

**Практическое занятие №5  
по курсу “Физические основы  
микро и наноэлектроники”**

**Тема: Ионное (катодное)  
распыление**

---

- Тонкие пленки – это слои вещества толщиной от долей нанометра до нескольких микрометров, обладающих рядом особенностей атомно-кристаллической структуры, магнитных, электрических и других физических свойств.
- Тонкие пленки, и в особенности – nano-структурированные тонкие пленки, играют очень важную роль в современной технике. Их значение в научно-техническом прогрессе чрезвычайно велико. Они используются в самых разнообразных областях науки и техники, например в качестве защитных покрытий, для преобразования солнечной энергии в электрическую, в сверхпроводниковых приборах, в интегральной и функциональной микро- и наноэлектронике.

## **Что такое тонкие пленки и зачем они нужны?**

---



- Термическое вакуумное напыление (ТВН)
- Ионное (катодное) распыление (ИКР)
- Ионно-плазменное распыление (ИПР)
- Эпитаксия из газовой фазы
- Жидкостная эпитаксия
- Молекулярно-лучевая эпитаксия

# **Технологии получения тонких пленок**

---

- Ионное (катодное) распыление было открыто в 1852 году В.Р. Гроувом, который пытался установить аналогию между электролизом и электризацией газа.
- Вначале некоторые исследователи называли это явление «электрическим испарением», так как в газоразрядных трубках металлические электроды «испарялись» при температурах, которые были значительно ниже достаточной для этого. В дальнейшем за процессом разрушения и распыления металлов в газоразрядных трубках укрепилось название «катодное распыление», поскольку на стенках трубок оседал в основном материал катода.

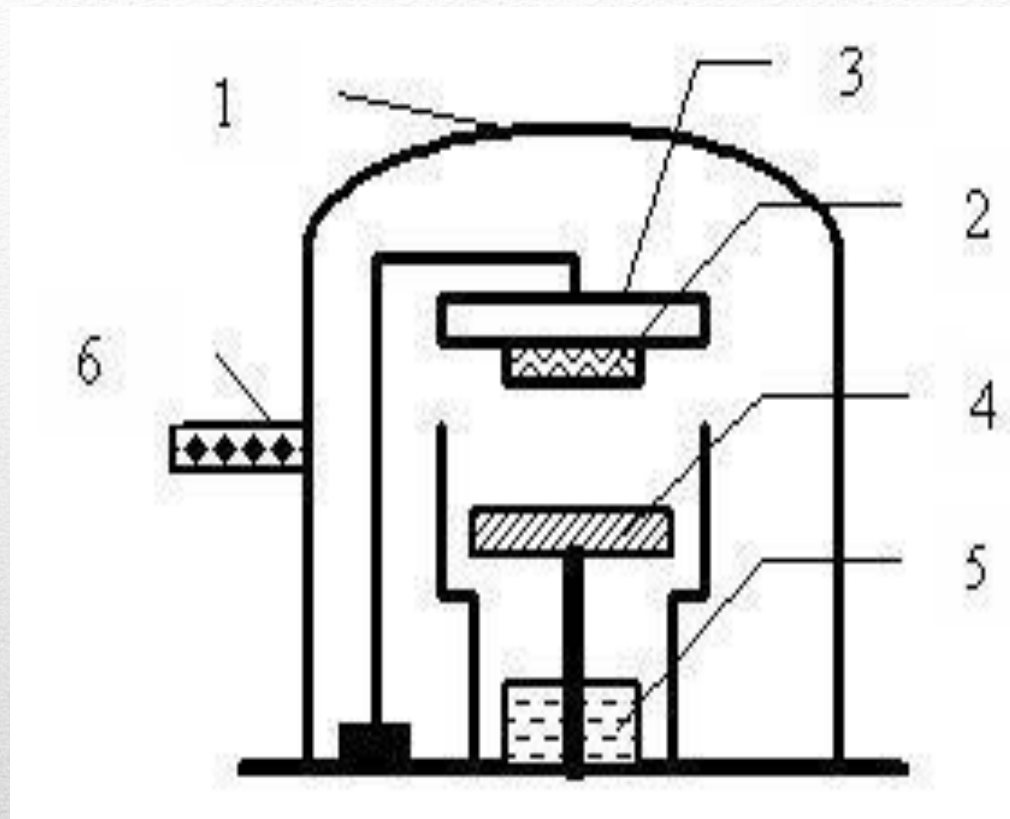
# История открытия

---



## Схема установки:

- 1 – колпак
- 2 – анод, с закрепленной к нему подложкой
- 3 – подложка
- 4 – катод
- 5 – изолятор
- 6 - штуцер



# Установка ионного (катодного) распыления

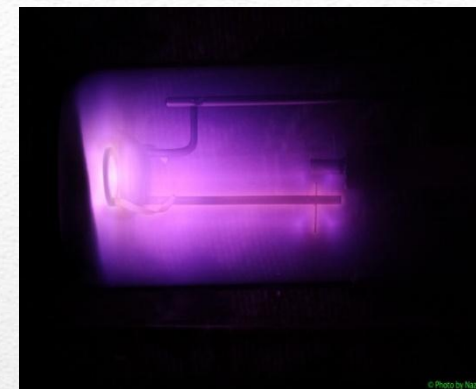
---

В основе ИКР лежит электрический газовый разряд – совокупность явлений происходящих в газе или парах ртути при прохождении через них электрического тока.

При приложении электрического поля к объему, заполненному газом могут наблюдаться два основных типов явлений:

- Ионизация нейтральных атомов газа свободными электронами;
- Рекомбинация ионов газа, происходящая при соединении положительного иона газа со свободным электроном.

При электрическом разряде в газе одновременно происходят оба процесса, что приводит к его свечению, например, тлеющий разряд в воздухе.





- Несамостоятельный разряд – осуществляется только при наличии внешнего источника ионизации. В качестве которого могут выступать естественные ионизаторы.
- Самостоятельный разряд – продолжается после удаления внешнего ионизатора или возникает спонтанно за счет непрерывного образования носителей заряда в процессе разряда.
- Нормальный тлеющий разряд - все пространство между катодом и анодом заполняется газовой плазмой – смесью нейтральных атомов, ионов газа и свободных электронов. Вблизи катода образуется избыточный положительный заряд ионов. Между ним и отрицательным катодом происходит основное падение напряжения. На этом участке положительные ионы получают большое ускорение и бомбардируют катод, вызывая с его поверхности электронную и атомную эмиссию.
- Аномальный тлеющий разряд - после того как вся площадь катода при нормальном тлеющем разряде занята разрядом, дальнейший рост разрядного тока возможен лишь при повышении интенсивности процессов ионизации на катоде, для чего необходимо увеличение катодного падения напряжения. Разряд переходит в аномальный тлеющий разряд.

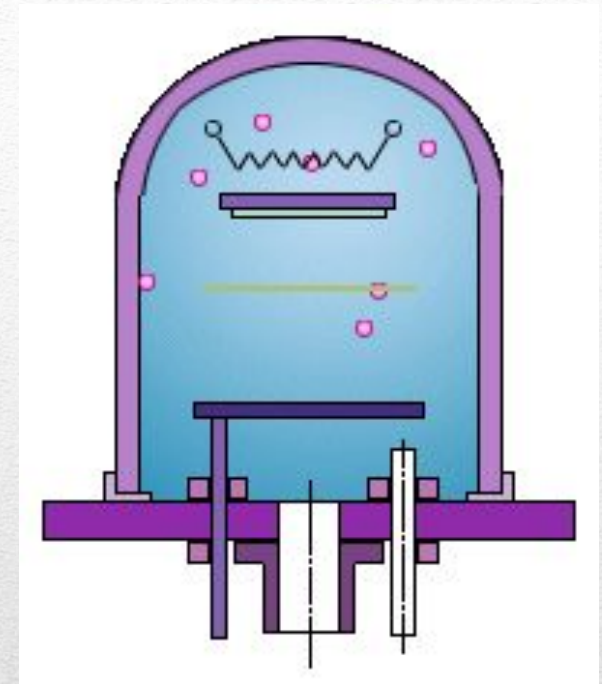
# Виды газового разряда

---



Метод ИКР основан на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными атомами разряженного газа.

При бомбардировке катода (мишени) отдельными атомами, ионами и молекулами, имеющими энергию больше энергии связи отдельного атома с объемом твердого тела, материал мишени распыляется. Если поблизости от мишени поместить подложку, то часть атомов распыляемой мишени попадет на подложку и будет конденсироваться на ней образуя пленку.



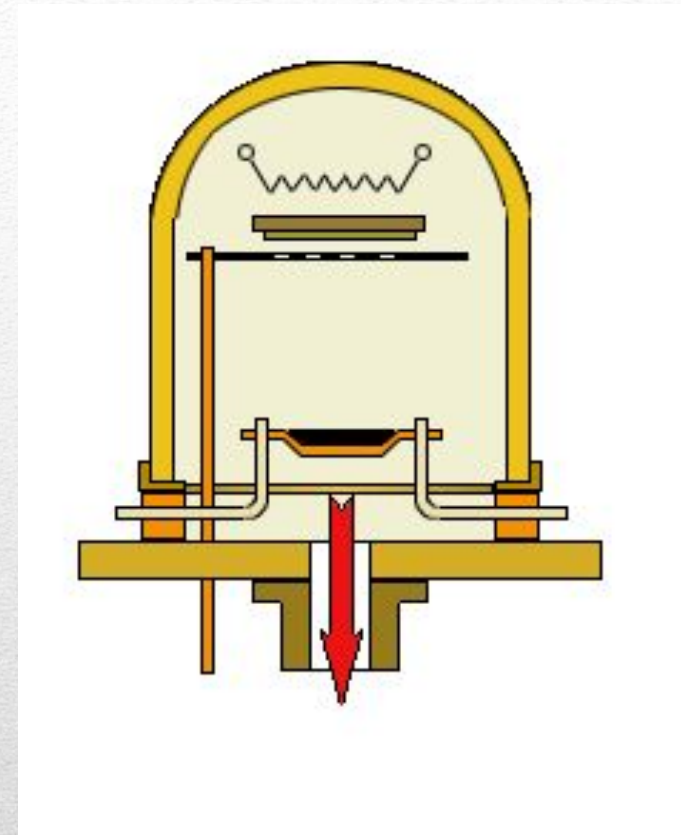
# Ионное (катодное) распыление

---



Вспомним, что сущность процесса ТВН состоит в переводе осаждаемого материала с помощью нагрева в парогазовую фазу.

Образующийся при этом парогазовый поток в высоком вакууме распространяется прямолинейно, так как отсутствует соударение с молекулами остаточного газа - длина свободного пробега молекул в остаточном газе на порядок превышает расстояние от источника до подложки; газ попадает на подложку, поверхность которой холоднее источника пара, при этом происходит конденсация и образование плёнки.



# Термическое вакуумное распыление

---

Основным параметром, характеризующим процесс распыления, является коэффициент распыления  $K_p$ , равный числу выбитых атомов, приходящих на один ион, упавший на мишень.

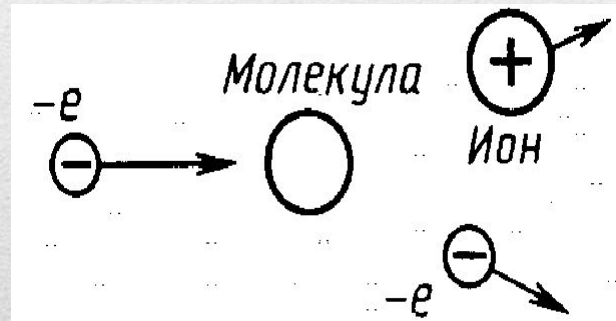
Заметное распыление начинается лишь с некоторых пороговых значений энергии ионов  $E_{пор}$  и резко растет при дальнейшем увеличении энергии ионов, пока не достигнет максимума при  $E_i = E_{мах}$ . Последующее увеличение  $E_i$  вызывает падение  $K_p$ .

# Коэффициент распыления

---



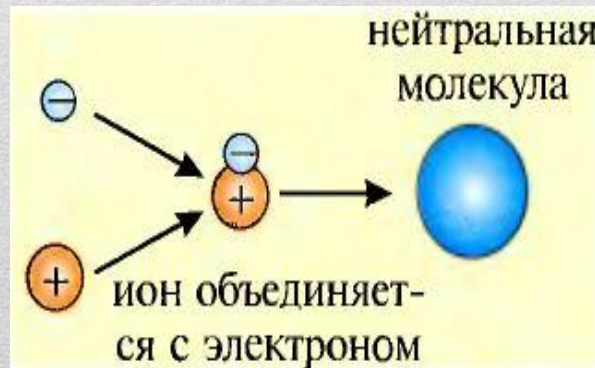
- Положительные ионы образуются в газе в результате ионизации атомов электронным ударом. Процесс ионизации заключается в том, что электрон, сталкиваясь с атомом, отрывает от него электрон. Для этого необходимо, чтобы сталкивающийся электрон имел энергию больше энергии ионизации атома.



# Образование положительных ионов и процесс рекомбинации

---

- Электроны могут также рассеиваться на атомах газа, попадать на стенки камеры и оседать на них, так как эти стенки являются обычно не проводящими.
- Положительно заряженные ионы, обладая в 1000 раз больше массой по сравнению с электронами, являются малоподвижными частицами. Они медленно дрейфуют в электрическом поле и собираются отрицательно заряженными электродами или попадают на стенки камеры, где рекомбинируют с электронами.
- Процесс рекомбинации – процесс обратный ионизации.





- Количество ионов, образующихся в камере, зависит от количества электронов с катода, давление газа в камере и напряжения на аноде. При давлении газа в камере выше  $10^{-1}$  Па средняя длина пробега свободного электрона меньше 1 см. Поэтому если расстояние до анода значительно больше этой длины, то на своем пути до анода электрон успевает испытать большое число столкновений с атомами газа.
- Что бы соударения приводили к ионизации электрон должен приобрести в электрическом поле достаточно большую энергию.
- Например, энергия ионизации атома аргона составляет 15,7 эВ.
- Если энергия электрона превышает это значение, то вероятность ионизации, сначала растет, затем уменьшается.
- Оптимальная энергия равна примерно 100 эВ.

## **Количество ионов**

---



- Среднее количество ионов, создаваемых в газе каждым выходящим из катода электроном, с ростом давления сначала повышается, а затем падает. В конце 19 века этот эффект был открыт А.Г. Столетовым, исследовавшим влияние газового наполнения на ток в приборе с фотоэлектронным катодом, и получил название эффекта газового усиления.
- Наибольшее газовое усиление происходит при некоторой величине отношения напряженности электрического поля к давлению, характерной для каждого газа. Для аргона например, она равна 175 В/м\*Па. Это означает, что при напряженности поля 500 – 1000 В/м оптимальное давление аргона составляет 3 – 6 Па.

## **Влияние давления на количество ионов**

---



- Поскольку распыление является низкотемпературным процессом, то в качестве исходной мишени можно использовать тугоплавкие материалы и синтезировать соединения, которые практически невозможно получить термическим испарением.
- Наносимые пленки имеют высокую адгезию к подложке.
- Постоянство химического состава распыляемого материала обеспечивает однородность пленки по толщине.
- Большие, чем при термическом испарении, площади поверхности получаемых пленок, поскольку материал напыляется на подложку не из точечного источника .
- Высокий коэффициент использования распыляемого материала.

## **Преимущества ионного (катодного) распыления**

---

- Невозможность прямого нанесения диэлектрических пленок, так как распыляемый катод должен быть проводящим. Это ограничение устраняется при использовании реактивного ионного распыления, которое заключается в добавлении к инертному рабочему газу небольшого количества активного газа.
- Наличие загрязнений из-за невысокого вакуума и контакта рабочей среды с подложкой.
- Эрозия и разрушение катода вследствие его распыления. Этих недостатков лишен метод ионно-плазменного распыления.

## **Недостатки ионного (катодного) распыления**

---



**Благодарю за  
внимание**

---