



## Практическое занятие №5

по курсу “Физические основы микро и наноэлектроники”

Тема: Термическое вакуумное напыление

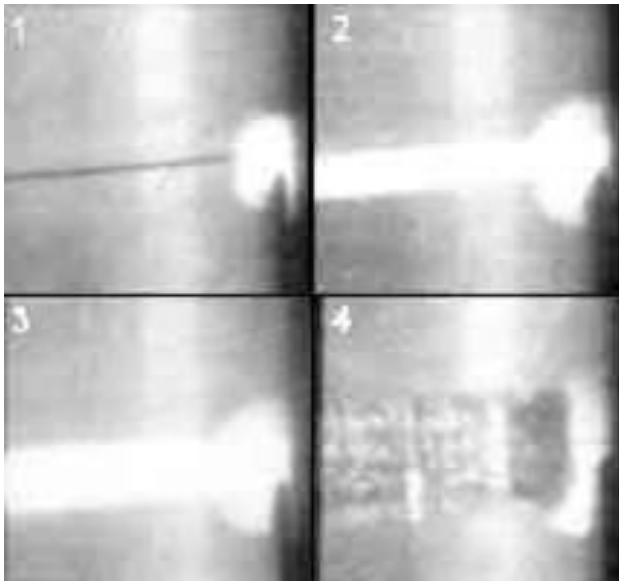


## ТВН: Введение

Получение тонких пленок является одной из основных задач технологии изготовления микросхем, а метод термического вакуумного напыления (ТВН) одним из самых распространенных даже до настоящего времени. Известен он еще с 1857 г. благодаря экспериментам Фарадея с взрывающимися проволочками и состоит из следующих основных этапов: нагреве в вакууме наносимого вещества до температуры испарения, транспортировке парогазового облака через вакуум от испарителя до подложки и конденсации пара на поверхности подложки.

Фарадей получал очень тонкие металлические пленки на внутренних стенках колбы при разряде через золотую проволочку. В последующем интерес к электрическому взрыву в разных областях науки и техники нарастает лавинообразно. К 1966 году было опубликовано уже более 800 статей, охватывающих широкий круг фундаментальных и прикладных исследований.

## ТВН: Опыты Фарадея



- Этапы развития электрического взрыва проводника:
- 1 - пробой с электрода на проводник;
  - 2 - образование плазменного шнура;
  - 3 - его расширение;
  - 4 - разлёт расширяющихся продуктов взрыва.

Продуктами разрушения проводника являются пары и мельчайшие частицы металла, которые в определенных условиях могут взаимодействовать с окружающей средой, образуя различные химические соединения.

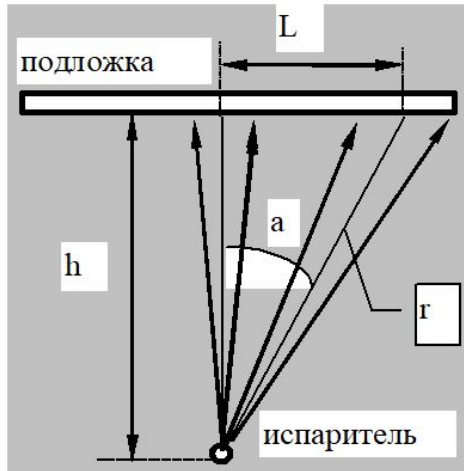
В зависимости от рода газа, окружающего проводник, можно получать порошки металлов, сплавов, порошки химических соединений или порошки композиционных составов.



## ТВН: Механизм

Под электрическим взрывом понимается комплекс процессов, происходящих при быстром джоулевом нагреве металлического проводника до температур, превышающих температуру начала испарения металла. Эти процессы включают, как правило, фазовые переходы металл - жидкость - пары металла в начальной стадии, формирование плотной металлической плазмы при дальнейшем нагреве, образование мелких частиц при разлете продуктов взрыва и их остывании. Явление сопровождается (или может сопровождаться) обрывом тока в контуре и генерированием импульсов высокого напряжения, мощными ударными волнами, химическими реакциями, яркой вспышкой света. Причем, условия осуществления электрического взрыва весьма разнообразны по энергетике, набору металлов, окружающей среде и т. д. Весьма разнообразны, соответственно, достигаемые при этом физические состояния и получаемые эффекты.

## ТВН: Геометрия процесса



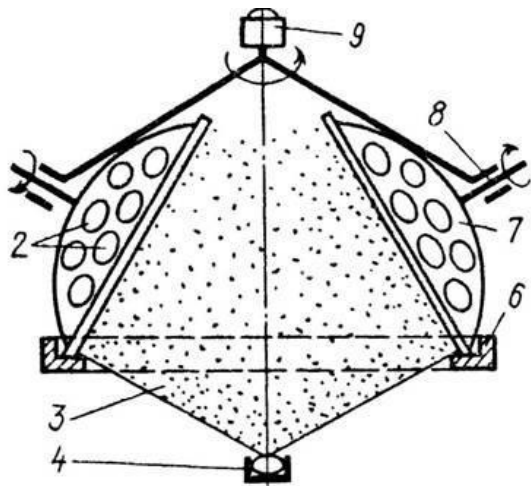
Геометрия процесса напыления  
при методе ТВН

Испарение вещества происходит не равномерно во всех направлениях, а преимущественно в направлениях, близких к нормали к испаряемой поверхности (кратчайшее расстояние от испарителя до подложки), где  $\cos \alpha$  имеет максимальное значение. При этом масса испаряемого вещества, приходящегося на единицу поверхности подложки, зависит от расстояния от центра подложки вследствие чисто геометрических соображений, как это показано на рисунке, где:

- $d$  - толщина напыляемой пленки;
- $L$  - расстояние от центра подложки;
- $h$  - расстояние от подложки до испарителя.

## ТВН: Конструкция подложкодержателя

В настоящее время производственные установки термовакuumного напыления снабжены вращающимися устройствами подложкодержателями (дисками, барабанами), несущими несколько подложек (6, 8 или 12), как это показано на рисунке, где:



- 2 – подложки, расположенные на вогнутом держателе 7;
- 3 – поток испаряемого вещества;
- 4 – испаритель;
- 6 – система поддержки подложкодержателей;
- 8 – ввод движения в вакуум;
- 9 – система вращения подложкодержателей центральная.

Подложки последовательно и многократно проходят над неподвижным испарителем, постепенно набирая необходимую толщину плёнки. В результате центральный "холм", который мог бы образоваться на неподвижной подложке, размывается в "хребет", вытянутый в направлении движения подложки. Для выравнивания толщины плёнки в поперечном направлении применяют корректирующую диафрагму, устанавливаемую между испарителем и подложкой в непосредственной близости от нее.



# ТВН: Этапы образования пленки

**1 Нагрев в вакууме наносимого вещества до температуры испарения:** Для создания покрытия значительная часть частиц должна адсорбироваться на подложке или вследствие химической реакции образовать новое соединение. Поток испарившихся частиц в вакууме образуется в случае, когда давление пара испаряемого материала превышает давление остаточных газов в камере. Тогда возникает поток пара, направленный от испарителя к подложке. Для испарения вещества можно использовать электронный или лазерный луч, джоулево тепло, высокочастотное поле и другие источники тепла.

**2 Транспортировка парогазового облака через вакуум от испарителя до подложки:** Если считать, что скорости молекул в момент испарения распределены по максвелловскому закону, то тогда от точечного испарителя они будут двигаться во всех направлениях с равной вероятностью.

**3 Конденсация пара на поверхности подложки:** Образующиеся тонкие пленки имеют физические свойства, существенно отличающиеся от свойств объемных образцов. При этом в процессе выращивания пленок экспериментаторы и технологи вынуждены определять и контролировать целый ряд параметров, таких, как материал и структура подложки, ее температура, состав и давление пара, интенсивность его поступления. Чаще всего эти параметры подбирают эмпирически для получения требуемых параметров структуры и состава пленки.



# ТВН: Этапы конденсации пара

**1 Зарождение зерен:** падающая частица после соударения с поверхностью удерживается на ней силами поляризации, Ван-дер-Ваальса или химической связи. Первым этапом конденсации пленок считают адсорбцию. Адсорбированные атомы могут либо десорбироваться обратно в пар, либо остаться на подложке, в результате чего появляются маленькие зерна (0,5 нм), вначале статистически распределенные по поверхности, а впоследствии за счет возможной миграции локализующиеся на участках с дефектами, дислокациями, примесями и прочими неоднородностями структуры поверхности. После локализации начинается собственно процесс роста пленки. Зародыши или зерна вообще могут иметь самую разнообразную форму, однако в теоретических расчетах принимается, что они имеют форму полусферы или диска.

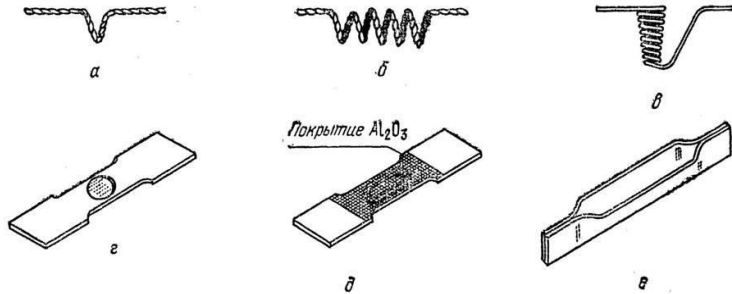
**2 Рост зерен:** вокруг образовавшихся зерен начинают расти пространственные островки. В зависимости от температуры подложки они могут быть жидкими каплями или монокристаллами. Температура плавления островков на  $2/3$  меньше температуры плавления объемного материала.

**3 Объединение островков:** При пограничном контакте за счет разрушения границы и выделения при этом тепла островки расплавляются, а после слияния охлаждаются, образуя новый монокристалл. На монокристаллической подложке ориентация большинства островков повторяет ориентацию подложки. Межсоединения островков образуют сеть с пустотными каналами.

**4 Заполнение каналов:** Для каждой пары конденсат-подложка при заданной скорости осаждения существует критическая температура подложки, выше которой происходит рост кристаллически ориентированной пленки независимо от степени несовершенства исходного кристалла. Конденсация при температурах ниже критической приводит к разориентации структуры пленки и при низких температурах (порядка  $1/3$  температуры плавления объемного образца) получается аморфная структура.



## ТВН: Конструкция испарителей



Для перевода распыляемого вещества в расплавленное состояние применяются различные методы, в частности использование выделяющегося при прохождении электрического тока джоулево тепло. Простейшие испарители джоулевого типа изготавливаются из проволоки и металлической фольги, как это показано на рисунках. Материалами для испарителей служат тугоплавкие металлы с высокими температурами плавления и низкими давлениям паров. Наиболее широко применяются вольфрам, молибден и тантал.



---

## ТВН: Установка ТВН





## ТВН: Адгезия

Одной из основных характеристик получаемых пленок является **адгезия** (прилипание) - возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел или фаз, приведенных в соприкосновение. Адгезия характеризует прочность контакта образовавшегося соединения пленки с подложкой. К сожалению, как отметила “Физическая энциклопедия”, “адгезия не может быть измерена во всех тех практически важных случаях, когда она достаточно велика, т.е. когда адгезионный шов не является слабым местом”. Смысл этой фразы в том, что при хорошей адгезии прочность адгезионного шва выше прочности самого материала. Предполагается, что адгезия во многом зависит от энергии падающей на подложку частицы - чем выше энергия, тем лучше адгезия. С этой точки зрения метод ТВН не является перспективным, т. к. энергия частиц парового облака является незначительной.



## ТВН: Распыление тугоплавких и туголетучих

Термическое испарение тугоплавких и труднолетучих материалов сопряжено со значительными трудностями: необходимостью нагрева вещества до высоких температур, химическим взаимодействием расплава с контейнером, разложением испаряемого вещества. Обойти эти трудности позволяет электронно-лучевое испарение. Метод основан на формировании, ускорении и фокусировке электронного луча на испаряемом объекте, находящемся в водоохлаждаемом контейнере. В лабораторной практике применяются электронные пучки с энергиями от 5 до 25 кэВ и током от единиц миллиампер до единиц ампер, что позволяет использовать очень большую мощность.



## ТВН: Недостатки метода

1. Большой расход материала - конденсат осаждается не только на подложку, но и по всему объему камеры, что приводит еще и к необходимости ее регулярно чистить и дополнительно обезгаживать.
2. Невысокое качество получаемых пленок, наличие загрязнений и примесей, структурных неоднородностей.
3. Неравномерность получаемых пленок по толщине.
4. Невозможность распыления тугоплавких материалов, сплавов.
5. Невозможность распыления химических соединений.
6. Низкая адгезия получаемых пленок.

Поэтому для получения качественных пленок используются другие методы.