

2.1.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ И МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Цель лабораторной работы: изучение технологических процессов и оборудования для формирования тонкопленочных покрытий методами термического испарения и магнетронного распыления.

Задание по лабораторной работе

1. Ознакомиться с физическими основами процесса нанесения тонких пленок методами термического испарения и магнетронного распыления.

2. Получить у преподавателя задание и таблицу с физическими параметрами испаряемых и распыляемых материалов.

3. Установить в рабочую камеру установки испаритель, испаряемый материал и предварительно очищенные подложки с закрепленными на них масками.

4. Провести осаждение пленки методом термического испарения, замерить время осаждения, записать параметры.

5. Разгерметизировать камеру и извлечь образцы.

6. Установить в рабочую камеру установки мишень распыляемого материала и предварительно очищенные подложки с закрепленными на них масками.

7. Провести осаждение пленки методом магнетронного распыления, замерить время осаждения, записать параметры.

8. На основании выражений для нахождения скоростей выполнить расчеты толщин осажденных пленок.

9. Подготовить отчет и представить его к защите преподавателю.

Теоретическая часть

В лабораторной работе осаждение тонких пленок в вакууме осуществляется методами термического испарения и магнетронного распыления.

Нанесение тонких пленок методом термического испарения

Процесс термического испарения (рис. 2.9) можно разбить на пять этапов:

1. Термовакuumное испарение вещества. Вещества переходят в пар при любой температуре выше абсолютного нуля, но чтобы увеличить интенсивность парообразования, их нагревают. С увеличением температуры повышается средняя кинетическая энергия атомов и вероятность разрывов межатомных связей. Атомы отрываются от поверхности и распространяются в свободном пространстве, образуя пар.

Давление пара $p_{\text{нас}}$, соответствующее равновесному состоянию системы, когда число атомов, покидающих поверхность вещества, равно числу

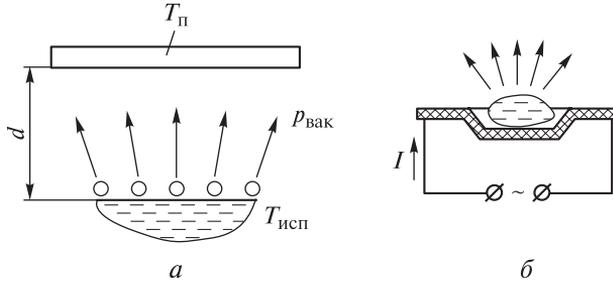


Рис. 2.9. Формирование пленок методом термического испарения (а) и схема резистивного нагрева (б)

возвращающихся атомов, называют давлением насыщенного пара. Это давление значительно зависит от температуры. Приращения температуры на каждые 5–10 % сверх температуры испарения приводят к увеличению давления насыщенного пара, а следовательно, и скорости испарения на один порядок.

Скорость термического испарения чистого металла (количество вещества в килограммах, покидающее 1 м^2 поверхности за 1 с)

$$v_{\text{и}} = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M_{\text{м}}}{T_{\text{и}}}}, \quad (2.1)$$

или в нм/с

$$v_{\text{и}} = 5,83 \cdot 10^{-3} p_{\text{нас}} \sqrt{\frac{M_{\text{м}}}{T_{\text{и}}}} \frac{10^9}{\rho}, \quad (2.2)$$

где $p_{\text{нас}}$ — давление пара испаряемого вещества при температуре испарения, Па; $M_{\text{м}}$ — молекулярная масса испаряемого материала, кг/кмоль; $T_{\text{и}}$ — температура испарения, К; ρ — плотность испаряемого вещества.

2. Распространение молекулярного потока испаряемых частиц от испарителя к подложке. Молекулярный поток испаряемых частиц на своем пути встречает молекулы остаточного газа. Возникающие при этом неблагоприятные столкновения, изменяя траектории частиц пара, оказывают влияние на физико-механические свойства осаждаемых пленок, приводят к потерям испаряемого материала за счет нанесения на внутрикамерную оснастку и стенки камеры, уменьшают скорость нанесения пленки. Такие столкновения не происходят, если длина свободного пробега молекул пара λ превышает расстояние «испаритель–подложка» d :

$$\lambda \gg d; \quad (2.3)$$

$$\lambda \approx \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p}, \quad (2.4)$$

где p — давление остаточного газа, Па.

Начиная с давления $p \approx 10^{-3}$ Па, средняя длина свободного пробега частиц газа становится больше расстояния от источника до подложки, которое в промышленных установках не превышает 30 см. С этого давления вероятность столкновений в пролетном пространстве с молекулами остаточных газов невелика. Можно считать, что частицы напыляемого вещества беспрепятственно распространяются прямолинейно направленным молекулярным потоком, сохраняя свою энергию до встречи с подложкой.

3. Конденсация пара на поверхности подложки. Конденсация пара зависит от температуры подложки и плотности атомарного потока. Молекулы (атомы) пара, достигшие подложки, могут мгновенно отразиться от нее (упругое столкновение), адсорбироваться и через некоторое время отразиться от подложки (реиспарение), адсорбироваться и после кратковременного мигрирования по поверхности окончательно остаться на ней (конденсация).

Конденсация молекул (атомов) происходит, если их энергия связи с подложкой больше средней энергии атомов подложки, в противном случае молекулы отражаются. Если подложка нагрета, энергия ее атомов выше, вероятность конденсации пара ниже. Температура, выше которой при данной плотности потока пара все молекулы отражаются от подложки и пленка не образуется, называется критической температурой конденсации. Она зависит от природы материала пленки и подложки и от состояния поверхности подложки. При определенной температуре подложки, меньшей критической, конденсация пара возможна только при условии пересыщения пара, т. е. для конденсации существует критическая плотность потока. Критической плотностью потока для данной температуры подложки называется наименьшая плотность, при которой молекулы конденсируются на подложке.

4. Образование зародышей. Образование зародышей происходит в результате нахождения молекулами мест сильной связи (сил Ван-дер-Ваальса) с подложкой, соответствующих минимуму свободной энергии системы «молекула—подложка». Если на пути своего движения обладающая избытком энергии молекула встречает место слабой связи с подложкой, то происходит реиспарение. Рост зародышей продолжается за счет присоединения новых молекул, мигрирующих по поверхности или попадающих в зародыши непосредственно из пролетного промежутка «источник—подложка».

5. Рост пленки. По мере конденсации зародыши растут, между ними образуются соединяющиеся мостики, зародыши сливаются в крупные островки. После этого наступает стадия слияния островков с образованием единой сетки. Сетка переходит в сплошную пленку, которая начинает расти в толщину. С этого момента влияние подложки исключается, и частицы пара от поверхности пленки практически не отражаются.

Скорость осаждения пленки v_0 зависит от скорости испарения, площади испарителя $S_{\text{и}}$, расстояния r между испарителем и подложкой и углов испарения φ и конденсации θ .

$$v_0 = \frac{v_{\text{и}} S_{\text{и}} \cos(\varphi) \cos(\theta)}{4\pi r^2}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}, \quad (2.5)$$

где φ — угол между направлением пучка паров и нормалью к поверхности испарителя; θ — угол между направлением потока паров и нормалью к поверхности подложки.

Скорость осаждения пленки и давление остаточных газов в рабочей камере определяют такие параметры пленок, как размер зерна, пористость, удельное сопротивление, оптические свойства и т. п.

Нанесение тонких пленок методом магнетронного распыления

Схема магнетронной распылительной системы (МРС) с плоской мишенью представлен на рис. 2.10. Методика формирования тонких пленок методом магнетронного распыления на установке MANTIS QPREP 500 приведена в прил. 5.

Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или отрицательный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждает аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны на катод, а с другой — поверхностью мишени, отталкивающей электроны. Электроны циркулируют в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию.

Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадет на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности катода. Это в свою очередь обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки

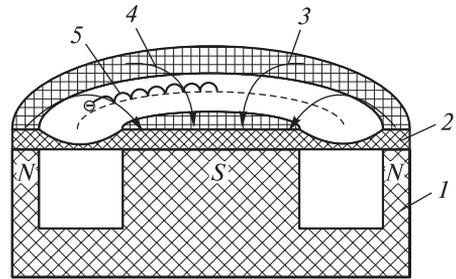


Рис. 2.10. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью:

1 — магнитная система; 2 — катод-мишень; 3 — силовая линия магнитного поля; 4 — зона наибольшей эрозии поверхности катода; 5 — траектория движения электрона

поверхности мишени и значительный рост скорости распыления, а следовательно, и скорости осаждения пленки.

Следует отметить, что плазма разряда существует только в области магнитной ловушки в непосредственной близости от мишени и ее форма определяется геометрией и величиной магнитного поля.

Одним из преимуществ магнетронных распылительных систем является то обстоятельство, что захват вторичных электронов магнитной ловушкой у поверхности мишени препятствует интенсивному перегреву подложки. Это позволяет увеличить скорость распыления материалов, а следовательно, и скорость их осаждения.

Скорость распыления

$$v_p = \frac{j_{и} S_p M_M \cdot 10^9}{q_e N_{Ar}}, \frac{\text{нм}}{\text{с}}, \quad (2.6)$$

где $j_{и}$ — плотность ионного тока, А/м²; S_p — коэффициент распыления (КР), атом/ион; q_e — заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Коэффициент распыления S_p зависит от многих факторов, основным из которых является энергия бомбардирующих ионов E_n и угол падения ионов α на поверхность распыляемого материала. С ростом α от 0° (отсчет ведется от нормали к поверхности) до 60...70° наблюдается увеличение S_p .

Для большинства используемых материалов зависимость S_p от α в этой области можно оценить по формуле

$$S_p(\alpha) = \frac{S_p(0)}{\cos \alpha}, \quad (2.7)$$

где $S_p(0)$ — коэффициент распыления при нормальном падении ионов.

Скорость осаждения пленки v_o на подложке зависит от энергетических характеристик источника и его площади распыления $S_{п}$, угла распыления φ , угла конденсации θ , расстояния между подложкой и мишенью r , коэффициента прилипания молекул осаждаемого материала к подложке α_m :

$$v_o = \frac{v_p S_{п} \cos \varphi \cos(\theta) \alpha_m}{\pi r^2}, \frac{\text{нм}}{\text{с}}. \quad (2.8)$$

При установившемся процессе осаждения, когда на поверхности подложек образовалась пленка из нескольких атомных слоев, коэффициент прилипания α_m можно считать равным единице.

Контрольные вопросы

1. При каком методе осаждения тонких пленок длина свободного пробега молекул больше?

- а) при термическом испарении;
- б) при магнетронном распылении;
- в) одинакова для обоих методов.

2. Для какого метода осаждения тонких пленок необходимо подавать в камеру рабочий газ?

- а) для магнетронного распыления;
- б) для термического испарения;
- в) для осаждения взрывом.

3. При каком методе осаждения тонких пленок энергия частиц выше?

- а) при магнетронном распылении;
- б) при термическом испарении;
- в) одинакова для обоих методах.