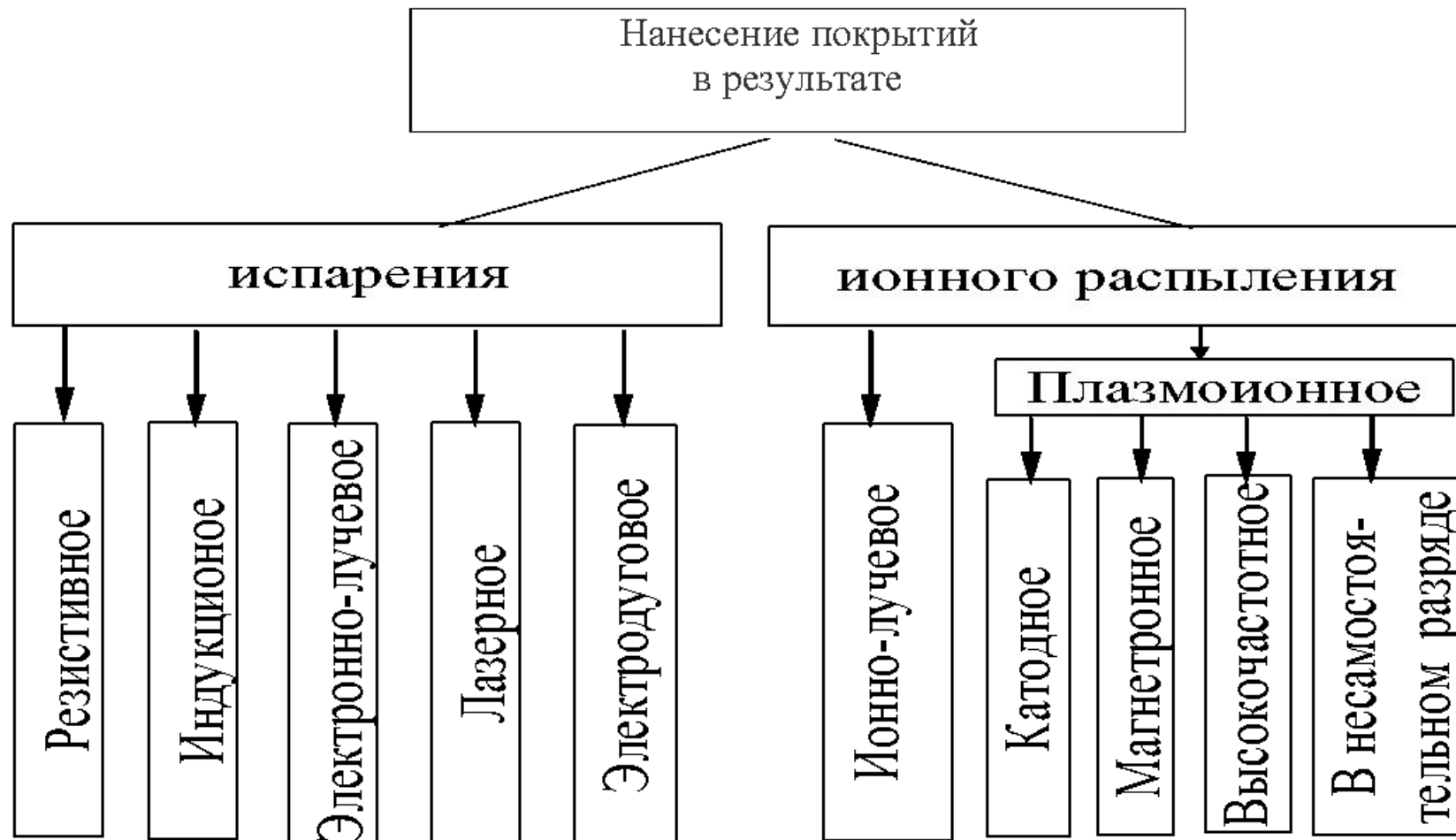


КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

Наиболее распространена классификация, в соответствии с которой в зависимости от механизма генерации газового потока все известные методы условно разделяют на способы перевода атомов в газовую фазу по механизму *испарения* и способы образования газовой фазы в результате *распыления* мишени ионами или высокоэнергетичными атомами (рисунок 2):



В зависимости от природы энергетического воздействия на испаряемое вещество различают:

1) резистивное испарение. В этом случае перевод в газовую фазу происходит под действием тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через резистивный элемент или испаряемое вещество;

2) электронно-лучевое испарение. Нагрев и испарение вещества осуществляются при действии на него потока электронов;

3) лазерное испарение. Источником энергии в данном способе является монохроматическое электромагнитное (лазерное) излучение;

4) электродуговое испарение. Генерация газовой фазы происходит в результате горения электрической дуги и выделения при этом теплоты;

5) индукционное испарение. Образование паров осуществляется в результате нагрева при прохождении через резистивный элемент или испаряемый металл индукционных токов, создаваемых внешним высокочастотным магнитным полем.

Все методы нанесения покрытий, реализующие генерацию газовой фазы по механизму распыления, классифицируют на две большие группы: ионно-лучевые и ионно-плазменные или плазмоионные. В первом случае выбивание атомов мишени происходит под действием бомбардировки ее поверхности ионными пучками определенной энергии. Характерной особенностью данных методов является отсутствие необходимости подачи на распыляемую мишень электрического потенциала. При плазмоионном распылении мишень находится в сильно ионизированной плазме под отрицательным потенциалом относительно плазмы. Под действием электрического поля положительные ионы вытягиваются из плазмы и бомбардируют мишень, вызывая ее распыление.

В зависимости от способа создания плазмы различают следующие разновидности плазмоионного распыления: катодное, магнетронное, высокочастотное и распыление в несамостоятельном газовом разряде.

ИСПАРЕНИЕ АТОМОВ МЕТАЛЛА

Основным уравнением, описывающими испарение атомов металла, является уравнение Герца - Кнудсена:

$$\frac{dN \uparrow}{dt} = S(2\pi mRT)^{-1/2}(P^* - p),$$

где $N \uparrow$ – число атомов, покидающих поверхность площадью S ; m – масса этих атомов; R – постоянная Больцмана; P^* – термодинамическое равновесное давление; p – гидростатическое давление испаренных веществ в газовой фазе.

Анализ уравнения Герца - Кнудсена показывает, что испарение имеет место практически при любой температуре. Даже при комнатной температуре всегда образуются пары вещества, давление (или плотность) которых может быть очень малым.

Испарение вещества в вакууме осуществляется с помощью специального устройства – испарителя. При этом материал испарителя должен удовлетворять следующим основным требованиям:

а) давление паров материала испарителя при температуре испарения должно быть мало. При невыполнении этого условия невозможно получение химически чистых покрытий. Кроме этого в процессе эксплуатации испарителя будет происходить его разрушение;

б) поверхность испарителя должна хорошо смачиваться расплавом испаряемого вещества и при этом между ними обеспечивается хороший тепловой контакт;

в) испаряемое вещество не должно образовывать химических соединений с материалом испарителя. Это допустимо только в том случае, если образующиеся химические соединения имеют высокую термостойкость и соответствуют приведенным выше требованиям;

г) материал испарителя должен быть достаточно пластичным и имеется возможность получения из него изделий сложной формы.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ РЕЗИСТИВНЫМ ИСПАРЕНИЕМ

В настоящее время эта технология широко используется при получении покрытий алюминия, меди, кадмия, цинка и других металлов, имеющих относительно низкую температуру испарения.

Технология получения покрытий резистивным испарением характеризуется **следующими основными достоинствами:**

- 1) возможность нанесения покрытий из металлов, диэлектриков, полупроводников;
- 2) технология реализуется с помощью относительно простых устройств;
- 3) возможность осаждения покрытий с высокой скоростью и ее регулирования в широких пределах;

Данная технология имеет следующие недостатки:

- 1) высокая инерционность процесса испарения;
- 2) трудность управления потоком атомов;
- 3) низкая ионизация атомов в потоке и, как следствие этого, невысокая адгезия и сплошность осаждаемых покрытий;
- 4) трудность, а в ряде случаев невозможность получения покрытий из тугоплавких металлов.

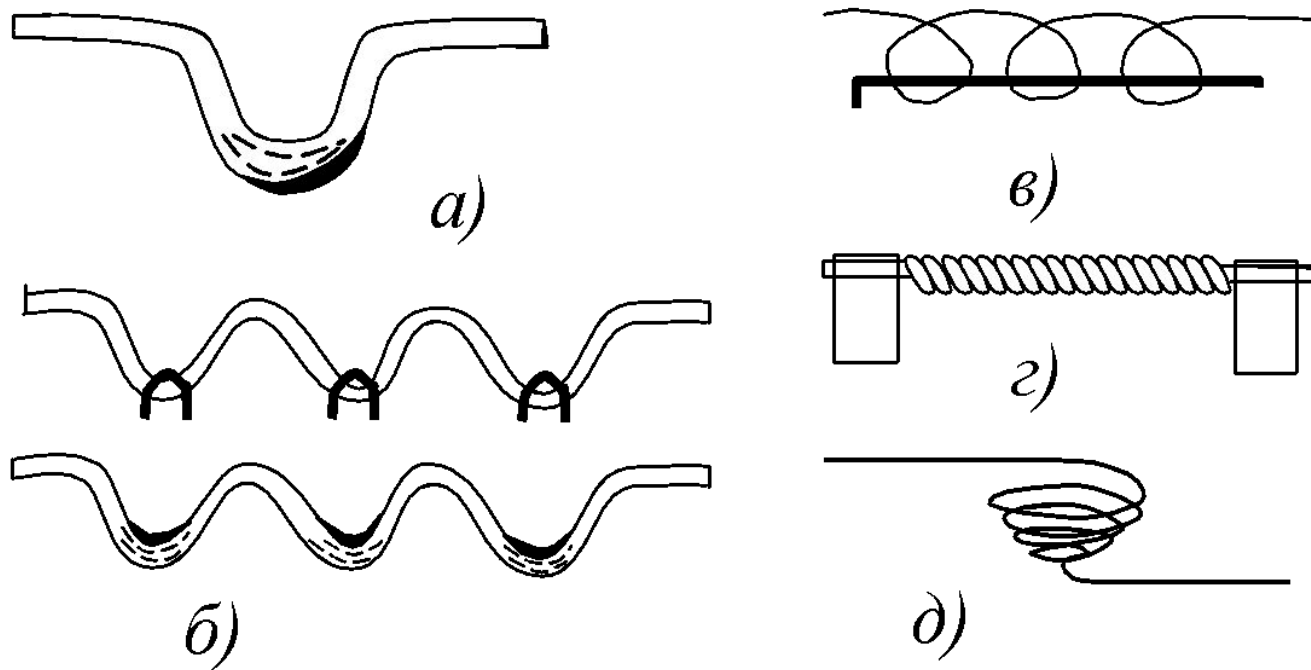


Рисунок 3 – Проволочные испарители: а – нить в виде шпильки; б – синусоидальная нить; в – многожильная спираль; г – стержневой вольфрамовый нагреватель; д – коническая спираль

Диаметр проволоки – 0,5-1,5 мм, и она должна быть равномерной по сечению, в противном случае возможен локальный перегрев и последующее разрушение.

Проволочные испарители имеют следующие основные недостатки:

- не позволяют испарять порошки;
- испаряемые с помощью проволочных испарителей атомы вещества распространяются по всем направлениям и возможны его потери (коэффициент полезного использования испаряемого материала низок).

Ленточный испаритель изготавливается из тонких пластин, лент тугоплавких металлов и имеет на поверхности специальные углубления, в которые помещается испаряемое вещество (рисунок 4). Они просты по своей конструкции и испаряют атомы металла в телесном угле 2л. Вместе с тем они менее экономичны по сравнению с проволочными испарителями.

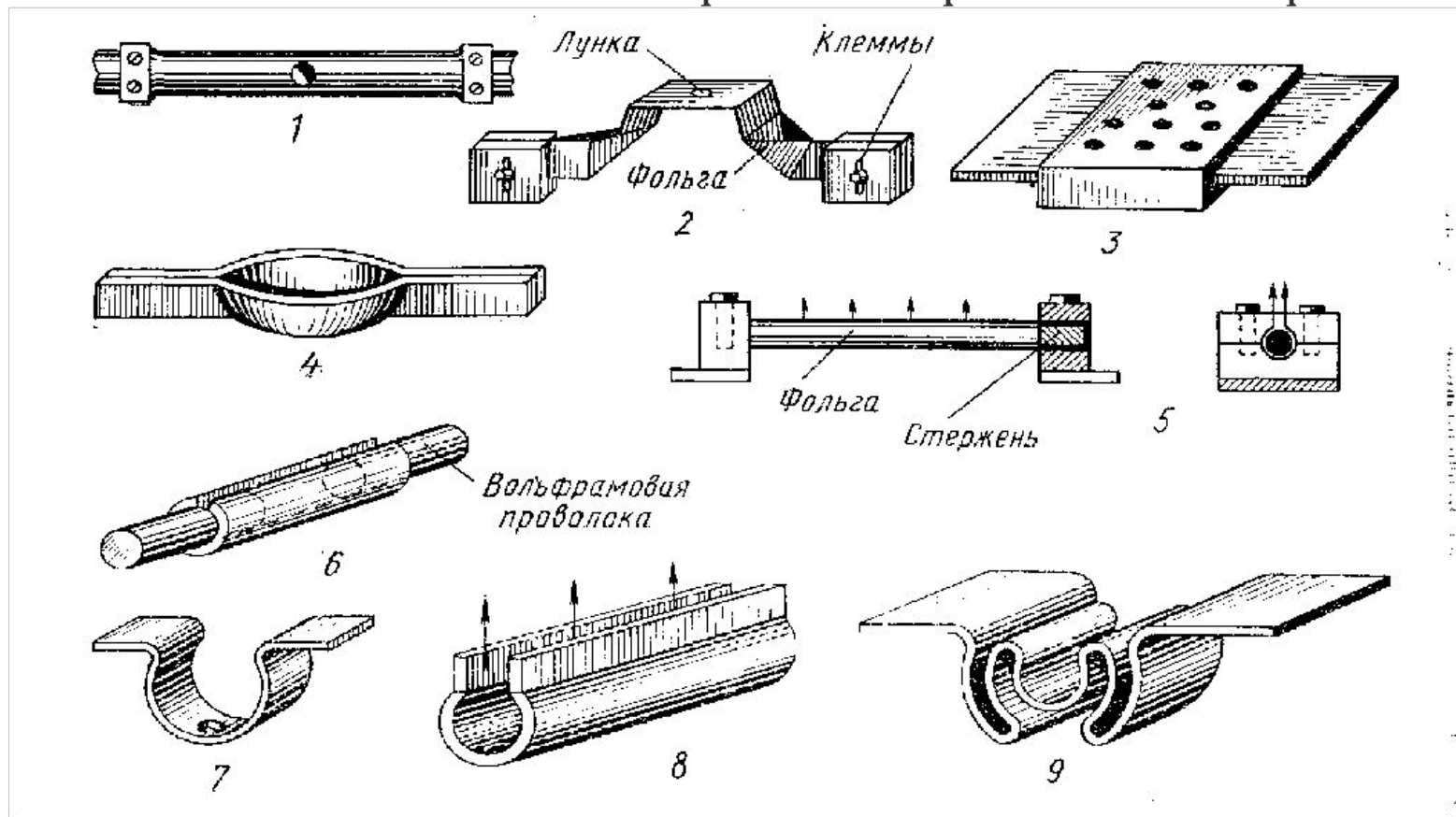


Рисунок 4 – Ленточные нагреватели: 1, 2 и 3 – поверхностные испарители; 4 – лодочный испаритель; 5- 9 – цилиндрические испарители

Тигельный испаритель представляет собой ванну, в которую помещают металл. Тигель может быть изготовлен из материала, который не проводит электрический ток. В этом случае для достижения необходимой температуры испарения используют отдельный нагревательный элемент. В качестве материала тигля применяется BeO ($T_{\text{пл}} \sim 1800 \text{ }^\circ\text{C}$), ThO ($T_{\text{пл}} - 2200 \text{ }^\circ\text{C}$), графит, Al_2O_3 , W, Mo, Ta, TiO_2 и другие тугоплавкие материалы. С помощью тигельных испарителей возможно нанесение толстых покрытий без применения специальных систем подачи испаряемого материала в зону испарения. В настоящее время разработано большое число конструкций испарителей подобного типа. Основной недостаток их в том, что газовые потоки вынуждены проходить сквозь объем расплавленного металла, так как температура наиболее высокая у стенок тигля. В результате при высоких температурах испарения (скорости испарения) в газовых потоках содержится капельная фаза. При осаждении капель металла на поверхности подложки резко снижаются физико-механические свойства покрытий.

Определенные трудности имеет процесс получения покрытий из сплавов, соединений сложного состава. Покрытия из сплавов можно наносить двумя основными способами:

1. Нагрев и испарение сплава. При этом необходимо учитывать, что вначале испаряется компонента сплава, имеющая более высокое равновесное давление паров. В итоге на поверхности образуется покрытие с неоднородным по толщине химическим составом. Для выравнивания химического состава такие покрытия обязательно подвергаются термообработке (диффузионному отжигу).

2. Нанесение покрытия путем испарения компонент из отдельных испарителей. Таким методом, например, получают латунные покрытия, испаряя отдельно медь и цинк. Основной недостаток данного метода заключается в необходимости принимать специальные меры для получения однородных по площади подложки покрытий (перемещать подложку или испарители, использовать экраны и т.п.).

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ НАНЕСЕНИЕ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

При электронно-лучевом нанесении вакуумных покрытий нагрев и испарение вещества осуществляются в результате теплового действия электронов, бомбардирующих испаряемую мишень. Данным методом получают покрытия из сплавов металлов, полупроводников и даже диэлектриков. Электронно-лучевое нанесение покрытий характеризуется следующими преимуществами:

1. Возможность получения высоких по плотности потока энергий в электронном пучке $j_e \sim 5 \cdot 10^8$ Вт/см² (для испарения металлов достаточны потоки с энергией в 10^3 раз ниже). При этом в зоне действия электронов может развиваться температура ~ 10000 °С, поэтому этим методом осуществляется испарение практически любых, даже очень тугоплавких материалов.

2. Парообразование происходит на поверхности. Это очень важная особенность процесса. При резистивном испарении более высокая температура достигается в зоне контакта расплавленного металла с поверхностью испарителя. При этом образующиеся пары проходят через расплав металла, что вызывает появление в газовом потоке капельной фазы. При электронно-лучевом испарении капельная фаза практически отсутствует.

3. Представляется возможным сканировать поток электронов по поверхности мишени, и, таким образом, при использовании составных тиглей достаточно просто изменять химический состав испаряемых частиц и их пространственное распределение.

4. Возможность автоматизации процесса испарения и, соответственно, нанесения покрытия в целом.

5. Получение химически чистых покрытий, т.к. нагревается только испаряемый материал.