

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ  
ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК**

Учебно-методическое пособие

Составители:  
Л.Н. Владимирова, Е.С. Машкина,  
Б.Н. Сахаров

Воронеж  
Издательский дом ВГУ  
2019

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретическая часть .....	5
1.1. Классификация проводниковых материалов твердотельной электроники.....	5
1.2. Особенности процесса термического испарения вещества...	7
1.3. Метод термического напыления материалов .....	13
1.4. Механизмы роста тонких металлических пленок, их основные характеристики .....	33
1.5. Обеспечение равномерности толщины пленки .....	37
1.6. Достоинства и недостатки метода термического напыления материалов.....	41
1.7. Основные характеристики контакта металл – полупроводник...	42
2. Практическая часть .....	49
3. Контрольные вопросы.....	54
4. Список рекомендуемой литературы.....	55

безупречно, и оценка чистоты в сильной степени зависит от уровня развития техники.

Существует много возможных классификаций проводниковых материалов, на рис. 1 приведена одна из таких классификаций.

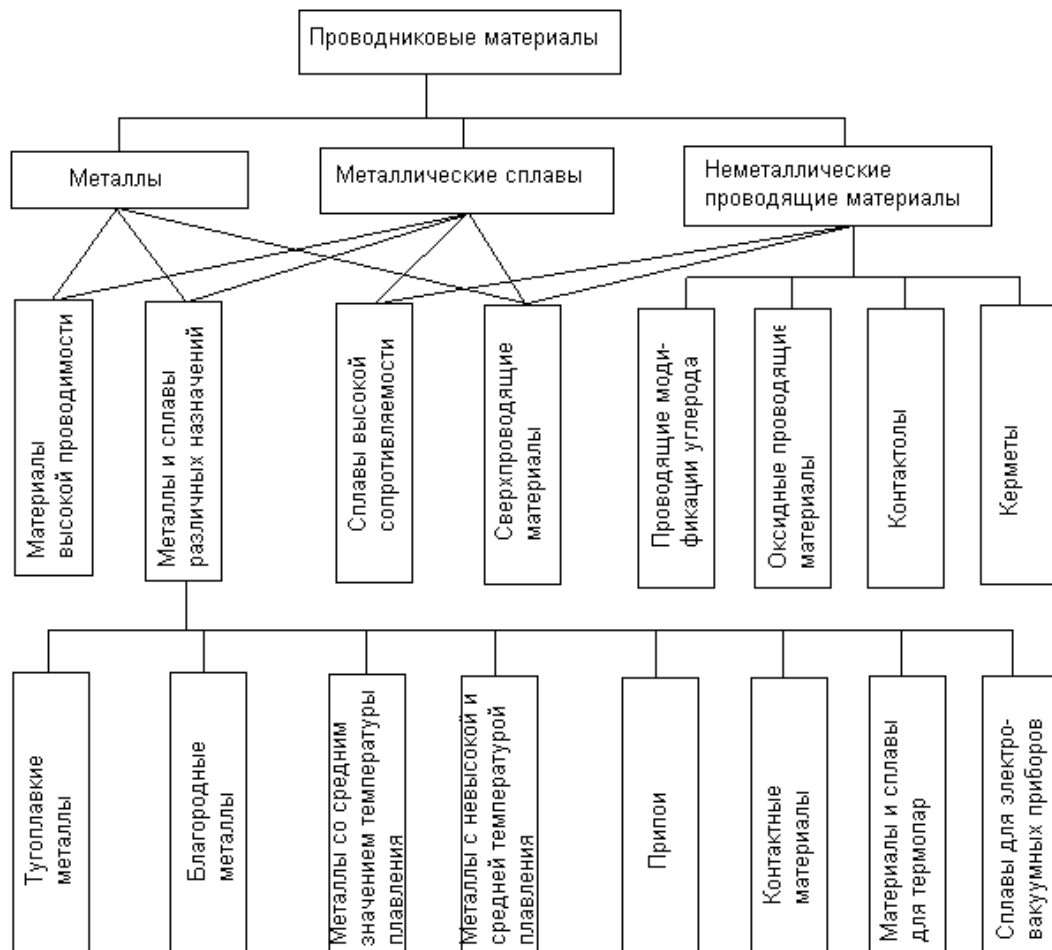


Рис. 1. Классификация проводниковых материалов

В целом, следует помнить, что номенклатура и степень чистоты проводниковых материалов определяется требованиями, предъявляемыми к ним технологией производства ЭКБ и условиями эксплуатации изделия электронной техники (ИЭТ).

Используемые в микроэлектронике проводниковые материалы условно можно подразделить на:

- материалы высокой проводимости (Al, Cu и др.);
- металлы и сплавы высокого сопротивления (манганин, константан, хромоникелевые сплавы и др.);
- тугоплавкие металлы и сплавы (Mo, W, Nb, Ta, Cr, Re и др.);
- благородные металлы (Au, Pt, Ag, Pd и их сплавы);
- силицидные фазы (PtSi, PtSi<sub>2</sub> и др.);
- неметаллические проводящие материалы (графит и др.).

В зависимости от назначения тонкопленочного проводящего элемента в структуре ИМС или отдельного полупроводникового прибора такой пленочный объект должен соответствовать предъявляемым к нему требованиям по чистоте, электрофизическим характеристикам (удельному сопротивлению, ТКЛР и др.) и качеству сформированных границ с ниже и вышележащими слоями различной природы.

## **1.2. Особенности процесса термического испарения вещества**

Все методы осаждения пленок, как правило, можно разделить на физические (Physical Vapor Deposition - PVD) и химические (Chemical Deposition - CD).

Термин Physical Vapor Deposition (PVD) был введен в научный обиход в 1966 г., но следует заметить, что Майкл Фарадей использовал данную технологию для получения покрытий еще в 1838 г.

Физические методы основаны на переносе материала пленки в атомарном виде от источника или мишени к подложке с конденсацией на ней и ростом пленки. В основе химических методов лежит осаждение

газообразных или жидких компонентов и образование пленки в результате химических превращений на поверхности подложки или вблизи нее.

Иногда четкое разделение физических и химических методов провести достаточно трудно: например, физический метод испарения металла может сочетаться с одновременным его окислением. В особую группу методов следует выделить электрохимические методы формирования пленок, в которых сочетаются признаки физических и химических методик.

Процесс нанесения пленки физическими методами включает следующие основные стадии:

- создание необходимых условий в газовой фазе;
- направленный массоперенос частиц вещества от источника к подложке;
- конденсация частиц на поверхности подложки и образование пленки.

Необходимым условием физического осаждения пленок является создание в рабочей камере высокого вакуума для того, чтобы обеспечить транспорт атомов к подложке и исключить их взаимодействие с частицами газовой фазы. Поэтому физические методы получения пленок называют также вакуумными.

**Ва́куум** (от лат. *vacuus* — пустой) — пространство, свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, содержащую газ при давлении значительно ниже атмосферного.

Для создания вакуума в рабочем объеме из него должны быть откачаны газовые компоненты. Идеальный вакуум не может быть достигнут, поскольку и в откачанных рабочих объемах установок всегда присутствует некоторое количество остаточных газов, чем и определяется давление в откачанной камере или степень вакуума.

В Международной системе единиц (СИ) единицей давления является **паскаль (Па)**, равный 1Н на 1 м<sup>2</sup> (Н/м<sup>2</sup>). В вакуумной технике большое распространение получила внесистемная единица - миллиметр ртутного столба (мм. рт. ст.), соответствующая давлению столбика ртути 1 мм при 0°С. Между этими единицами давления существуют следующие соотношения: 1 мм рт. ст. =133.3 Па или 1Па = 7.5·10<sup>-3</sup> мм рт. ст.

Вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа  $\lambda$  и характерным размером сосуда  $d$ . **Длина свободного пробега молекулы** - это среднее расстояние, которое частица пролетает за время свободного пробега от одного столкновения до следующего, ее обычно обозначают  $\lambda$ .

Длина свободного пробега каждой молекулы различна, поэтому в кинетической теории вводится понятие средней длины свободного пробега ( $\langle\lambda\rangle$ ). Величина  $\langle\lambda\rangle$  является характеристикой всей совокупности молекул газа при заданных значениях давления и температуры.

Под  $d$  может приниматься расстояние между стенками вакуумной камеры, диаметр вакуумного трубопровода и др.

В зависимости от величины соотношения  $\lambda/d$  различают

низкий ( $\lambda/d \ll 1$ ),  
 средний ( $\lambda/d \sim 1$ ) и  
 высокий ( $\lambda/d \gg 1$ ) вакуум.

Таблица 1.  
Уровни вакуума по величине давления

№ п/п	Вакуум	низкий	средний	высокий	сверхвысокий
1.	р, Па	10 <sup>5</sup> -10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-10</sup>
2.	р, мм рт.ст.	750-10	10-10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-12</sup>

При **низком вакууме** ( $p > 10^2$  Па) средняя длина свободного пробега частиц  $\lambda$  значительно меньше характерного размера сосуда  $d$ , т. е.  $\lambda \ll d$ . Частицы при этом испытывают постоянные столкновения друг с другом. При столкновении со стенками сосуда частицы газа адсорбируются на них. В условиях низкого вакуума на стенках сосуда постоянно имеется слой адсорбированных частиц.

**Средний вакуум** ( $p = 10^2 \div 10^{-1}$  Па) характеризуется тем, что средняя длина свободного пробега частиц  $\lambda$  приблизительно равна характерному размеру сосуда  $d$ , т. е.  $\lambda \approx d$ .

В **высоком вакууме** ( $p = 10^{-1} \div 10^{-5}$  Па) средняя длина свободного пробега частиц  $\lambda$  значительно больше характерного размера сосуда  $d$ , т. е.  $\lambda \gg d$ .

В **сверхвысоком вакууме** длина свободного пробега частиц оценивается в десятки тысяч метров.

В зависимости от степени разрежения в камере и размеров самой камеры длина свободного пробега молекул изменяется в широких пределах. В таблице 2 приведены сравнительные расчетные данные для молекул в воздухе при 20° С и различных давлениях.

Таблица 2.

Длина свободного пробега молекул в воздухе для различных давлений

p, Па	$10^5$	$10^1$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
(мм рт.ст.)	(760)	( $10^{-1}$ )	( $10^{-2}$ )	( $10^{-3}$ )	( $10^{-4}$ )	( $10^{-5}$ )	( $10^{-6}$ )
$\lambda$ , см	$7,2 \cdot 10^{-6}$	0,055	0,55	5,5	55	550	5500

Чем выше требуемый уровень вакуума, тем сложнее оборудование для его создания, поддержания и контроля, а также для проведения