

ФИЗИКА

УДК 533.9.924+621.793.18

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ
ИЗ КОЛЬЦЕВОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА*канд. техн. наук, доц. И.В. СВАДКОВСКИЙ, С.М. МЕЛЬНИКОВ**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)**д-р техн. наук, проф. С.П. КУНДАС**(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, г. Минск)*

Представлена разработанная 3D-модель, позволяющая рассчитывать профиль распределения толщины тонкопленочного покрытия при ионно-лучевом распылении и оптимизировать распылительную систему, включающую в себя подложку, мишень и кольцевой ионный источник на основе ускорителя с анодным слоем.

Введение. Методы ионно-лучевого нанесения получили широкое развитие как одно из альтернативных способам формирования слоев термическим и электронно-лучевым испарением в производстве изделий микроэлектроники и оптоэлектроники. Характерная особенность метода состоит в том, что ионообразующая плазма создается в квазизамкнутом объеме ионного источника, в котором реализованы условия для эффективной ионизации, что и предопределяет высокую контролируемость и управляемость процесса, минимальное побочное влияние на подложку, а также низкое давление в технологической камере (10^2 Па) [1]. Разрядная область конструктивно отделена от объекта обработки и через нее прокачивается рабочий газ, что создает значительный градиент давлений между зоной ионообразования и объемом вакуумной камеры, минимизирует влияние внешних факторов на генерацию и ускорение ионов, а также снижает загрязнение растущей пленки в результате ионизации атомов остаточного газа. Электрическое и магнитное поле локализовано внутри разрядной области, что уменьшает неконтролируемое влияние разряда на объект обработки.

Наибольшее распространение в промышленности получили ионные источники типа ускорителя с анодным слоем (УАС). На основе этой модификации разряда разработан ряд новых ионно-лучевых устройств для технологии формирования тонких пленок [1].

Типовое устройство [2] выполняется в виде осесимметричной конструкции тороидальной формы с кольцевой областью разряда, у одного из торцов которой расположена мишень, находящаяся в фокусе ионного пучка конической геометрии, а у другого - подложка.

Распыление мишеней, как правило, производится под углом $45 - 60^\circ$ сходящимся пучком конической геометрии. Преимущества подобной конфигурации:

- незначительное расстояние мишень - подложка, обеспечивающее повышение скорости нанесения пленок;
- наклонное падение ионов на поверхность мишени позволяет увеличивать эффективность распыления;
- возможность размещения на одной рабочей позиции нескольких независимых соосно расположенных ионных источников, объединенных единой магнитной системой, системой охлаждения и т.д., обеспечивает конструктивную гибкость устройства.

Одной из целей проектирования процессов ионно-лучевого распыления является оптимизация скорости нанесения при обеспечении приемлемой равномерности пленки по поверхности подложки.

Для реализации поставленной цели разработана математическая модель, описывающая распределение скорости формирования тонкопленочного покрытия с учетом распределения ионного тока в промежутке ионный источник - мишень и распыленного потока в промежутке мишень - подложка.

Обоснование принятых допущений. В результате проведенного анализа установлено, что для диапазона энергий ионов в пределах $100 - 1000$ эВ и давления $0,01 - 0,1$ Па пробеги ионов, при которых становятся существенными эффекты резонансной перезарядки, составляют десятки сантиметров. Так, например, в работе Робинсона исходя из потенциалов попарного взаимодействия были рассчитаны сечения резонансной перезарядки, потери энергии и импульса в зависимости от дистанции пробега и энергии ионов Ag, Kг и Хе [3]. В соответствии с этими данными средние пробеги при потере заряда составили $1,33; 2,0; 2,4$ Па·см, а средние пробеги при потере энергии соответственно $13,3; 20,0; 24,0$ Па·см для ионов Ag с энергией $100, 500, 1000$ эВ. В нашем случае моделирование проводится при следующих параметрах: средняя длина пробега $5 - 15$ см; энергия ионов примерно 1000 эВ; давление $0,03 - 0,06$ Па, что с

точностью в несколько процентов позволяет пренебречь процессами резонансной перезарядки, при том, что средний пробег, обусловленный лотерей энергии и импульса, примерно на порядок величины превышает средний свободный пробег потери заряда.

Ключевую роль в процессах ионно-плазменного нанесения тонкопленочных структур играют эффекты потери энергии распыленного потока в процессе транспортировки от мишени к подложке в результате межатомного взаимодействия. В общем случае ее величина зависит от дистанции пробега и давления остаточного газа в камере. В работе [4] на основании теории кинетики взаимодействия газов были рассчитаны распределения энергии распыленных атомов в зависимости от параметров процесса. Как следует из полученных результатов, для давления 0,04 Па уменьшение средней энергии распыленного потока составляет величину менее 20 % при расстоянии «мишень - подложка» 25 см. Очевидно, что изменение плотности атомарного потока будет составлять значительно меньшую величину. В этой связи, было решено не учитывать рассеяние распыленного потока при транспортировке от мишени к подложке при расстояниях «мишень - подложка» до 40 см.

Для количественного описания конфигурации ионного пучка, генерируемого ионным источником типа УАС, была проведена серия экспериментов, по измерению пространственного распределения потока ионов с помощью одиночного проволочного зонда. При этом для отсечки электронов предусматривалась подача отрицательного смещения. Определение суммарного тока ионного пучка производилось с помощью мишени-токосъемника, представляющей собой электроизолированный экран, охватывающий всю предполагаемую область распространения ионов. Установлено, что конфигурация ионного пучка имеет сильную зависимость от напряженности магнитного поля в ускорительном канале, которая в общем случае определялась током соленоида и конфигурацией полюсных наконечников, ограничивающих ускорительный канал. Градиент магнитного поля в канале измерялся с помощью датчика Холла. Типичные характеристики пространственного распределения плотности ионного тока при различных значениях индукции магнитного поля для источника, генерирующего пучок цилиндрической конфигурации радиусом 2,5 см, представлен на рис. 1.

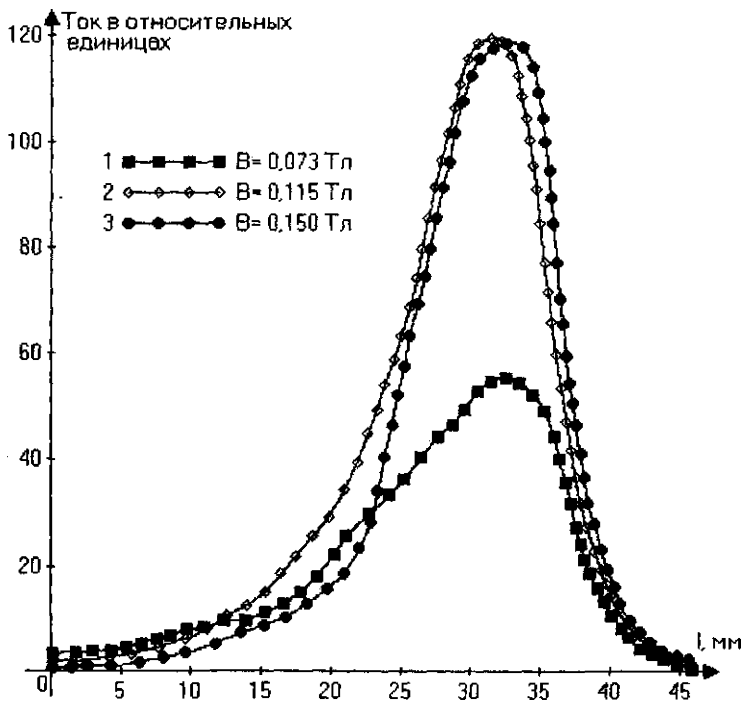


Рис. 1. Типичные характеристики пространственного распределения плотности ионного тока при различных значениях магнитной индукции

В результате проведенного анализа установлено, что с некоторыми допущениями пространственное распределение ионов, генерируемых ионным источником типа УАС, можно экстраполировать законом косинуса с некоторым показателем степени n , зависящем от напряженности магнитного поля в ускорительном канале (рис. 2).

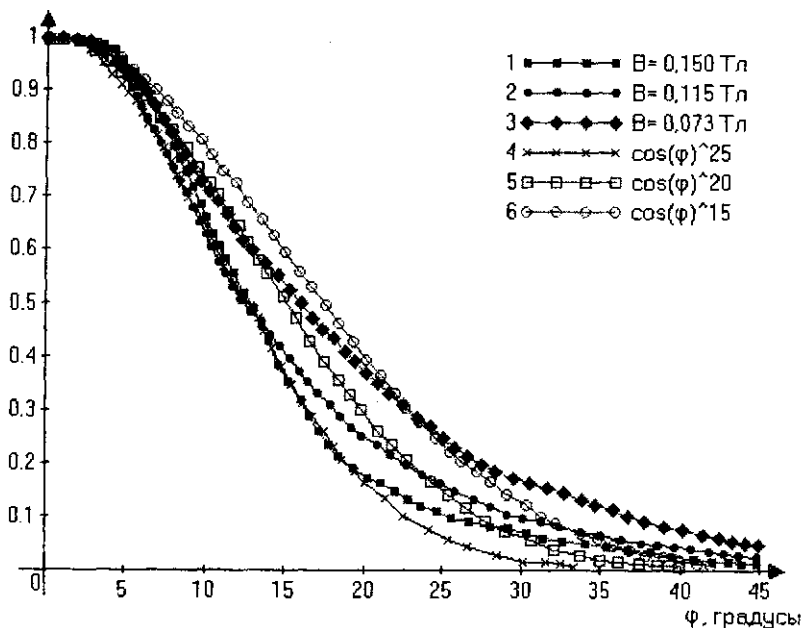


Рис. 2. Нормированные угловые распределения плотности ионного тока источника типа УАС при различных напряженностях магнитного поля в ускорительном канале (1 – 3); графики функции $\cos^n \varphi$ при $n = 25$ (4); $n = 20$ (5); $n = 15$ (6)

Математическая модель системы ионный источник - мишень. Разработанная математическая модель учитывает осесимметричное взаимное расположение ионного источника, мишени и подложки (рис. 3).

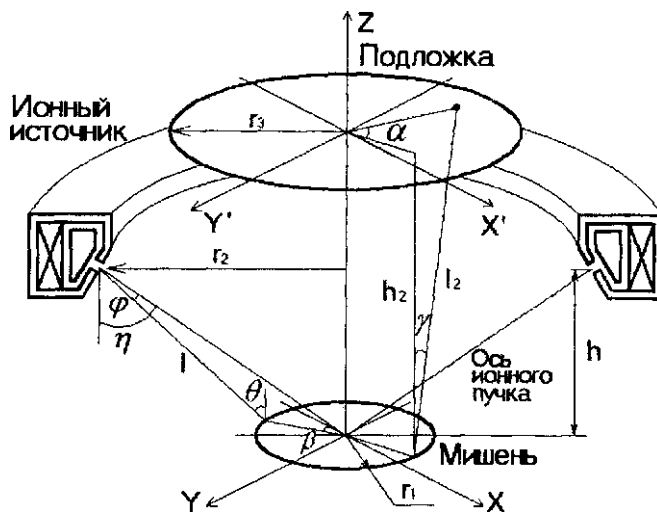


Рис. 3. Компонировочная схема модели ионный источник - мишень - подложка

Для упрощения решения модель разбита на две связанных системы: ионный источник - мишень и мишень - подложка.

Плотность тока на плоскости поверхности мишени описывается соотношением (см. рис. 3):

$$j = \frac{n+1}{2\pi} \cdot I \cdot \int_{\beta} \frac{\cos^n \varphi \cdot \cos \theta}{r^2} d\beta, \tag{1}$$

где β – угол интегрирования в плоскости мишени, изменяется от 0 до 2π ; φ – угол между осью ускорительного канала ионного источника и нормалью к поверхности мишени; θ – угол падения иона на поверхность мишени; n – показатель степени (функция от напряженности магнитного поля, варьируется от 13 до 30 при увеличении индукции магнитного поля в ускорительном канале от 0,06 до 0,2 Тл); I – суммарный ток ионного источника (мА); l – текущая дистанция пробега иона от зоны генерации до мишени, см.

В соответствии с обозначениями имеем:

$$j(r_{1i}) = \frac{n+1}{2\pi} \cdot I \cdot \int_{\beta} \frac{h}{l^3} \left(\frac{\sin \eta}{2 \cdot r_2 \cdot l} \left(\frac{r_2^2}{\sin^2 \eta} + l^2 - r_1^2 \right) \right)^n d\beta, \quad (2)$$

где η – угол наклона оси ионного пучка относительно оси устройства; r_1 – текущий радиус мишени, см.

Распределение тока по мишени симметрично и описывается переменной r_1 . Программно вычисляя значения j для r_{1i} , где r_{1i} изменяется от нуля до ее радиуса, получаем массив значений распределения плотности тока по мишени.

Расчитанное распределение ионного тока на мишени является функцией компоновочных параметров ионно-лучевого устройства (диаметр разрядной зоны, угол наклона ионного лучка и т.д.), а также напряженности магнитного поля в зоне ионизации.

Математическая модель системы мишень – подложка. Представим модель мишени в виде круглого диска радиусом r_1 , поверхность распыления которого параллельна плоской поверхности подложки. Следовательно, распределение атомарного потока, достигающего подложки, центрально-симметрично и описывается переменной текущего радиуса подложки r_{3i} (см. рис. 3). Поскольку мишень параллельна подложке, то угол эмиссии атома γ из мишени равен углу падения на подложку.

Толщина наносимого тонкопленочного покрытия описывается уравнением:

$$d(r_{3i}) = \frac{t \cdot Ma}{\pi \cdot \rho} \cdot j_i(r_1) \cdot Y \cdot N_A \cdot 10^{-5} \cdot \int_0^{r_3} \int_0^{2\pi} \frac{h_2^2}{l_2^4} d\alpha dr_3, \quad (3)$$

где α – угол интегрирования в плоскости мишени, изменяется от 0 до 2π ; Ma – атомная масса распыляемого материала (г/моль); ρ – плотность материала (г/см³); t – время распыления, с; Y – коэффициент распыления материала мишени (атом/ион); h_2 – высота подложки, см; l_2 – расстояние от элемента распыления до точки осаждения (см.); N_A – число Авогадро ($6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Плотность ионного тока на поверхности мишени определяет распыленный атомарный поток через коэффициент распыления. В этом случае распределение наносимой пленки по толщине определяется взаимным расположением мишени и подложки, плотностью материала пленки и временем нанесения.

Численное решение уравнений (2), (3) осуществлялось методом прямоугольников. Для этих целей разработана программа на языке Borland Delphi. Программа позволяет производить расчет для различных однокомпонентных материалов мишени с соответствующими атомными массами и коэффициентами распыления.

Результаты моделирования, экспериментальных исследований и их анализ. Для верификации разработанной модели проведены экспериментальные исследования процесса нанесения пленки никеля методом ионно-лучевого распыления на установке ВУ-2М при следующих параметрах процесса:

- давление – $3 \cdot 10^{-2}$ Па;
- ток мишени – 185 мА;
- ток разряда – 150 мА;
- радиус ионного источника (r_2) – 5,75 см;
- радиус мишени (r_1) – 4 см;
- радиус подложки (r_3) – 14,85 см;
- дистанция мишень – подложка (h_2) – 24 см;
- дистанция мишень – ионный источник (h) – 2,2 см;
- угол наклона ионного пучка относительно оси устройства (η) – 60° ;
- время распыления – 3600 с.

Также было проведено компьютерное моделирование процесса с приведенными выше параметрами (рис. 4).

Из приведенных на рис. 4 результатов видно, что погрешность разработанной модели не превышает 25 %, что позволяет применять ее для исследования и оптимизации процессов ионно-лучевого распыления. Анализ возможных причин погрешностей продемонстрировал, что игнорирование процессов рассеяния ионного пучка в процессе транспортировки от источника к мишени, а также рассеяния распыленного потока при транспортировке от мишени к подложке в диапазоне давлений 0,03 - 0,06 Па не оказывает существенного влияния на точность вычислений. Одной из причин погрешностей расчетов можно считать принятое в модели осисимметричное распределение плотности ионного тока относительно точки эмиссии, что не учитывает направленное влияние магнитного поля на траекторию движения зарядов. Однако относительная сложность описания физических процессов, сопровождающих генерацию ионов в ускорителях с анодным слоем, а также неплохое соответствие проведенных расчетов экспериментальным результатам позволило сделать вывод о перспективности дальнейшего использования разработанных модельных представлений.

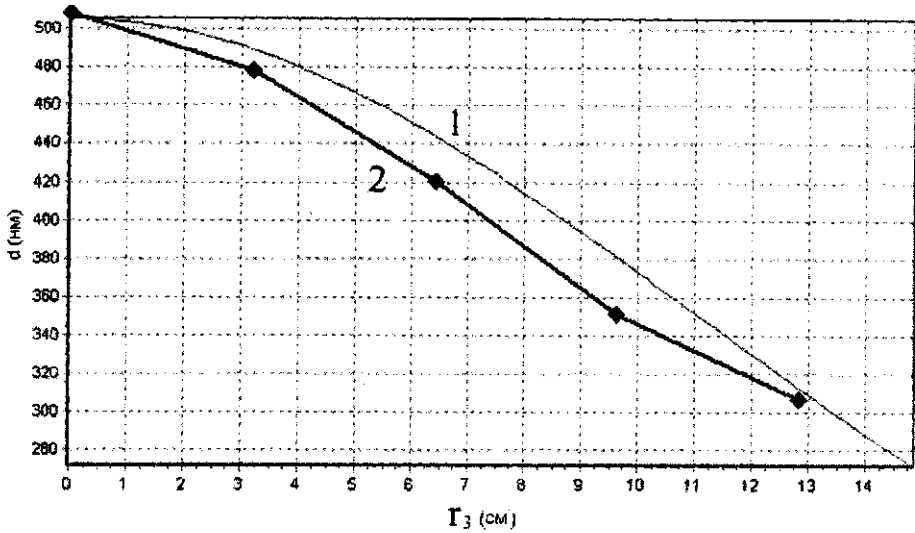


Рис. 4. Зависимость толщины нанесенной пленки никеля от расстояния до оси подложки: 1 – компьютерное моделирование ($n = 15$); 2 – экспериментальные данные

В частности, с помощью разработанной модели исследовалось изменение профилей распределения толщины наносимого тонкопленочного покрытия в зависимости от параметров ионно-лучевого распылительного устройства и режимов нанесения. Кроме того, в ряде случаев учитывалось распределение плотности ионного тока по поверхности мишени.

Для базового варианта ионно-лучевого устройства проводилось компьютерное моделирование со следующими исходными данными:

- радиус ионного источника - 5,75 см;
- радиус мишени - 4 см;
- радиус подложки - 10 см;
- дистанция мишень - подложка - 10 см;
- дистанция мишень - ионный источник - 3,4 см;
- ~ угол наклона ионного пучка относительно оси устройства - 60° ;
- время распыления - 1 с.

Параметрами оптимизации являлись радиус и материал мишени, а также индукция магнитного поля в ускорительном канале. Результаты моделирования представлены на рис. 5 - 7.

Исходя из результатов исследования влияния радиуса мишени на профили распределения толщины наносимого тонкопленочного покрытия (см. рис. 5), косвенно оценены необходимые размеры мишени при различных вариантах ее позиционирования.

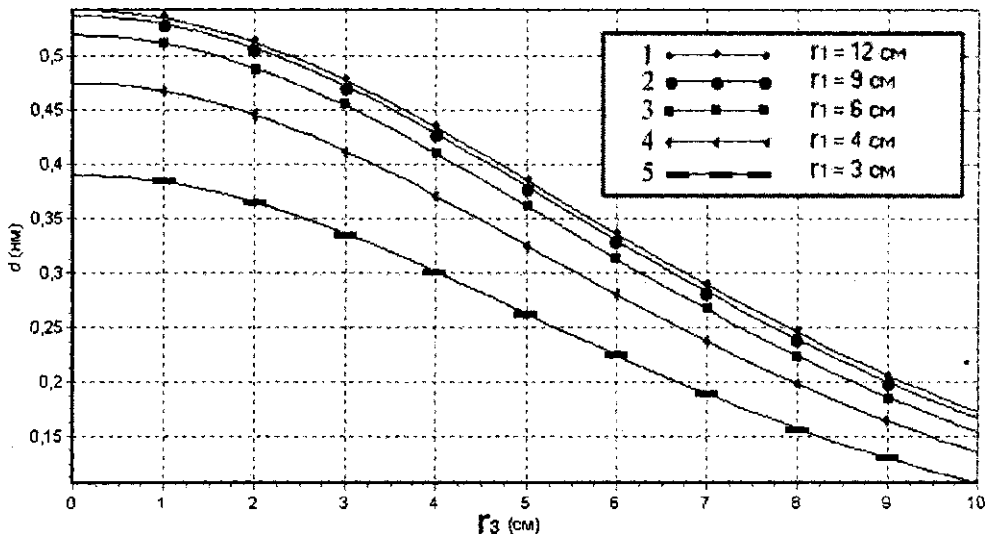


Рис. 5. Профили распределения толщины покрытия при различных радиусах никелевой мишени ($n = 15$; $h = 3,4$ см)

Кроме того, проведена оценка влияния индукции магнитного поля в ускорительном канале на распределение плотности ионного тока по поверхности мишени (см. рис. 6). В случае попадания ионов за пределы мишени происходит распыление элементов технологической оснастки, окружающей мишень, в результате чего в пленку привносятся загрязнения.

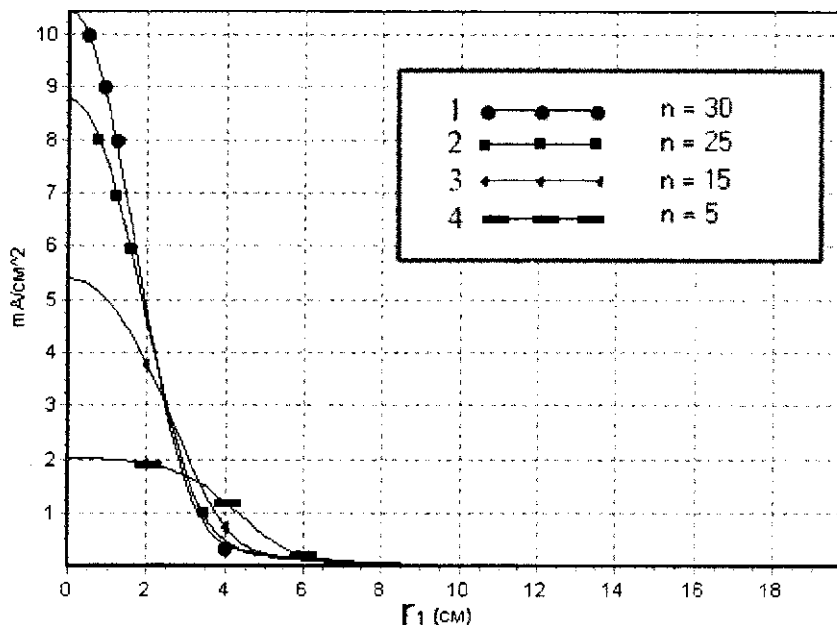


Рис. 6. Распределения плотности ионного тока по поверхности мишени при различных показателях степени n ($h = 3,4$ см)

Как следует из рис. 6, увеличение индукции магнитного поля улучшает суммарную фокусировку ионного пучка, что увеличивает атомарный поток распыленных атомов с мишени радиусом 4 см (см, рис. 7). Разработанная модель позволяет рассчитывать профили распределения толщины наносимого тонкопленочного покрытия, обусловленные только материалом мишени без учета распыления других элементов технологической оснастки.

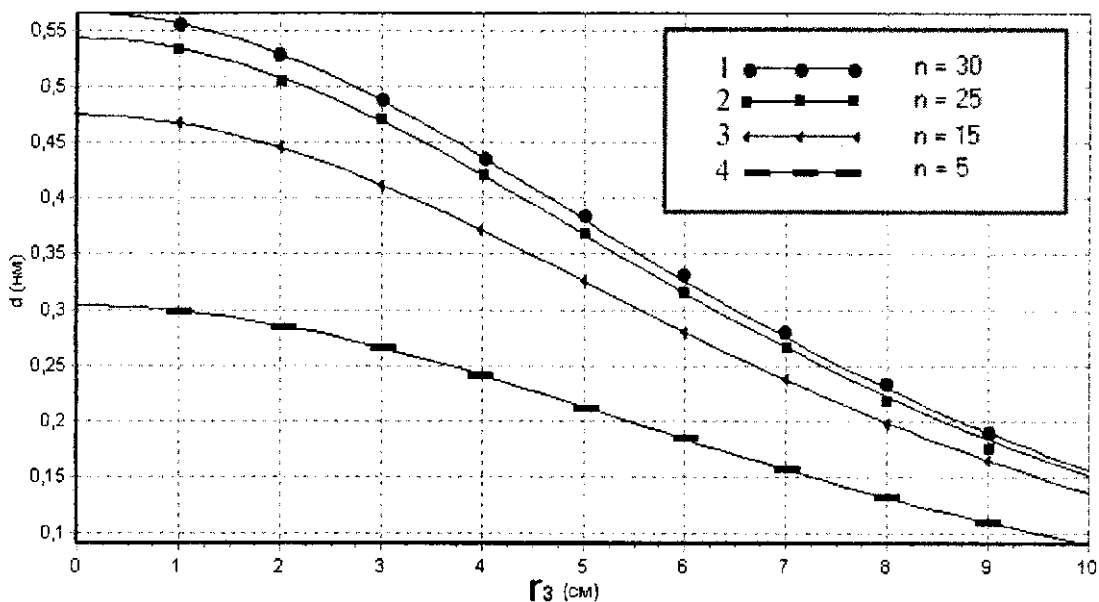


Рис. 7. Профили распределения толщины покрытия при различных показателях степени n ($h = 3,4$ см)

Заключение. Разработанная 3D-модель описывает абсолютное изменение толщины покрытия и позволяет оптимизировать существующие распылительные системы, включающие в себя подложку, мишень и распылительное устройство на базе ускорителя с анодным слоем, а также осуществляет проектирование новых технологических устройств и процессов ионно-лучевого распыления осесимметричной конфигурации. Погрешность результатов моделирования составила 10 - 30 %.

С помощью разработанной модели оптимизированы некоторые параметры ионно-лучевого распылительного процесса: радиус и материал мишени при различных вариантах ее позиционирования, а также индукция магнитного поля в ускорительном канале по критерию изменения профиля распределения толщины наносимого покрытия и распределению плотности ионного тока по поверхности мишени.

Дальнейшее развитие исследований планируется проводить в направлении повышения точности разработанной модели, расчета конструкций протяженного типа, скорости формирования покрытия с учетом распределения магнитных полей в ускорительном канале ионного источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники: В 3-х т. Т. 2 / А.П. Достанко, С.В. Бордусов, И.В. Свадковский, и др.; Под общ. ред. А.П. Достанко, - Мн.: ФУАинформ, 2001. - 244 с.
2. А.с. 740067 СССР. Устройство для ионно-лучевой обработки поверхности / Достанко А.П., Ширпов В.Я., Калошкин Э.П.
3. Robinson R.S. Energetic binary collisions in rare gas plasmas // J. Vac. Sci. Technol. - 1979. - Vol. 16, - P. 185 - 187.
4. Meyer PC, Schuller I.K., Falco C.M. Thermalization of sputtered atoms // J. Appl. Phys. - 1981.