

УДК 533.9.07; 539.23

В. В. Черниговский, С. А. Марцынюков, А. А. Лисенков, Д. К. Кострин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование распределения толщины покрытий, наносимых методом магнетронного распыления

Рассмотрено устройство магнетронной распылительной системы. Изучена модель Данилина для плоского кольцевого испарителя, которая была применена для расчета распределения толщины наносимого покрытия при разных вариациях плотности тока на катоде (равномерная, в виде треугольника и в виде полинома третьей степени), получены соответствующие графики. Было проанализировано соотношение между параметрами магнетронной распылительной системы, при котором наблюдалась наибольшая равномерность распределения толщины наносимой пленки. Проведено исследование профиля распыления мишени с отличным от нуля углом конусности. Было установлено, что при увеличении угла конусности в областях подложки, находящейся непосредственно над катодом, наблюдается сильное утолщение напыляемой пленки, а в центре и по краям подложки толщина, наоборот, сильно уменьшается – происходит перераспределение толщины. Были выявлены параметры мишени, при которых достигается наибольшая равномерность распределения пленки по толщине.

Магнетронная распылительная система, модель Данилина, тонкие пленки, профиль покрытия

Для нанесения пленок и покрытий применяются различные методы, большинство из которых основано на использовании термических процессов при давлении газов порядка атмосферного. Особое место в данной технологии принадлежит методам физического осаждения в вакууме [1]–[6]. Несмотря на свои широкие возможности, такие методы получения тонких пленок имеют существенные недостатки: неоднородность по толщине покрытий, нанесенных на большие площади, высокая инерционность процессов термоиспарения, трудности с получением пленок ряда сплавов и соединений, а также недостаточная прочность сцепления пленки с подложкой.

В магнетронных распылительных системах (МРС) используется принцип ионного распыления [3], [7]. Общая конструкция МРС приведена на рис. 1: 1 – линии индукции магнитного поля; 2 – магнит; 3 – анод; 4 – траектория электрона; 5 – вытравливаемый профиль; 7 – катод-мишень. Значения индукции магнитного поля обычно лежат в диапазоне 30...150 мТл, при которых плазма будет замагничена по электронной компонен-

те, а ионы практически не будут испытывать влияния магнитного поля. В этой ситуации электроны плазмы будут иметь составляющую дрейфовой скорости перпендикулярно векторам как электрического, так и магнитного поля.

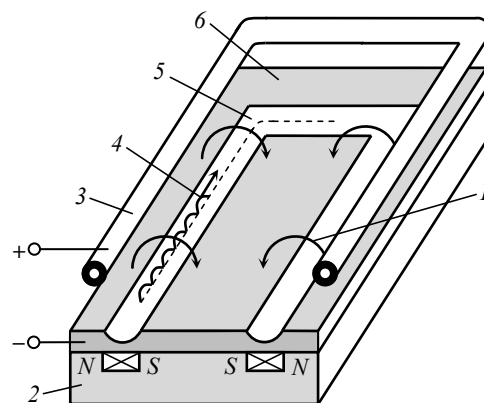


Рис. 1

При использовании МРС электроны будут дрейфовать параллельно поверхности мишени по замкнутым циклоидальным траекториям. Переход на траекторию, более удаленную от поверхности катода-мишени, возможен только при

столкновении электрона с атомом плазмообразующего газа. В среднем при одном столкновении электрон смещается в направлении электрического поля на расстоянии порядка ларморовского радиуса (R_L) – окружность, по которой движется частица в поперечном магнитном поле. В связи с этим в МРС ларморовский радиус начинает играть роль, аналогичную длине свободного пробега в разрядах без магнитного поля. Так как R_L у электронов в МРС имеет порядок 1 мм, быстрые свободные электроны как бы запираются в своеобразную ловушку вблизи поверхности катода, выйти из которой они могут, только растратив свою энергию при столкновениях, приводящих к ионизации. Таким образом, это должно привести к снижению падения напряжения на разряде. В МРС падение напряжения на разряде лежит в пределах 200...700 В, что значительно ниже, чем в других системах ионного распыления [4]. Увеличение времени нахождения электрона вблизи катода-мишени приводит к возрастанию концентрации плазмы до $10^{11}...10^{12}$ см⁻³, что обеспечивает плотность ионного тока на распыляемую поверхность катода-мишени до 1 А/см² и более. Предельные плотности токов на катоде ограничиваются возможностями системы охлаждения МРС.

Катодный узел – один из важнейших элементов МРС. Обычно он состоит из мишени, изготовленной из распыленного материала, и ее водоохлаждающего держателя. В материале мишени недопустимы инородные включения, пустоты, трещины, неравномерное распределение легирующих примесей, поскольку в противном случае загрязняются формируемые слои, распыление поверхности мишени становится неоднородным, появляется дугообразование в процессе распыления и ряд других побочных явлений.

В процессе распыления в результате интенсивной ионной бомбардировки мишень может разогреваться до высокой температуры (~400 °С) [8], что приводит к окислению ее поверхности, усилению диффузионных процессов в сплавных мишенях, может вызвать деформацию мишени и даже ее расплавление, а это снижает эффективность процесса распыления и качество формируемых пленок. Поэтому в процессе распыления необходимо эффективное охлаждение мишени [5]. В МРС могут использоваться мишени различной формы, но чаще всего используют мишени плоской планарной или конической формы. В последнее время также используются профилированные мишени. Скорость нанесения пленок

или покрытий, без расплавления катода-мишени, в МРС может достигать 1.5 мкм/мин [4], [9].

По существу только в начальный момент распыления мишени ионы бомбардируют плоскую мишень, а в дальнейшем бомбардировке подвергается поверхность с V-образным профилем, глубина которого постоянно увеличивается. По мере увеличения степени эрозии мишени скорость осаждения распыляемого материала снижается, причем изменение скорости осаждения зависит от конструкции МРС и разрядного тока. Снижение скорости осаждения можно компенсировать увеличением длительности процесса осаждения. Точность коррекции режима осаждения может быть существенно повышена в том случае, если известна экспериментальная кривая зависимости скорости осаждения от времени эксплуатации мишени при фиксированном разрядном токе [10].

Характерной особенностью МРС является наличие на мишени узкой зоны распыления, обычно имеющей форму кольца или вытянутого эллипса, что сильно затрудняет проблему получения пленки на подложке с требуемой равномерностью по толщине (рис. 2: l – ширина кольцевой зоны распыления; H – среднее расстояние от подложки до мишени; α – полярный угол; γ – угол конусности мишени (в данном случае $\gamma = 0$); R – текущий радиус мишени).

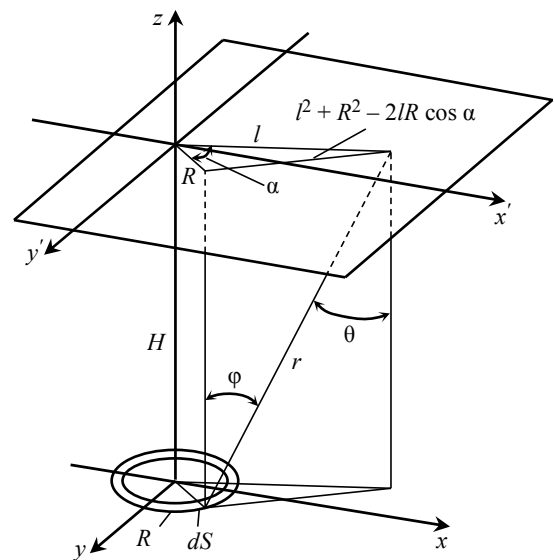


Рис. 2

Повысить равномерность осаждения пленок можно двумя способами: первый, заимствованный из метода термовакuumного осаждения, предусматривает планетарное вращение подложек в процессе осаждения на них пленок, в результате чего угол падения атомов распыляемого

материала на приемную поверхность подложки непрерывно изменяется. Второй способ повышения равномерности осаждения пленок предусматривает оптимизацию геометрии МРС и ее пространственного расположения, при которых высокая равномерность может быть обеспечена при неподвижной или линейно перемещающейся относительно МРС подложке.

Рассмотрим МРС с плоским катодом. В этом случае для расчета распределения толщины пленки или покрытия можно воспользоваться моделью Данилина [5] для плоского кольцевого испарителя, представляющей собой частный случай модели для конусного испарителя (угол конусности мишени в этом случае будет равен нулю). Модель служит для расчета распределения толщины покрытия, наносимого с помощью МРС, при условии, что длина свободного пробега испаренных атомов не меньше расстояния от катода до подложки (прямопролетный режим); распределение материала в пространстве происходит по косинусоидальному закону; скорость распределения пропорциональна плотности ионного тока.

Когда мишень МРС имеет форму тела вращения, на ее поверхности имеется узкая кольцевая зона распыления шириной l с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2 (рис. 3: R_p – расстояние от точки конденсации до центра подложки).

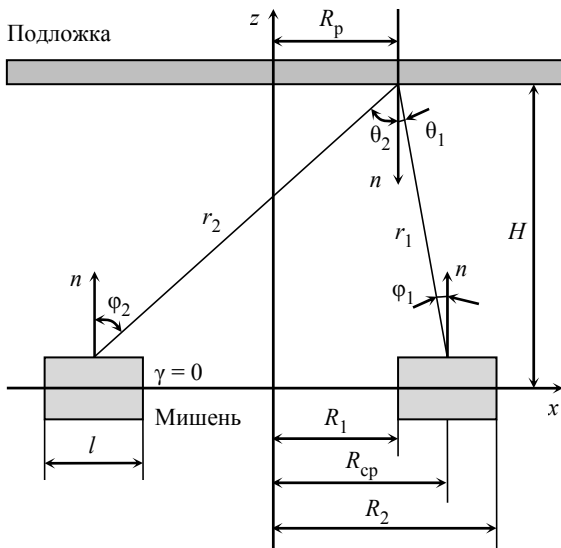


Рис. 3

Из геометрических построений следует:

$$H_1 = H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma;$$

$$\cos \varphi(R, \alpha) = \frac{1}{r} [H_1 \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma];$$

$$\cos \theta(R, \alpha) = H_1 / r;$$

$$r(R, \alpha) = (H_1^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^{0.5}.$$

Общая формула для расчета толщины пленки в этом случае имеет вид

$$h(R_p) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi(R, \alpha) \cos \theta(R, \alpha) R \Pi(R)}{r^2(R, \alpha) \cos \gamma} d\alpha dR.$$

Если угол конусности мишени равен нулю, то эти выражения примут следующий вид:

$$H_1 = H + (R_2 - R) \operatorname{tg} 0 = H;$$

$$\cos \theta(R, \alpha) = H_1 / r = H / r = \cos \varphi(R, \alpha);$$

$$\cos \varphi(R, \alpha) = \frac{1}{r} [H_1 \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma] =$$

$$= \frac{1}{r} [H \cos 0 + (R - R_p \cos \alpha) \sin 0] = \frac{1}{r} [H + 0] = \frac{H}{r};$$

$$r(R, \alpha) = (H_1^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^{0.5} =$$

$$= (H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^{0.5}.$$

Общая формула для расчета толщины пленки примет вид

$$h(R_p) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi(R, \alpha) \cos \theta(R, \alpha) R \Pi(R)}{r^2(R, \alpha) \cos \gamma} d\alpha dR =$$

$$= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(H/r) R \Pi(R)}{(\sqrt{H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha})^2 \cos 0} d\alpha dR =$$

$$= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{H}{\sqrt{H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha}} \right)^2 \times$$

$$\times R \Pi(R) / \left(\sqrt{H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha} \right)^2 d\alpha dR =$$

$$= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi(R) d\alpha dR}{(\sqrt{H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha})^4} =$$

$$= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi(R)}{(H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^2} d\alpha dR.$$

Для упрощения расчета в качестве размеров системы испарения возьмем типовые значения. Диаметр мишени может варьироваться в пределах 0.005...5 м [4]. Однако устройства МРС наиболее эффективны в том случае, когда мишени имеют сравнительно небольшой диаметр – 50...75 мм. Отношение R_p/R_{cp} меняется в диапазоне 0.2...1; отношение H/R_{cp} меняется в диапазоне 0.6...2. Исходя из этого, примем: $l = 36$ мм; $R_1 = 32$ мм; $R_{cp} = 50$ мм; $R_2 = 68$ мм; $H = 20...100$ мм; $R_p = 100$ мм [5].

Исследование распределения плотности тока было выполнено двумя методами: с использованием мишени, состоящей из семи изолированных друг от друга колец, с каждого из которых снимали долю полного тока на мишень, а также замером профиля зоны распыления мишени после длительного времени работы МРС при постоянных параметрах. Полученные данные были аппроксимированы полиномом Лагранжа $\Pi(R)$, учитывающим реальное распределение плотности тока по радиусу мишени. Рассмотрим три случая.

1. Исследование профиля напыления пленки в случае, когда полином Лагранжа равен единице. Вид полинома, описывающего постоянное распределение плотности тока по радиусу мишени:

$$\Pi_1(R) = \begin{cases} 0, & \text{если } R \leq R_1; \\ 1, & \text{если } R_1 \leq R \leq R_2; \\ 0, & \text{если } R \geq R_2. \end{cases}$$

В этом случае общая формула для расчета толщины пленки примет вид

$$h(R_p) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi_1(R)}{(H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^2} d\alpha dR = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R}{(H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^2} d\alpha dR.$$

Зависимость распределения толщины напыляемой пленки по подложке $h(R_p)$ при разных значениях расстояния H от подложки до мишени, если распределение тока по радиусу мишени постоянно, представлена на рис 4: 1 – профиль распыления непосредственно с мишени (без учета H); 2 – $H = 30$ мм; 3 – 40 мм; 4 – 80 мм.

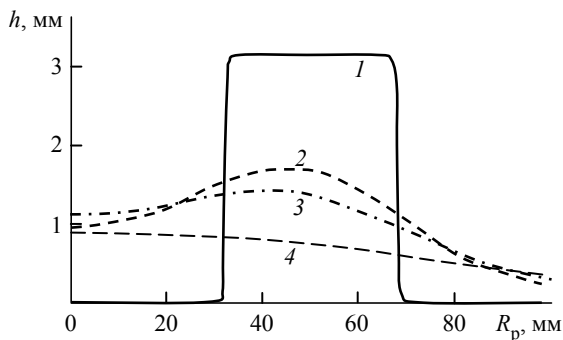


Рис. 4

2. Исследование профиля напыления пленки в случае, когда полином Лагранжа описывает треугольник. В этом случае полином, описывающий распределение плотности тока по радиусу мишени, имеющее вид треугольника, примет следующий вид:

$$\Pi_2(R) = \begin{cases} \frac{R - R_1}{R_{cp} - R_1}, & \text{если } R_1 \leq R \leq R_{cp}; \\ \frac{R_2 - R}{R_2 - R_{cp}}, & \text{если } R_{cp} \leq R \leq R_2. \end{cases}$$

В этом случае общая формула для расчета толщины пленки примет вид

$$h(R_p) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi_2(R)}{(H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^2} d\alpha dR.$$

Зависимость распределения толщины напыляемой пленки по подложке при разных расстояниях от подложки до мишени, если распределение тока по плоскости мишени имеет вид треугольника, представлена на рис. 5: 1 – профиль распыления непосредственно с мишени (без учета H); 2 – $H = 30$ мм; 3 – 40 мм; 4 – 80 мм.

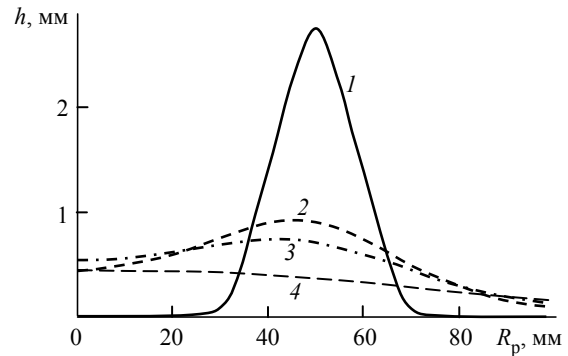


Рис. 5

Из рис. 5 видно, что по сравнению со случаем прямоугольного распределения плотности тока (рис. 4) в рассматриваемом случае толщина подложки несколько уменьшается (при прочих равных параметрах), особенно по мере увеличения расстояния от мишени до подложки. Это связано с тем, что теперь распыление катода происходит неравномерно по его поверхности – характер распределения стал таким, что плотность тока является максимальной при $R = R_{cp}$ и линейно убывает по мере приближения R к R_1 с одной стороны и к R_2 – с другой стороны относительно R_{cp} .

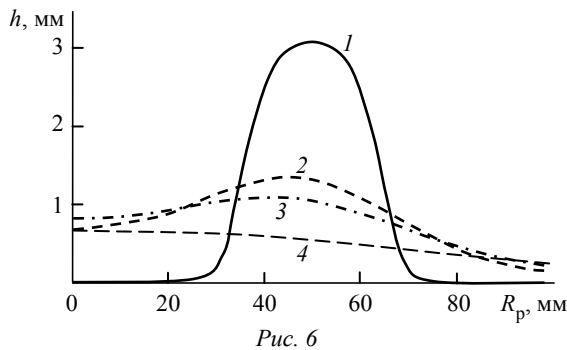
3. Исследование профиля напыления пленки в случае, когда распределение плотности тока аппроксимируется многочленом третьей степени. Этот случай описывает распределение плотности тока по радиусу мишени, наиболее приближенное к реальному. Полином Лагранжа, описывающий распределение плотности тока по радиусу мишени, имеющее форму многочлена третьей степени, примет следующий вид:

$$\Pi_3(R) = \begin{cases} 0, & \text{если } R \leq R_1; \\ -0.24 \left(|R - R_{cp}| 10^{-1} \right)^3 + \\ + 0.44 \left(|R - R_{cp}| 10^{-1} \right)^2 - \\ - 0.64 |R - R_{cp}| 10^{-1} + 1, & \text{если } R_1 \leq R \leq R_2; \\ 0, & \text{если } R \geq R_2. \end{cases}$$

В этом случае общая формула для расчета толщины пленки примет вид

$$h(R_p) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi_3(R)}{\left(H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha \right)^2} d\alpha dR.$$

Зависимость распределения толщины напыляемой пленки по подложке при разных расстояниях от подложки до мишени, если распределение тока по плоскости мишени аппроксимируется многочленом третьей степени, представлена на рис. 6: 1 – профиль распыления непосредственно с мишени (без учета H); 2 – $H = 30$ мм; 3 – 40 мм; 4 – 80 мм.



Как видно из рис. 6, толщина пленки при учете реального распределения плотности тока по радиусу мишени несколько «проседает» по сравнению со случаем равномерного распределения плотности тока. Тем не менее толщина пленки при аппроксимации распределения плотности тока полиномом третьей степени получается больше, чем при треугольном распределении. Этот случай описывает наиболее реальный процесс.

С целью определения геометрических параметров системы осаждения пленок в МРС необходимо исследовать равномерность распределения пленки по толщине на плоских поверхностях в зависимости от угла конусности мишени и отношения H/R_{cp} .

Будем считать, что угол конусности мишени равен нулю (плоский диск) и распределение плотности тока по радиусу мишени постоянное

($\Pi(R) = 1$). Определим такое значение H/R_{cp} , при котором толщина покрытия на максимальной площади не будет меняться с точностью $\pm 2\%$. Для этого необходимо найти толщину пленки в центре подложки (при $R_p = 0$), а также отношение толщины пленки при $R_p \neq 0$ к толщине пленки в центре подложки. Далее, фиксируя R_{cp} и варьируя H , найдем такое соотношение этих величин, при котором отношение толщины распределенной по подложке пленки к толщине пленки в центре подложки будет близко к 100%.

Определим толщину пленки в центре подложки:

$$\begin{aligned} h_0|_{R_p=0} &= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{(\cos \varphi(R, \alpha))^2 R \Pi(R)}{r^2(R, \alpha) \cos \gamma} d\alpha dR = \\ &= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi(R)}{\left(\sqrt{H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha} \right)^4} d\alpha dR = \\ &= \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi(R)}{(H^2 + 0 + R^2 - 2 \cdot 0 \cdot R \cos \alpha)^2} d\alpha dR = \\ &= H^2 \int_{R_1}^{R_2} \frac{R \Pi(R)}{(H^2 + R^2)^2} dR. \end{aligned}$$

Общая формула для расчета толщины пленки имеет вид

$$h(R_p) = \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H^2 R \Pi(R)}{(H^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha)^2} d\alpha dR.$$

Таким образом, необходимо, чтобы $h/h_0 \rightarrow 100\%$.

Распределение пленки по толщине для кольцевого испарителя представлено на рис. 7: 1 – $H = 30$ мм, $R_{cp}/H = 1.6$; 2 – $H = 40$ мм, $R_{cp}/H = 1.25$; 3 – $H = 50$ мм, $R_{cp}/H = 1.0$; 4 – $H = 60$ мм, $R_{cp}/H = 0.83$; 5 – $H = 65$ мм, $R_{cp}/H = 0.77$; 6 – $H = 100$ мм, $R_{cp}/H = 0.5$.

Из рис. 7 видно, что наибольшая равномерность распределения пленки по толщине в среднем получается при $H = 60 \dots 65$ мм. При расчете было зафиксировано значение $R_{cp} = 50$ мм. Таким образом, $R_{cp}/H = (50/65) \dots (50/60)$; $R_{cp} = 0.77H \dots 0.83H$; $R_{cp} \approx 0.8H$; $H = 1.25R_{cp}$. Из этого можно сделать вывод, что целесообразно располагать подложку на расстоянии $1.25 R_{cp}$ от мишени для достижения наибольшей равномерности распределения толщины осаждаемой пленки.

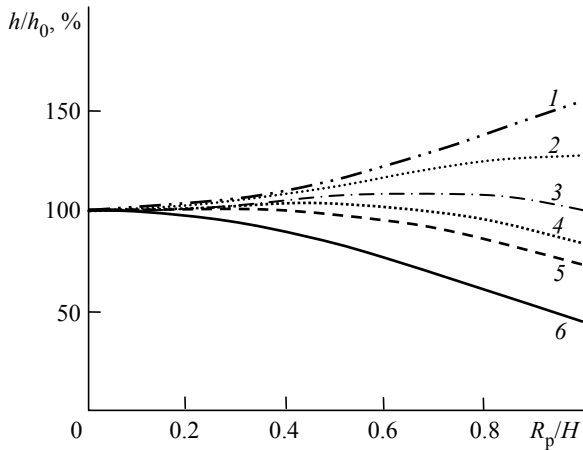


Рис. 7

Как упоминалось ранее, только в начальный момент распыления мишень является плоской, а в дальнейшем бомбардировке подвергается поверхность с V-образным профилем, глубина которого постоянно увеличивается. В этом случае угол конусности распыляемой мишени $\gamma \neq 0$. Рассматриваемая система показана на рис. 8.

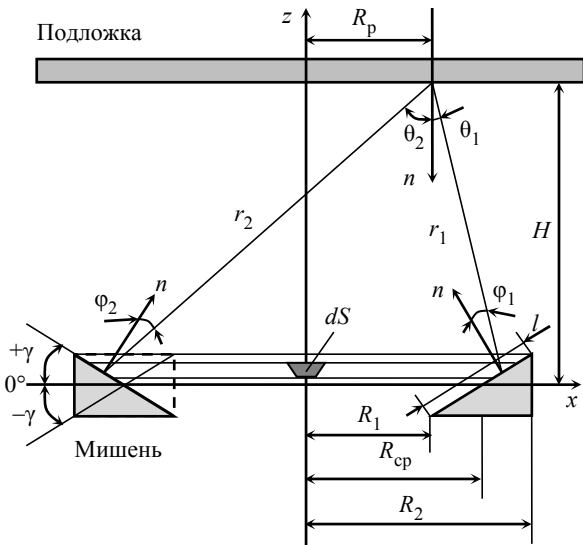


Рис. 8

Знак угла γ изменяется в зависимости от радиуса мишени и его необходимо учитывать. Рассмотрим геометрию мишени отдельно и более подробно (рис. 9).

Возникают две области распыления. Результирующая толщина пленки будет равняться сумме толщин, полученных в результате совместного испарения этих областей. Будем считать, что распределение плотности тока по радиусу мишени равномерно. Запишем соотношения, характеризующие полученные области.

Для первой области распыления:

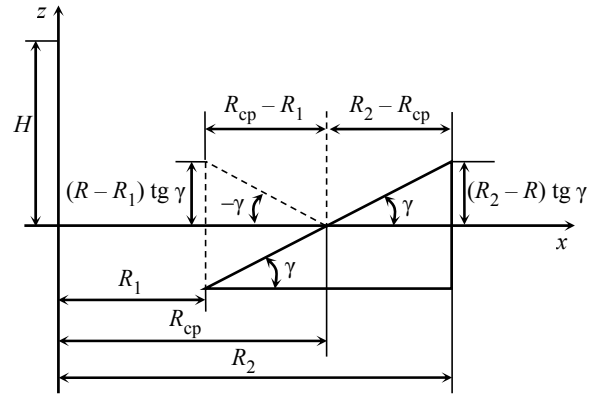


Рис. 9

$$H_1 = H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma);$$

$$r(R, \alpha) = \left(H_1^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha \right)^{0.5} =$$

$$= \sqrt{[H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha};$$

$$\cos \varphi(R, \alpha) = \frac{1}{r} [H_1 \cos(-\gamma) + (R - R_p \cos \alpha) \sin(-\gamma)] =$$

$$= \frac{[H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)] \cos(-\gamma) + (R - R_p \cos \alpha) \sin(-\gamma)}{\sqrt{[H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha}}$$

$$\cos \theta(R, \alpha) =$$

$$= \frac{H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)}{\sqrt{[H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha}}$$

Толщина пленки, получаемой посредством испарения этой области:

$$h_1(R_p) = \int_{R_1}^{R_{cp}} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta \cos \varphi R \Pi(R)}{r^2 \cos(-\gamma)} d\alpha dR =$$

$$= \int_{R_1}^{R_{cp}} \int_0^{2\pi} \frac{H_1}{r} \frac{H_1 \cos(-\gamma) + (R - R_p \cos \alpha) \sin(-\gamma)}{r} \times$$

$$\times R \Pi(R) / r^2 \cos(-\gamma) d\alpha dR =$$

$$= \int_{R_1}^{R_{cp}} \int_0^{2\pi} H_1 [H_1 \cos(-\gamma) + (R - R_p \cos \alpha) \sin(-\gamma)] \times$$

$$\times R \Pi(R) / r^4 \cos(-\gamma) d\alpha dR =$$

$$= \int_{R_1}^{R_{cp}} \int_0^{2\pi} [H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)] \times$$

$$\times \{ [H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)] \cos(-\gamma) + (R - R_p \cos \alpha) \times$$

$$\times \sin(-\gamma) \} R \Pi(R) / \left\{ [H + (R - R_1) \operatorname{tg}(-\gamma)]^2 + \right.$$

$$\left. + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha \right\}^2 \cos(-\gamma) d\alpha dR.$$

Для второй области распыления:

$$\begin{aligned}
 H_1 &= H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma; \\
 r(R, \alpha) &= \left(H_1^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha \right)^{0.5} = \\
 &= \sqrt{[H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha}; \\
 \cos \varphi(R, \alpha) &= \frac{1}{r} [H_1 \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma] = \\
 &= \frac{[H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma] \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma}{\sqrt{[H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha}}; \\
 \cos \theta(R, \alpha) &= \\
 &= \frac{H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{[H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha}}; \\
 h_2(R_p) &= \int_{R_{cp}}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \theta \cos \varphi R \Pi(R)}{r^2 \cos \gamma} d\alpha dR = \\
 &= \int_{R_{cp}}^{R_2} \int_0^{2\pi} \frac{H_1}{r} \frac{H_1 \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma}{r} \times \\
 &\quad \times R \Pi(R) / r^2 \cos \gamma d\alpha dR = \\
 &= \int_{R_{cp}}^{R_2} \int_0^{2\pi} H_1 [H_1 \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma] \times \\
 &\quad \times R \Pi(R) / r^4 \cos \gamma d\alpha dR = \\
 &= \int_{R_{cp}}^{R_2} \int_0^{2\pi} [H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma] \{ [H + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma] \times \\
 &\quad \times \cos \gamma + (R - R_p \cos \alpha) \sin \gamma \} R \Pi(R) / \{ [H + \\
 &\quad + (R_2 - R) \operatorname{tg} \gamma]^2 + R_p^2 + R^2 - 2R_p R \cos \alpha \}^2 \times \\
 &\quad \times \cos \gamma d\alpha dR.
 \end{aligned}$$

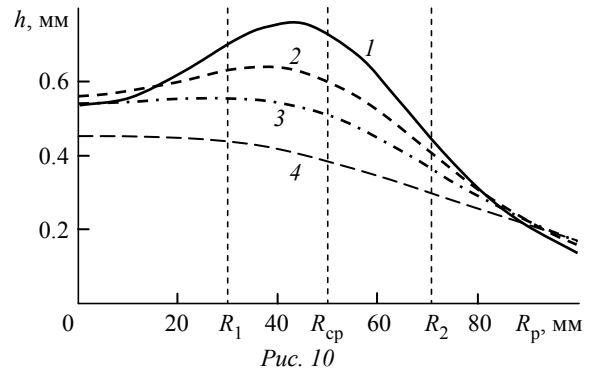
Толщина покрытия, нанесенного на подложку, будет определяться суммой от воздействия на нее обеих частей мишени:

$$h(R_p) = h_1(R_p) + h_2(R_p).$$

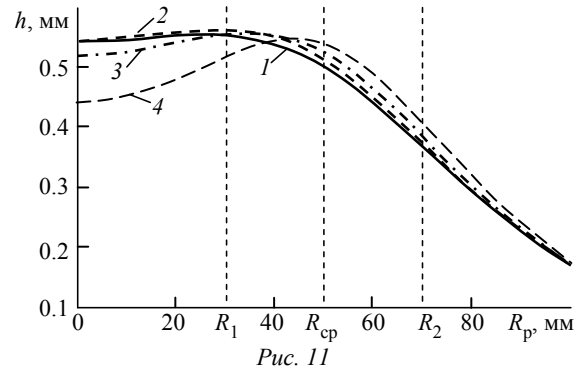
Рассмотрим влияние расстояния от мишени до подложки на характер распределения нанесенного покрытия в случае, когда мишень с течением времени распыляется и приобретает форму V-образной канавки. Пусть угол конусности мал $\gamma = \pi/15$, а выражение, описывающее распределение плотности тока по радиусу мишени, аппроксимируется треугольником.

На рис. 10 представлено распределение толщины пленки для кольцевого испарителя при разных расстояниях от мишени до подложки (I –

$H = 40$ мм; 2 – 50 мм; 3 – 60 мм; 4 – 80 мм). При расчетах было принято $R_{cp} = 50$ мм. Наибольшая равномерность распределения пленки по толщине наблюдается при $H = 1.25 R_{cp} \approx 60$ мм.



Влияние угла конусности на профиль напыляемого покрытия при $R_{cp} = 50$ мм, $H = 1.25 R_{cp} \approx 60$ мм представлено на рис. 11: 1 – $\gamma = 0^\circ$; 2 – 15° ; 3 – 30° ; 4 – 45° .



Из рис. 11 видно, что достичь наиболее высокой равномерности распределения пленки по толщине можно при небольших значениях угла конусности γ (не более 30°).

При увеличении γ в областях подложки, находящихся непосредственно над катодом, наблюдается сильное утолщение напыляемой пленки, а в центре и по краям подложки толщина, наоборот, сильно уменьшается (происходит перераспределение толщины). При $\gamma > 30^\circ$ уже наступает нерабочий режим.

Следовательно, для получения максимальных площадей с высокой равномерностью распределения пленки по толщине необходимо не допускать больших значений γ и придерживаться соотношения $R_{cp} \approx 0.8H$.

Таким образом, исследование влияния изменения профиля распыляемой поверхности катода-мишени на распределение толщины наносимого на подложку покрытия позволило определить ряд параметров магнетронной системы распыления, оказывающих существенное влияние на профиль напыляемого покрытия и требующих экспериментального определения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майссел Л., Гленг Р. Технология тонких пленок. М.: Сов. радио, 1977. 664 с.
2. Свадковский И. В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий. Минск: Бестпринт, 2002. 214 с.
3. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.
4. Барченко В. Т., Быстров Ю. А., Колгин Е. А. Ионно-плазменные технологии в электронном производстве. СПб.: Энергоатомиздат, 2001. 332 с.
5. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 328 с.
6. Формирование массивов GaAs нитевидных нанокристаллов на подложке Si (111) методом магнетронного осаждения / И. П. Сошников, В. Г. Дубровский, Н. В. Сибирев и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 12. С. 28–33.
7. Барченко В. Т., Павленко Т. С. Анализ формирования профилей имплантированных ионов в зависимости от структурного состояния мишени и режимов имплантации // Изв. вузов. Физика. Т. 57, № 10/3. С. 99–103.
8. Method of magnetron target temperature evaluation by analysis of thermal radiation spectrum / V. A. Gerasimov, D. K. Kostrin, L. M. Selivanov et al. // J. of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 729. P. 012019.
9. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Uhov A. A. Spectrometric control of coatings deposition process // J. of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. P. 012055.
10. Барченко В. Т., Егоров С. К., Сошников И. П. Моделирование вольт-амперных характеристик магнетронных распылительных систем // Вакуумная техника и технология. 2009. Т. 19, № 3. С. 173–178.

V. V. Chernigovskiy, S. A. Martsinukov, A. A. Lisenkov, D. K. Kostrin
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

RESEARCH OF THE THICKNESS DISTRIBUTION OF COATINGS APPLIED BY MAGNETRON SPUTTERING

In this paper the structure of a magnetron sputtering system is considered. The model of Danilin for a flat ring evaporator was studied and used to calculate the thickness distribution of the coating applied at different variations of the current density at the cathode (uniform, in the form of a triangle and in the form of a polynomial of the third degree), the appropriate graphs were also obtained. Correlation between the parameters of magnetron sputtering system, at which the greatest uniformity of the thickness distribution of the applied film was observed, was analyzed. The study of the profile of target spraying with a non-zero cone angle was researched. It was found that with an increase in the angle of cone in the areas of the substrate situated directly above the cathode, there is a strong thickening of the sprayed film, and in the center and at the edges of the substrate thickness, on the contrary, is greatly reduced – there is a redistribution of the film thickness. The parameters of the target at which the greatest uniformity of distribution of a film on thickness is reached were revealed.

Magnetron sputtering system, Danilin model, thin films, coating profile
