

В.Ф. Соколов, Ю.А. Соколова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ КАТОДА В ПРОЦЕССЕ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

*Ивановский государственный химико-технологический университет,  
пр. Ф. Энгельса, 7, г. Иваново, 153460, Россия*

### 1. Введение

Магнетронные распылительные системы широко используются в тонкопленочной технологии благодаря высоким скоростям осаждения покрытий и использованию газовой среды при низком давлении. В то же время существует проблема получения методом магнетронного распыления однородных по толщине тонких пленок и появления профиля эрозии распыляемой мишени из-за удержания разряда вблизи катода магнитным полем. Эти вопросы исследуются экспериментально и теоретически в ряде работ для разных параметров разряда и конструкций магнетронов. Например, в работе [1] измерено распределение магнитного поля вблизи катода планарного магнетрона постоянного тока и экспериментально показано, что имеется строгая корреляция между эрозией катода и оптической эмиссией плазмы. В работе [2] изучены проблемы генерации плазмы и формирования эрозионного профиля путем численного моделирования движения электронов в цилиндрической магнетронной распылительной системе с ферромагнитной мишенью. В работе [3] методом Монте-Карло анализируются особенности переноса материала от мишени к подложке в импульсных магнетронах.

Ранее нами был выполнен ряд экспериментов по нанесению металлических и металлсодержащих пленок на поверхность различных неорганических и полимерных материалов методом магнетронного распыления [4-6]. Осаждение пленок проводили с помощью планарного магнетрона постоянного тока с катодом из меди или алюминия; в качестве плазмообразующего газа использовался аргон. Варьировались различные режимы напыления, позволяющие получать пленки с заданными свойствами (адгезионными, электрическими, оптическими и др.). Были измерены интенсивности излучения возбужденных атомов меди, алюминия и аргона в магнетронной распылительной системе и с помощью математической обработки построены зависимости, связывающие интенсивность излучения с давлением рабочего газа и током разряда. Это позволило обеспечить контроль процесса магнетронного распыления для получения пленок нужной толщины. Однако вопросы оптимизации процесса, связанные с осаждением однородной по толщине пленки и равномерной эрозией мишени, остаются открытыми.

Данная работа посвящена анализу влияния параметров разряда в плоском магнетроне постоянного тока на изменение профиля распыляемой мишени.

### 2. Методика анализа

Процесс магнетронного распыления условно можно представить в виде трех основных последовательных стадий: распыление мишени под действием бомбардировки положительными ионами плазмообразующего газа; движение распыленных атомов от мишени к подложке; осаждение атомов на подложке и образование пленки.

Нами была разработана модель, описывающая процесс распыления мишени магнетронного устройства, которая качественно хорошо соответствует условиям нашего эксперимента. Согласно этой модели зона разряда представляет собой кольцо, прилегающее к поверхности мишени (рис.1), а свойства разряда определяются параметрами  $D_m$ ,  $D_k$ ,  $L_k$ ,  $I$ ,  $\tau$ . Поток положительных ионов из сечения кольца на поверхность мишени описывается выражением

$$P_i = a \cdot \exp \left[ - \left( \frac{x - D_m}{D_k} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $D_m$  – диаметр светящейся разрядной области,  $D_k$  – ширина этой области,  $a$  – численный коэффициент.

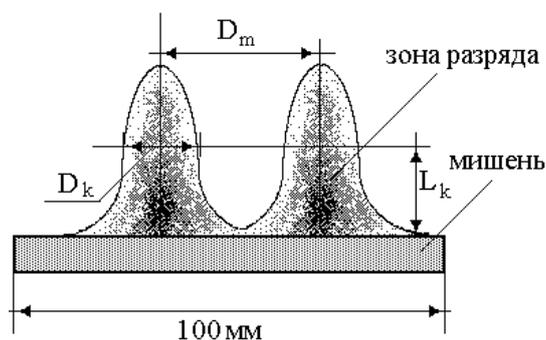


Рис. 1. Модель зоны разряда.

Величина  $L_k$  характеризует расстояние, на котором концентрация ионов равна половине их максимальной концентрации;  $I$  – ток разряда;  $\tau$  – время распыления.

Известно, что коэффициент распыления металла при бомбардировке положительными ионами определяется физическими и химическими свойствами пары рабочий газ – металл, энергией бомбардирующего иона и углом падения (то есть углом между потоком ионов и нормалью к поверхности). Для того чтобы учесть угловую и энергетическую зависимости коэффициента распыления интересующих нас мишеней использовали имеющиеся в литературе [7] данные об интегральных коэффициентах распыления металлов ионами аргона и приведенную в [8] угловую зависимость коэффициента распыления для пары аргон – германий. В результате математической обработки и нормирования имеющихся данных для коэффициента распыления получено следующее выражение:

$$S(\theta, E) = 0,18 \cdot S(E) + 2 \cdot S(E) \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\theta - 80}{d\theta} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $E$  – энергия бомбардирующего иона,  $\theta$  – угол падения иона на поверхность мишени.

Расчет проводился для углов падения  $0 - 90^\circ$  и энергий ионов  $5 - 750$  эВ. Результаты расчета по формуле (2) для интересующих нас мишеней показаны на рис. 2. Видно, что качественно эти зависимости похожи, но для атомов меди коэффициент распыления выше, поэтому в дальнейшем все расчеты профиля проводились для мишени из меди, которая в равных условиях подвергается более сильной эрозии.

Процедура численного исследования процесса распыления мишени заключалась в следующем. В вертикальной плоскости, пересекающей по диаметру мишень, область разряда и подложку, на поверхности мишени фиксировалось 150 точек с координатами, соответствующими начальному состоянию мишени. Большинство расчетов было проведено в предположении, что исходная мишень плоская (хотя в программе предусмотрено задание любого произвольного профиля мишени). Расстояние между мишенью и подложкой в этой плоскости также разбивалось на 150 частей. Для всех заданных точек поверхности мишени определялся поток ионов из каждой точки зоны разряда; и с учетом энергии и угла падения ионов, а также коэффициента распыления металла рассчитывалось изменение координат точек на поверхности, то есть фактически изменение профиля мишени в процессе распыления. Расчет повторялся многократно до истечения заданного времени процесса, которое составляло 100 условных шагов. Другие параметры расчета имели следующие значения: ток разряда составлял  $100 - 600$  мА, энергия ионов аргона –  $105, 230$  и  $355$  эВ, величину  $D_m$  изменяли от  $20$  до  $50$  мм,  $D_k$  – от  $10$  до  $40$  мм,  $L_k$  – от  $10$  до  $50$  мм, радиус мишени от  $0$  до  $50$  мм. Расстояние от мишени до подложки равнялось  $100$  мм. Расчет проводился в предположении, что длина свободного пробега ионов составляет величину не менее  $10$  см, что соответствует давлениям рабочего газа не выше  $0,01$  Па. Выбор всех параметров расчета определялся наиболее близкими их значениями к условиям эксперимента.

### 3. Результаты анализа

На рис. 3–7 представлены результаты проведенного нами анализа условий равномерного распыления медной мишени магнетрона. По оси  $x$  отложен радиус мишени, по оси  $y$  – время процесса, по оси  $z$  – рассчитываемый профиль мишени, начиная с исходного профиля и кончая фактически полученным в результате распыления. В нижней части рисунков схематично представлен вид светящейся области разряда. Зависимость эрозии мишени от энергии бомбардирующих ионов в исследуемом диапазоне при прочих равных условиях оказывается слабой (рис.3). Наиболее четко проявляется изменение профиля мишени в зависимости от параметров  $D_m$  и  $D_k$ , которые определяются геометрией и напряженностью магнитного поля и конструкцией магнитопровода. С увеличением диаметра светящейся области распыление происходит более равномерно (рис. 4), а с ростом толщины этой области – наоборот (рис. 5). Однозначная связь имеется также между профилем распыляемой мишени и током разряда (рис. 6) – чем больше ток, тем сильнее эрозия. Что касается зависимости профиля мишени от эффективной толщины зоны разряда, определяемой напряженностью электрического поля, то при различных значениях других параметров она может быть разной, то есть эрозия мишени может либо увеличиваться, либо уменьшаться с ростом  $L_k$ . На рис. 7 приведены некоторые подобранные сочетания параметров, позволяющие достичь равномерного распыления мишени.

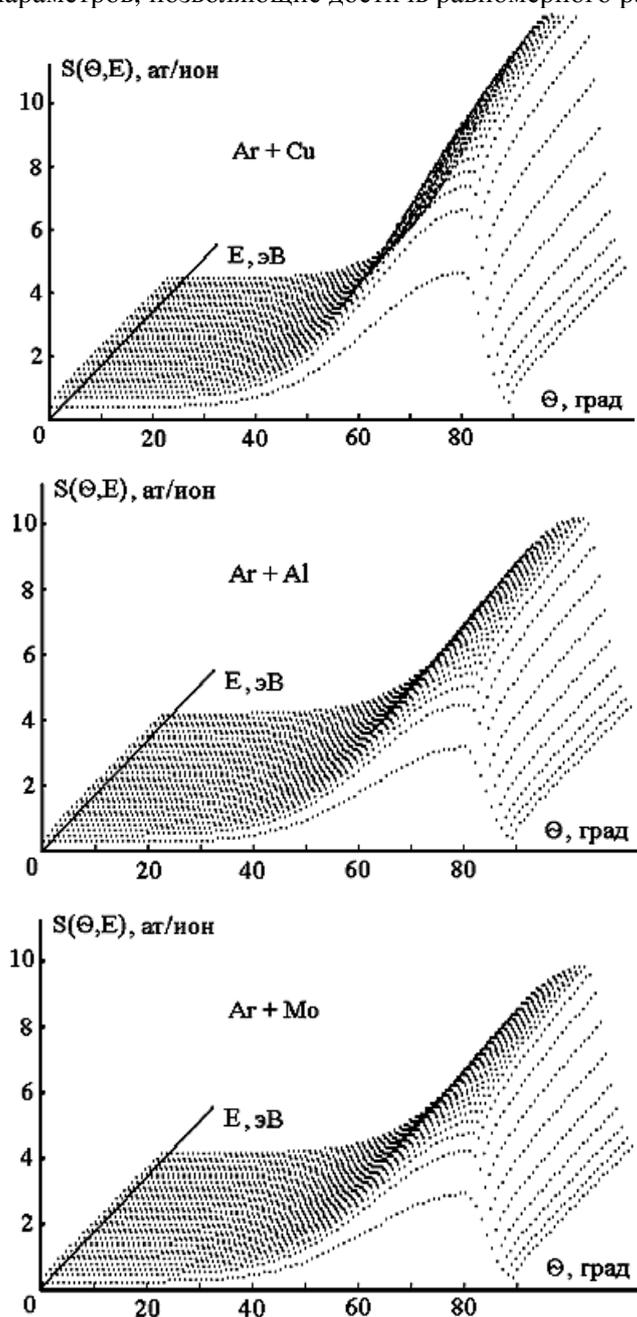


Рис. 2. Зависимость коэффициента распыления материала мишени от угла падения и энергии ионов.

Таким образом, результаты анализа подтверждают возможность проведения процесса магнетронного распыления с равномерной эрозией мишени при выбранных условиях, что на практике позволяет получить экономию дефицитных и дорогостоящих материалов.

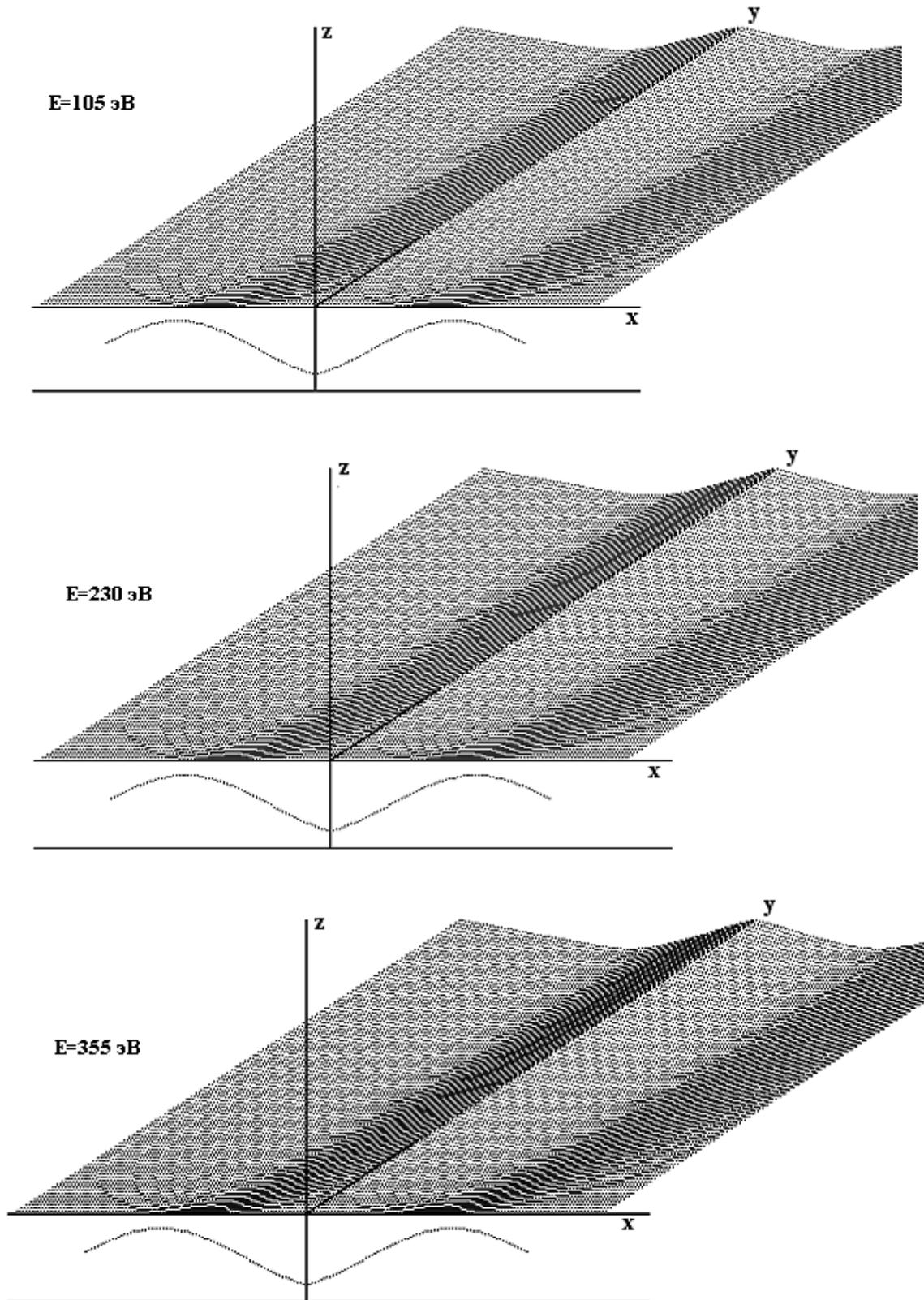


Рис. 3. Изменение профиля мишени в процессе распыления в зависимости от энергии тонов  $D_m = 50$  мм,  $L_k = 20$  мм,  $D_k = 40$  мм,  $I = 200$  мм.

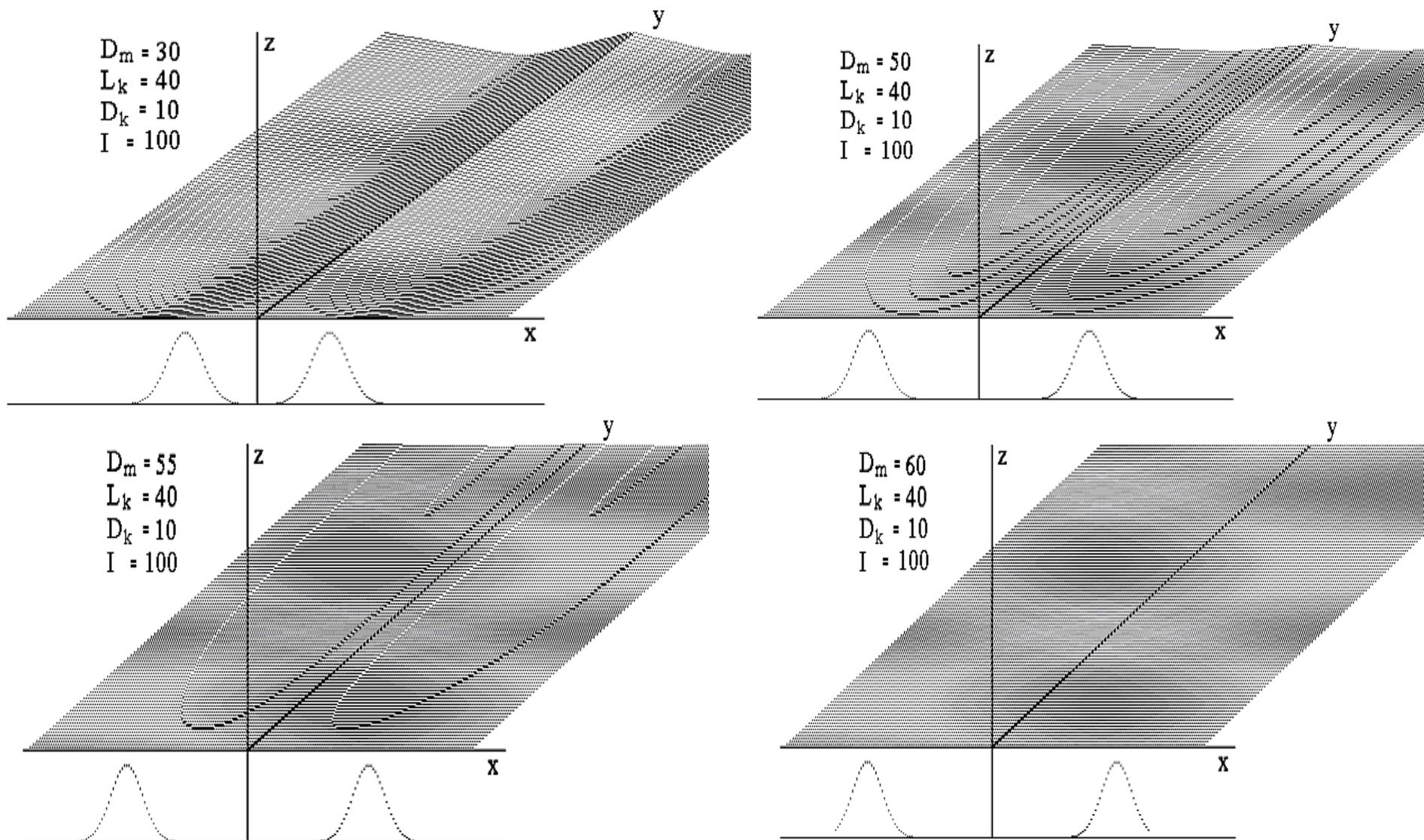


Рис. 4. Изменение профиля мишени в процессе распыления в зависимости от диаметра светящейся области разряда.  
 $E = 105$  эВ.

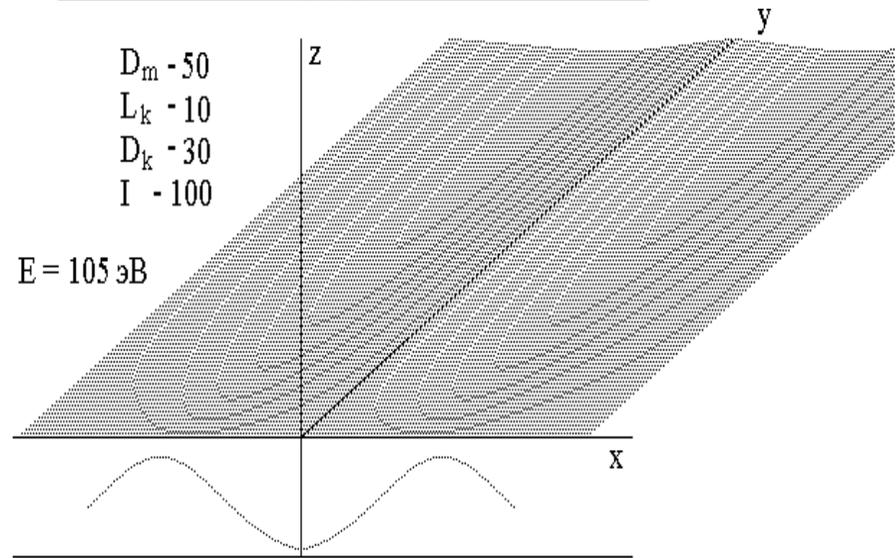
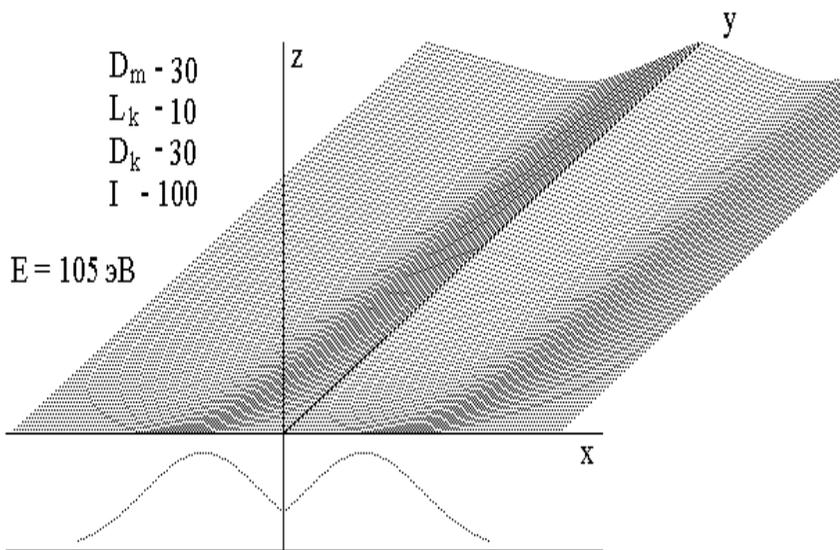
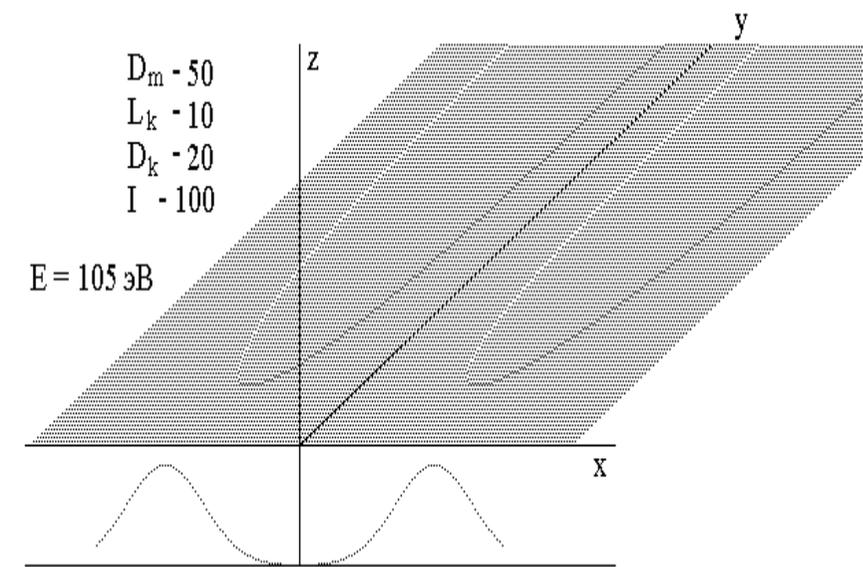
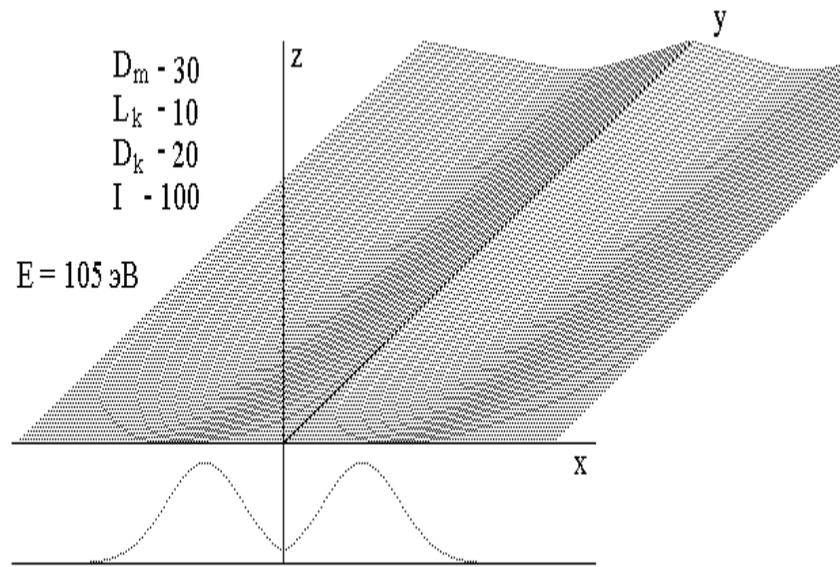


Рис. 5. Изменение профиля мишени в процессе распыления в зависимости от толщины светящейся области разряда.  
 $E = 105 \text{ эВ}$ .

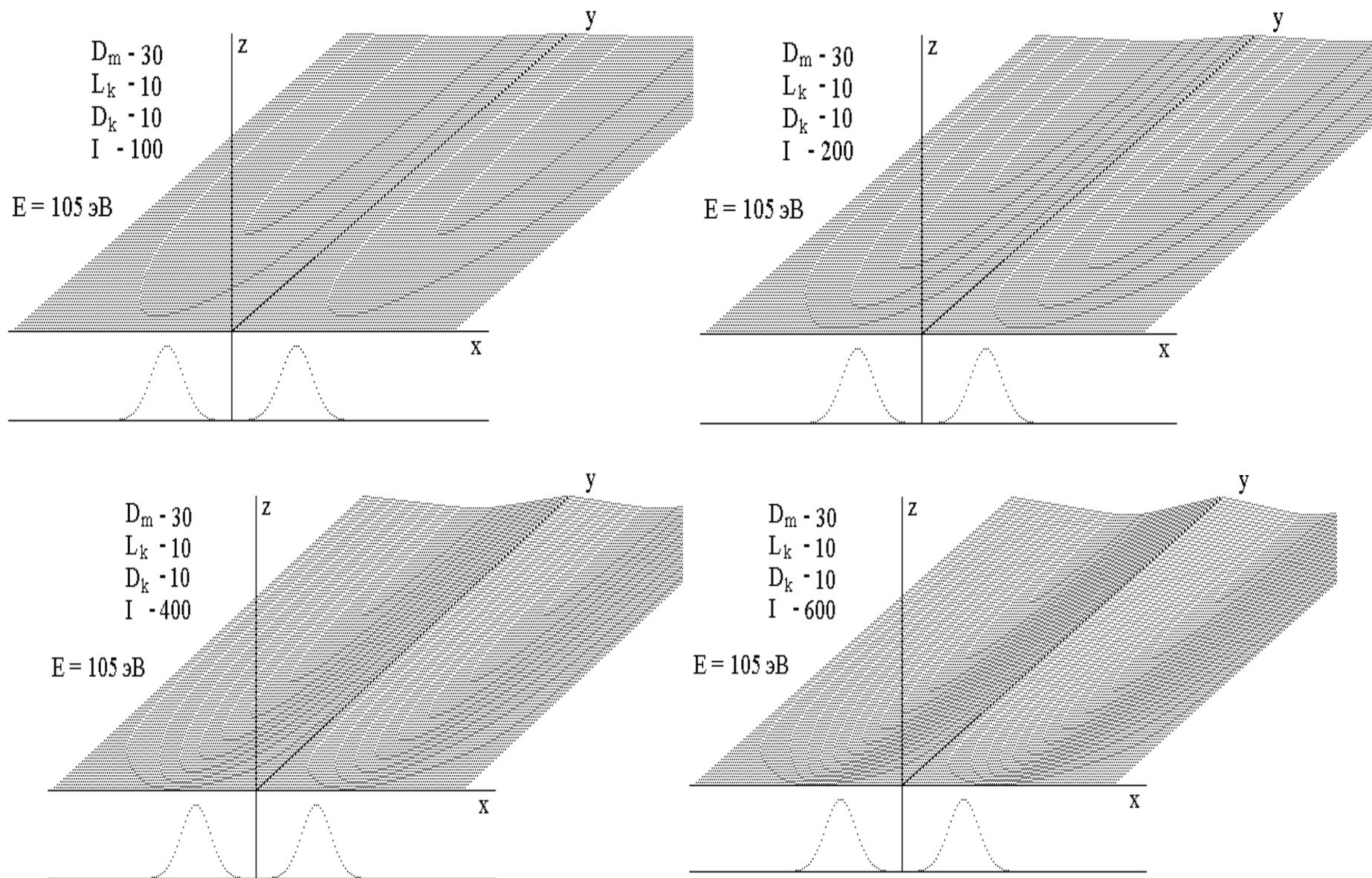


Рис. 6. Изменение профиля мишени в процессе распыления в зависимости от тока разряда.  
 $E = 105 \text{ эВ}$ .

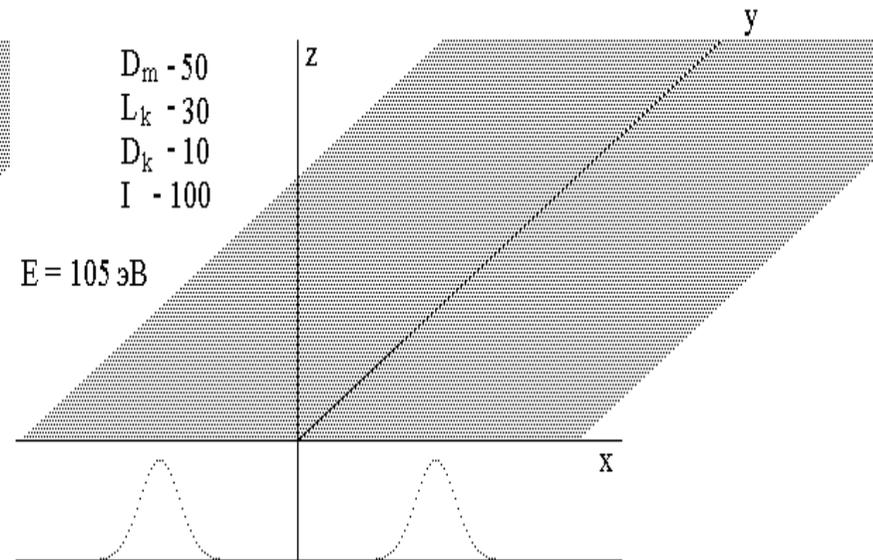
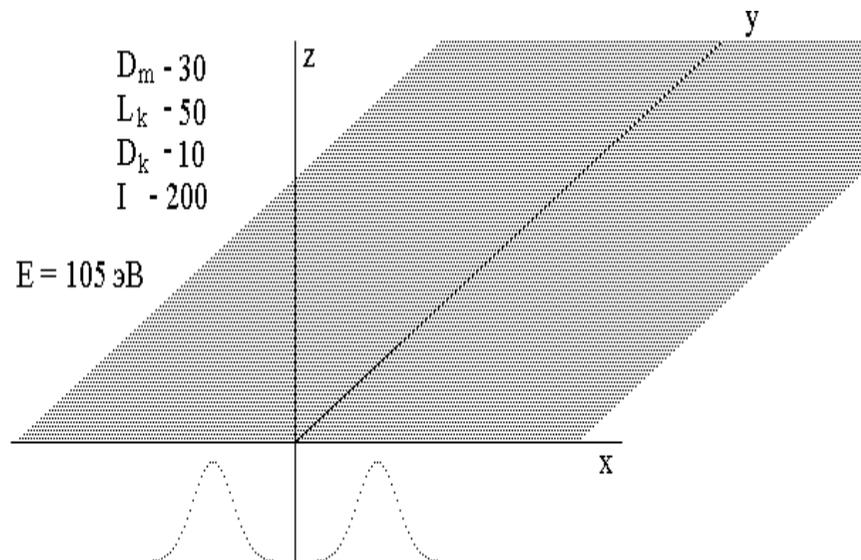
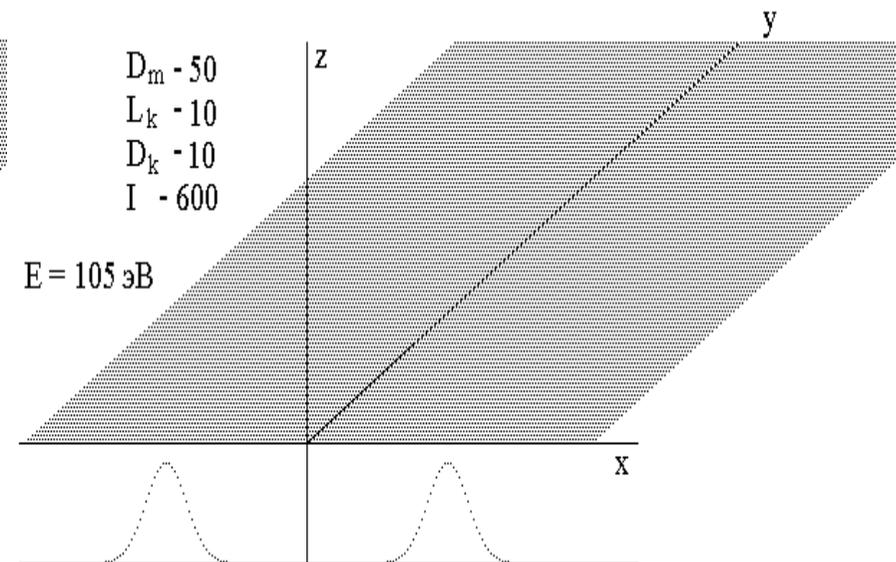
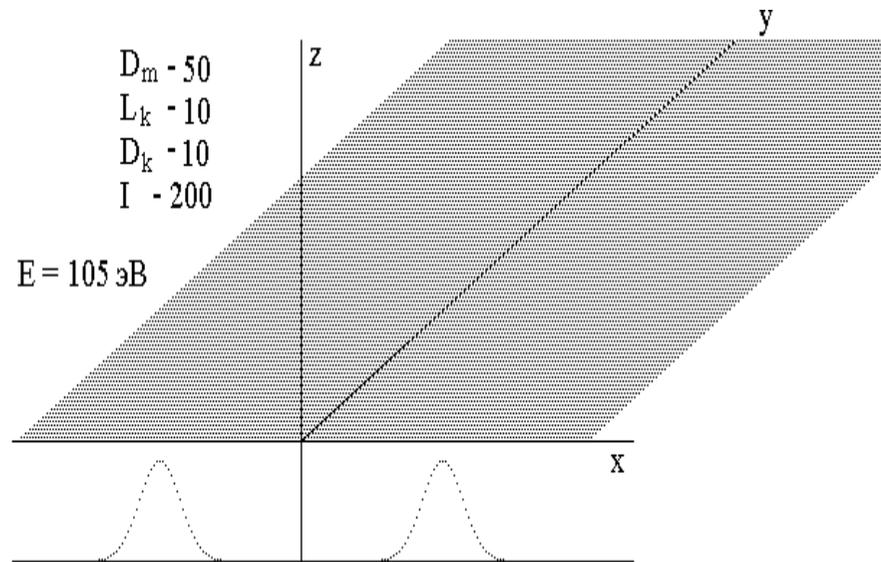


Рис. 7. Условия равномерной эрозии мишени.  
 $E = 105 \text{ эВ}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Debal F., Cammarata F., Wautelet M., Dauchot J.P., Hecq M. Correlation between the cathode erosion, the optical emission and the magnetic field distribution in magnetron sputtering systems // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. P. L31–L33.
2. Ido S., Kashiwagi M., Takahashi M. Computational studies of plasma generation and control in magnetron sputtering system // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. V. 38. P. 4450–4454.
3. Kuzmichev A.I., Goncharuk I.M. Simulation of the material transfer in the pulse magnetron sputtering system // Contrib. Papers of III Intern. Conf. "Plasma Physics and Plasma Technology", Minsk, Belarus, IМАРН ВNAS. 2000. V.1. P. 228–231.
4. Соколов В.Ф., Соколова Ю.А., Протасевич А.А. Исследование излучения магнетронного разряда в процессе напыления тонких пленок // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 3. С. 84–89.
5. Соколов В.Ф., Соколова Ю.А. Плазменная модификация углеродных волокнистых материалов для медицинских применений // Тез. докл. Междунар. научно-техн. конф. "Перспективные химические технологии и материалы", Пермь, ПермГТУ. 1997. С.243.
6. Соколов В.Ф., Соколова Ю.А., Крайнов Р.Н., Тымочко А.М. Плазмохимическое осаждение и свойства тонких полимерных и металлсодержащих пленок на основе гексаметилдисилоксана // Физика и химия обработки материалов. 1999. № 4. С. 33–40.
7. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М., 1991. С. 282 – 283.
8. Гасенко А.М. Моделирование процесса развития рельефа поверхности при ионной бомбардировке // Материалы XII Междунар. конф. "Взаимодействие ионов с поверхностью". М., МАИ, 1995. Т.1. С. 105–108.

*Поступила 16.12.01*

### Summary

Correlation between discharge parameters and a profile of the target sputtered in a DC planar magnetron system is studied. With simulation procedure the best conditions are determined for uniform cathode erosion.

---

Г. Я. Вяслева, Н. М. Селиванова, А.А. Коноплева, Д. М. Торсуев, В.П. Барабанов

## ПОЛУЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Казанский государственный технологический университет,  
ул. К. Маркса 68, г. Казань, 420015, Россия*

### Введение

Современная техника предъявляет повышенные требования к конструкционным материалам в связи с более жесткими условиями их эксплуатации. Особая роль отводится в этом плане изоляционным полимерным покрытиям, физико-механические свойства и структура которых в значительной степени определяется способом их нанесения и обработки.

В настоящее время широкое распространение получили электрохимический и электростатический методы формирования покрытия на электроде [1–3]. Одной из определяющих причин влияния параметров электрического поля на эксплуатационные свойства таких покрытий является воздействие на структуру [4–5]. Так, известно, что микроструктура покрытий, полученных другими способами, например наливом, имеет неоднородности, встречаются фрагменты с крупными частицами и т.д. Структурная организация электроосажденных покрытий представляет собой плотноупакованную матрицу из одинаковых по размеру фибриллярных или сферических плотноупакованных элементов. Следовательно, регулировать свойства покрытий, формирующихся на электроде, возможно путем