

2.2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

2.2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение

Одним из эффектов, возникающих при взаимодействии ускоренных ионов с веществом и наиболее часто используемым в ионных и плазменных технологиях, является ионное распыление материалов. В зависимости от материала, формы, энергии и удельной мощности ионного пучка при взаимодействии его с веществом происходят процессы направленного изменения геометрических размеров и свойств твердого тела, а также их контроля. Ионный пучок может быть сформирован как из положительных, так и отрицательных ионов, однако наиболее часто используют ионы, несущие положительный заряд, вследствие большей простоты их получения и управления параметрами пучка. В качестве материала ионного пучка могут быть использованы атомы практически всех элементов таблицы Менделеева, включая ионы молекул, что при возможности варьирования величиной заряда делает ионные пучки потенциально более гибким средством воздействия на обрабатываемый или исследуемый объект по сравнению с электронными пучками.

Теоретические основы расчета

Ударяющиеся о поверхность образца ионы связываются с ней за счет адсорбции или хемосорбции, что может быть использовано для получения тонкопленочных слоев. Вероятность того, что ударившийся о поверхность ион останется на ней, рассчитывается с помощью коэффициента аккомодации:

$$\alpha = \frac{E_i - E'_d}{E_i - E''_d} \leq 1, \quad (2.1)$$

где E_i — кинетическая энергия иона; E'_d — энергия десорбированного атома до наступления термодинамического равновесия с подложкой; E''_d — энергия десорбированного атома после установления термодинамического равновесия с подложкой.

Ионное распыление материала происходит при взаимодействии (бомбардировке) ускоренных до энергии 0,5...5 кэВ ионов с веществом, находящимся в твердом или жидком состоянии. Сущность метода (рис. 2.21) заключается в механическом выбивании атомов или молекул материала мишени путем передачи им кинетической энергии ускоренных ионов инертного газа.

Если бомбардирующие поверхность образца ионы передают настолько большой импульс, что полностью освобождают от связей один или несколько атомов, то происходит физическое распыление. Это явление наиболее эффективно проявляется при энергиях иона 0,5...5 кэВ, а показателем эффективности является КР:

$$S = \frac{N_a}{N_i}, \quad (2.2)$$

где N_a — число распыленных атомов; N_i — число падающих на поверхность мишени ионов. Коэффициент распыления можно рассчитать по следующей формуле:

$$S = \frac{N_A z q_e \Delta m}{M J_i t}, \quad (2.3)$$

где N_A — число Авогадро, атом/кмоль; $z q_e$ — заряд иона (z — кратность ионизации), Кл; Δm , M — масса, кг, и молекулярная масса, кг/кмоль, распыляемого вещества; J_i — ионный ток, А; t — время, с.

Коэффициент распыления зависит от максимальной энергии E_{\max} передаваемой атому материала падающим на поверхность мишени ионом (с энергией E_i), коэффициента α , энергии межатомных связей распыляемого материала U_0 и рассчитывается по следующей формуле:

$$S(E) = \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{E_{\max}}{U_0}. \quad (2.4)$$

Отношение масс распыленных атомов и падающих ионов M_2/M_1 влияет на коэффициент α , а $U_0 \approx 4H_{\text{субл}}$, где $H_{\text{субл}}$ — энергия сублимации распыляемого материала.

Соотношение между M_2/M_1 и α

M_2/M_1	0,01	1,0	10,0
α	0,17	0,23	5,0

Коэффициент распыления зависит также от угла падения иона:

$$S(\phi) = \frac{S(0)}{\cos \phi}, \quad (2.5)$$

где $S(0)$ — коэффициент распыления при падении иона перпендикулярно поверхности мишени, т. е. при $\phi = 0$. Увеличение коэффициента распыления при отклонении направления падения иона от перпендикуляра к поверхности объясняется гипотезой о парных упругих столкновениях (рис. 2.22). Согласно этой гипотезе, при столкновении ускоренного иона с молекулярной

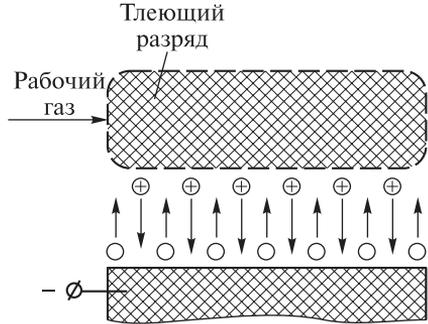


Рис. 2.21. Схема процесса ионно-плазменного распыления

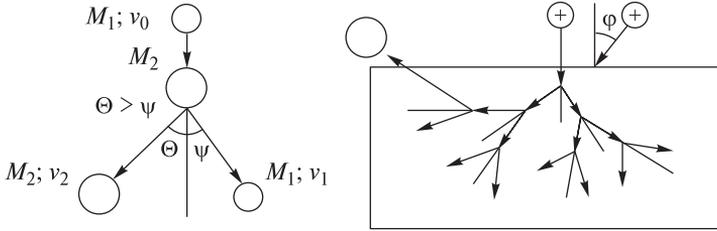


Рис. 2.22. Схема парных соударений

массой M_1 с атомом материала мишени с молекулярной массой M_2 угол отклонения иона Ψ меньше угла отклонения атома Θ .

Явление ионного распыления широко используется для строго дозированного удаления вещества с определенных участков обрабатываемого изделия (ионное фрезерование), нанесения тонких пленок в вакууме из большой номенклатуры материалов, анализа распыленных частиц по массам.

Скорость ионного распыления рассчитывается по следующим формулам ($z = 1$):

$$v_p = S \frac{j_i M}{q_e N_A} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right], \quad (2.6)$$

или

$$v_p = S \frac{j_i M 10^9}{q_e N_A \rho} \left[\frac{\text{нм}}{\text{с}} \right], \quad (2.7)$$

где j_i — плотность ионного тока, А/м^2 ; ρ — плотность распыляемого материала, кг/м^3 .

Погрешность травления, т. е. отклонение получаемых размеров от размеров маски, зависит от показателей изотропности травления. Строгая направленность обработки ускоренными частицами (заряженными ионами, нейтральными атомами или молекулами) способствует уменьшению погрешности размеров благодаря преимущественному травлению перпендикулярно поверхности, т. е. вглубь материала (см. рис. 2.23, а). Травление электрически нейтральными частицами (молекулами, атомами и радикалами), не имеющими преимущественного направления движения, вызывает появление погрешности размеров обработки за счет изотропного травления как перпендикулярно поверхности, т. е. вглубь материала, так и параллельно ей, т. е. под маску (рис. 2.23, б).

При ионном травлении погрешность размеров обработки может появиться при неправильно выбранной толщине маски. Если толщина маски намного больше толщины вытравливаемого слоя, то распыляемые атомы осаждаются на боковые стенки маски и изменяют ее размеры (длину, ширину или диаметр окна). При этом соответствующие размеры обрабатываемого слоя уменьшаются. Если толщина маски меньше или равна толщине обрабатываемого слоя, то материал маски может стравиться быстрее, чем материал слоя, и его размеры могут стать больше требуемых.

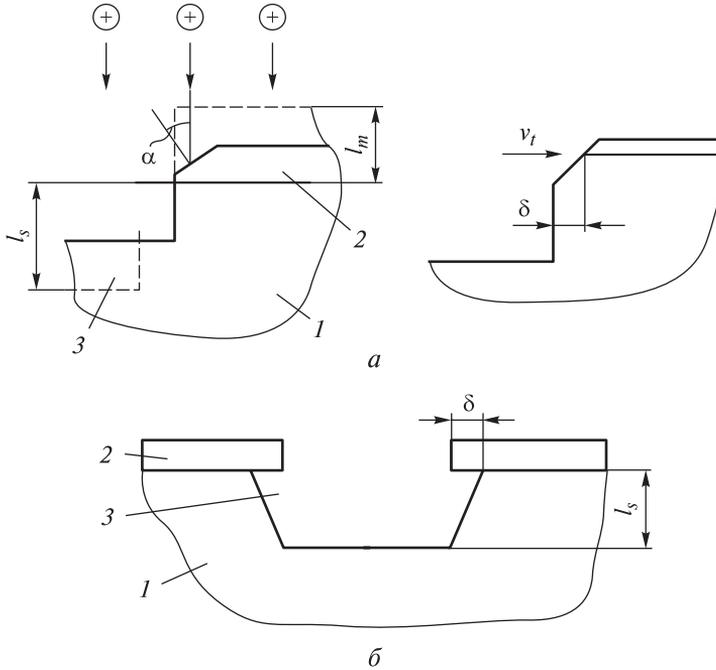


Рис. 2.23. Схема формирования погрешности ионного (а) и ионно-химического (б) травления:

1 — изделие; 2 — масса; 3 — обрабатываемый слой

Оптимальную толщину маски при ионном травлении рассчитывают по следующей методике.

1. Максимальное время травления маски t_1 толщиной l_m без погрешности δ

$$t_1 = \frac{l_m \cos \alpha}{v_m(\alpha)}, \quad (2.8)$$

где $v_m(\alpha) = \frac{v_m(0)}{\cos \alpha}$ — скорость травления маски под углом α , возникающим в результате более интенсивного распыления скругленных кромок маски (рис. 2.23, а); $v_m(0)$ — скорость травления маски при $\alpha = 0$.

2. Время травления слоя t на заданную глубину l_s

$$t = \frac{l_s}{v_s(0)}, \quad (2.9)$$

где $v_s(0)$ — скорость травления слоя при $\alpha = 0$.

3. Скорость бокового травления маски

$$v_t = \frac{v_m(\alpha)}{\sin \alpha}. \quad (2.10)$$

4. Погрешность травления δ равна:

$$\delta = v_t(t - t_1) = \frac{l_s v_m(0)}{\sin \alpha \cos \alpha \cdot v_s(0)} - \frac{l_m}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.11)$$

5. Оптимальная толщина маски при $\delta = 0$

$$l_m^{\text{опт}} = \frac{l_s v_m(0)}{\cos^2 \alpha \cdot v_s(0)}. \quad (2.12)$$

К материалам маски при ионном травлении предъявляются следующие требования: высокая разрешающая способность; термостойкость; минимальная скорость травления по отношению к скорости травления слоя. Применяют маски из фольги (трафареты) с минимальным размером рисунка 30...50 мкм и тонкопленочные (контактные) маски с минимальным размером рисунка 100...500 нм.

Для изготовления тонкопленочных масок используют следующие материалы:

- органические материалы: фото-, электроно-, ионо- и рентгенорезисты, которые могут работать при температуре не выше 423...473 К, что определяет критическую плотность мощности ионного тока на мишени: 0,05 Вт/см² — без охлаждения мишени; 0,5 Вт/см² — с водяным охлаждением без плотного прижатия к мишени; 1 Вт/см² — с водяным охлаждением по всей площади поверхности мишени;
- металлы: Ti, Cr, Mn, V, Mo, Ta и Al, выдерживающие температуру нагрева 620...670 К, скорость травления которых резко уменьшается при напуске кислорода (через такие маски обрабатывают материалы с коэффициентом распыления мало зависящим от парциального давления кислорода: SiO₂, Si₃N₄, Cu, Ag, Au, Pt, GaAs и др.);
- графит, имеющий самый низкий коэффициент распыления в чистом аргоне и выдерживающий большие плотности мощности ионного тока на мишени.

2.2.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Варианты заданий

Для выполнения домашнего задания, пользуясь табл. 2.2, необходимо решить следующие две задачи.

Задание 1

А. Рассчитать скорость распыления (кг·м⁻²·с⁻¹) мишени из материала (указывается материал) ионами аргона с энергией (указывается в номере варианта) кэВ и плотностью тока (указывается в номере варианта) А/м².

Б. Определить плотность ионного тока j_i (А/м²), необходимую для обеспечения скорости распыления мишени из (указывается материал), равную $v_p =$ (указывается в номере варианта) (нм/с), при энергии ионов аргона

(указывается в номере варианта), Дж. Как изменится j_i при распылении мишени из (указывается материал) ионами ксенона?

Задание 2

Рассчитать погрешность δ ионного травления кремниевой микросхемы через маску из фоторезиста в установке диодного типа. Определить, при какой толщине маски погрешность δ будет равна нулю.

В задании 1А для каждого варианта выдают следующие данные:

- распыляемый материал;
- энергия ионов аргона $E_{и}$, кэВ;
- плотность тока $j_{и}$, А/см².

В задании 1Б для каждого варианта выдают следующие данные:

- распыляемый материал;
- скорость распыления материала v_p , нм/с;
- энергия ионов аргона и ксенона $E_{и}$, кэВ.

В задании 2 для каждого варианта выдают следующие данные:

- толщина вытравливаемого слоя кремния l_s , нм;
- скорость травления кремния v_s , нм/с;
- толщина маскирующего слоя фоторезиста l_m , нм;
- скорость травления фоторезиста v_m , нм/с;
- максимальный угол кромки α .

Таблица 2.2

Типовые значения параметров

№ п/п	Задание 1				Задание 2				
	Материал	$E_{и}$, кэВ	$j_{и}$, А/см ²	v_p , нм/с	l_s , нм	v_s , нм/с	l_m , нм	v_m , нм/с	α , град
1	Алюминий	0,5	0,1	1	10	0,2	10	0,1	20
2	Медь	1	0,5	10	50	0,3	50	0,2	25
3	Вольфрам	1,5	1	40	100	0,4	100	0,3	30
4	Хром	2	2	70	200	0,5	200	0,4	35
5	Титан	2,5	3	100	300	0,6	300	0,5	40
6	Золото	3	4	200	400	0,7	400	0,6	45
7	Никель	3,5	5	400	500	0,8	500	0,7	50
8	Молибден	4	6	600	600	0,9	600	0,8	55
9	Серебро	4,5	8	800	800	1,0	800	0,9	60
10	Молибден	5	10	1000	1000	1,1	1000	1,0	65

2.2.3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Задание оформляется на листах формата А4 с титульным листом, на котором указывают фамилию студента, группу, название домашнего задания, номер варианта, сроки выдачи и сдачи. Обязательным является перечень исходных данных с указанием размерностей, наличие формул, по которым ведется расчет, в символьном и цифровом виде с указанием размерностей. В заключение необходимо дать анализ полученных результатов.