max}} n(x, y) \exp\left(-\frac{\left(\frac{B_x(x, y)}{B(x, y)} - 1\right)^2}{2\sigma^2}\right) dy, \quad (3)$$

где $\sigma = \frac{1-B_x/B}{2}$ – дисперсия распределения, задаваемая в зависимости от плотности магнетронного разряда, и характеризуемая допустимым углом отклонения вектора \vec{B} индукции от поверхности катода. Распределение концентрации актов ионизации пропорционально изменению индукции, точнее её компоненты B_x , удерживающей электроны:

$$n(x, y) \sim \frac{B_x(x, y)}{B_{x0}(x, y)}, \quad (4)$$

Итоговый профиль эрозии определяется нормированной суммой нормированного профиля эрозионной канавки и нормированного профиля зоны эрозии, умноженной на подбираемый коэффициент k , который изменяется в пределах от 0,1 до 0,8 и показывает долю удержанных электронов от их общего числа, зависящего от плотности тока магнетронного разряда (электрической мощности подаваемой на магнетрон):

$$h(x) = h_g(x) + k \cdot h_e(x) \quad (5)$$

Программная реализация описанной модели расчёта прогнозируемого профиля эрозии мишени магнетрона названа программой Pretarger (Prediction of target erosion) и построена на языке MATLAB. Входными данными программы являются данные в виде текстовых таблиц распределения индукции магнитного поля $B(x, y)$ и её компонентов $B_x(x, y)$ и $B_y(x, y)$ над поверхностью мишени. Функциональные возможности программы включают расчет профилей выработки материала мишени магнетронных распылительных систем планарного типа любых размеров и конструкций. Программа Pretarger преобразует входные таблицы в матрицы данных, выполняет вычисление по приведённым выше формулам и выводит график профиля $h(x)$ прогнозируемой эрозии мишени. Входные данные в виде таблиц могут быть составлены либо прямыми измерениями распределения магнитного поля с помощью магнетометра, либо с помощью программы магнитоэстетического моделирования и расчёта физических полей по модели конструкции магнетрона и его магнитной системы. В качестве такой программы выбран программный комплекс ELCUT [5], основанный на моделировании физических полей методом конечных элементов. При этом объекты ELCUT обеспечивают постановку новой задачи, описание ее геометрической модели, построение сетки конечных элементов и ее решение. Использование ELCUT особенно целесообразно на этапе проектирования новых магнетронов. Для удобства ввода в программу Pretarger данных, полученных с помощью ELCUT разработан программный скрипт передачи данных.

В качестве примера выполнен расчёт прогнозируемого профиля эрозии мишени дуальной MPC. Схема приведена на рис. 3. Конструкция магнетрона, размером 44x158x438 мм, состоит из основания 1, размером 133x413 мм, выполненного из Ст3, периферийных магнитов 2, размером 20x25x45 мм из NdFeB N48H с коэрцитивной силой по индукции 1353 кА/м и остаточной магнитной индукцией 1,36 – 1,42 Тл, центрального полюсного наконечника в виде наборных планок 3 из Ст3, мишени 4, размером 6x120x400 мм, экрана 7, находящегося под плавающим потенциалом, центрального 5 и периферийного 6 прижимов мишени, корпуса 8 из Д16Т, держателя 9, заземлённого на корпус камеры и изолированного от магнетрона. Два одинаковых магнетрона образуют дуальную распылительную систему. Питание относительно корпуса 9 попеременно подается на катоды магнетронов, гальванически изолированные от всех остальных частей.

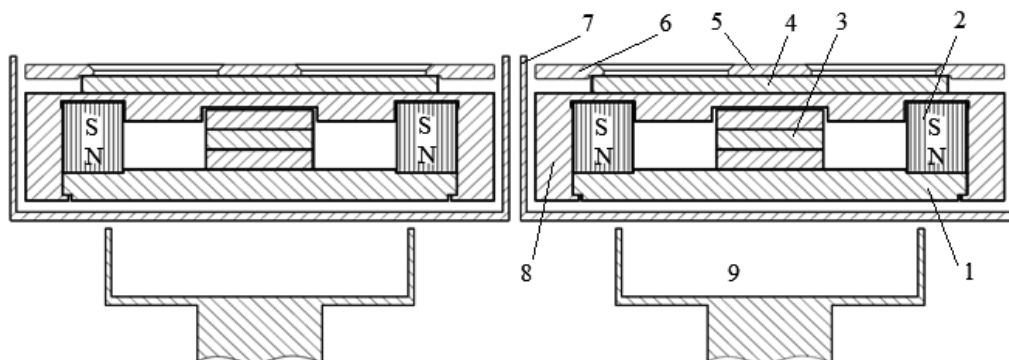


Рис.3. Схема дуальной MPC

В связи с симметрией, с помощью программного комплекса ELCUT вычислена конфигурация и распределение магнитного поля левого магнетрона (рис.4а). Магнитная

система имеет ярко выраженную заложенную проектированием разбалансированность 2-го типа, связанную с отсутствием центрального магнита, и сильное боковое поле. На рис. 5а приводится рассчитанный программой Pretarget прогнозируемый профиль эрозии для случая одной и трёх планок центрального полюсного наконечника. Сильное взаимное искажение магнитного поля, приводящее к неравномерной эрозии, связанное с рядом размещённых магнетронов, существенно ослабляется с применением экрана из Ст3. На рис. 4б показана конфигурация и распределение магнитного поля с экраном, а на рис. 5б прогнозируемый профиль эрозии. Однако, применение магнитного экрана замыкает на себя боковое магнитное поле, приводя к его ослаблению, и образует области, где возможно появление паразитной плазмы. В таблице 2 сведены характерные размеры прогнозируемого профиля эрозии при установке 1 или 3 планок полюсного наконечника для каждого магнетрона дуальной МРС, а также с применением магнитного экрана или без него.

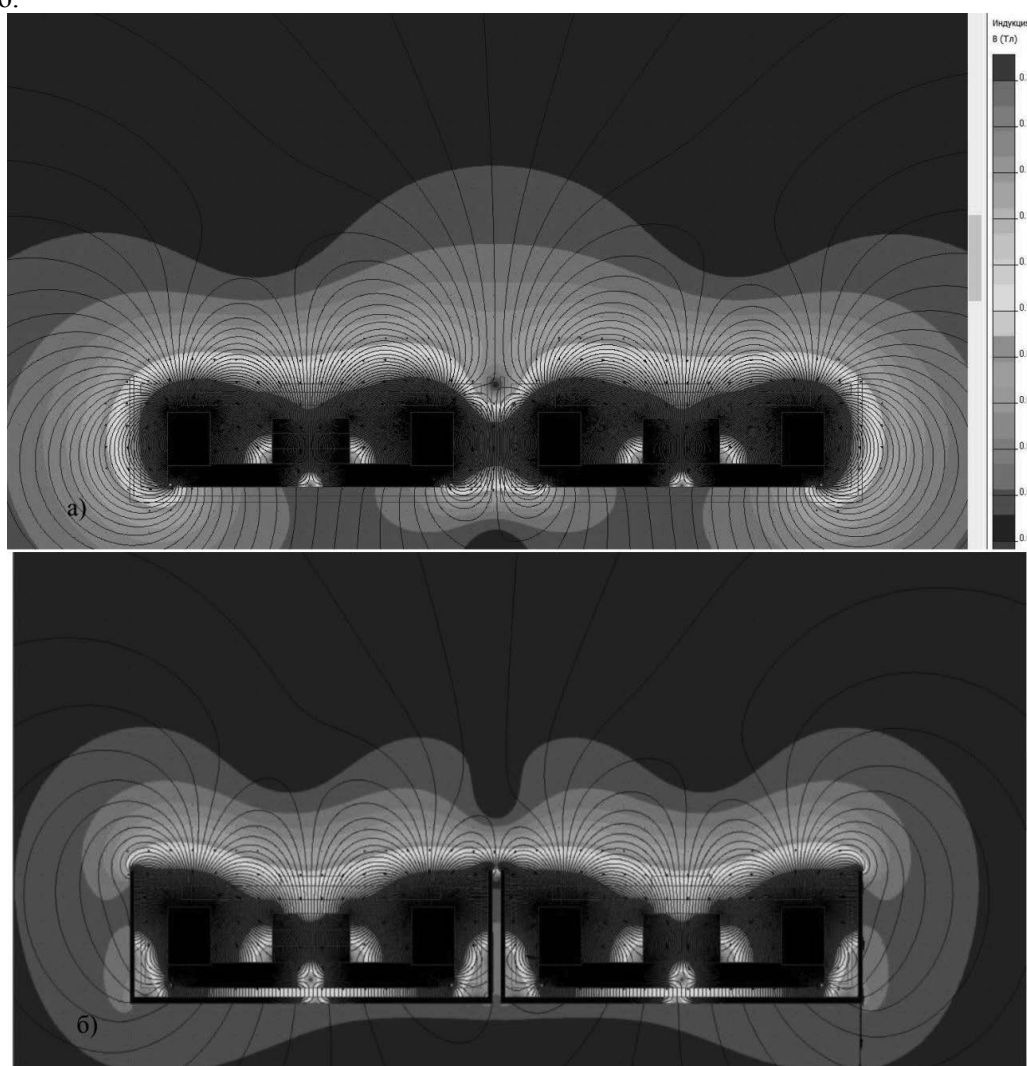


Рис. 4. Конфигурация магнитного поля дуальной системы магнетронов а) из двух одинаковых магнетронов; б) с применением магнитного экрана.

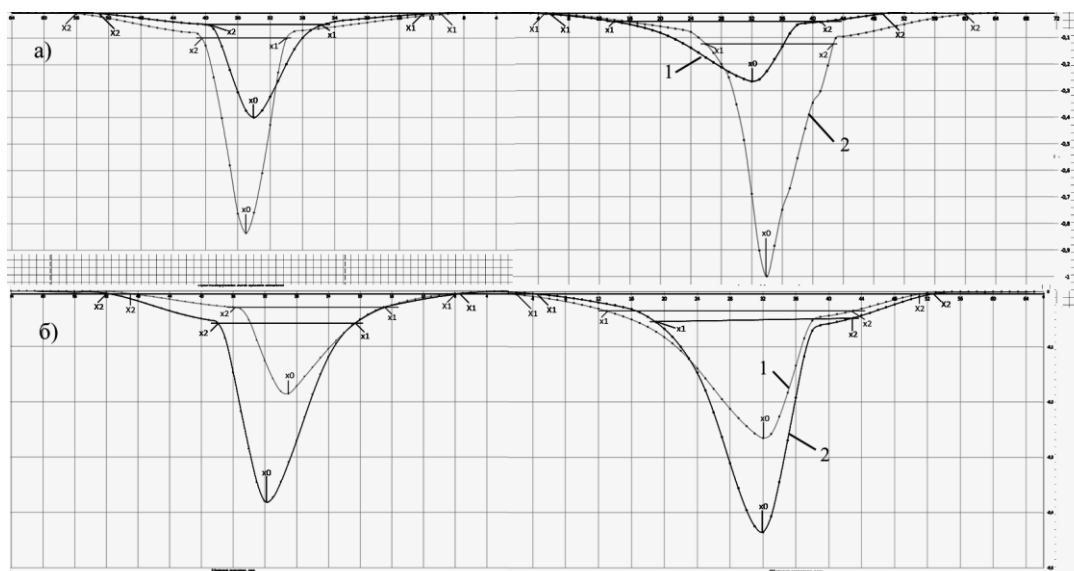


Рис. 5. Прогнозируемый профиль эрозии по левому магнетрону дуальной системы магнетронов 1 – 3 планки, 2 – 1 планка а) дуальный магнетрон без экрана; б) дуальный магнетрон с магнитным экраном

Таблица 2

Прогнозируемый профиль эрозии по левому магнетрону дуальной системы.

| Параметр | сторона мишени | Магнетрон с 1 планкой | | Магнетрон с 3 планками | |
|------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | | без экрана | с экраном | без экрана | с экраном |
| Ширина эрозии (макс. ширина 60) | лев. | 40 | 41 | 45 | 45 |
| | прав. | 43 | 49 | 55 | 48 |
| Ширина канавки | лев. | 14 | 21 | 11 | 17 |
| | прав. | 27 | 30 | 17 | 24 |
| Центр канавки (оптимально 30) | лев. | 34 | 29 | 35 | 32 |
| | прав. | 32 | 32 | 34 | 32 |

ВЫВОДЫ

На основании вычислений распределения магнитного поля над поверхностью мишени дуальной MPC и отдельного магнетрона программным комплексом ELCUT выполнены расчёты прогнозируемой формы эрозии мишени и сделаны выводы:

1) ширина эрозионной канавки больше при установке одной планки полюсного наконечника. При этом магнитное поле на поверхности мишени меньше, чем при установке 3-х планок, что приводит к меньшей скорости распыления;

2) сборка двух одинаковых магнетронов в дуальную систему создаёт сильное взаимное влияние магнитных систем магнетронов и приводит к искажению формы эрозии, уменьшая ширину эрозионных канавок и смещая их к периферии магнетрона, особенно примыкающей области, вводя асимметрию формы эрозии и неравномерность глубины эрозии;

3) введение магнитного экрана значительно ослабляет взаимное влияние магнитных систем магнетронов, улучшая симметричность формы эрозии, возвращая эрозионные канавки в середину и существенно увеличивая эрозионные канавки;

4) введение магнитного экрана уменьшает ширину поля эрозии со смещением к центру мишени, что исключает возможность распыления прижима мишени;

5) введение магнитного экрана создаёт куполообразное магнитное поле между экраном и мишенью, способное вызвать паразитный плазменный разряд, который можно закрыть дополнительным экраном.

После выработки мишени планируется выполнить сравнение прогнозируемого профиля эрозии с формой выработки экспериментальной мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании опубликованных данных, обобщающих многочисленные наблюдения работы магнетронов, предложена упрощённая модель сложных процессов, происходящих в магнетронном разряде. Выведены полуэмпирические формулы расчёта прогнозируемой формы профиля эрозии мишени планарных магнетронов разных конструкций, основанные на знании конфигурации магнитного поля и распределения величины индукции и её компонентов относительно поверхности мишени.

Разработана программа прогнозирования профиля эрозии мишени магнетрона Pretarger, построенная на языке MATLAB и имеющая возможность ввода данных о распределении магнитного поля над поверхностью мишени, вычисляемых по модели магнетрона и его магнитной системы с помощью программного комплекса ELCUT.

Выполнены первые расчёты прогнозируемого профиля эрозии для дуальной MPC, собранной из двух одинаковых магнетронов.

Для получения убедительных результатов достоверности прогнозирования эрозии мишени магнетронов необходимо разработать стенд для измерения распределения над мишенью величины индукции и её компонентов, а также обкатка программы с целью получения статистических результатов сравнения прогнозируемой эрозии с выработанными мишенями для разнообразных планарных магнетронов.

Введение в программу Pretarger учёта внешнего электрического поля позволит прогнозировать профиль выработки мишени с учётом формы и размещения анода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.А. Голосов, С.Н. Мельников, С.П. Кундас, А.П. Достанко «Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем», Проблемы физики, математики и техники, № 2 (3), 2010. – С. 62 – 67.
2. Д.В. Духопельников «Магнетронные распылительные системы. Ч. 1, Устройство, принцип работы, применение», М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
3. С.Д. Гришин, Л.В. Лесков, Н.П. Козлов «Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975. – С. 272.
4. А.И. Морозов «Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков в ЭРД» М.: Атомиздат, 1978. – С. 328.
5. ELCUT программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tor.ru/elcut/>.