

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.94:621.385.64

Карбанович Борис Олегович

Компьютерное моделирование разряда в скрещенных ЕхН полях магнетронных  
распылительных систем

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 02 Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

---

Научный руководитель  
Достанко Анатолий Павлович  
Доктор технических наук, профессор

---

Минск 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Разряд, при котором внешнее магнитное поле оказывается перпендикулярно электрическому, принято называть разрядом в скрещенных полях. В последние годы интерес к такому типу разряда возрос. Прежде всего, это связано с его использованием в технологии создания тонких пленок.

В последние годы широкое распространение получил метод магнетронного распыления, вытесняя энергоемкий и экономически менее эффективный метод термического испарения. Имея целый ряд преимуществ по сравнению с резистивным и электронно-лучевым испарением, диодным и триодным распылением, магнетронное распыление обладает оптимальным сочетанием ряда уникальных свойств, а именно: возможность получения больших скоростей распыления материалов, низкий нагрев подложек, относительная простота оборудования. При использовании МРС имеется возможность распыления тугоплавких металлов и сплавов с хорошим сохранением состава при высоких скоростях осаждения и малой инерционностью процесса. Таким образом, можно сказать, что магнетронное распыление по существу заняло лидирующее положение среди всех других вакуумных методов получения тонкопленочных структур, продолжая совершенствоваться и развиваться.

Моделирование магнетронного разряда на основе магнитного поля, давления газа и напряжения является перспективным с научной точки зрения, поскольку это касается плазмы, взаимодействующей с магнитным полем, которое сложно описать математически

Для анализа и понимания структуры таких разрядов, в первую очередь для описания электронной компоненты, необходимо применение кинетической нелокальной теории тлеющего разряда.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы: Комплексное исследование различных физических характеристик разряда постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях в магнетронной распылительной системе.

Задачи исследования: Разработка модели магнетронного разряда в скрещенных  $E \times H$  полях магнетронных распылительных систем. Определение пространственных параметров ионизирующей части электронной компоненты - распределение ее плотности, а также среднеинтегральную величину частоты ионизации по высоте разряда в рабочем режиме магнетрона. Определение области локализации разряда. Определение основных факторов, влияющих на распределение ионизирующих электронов в магнетронном разряде.

Объект исследования: Гомогенные и гетерогенные процессы в плазме в скрещенных  $E \times H$  полях магнетронных распылительных систем.

Предмет исследования: Технологический процесс, моделирование параметров магнетронного разряда.

## ОБЗОР ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ COMSOL MULTIPHYSICS

С помощью пакета COMSOL Multiphysics можно моделировать практически все физические процессы, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных (УРЧП). Далее задачи решаются методом конечных элементов (МКЭ).

COMSOL Multiphysics позволяет решать мультифизические задачи, которые описываются комбинацией различных УРЧП и благодаря этому производится комплексный анализ физической модели.

Графическая среда COMSOL Desktop™ состоит из нескольких частей. Основная часть среды в которой изображается структура модели называется Model Builder (Построитель моделей). Интерфейс аналогичен дереву построения в CAD системах, которые к настоящему времени представлены на рынке. Пользователь видит в процессе подготовки модели все ее основные части в четырех основных точках: подготовка геометрии (Geometry), генерирование сетки (Mesh), вариант анализа (Study) и обработка результатов расчетов (Results). Одновременно можно подготовить несколько вариантов модели.

Модуль AC/DC предназначен для моделирования задач электромагнитных явлений как переменного, так и постоянного тока. При помощи предварительно подготовленных приложений можно моделировать электромоторы, электромагниты, трансформаторы напряжения и тока, индукторы, конденсаторы, микросенсоры и др. Модуль AC/DC содержит приложения для общего статического и квазистатического электромагнетизма двухмерных (2D) и трехмерных (3D) моделей, включая симметрические геометрии. При расчетах моделей можно осуществить статический, гармонический и переходный анализ или анализ явлений во времени. Также можно провести расчеты для заданной частоты. При моделировании можно включить в анализируемую модель другие физические приложения как, например, теплопередача, Джоулева теплота или индукционный нагрев. Физическое моделирование можно связать с решением электрических цепей заданных в формате SPICE, представляемых как возбуждающий или демпфирующий элемент. В Модуле AC/DC находятся также приложения для вращающихся машин, использующих подвижные сетки (метода ALE) в 2D измерении. Для моделирования неограниченных областей можно использовать бесконечные элементы (“Infinite elements”).

Модуль Плазмы предназначен для решения всех типов неядерных низкотемпературных плазменных реакторов. Модуль дает возможность решать задачи из следующих областей:

- Индуктивно-связанная плазма - Inductively Coupled Plasmas (ICP)
- Емкостно-связанная плазма - Capacitively Coupled Plasmas (CCP)
- Микроволновая плазма
- Электрические разряды (DC discharges)

Детальную схему электрической цепи можно включить в модель посредством редактора в модулях AC/DC и RF. Процесс моделирования упрощен приложениями, в которых автоматически запускаются сложные связи между различными физическими явлениями.

Для моделирования тлеющего разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях магнетронных распылительных систем необходимо использовать модули AC/DC и плазмы.

## **МАГНЕТРОННЫЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

Магнетронные распылительные системы получили свое название от СВЧ приборов М-типа (магнетронных устройств), хотя, кроме наличия скрещенных электрического и магнитного полей ничего общего с ними не имеют. Магнетронные системы относятся к системам распыления диодного типа, в которых распыление материала происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа, образующимся в газе аномально тлеющего разряда. Высокая скорость распыления, характерная для этих систем, достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля.

Основными элементами магнетронной распылительной системы являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

Основные рабочие характеристики магнетронных распылительных систем – напряжение на электродах, ток разряда, плотность тока на мишени и удельная мощность, величина индукции магнитного поля и рабочее давление. От величины и стабильности перечисленных параметров, которые взаимно связаны между собой, зависят стабильность разряда и воспроизводимость

процесса нанесения тонких пленок. Магнетронные системы относятся к низковольтным системам распыления. Напряжение питания не превышает 1000 В постоянного тока. Рабочее напряжение составляет 200 – 700 В, на мишень обычно подается отрицательный потенциал, а на анод – нулевой потенциал. Однако в магнетронных системах с плоским катодом для более полного улавливания вторичных электронов рекомендуется на анод подавать небольшое положительное смещение (40 – 50 В). В некоторых системах предусматривается подача отрицательного смещения на подложку (100 В) для реализации распыления со смещением.

Конструкции современных магнетронных распылительных систем весьма разнообразны. Катод представляет собой цилиндрический стержень, расположенный в центре камеры, а подложки располагаются по цилиндрической поверхности анода вокруг катода. Коаксиальные конструкции электродов, имея в основном аналогичные с планарными конструкциями рабочие характеристики, позволяют значительно увеличить (в 3 – 5 раз) производительность за счет увеличения площади одновременно обрабатываемых подложек. Кроме того, в этих системах на порядок меньше интенсивность бомбардировки подложек вторичными электронами, что достигается наличием аксиального магнитного поля и заземленных экранов по торцам цилиндрического катода. Еще более снижает бомбардировку подложек вторичными электронами наличие между катодом и держателем подложек цилиндрического сетчатого анода. При длительной работе температура подложек в такой системе не превышает 320 К. Но в то же время из-за сетчатого анода (улавливающего электрода) уменьшается скорость осаждения пленки.

Усовершенствование коаксиальных систем в целях увеличения скорости осаждения привело к созданию катода в виде катода с дисками по торцам. Такая конструкция позволяет значительно увеличить интенсивность разряда благодаря осцилляции электронов вдоль поверхности катода между его торцевыми дисками, достичь плотностей тока  $300 \text{ А/м}^2$  и скоростей осаждения до 17 нм/с. Существенным недостатком этой системы является низкая равномерность распределения пленки по толщине, связанная с неравномерным распылением мишени.

Дальнейшее развитие магнетронных распылителей привело к созданию планетарных систем, в которых эффект экранирования потока распыленных атомов полностью устранен. Магнитная система монтируется в водоохлаждаемом держателе и не вносит загрязнений в рабочую камеру. Планетарные магнетронные системы позволяют создать еще более высокие плотности тока и достичь скоростей осаждения, сравнимых со скоростями, характерных для метода термического испарения в высоком вакууме.

В настоящее время известно множество конструктивных вариантов магнетронных распылительных систем, но наибольшее распространение в промышленности получили системы с мишенями конической и плоской форм. Конструкции магнетронных систем должны обеспечивать высокую скорость распыления, минимальное отрицательное воздействие на обрабатываемые структуры, высокий коэффициент использования материала мишени, возможность распыления разнообразных материалов, нанесение пленочных покрытий на большие площади с минимальной неравномерностью по толщине, высокую надежность работы, большой срок службы и другие. Большинство из этих требований удовлетворяется правильным выбором конструкции магнетронной и формы мишени.

Магнитная система, являющаяся одним из конструктивных элементов магнетронной системы, должна формировать у поверхности мишени поле заданной конфигурации и величины с минимальным рассеянием для создания эффективной магнитной ловушки для электронов.

## **ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ $E \times H$ ПОЛЯХ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Применение вакуумно-плазменной технологии модификации поверхности материалов и изделий основано на получении низкотемпературной плазмы, для генерации которой используется тлеющий разряд. Газоразрядные системы на основе тлеющего разряда с полым катодом большой площади используются при обработке крупногабаритных изделий. Напряжение горения такого разряда на уровне нескольких сотен вольт, внешняя инжекция электронов обеспечивает возможность регулировки тока разряда и напряжения горения независимо от геометрии разрядного промежутка, рода используемого газа и его давления.

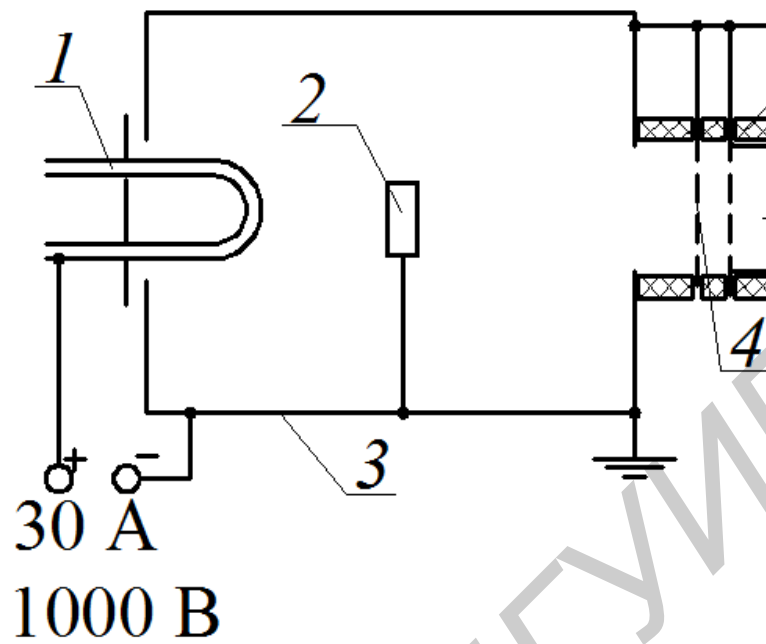
При тлеющем газовом разряде эмиссия электронов является результатом бомбардировки катода ионами, образующимися в разрядной плазме и слое положительного объемного заряда между ними. Особенностью разряда низкого давления в полом катоде является возможность существования свободного режима с двойным электрическим слоем на катоде и высокой плотностью тока быстрых электронов в объеме разряда, значительно превышающей плотность тока с катода. Ионизацию газа в этих разрядах совершает малая доля быстрых электронов, живущих в объеме, но вероятность ионизации газа оказывается достаточно высокой. При этом скорость ионизации быстрыми электронами значительно превышает скорость ионизации плазменными электронами.

Рассмотрим газовый разряд внутри цилиндрической катодной полости длиной  $D$  и диаметром  $D$ . Анод (в виде двух трубок диаметром  $\Phi = 12$  мм и общей площадью  $S_a$ ) расположен на боковой стенке катода (рисунок 1). Катодная полость заполнена плазмой, между которой и катодом сосредоточено катодное падение потенциала  $U$  (напряжение разряда). Ионы, ускоренные в катодном слое, обуславливают ионно-электронную эмиссию с поверхности катода, а образующиеся за счет ионно-электронной эмиссии электроны ускоряются и растрачивают приобретенную энергию в столкновениях с нейтральными атомами и обеспечивают самоподдержание разряда.

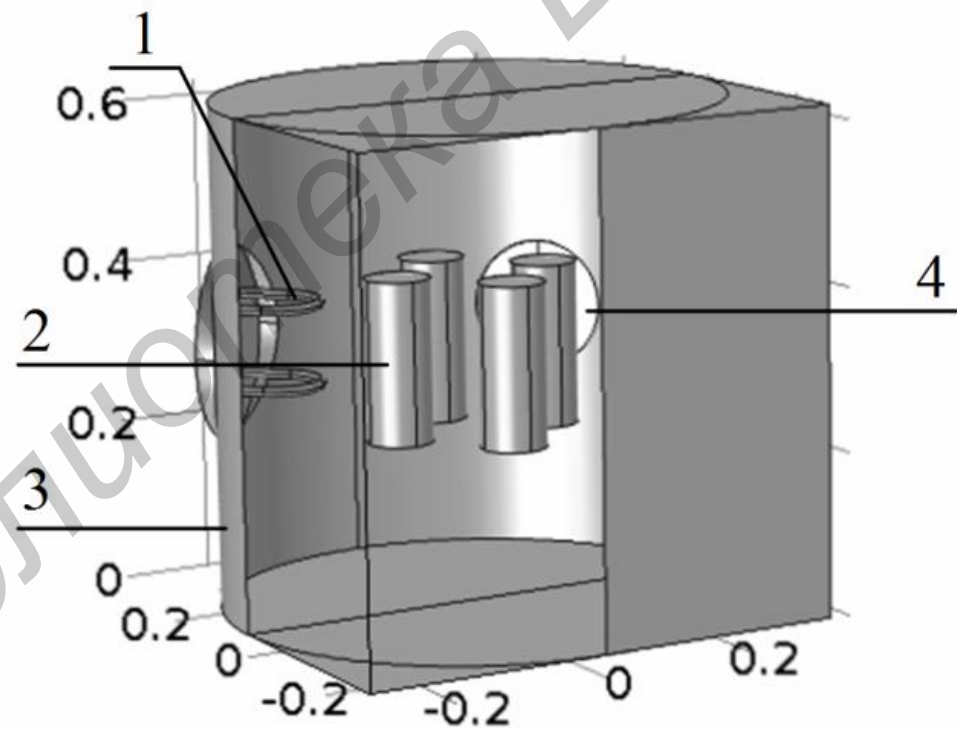
В самостоятельном режиме горения (давление аргона  $p = 0,65$  Па) при изменении напряжения зажигания разряда  $U_{мл}$  от 200 до 750 В ток разряда  $I_{мл}$  увеличивается от 2 до 35 А (площадь анода  $S_a = 500$  см<sup>2</sup>). При изменении площади анода изменение напряжения горения достигало 25%, что связано с эффективностью утилизации энергии первичных электронов на неупругие столкновения с газом, которая уменьшается при увеличении площади анода.

В несамостоятельном режиме горения в интервале изменения  $U_{мл}$  от 0 до 350 В ток  $I_{мл}$  линейно растет от 0 до 35 А. Экспериментально получено, что радиальное распределение параметров плазмы основного разряда в несамостоятельном режиме горения аналогично распределению параметров плазмы для самостоятельного режима горения этого разряда. При изменении давления несамостоятельный режим горения аналогичен самостоятельному режиму.





а



б

1 – анод тлеющего разряда; 2 – образцы; 3 – полый катод тлеющего разряда;

4 – окно дугового разряда

Рисунок 1 Схема экспериментальной установки (а) и расчетная область (б)

Распределение концентрации плазмы в полом катоде исследовано численно с применением гидродинамической модели. Интегрально-дифференциальное уравнение Больцмана аппроксимировано гидродинамическими уравнениями, описывающими электронные плотности заряженных частиц ( $n_e$ ) и их средние энергии ( $n_\varepsilon$ ), как функцию времени и пространства. В таблице 1 показываються столкновения и реакции, использованные для расчетов транспортных коэффициентов и для проведения численного эксперимента.

Таблица 1 – Моделируемые столкновения и реакции

Реакция	Формула	Тип	Потеря энергии, $\Delta_\varepsilon$ (эВ)
1	$e+Ar \Rightarrow e+Ar$	Упругий	0,000
2	$e+Ar \Rightarrow e+Ar^*$	Возбуждение	11,500
3	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	Ионизация	15,800
4	$e+Ar^* \Rightarrow 2e+Ar^+$	Ионизация	4,427

Уравнения переноса электронов ( $e$ ) и плотности энергии ( $\varepsilon$ ) имеют вид:

$$\frac{\partial n_{e,\varepsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{e,\varepsilon} + \mathbf{E} \cdot \Gamma_{e,\varepsilon} = R_{e,\varepsilon}, \Gamma_{e,\varepsilon} = -(\mu_{e,\varepsilon} \cdot \mathbf{E})n_{e,\varepsilon} - D_{e,\varepsilon} \cdot \nabla n_{e,\varepsilon}. \quad (1)$$

здесь  $\Gamma_{e,\varepsilon}$  – потоки электронов и энергии,  $\mu_{e,\varepsilon}$  – подвижности,  $\mathbf{E}$  – электрическое поле,  $D_{e,\varepsilon}$  – коэффициенты диффузии,  $R_{e,\varepsilon}$  – скорость ионизации и энергетические потери/приобретения из-за неупругих столкновений. Рассматривались 2-х и 3-х мерные модели, в которых соотношение геометрических размеров катода и анода соответствует экспериментальной системе. Моделировались режимы самостоятельного разряда и разряда с дополнительной инжекцией электронов.

При увеличении давления газа (аргон) от 0,65 до 2 Па концентрация и температура плазмы изменяются незначительно. При присутствии обрабатываемых деталей концентрация плазмы уменьшается. Это объясняется тем, что обрабатываемые детали увеличивают эффективность перехвата быстрых электронов, играющих главную роль в процессе ионизации газа.

Численно исследована генерация низкотемпературной плазмы в тлеющем разряде с полым катодом большой площади в самостоятельном режиме и режиме поддержания разряда электронным пучком, извлеченным из плазмы вспомогательного дугового разряда. Показано, что в самостоятельном тлеющем разряде с полым катодом достигается высокая однородность плазмы с концентрацией до  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ , что согласуется с экспериментом.

При присутствии обрабатываемых деталей концентрация плазмы уменьшается. Чтобы ее поддержать, необходимо проводить дополнительную инжекцию электронов вспомогательного разряда.

Библиотека БГУИР

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было проведено комплексное исследование различных физических характеристик разряда постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях в магнетронной распылительной системе.

Экспериментально исследованы свойства получаемых при магнетронном напылении покрытий. Проведен анализ зависимостей между основными параметрами магнетронного разряда и свойствами покрытий. На основе этих зависимостей установлена возможность управления процессом напыления с целью получения покрытий с заданными свойствами.

Детально изучены технологии нанесения покрытий с заданными свойствами при непрерывном контроле толщины наносимых покрытий а также проведено моделирование магнетронного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях магнетронных распылительных систем.

В процессе моделирования определены пространственные параметры ионизирующей части электронной компоненты - распределение ее плотности, а также среднеинтегральная величина частоты ионизации по высоте разряда в рабочем режиме магнетрона.

Также были определены область локализации разряда и основные факторы, влияющие на распределение ионизирующих электронов в магнетронном разряде.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Francis F. Chen. Industrial applications of low – temperatures plasma physics. Phys. Plasmas vol. 2, n. 6, June 1995, pp. 2164 – 2175.

[2] N. Singh, R. Kist, H. Thiemann. Experimental and numerical studies on potential distributions in a plasma. Pl. Phys., vol. 22, 1980, pp. 695 – 707.

[3] Плазменные ускорители/Под общей редакцией Л. А Арцимовича. – М.: Машиностроение, 1973.

[4] Данилин Б. С., Неволин В. К., Сырчин В. К. Исследование магнетронных систем ионного распыления материалов. – Электронная техника. Сер. Микроэлектроника, 1977, вып. 3 (69), с. 37 – 44.

[5] Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982.

[6] L. Vriens. Energy balance in low – pressure gas discharges. J. Appl. Phys. vol. 44, n. 9, September 1973, pp. 3980 – 3989.

[7] J. –P. Boeuf. A two – dimensional model of dc glow discharges. J. Appl. Phys. vol. 63, n. 5, March 1998, pp. 1342 – 1349.

[8] S. Maniv. Generalization of the model for I – V characteristics of dc sputtering discharges. J. Appl. Phys. vol. 59, n. 1, January 1986, pp. 66 – 70.

[9] W. D. Westwood, S. Maniv. The current – voltage characteristic of magnetron sputtering systems. J. Appl. Phys. vol. 54, n. 12, December 1983, pp. 6841 – 6846.

[10] F. A. S. Ligthart, R. A. J. Keijser. Two – electron group model and electron energy balance in low - pressure gas discharges. J. Appl. Phys. vol. 51, n. 10, October 1980, pp. 5295 – 5299.

[11] A. Fiala, L. C. Pitchford, J. P. Boeuf. Two – dimensional, hybrid model of low – pressure glow discharges. Phys. Review. ser. E, vol. 49, n. 6, June 1994, pp. 5607 – 5622.

[12] K. Kuwahara, H. Fujiyama. Application of the Child – Langmuir Law to Magnetron Discharge Plasmas. IEEE Trans. Plasma. Sci., vol. 22, n. 4, August 1994, pp. 442 – 448.

[13] T. E. Sheridan, M. J. Goeckner, J. Goree. Electron distribution Functions in a sputtering Magnetron Discharge. Jap. J. Appl. Phys., vol. 34, P. 1, n. 9A, September 1995, pp. 4977 – 4982.

[14] Tsutomu Muira, Tatsuo Asamaki. A theory on planar magnetron discharge. Thin Solid Films 281–282, 1995, pp. – 190 – 193.

[15] F. A. Green, B. N. Chapman. Electron effects in magnetron sputtering. J. Vac. Sci. Technol., vol. 13, n. 1, January/February 1976. pp. 165–168.

[16] J. G. Kirk, D. J. Galloway. The evolution of a test particle distribution in a strongly magnetized plasma. *Pl. Phys.*, vol. 24. n. 4, 1982, pp. 339 – 359.

[17] N. D' Angelo, M. J. Alport. On “anomalously” high ion temperatures in plasma discharges. *Pl. Phys.*, vol. 24. n. 10, 1982, pp. 1291 – 1293.

[18] M. Katsch, K. Wiesmann. Relaxation of supratermal electrons due to coulomb collisions in a plasma. *Pl. Phys.*, vol. 22, 1980, pp. 627 – 638.

[19] Технология интегральных схем (Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов) / А. П. Достанко, 206 с., Минск Вышэйш. школа 1982.

[20] Достанко А.П. и др. - Технологические процессы и системы в микроэлектронике: плазменные, электронно-ионно-лучевые, ультразвуковые. - Минск: Бестпринт, БГУИР, 2009, 199 с.

[21] Данилин В.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы// М. Радио и связь, 1982, 72 с.

[22] Ананьин П.С. и др. Магнетронная распылительная система// RU 2107971 С1, 27.03.1998.

[23] Сочугов Н.С., Соловьев А.А., Захаров А.Н. / Магнетронная распылительная система // RU 2242821, 20.12.2004.

[24] Соловьев А.А., Сочугов Н.С., Оскомов К.В., Захаров, А.Н. Свойства многослойных ZnO:Ga/Ag/ZnO:Ga покрытий, наносимых магнетронным распылением.// *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2010, Т. 46. № 4, С. 361-366.

[25] Бугаев С. П., Захаров А.Н., Оскомов К.В, Сочугов Н.С. Электрохромизм в пленках триоксида вольфрама, полученных методом реактивного магнетронного распыления вольфрамовой мишени. // *Изв. ВУЗов Физика*, 1996, т.39, №5, С.4-9.

[26] Чутко В.М. Применение ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения в ионно-лучевой технологии обработки оптических деталей // *Вакуумная техника и технология*, 1992, т.П, №1, с.42-47.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А] Карбанович, Б.О. Исследование динамики концентрации плазмы и электронной температуры при изменении параметров магнетронной распылительной системы / Б.О. Карбанович, В.Л. Ланин. – Минск, 2014.

Библиотека БГУИР