

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

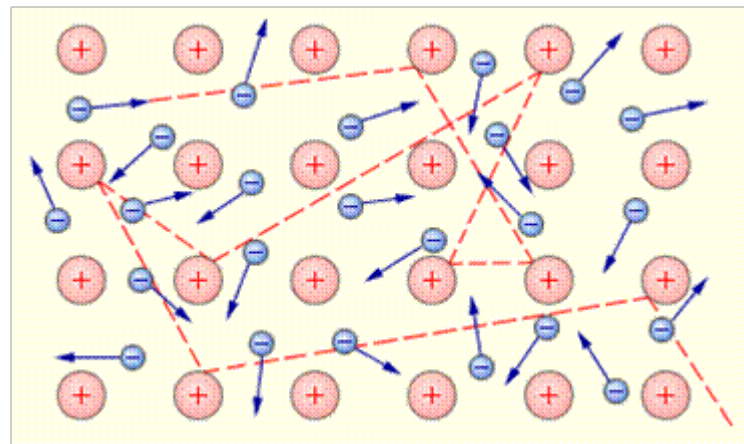
## МОДУЛЬ 4. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

### Лекция 17.

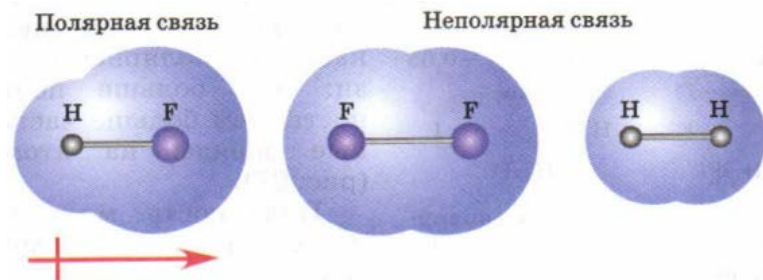
Электрические свойства металлов, полупроводников и диэлектриков. Методы измерения электросопротивления. Магнитные характеристики материалов и методы их исследования. Устройство и принцип работы вибромагнитометра. Шумы Баркгаузена.

# Типы связей в кристаллах

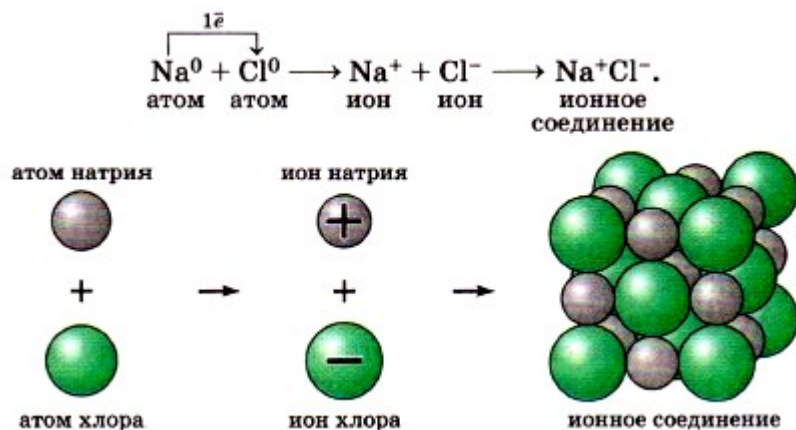
**Металлическая связь.** Во всех узлах кристаллической решётки расположены положительные ионы металла. Между ними беспорядочно, подобно молекулам газа, движутся валентные электроны, отцепившиеся от атомов при образовании ионов.



**Ковалентная связь.** Нейтральные атомы размещены в узлах кристаллической решётки. Связь образуется направленными валентными электронными облаками.

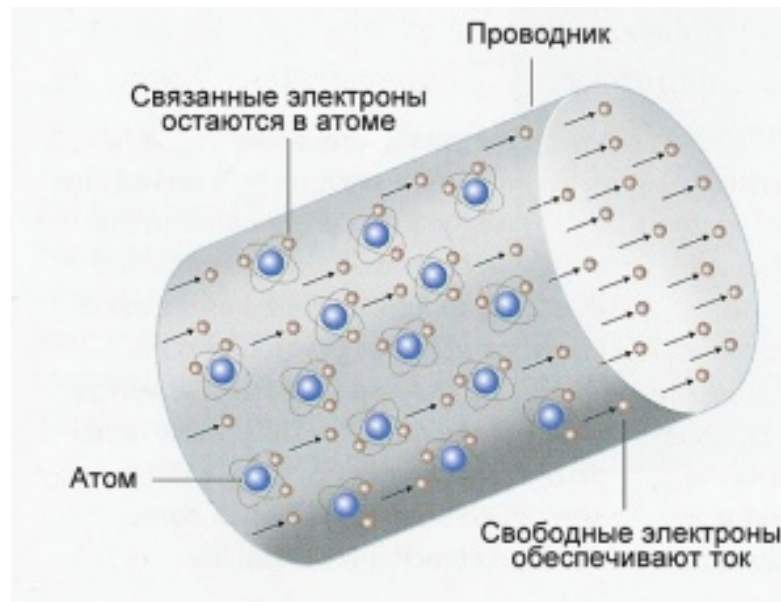


**Ионная связь.** В узлах кристаллической решётки помещаются положительно и отрицательно заряженные ионы. Силы взаимодействия между узлами являются в основном электростатическими (кулоновскими).



**Металлический** проводник состоит из:

- 1) положительно заряженных ионов, колеблющихся около положения равновесия.
- 2) свободных электронов, образованных путем отрыва от атомов металлов их валентных электронов и способных перемещаться по всему объему проводника.



Концентрация свободных электронов составляет порядка  $10^{28} \text{ м}^{-3}$ , что соответствует концентрации атомов.

**Сопротивление** металлов объясняется столкновениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки. Чем чаще происходят такие столкновения, т. е. чем меньше среднее время свободного пробега электрона между столкновениями, тем больше удельное **сопротивление** металла.

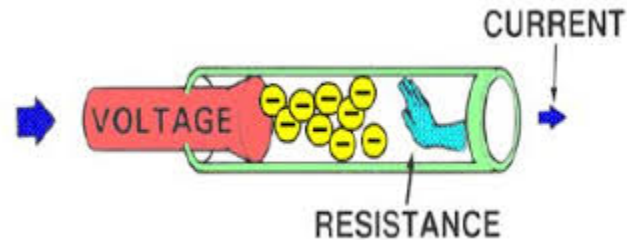
## Сопротивление металлов увеличивается с температурой!

Время свободного пробега электронов проводимости зависит от расстояния между ионами решетки, амплитуды их колебаний, характера взаимодействия электронов с ионами и скорости теплового движения электронов.

С **ростом** температуры металла амплитуда колебаний ионов и скорость теплового движения электронов увеличиваются. Возрастает и число дефектов кристаллической решетки.

Все это приводит к тому, что при увеличении температуры металла **столкновения** электронов с ионами будут происходить **чаще**,

т.е. **время** свободного пробега **уменьшается**, а удельное **сопротивление** металла **увеличивается**.

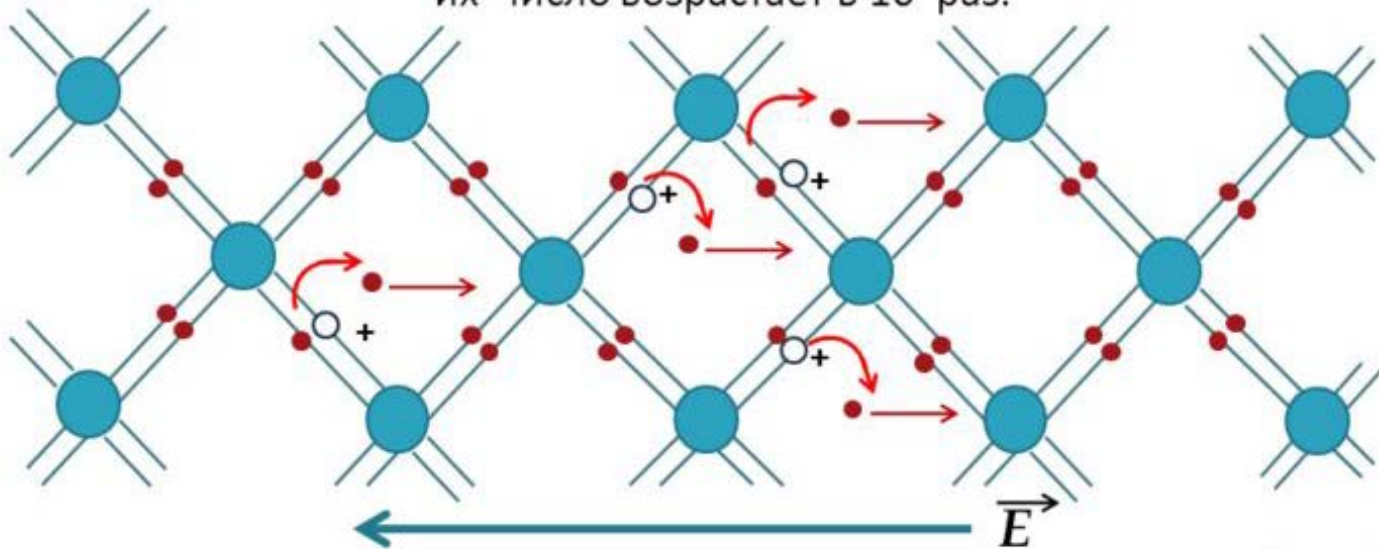


**Полупроводники** – это материалы, которые по своей проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличаются от проводников сильной зависимостью проводимости от концентрации примесей, температуры и различных видов излучения.

Основное свойство полупроводников – **увеличение** электрической проводимости с **ростом** температуры.

---

При повышении температуры отдельные связи разрываются, электроны становятся «свободными», в электрическом поле они перемещаются упорядоченно, образуя ток. При увеличении температуры от 300 К до 700 К их число возрастает в  $10^7$  раз.

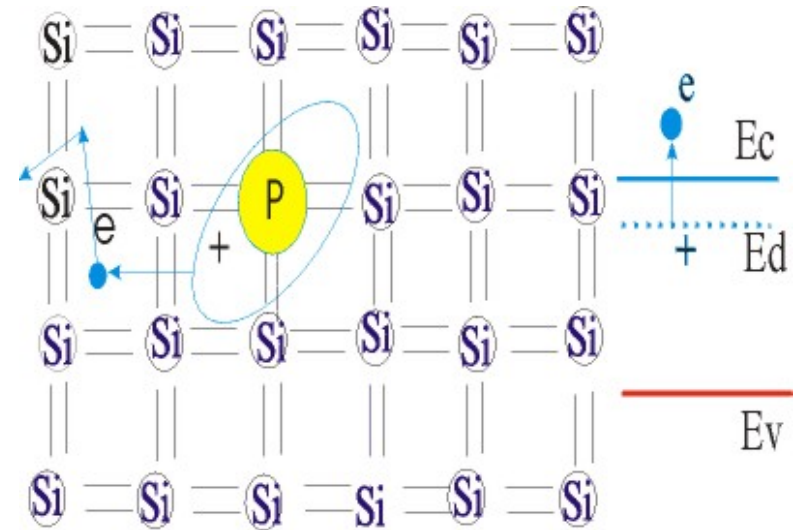
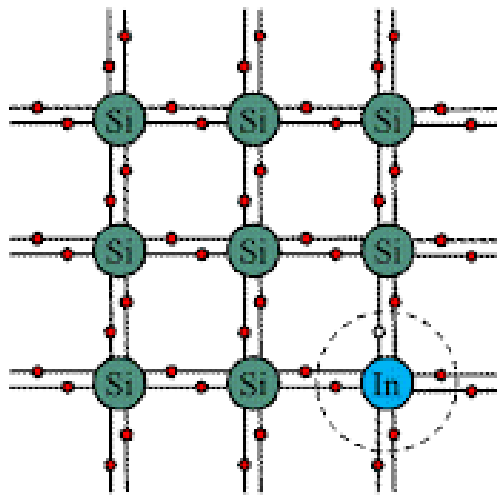
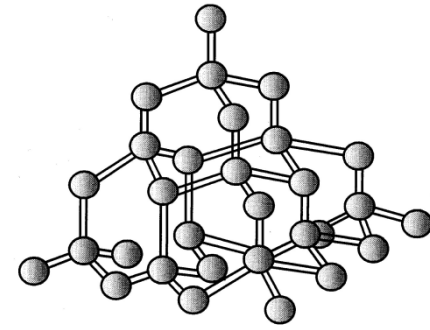
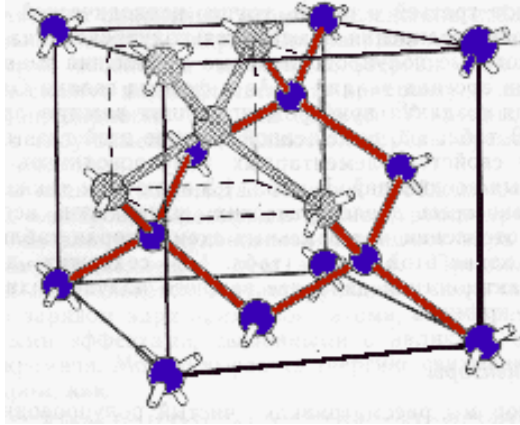


При разрыве связи образуется вакантное место, которое называют **дыркой**.

В дырке имеется избыточный положительный заряд.

В **собственных** полупроводниках электронный ток равен дырочному!

# Примесные полупроводники



Полупроводники, содержащие донорные примеси, называются полупроводниками  $n$  – типа от слова negative – отрицательный

Полупроводники, содержащие акцепторные примеси, называются полупроводниками  $p$  – типа от слова positive – положительный





В **диэлектриках** электропроводность складывается из **ионной** и **электронной** электропроводностей, причем.

Для **диэлектриков** наиболее характерна **ионная электропроводность**, электронная электропроводность, как правило, наблюдается только в сильных электрических полях

Под действием тепловых флуктуаций ионы получают иногда энергию, достаточную, чтобы покинуть нормальные положения в решетке и попасть в пространство между нормально закрепленными ионами (междоузлия).

**При приложении электрического поля** эти межузельные ионы перескакивают из одного межузельного положения в другое в направлении поля.

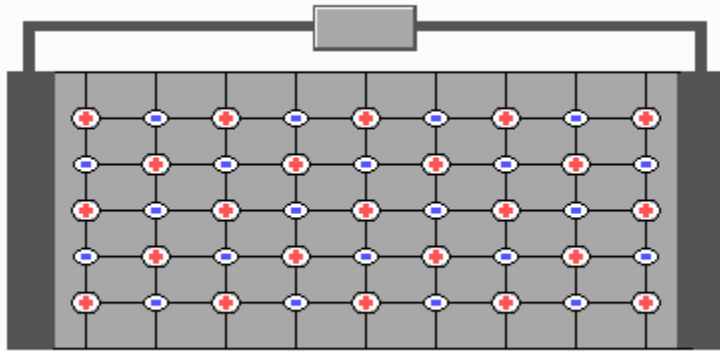
Таким образом, через диэлектрик будет протекать электрический ток.

Электронная электропроводность не сопровождается переносом вещества.

Ионная – сопровождается.

Следовательно, так можно экспериментально определить вид электропроводности.

Подключите напряжение !



Механизм электропроводности по Френкелю

Ток проводимости в твердых диэлектриках обуславливается направленным перемещением ионов примесей и ионов самого диэлектрика.

В диэлектриках **с атомными и молекулярными решетками** (парафин, полиэтилен и др.) ток проводимости обусловлен только ионами различных примесей.

У таких диэлектриков электропроводность весьма мала!

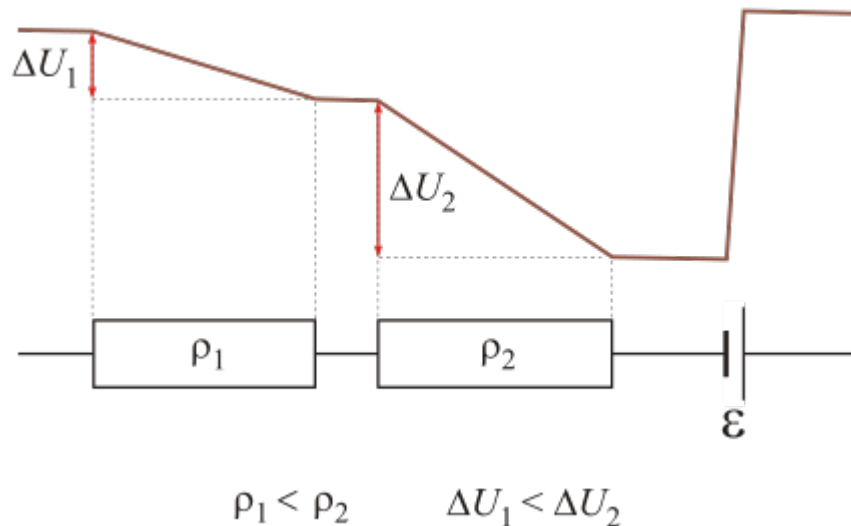
С течением времени ионная проводимость твердого диэлектрика понижается в связи с уменьшением количества ионов примесей, которые, дойдя до электродов, нейтрализуют свои заряды.

В **ионных** кристаллических диэлектриках (слюда и др.) ток проводимости составляют не только ионы примесей, но ионы самой кристаллической решетки. Последние могут быть сорваны электрическим полем с мест, где они были слабо закреплены (междоузлия), а также из узлов кристаллической решетки при одновременном воздействии на нее электрического поля и высокой температуры.

В **аморфных** диэлектриках (неорганические стекла) ионная электропроводность обусловлена электролизом различных окислов, входящих в состав самих стекол



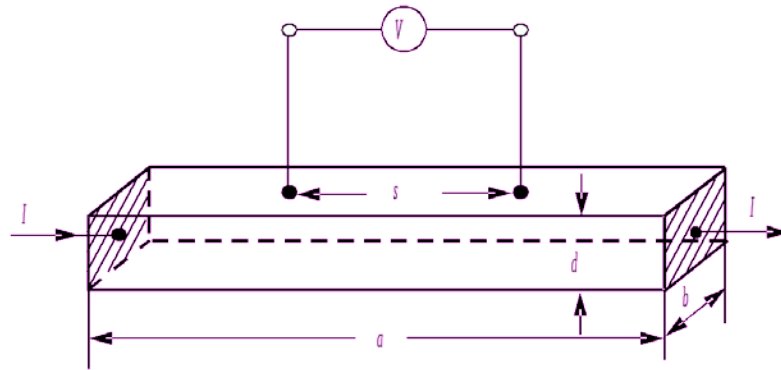
**Электрическое сопротивление** — физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока и равная отношению напряжения на концах проводника к силе тока, протекающего по нему.



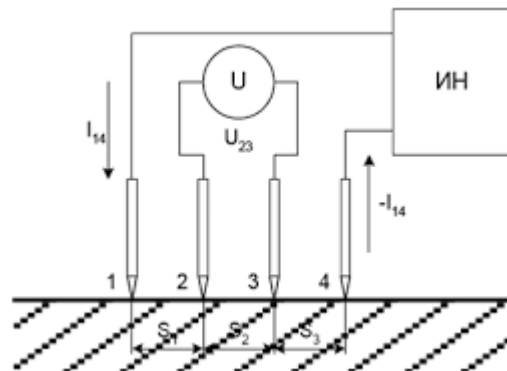
По [закону Ома](#) на участке проводника, обладающем активным сопротивлением , ток создаёт падение напряжения .

$$U = IR$$

**Двухзондовый метод** применяют для измерения удельного сопротивления образцов, имеющих правильную геометрическую форму и постоянное поперечное сечение. При этом на торцевых гранях образца, например в виде прямоугольной пластины, изготавливают омические контакты. Через эти контакты вдоль образца пропускают электрический ток.

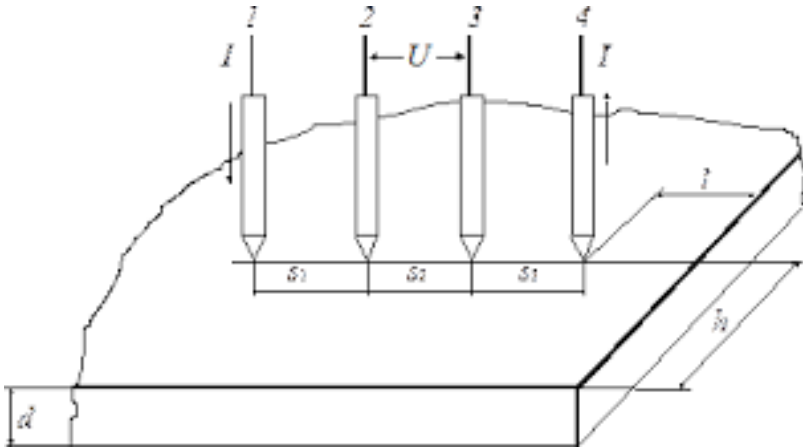


**Четырехзондовый метод** измерения удельного сопротивления не требует создания омических контактов к образцу, возможно измерение удельного сопротивления образцов самой разнообразной формы и размеров. Условием его применения с точки зрения формы образца является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов.



Если расстояния между зондами одинаковы, т.е.  $s_1 = s_2 = s_3 = s$ , то

$$\rho = 2\pi s \frac{U_{23}}{I_{14}}$$



# Три класса магнитных веществ

Существует три основных класса веществ с резко различающимися магнитными свойствами:

**ферромагнетики,**  
**парамагнетики** и  
**диамагнетики.**

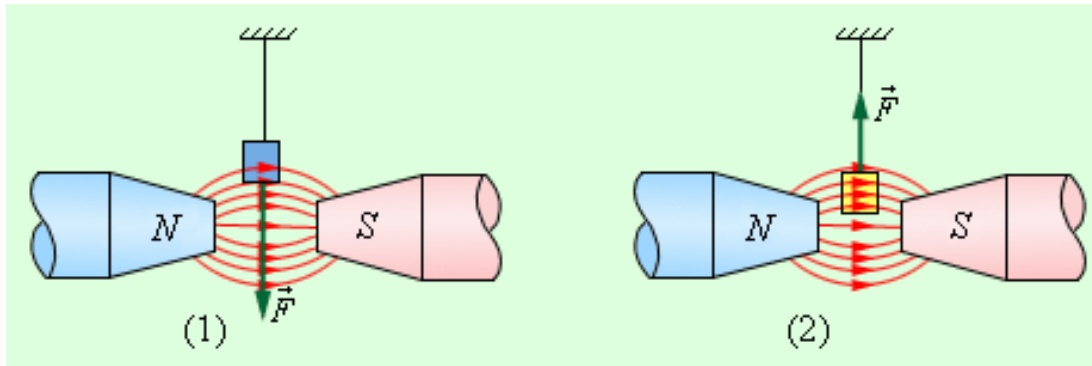


# Слабо-магнитные вещества



**Парамагнетики** — вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении внешнего магнитного поля. Парамагнетики **втягиваются** магнитным полем

**Диамагнетики** — вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. Диамагнетики **отталкиваются** магнитным полем.



**Ферромагнетики** — Внутреннее (собственное) магнитное поле может быть многократно (сотни, тысячи) сильнее, чем внешнее поле, вызвавшее намагничивания.



**магнито-мягкие** материалы - почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю

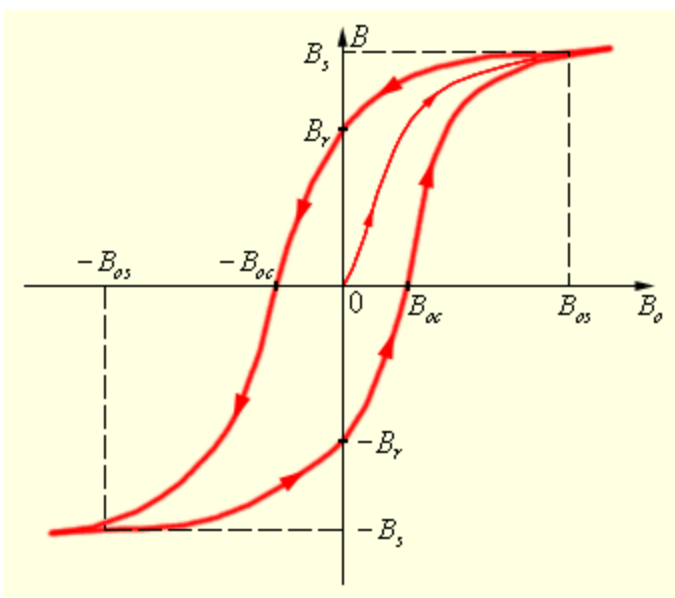
**магнито-жесткие** материалы – в значительной мере сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля

Магнитная проницаемость  $\mu$  **ферромагнетиков** не является постоянной величиной; она сильно зависит от индукции  $B_0$  внешнего поля.

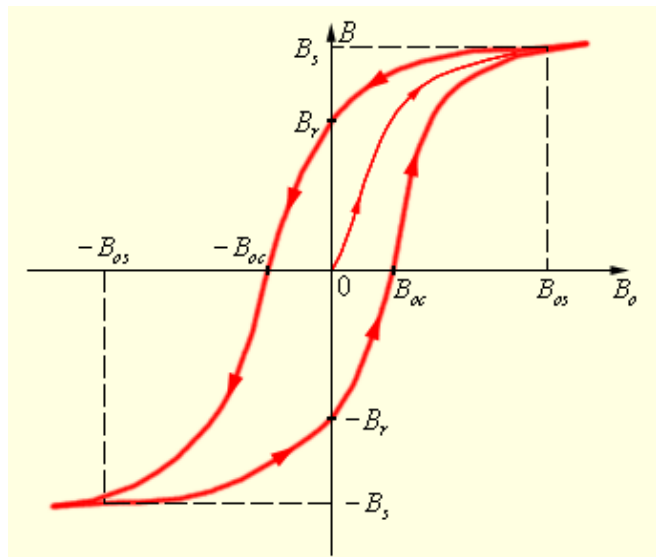
Непостоянство магнитной проницаемости приводит к нелинейной зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля.

Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является *гистерезис*, то есть зависимость намагничивания от предыстории образца.

Кривая намагничивания  $B$  ( $B_0$ ) ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса*



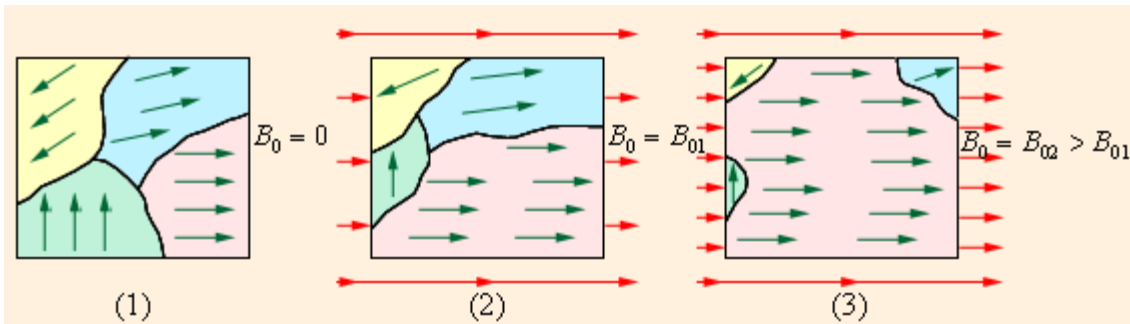




при  $|B_0| > B_{0s}$  наступает магнитное насыщение – намагниченность образца достигает максимального значения.

Если теперь уменьшать магнитную индукцию  $B_0$  внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит **остаточную намагниченность** – поле внутри образца будет равно  $B_r$ .

Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию  $B_0$  до значения  $-B_{0c}$ , которое принято называть **коэрцитивной силой**.



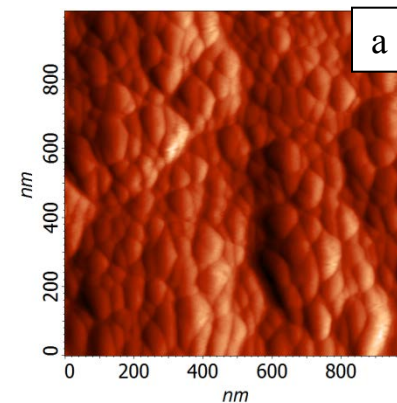
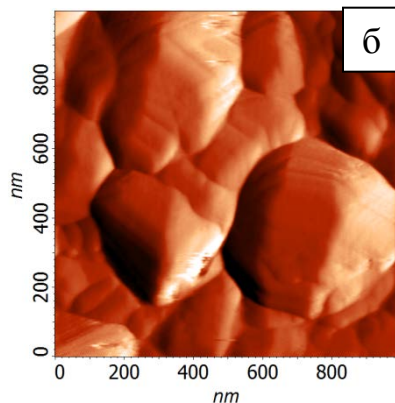
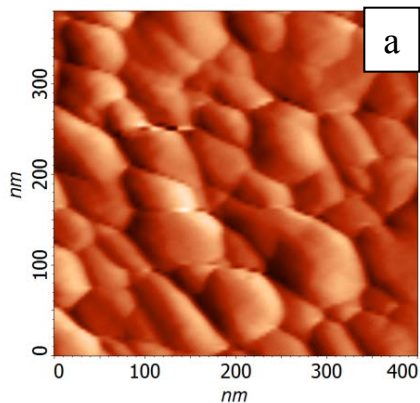
Намагничивание  
ферромагнитного образца.

(1)  $B_0 = 0$ ; (2)  $B_0 = B_{01}$ ;

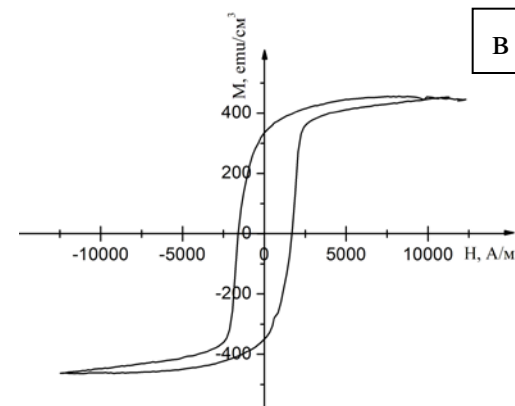
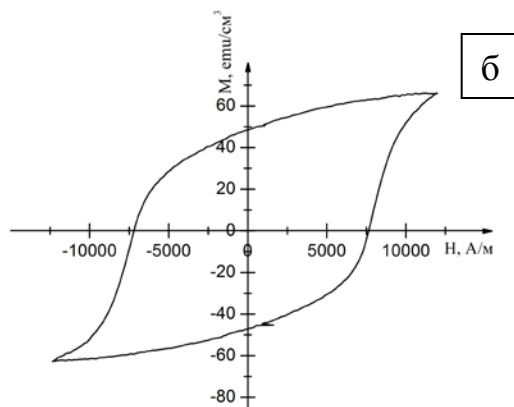
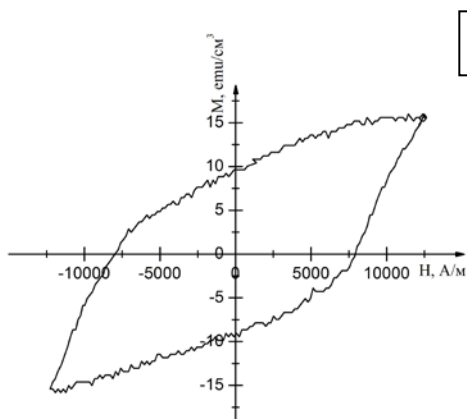
(3)  $B_0 = B_{02} > B_{01}$

У **МАГНИТО-МЯГКИХ** материалов значения коэрцитивной силы  $H_{0c}$  невелико – петля гистерезиса таких материалов достаточно узкая.

Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие широкую петлю гистерезиса, относятся к **МАГНИТО-ЖЕСТКИМ**.



АСМ-изображения морфологии поверхности пленок Co, нанесенных при температуре подложки 330 °C и температурах испарителя 120 (а), 145 (б) и 155 °C (в)



Петли гистерезиса пленок Co, нанесенных при температуре подложки 330 °C и температурах испарителя 120 (а), 145 (б) и 155 °C (в)

**Магнитометр** — прибор для измерения характеристик магнитного поля и магнитных свойств материалов.

В зависимости от измеряемой величины различают приборы для измерения - -

- напряжённости поля (эрстедметры),
- направления поля (инклинаторы и деклинаторы),
- градиента поля (градиентометры),
- магнитной индукции (тесламетры),
- магнитного потока (веберметры, или флюксметры),
- коэрцитивной силы(коэрцитиметры),
- магнитной проницаемости (мю-метры),
- магнитной восприимчивости (каппа-метры),
- магнитного момента.

Основные **датчики**, применяемые в магнитометрах:

- Оптико-механический
- Феррозондовый
- Магнитоиндуктивный
- На эффекте Холла
- Магниторезисторный
- Протонный
- Квантовый

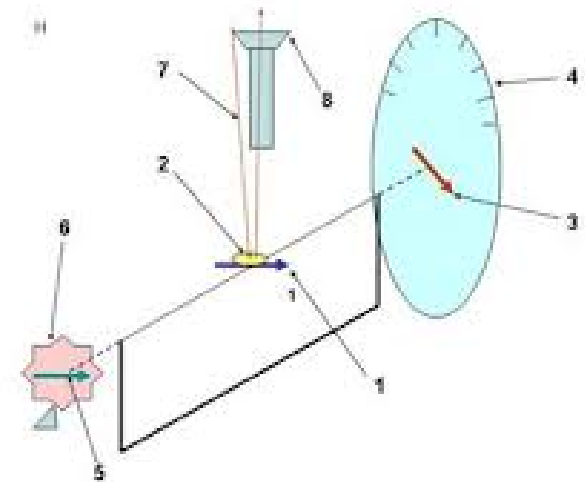
## Принцип действия **оптико-механических** магнитометров аналогичен работе **компаса**

Принцип работы **оптико-механического** магнитометра основан на измерении механических моментов, действующих на чувствительный элемент прибора (например, небольшой постоянный магнит) в измеряемом поле.

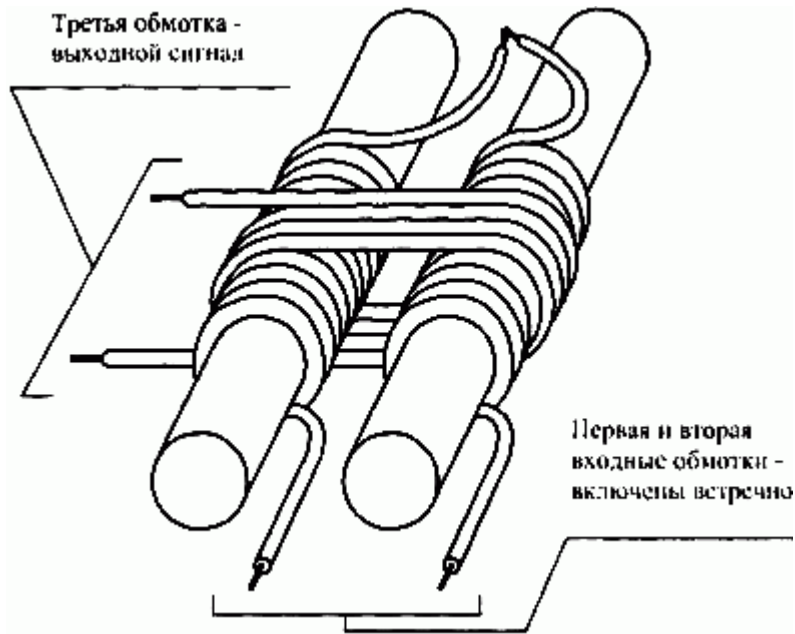
При воздействии внешнего поля, не совпадающего с направлением поля этого постоянного магнита, чувствительный магнит испытывает поворачивающий момент, зависящий от напряжённости внешнего измеряемого поля и ориентации поля измерительного магнита и внешнего поля.

Измерительный магнит подвешен на упругой для кручения подвеске, по степени закручивания, с учётом ориентации прибора, определяют внешнее поле.

Измерительный магнит (1) с зеркальцем (2) жестко укреплен на горизонтально натянутой тонкой металлической нити. Магнит может поворачиваться в вертикальной плоскости на определенный угол в зависимости от величины вертикальной напряженности магнитного поля  $Z$ . Практически удобнее не измерять угол отклонения магнита, а компенсировать его. Для этого сбоку от измерительного магнита установлен компенсационный магнит (3), жестко связанный с прозрачным диском, на котором нанесена шкала (4). С другой стороны установлен диапазонный магнит (или магнит грубой компенсации - 5), положение которого меняется степенями с помощью зубчатого сектора (6).



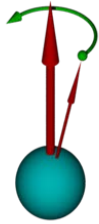
## Дифференциальный ферромагнитный датчик



Датчик состоит из **двух** идентичных ферромагнитных сердечников с идентичными катушками, расположенными параллельно рядом друг с другом. По отношению к возбуждающему электрическому сигналу опорной частоты они включены встречно. **Третья** катушка представляет собой обмотку, намотанную поверх двух сложенных вместе первых двух катушек с сердечниками.

При отсутствии внешнего магнитного поля электрические сигналы первой и второй обмоток **симметричны** и действуют так, что выходной сигнал в третьей обмотке отсутствует, так как магнитные потоки через нее полностью компенсируются.

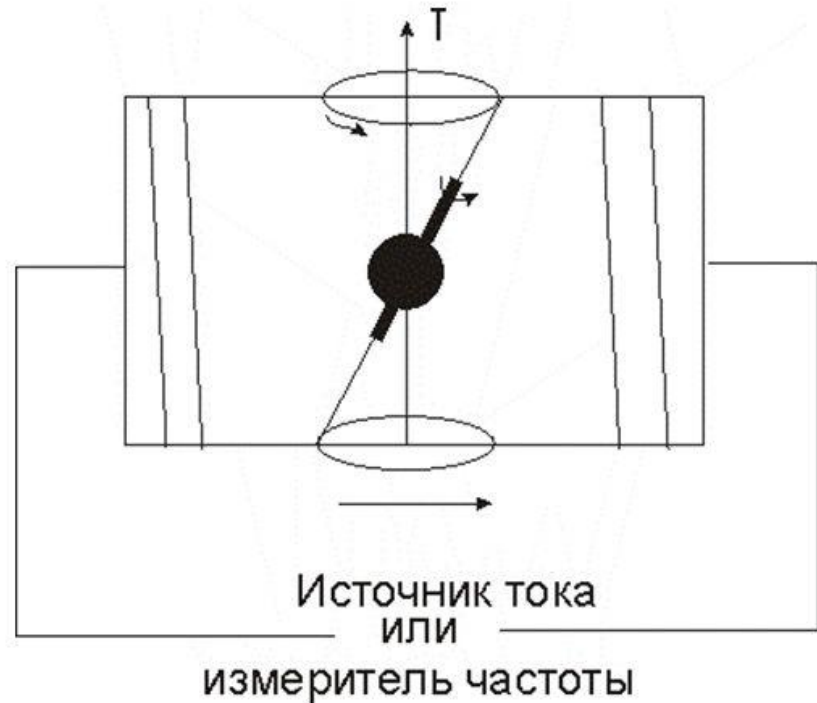
При наличии внешнего смещающего магнитного поля на выходе третьей обмотки появляется сигнал рассогласования удвоенной частоты.



# Протонный магнитометр

Элементарные частицы материи, в т.ч. атомные ядра, имеют собственные магнитные моменты. Атомное ядро вращается в магнитном поле вокруг направления поля. Частота вращения не зависит от внешних факторов (температура, давление и др.) и определяется только напряженностью магнитного поля.

$$\underline{T \sim f}$$



Для измерения магнитного поля удобнее всего использовать протоны.

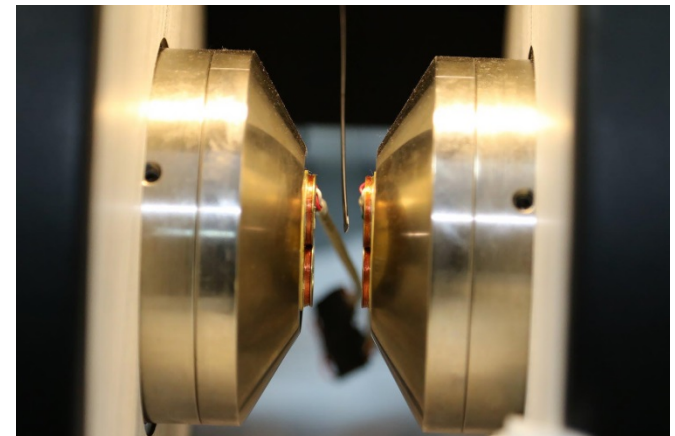
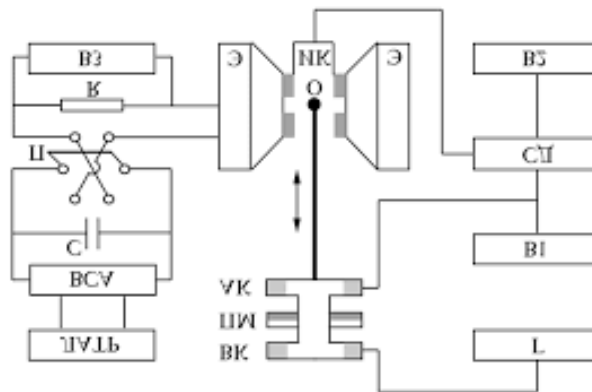
Если поместить образец с протонами (например, сосуд с водой или спиртом) в катушку индуктивности, то в последней возникнет Э.Д.С. с частотой, равной частоте прецессии (вращения) протонов.



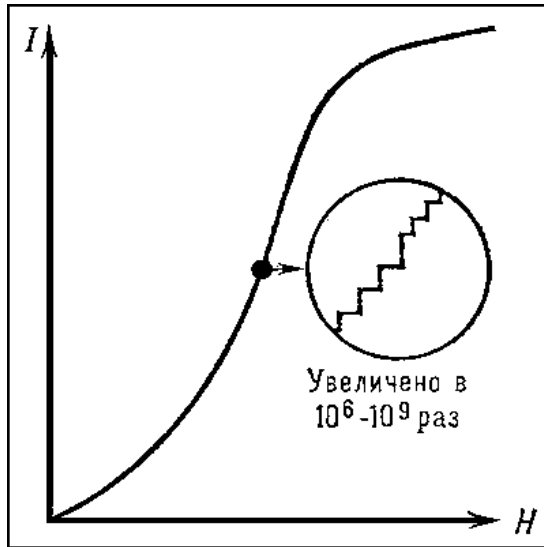


## Вибромагнитометр

Образец, укрепленный на штоке, приводится в колебательное движение в системе четырех измерительных катушек. При этом ось колебаний параллельна плоскости катушек, а магнитный момент образца, индуцируемый внешним магнитным полем, ориентирован перпендикулярно плоскости катушек. Катушки расположены на полюсах электромагнита, который является источником магнитного поля. На каждом полюсе в парах катушки соединены «встречно», а пары между собой – «последовательно». При движении образца вверх увеличивается магнитный поток в верхних катушках и уменьшается в нижних катушках. Возникающие в них **э.д.с.** имеют разные знаки, но, благодаря встречному включению катушек, складываются. Подобным образом развивается ситуация при движении образца вниз.



## Шумы Баркгаузена



При медленном намагничивании ферромагнитного образца в динамике, соединённом с измерительной катушкой, надетой на образец, слышен шум и отдельные щелчки, связанные со скачкообразным изменением намагниченности образца.

Причиной Шума Баркгаузена являются различного рода неоднородности в ферромагнетике (инородные включения, дислокации, остаточные механические напряжения и т.д.), которые препятствуют перестройке магнитной структуры.

Когда граница домена, смещаясь при увеличении поля  $H$ , встречает препятствие (например, включение), она останавливается и остаётся неподвижной при дальнейшем увеличении поля.

При некотором значении поля граница преодолевает препятствие и двигается уже без увеличения поля.



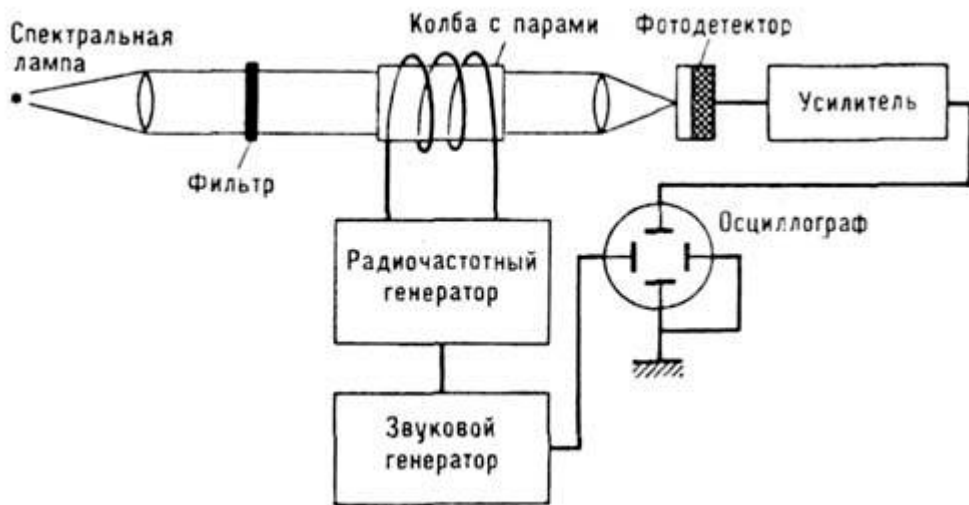
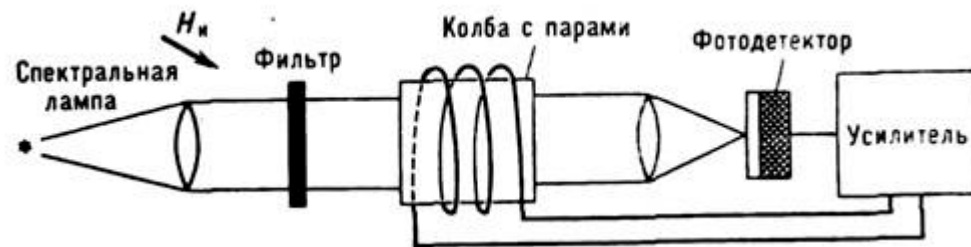
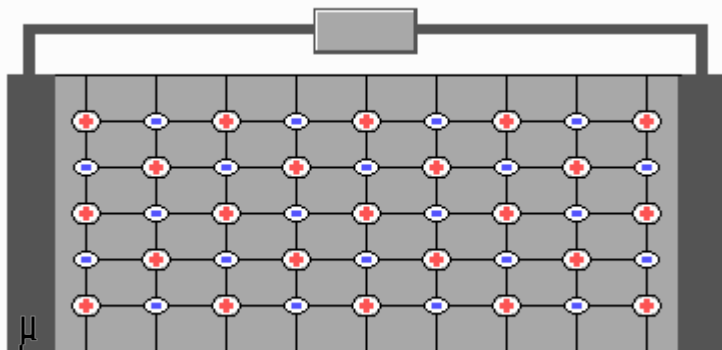


Схема квантового магнитометра с оптической накачкой и оптической индикацией.



Подключите напряжение !

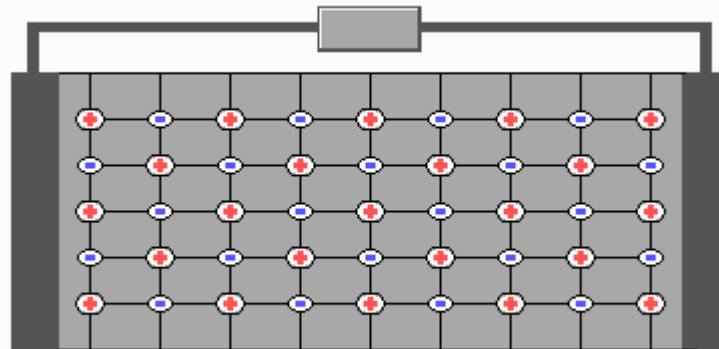


Механизм электропроводности по Френкелю

## Механизм Фрэнкеля

Если при движении по кристаллу ион встречает вакантное место, то он снова закрепляется в узле решетки. Такой процесс приводит к обмену атомов местами, то есть к **диффузии**.

Подключите напряжение !



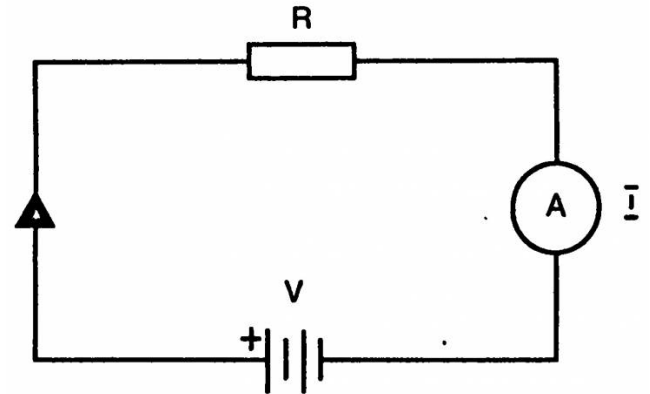
Механизм электропроводности по Шоттки

Механизм **Шоттки**. Дефекты образуются в результате удаления равного числа анионов (-) и катионов (+) из нормальных узлов решетки и помещения их в новые узлы на внешних и внутренних поверхностях кристалла. В этом случае вакансии перемещаются по кристаллу вследствие переноса в незанятый узел ионов из соседних узлов. Посмотрите, как происходит этот процесс.

# Закон Ома

**Сила тока** в участке цепи прямо пропорциональна **напряжению** и обратно пропорциональна **электрическому сопротивлению** данного участка цепи.

$$R = \frac{U}{I}$$



- где
- $R$  — **сопротивление**, Ом;
  - $U$  — разность электрических потенциалов (**напряжение**) на концах проводника, В;
  - $I$  — **сила тока**, протекающего между концами проводника под действием разности потенциалов, А.