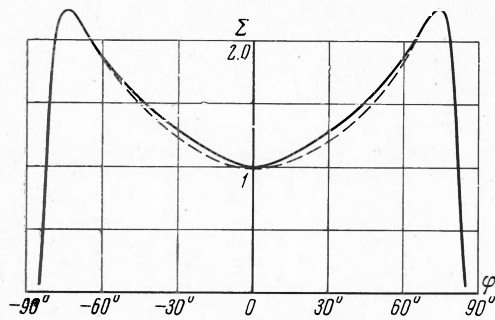


О ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, УНОСИМЫХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКИ

Б. М. Калмыков, Ю. А. Рыжов
(Москва)

Приведены методы и некоторые результаты расчета изменений формы поверхности однородного и изотропного тела под действием ионной бомбардировки. Указывается на возможные ошибки применявшейся [1] экспериментальной методики определения зависимости интенсивности уноса от угла падения ионного пучка.

Интенсивность уноса массы под действием ионной бомбардировки определяется коэффициентом распыления S [ат / ион], равным количеству атомов материала, выбитых одним бомбардирующим ионом. Существующие экспериментальные данные показывают, что при энергиях порядка кэв для поликристаллических материалов коэффициент распыления существенно зависит от угла φ , падения ионов на поверхность.



Фиг. 1

Типичная зависимость $\Sigma(\varphi) = S(\varphi) / S(0)$, зависимость относительного коэффициента распыления меди ионами Ag^+ при энергии 6 кэв от угла падения ионного пучка φ , отсчитанного от нормали к поверхности, представляющая собой четную функцию, приведена на фиг. 1. Представляет интерес задача об изменении формы тела по времени при действии на него однородного (по направлению, энергии и плотности) потока ионов.

Пусть поток ионов плотностью j_0 [ион / cm^2 сек], движущийся в направлении отрицательной оси y (фиг. 2), падает на поверхность тела, начальная форма которого описывается кривой $y_0(x)$. При плотностях

ионного потока, имеющих место в практике катодного распыления, режим движения ионного потока свободно-молекулярный, а потому различия пространственной осесимметричной задачи с плоской в интересующем нас плане здесь не будет. При известной зависимости $s(\varphi)$ скорость уноса материала по нормали к поверхности в точке P будет равна

$$W_n = -\frac{j_0 \cos \varphi S(\varphi)}{N_0} = -\frac{j_0 S_0}{N_0} \Sigma(\varphi) \cos \varphi \quad (S_0 = S(0))$$

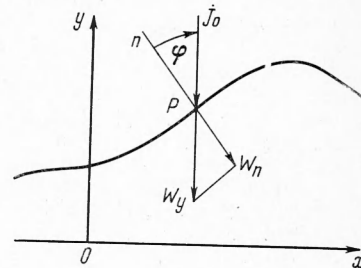
где N_0 [ат / cm^3] — атомная плотность бомбардируемого материала, φ — угол, составленный нормалью к поверхности в точке P с осью y . Тогда скорость уноса по оси y

$$W_y = \frac{W_n}{\cos \varphi} = -\frac{j_0 S_0}{N_0} \Sigma(\varphi) \quad (1)$$

$$y(x, \tau) = y_0(x) + \int_0^\tau W_y(x, \tau) d\tau \quad (2)$$

где τ — время. Подставляя (1) в (2) и дифференцируя по времени, получим:

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} = -\frac{j_0 S_0}{N_0} \Sigma(\varphi) \quad (3)$$



Фиг. 2

В дальнейшем целесообразно представить зависимость Σ как функцию $\operatorname{tg} \varphi$, т. е. $\partial y / \partial x$. Тогда, дифференцируя (3) по x , получим

$$\frac{\partial^2 y}{\partial \tau \partial x} = -\frac{j_0 S_0}{N_0} \frac{\partial \Sigma}{\partial (\partial y / \partial x)} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Это нелинейное дифференциальное уравнение гиперболического типа заменой приводится к виду

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial \Sigma}{\partial j} \frac{\partial j}{\partial x} \quad \left(i = \frac{\tau j_0 S_0}{N_0}, j = \frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Зависимость $\Sigma(\varphi)$, а следовательно, и $\Sigma(f)$ заданы, поэтому уравнение (4) можно представить в следующем виде

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \xi(f) \frac{\partial f}{\partial x} \quad \left(\xi(f) = -\frac{\partial \Sigma}{\partial f} \right) \quad (5)$$

Решение этого уравнения, удовлетворяющее начальному условию

$$f(x, 0) = \frac{\partial y_0}{\partial x} = F(x) \quad (6)$$

можно записать в неявном виде

$$V(x, t, f) = f - F[x + t\xi(f)] = 0 \quad (7)$$

Действительно,

$$\frac{\partial V}{\partial f} = 1 - F' t \frac{\partial \xi}{\partial f}, \quad \frac{\partial V}{\partial x} = -F', \quad \frac{\partial V}{\partial t} = -F' \xi(f)$$

И тогда

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial V / \partial t}{\partial V / \partial f} = \frac{-F' \xi(f)}{1 - F' t \partial \xi / \partial f}, \quad \xi(f) \frac{\partial f}{\partial x} = \xi(f) \frac{\partial V / \partial x}{\partial V / \partial f} = \frac{-F' \xi(f)}{1 - F' t \partial \xi / \partial f} = \frac{\partial f}{\partial t}$$

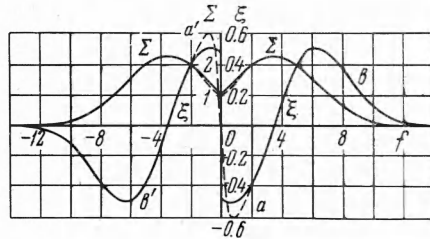
Для зависимости $\Sigma(\varphi)$, изображенной на фиг. 1, вид функций $\Sigma(f)$ и $\xi(f)$ показан на фиг. 3.

Точность существующих экспериментальных данных по зависимости коэффициента эрозии от угла падения ионного пучка не позволяет с необходимой достоверностью определить характер функции $\xi(f)$ при f , близких к нулю.

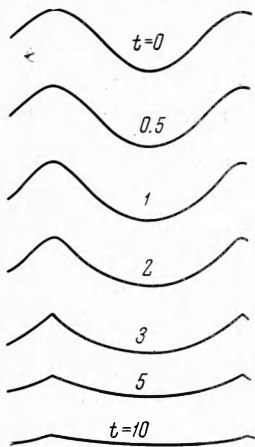
Так, если предположить, что при малых φ зависимость $\Sigma(\varphi) \sim (\cos \varphi)^{-1}$ (см. например, [2]), то $\xi(f) \rightarrow 0$ при $f \rightarrow 0$. Экспериментальные зависимости $\Sigma(f)$ хорошо аппроксимируются функцией вида $\exp\{a|f| - bf^2\}$, а в этом случае $\xi(0)$ будет конечным и двужначным. На фиг. 3 пунктиром показаны зависимости $\Sigma(f)$ и $\xi(f)$ для случая, когда $\partial S / \partial \varphi = 0$ при $\varphi = 0$ ($\Sigma(\varphi) \sim (\cos \varphi)^{-1}$ при малых φ).

Видно, что заметное изменение функции $\xi(f)$ приводит к отклонениям в зависимости $\Sigma(f)$, не превышающим разброс экспериментальных точек в такого рода исследованиях.

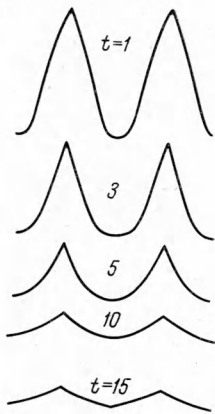
Изложенным выше методом были рассчитаны изменения формы некоторых простейших поверхностей в процессе ионной бомбардировки. Использовалась зависи-



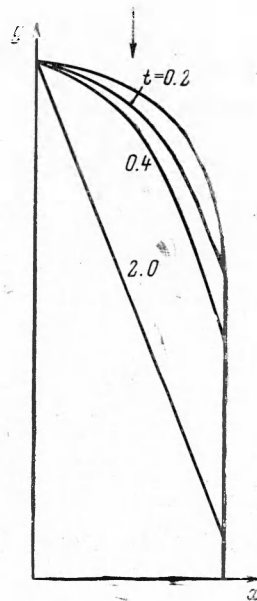
Фиг. 3



Фиг. 4



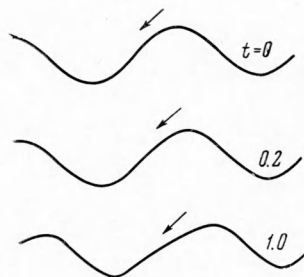
Фиг. 5



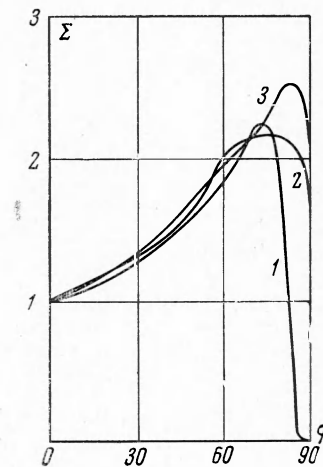
Фиг. 6

мость $\xi(f)$, показанная на фиг. 3 пунктиром. Полученное решение не учитывает взаимонапыления распыляемых поверхностей, поэтому применимо, строго говоря, к выпуклым поверхностям. По последовательным изменениям начальных форм тела $y_0 = \cos x$ и $y_0 = 4 \cos x$ в процессе ионной бомбардировки на фиг. 4 и 5 соответственно видно, что при однородной и изотропной структурах бомбардируемого материала происходит выравнивание поверхности.

Для оценки влияния вида зависимости $\xi(f)$ (при малых f) на деформацию поверхности во время ионной бомбардировки были проведены расчеты бомбардировки цилиндра с полусферическим закруглением $y_0 = \sqrt{1-x^2}$ при использовании обеих функций $\xi(f)$, показанных на фиг. 3. Результаты приведены на фиг. 6. Отличие результатов расчета по $\partial S / \partial \varphi = 0$ при $\varphi = 0$ и по $\partial S / \partial \varphi \neq 0$ при $\varphi = 0$ не выходят за рамки точности счета. Видно, что в обоих случаях форма поверхности стремится к конической с $\lim |f| = 3,5$ при $t \rightarrow \infty$, что соответствует f , при котором $\xi(f) = 0$, т. е. унос максимален (Σ_{\max}). На фиг. 7 показано изменение формы поверхности $y_0 = \cos x$,



Фиг. 7



Фиг. 8

бомбардируемой под углом $\varphi_0 = 40^\circ$ к оси x . Видна тенденция образования гребней, аналогичных отмеченным в работе [3].

В экспериментальных исследованиях Венера [1] зависимости $S(\varphi)$ определялись по уносу сферической модели, причем предполагалось, что за время эксперимента поверхность с данной координатой x не сильно меняет угол встречи с ионным потоком, а потому $\Sigma(\varphi) \sim \Delta y(\varphi) / \Delta y(0)$. В работе [1] не указывается точное значение j_0 , при котором проводились исследования, поэтому определить характерные приведенные времена t в этих экспериментах не представлялось возможным. Однако, исходя из указания автора, что j_0 было порядка $1 \text{ ma} \cdot \text{cm}^{-2}$, можно принять $t = 0.2 \div 0.4$. На фиг. 8 сравнивается зависимость $\Sigma(\varphi)$, заложенная в расчет уноса полусферы по предлагаемой методике, кривая (1), с зависимостями, полученными обработкой результатов расчета форм поверхности при $t = 0.2$ и 0.4 по методике Венера [1], кривые (2) и (3) соответственно. Видно, что такая обработка приводит к ошибке как в определении значений $\Sigma(\varphi)$, так и в оценке угла φ , соответствующего максимуму этой зависимости.

Авторы благодарят Д. С. Стриженова и И. И. Шкарбана за полезные обсуждения.

Поступила 19 VII 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Wehner G. K. Influence of the Angle of Incidence on Sputtering Yields J. Appl. Phys., 1959, 30, 1762.
2. Р о л П. К., Ф л ю и т И. М., К и с т е м а к е р И. Распыление меди при бомбардировке ионами в диапазоне энергий 5—25 кэв. Сб. «Электростатические реактивные двигатели», Изд. «Мир», 1964
3. Balarin M., Hilbert F. Die Einwirkung energiereicher Ionen auf Metalloberflächen J. Phys. Chem. Solids., 1961, vol. 20, No. 1/2, p. 138—145.