

6. Mo, W. Content-Based Retrieval System for Endoscopic Images / W. Mo, A. Zanchao Zhang // International Journal of Information Technology. – 2005. – Vol. 11(12). – P. 76–79.

7. Ciobanu, A. Iris Identification Based on Optimized LAB Histograms Applied to IRIS Partitions / A. Ciobanu, M. Luca (Costin), I. Pavaloi, T. Barbu, // Autom. & Calc. – 2014. – P. 37–48.

8. Costin, H.N. Fuzzy rule-based decision support system for haematological diseases classification / H.N. Costin, M. Costin, M. Zbancioc // Proc. Intern. Federation for Medical & Biomedical Eng. – 2001. – Vol. 1. – P. 433–436.

**С.Н. Мельников, Д.А. Голосов, С.М. Завадский, Д.Э. Окоджи,
Г.М. Рубан, Д.Д. Котинго**

Центр 10.1 «Электронных технологий и технической диагностики технологических сред и твердотельных структур»,
УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ СКВОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Введение

В настоящее время магнетронное распыление заняло лидирующие позиции среди методов нанесения тонких пленок [1]. К достоинствам метода можно отнести высокие скорости распыления, сравнительно низкое энергетическое воздействие на подложку, возможность нанесения, как слоев металлов, так и их соединений. Магнетронные распылительные системы (МРС) являются по существу автономными источниками распыляемого материала и допускают широкое разнообразие, как форм распыляемой поверхности мишени, так и пространственного взаимного расположения мишени и подложки. С применением метода наносят твердые, износостойкие, антикоррозионные, декоративные покрытия и покрытия со специфическими оптическими, или электрическими свойствами. Для предприятий, занимающихся нанесением покрытий, необходимо оборудование, которое обеспечивает высокую производительность нанесения слоев с длительным использованием мишени и высокой равномерностью по толщине без эмпирического подбора взаимного расположения составных частей системы. Это означает, что производителям магнетронного оборудования необходимо на этапе проектирования предсказывать характеристики разрабатываемой конструкции магнетрона. В данном случае применение методов компьютерного моделирования позво-

ляет исключить ошибки при проектировании установок и систем магнетронного распыления и значительно уменьшить сроки и затраты на разработку. При этом желательным является возможность оптимизации параметров систем и процессов путем моделирования, не прибегая к выполнению реального эксперимента.

Таким образом, целью работы была разработка относительно простой методики сквозного моделирования магнетронных систем от прогнозирования зоны эрозии магнетрона до формирования покрытия на подложке, которая бы оперировала реальными параметрами процесса и позволяла с достаточной для практического применения точностью производить расчет без использования мощных компьютерных ресурсов.

1. Моделирование электромагнитных полей и оптимизация магнитной системы магнетрона

Решение подобной проблемы становится возможным только в том случае, если общая задача разбивается на ряд последовательных стадий, которые связаны между собой набором общих данных.

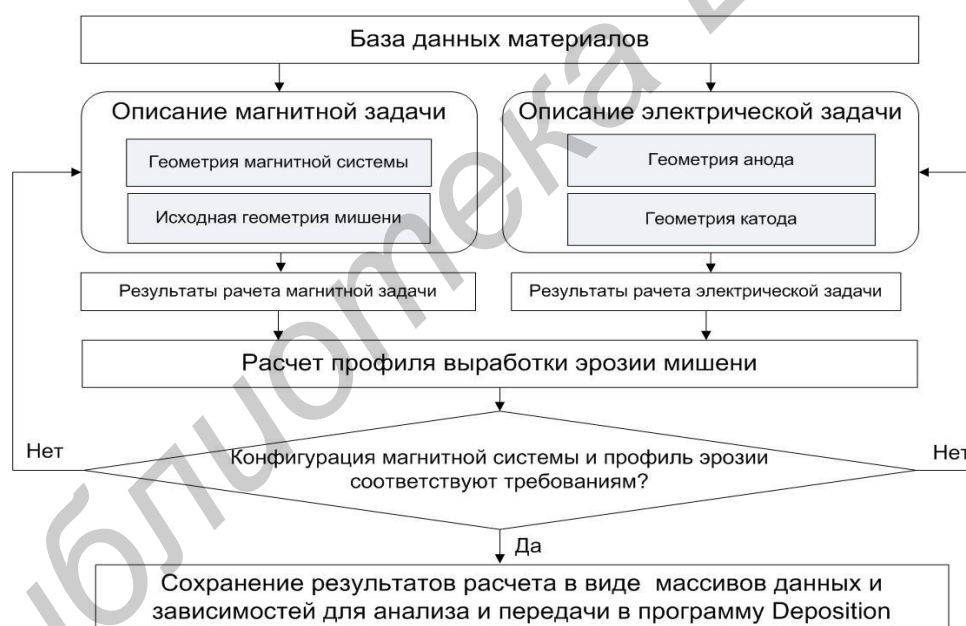


Рисунок 1 – Алгоритм расчета профиля эрозии с возможностью оптимизации конфигурации магнитной системы магнетрона

Для расчета требуемой конфигурации магнитной системы МРС и профиля эрозии мишени разработан алгоритм, представленный на рисунке 1. Прогнозирование зоны эрозии мишени реализовано в программном модуле *TargProf* на базе оригинального метода, основанного на определении зоны ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона [2]. При этом предполагается, что ионизация рабочего газа в основном происходит в области скрещенных $E \times H$

полей, где вектор магнитной индукции практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и индукция магнитного поля имеет величину не ниже определенного значения.

В качестве исходных данных программного модуля используются результаты расчета электромагнитных полей в разрядной зоне магнетрона, которые рассчитываются с помощью программного комплекса моделирования двумерных полей *ELCUT*. При этом конструкция ионно-плазменного устройства представляется в виде ряда подобластей, каждой из которых приписывается определенный набор физических свойств. Для расчета проектируемых ионно-плазменных систем созданы базы данных электрофизических и магнитных свойств применяемых материалов. Объекты *ELCUT* обеспечивают постановку задачи, описание ее геометрической модели, построение сетки конечных элементов и ее решение. Результаты расчета с помощью технологии *ActiveField* передаются из программного комплекса *ELCUT* программному модулю *TargProf*. Разработанная программа формирует матрицы индукции магнитного поля, горизонтальной составляющей индукции магнитного поля, напряженности электрического поля. В полученной матрице горизонтальной составляющей индукции магнитного поля с учетом граничных условий выделяется зона ионизации рабочего газа, для каждой точки пространства, рассчитывается относительная частота ионизации и создается матрица выходных результатов. Профиль распределения плотности ионного тока мишени формируется путем интегрирования распределения относительной скорости ионизации во всем объеме плазмы

$$j_i(r) = \int_0^{z^*} n_e(r, z) v_i(r, z) dz, \quad (1)$$

где n_e – плотность ионизирующих электронов, v_i – частота ионизации, z^* – граница плазмы. Средняя частота ионизации, определяемая функцией распределения электронов по энергиям. Далее с учетом параметров материала мишени рассчитывается профиль эрозии мишени магнетрона и коэффициент использования материала мишени. Программа *TargProf* позволяет рассчитать профиль эрозии мишени, коэффициент использования материала мишени и полное время работы мишени. Верификация предложенной модели проведена на ряде разрабатываемых МРС и установлено, что погрешность моделирования профиля эрозии не превышала 16 %.

Результаты расчета магнитных полей также используются для анализа магнитных потоков бокового и центрального магнитов, индукции магнитного поля в разрядной зоне и уровня несбалансированности магнитной системы МРС

[4]. Степень несбалансированности магнитной системы магнетрона оценивается с помощью коэффициента геометрической несбалансированности

$$K_G = \frac{Z_0}{2\bar{R}}, \quad (2)$$

где Z_0 – расстояние от поверхности магнита до точки на оси МРС, в которой вертикальной составляющей индукции магнитного поля изменяет направление на противоположное, \bar{R} – радиус максимальной эрозии в зоне распыления.

Результатом моделирования является оптимальная конфигурация магнитной системы с точки зрения разрядных характеристик и уровня ионной бомбардировки растущей пленки и прогнозируемый профиль эрозии мишени, основные параметры которого передаются программному комплексу *Deposition* для расчета толщины тонкопленочных покрытий.

2. Моделирование распределения толщины нанесенного покрытия

Для расчета скорости нанесения слоев для аксиальных и протяженных магнетронных распылительных систем при различной конфигурации систем перемещения подложек на основе оригинальных методик и результатов собственных экспериментов разработаны математические модели. Модели описывают следующие конфигурации процессов магнетронного распыления [3–6]: нанесение слоев на стационарные подложки; нанесение слоев на линейно перемещаемые подложки; нанесение на подложки, расположенные на вращающемся барабанном подложкодержателе для двух конфигураций процесса: I – магнетрон располагается снаружи вращающегося барабанного подложкодержателя; II – магнетрон располагается внутри вращающегося барабанного подложкодержателя; магнетронное нанесение при планетарном вращении подложек; нанесение слоев при распылении мозаичных мишеней с произвольным расположением вставок.

На основе предложенных моделей создан программный комплекс *Deposition* (рисунок 2), который позволяет рассчитать распределение скорости нанесения и толщину наносимых слоев в любой точке подложки для различных конфигураций зон распыления магнетронных распылительных систем и систем перемещения подложек [2]. Расчет основан на интегрировании потоков с каждой точки зоны распыления. При расчетах учитывается реальное распределение плотности ионного тока в зоне распыления, зависимость эффективного коэффициента распыления и ионно-электронной эмиссии материала мишени от напряжения разряда, термализация распыленного потока. Однако поскольку в разработанных моделях не учитываются эффекты термализации распыленного потока, то анализ процессов магнетронного нанесения слоев возможно проводить при рабочем давлении в зоне нанесения не более 1,0 Па.

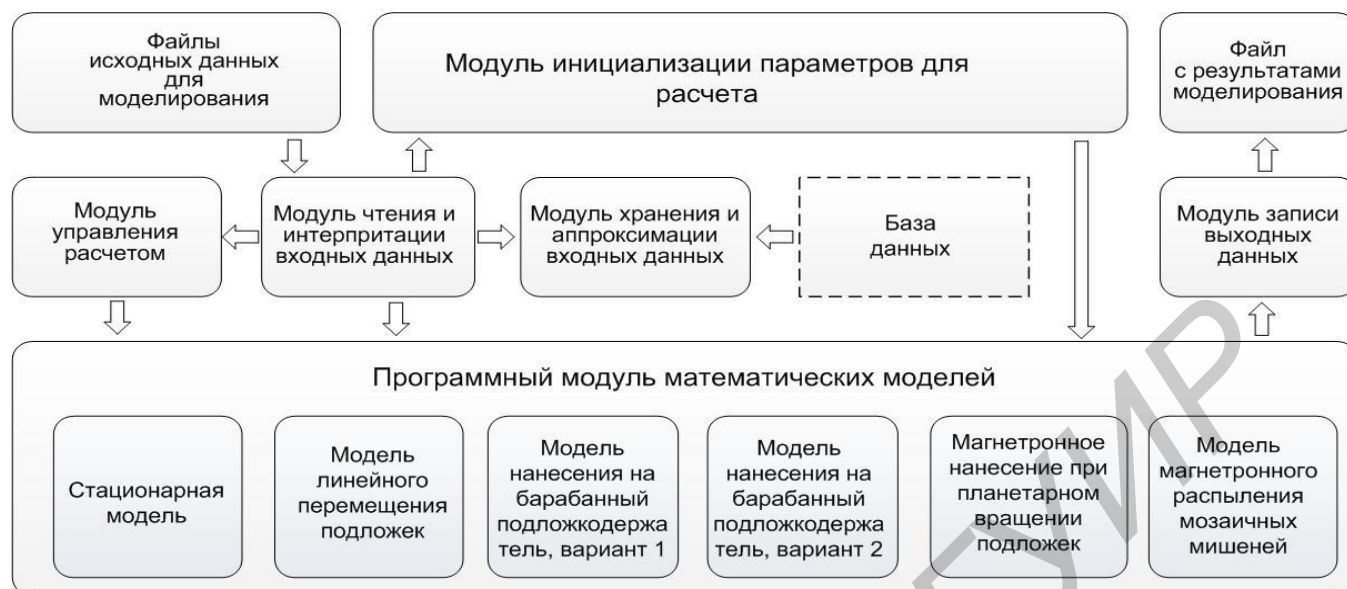


Рисунок 2 – Структура программного комплекса *Deposition* для моделирования нанесения тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления

Программа опробована и испытана при разработке и исследовании ряда реальных распылительных систем и установок магнетронного распыления. Анализ результатов моделирования показал, что погрешность расчетов по всем предложенным моделям не превышает 15,0 %.

Заключение

Разработаны методы компьютерного моделирования для проектирования систем и процессов магнетронного распыления, которые позволяют проводить сквозное моделирование систем магнетронного нанесения от этапа создания магнитной системы магнетрона до формирования покрытия на поверхности подложки.

Литература

1. Pauleau, Y. Materials surface processing by directed energy techniques / Y. Pauleau. – Elsevier Ltd, 2006. – 722 p.
2. Голосов, Д.А. Сквозное моделирование процессов нанесения покрытий при магнетронном распылении / Д.А. Голосов, С.М. Завадский, С.Н. Мельников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 75–82.
3. Svadkovski, I.V. Characterisation parameters for unbalanced magnetron sputtering systems / I.V. Svadkovski, D.A. Golosov, S.M. Zavatskiy // Vacuum. – 2002. – Vol. 68. – № 4. – P. 283–290.

4. Голосов, Д.А. Распределение толщины тонкопленочных слоев при магнетронном нанесении на линейно перемещаемые подложки / Д.А. Голосов, А.П. Достанко, С.Н. Мельников // Вакуумная техника и технология. – 2012. – Т. 22. – № 1. – С. 27–34.

5. Голосов, Д.А. Модель расчета толщины тонкопленочных слоев для магнетронных установок с подложкодержателями барабанного типа / Д.А. Голосов, С.Н. Мельников // Энергоэффективные электротехнологии. – 2011. – С. 49.

6. Golosov, D.A. Calculation of the Elemental Composition of Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering of Mosaic Targets / D.A. Golosov, S.N. Melnikov, A.P. Dostanko // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2012. – Vol. 48. – № 1. – P. 52–59.

Г.С. Покаташкин^{1,2}, Р.Г. Шуляковский¹, М.Н. Невмержицкий¹

¹ГНУ «Институт прикладной физики

Национальной академии наук Беларуси», Минск, Беларусь

²Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

ОБЗОР МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Введение

С ростом возможностей вычислительной техники растёт и объём информации, которую необходимо хранить, передавать и обрабатывать. Кроме этого, остаётся вопрос о качестве получаемых данных. Для решения этой задачи, человечество совершенствует электронику, материалы и методы. Одним из направлений позволяющим повысить качество сбора и обработки данных составляют методы и техники автоматизации эксперимента.

Эксперимент – метод исследования некоторого явления в управляемых наблюдателем условиях. Для того, чтобы повысить качество сбора данных, снизить систематические ошибки, негативные (фоновые) явления и получить наглядные и обработанные данные – необходимо использовать автоматизацию и постоянно совершенствовать методы. Очень часто, под методом понимается совокупность техник, приёмов и алгоритмов для достижения желаемого результата.

В данной работе будет приведён обзор нескольких методов автоматизации эксперимента отличающихся друг от друга, как по области применения, так и по своей сути, а также основные инструменты необходимые для работы методов и алгоритмов.