

ТЕМА 4.5. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И ИНДИКАТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА (2 ЧАС)

(СВЕТОДИОД И ФОТОДИОД; ОПТОПАРЫ:
ФОТОРЕЗИСТОР, ФОТОДИОД, ФОТОТРАНЗИСТОР,
ФОТОТИРИСТОР; СЕГМЕНТНЫЙ ДИОДНЫЙ ДИСПЛЕЙ И
ЛИНЕЙНЫЕ ШКАЛЫ; СТОЛБИКОВЫЙ ИНДИКАТОР;
ЛОГИЧЕСКИЙ ПРОБНИК)

Оптоэлектроника — область электроники, в которой в качестве носителя информации используют электромагнитные волны оптического диапазона.

- ✓ Длина волн оптического излучения -- от 10^{-8} м до 10^{-3} м, или от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{11}$ Гц.
- ✓ Узкая часть этого диапазона (от $0,4 \cdot 10^{-6}$ до $0,7 \cdot 10^{-6}$ м) -- видимый свет.
- ✓ Электромагнитные колебания с длинами волн от 10^{-8} до $0,4 \cdot 10^{-8}$ м -- ультрафиолетовое излучение,
- ✓ от $0,7 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-3} м — инфракрасное излучение.

В отличие от электромагнитных колебаний инфранизкочастотного, звукового, радио и СВЧ диапазонов параметр частота для характеристики электромагнитных колебаний оптического диапазона практически не применяется. Его заменяет длина волны, которая определяет выбор материалов источника и приемника излучения. Кроме того, от длины волны зависит степень передачи и поглощения излучения в различных светопроводящих средах.

В оптоэлектронике световой луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях. Однако элементы оптоэлектроники обладают целым рядом преимуществ по сравнению с элементами электрических цепей.

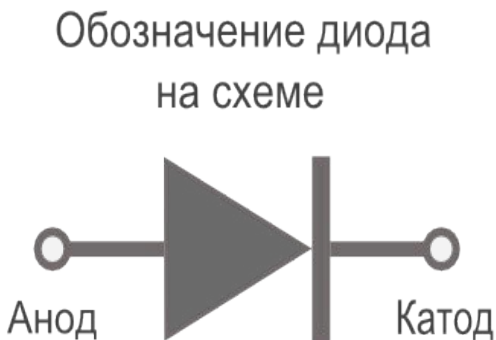
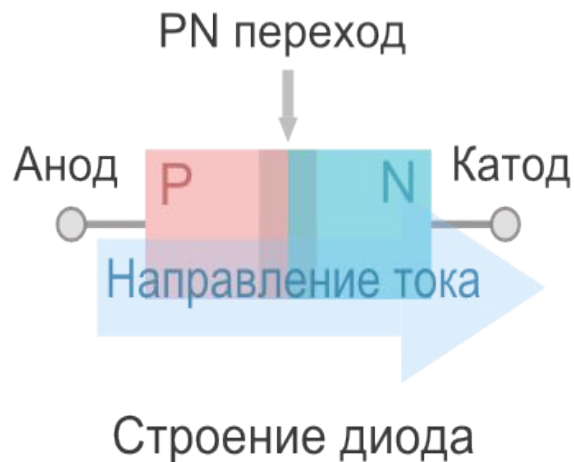
Наличие заряда у электрона не позволяет избежать его взаимодействия с внешними электрическими и магнитными полями. Поэтому в электрических цепях эти взаимодействия всегда имеют место, что требует экранирования и других средств защиты от паразитных влияний внешних полей. Кроме того, в электрических цепях трудно осуществлять гальваническую развязку, особенно на низких частотах и на постоянном токе. В оптических цепях носителями сигналов являются электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются. Это обеспечивает практически полную электрическую развязку входной и выходной цепей системы, хорошее согласование цепей с разными входными и выходными сопротивлениями, отсутствие обратного влияния приемника сигнала на его источник. Оптическое излучение характеризуется большим числом параметров (интенсивность, частота, длина волны, фаза, поляризация, степень монохроматичности и когерентности, направленность), каждый из которых может быть использован для измерения различных физических величин: температуры, давления, геометрических размеров, интенсивности электрического и магнитного полей, гамма-излучения, скорости, ускорения и т. д. Применение оптических методов измерения физических параметров технологических процессов исключает влияние средств измерения на ход процесса, повышает точность измерений.

В устройствах оптоэлектроники передача информации от источника оптического излучения к приемнику осуществляется через светопроводящую среду (воздух, вакуум) или специальные световоды (оптические волокна или планарные волноводы), выполняющие роль проводника оптического излучения. По существу, световоды в световодных системах являются эквивалентами электрических проводов в электронных системах. Световодные линии передачи информации характеризуются большой пропускной способностью, т. е. возможностью совмещать в одном световоде большое число каналов связи при очень высокой скорости передачи информации, достигающей десятков гигабит в секунду. Несколько каналов информации можно объединить в одном световоде, так как оптическое излучение легко разделяется по длинам волн. Световоды характеризуются взрыво- и пожаробезопасностью из-за отсутствия электрического тока и опасности возникновения электрической искры. Последнее свойство особенно важно при прокладке линий связи и установке устройств автоматики в помещениях с наличием горючих материалов, взрывчатых веществ. Обобщенная схема оптоэлектронной системы включает в себя источник оптического излучения, световод и приемник оптического излучения.

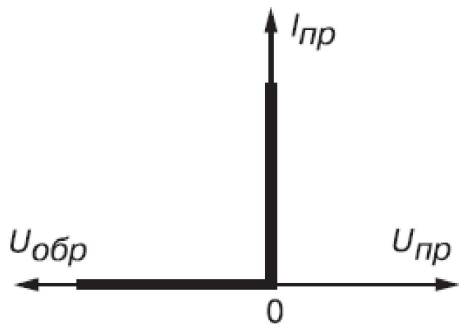
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Основная задача выпрямительного диода – *проводить электрический ток в одном направлении, и не пропускать его в обратном*. Идеальный диод должен быть очень хорошим проводником с нулевым сопротивлением при прямом подключении напряжения (плюс - к аноду, минус - к катоду), и абсолютным изолятором с бесконечным сопротивлением при обратном.

Полупроводниковым диодом называют прибор с одним p-n-переходом, имеющим два вывода: анод A и катод

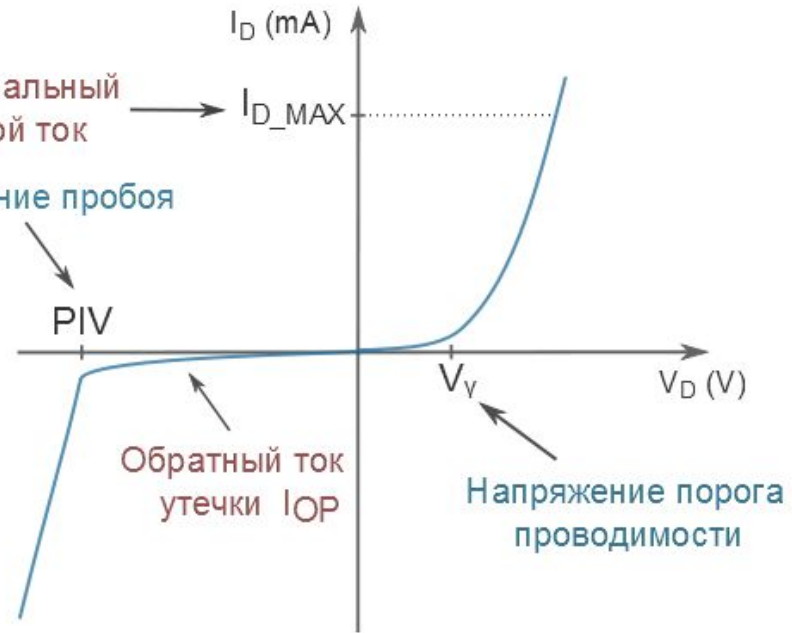


вольтамперная характеристика диода

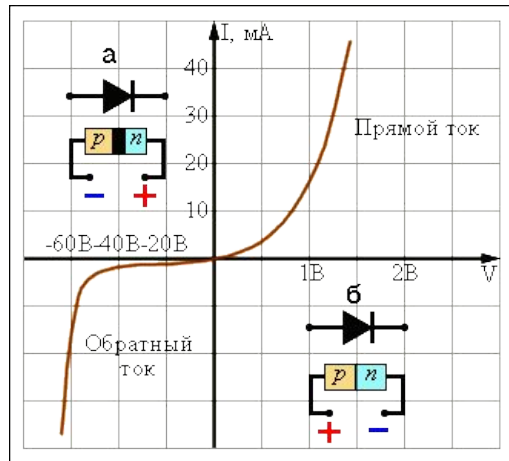


$$I = I_0 \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{U/\phi_T} - 1 \right),$$

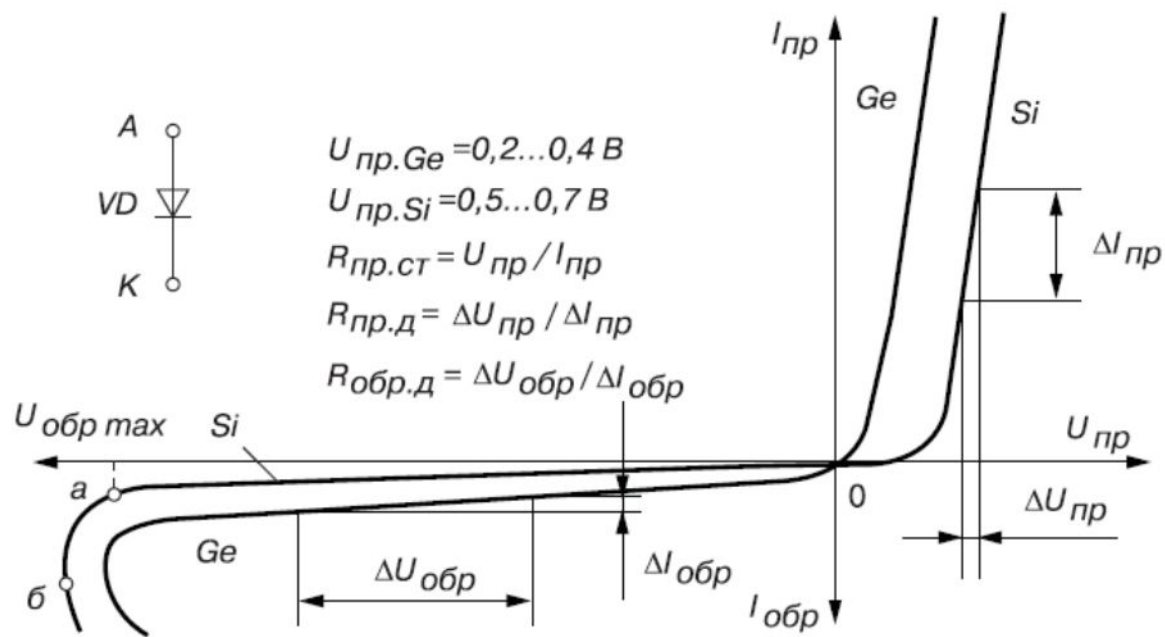
где I_0 — ток насыщения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\phi_m = T/11600$ — температурный потенциал электрона, равный при $t = 20^\circ\text{C}$,



Зависимость тока от напряжения в настоящем диоде



При включении p - n -перехода под *прямое напряжение* $U_{пр}$ сопротивление p - n -перехода $R_{пр}$ снижается, а ток $I_{пр}$ возрастает. При *обратном* напряжении $U_{обр}$ обратный ток I неосновных носителей заряда оказывается во много сотен или тысяч раз меньше прямого тока. При напряжении $U > U_{max}$ (см. точку a на ВАХ) иода) начинается лавинообразный процесс нарастания обратного тока I , соответствующий электрическому пробое p - n -перехода, переходящий (если не ограничить ток) в необратимый тепловой пробой (после точки b на рис.)



Вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость тока, протекающего через $p-n$ -переход, от значения и полярности приложенного к нему напряжения U , достаточно хорошо соответствует выражению

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{U / \varphi_T} - 1 \right),$$

где I_0 — ток насыщения; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $\varphi_T = T / 11600$ — температурный потенциал электрона, равный при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$\varphi_T = \frac{273 + 20}{11600} \approx 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ}.$$

Разновидности диодов

Выпрямительные диоды используют в схемах преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный ток:

плоскостные диоды средней и большой мощности (большая площадь p-n перехода большая площадь p-n перехода, большая ёмкость перехода, предельная частота частот большая площадь p-n перехода, большая ёмкость перехода, предельная частота:



точечные диоды (малая площади p-n перехода точечные диоды (малая площади p-n перехода, малая ёмкость перехода, предельная частота частот точечные диоды (малая площади p-n перехода, малая ёмкость перехода, предельная частота 300—600 МГц точечные диоды (малая площади p-n перехода, малая ёмкость перехода, предельная частота 300—600 МГц. При использовании более острых игл получают точечные диоды с предельной частотой порядка десятков гигагерц;



Принцип устройства точечного (а) и микроплоского (б) диодов

Маломощные диоды - мощность рассеивания до 0,3 Вт,
диоды *средней мощности* - мощность рассеивания 0,3-10 Вт,
диоды *большой мощности* - мощность рассеяния >10Вт.

Параметры выпрямительных диодов:

$I_{пр}$ — прямой ток;

$U_{пр}$ — прямое напряжение;

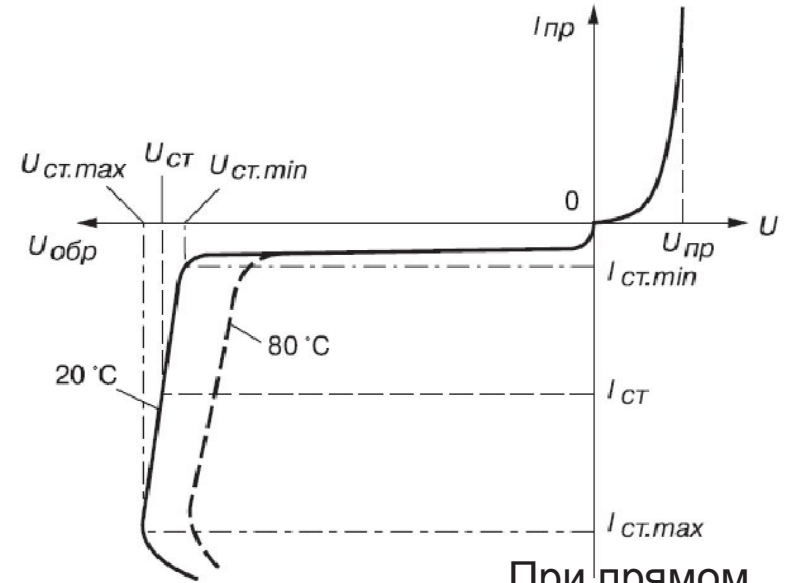
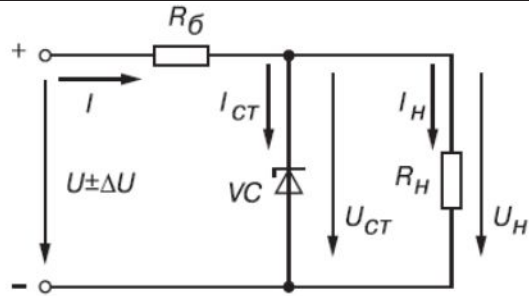
I_{max} — максимальный допустимый прямой ток;

$U_{обр.max}$ — максимальное допустимое обратное напряжение;

— I обратный ток, который нормируется при определенном обратном напряжении.

Выпускаются *диодные столбы*, в которых для увеличения обратного напряжения последовательно соединены от 5 до 50 диодов с допустимым обратным напряжением от 2 до 10 кВ

2. Стабилитроны или опорные кремниевые диоды предназначены для использования в параметрических стабилизаторах напряжения. Рабочим участком ВАХ стабилитрона является участок обратной её ветви, соответствующий области обратного электрического пробоя *p-n*-перехода и ограниченный минимальным и максимальным значениями тока.



Основными параметрами стабилитрона являются:

- $U_{cm} = 3...180 \text{ В}$ — напряжение на стабилитроне;
- $R_{\partial} = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}} = \frac{U_{cm.max} - U_{cm.min}}{I_{cm.max} - I_{cm.min}}$ — динамическое сопротивление на участке стабилизации;
- $I_{cm.min}$ и $I_{cm.max}$ — минимальный и максимальный токи стабилизации (от 5 мА до 5 А);
- $TКН \% = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} 100 = 0,3...0,4 \text{ \%/град}$ — температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации, характеризующий относительное изменение напряжения стабилизации, вызванное изменением температуры на 1°C при постоянном токе, протекающем через стабилитрон.

При прямом включении стабилитрон работает, как обычный диод, $U_{пр} 0,3-0,4 \text{ В}$ мало изменяется при значительных изменениях $I_{пр}$. Прибор, в котором используется прямая ветвь в схеме стабилизации напряжения, называют **стабистором**.

3. Высокочастотные диоды — приборы универсального назначения (для выпрямления токов в широком диапазоне частот — до сотен мегагерц, генерации колебаний СВЧ диапазона, модуляции сигналов, детектирования и других нелинейных преобразований).

Для нормальной работы, чтобы сохранить одностороннюю проводимость на высокой частоте, эти диоды должны иметь точечную структуру участка пробоя.

Параметры:

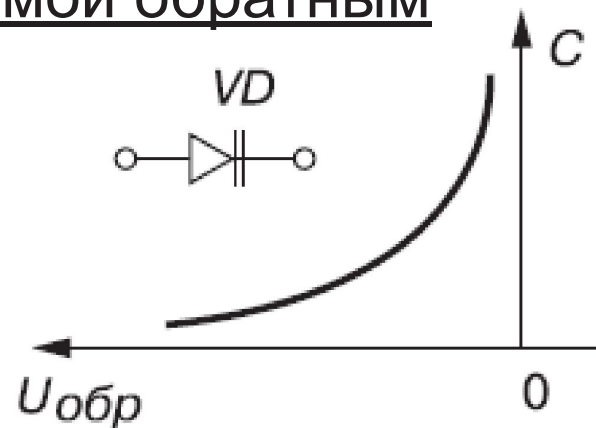
1. Барьерная ёмкость C_b [мкФ]

2. $f_{\text{раб}}$ [МГц]

В современных импортных диодах используется такая характеристика, как "Время восстановления". В ультрабыстродействующих диодах она достигает величин 100 нс.

4. Импульсные диоды используют в ключевых схемах при малых длительностях импульсов и переходных процессов (микросекунды и доли микросекунд). Важным моментом является инерционность включения и выключения диодов (малая длительность рекомбинации носителей заряда — восстановление обратного сопротивления за счет уменьшения барьерной ёмкости p - n -перехода).

4. Варикапы — полупроводниковые диоды, предназначенные для использования их ёмкости, управляемой обратным напряжением U



Основные параметры варикапа:

- C — ёмкость, измеренная между выводами варикапа при заданном обратном напряжении (рис. 1.7). Для различных варикапов ёмкость может быть от нескольких единиц до нескольких сотен пикофард;
- $k_c = 5...20$ — коэффициент перекрытия по ёмкости отношения ёмкостей варикапа при двух значениях обратных напряжений;

- $Q = \frac{1}{\omega R C_{бар}}$ — добротность варикапа (значение Q — от десятков до нес-

кольких сотен) — это отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к активным сопротивлениям потерь R при заданных значениях ёмкости и обратного напряжения.

Варикапы применяют в основном в устройствах высоких и сверхвысоких частот, например, для настройки колебательных контуров.

В общем случае диод обладает барьерной и диффузионной ёмкостями. *Барьерная ёмкость* проявляется при приложении к p - n -переходу обратного изменяющегося во времени напряжения. При этом через p - n -переход протекает ток. Та доля тока (ток смещения), которая не связана с движением носителей заряда через p - n -переход, и определяет барьерную ёмкость
$$C_{бар} = \left| \frac{dq_{обр}}{dU} \right|$$

(появление тока смещения связано с изменением объёмного заряда). Абсолютное значение отношения $\left| \frac{dq_{обр}}{dU} \right|$ взято потому, что объёмный заряд в p - n -переходе может быть положительным и отрицательным.

Диффузионную ёмкость обычно связывают с изменением заряда инжектированных неосновных носителей при изменении напряжения на диоде:

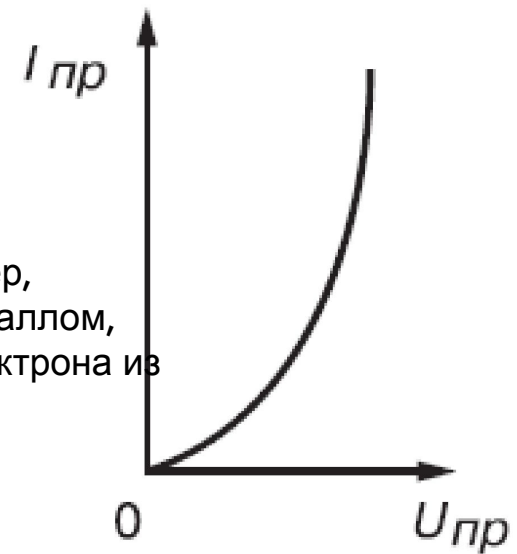
$$C_{диф} = \left| \frac{dq_{инж}}{dU} \right|$$

Диффузионная ёмкость проявляется при прямом смещении p - n -перехода диода. В качестве варикапов используют диоды при обратном постоянном смещении, когда проявляется только барьерная ёмкость.

5. Диоды Шоттки — это полупроводниковые приборы, в которых используются свойства потенциального барьера (барьера Шоттки) на контакте металл — полупроводник.

ВАХ диодов Шоттки — строгая экспонента

Барьер Шоттки (или Шоттки, (англ. Schottky barrier)) — потенциальный барьер, образующийся в приконтактном слое полупроводника, граничащего с металлом, равный разности работ выхода (энергий, затрачиваемых на удаление электрона из твёрдого тела или жидкости в вакуум) металла и полупроводника

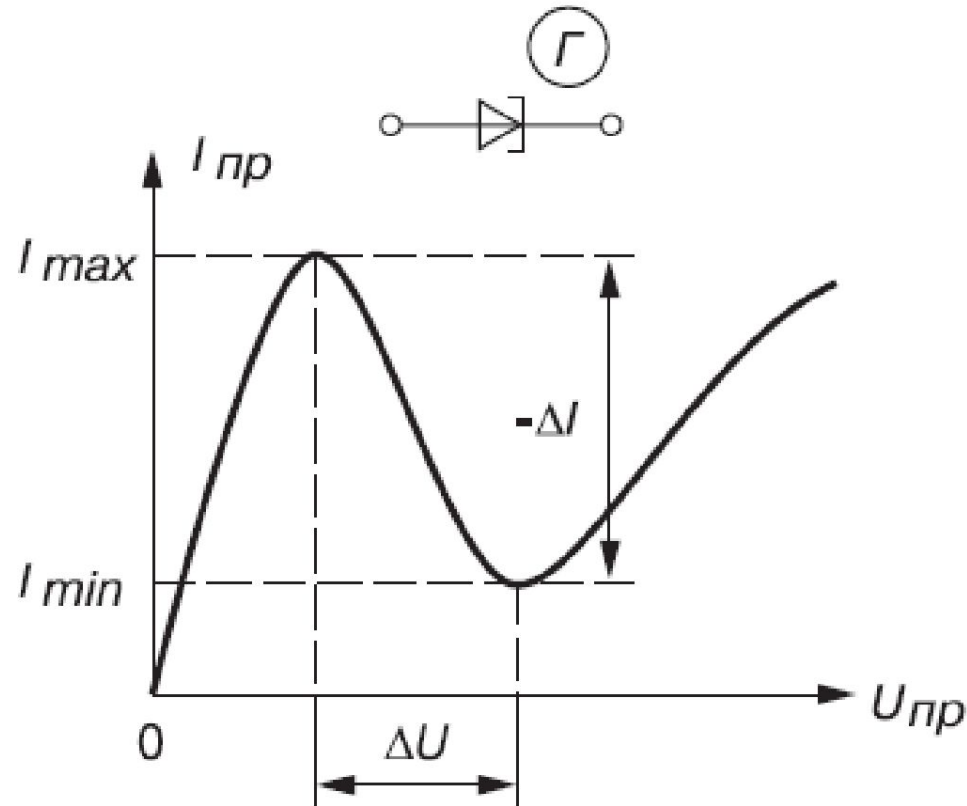


В рассматриваемых диодах из-за разной высоты потенциальных барьеров для электронов и дырок нет инжекции неосновных носителей заряда, нет и таких медленных процессов, как накопление и рассасывание неосновных носителей в базе. В результате инерционность диодов с выпрямлением на контакте металл — полупроводник определяется величиной барьерной ёмкости выпрямляющего контакта ($C_{бар} \approx 1$ пФ). Кроме того, у этих диодов незначительные активные потери (прямое напряжение $U_{пр} \approx 0,4$ В, что на 0,2 В меньше, чем у обычных диодов).

В связи с тем, что барьерная ёмкость и последовательное активное сопротивление в таких диодах небольшие, соответственно мало и время перезарядки ёмкости; это даёт возможность использовать диоды Шоттки в качестве сверхскоростных импульсных диодов ($f = 315$ ГГц), например, в некоторых схемах в качестве быстродействующих логарифмических элементов и в мощных высокочастотных выпрямителях, в которых диоды способны работать на частотах до 1 МГц при $U = 50$ и $I = 10$.

6. Туннельные диоды — это полупроводниковые приборы (не имеющие *p-n*-перехода), использующие эффект Ганна — возникновение на ВАХ участка отрицательного дифференциального сопротивления $R_d = -\Delta U / \Delta I$

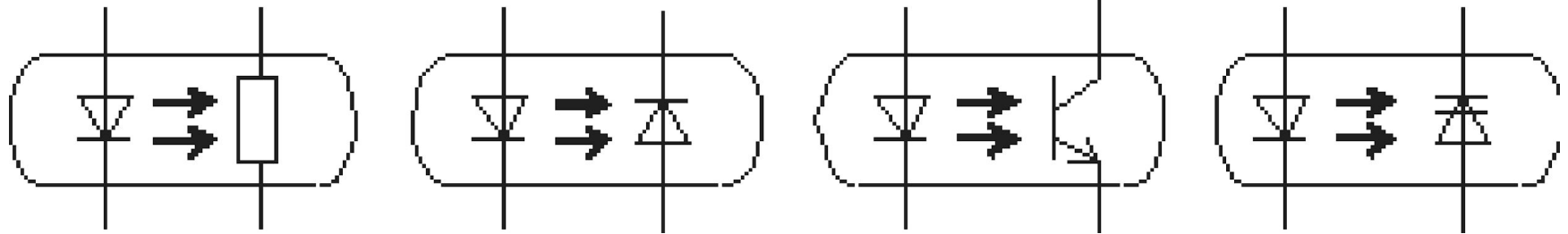
Отношение токов $I_{max} / I_{min} = 5 \dots 10$. Это свойство диодов Ганна используют при разработке усилителей, генераторов синусоидальных и релаксационных колебаний, в переключающих устройствах с частотами от 100 МГц до 10 ГГц.



ГАННА ЭФФЕКТ - генерация высокочастотных колебаний электрич. тока в полупроводниках с N-образной объёмной вольтамперной характеристикой

Принцип действия полупроводниковых *оптоэлектронных* приборов основан на использовании электромагнитного излучения оптического диапазона для передачи, обработки или отображения информации. В семейство приборов некогерентной оптоэлектроники входят излучающие светодиоды, цифробуквенные индикаторы (дисплеи), резисторные, диодные, транзисторные, тиристорные оптопары и оптоэлектронные интегральные микросхемы.

Оптопарой называют прибор, состоящий из излучающего и фотоприёмного элементов, между которыми имеется оптическая связь и обеспечена электрическая изоляция. В резисторной оптопаре в качестве фотоприёмного элемента используется фоторезистор (рис. 10.46, а), в диодной, транзисторной и тиристорной — соответственно фотодиод, фототранзистор и фототиристор.



В оптоэлектронных интегральных микросхемах осуществляется оптическая связь между отдельными узлами или компонентами с целью изоляции их друг от друга (гальваническая развязка). В этих ИМС, представляющих собою гибридные модули с компараторами, счётчиками, дешифраторами и индикаторами, кроме излучателя и фотоприёмника, содержится устройство обработки сигнала, получаемого от фотоприёмника, в частности, устройство согласования оптикоэлектронного тракта с логическими ИМС по уровням сигналов, быстродействию, функциональным параметрам [2].

7. Светодиоды —излучающие полупроводниковые приборы (индикаторы), непосредственно преобразующие электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

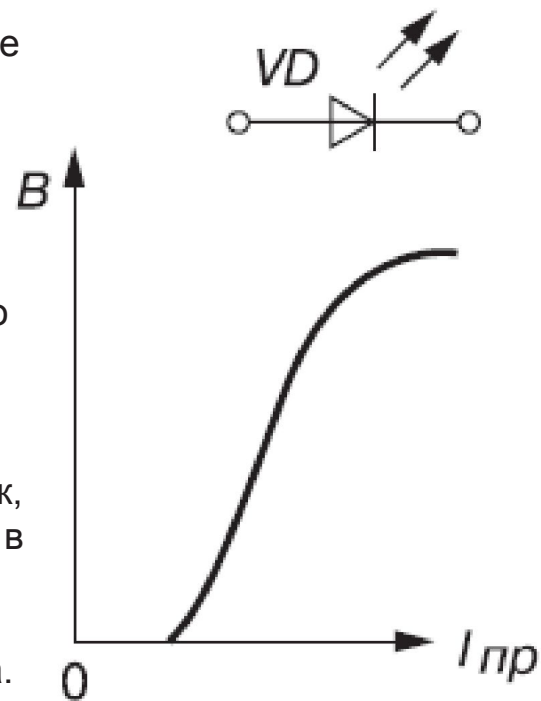
В основе принципа функционирования светодиодов лежит преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение, спектр которого полностью или частично лежит в видимой области, диапазон длин волн которой составляет 0,45--0,68 мкм.

При пропускании электрического тока через р-п переход в прямом направлении, носители заряда — электроны и дырки — рекомбинируют с излучением фотонов (из-за перехода электронов с одного энергетического уровня на другой).

Светодиодная структура представляет собой *р-п*-переход, в котором при протекании прямого тока в несколько миллиампер в обеих областях перехода происходит рекомбинация инжектированных электронов и дырок, но наиболее эффективное преобразование инжектированных электронов в световую энергию протекает в базовой *р*-области.

Максимальное значение энергии, которое может выделиться при рекомбинации, равно ширине запрещённой зоны данного полупроводника. В полупроводниковых материалах с шириной запрещённой зоны менее 1,8 эВ может возбуждаться излучение с длиной волны более 0,7 мкм, которое лежит за пределами диапазона длин волн видимого света. Поэтому основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления серийных светодиодов, являются фосфид галлия (GaP), твёрдые растворы ($GaAsP$, $GaAlP$) и карбид кремния (SiC) с шириной запрещённой зоны более 2 эВ.

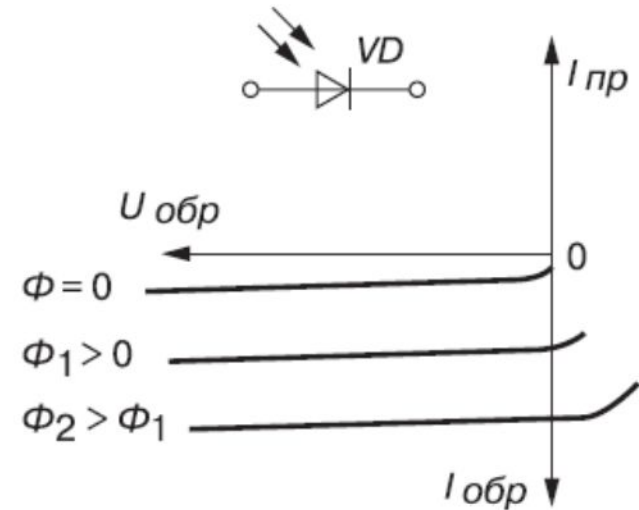
Условное изображение и яркостная характеристика $B(I_{пр})$ светодиода, где B — яркость света в канделах



Светодиоды разных цветов, как и все светоизлучающие приборы в устройствах отображения, используются для визуального отображения информации. Как отмечалось, важнейшей характеристикой светодиода является яркостная характеристика $B(I_{пр})$ (см. рис. 1.10), в которой используется линейный участок. Номинальные токи серийных светодиодов $I_{пр} = 220$ мА, при прямом и обратном напряжениях 23 В ($U_{обр.мах} 5$ В).

Светодиоды с переменным цветом свечения (зарубежные LTR_293, отечественные АЛС331А и другие) содержат в корпусе два светоизлучающих $p\&l\&$ перехода, один из которых имеет резко выраженный максимум спектральной характеристики в красной полосе, другой — в зелёной. При совместной работе $p\&l\&$ переходов цвет излучения светодиода зависит от соотношения токов через эти переходы. Они могут служить индикаторами изменения токовых режимов в электронной цепи. Светодиоды, обладающие рядом преимуществ (малые габариты, низкое напряжение питания, набор различных цветов свечения, большой срок службы) с успехом используются в схемах индикации включения, готовности к работе, наличия напряжения в блоке, аварийной ситуации узла и в других схемах, хорошо согласуясь по электрическим параметрам с полупроводниковыми приборами и микросхемами.

8. Фотодиод — полупроводниковый прибор с $p-n$ -переходом, обратный ток которого зависит от освещенности Φ (рис.).

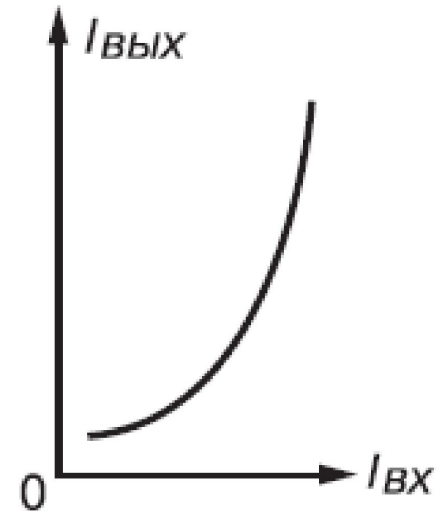
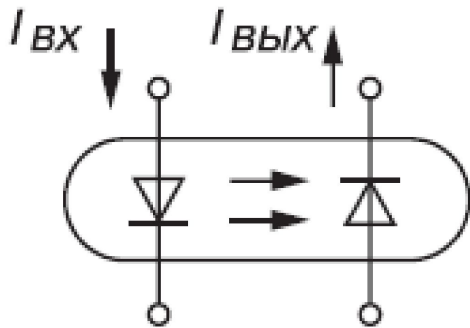


При поглощении квантов света в $p-n$ -переходе или в прилегающих к нему областях кристалла полупроводника образуются новые носители заряда (пары электрон-дырка), поэтому обратный ток (фототок) через фотодиод при освещении возрастает.

С увеличением светового потока Φ сопротивление перехода уменьшается (рис.).

Приборы, предназначенные для использования этого явления, называют *фоторезисторами*, а транзисторы и тиристоры, реагирующие на эффект облучения световым потоком и способные одновременно усиливать фототок, называют соответственно *фототранзисторами* и *фототиристорами*.

9. Диодные оптроны — это приборы, состоящие из оптически связанных между собой элементов оптронной пары (управляемого светодиода и принимающего излучение фотодиода) и предназначенные для выполнения функциональных электрических и оптических преобразований.



На рис. изображена схема диодного оптрона с внутренней прямой оптической связью. Изменение входного тока $I_{вх}$ через светодиод сопровождается изменением яркости его свечения и изменением освещенности фотодиода, что приводит к уменьшению сопротивления фотодиода и соответственно к увеличению тока $I_{вых}$ через выход оптрона. Важным свойством такого оптрона является полная электрическая развязка входа и выхода прибора, что исключает обратную электрическую связь с его выхода на вход.

Тиристор — полупроводниковый прибор с тремя и более переходами, предназначенный для использования в качестве электронного ключа (включён, выключен) в цепи для переключения тока. При этом два внешних слоя изготавливают с высокими концентрациями основных носителей зарядов, а два внутренних — *высокоомными*.

В зависимости от конструктивных особенностей и свойств тиристоры подразделяют на *диодные* и *триодные*.

Диодный тиристор (динистор, неуправляемый тиристор) — прибор с тремя р-я-переходами $J_1, J_2 /_3$ и двумя внешними выводами — *анодом* А и *катодом* К.

Принцип работы. Если на внешние электроды динистора подать прямое напряжение $U_{пр}$ («+» к А, «—» к К), то два внешних перехода J_1 и J_3 окажутся смещёнными *прямо*, а средний J_2 — *обратно*. Это значит, что переходы J_1 и J_3 фактически устраняются и всё напряжение $U_{пр}$ окажется приложенным к переходу J_2 в *обратном направлении*. По динистору будет протекать лишь ток утечки I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов, который является обратным током перехода J_2 . С ростом напряжения $U_{пр}$ ток I_0 будет возрастать незначительно до тех пор, пока $U_{пр}$ не достигнет *напряжения включения* динистора $U_{вкл}$. При этом произойдёт *лавинный пробой* перехода J_2 , динистор откроется и ток I_0 скачком возрастёт до *тока включения* $I_{вкл}$. Дальнейшее увеличение напряжения источника повлечёт за собой рост тока $I_{пр}$ по аналогии

В открытом режиме динистор может *работать долго*, поскольку, во-первых, в переходе J_2 имеет место *лавинный пробой*, являющийся, как указывалось выше, *обратимым*, во-вторых, переход J_2 обильно питается основными носителями зарядов от слоёв J_1 и J_3 . Поэтому после снятия напряжения переход J_2 *восстанавливает первоначальные свойства*, как в лавинном выпрямительном диоде.

Светодиоды разных цветов, как и все светоизлучающие приборы в устройствах отображения, используются для визуального отображения информации. Как отмечалось, важнейшей характеристикой светодиода является яркостная характеристика $V(I_{пр})$ (см. рис. 1.10), в которой используется линейный участок. Номинальные токи серийных светодиодов $I_{пр} = 2 \dots 20$ мА, при прямом и обратном напряжениях 2-3 В ($U_{обр.макс} \approx 5$ В).

Характерная особенность тиристора заключается в том, что его можно *открыть* ЭУ, но *закрыть* невозможно, то есть тиристор *не полностью* управляется ЭУ так же как ионный прибор — тиратрон. Для его закрытия необходимо снизить, тем или иным способом, прямой ток /пр (ток нагрузки) ниже так называемого тока *удержания* /уд. При приложении к тиристорному переменного напряжения, например синусоидального частотой 50 Гц, он открывается ЭУ с момента набегания положительной полуволны, то есть с момента, когда это напряжение, возрастая, пересекает нулевую ось и закрывается без участия ЭУ с набеганием отрицательной полуволны, то есть с момента, когда это напряжение, снижаясь, пересекает нулевую ось. Такое закрытие тиристора *естественным*. Если к тиристорному приложить обратное напряжение $U_{обр} > U_{обр п}$ произойдет, как у выпрямительного диода и динистора, *тепловой пробой* переходов J_1 и J_3 (один за другим) и тринистор выйдет из строя. Таким образом, тиристор, как и диод, обладает *односторонней проводимостью*. Поэтому его ещё называют *управляемым диодом (вентилем)*.

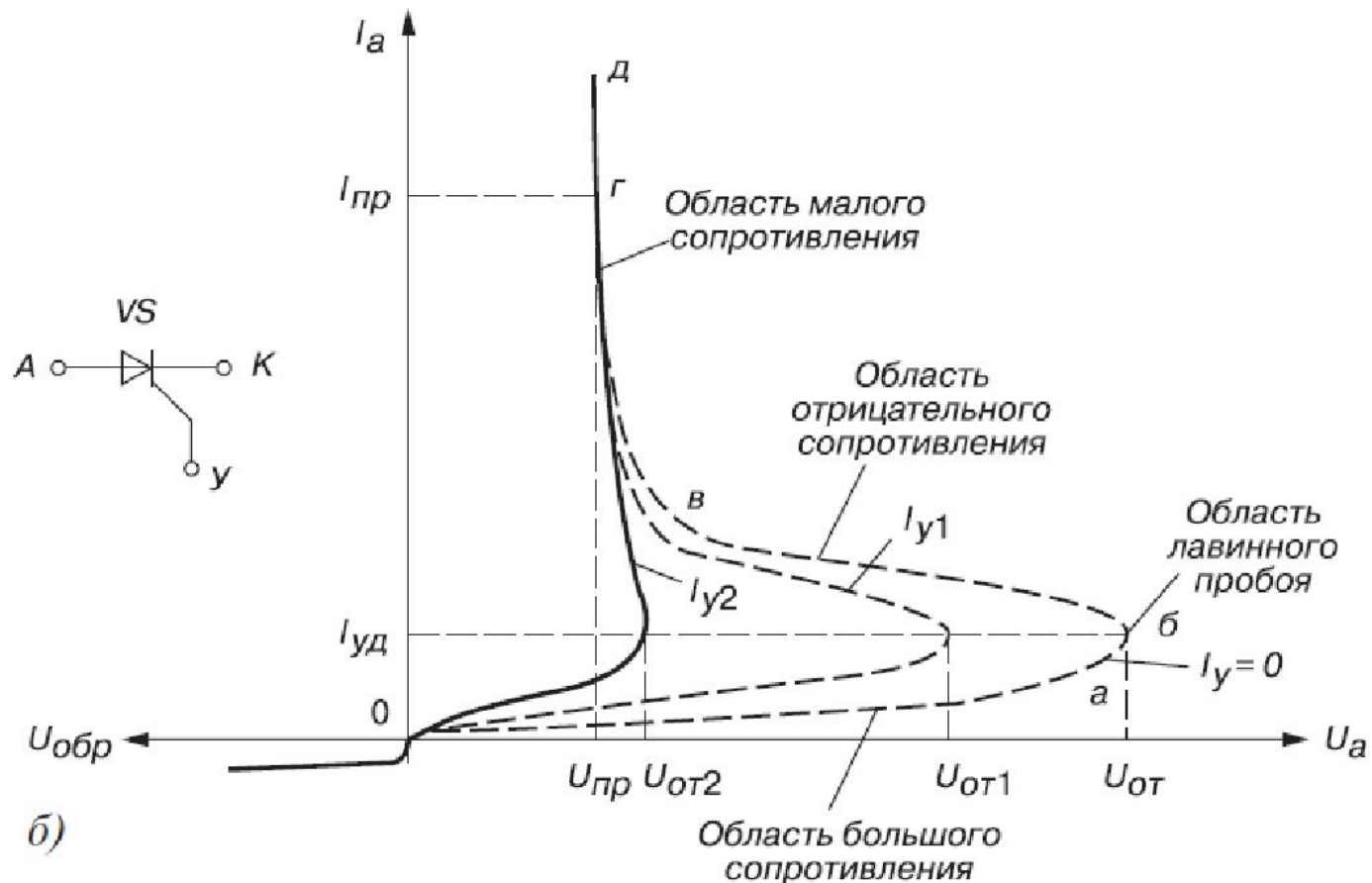
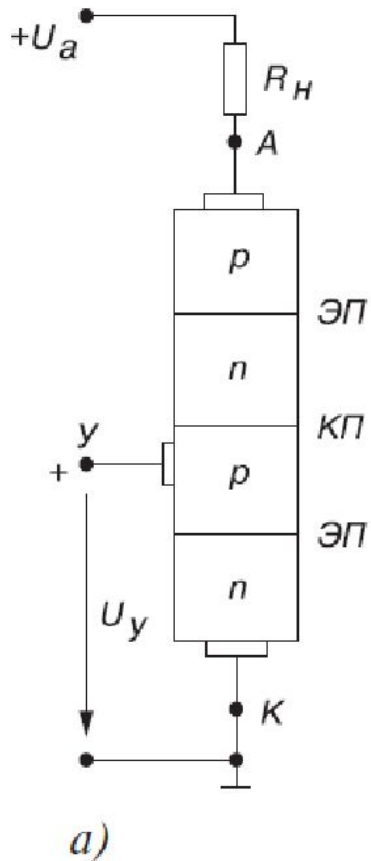
У современных тиристорных /пр» /уэ, то есть прямой ток («выходной») значительно больше тока управления («входного»). Поэтому они являются *усилительными приборами*.

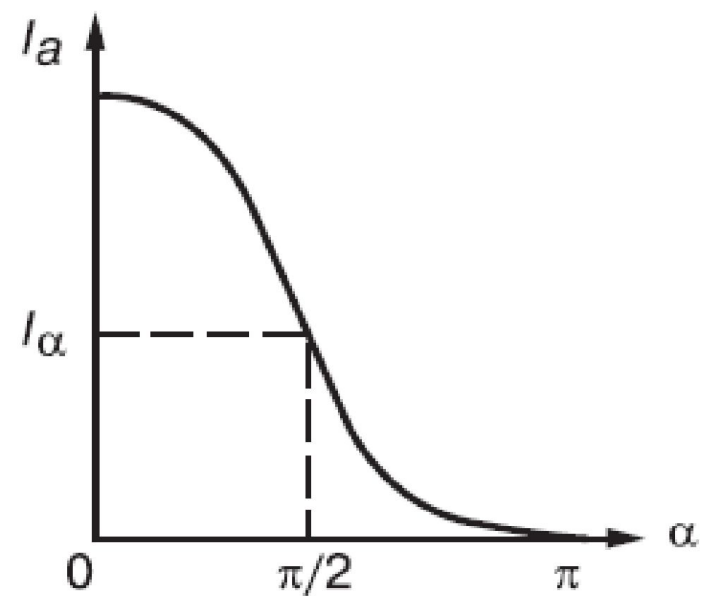
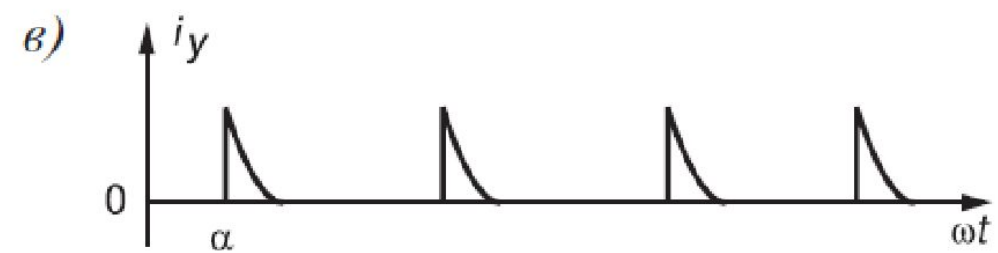
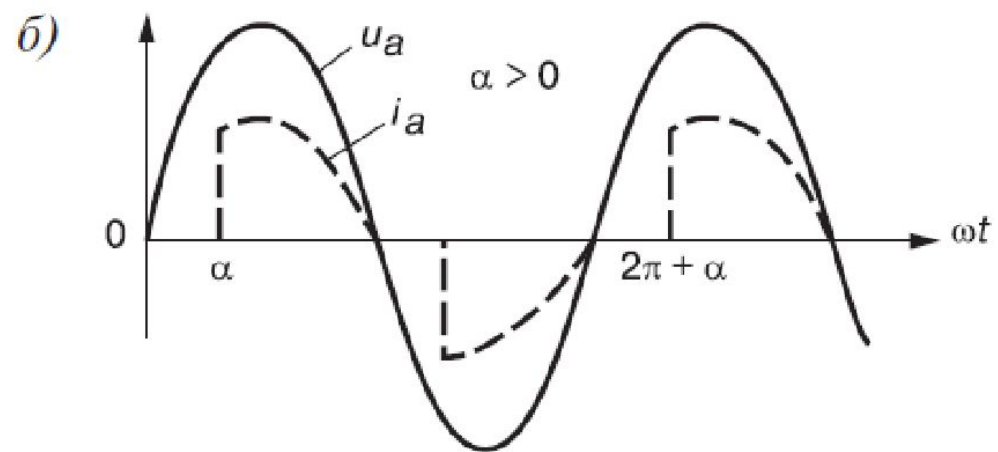
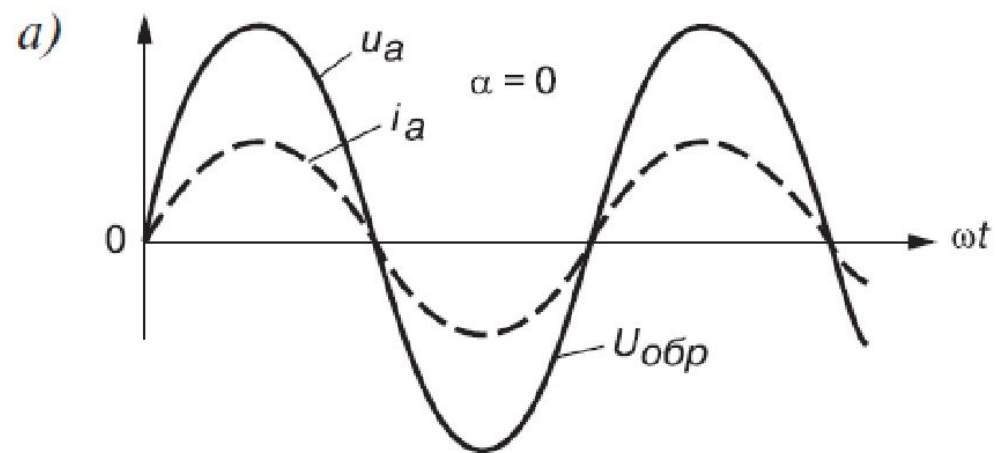
Триодный тиристор (тиристор, однооперационный тиристор, полууправляемый тиристор, незапираемый тиристор, тринистор). Условные изображения, структура и основная характеристика — ВАХ тиристора приведены на рис. 4.4,б. В отличие от динистора в тиристоре имеется третий электрод — *электрод управляющий ЭУ*. В зависимости от расположения ЭУ тиристоры делятся на тиристоры с *анодным* управлением (ЭУ отводится от «-слоя, на рис. 4.4,б показан пунктиром) и *катодным* управлением (ЭУ отводится от д-слоя, на рис. 4.4, б показан сплошной линией).

Классификация. Триодные тиристоры подразделяются на

- собственно *тиристоры*;
- « *симисторы* (симметрично управляемые тиристоры);
- *запираемые* (двухоперационные тиристоры, управляемые тиристоры

Тиристор — электропреобразовательный полупроводниковый прибор с тремя и более p - n -переходами, обладающий способностью принудительного переключения из одного устойчивого состояния (отсечки) в другое (насыщения). Тиристоры подразделяются на диодные (*динисторы*), имеющие два вывода (анод A и катод K), и триодные (*тринисторы*), имеющие три вывода (анод A , катод K и управляющий электрод $У$)





Время переключения тока (порядка 50...100 мА) маломощных тиристорov составляет доли микросекунд, а время восстановления сопротивления тиристора при токе $I_a = 10$ А составляет 200...250 мкс. Коэффициент усиления по мощности тиристора

$$K_p = U_a I_a / U_y I_y \approx 250000.$$

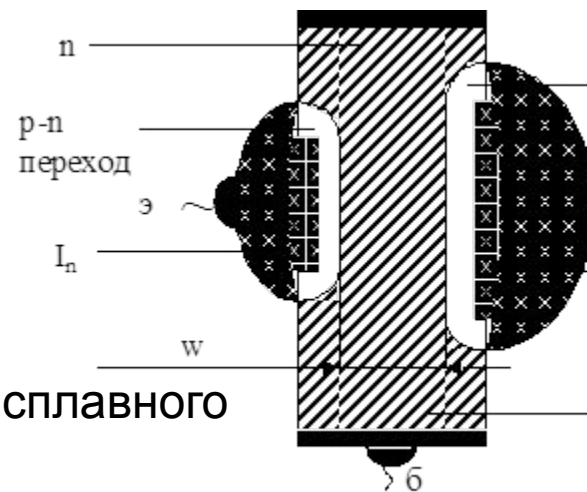
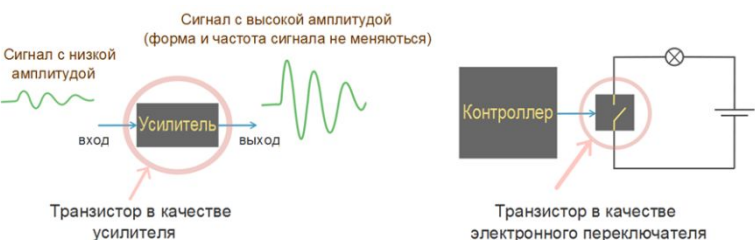
Основные параметры тиристорov:

- напряжение на открытом тиристоре $U_{om} = 1...1,5$ В;
- максимальный допустимый ток анода $I_{a.max}$;
- управляющие напряжение U_y и ток I_y ;
- время включения и выключения $t_{вкл}$ и $t_{вык}$;
- допустимое обратное напряжение тиристора $U_{обр max}$.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР (СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ И И-ПАРАМЕТРЫ)

Транзистор — полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления, инвертирования, преобразования электрических сигналов, а также переключения электрических импульсов в электронных цепях различных устройств.

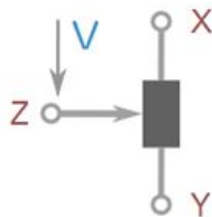
Различают биполярные транзисторы, в которых используются кристаллы *n* и *p*-типа, и полевые (униполярные) транзисторы, изготовленные на кристалле германия или кремния с одним типом проводимости.



Реальная структура сплавного транзистора p-n-p

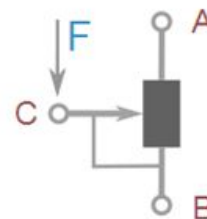
Слово «транзистор» происходит от двух английских слов - «transfer» (переносить) и «resistor» (сопротивление). Что можно буквально перевести, как «переходное сопротивление». Однако, лучше всего для описания работы этого прибора, подойдет название «переменное сопротивление».

Сопротивление между X и Y зависит от напряжения в точке Z

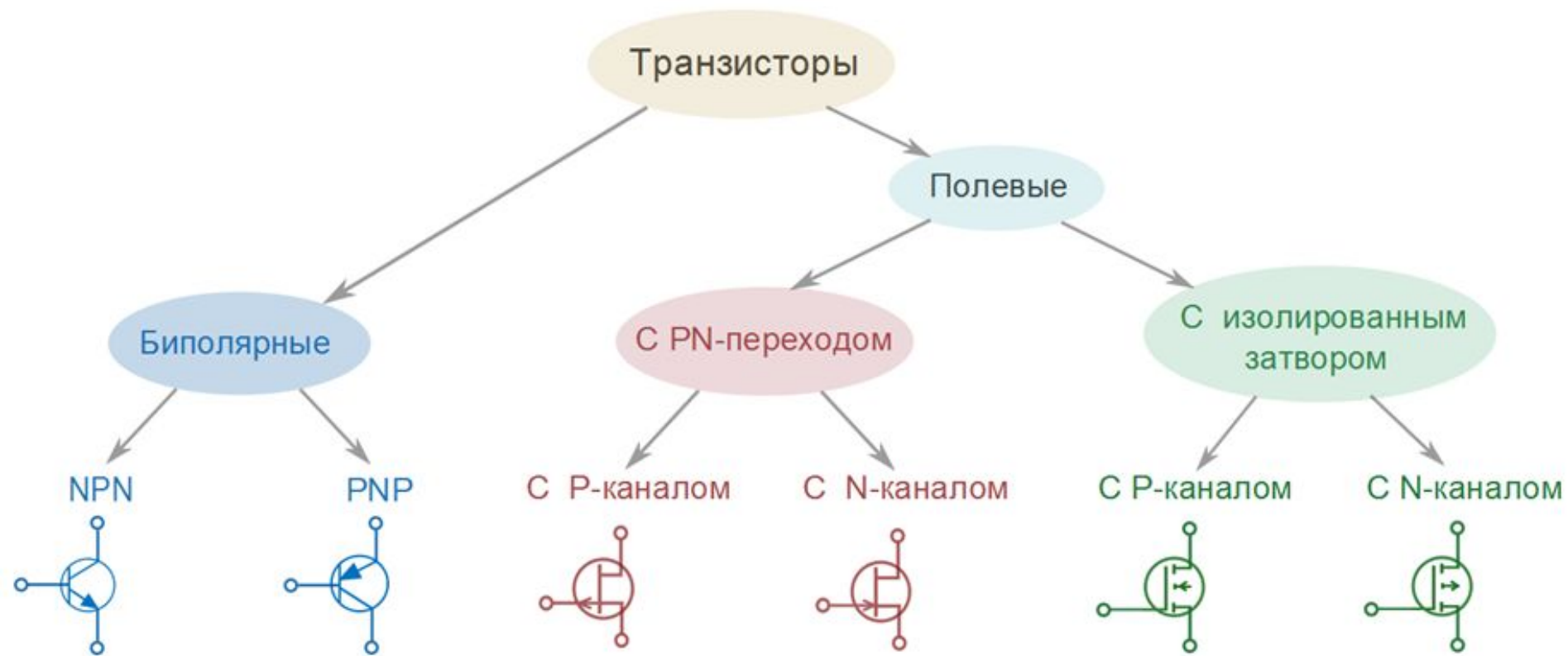


Транзистор

Сопротивление между A и B меняется путем механического движения ползунка C



Обычный переменный резистор

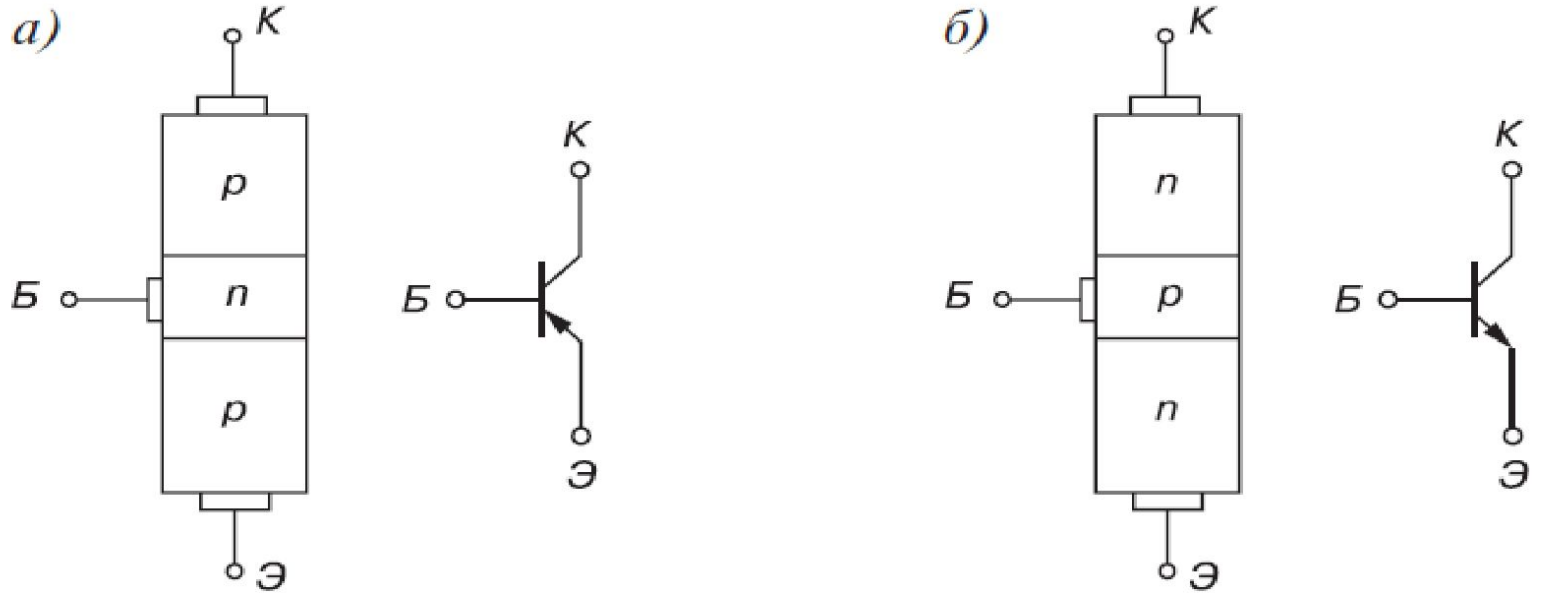


Классификация основных типов транзисторов и обозначение на схеме

Первая – это биполярные транзисторы (БТ) (международный термин – BJT, Bipolar Junction Transistor). Вторая группа – это униполярные транзисторы, еще их называют полевыми (ПТ) (международный термин – FET, Field Effect Transistor).

Полевые, в свою очередь, делятся на транзисторы с PN-переходом (JFET - Junction FET) и с изолированным затвором (MOSFET- Metal-Oxide-Semiconductor FET)

Биполярные транзисторы — полупроводниковые приборы, выполненные на кристаллах со структурой $p-n-p$ -типа (а) или $n-p-n$ -типа (б) с тремя выводами, связанными с тремя слоями (областями): коллектор (К), база (Б) и эмиттер (Э)



База Б — средний тонкий слой, служащий для смещения эмиттерного и коллекторного переходов. Толщина базы должна быть меньше длины свободного пробега носителей заряда.

Эмиттер Э — наружный слой, источник носителей заряда с высокой концентрацией носителей, значительно большей, чем в базе.

Второй наружный слой $К$, принимающий носителей заряда, называют **коллектором**. Ток в таком транзисторе определяется движением зарядов двух типов: электронов и дырок. Отсюда его название — **биполярный транзистор**.

Физические процессы в транзисторах $p-n-p$ -типа и $n-p-n$ -типа одинаковы. Отличие их в том, что токи в базах транзисторов $p-n-p$ -типа переносятся основными носителями зарядов — дырками, а в транзисторах $n-p-n$ -типа — электронами.

Каждый из переходов транзистора — эмиттерный (БЭ) и коллекторный (БК) можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

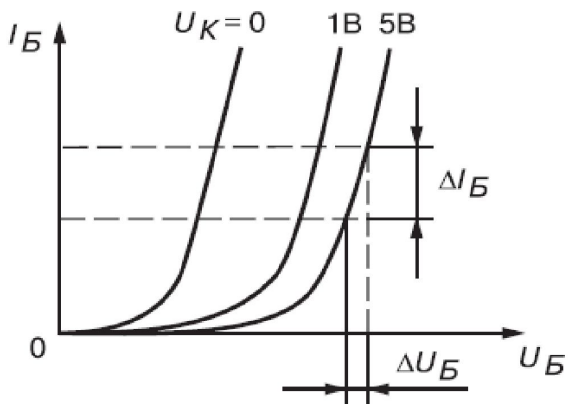
✓ *режим отсечки* — оба *p-n*-перехода закрыты, при этом через транзистор протекает сравнительно небольшой ток I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов;

✓ *режим насыщения* — оба *p-n*-перехода открыты;

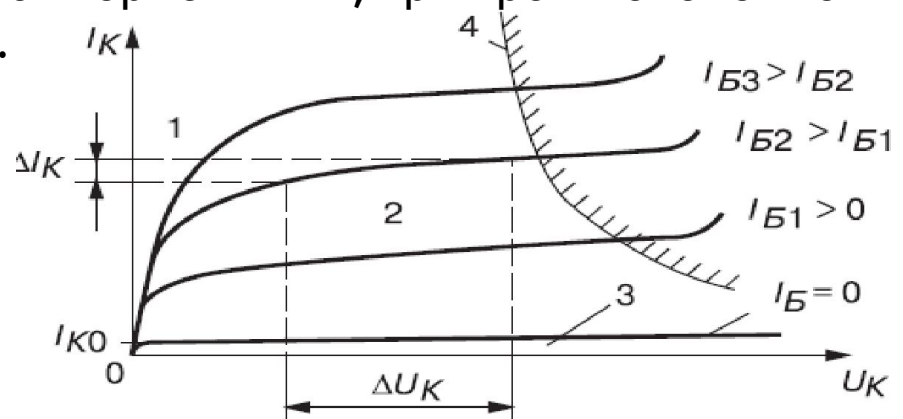
✓ *активный режим* — один из *p-n*-переходов открыт, а другой закрыт.

В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует. В активном режиме транзистор выполняет функцию *активного элемента* электрических схем усиления сигналов, генерирования колебаний, переключения и т. п.

Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном обратное, то такое включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности напряжений — инверсным.



$R_{вх} = \Delta U_B / \Delta I_B$
при $U_K = const$



- 1 - область насыщения
- 2 - активная область
- 3 - область отсечки
- 4 - допустимая граница использования по мощности

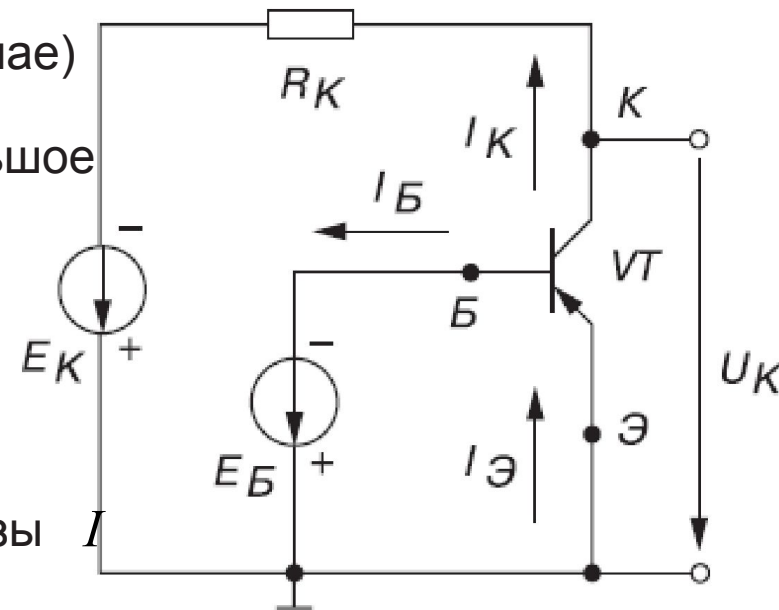
$R_{вых} = \Delta U_K / \Delta I_K$
при $U_B = const$

Подав отрицательный потенциал ЭДС источника на коллектор и положительный на эмиттер (рис. 1.14) в схеме включения транзистора с общим эмиттером, мы, тем самым, открыли эмиттерный переход ЭБ и закрыли коллекторный БК, при этом ток коллектора $I_{K0} = I_{Э0}$ определяется концентрацией неосновных носителей (электронов в данном случае) в коллекторе и базе.

Если между эмиттером и базой приложить небольшое напряжение (0,30,5 В) в прямом направлении $p-n$ -перехода ЭБ, то происходит *инжекция* дырок из эмиттера в базу, образуя ток эмиттера $I_{Э}$. В базе дырки частично рекомбинируют со свободными электронами, но одновременно от внешнего источника напряжения E_B ($E_B < E_K$) в базу приходят новые электроны, образуя ток базы

б.

Так как база в транзисторе выполняется в виде тонкого слоя, то только незначительная часть дырок рекомбинирует с электронами базы, а основная их часть достигает коллекторного перехода. Эти дырки захватываются электрическим полем коллекторного перехода, являющегося ускоряющим для дырок. Ток дырок, попавших из эмиттера в коллектор, замыкается через резистор R_K и источник напряжения с ЭДС E_K , образуя ток коллектора I_K во внешней цепи.



Отношение тока коллектора к току эмиттера называют *коэффициентом передачи тока*

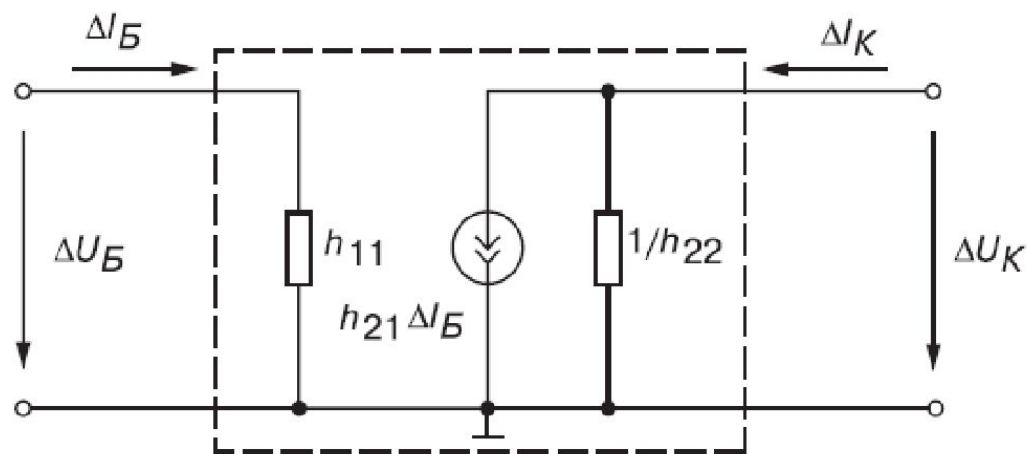
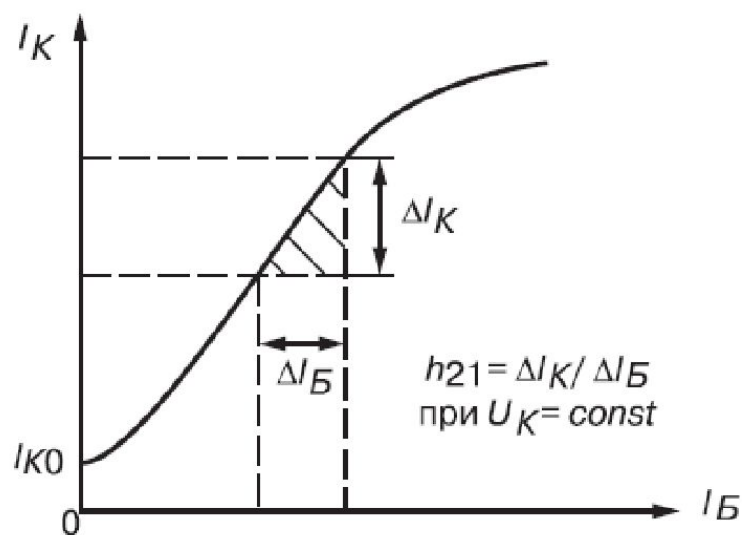
$$\alpha \approx I_K / I_{\text{Э}} \Big|_{U_{\text{БЭ}} = \text{const}} = 0,96 \dots 0,995 < 1,$$

откуда ток базы

$$I_B = I_{\text{Э}} - I_K = (1 - \alpha)I_{\text{Э}} - I_{K0} \ll I_{\text{Э}}.$$

Схема включения транзистора с ОЭ является наиболее распространенной вследствие малого тока базы во входной цепи и усиления входного сигнала как по напряжению, так и по току.

Основные свойства транзистора определяются соотношениями токов и напряжений в различных его цепях и взаимным их влиянием друг на друга.



При расчёте устройств с биполярными транзисторами часто используют h -параметры транзистора, представляя его в виде линейного четырехполюсника (рис. 1.17) (состоящего из резистивных элементов и управляемого источника тока), описываемого системой из двух уравнений:

$$\Delta U_B = h_{11\Omega} \Delta I_B + h_{12\Omega} \Delta U_K;$$

$$\Delta I_K = h_{21\Omega} \Delta I_B + h_{22\Omega} \Delta U_K,$$

где $h_{11\Omega} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta I_B} \right|_{U_K = const}$ ($\Delta U_K = 0$) — входное динамическое сопротивление транзистора ($h_{11\Omega} = 100 \dots 1000 \text{ Ом}$);

$h_{12\Omega} = \left. \frac{\Delta U_B}{\Delta U_K} \right|_{I_B = const}$ ($\Delta I_B = 0$) — безразмерный коэффициент внутренней обратной связи по напряжению, значение которого лежит в пределах $0,002 \dots 0,0002$ (при расчётах им часто пренебрегают, т. е. полагают равным нулю);

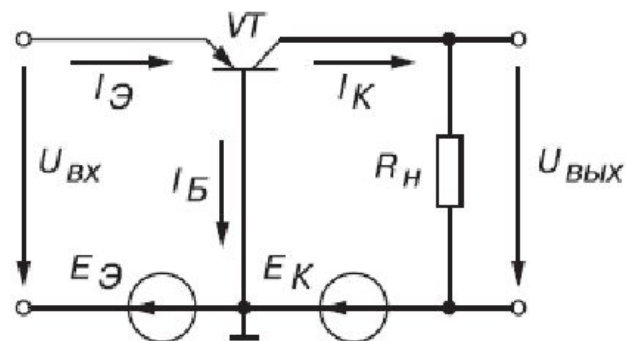
$h_{21\Omega} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_K = const}$ ($\Delta U_K = 0$) — коэффициент передачи (усиления) тока при постоянном напряжении на коллекторе; его также обозначают K_i или $\beta = 10 \dots 200$;

$h_{22\Omega} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} \right|_{I_B = const}$ ($\Delta I_B = 0$) — выходная проводимость транзистора при постоянном токе базы ($h_{22\Omega} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ См}$).

Биполярный транзистор можно также включить по схеме с *общей базой* (ОБ) и по схеме с *общим коллектором* (ОК), используя в качестве общего вывода для входной и выходной цепей соответственно базу или коллектор (рис. 1.18).

Коэффициенты усиления транзисторов зависят от частоты входного сигнала (сказывается влияние входной (БЭ) и проходной (БК) ёмкостей).

Схема с ОБ



$$R_{вх} = R_{Э} + R_{Б}(1 - \alpha)$$

(5...100 Ом)

$$h_{21Б} = \alpha \approx 1$$

$$K_{иБ}^* \approx \frac{R_{н}}{R_{ЭБ}}$$

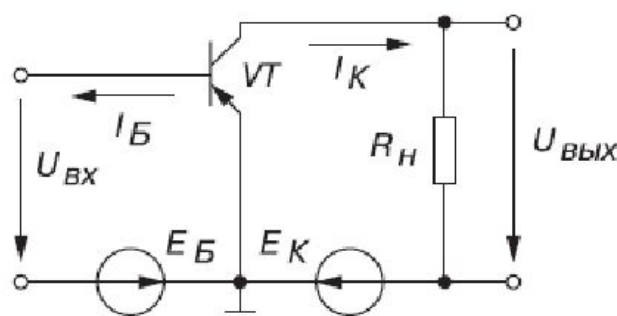
(до 1000)

$$K_{рБ}^* \approx \frac{R_{н}}{R_{ЭБ}}$$

(до 1000)

$$R_{вых} = 0,1...1 \text{ МОм}$$

Схема с ОЭ



$$R_{вх} = R_{Б} + R_{Э}(\beta + 1)$$

(100...1000 Ом)

$$h_{21Э} = \beta = -\alpha / (1 - \alpha)$$

(10...200)

$$K_{иЭ} = \frac{-\beta R_{н}}{R_{БЭ}}$$

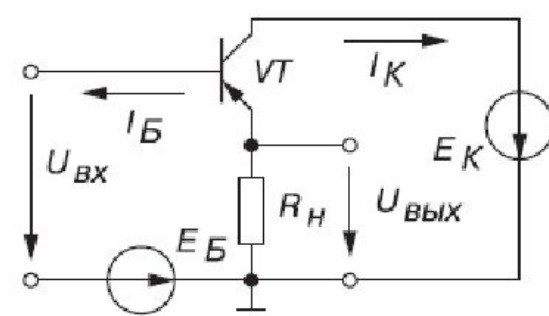
(10...1000)

$$K_{рЭ} = \frac{\beta^2 R_{н}}{R_{БЭ}}$$

(до 10000)

$$R_{вых} = 10...100 \text{ кОм}$$

Схема с ОК



$$R_{вх} = R_{Б} + (R_{Э} + R_{н})(\beta + 1)$$

(30...100 кОм)

$$h_{21К} = \beta + 1$$

(10...100)

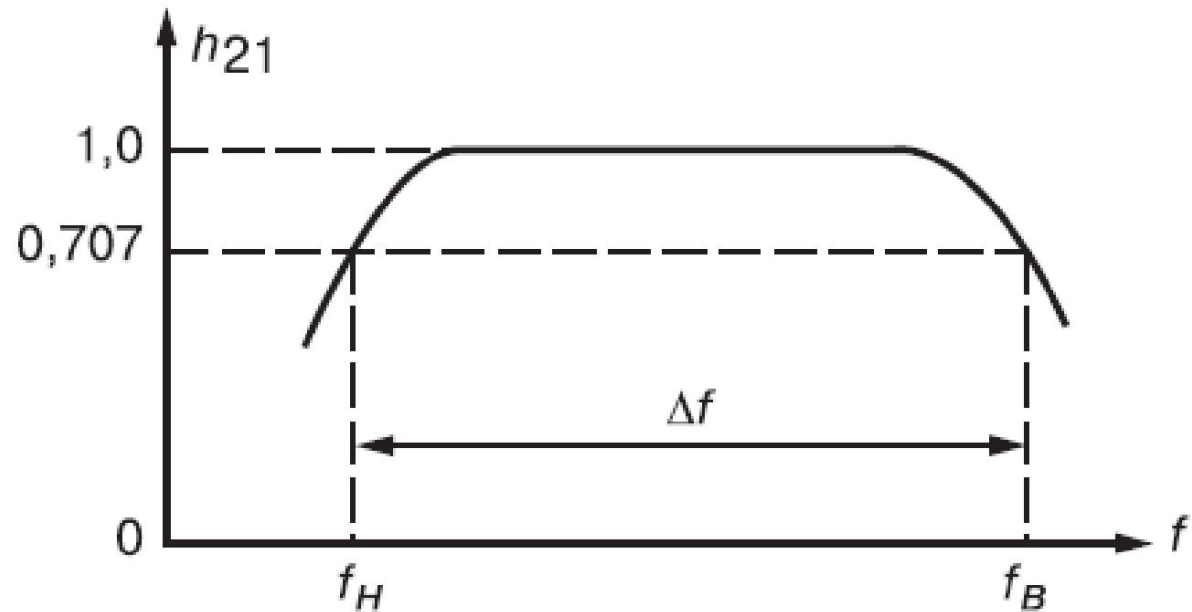
$$K_{иК} \approx 1$$

$$K_{рК} \approx \beta$$

(10...200)

$$R_{вых} = 10...100 \text{ Ом}$$

Физический смысл предельных частот среза f_H и f_B коэффициента передачи тока — это частоты, на которых модуль коэффициента передачи тока снижается не более чем в 2 раз (или на 3 дБ), по сравнению с его значением в полосе пропускания Δf .



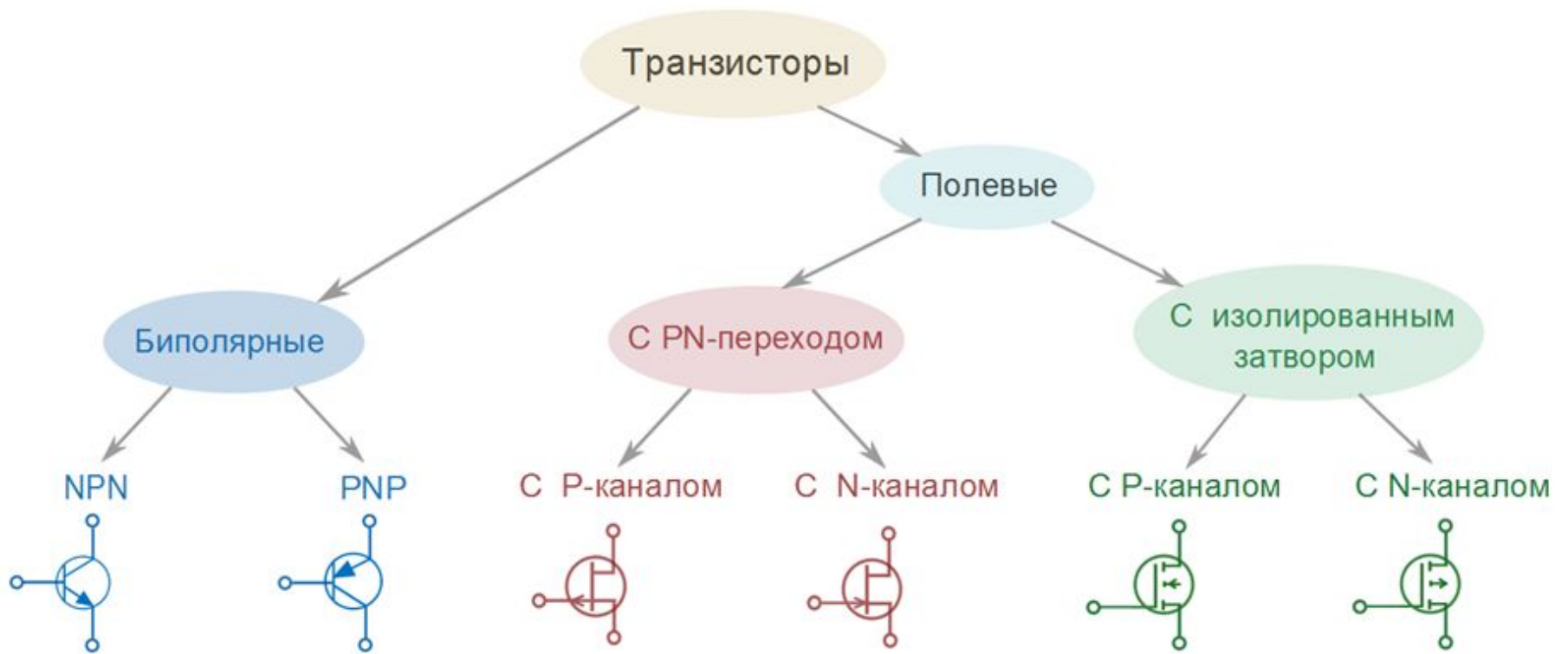
Биполярные транзисторы *классифицируют*:

по мощности рассеяния (маломощные (до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 Вт до 1,5 Вт) и мощные (свыше 1,5 Вт));

по частотным свойствам (низкочастотные (до 3 МГц), средней частоты (330 МГц), высокой (30300 МГц) и сверхвысокой частоты (более 300 МГц));

по назначению: универсальные, усилительные, генераторные, переключательные и импульсные.

При маркировке биполярных транзисторов вначале записывают букву или цифру, указывающую на исходный полупроводниковый материал: Г или 1 — германиевый, К или 2 — кремниевый; затем цифру от 1 до 9 (1, 2 или 3 — низкочастотные, 4, 5 или 6 — высокой частоты, 7, 8 или 9 — сверхвысокой частоты соответственно в каждой группе малой, средней или большой мощности). Следующие две цифры от 01 до 99 — порядковый номер разработки, а в конце буква (от А и выше) указывает на параметрическую группу прибора, например, на напряжение питания транзистора и т. п.

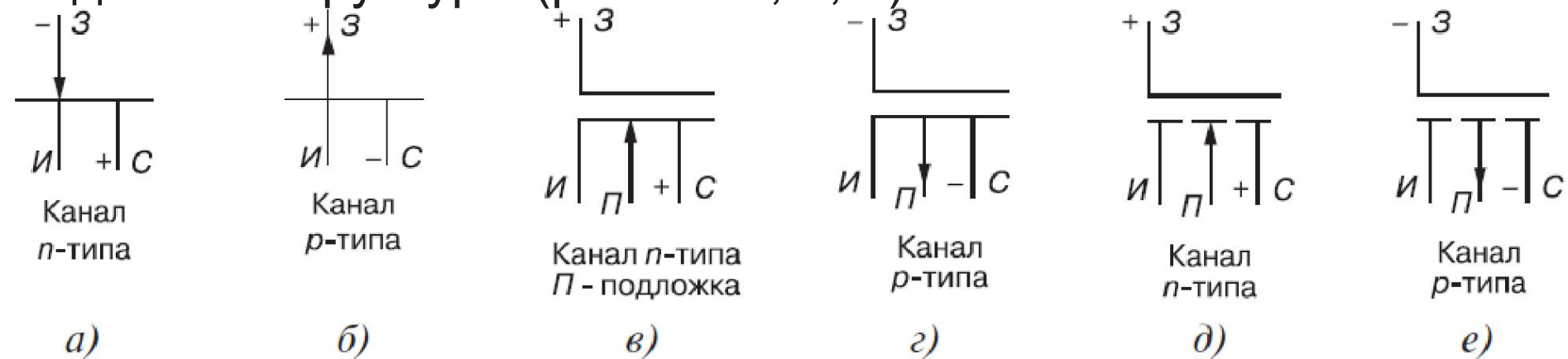


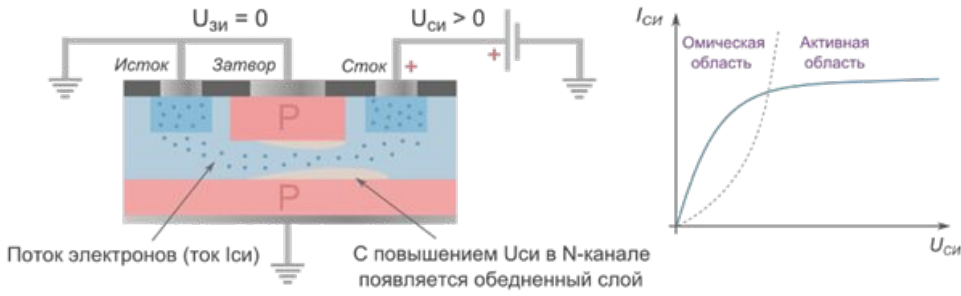
Классификация основных типов транзисторов и обозначение на схеме

униполярные транзисторы - полевые (ПТ) (международный термин – FET, Field Effect Transistor)

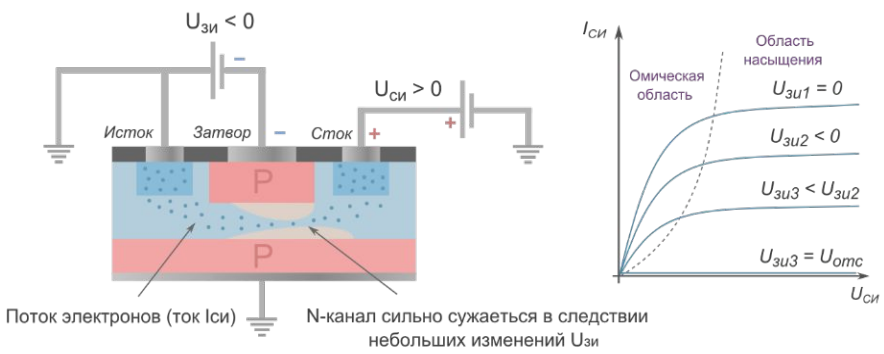
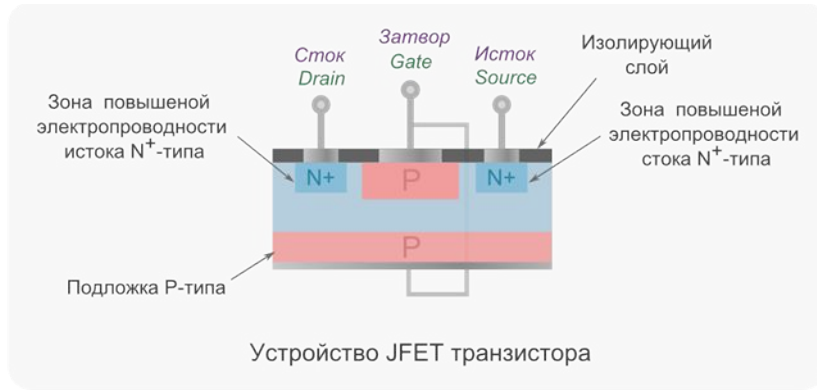
Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, в котором ток стока (C) через полупроводниковый канал n или p -типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором ($З$) и истоком ($И$). Поле вые транзисторы изготавливают:

- с управляющим затвором типа p - n -перехода для использования в высокочастотных (до 1218 ГГц) преобразовательных устройствах (рис. а, б);
- с изолированным (слоем диэлектрика) затвором для использования в устройствах, работающих с частотой до 12 ГГц. Их изготавливают или со *встроенным каналом* в виде МДПструктуры (рис. в и г), или с *индуцированным каналом* в виде МОПструктуры (рис. 1.20, д, е).

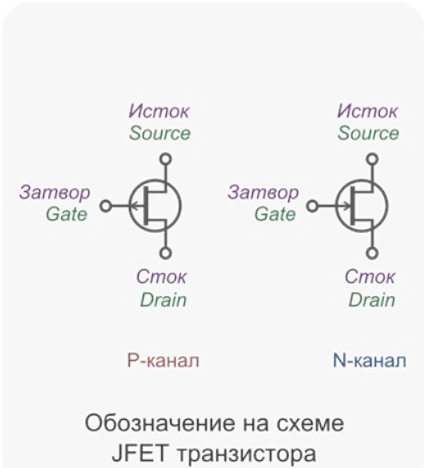
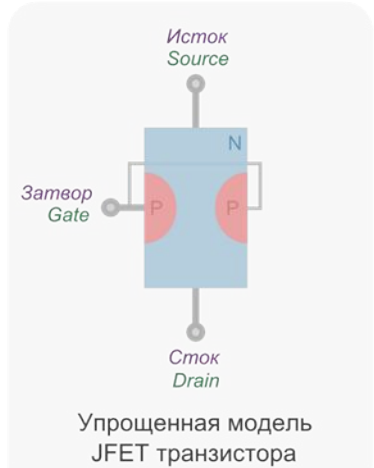


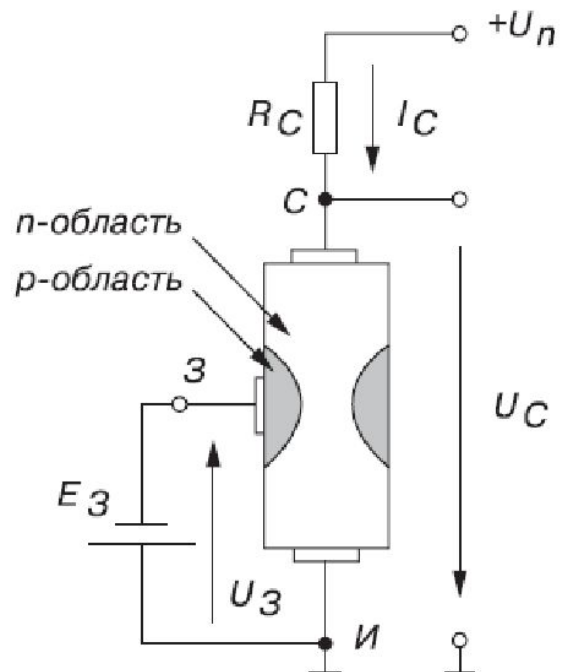


Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} = 0$

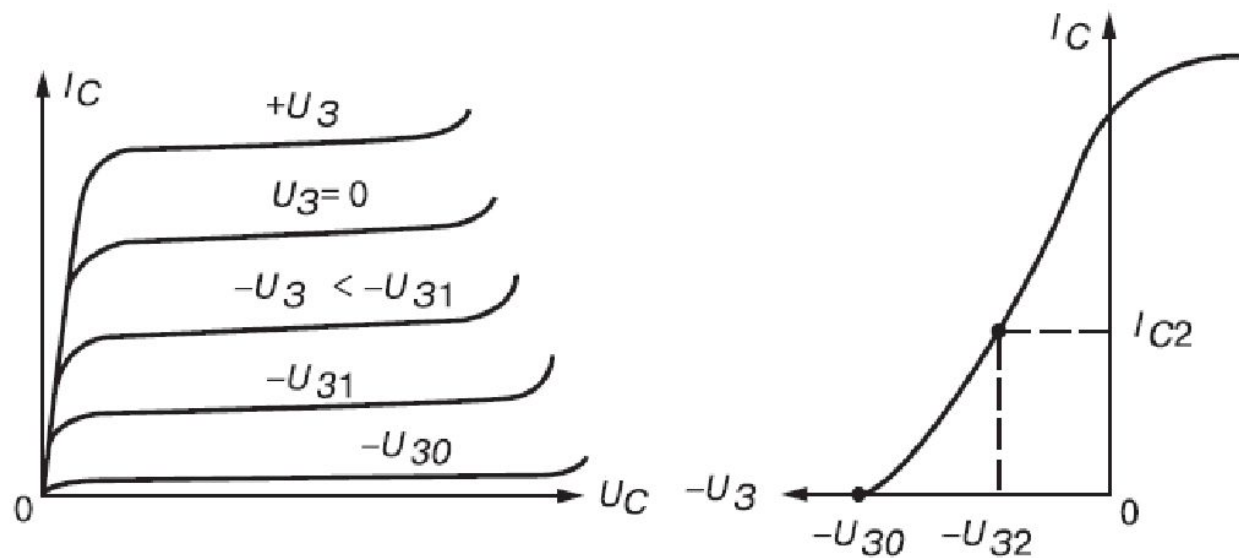


Работа полевого транзистора JFET при $U_{зи} < 0$



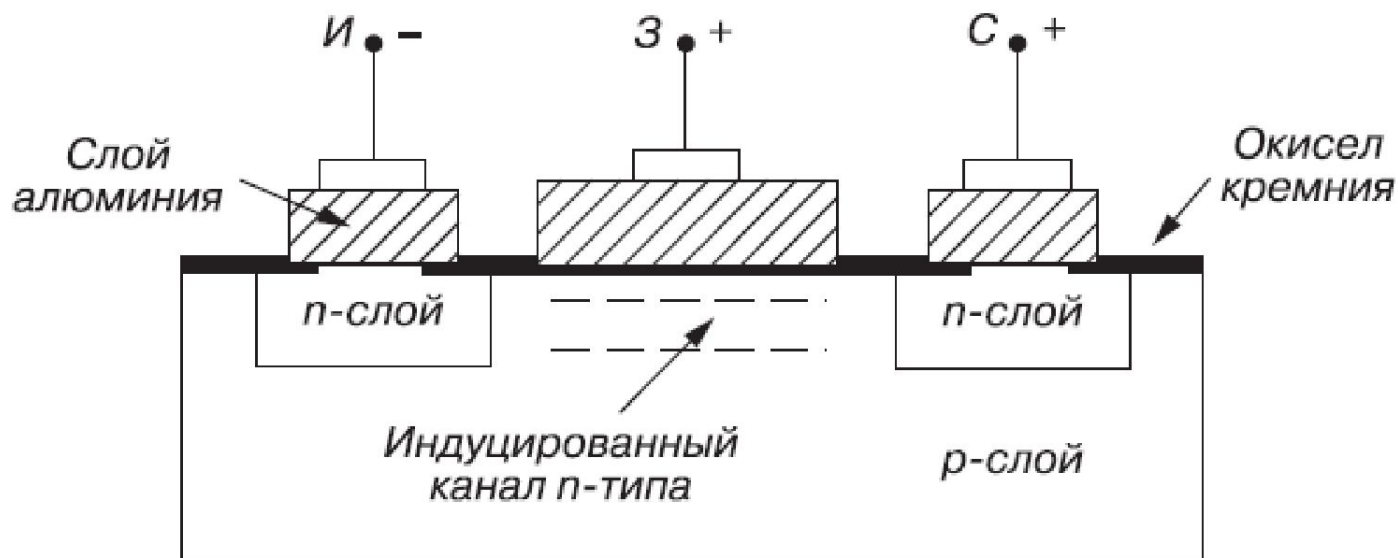


а)



б)

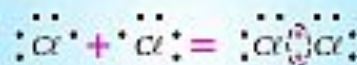
в)



Физические и химические свойства атомов

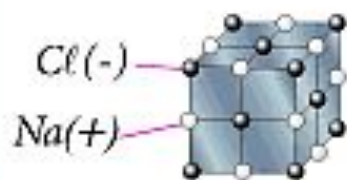
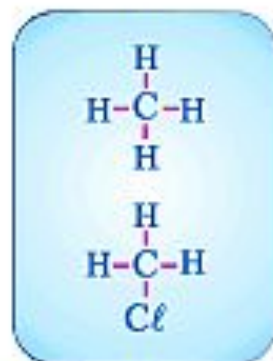
Строение внешних электронных оболочек атомов определяет виды связей в молекулах

I Ковалентная (химическая связь). Молекулы образуются из атомов за счет объединения их внешних валентных электронов.



Молекулы могут быть:

1. Нейтральными ($\text{O}_2, \text{N}_2, \text{Cl}_2, \text{CH}_4$)
2. Полярными (CH_3Cl)

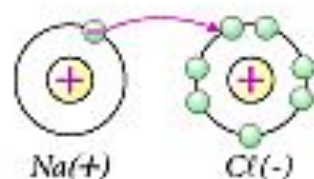


II Ионная связь

Вещества имеют кристаллическую решётку (NaCl)

Вещества с ионной связью бывают:

- 1) с плотной упаковкой ионов (NaCl)
- 2) с неплотной упаковкой (GCl)



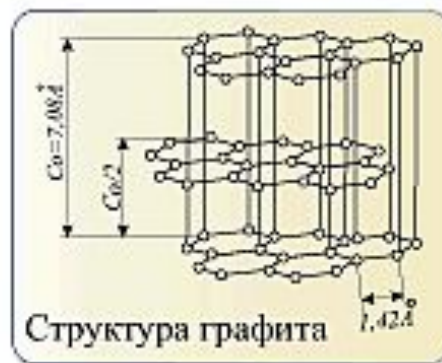
Физические и химические свойства атомов

Электрон

Ион



III Металлическая (химическая) связь. Между узлами с ионами находятся свободные (коллективизированные) электроны (это металлы и их сплавы).



Структура графита

IV Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса) Вещества состоят из отдельных молекул и связаны слабыми молекулярными силами.

(графит, парафин, мышьяк, фосфор, H_2, N_2)



Электродвигатель И-1000В



Щётка графитовая

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет имени Ю. М. Ломоносова»

Основные электрические характеристики электротехнических материалов

1. ϵ - диэлектрическая проницаемость.
2. $\rho_V; \rho_S$ - удельные сопротивления.
3. δ и $\operatorname{tg} \delta$ - угол диэлектрических потерь.
4. E - напряжённость пробоя (электрическая прочность)

Классификация материалов по способности проводить электрический ток

По величине ρ_V - объемное удельное сопротивление - материалы подразделяются:

I Проводниковые

1. $\rho_V = 10^{-4} \div 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - металлы и их сплавы.
2. $\rho_V = 0$ при $t < t_{\text{кр}}$ - сверхпроводниковые материалы (многокомпонентные сплавы)

II Диэлектрики

$\rho_V = 10^8 \div 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - изоляционные материалы.

III Полупроводники

$\rho_V = 10^{-2} \div 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - диоды, транзисторы и др.

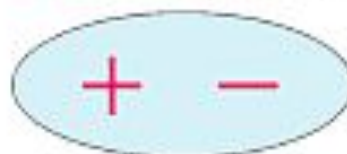
Поляризация диэлектриков

1. Ограниченное смещение связанных зарядов в нейтральных диэлектриках.



Неполярная молекула

$\leftarrow E$ (внешнее электрическое поле)



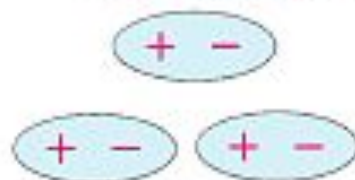
Поляризованная молекула

2. Ориентация диполей в полярных диэлектриках.

Без внешнего поля



$\leftarrow E$ (внешнее электрическое поле)



Основные виды поляризации диэлектриков

Вид поляризации зависит от строения молекул

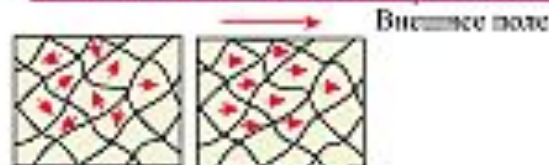
I Миграционная поляризация



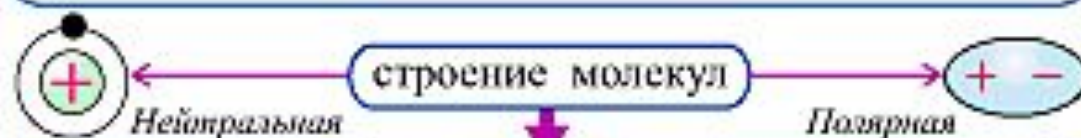
- 1) При низких частотах
- 2) Со значительным рассеиванием энергии

В слоистых пластиках:
гетинакс, текстолит,
стеклотекстолит.

II Спонтанная или самопроизвольная поляризация



- 1) Домены
- 2) Очень сильное рассеивание энергии в сегнетоэлектриках



III Мгновенная

- 1) Быстро
- 2) Упруго
- 3) Без рассеяния энергии

1. Электронная

Во всех видах диэлектриков

2. Ионная

В твердых телах с ионным строением (кварц, слюда, корунд.)

поляризация

Характеризуется:
интенсивностью
процесса
поляризации,
 ϵ

нейтральные диэлектрики
(1,8 + 2,5)

полярные диэлектрики
(3 + 10)

IV Замедленная

- 1) Замедленно
- 2) С рассеиванием энергии

1. Электронно-релаксационная

В диоксиде титана, с примесью Са, Ва

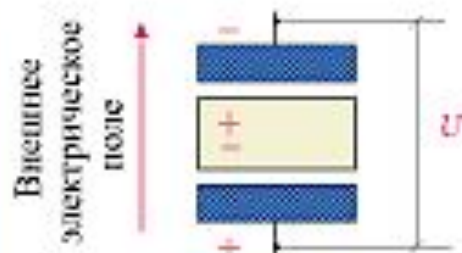
2. Ионно-релаксационная

Неорганические стекла

3. Дипольно-релаксационная

В дипольных диэлектриках (органические вещества - целлюлоза)

ϵ - Диэлектрическая проницаемость (или коэффициент поляризуемости)



Заряд конденсатора

$$Q = C \cdot U ;$$

можно представить:

$$Q = Q_0 + Q_1$$

Q_0 - между обкладками вакуум

Q_1 - заряд на поверхности диэлектрика

ϵ - определяет интенсивность процесса поляризации

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_1}{Q_0} = 1 + \frac{Q_1}{Q_0}$$

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость

$\epsilon = 1$ - только в случае вакуума

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1$$

Во всех остальных случаях $\epsilon > 1$

ϵ воздуха = 1,00058

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \text{ где}$$

ϵ_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость

ϵ_0 - электрическая постоянная, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

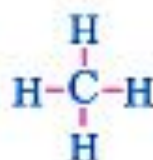
ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость.



Диэлектрическая проницаемость

строение молекул

нейтральная

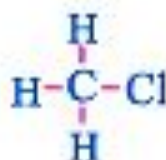


мгновенная
поляризация



$$\epsilon = 1,8 \div 2,5$$

полярная



замедленная
поляризация
(релаксационная)



$$\epsilon = 3 \div 7$$

доменная структура



доменная структура
спонтанная (само-
произвольная)
поляризация



$$\epsilon = 500 \div 1000$$



Конденсатор

Величина ёмкости
конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 \cdot S}{d} \text{ [Ф]}, \text{ где}$$

S - площадь электродов
 d - толщина диэлектрика

Механическая прочность – способность материала противостоять деформации и разрушению от действия динамического или статического усилия.

Её характеризуют

Твердость — свойство материала сопротивляться внедрению в него другого, более твёрдого тела — индентора, степень сопротивления вещества механическому воздействию (царапанию или вдавливанию).

Хрупкость (противоположность пластичности) — свойство материала разрушаться без образования заметных остаточных деформаций. Для хрупких материалов (чугун, высокоуглеродистая инструментальная сталь, стекло, кирпич, камни и др.) удлинение при разрыве не превышает 2...5 %, а в ряде случаев измеряется долями процента.

Пластичность - способностью материала подвергаться деформации под давлением без разрушения, и сопротивлением деформации.

Упругость — свойство материала под действием механических напряжений деформироваться обратимо: после снятия напряжений материал остается недеформированным.

Противоположность упругости -пластичность

Определение твердости методом Бринелля

первым широко используемым и стандартизированным методом определения твердости материалов



Рис. 1-1

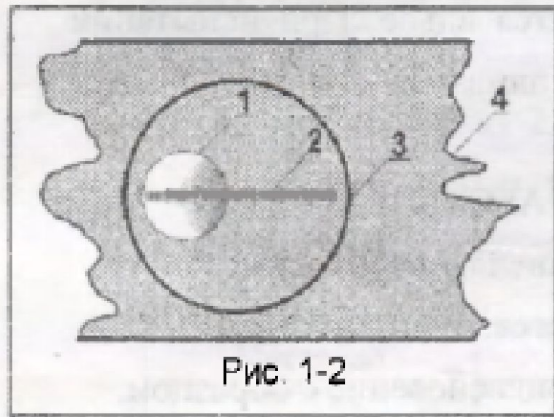


Рис. 1-2

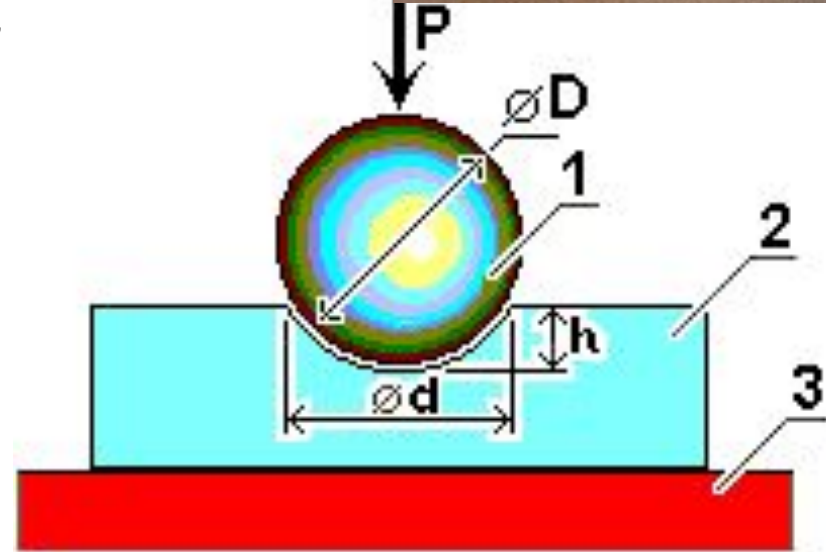
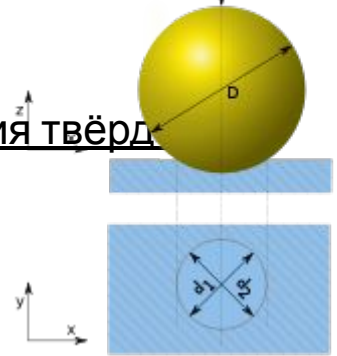
$$HB = \frac{P}{S}$$

Бринеллю, МПа;
 P – усилие вдавливания шарика, Н;
 S – площадь сферического отпечатка шарика, мм²
 Площадь S отпечатка вычисляют по его диаметру d, мм и диаметру D шарика:

$$S = \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

или по его глубине h, мм:

$$S = \pi D h$$



1 — стальной закаленный шарик; 2 — испытуемый материал; 3 — массивное основание; P — усилие вдавливания; D — диаметр шарика; d, h — диаметр и глубина сферического отпечатка

Определение твердости методом

Роквелла - вдавливание алмазного конуса



при измерении по шкале А (HRA) и С (HRC):

$$HR = 100 - \frac{H - h}{0,002}$$

Разность $H - h$ представляет разность глубин погружения индентора (в миллиметрах) после снятия основной нагрузки и до её приложения (при предварительном нагружении).

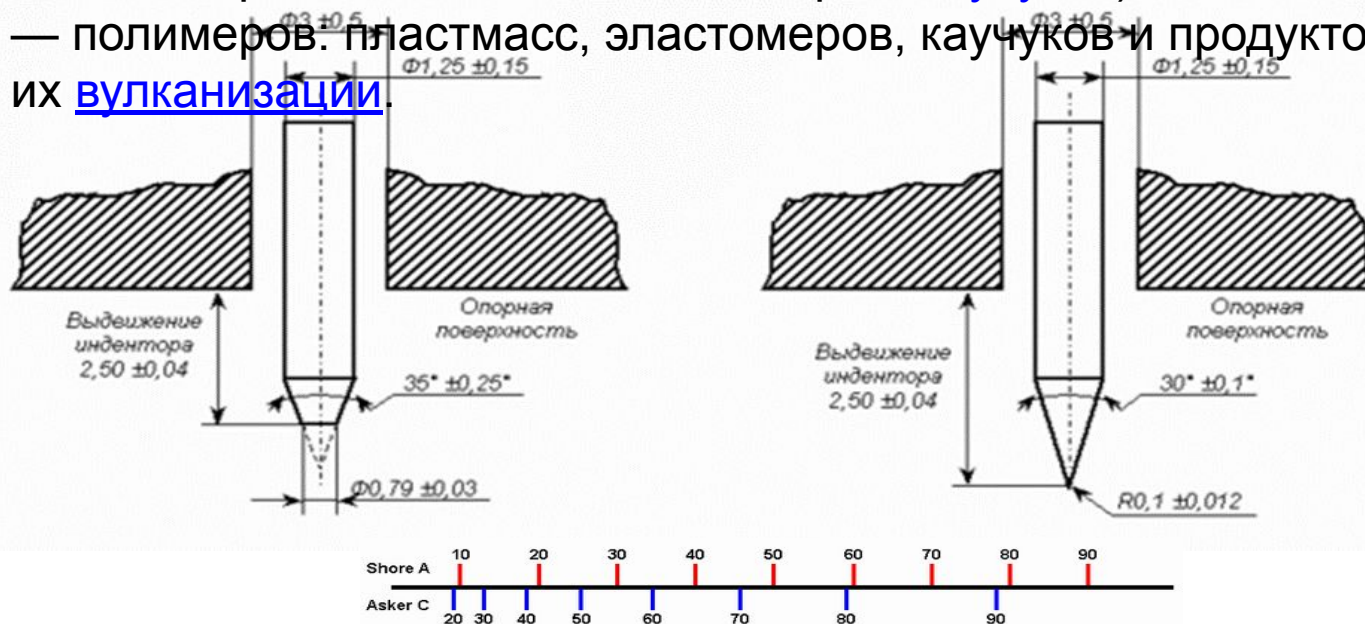
при измерении по шкале В

(HRB):

$$HR = 130 - \frac{H - h}{0,002}$$

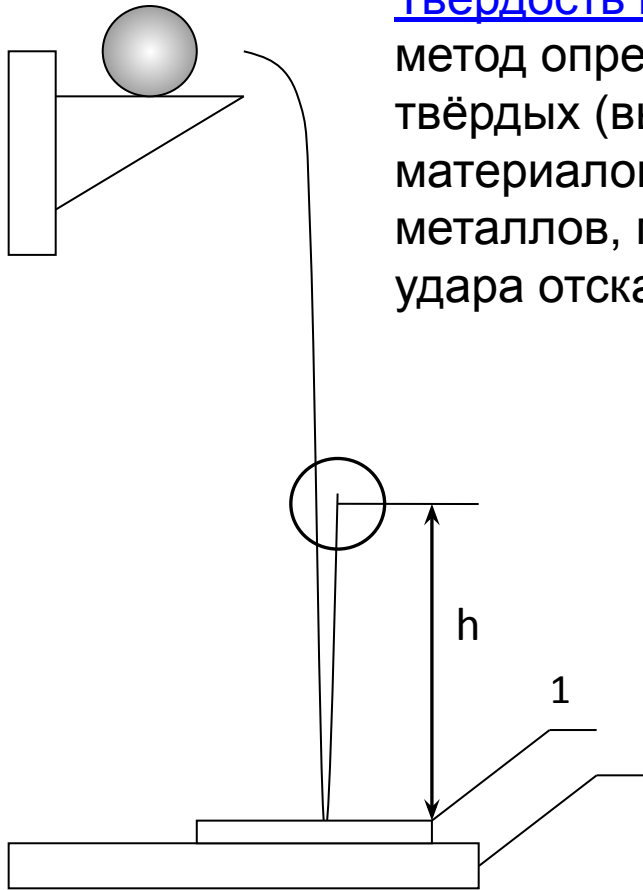
Метод Виккерса — твёрдость определяется по площади отпечатка, оставляемого четырёхгранной алмазной пирамидкой, вдавливаемой в поверхность.

Твёрдость по Шору (Метод вдавливания) — **HSx** твёрдость определяется по глубине проникновения в материал специальной закаленной стальной иглы (индентора) под действием калиброванной пружины. В данном методе измерительный прибор именуется дюрометром. Обычно метод Шора используется для определения твердости низкомодульных материалов (полимеров). Обычно — полимеров. Обычно — полимеров: пластмасс). Обычно — полимеров: пластмасс, эластомеров). Обычно — полимеров: пластмасс, эластомеров, каучуков). Обычно — полимеров: пластмасс, эластомеров, каучуков и продуктов их вулканизации.



Твёрдость по Шору (Метод отскока) —

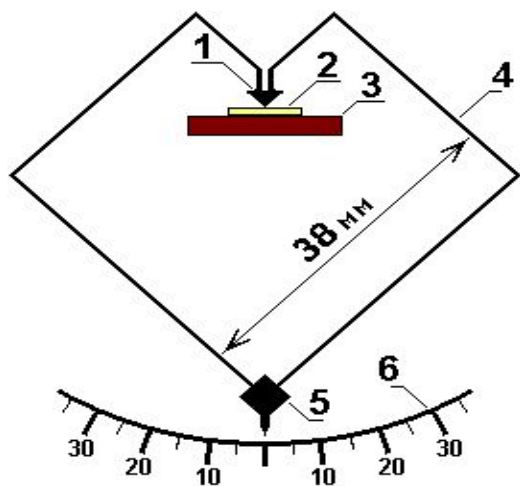
метод определения твёрдости очень твёрдых (высокомодульных) материалов, преимущественно металлов, по высоте, на которую после удара отскакивает специальный боёк



Также для испытания хрупких материалов применяют метод падающего шарика или способ Шора. Стальной шарик определенного диаметра, падает с некоторой высоты на поверхность образца 1, размещенного на массивной опоре 2, ударяется об него и подскакивает. Высота подскока характеризует твердость материала.

Определение твердости методом Шора:

1 — испытуемый материал; 2 — массивная опора;



Для определения твердости непластичных хрупких материалов (сланца, стекло, фарфор, лаковые пленки) пользуются методом маятника Кузнецова (рис. 1). На горизонтальную поверхность образца материала 2, уложенного на массивную опору 3, устанавливают маятник в виде легкой рамки 4 с опорами 1 и грузом 5 в нижней ее части. Маятник приводят в колебательное движение, амплитуду колебаний отсчитывают по шкале 6. Колебания маятника затухают тем скорее, чем меньше твердость испытуемого образца, что связано с большими затратами энергии на перекачивание опор рамки по поверхности мягкого материала.

Твердость материала оценивают временем, за которое амплитуда колебаний маятника уменьшится вдвое. При испытании особо твердых материалов опоры 3 выполняют из алмазных пирамидок, заточенных под углом 90.

Маятник Кузнецова: 1 — опорные призмы; 2 — испытуемый материал; 3 — основание; 4 — легкая рамка; 5 — тело маятника; 6 — шкала амплитуд

$$\sigma_P = \frac{P_P}{S_O}$$

Предел прочности при растяжении σ_P определяют на образце материала в виде стержня с площадью поперечного сечения S_O (мм²), к которому прикладывают растягивающее усилие P_P (Н), увеличиваемое до разрыва образца.

$$\sigma_C = \frac{P_C}{S_O}$$

Предел прочности при сжатии (σ_C) определяют на образцах материала, имеющих форму цилиндра или куба с площадью поперечного сечения S_O (мм²). Сжимающее усилие P_C увеличивают до разрушения образца материала.

$$\sigma_{И} = \frac{1,5 \cdot P_{И} L}{S_O h}$$

Предел прочности при статическом изгибе ($\sigma_{И}$) определяют на образце материала определенной формы толщиной h (мм) с площадью поперечного сечения S_O (мм²), свободно лежащего концами на стальных опорах, разнесенных на расстояние L (мм). К середине образца прикладывают прогибающее усилие $P_{И}$ (Н), нарастающее до разрушения образца или до его прогиба сверх пределов упругости.

Механические испытания э/т материалов не ограничиваются определением перечисленных характеристик. По стандартным методикам на специальной аппаратуре их испытывают на способность противостоять ударному изгибу, многократному перегибанию, излому, раздиранию, продавливанию, надрыву, оценивают их стойкость к истиранию и воздействию вибраций.

Электроизоляционные материалы (диэлектрики)
применяют в электро- и радиотехнических
устройствах для:

1. **разделения токоведущих частей**, имеющих разные потенциалы, т.е. препятствуют утечке электрического тока между какими-либо токопроводящими частями, находящимися под разными электрическими потенциалами,
- увеличения ёмкости конденсаторов**,
- в качестве теплопроводящей среды в электрических машинах, аппаратах и т. п.**

Диэлектрики обладают высоким удельным электрическим сопротивлением ($10^8 \dots 10^{18}$ Ом·м), так как содержат весьма малое количество свободных носителей зарядов.

По агрегатному состоянию диэлектрики бывают газообразными, жидкими и твердыми. Самой большой является группа твердых диэлектриков.

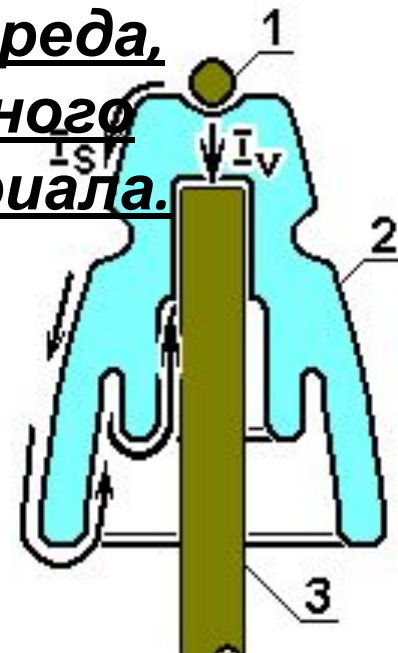
Электрические свойства диэлектриков характеризуют:

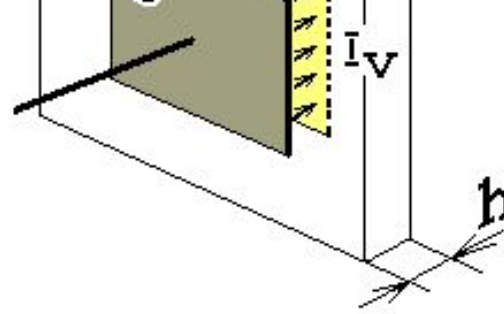
- **удельное объемное сопротивление,**
- **удельное поверхностное сопротивление,**
- **диэлектрическая проницаемость,**
- **температурный коэффициент диэлектрической проницаемости,**
- **тангенс угла диэлектрических потерь,**
- **электрическая прочность материала.**

Движение свободных электронов и ионов изоляционного материала под действием электрического поля обуславливает протекание токов утечки. Токи утечки вызваны как электропроводностью массы самого материала, так и электропроводностью слоя, образованного загрязнением и влагой на его поверхности. Соответственно различают объёмные (I_v) и поверхностные (I_s) токи.

Объёмный ток I_v нагревает тело изолятора, ухудшая его изоляционные качества. При локальном нагреве возможен раскол изолятора, выполненного из керамики или стекла.

Поверхностный ток I_s нагревает поверхность изолятора, но её охлаждает окружающая среда, нагрев обычно слаб и не оказывает серьёзного влияния на качества изоляционного материала.

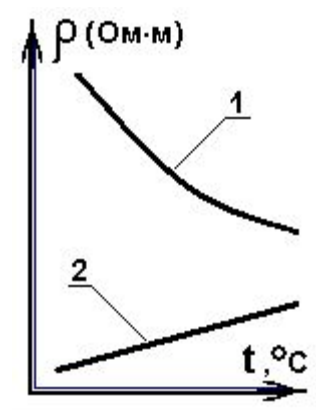
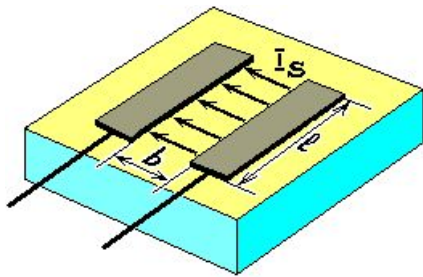




Поверхностное сопротивление изоляционного материала $R_s = \rho_s \mathbf{l} / \mathbf{b}$

зависит от удельного поверхностного электрического сопротивления материала, длины электродов и расстояния между ними

$$\rho_s = R_s \mathbf{l} / \mathbf{b} \quad (10^9 \dots 10^{16} \text{ Ом})$$



Влияние температуры на удельное электрическое сопротивление диэлектриков (1) и металлов (2)

температурный коэффициент удельного сопротивления изоляционных материалов

отрицателен

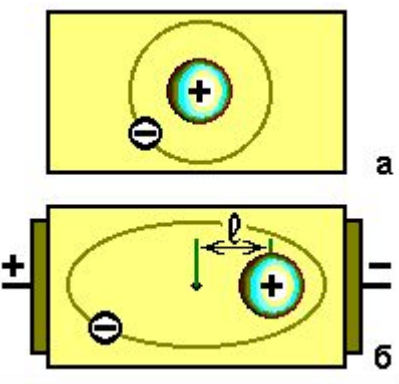
Для определения сопротивления обычно используют метод «вольтметра — амперметра»: подав на измерительные электроды известное напряжение, измеряют объёмный или поверхностный токи, а затем, руководствуясь законом Ома, вычисляют соответствующее сопротивление.

Поляризация — явление закономерного распределения электрических зарядов в материале при воздействии на него электрического поля.

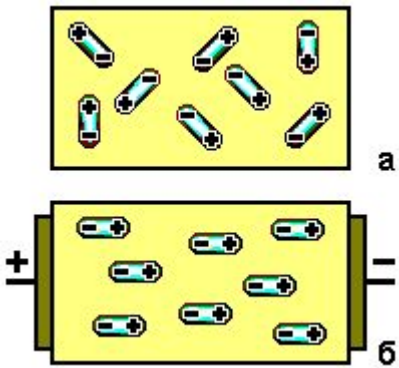
Поляризация связана с изначальным наличием в материале (или образованием в нём под действием поля) электрических диполей — совокупностей пар точечных зарядов, равных по величине, противоположных по знаку и находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Свойства диполя характеризуются дипольным моментом, равным произведению модуля зарядов электрического диполя на расстояние между зарядами

Различают виды поляризации, при которых энергия, затраченная на поляризацию, обратима и не вызывает диэлектрических потерь, и виды поляризации, связанные с необратимым поглощением энергии, вызывающим нагрев материала.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек относительно ядра атомов диэлектрика под действием внешнего электрического поля. Смещение оболочек в пределах атомов или ионов весьма мало, поэтому дипольный момент диэлектрика лишь в 1,5...2 раза превосходит соответствующий показатель вакуума. Процесс электронной поляризации завершается всего за 10^{-15} с. После исчезновения электрического поля оболочки возвращаются в первоначальное состояние, поляризация исчезает, энергия, затраченная на неё, освобождается без преобразования в тепло. Электронная поляризация свойственна всем диэлектрикам и создаёт в них лишь реактивный ток ёмкостного характера.

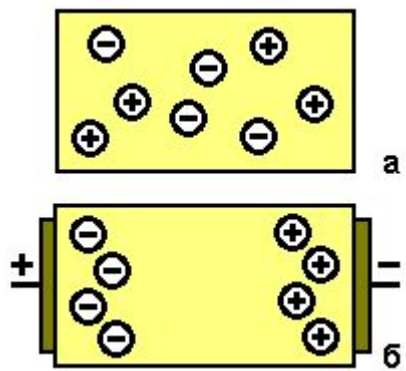


Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)



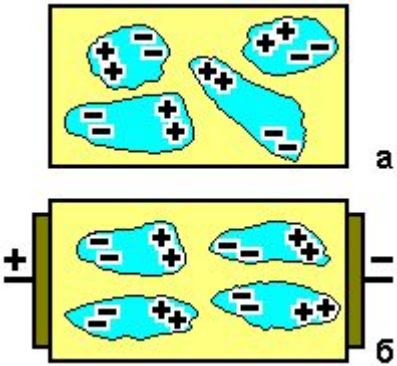
Дипольная поляризация — ориентация диполей диэлектрика по внешнему электрическому полю. Дипольная поляризация свойственна диэлектрикам с полярными молекулами, в которых центры положительных и отрицательных зарядов смещены друг относительно друга

Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)



Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

Объёмно-зарядная поляризация — накопление положительных и отрицательных ионов у приложенных к материалу электродов. При создании электрического поля начинается процесс перемещения и накопления положительных ионов у отрицательных, а отрицательных ионов — у положительных электродов. Сначала скорость накопления зарядов наибольшая, затем она уменьшается. Процесс поляризации завершается через 1...2 минуты, причём он более длителен у диэлектриков с высоким удельным электрическим сопротивлением. Всё это время по диэлектрику протекает ток поляризации, вызывающий диэлектрические потери в виде нагрева. Дипольный момент диэлектрика с объёмно-зарядной поляризацией в 10...15 раз превосходит аналогичный показатель вакуума



Диэлектрик вне
электрического поля
(а) и в
электрическом поле
(б)

Спонтанная (доменная) поляризация связана с наличием в диэлектрике областей — доменов , в пределах которых диполи имеют одинаковую ориентацию, но слабо связаны друг с другом. Ориентация диполей соседних доменов различна и при отсутствии внешнего электрического поля их суммарный дипольный момент равен нулю. Направление приложенного поля совпадает с ориентацией диполей какого-либо домена, который начинает подчинять своей ориентации диполи соседних областей и расти за их счёт. Процесс завершается одинаковой ориентацией всех диполей диэлектрика. Диэлектрики, в которых процесс спонтанной поляризации протекает весьма интенсивно, называются сегнетоэлектриками. Они способны поляризоваться в десятки тысяч раз сильнее, чем вакуум

Абсолютная диэлектрическая проницаемость ϵ_a
характеризует способность диэлектрика поляризоваться и
образовывать электрическую ёмкость. В электроустановках диэлектрики размещаются между токоведущими деталями с разными потенциалами и совместно с ними образуют конденсатор, свойства которого в значительной степени зависят от качества диэлектрика.

Ёмкость C плоского конденсатора определяется как

$$C = \epsilon_a S / h, \text{ Ф},$$

где S — площадь одного из электродов конденсатора, м^2 ; h — толщина диэлектрика, м ; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, Ф/м (фарада/метр).

Чаще пользуются понятием **относительной диэлектрической проницаемости**, которая показывает, во сколько раз сильнее в сравнении с вакуумом поляризуется данный диэлектрик.

$$\epsilon = \epsilon_a / \epsilon_0$$

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика (величина безразмерная);

ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, Ф/м ; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума: $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$, Ф/м .

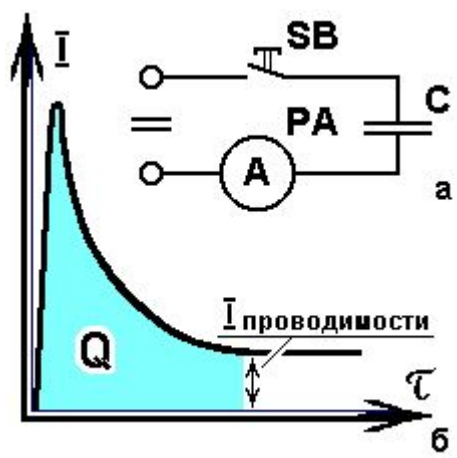
Если на электроды, между которыми помещён диэлектрик, подать напряжение, то начнётся поляризация диэлектрика, сопровождающаяся перемещением в нём электрических зарядов — протеканием электрического тока.

Электронная поляризация совершается почти мгновенно и сопровождается током, называемым **током смещения** ($I_{см}$).

Дипольная и объёмно-зарядная поляризации протекают более длительно и сопровождаются током, называемым **током абсорбции** ($I_{абс}$).

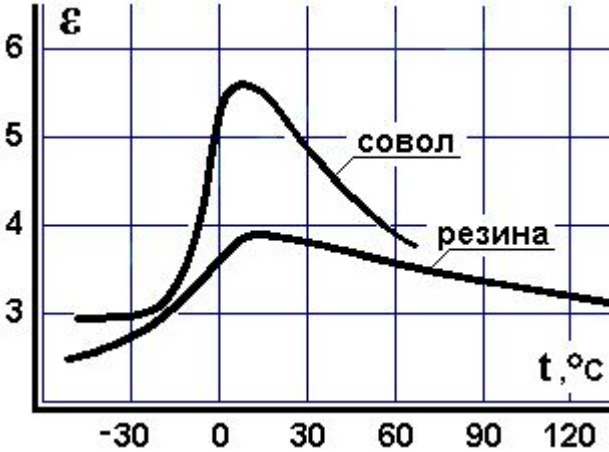
$$\bar{I} = \bar{I}_{см} + \bar{I}_{абс} + \bar{I}_{пр}$$

В момент включения ток максимален, так как протекают все три его составляющие. Через мгновение прекращается ток смещения ($I_{см}$), спустя некоторое время завершаются процессы других видов поляризации и ток абсорбции ($I_{абс}$) уменьшается до нуля. Далее сквозь диэлектрик протекает только ток проводимости ($I_{пр}$), не меняющийся во времени.



б — изменение тока поляризации I во времени τ ; $I_{пр}$ — ток проводимости; Q — потери энергии в диэлектрике

Факторы, влияющие на диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери в изоляционных материалах



Температура мало влияет на диэлектрическую проницаемость изоляционных материалов с упругой электронной поляризацией. При повышении температуры такого диэлектрика наблюдается некоторое снижение ϵ , что объясняется уменьшением количества молекул в единице объёма при его увеличении от нагрева

Рис. 9. Система из высоковольтного, измерительного и охранного электродов

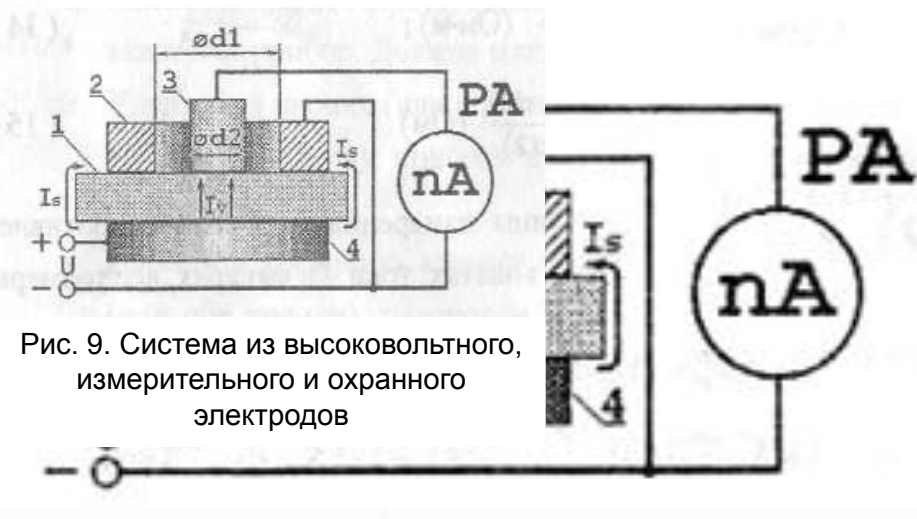
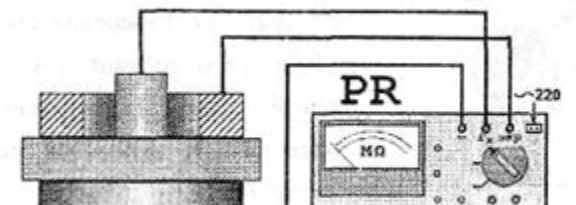


Рис. 9. Система из высоковольтного, измерительного и охранного электродов

Для определения сопротивления на измерительные электроды подают известное напряжение, измеряют ток I_V , протекающий сквозь образец материала, или ток I_S по его поверхности, а затем, руководствуясь законом Ома, вычисляют соответствующее сопротивление.

Для раздельного измерения объемного и поверхностного токов используют систему из высоковольтного, измерительного и охранного электродов. Для измерения объемного тока I_V образец изоляционного материала 1 (рис.9) укладывают на высоковольтный электрод 4, выполненный в виде диска. На изоляционный материал устанавливают массивный цилиндрический измерительный электрод 3 и коаксиально с ним – кольцевой охранный электрод 2. Объемный ток протекает сквозь изоляционный материал с высоковольтного электрода на измерительный, а затем через наноамперметр РА. Охранный электрод перехватывает поверхностный ток I_S и он не попадает в цепь измерительного прибора



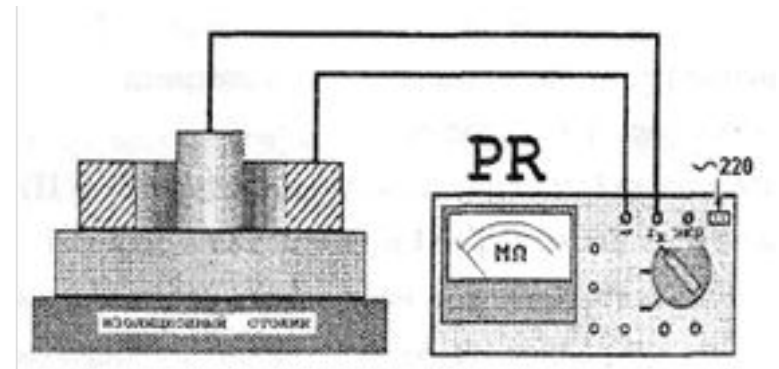
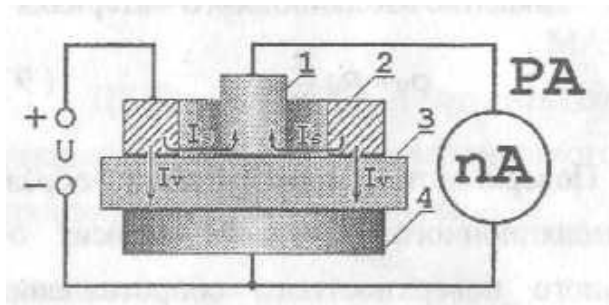
высоковольтным, цилиндрический электрод 1 – измерительным. Поверхностный ток протекает по поверхности изоляционного материала от высоковольтного электрода к измерительному, а затем через наноамперметр РА. Объемный ток протекает сквозь изоляционный материал от высоковольтного электрода к охранному и не попадает в цепь измерительного прибора.

По приложенному к электродам напряжению U и измеренным объемному I_V и поверхностному I_S токам вычисляют соответственно объемное R_V и поверхностное R_S сопротивления образца изоляционного материала:

$$R_V = \frac{U}{I_V} \quad R_S = \frac{U}{I_S}$$

$$\rho_V = R_V \frac{\pi \cdot d_1^2}{4h} \quad \rho_S = R_S \frac{\pi(d_1 + d_2)}{(d_1 - d_2)}$$

Удельные объемное и поверхностное сопротивления изоляционного материала можно вычислить, учитывая толщину образца материала h и диаметры d_1 , d_2 электродов, использованных при измерении (рис. 9).



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

При достаточно высокой напряженности электрического поля между проводниками изоляционный материал подвергается пробой, при котором он перестает быть изолятором и переходит в токопроводящее состояние, что часто бывает причиной выхода электроустановки из строя.

Пробой — образование в диэлектрике канала высокой проводимости и потеря им

электроизоляционных свойств. В результате пробоя замыкаются ранее изолированные друг от друга токоведущие детали, токи в электроустановке начинают протекать непредсказуемым образом, электроустановка выходит из строя с последствиями различной тяжести

Электрическая прочность — способность изоляционного материала противостоять пробой.

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}$$

где: $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность материала, МВ/м или в кВ/мм;
 $U_{\text{пр}}$ — напряжение пробоя, МВ;
 h — толщина материала, м.

Электрическую прочность оценивают отношением напряжения пробоя к толщине изоляционного материала:

Электрическая прочность изоляционных материалов зависит от их структуры, влажности, температуры и других факторов.

Электрический пробой связан с тем, что при определенной напряженности поля кинетическая энергия свободных носителей зарядов, движущихся под действием электрического поля, превосходит «энергию решетки» материала. При ударе носителя заряда, обладающего достаточной энергией, в электрически нейтральную частицу материала он разрушает ее, образуя ионы – новые свободные носители зарядов. Освобожденные носители зарядов, двигаясь в электрическом поле, тоже сталкиваются с нейтральными частицами и ионизируют их, высвобождая все новые и новые носители зарядов – изоляционный материал теряет изоляционные свойства. Процесс пробоя свершается лавинообразно за миллионную долю секунды.

В газах до воздействия на них электрического поля всегда имеется некоторое количество свободных зарядов: ионов и свободных электронов. Это могут быть заряженные частицы самого газа, либо заряженные частицы твердых и жидких веществ — примесей, находящихся в газе во взвешенном состоянии. Так, в 1 см^3 воздуха при атмосферном давлении и комнатной температуре насчитывается от 500 до 1000 пар (положительных и отрицательных) ионов. Образование их в газе обусловлено, во-первых, объемной ионизацией нейтральных молекул газа различными внешними ионизаторами: радиоактивными излучениями Земли, космическими лучами, энергией солнечного спектра, особенно его ультрафиолетовой части. Во-вторых, образованием свободных зарядов, например выходом электронов с поверхности электродов или стенок сосуда, в котором находится газ (поверхностная ионизацией).

Пробой диэлектриков

Пробоем диэлектриков или нарушением его электрической прочности называется потеря им свойств электроизоляционного материала под действием электрического поля.

$$U_{пр} [кВ]$$

— напряжение пробоя, при котором происходит пробой диэлектрика

$$E_{пр} [кВ/м]$$

— электрическая прочность- напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика.

$$E_{пр} = U_{пр} / h$$
$$h [м]$$

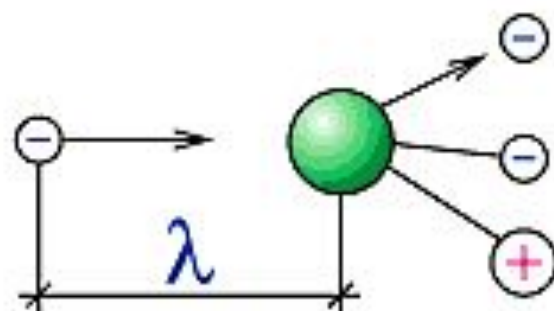
— толщина диэлектрика (для конструкции с однородным полем).



Пробой газов

Воздух – элемент изоляции ЛЭП и оборудования подстанций.

Пробой газов обусловлен явлением ударной ионизации— это расщепление нейтральных молекул электронами, которые ускоряются полем.



Расщепление нейтральной молекулы (ударной ионизацией).

λ — длина свободного пробега частицы, т.е. среднее расстояние, пройденное заряженной частицей без столкновений.

Пробой газа совершается практически мгновенно и это явление чисто электрическое. Поэтому все численные данные по пробую газа относятся к максимальным (амплитудным) значениям напряжения.

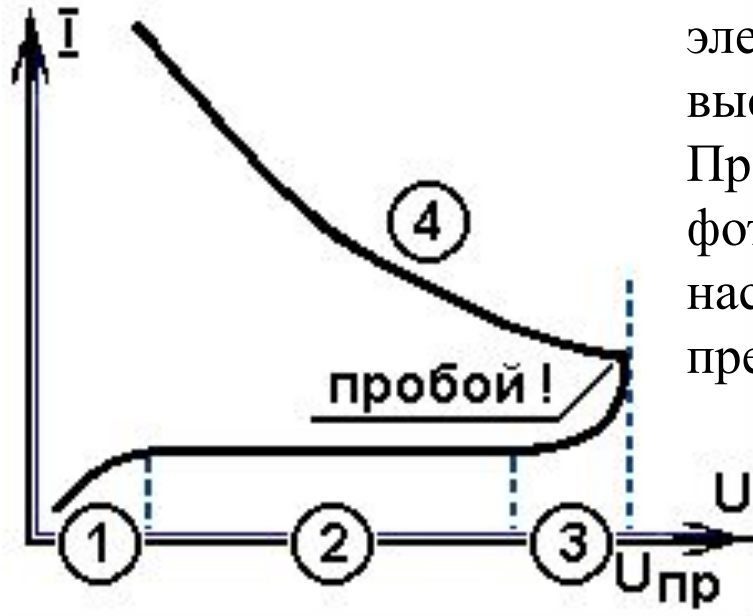


Пробой газообразных диэлектриков

Газы широко используют как диэлектрики в образцовых конденсаторах, как изоляцию между землёй и проводами воздушных линий электропередачи, газонаполненных кабелей и высоковольтных выключателей.

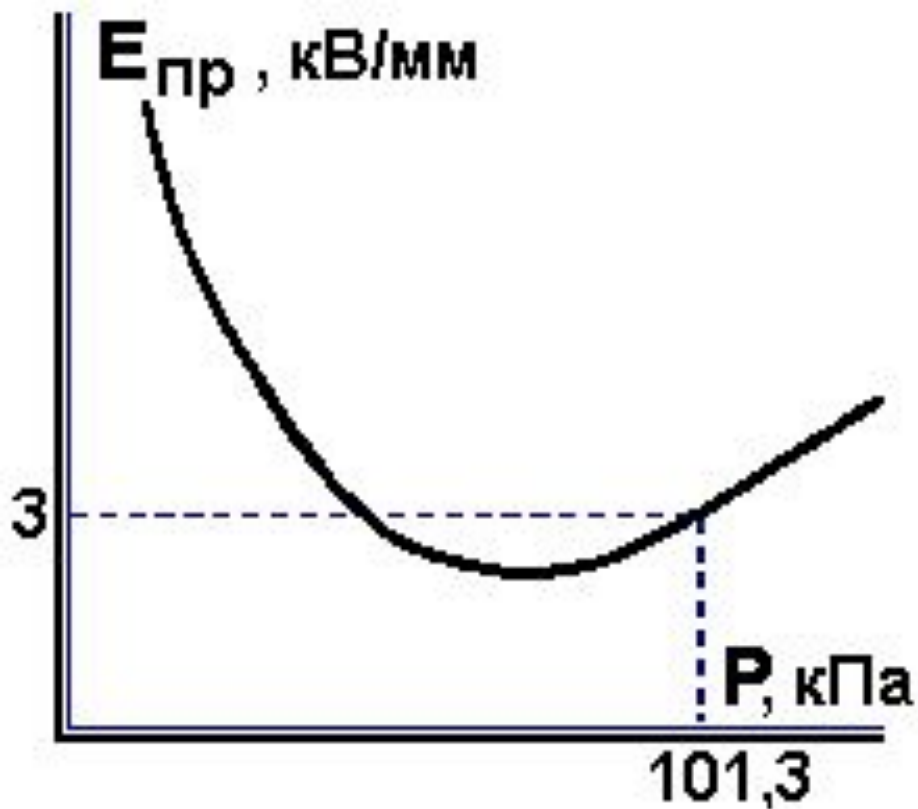
Пробой газа обуславливают явления ударной и фотоионизации. В однородном поле пробой газа наступает внезапно, в неоднородном - пробую предшествует явление короны.

Тлеющий разряд в инертных газах вызывает свечение: неона — оранжево-красным цветом, аргона — синева-зелёным.

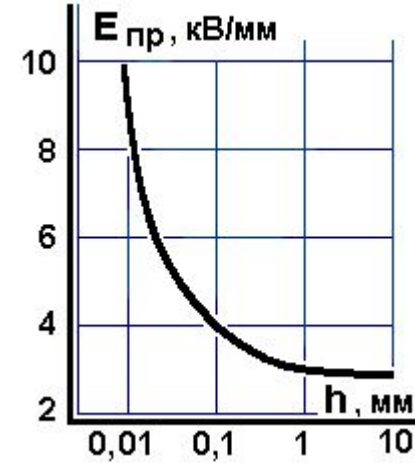


Вольт-амперная характеристика электрического разряда в газе:
1 — тихий разряд; 2 — тлеющий разряд; 3 — аномальный тлеющий разряд; 4 — дуговой разряд

Дуговой разряд используют в газоразрядных осветительных лампах, более экономичных, чем лампы накаливания, и в источниках ультрафиолетового излучения, губительно действующего на болезнетворные бактерии. Дуговой разряд, при котором раскалённые угольные электроды дают ослепительно яркий свет, используют в прожекторах и кинопроекторной аппаратуре. Температура дугового разряда в газе столь высока, что позволяет использовать его для плавки и сварки

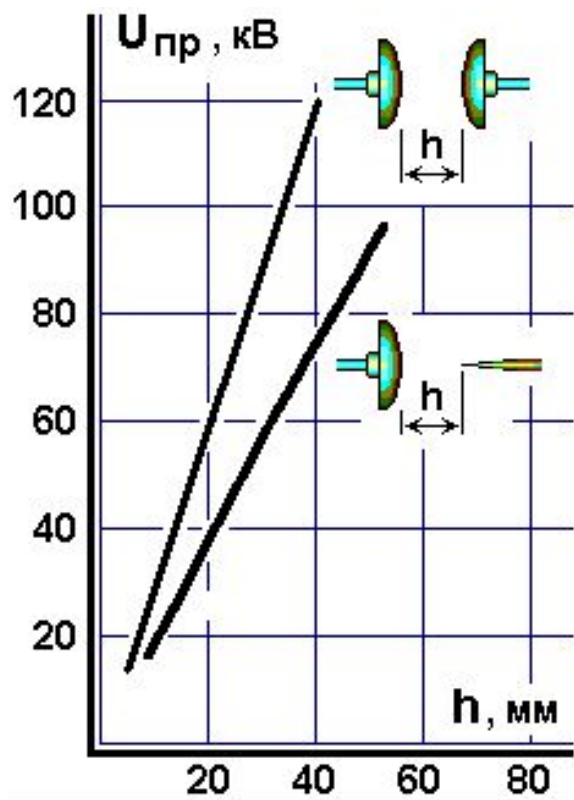


Влияние давления воздуха на его электрическую прочность

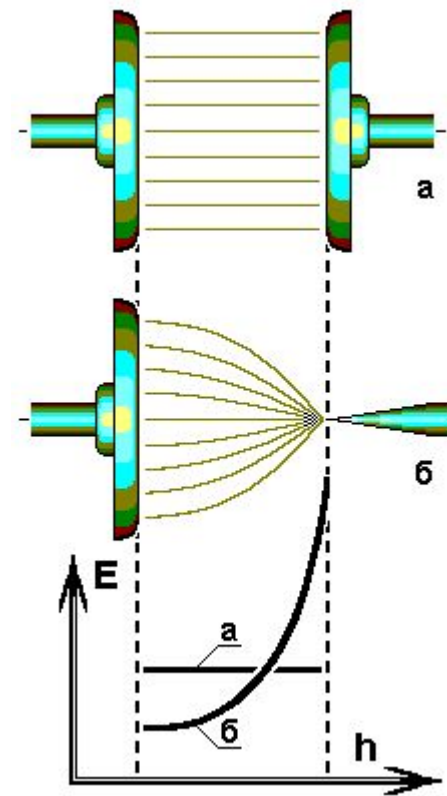


Влияние расстояния между электродами на электрическую прочность воздуха

При повышении давления прочность газа уменьшается до минимума, а затем вновь начинает возрастать, так как при увеличении плотности газа сокращаются время и длина свободного пробега носителей зарядов. От одного столкновения с нейтральной молекулой до другого они не успевают набрать скорость и приобрести кинетическую энергию, достаточную для ударной ионизации

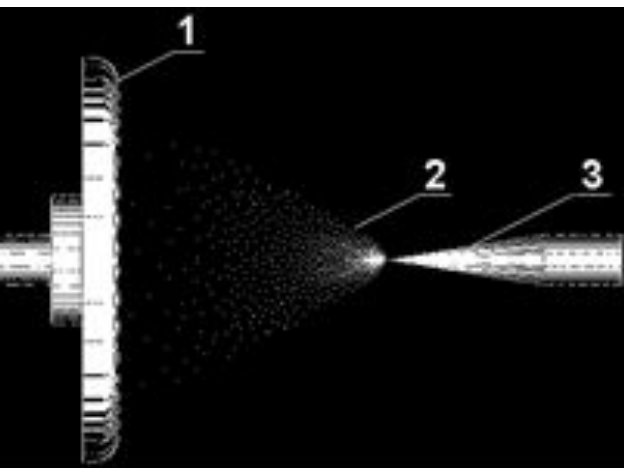


Зависимость напряжения пробоя воздуха от формы электродов и расстояния между ними



Распределение силовых линий и напряжённости в однородном (а) и неоднородном (б) электрических полях

В неоднородном поле частичная ионизация, а затем и полный пробой газообразного диэлектрика начинаются в областях с повышенной напряжённостью поля, где кинетическая энергия заряженных частиц достаточна для развития ударной ионизации газа



Коронный разряд в газе:
1, 3 — плоский и
игольчатый электроды; 2
— коронный локальный
разряд

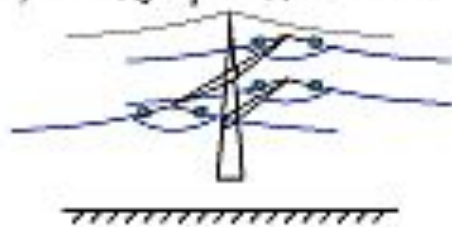
При неоднородном электрическом поле в зонах с напряженностью, превышающей электрическую прочность газообразного диэлектрика, газ ионизирован (рис. 14). Здесь возникает «коронный» локальный разряд 2 в виде синеватого свечения (рис. 15), сопровождающийся слабым шипением. В соответствии с законом Кулона напряженность электрического поля у поверхности электрода 3 тем больше, чем меньше его радиус (электрод 1 — плоский).

Напряженность электрического поля повышена около углов токоведущих деталей, остриев, заусенцев, тонких проводов. Именно около них возникает коронный разряд, способный перерасти в разряд дуговой, грозящий коротким замыканием и аварией электроустановки

На линиях электропередачи напряжением 220...500 и более киловольт при коронном разряде с одного метра провода через ионизированный воздух утекает ток в десятки микроампер. Ток коронного разряда на линии длиной в сотню километров исчисляется уже десятками ампер. Снег на проводах таких линий зимой или капли дождя летом вызывают потери, составляющие в месяц 10...20 тыс. кВт·ч электроэнергии только за счет коронного разряда у этих «электродов»

Пробой газа в неоднородном поле

1) Между проводами ЛЭП



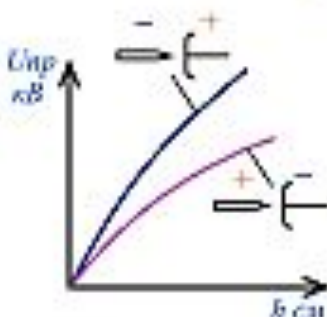
2) Между двумя остриями



3) Между острием и плоскостью



4) Между шарами при большом расстоянии между ними

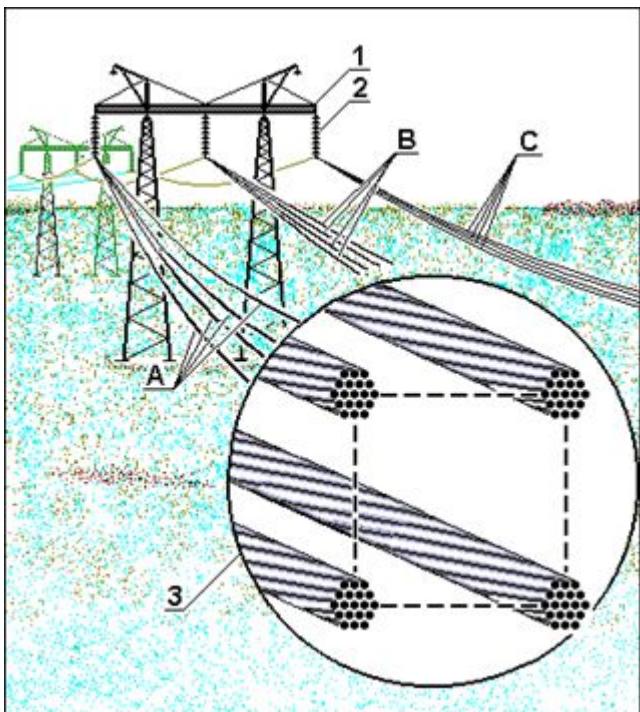


Зависимость $U_{пр} = f(b)$
около острия образуется "положительный объемный заряд"

Особенность пробоя в неоднородном поле – возникновение разряда в виде короны с переходом в искровой разряд или дугу.

Разъединитель
500кВ
РПД-500.





Для уменьшения напряжённости электрического поля и устранения опасности образования короны около проводов каждый из них заменяют несколькими отдельными проводниками, расположенными на определённом расстоянии друг от друга, тем самым как бы увеличивая диаметр провода. При напряжении 500...750 кВ удаётся обойтись тремя – четырьмя проводниками, размещёнными в поперечном сечении по вершинам равностороннего треугольника или квадрата

Пробой твёрдых диэлектриков

Для твердых изоляционных материалов характерны электрический, тепловой, ионизационный и поверхностный («перекрытие») виды пробоя.

Тепловой пробой объясняется нагревом изоляционного материала за счет диэлектрических потерь и токов утечки, в нем усиливается тепловая ионизация, увеличивается концентрация свободных носителей зарядов. При нагреве материала энергия, достаточная для ионизации его нейтральных частиц, уменьшается. Если она станет меньше кинетической энергии движущихся свободных носителей зарядов, то тепловой пробой перерастет в пробой электрический.

Пробой твердых диэлектриков

I В макроскопических
однородных диэлектриках
(Органические полимеры)

Причина пробоя - ударная
ионизация электронами.

пробой по поверхности



II В неоднородных диэлектриках,
содержащих газовые включения

Причина - ионизация газа. С увеличе-
нием толщины усиливается неоднород-
ность структуры и снижается $E_{пр}$



III Электротепловой пробой

Причина - возрастание электро-
проводности или диэлектрических
потерь.

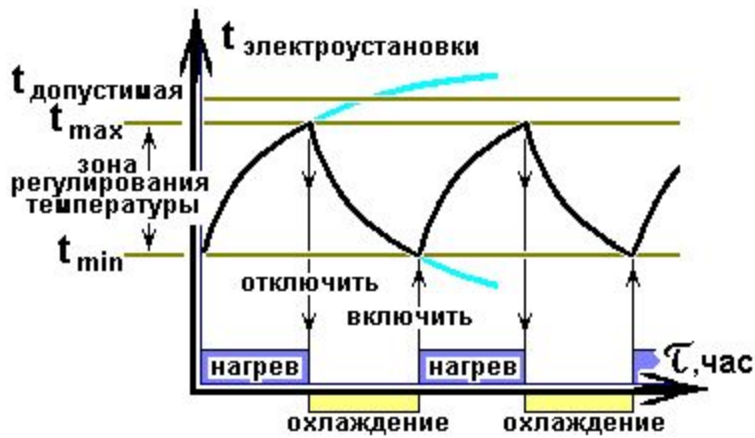


IV Электрохимический пробой

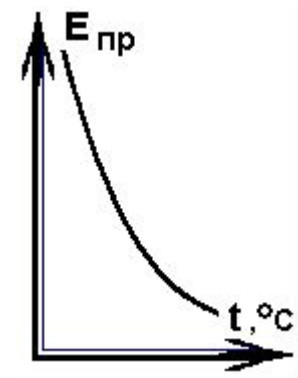
Причина - развитие электро-
литических процессов из-за иониза-
ции воздушных включений.



Электротепловой пробой — тепловое разрушение электроизоляционного материала (расплавление, прожигание) при его нагреве за счёт диэлектрических потерь и объёмных токов



Ограничение нагрева изоляции электрической установки её периодическим выключением



Зависимость электрической прочности твёрдого диэлектрика от температуры

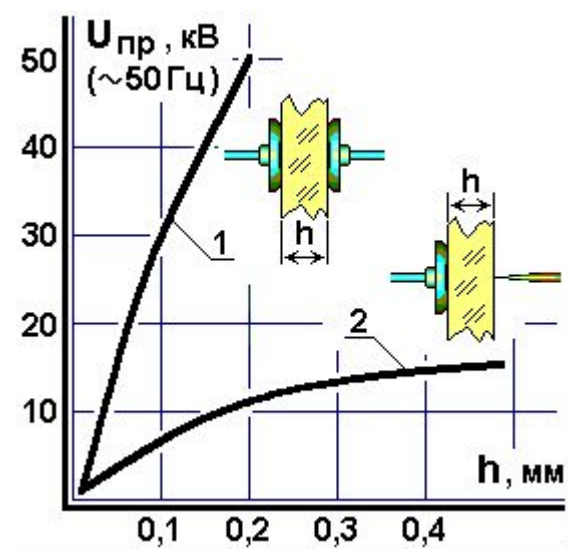
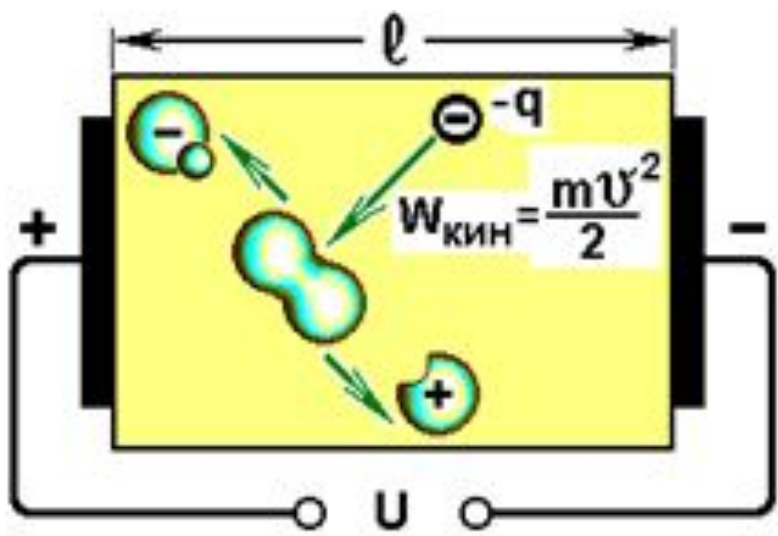
Мерами, позволяющими избежать теплового пробоя изоляционного материала, являются:

- использование изоляционных материалов с малыми диэлектрическими потерями;
- использование теплостойких диэлектриков, способных без теплового пробоя выдерживать высокие температуры;
- использование тонкой изоляции из материалов с высокой теплопроводностью;
- повышение теплоотдачи изоляции путём её интенсивного охлаждения активно циркулирующей средой с высокой теплоёмкостью;

сокращение времени работы электроустановки, чтобы температура изоляции не достигала разрушающей величины

Электрический пробой — лавинообразное нарастание количества свободных электронов в изоляционном материале под действием электрического поля. Электрический пробой твердого диэлектрика свершается за $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с.

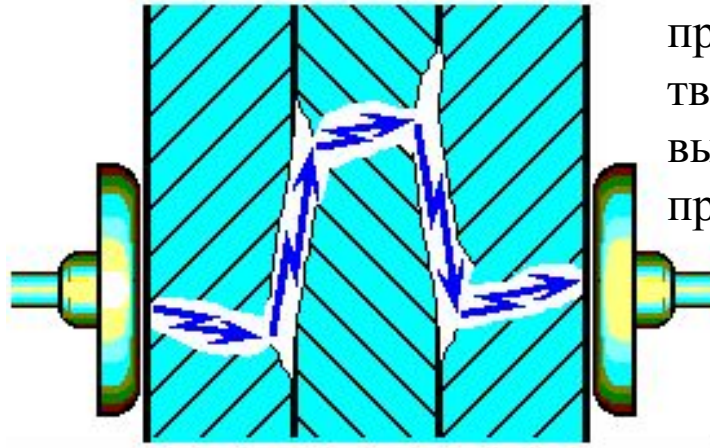
Механизмы электрического пробоя твёрдого диэлектрика и газа сходны по своей сути.



Механизм электрического пробоя твёрдого диэлектрика

Напряжение электрического пробоя стекла в однородном (1) и неоднородном (2) электрических полях

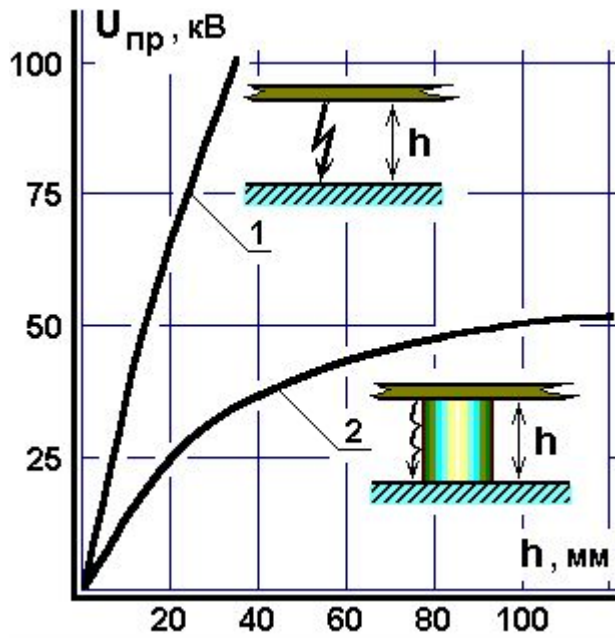
Ионизационный пробой слоистого изоляционного материала



Ионизация газовых включений в слоистом материале вызывает его расслоение, растрескивание и развитие интенсивных ионизационных процессов вдоль по слоям и трещинам

Для борьбы с ионизационным пробоем пористые материалы (бумагу, картон) и другие волокнистые материалы пропитывают изоляционными маслами, твердеющими жидкостями с более высокими, чем у газов, электрической прочностью и стойкостью к ионизации.

Перекрытие твёрдых электроизоляционных материалов — пробой окружающей среды по поверхности твёрдого диэлектрика

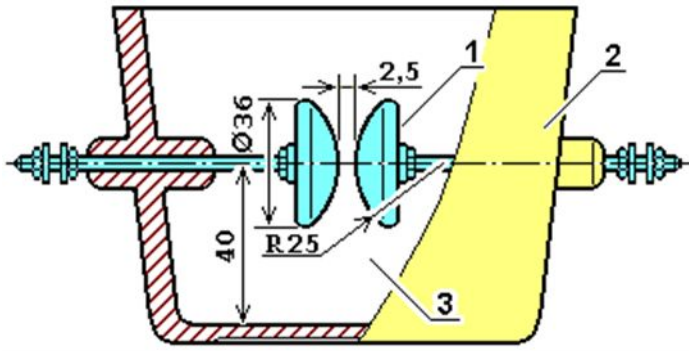


Напряжение перекрытия в значительной степени зависит от распределения потенциалов по поверхности изолятора. Чем более однородно электрическое поле, тем выше при прочих равных условиях напряжение перекрытия и тем меньше его вероятность

Напряжение электрического пробоя между токоведущей шиной и корпусом электроустановки при изоляции в виде воздуха (1) и в виде опорного изолятора из электрофарфора

Для определения электрической прочности испытуемый материал помещают между электродами стандартного пробойника (рис. 3.14), напряжение на которых увеличивают со скоростью 1 кВ/с до пробоя диэлектрика.

Чтобы электрическое поле было однородным, используют сферические, полусферические или плоские электроды с закруглёнными краями



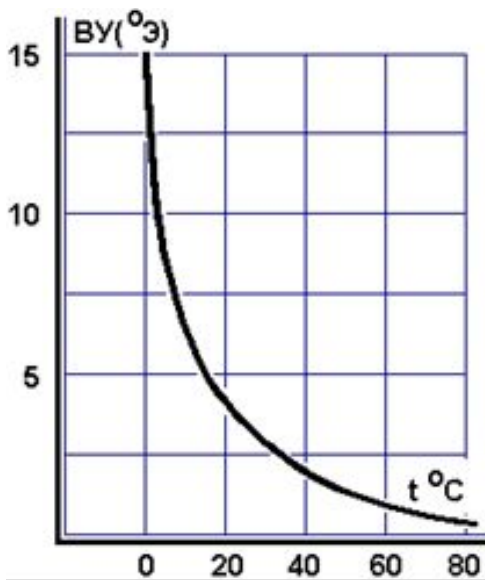
Минимальное напряжение U , приложенное к диэлектрику, и приводящее к образованию в нем проводящего канала, называется **пробивным напряжением**.

В зависимости от того, замыкает ли канал оба электрода, пробой может быть полным, неполным или частичным. У твердых диэлектриков возможен также поверхностный пробой, после которого повреждается поверхность материала, образуя на органических диэлектриках науглероженный след-трекинг.

РАБОТА №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вязкость — важная характеристика, позволяющая оценить эксплуатационные качества жидкости. При высокой вязкости жидкость малоподвижна, при малой — более текуча.



Влияние температуры масла на его вязкость

Жидкие диэлектрики часто используют для пропитки твёрдых волокнистых изоляционных материалов, как дугогасящую и охлаждающую среду. В силовых трансформаторах заполняющее их масло пропитывает изоляцию обмоток и повышает её электрическую прочность. Масло, охлаждая обмотки трансформатора, нагревается от них, а затем, остудившись в трубчатом теплообменнике, вновь поступает в бак трансформатора.

От вязкости жидких изоляционных материалов в значительной мере зависят их пропитывающие и охлаждающие качества.

Вязкость жидкостей уменьшается с ростом температуры, что объясняется уменьшением сил взаимосвязи между

Вязкость проявляется в противодействии внешним силам, вызывающим течение газов или жидкостей, и характеризует внутреннее трение при взаимном перемещении частиц среды. Вязкость оценивают динамической (Па·с), кинематической ($\text{м}^2/\text{с}$) или условной вязкостью ($^{\circ}\text{Э}$). Для измерения вязкости используют вискозиметры.

Для многих жидких сред сила противодействия пропорциональна скорости взаимного перемещения слоев :

$$F = \eta \cdot \vartheta$$

F – сила противодействия сдвигу, Н; ϑ – скорость перемещения слоев жидкости, м/с;

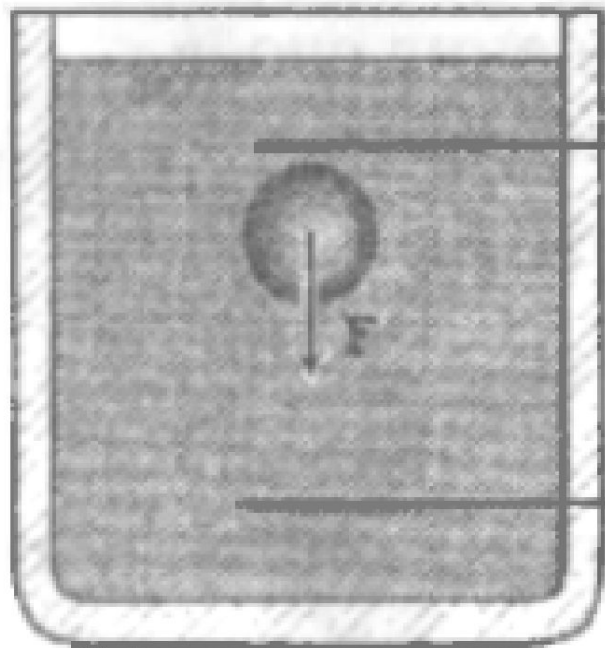
Динамической вязкостью наз. коэффициент пропорциональности η , зависит от свойств жидкости (Па·с)

Динамическую вязкость жидкости определяют при помощи **шарикового вискозиметра**.

Вискозиметр — прозрачный сосуд — заполняют испытуемой жидкостью, в которую роняют шарик. Скорость погружения шарика зависит, кроме прочих параметров, и от динамической вязкости жидкости

$$v = [2g (\rho - \rho_{\text{ж}}) r^2] / 9\eta$$

v — скорость погружения шарика, определяемая по времени погружения шарика на определённую глубину, м/с; **g** — ускорение свободного падения, м/с²; **ρ** и **ρ_ж** — плотности материалов шарика и жидкости, кг/м³; **r** — радиус шарика, м; **η** — динамическая вязкость жидкости, Па·с



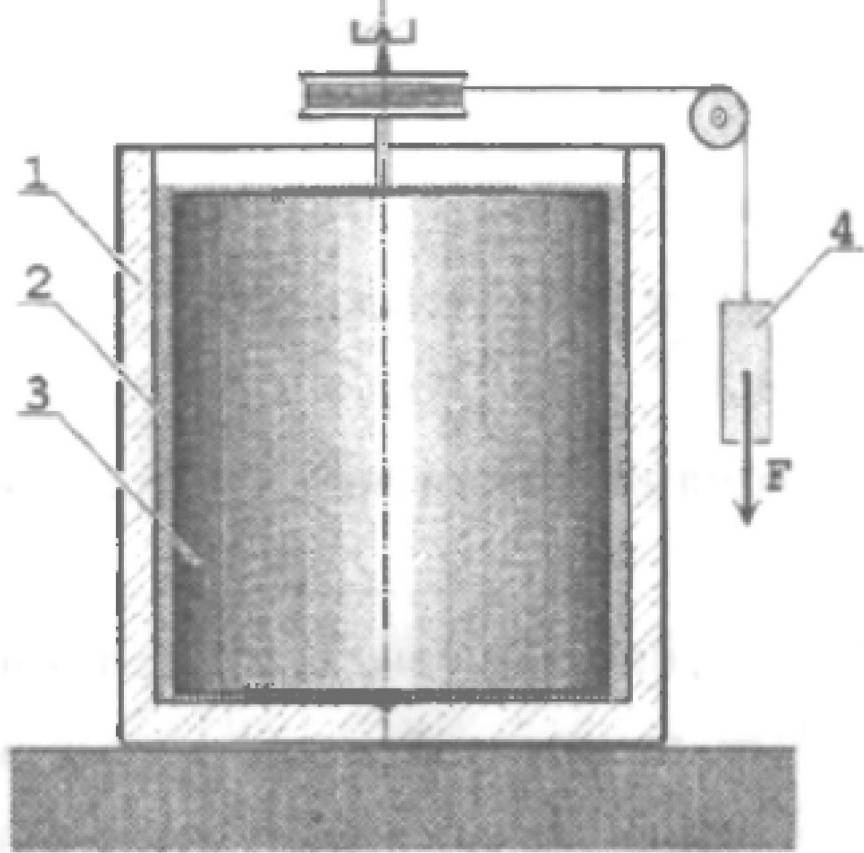
Для определения динамической вязкости жидкостей используют шариковый вискозиметр. Прозрачный сосуд, снабжённый рисками А и В, заполняют исследуемой жидкостью, в которую роняют шарик. Скорость погружения шарика зависит от силы тяжести за вычетом Архимедовой силы, действующей на него, от его размера и динамической вязкости жидкости:

$$v = \frac{F}{6 \pi r \eta}$$

где v – скорость погружения шарика, определяемая по времени преодоления им расстояния между рисками А и В ;

F – вес шарика, уменьшенный на вес вытесненной им жидкости ;

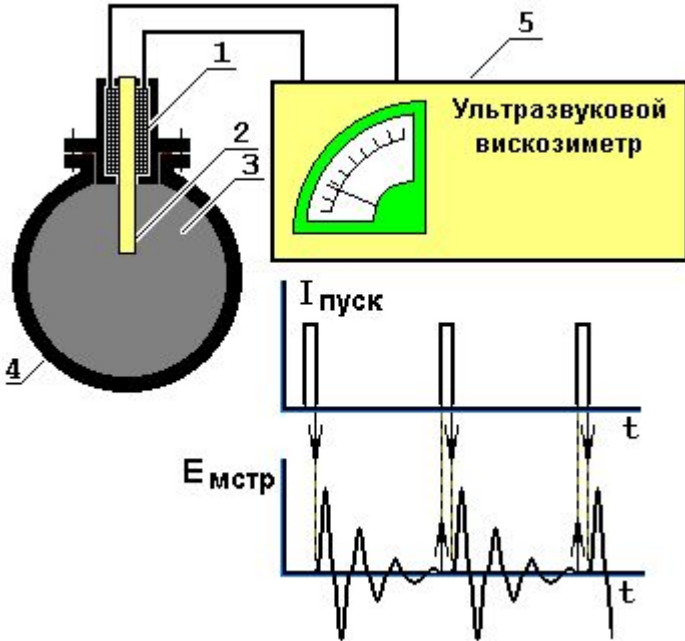
r – радиус шарика.



Динамическую вязкость можно определить и при помощи ротационного вискозиметра. В сосуде 1 на подшипниках размещён цилиндр 3, приводимый во вращение грузом 4. Зазор между стенками сосуда и цилиндра заполняют исследуемой жидкостью 2. В зависимости от вязкости жидкости она в большей или меньшей степени

Здесь
$$\eta = c \frac{F - F_{тр}}{n}$$
 значение цилиндра:

F - вес груза; $F_{тр}$ - поправка на силы трения в механизме вискозиметра ; n - частота вращения цилиндра ; c - постоянная вискозиметра



Для непрерывного измерения динамической вязкости жидкости в потоке используют *ультразвуковой вискозиметр* действие которого основано на зависимости времени затухания колебаний стержня, помещённого в жидкость, от её вязкости.

Ультразвуковой вискозиметр:

- 1 — датчик вискозиметра; 2 — магнитострикционный сердечник;
- 3 — поток испытуемой жидкости; 4 — трубопровод; 5 — измерительный блок

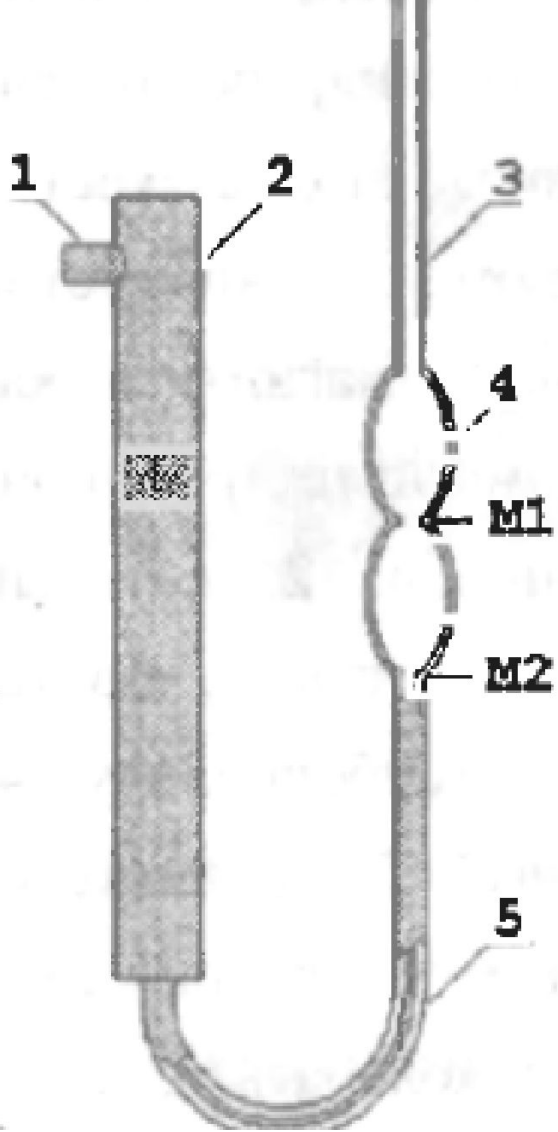
Датчик вискозиметра, представляющий электромагнитную катушку 1 с сердечником 2 из магнитострикционного материала (см. раздел 6.2), нижний конец которого опущен в трубопровод с испытуемой жидкостью. Измерительный блок 5 подаёт на катушку пусковой электрический импульс, и сердечник начинает колебаться. Его колебания затухают тем быстрее, чем больше вязкость жидкости. Как только колебания прекратятся, блок 5 подаст на катушку новый пусковой импульс. Этот процесс будет повторяться тем чаще, чем быстрее затухают колебания сердечника после очередного импульса, то есть чем выше вязкость жидкости. Частота подачи пусковых импульсов, измеряемая блоком 5, в определённом масштабе соответствует вязкости жидкости.

Кинематическая вязкость — отношение динамической вязкости жидкости к её плотности. Кинематическую вязкость определяют капиллярным вискозиметром, измеряя время t (с) снижения уровня жидкости в верхнем сосуде при перетекании её по калиброванному капилляру в нижний сосуд.

$$\nu = t c g k / 980,7, \text{ м}^2/\text{с},$$

ν — кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; c — постоянная вискозиметра; g — ускорение свободного падения на широте измерения вязкости, $\text{м}/\text{с}^2$; k — коэффициент учёта изменения объёма жидкости при температуре, отличной от 20°C .

Кинематическую вязкость измеряют и в стоксах (Ст): $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.



Кинематическую вязкость жидкости измеряют капиллярным вискозиметром. Вискозиметр представляет собой стеклянную конструкцию с калиброванным капиллярным каналом 5, соединяющим сообщающиеся сосуды 4 и 2. Пальцем закрывают сверху сосуд 2, переворачивают вискозиметр, опускают приёмную трубку 3 в испытуемую жидкость и заполняют ею двухкамерный сосуд 4 высасывая воздух через резиновую трубку, надетую на патрубок 1, а затем перекрывают трубку. Вискозиметр переводят в положение, показанное на рисунке. Как только будет открыт сосуд 2, жидкость начнёт перетекать из сосуда 4 в сосуд 2. По времени опускания уровня жидкости от метки М1 до метки М2 вычисляют кинематическую вязкость жидкости:

$$\nu = c \frac{g t}{980,7} k$$

c - постоянная вискозиметра; g - ускорение свободного падения на широте измерения вязкости; t - время перетекания жидкости; k - коэффициент, учитывающий изменение объёма жидкости при температуре, отличной от 20 °С.

Условную вязкость жидкости измеряют вискозиметром названным именем его изобретателя — химика Карла Энглера (1842–1925 гг.).

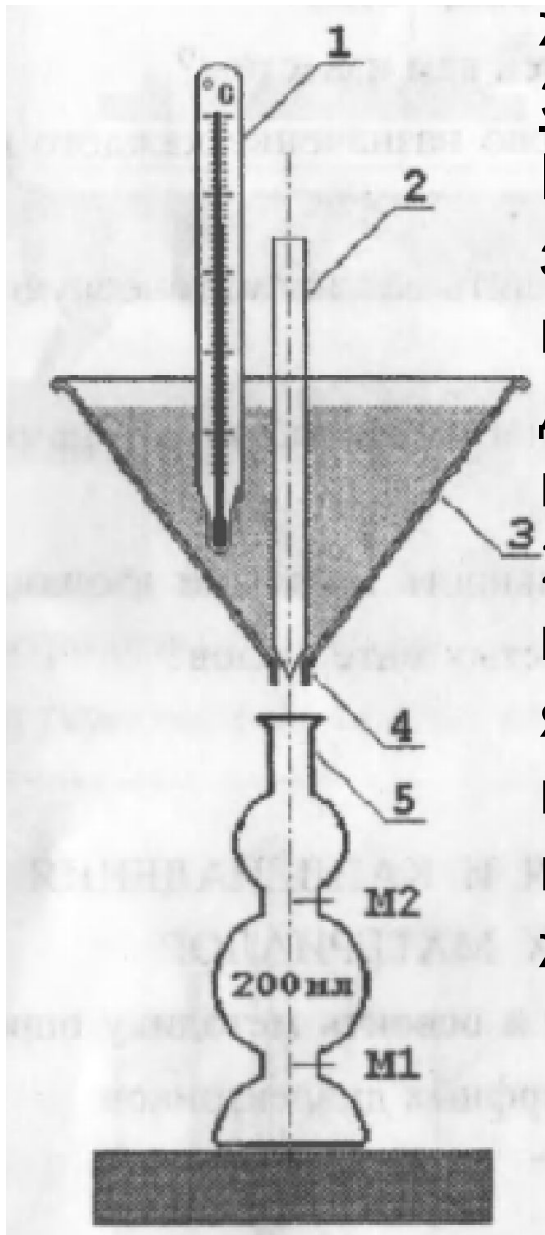
Испытуемая жидкость стекает из сосуда вискозиметра через калиброванный канал в мерную склянку. По времени $t_{\text{ж}}$ истечения 200 мл жидкости судят о её вязкости. Время истечения из вискозиметра такого же объёма дистиллированной воды при 20 °С называется постоянной вискозиметра $t_{\text{в}}$.

Для измерения условной вязкости жидкости используют вискозиметр Энглера

Исследуемая жидкость при изъятии запорного стержня 2 сливается через калиброванную фильеру 4 (диаметр 4 мм, длина канала 4 мм) из конусного сосуда 3 в мерную посуду 5. По времени истечения 200 мл жидкости судят о её относительной вязкости. Характеристикой вискозиметра является его постоянная, равная времени истечения 200 мл дистиллированной воды при 20 °С. Для учета температуры жидкости используют термометр 1.

Условная вязкость определяется отношением времени истечения испытуемой жидкости к постоянной вискозиметра

$$VУ = t_{Ж} / t_{В}, \text{ } ^{\circ}\text{Э}$$



Для определения условной вязкости поочередно измеряют времена истечения равных объемов дистиллированной воды при температуре 20 °С и испытуемой жидкости через калиброванное отверстие. Отношение этих величин дает значение условной вязкости испытуемой жидкости в градусах Энглера:

$$ВУ(^{\circ}Э) = \frac{t_{Ж}}{t_{В}}$$

где $t_{Ж}$ и $t_{В}$ – времена истечения одинаковых объемов испытуемой жидкости и воды соответственно.

Связь условной и кинематической вязкостей

$$ВУ(^{\circ}Э) = 0,135 \cdot 10^{-6} \cdot \nu$$

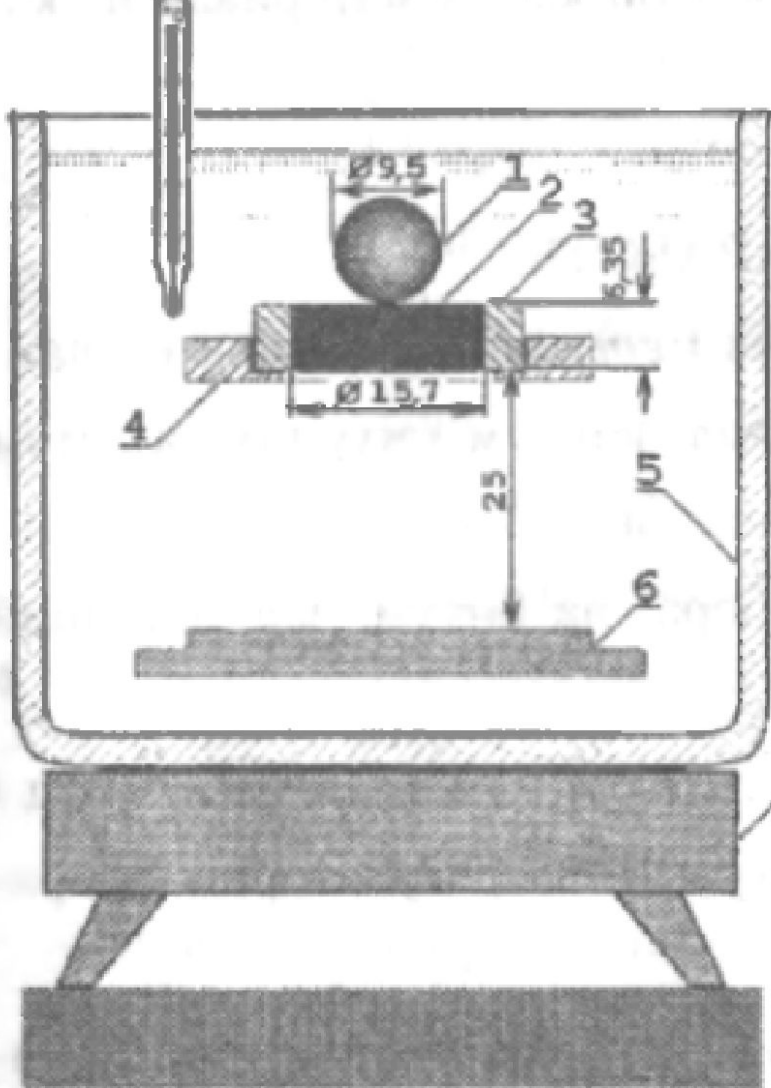
где ν – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Кинематическая вязкость ν (м²/ с) – отношение динамической вязкости η (Па·с) жидкости к ее плотности ρ (кг / м³):

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Вязкость может быть измерена и в относительных единицах, тогда она называется условной вязкостью и измеряется в «градусах Энглера», обозначается ВУ (°Э).

1. Каков физический смысл понятия «вязкость жидкости»?
2. Какие способы измерения вязкости жидкостей вам известны?
3. Какие типы вискозиметров вы знаете? Каково назначение каждого из них?
4. Как по условной вязкости жидкости определить её кинематическую и динамическую вязкости?
5. Может ли повышенная вязкость изоляционного масла повлиять на работу трансформатора?
6. Как увеличить глубину и сократить длительность пропитки изоляционным маслом твёрдых пористых и волокнистых материалов?



Температуру размягчения аморфных диэлектриков определяют методом «кольца и шара» прибором (рис. 6-1) с латунным кольцом 3 и стальным шариком 1. Кольцо, заполненное испытуемым материалом 2, укладывают в гнездо полки 4 на высоте 25 мм над контрольной пластиной 6. Прибор помещают в термостойкий сосуд 5, установленный на электронагревателе 7. Сосуд заполняют водой или глицерином, если температура размягчения материала превышает 100 °С. В непосредственной близости от колец размещают термометр. По мере нагрева материала шарик продавливает его своим весом и опускается на контрольную пластину. Температурой размягчения материала считают показания термометра в момент касания шариком пластины 6.

Электрическая травма (электрический удар, электрический ожог) возникает, если пострадавший замыкает собой цепь: проводник - рука – туловище – нога – пол – «земля». Возможны и другие пути прохождения тока, из которых наиболее опасен рука – рука.

Ожог возникает при нахождении пострадавшего вблизи места короткого замыкания, если оно сопровождается электрической дугой.

Ток, проходя через тело пострадавшего, вызывает биологическое действие, обычно поражая при этом сердечно-сосудистую и нервную системы.

Возникает судорожное сокращение мышц, которое «приковывает» пострадавшего к источнику тока.

«Приковывающий» эффект делает невозможным самостоятельное освобождение от источника тока, что значительно увеличивает время его действия и отягощает травму.

Поражение нервной и сердечно-сосудистой системы приводит к остановке дыхания и сердца или к нарушению ритма их работы. Для спасения пострадавшего необходимо как можно быстрее освободить его от действия электрического тока, а затем оказать ему первую медицинскую помощь.

Работа 6. Определение температур размягчения и каплепадения аморфных электроизоляционных материалов

Диэлектрики в электрических машинах и аппаратах работают, как правило, при повышенных температурах. Тепловые характеристики позволяют предвидеть поведение изоляционных материалов при их нагреве и установить для них предельную допустимую рабочую температуру.

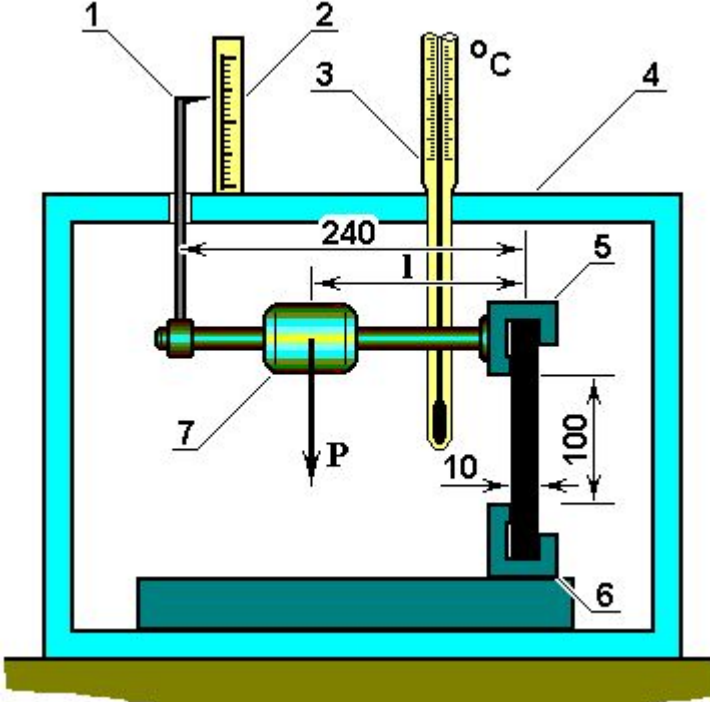
Тепловые воздействия вызывают размягчение и расплавление термопластичных материалов, термоокисление органических изоляционных материалов, называемое «термостарением». При термоокислении снижаются удельное сопротивление и электрическая прочность изоляции, утрачивается её эластичность, материал становится хрупким. Резкие колебания температуры — «термоудары» вызывают растрескивание изоляционного материала.

Тепловое воздействие особенно опасно в сочетании с вибрациями, при которых иссохшая изоляция разрушается и осыпается, оголяя токоведущие детали, а также в сочетании с высокой влажностью, когда влага заполняет образующиеся в теле изоляции трещины.

Под действием высокой температуры эксплуатационные качества электрической изоляции ухудшаются. В связи с этим исключительно важен вопрос о наивысшей допустимой рабочей температуре изоляционных материалов.

Важнейшими тепловыми характеристиками аморфных электроизоляционных материалов (пластмасс, битумов и восков, мастик на их основе) являются температуры размягчения и каплепадения материала. Недопустимый нагрев электрических аппаратов с изоляцией из указанных материалов ведет к стеканию изоляции с токоведущих деталей, снижению ее электрической

Теплостойкость — способность материала сохранять форму при одновременном воздействии нагрева и механических нагрузок. Эта характеристика наиболее актуальна для термопластичных полимерных материалов. Её получают при помощи аппарата Мартенса

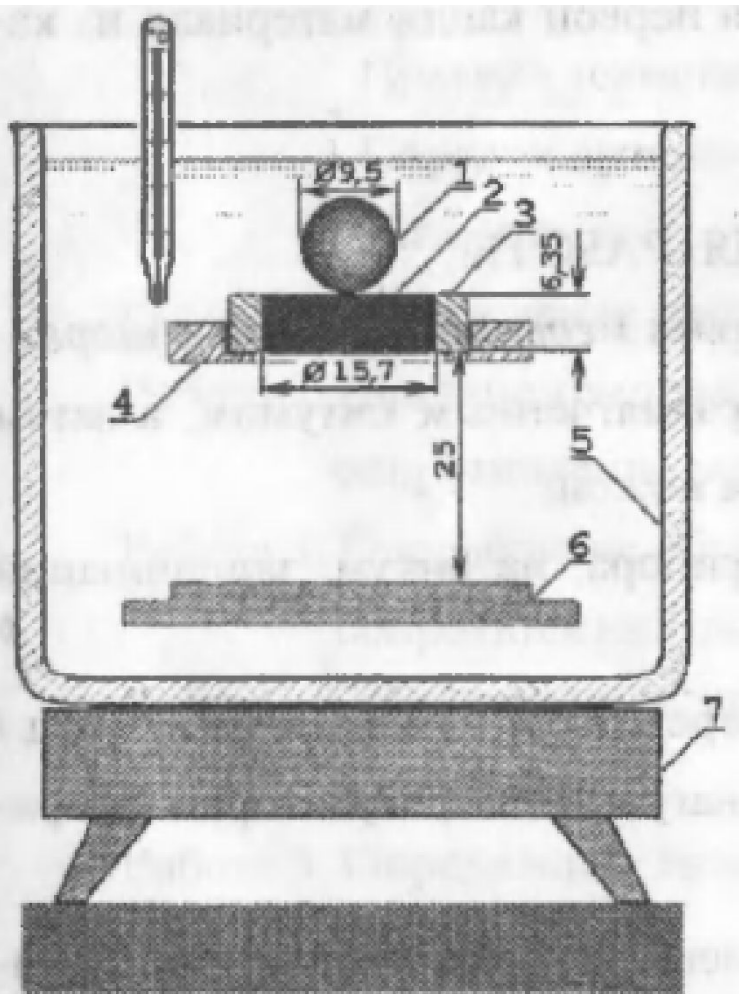


Аппарат Мартенса для определения термостойкости пластмасс :

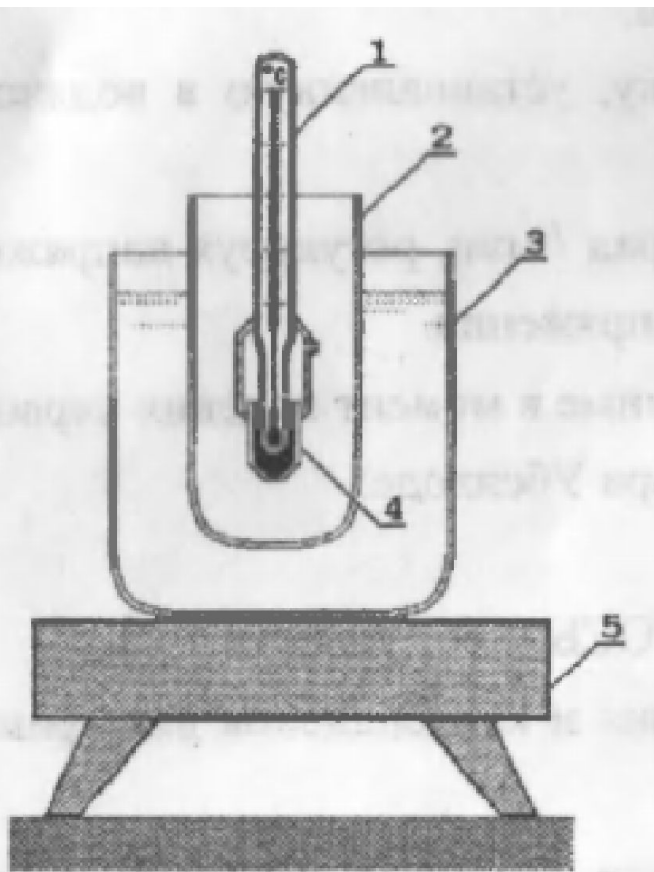
1 — указатель; 2 — линейка; 3 — термометр; 4 — термостат; 5, 6 — верхний и нижний зацепы; 7 — груз

Образец материала стандартных размеров закрепляют в аппарате при помощи зацепов. Перемещением груза по горизонтальной рейке задают определённый изгибающий момент $P l$, затем устройство помещают в термостат и нагревают со скоростью $50\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, наблюдая за перемещением указателя вдоль линейки. Когда указатель опустится на 6 мм или образец сломается, термометр показывает температуру размягчения материала по Мартенсу

Температуру размягчения аморфных диэлектриков определяют методом «кольца и шара» прибором с латунным кольцом 3 и стальным шариком 1. Кольцо, заполненное испытуемым материалом 2, укладывают в гнездо полки 4 на высоте 25 мм над контрольной пластиной 6. Прибор помещают в термостойкий сосуд 5, установленный на электронагревателе 7. Сосуд заполняют водой или глицерином, если температура размягчения материала превышает 100 °С. В непосредственной близости от колец размещают термометр. По мере нагрева материала шарик продавливает его своим весом и опускается на контрольную пластину. Температурой размягчения материала считают показания термометра в момент касания шариком пластины 6.



Температуру каплепадения аморфных диэлектриков определяют прибором Убеллоде, представляющим собой термометр 1, оснащенный латунной гильзой, в которую вставлена чашечка 4 с калиброванным отверстием в доньшке. Для сообщения полости гильзы с атмосферой в стенке гильзы имеется отверстие. Чашечку 4 заполняют испытуемым материалом и закрепляют в гильзе так, что ртутный шарик термометра оказывается вдавленным в материал. Термометр Убеллоде помещают в стеклянную пробирку 2 и нагревают на водяной или масляной бане 3. Электронагреватель 5 подключают к сети через регулятор напряжения, обеспечивая увеличение температуры на 1 градус за минуту. Температурой каплепадения материала считают показания термометра, отмеченные в момент падения первой капли материала из калиброванного отверстия чашечки.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определяют температуры размягчения и каплепадения аморфных диэлектриков?
2. Какое практическое значение имеют эти тепловые характеристики аморфных диэлектриков?
3. Зависят ли условия эксплуатации электроустановки от тепловых характеристик использованных в ней размягчающихся и плавящихся изоляционных материалов?

Нагревостойкость — способность диэлектрика длительно выдерживать предельно допустимую температуру без опасного ухудшения его электроизоляционных свойств. Нагревостойкость оценивают по температуре, при которой электроизоляционный материал обеспечивает экономически обоснованный срок службы электроустановки с изготовленными из него деталями.

Государственным стандартом установлены 9 классов нагревостойкости изоляционных материалов

Классы нагревостойкости изоляционных материалов (ГОСТ 8865–87)

Класс нагревостойкости	Предельная допустимая температура, °С	Изоляционные материалы, входящие в класс нагревостойкости
У	90	Органические диэлектрики (полистирол, полиэтилен), волокнистые не пропитанные материалы (бумаги, картоны, хлопчатобумажные ткани, натуральный шёлк)
А	105	Пропитанные лаками и другими составами хлопчатобумажные и шёлковые ткани (лакоткани), многие пластмассы (гетинакс, текстолит и др.)
Е	120	Триацетатцеллюлозные и лавсановые плёнки, стеклотекстолит на бакелитовой смоле
В	130	Клеевые слюдяные материалы (миканиты), материалы на основе стекловолокна, проклеенного составами классов нагревостойкости А или Е (бакелитовые смолы, лаки на их основе)
Ф	155	Материалы на основе слюды, асбеста или стекловолокна, склеенные или пропитанные лаками повышенной нагревостойкости (полиуретановыми лаками, эпоксидными смолами)
Н	180	Кремнийорганические лаки и резины, слюдяные и стекловолоконные материалы, склеенные кремнийорганическими лаками и смолами
200	200	Полиимиды, композиционные материалы из стеклянного или асбестового волокна и нагревостойких органических и некоторых кремнийорганических связующих
220	220	Некоторые виды полиимидов, фторопластов и пластмасс из кремнезёмных нитей и кремнийорганических и других нагревостойких связующих
250	250	Диэлектрики неорганического происхождения (керамики, стёкла, слюда без органических клеящих и пропиточных составов), высокополимерные диэлектрики (фторопласт-4, пластмассы неорганического состава)

Наиболее частые причины электротравм

1. Прикосновение или приближение на недопустимое расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением из-за

- неисправности электропроводки, установочных изделий, электроприборов;
- неосторожности, небрежности, неопытности, неосведомлённости пользователя;
- доступность электроустановок детям, их озорство;
- через временно выключенные из сети токоведущие части, если не приняты все меры к выключению из сети;
- при несогласованности в действиях (преждевременное включение тока).

Содержите проводку, установочные изделия и электроприборы в исправности, грамотно их эксплуатируйте. Необходимо твёрдо запомнить, что прикасаться к токоведущим частям нельзя даже после из отключения. Необходима ещё проверка отсутствия напряжения специальным прибором (индикатором).

2. Прикосновение к металлическому корпусу электроприбора, если он оказался под напряжением вследствие повреждения изоляции.

В промышленных электроустановках средством защиты служит заземление корпуса. В квартирах заземляющий провод может отсутствовать. Средством защиты служит полы из изолирующих материалов (дерево, линолеум и др.).

Не используйте в качестве заземления нулевой провод!

Не используйте в качестве заземления коммуникации (водопровод, канализацию, газ, отопление)!

Размещайте стиральную машину на достаточном удалении от коммуникаций!

Если вы заметили, что ваш прибор «щиплет», немедленно изымите его из пользования.

Если человек находится под действием тока, необходимо, прежде всего, принять меры к его освобождению от соприкосновения с проводником, т.к. прикосновение к нему опасно.

Если нельзя быстро выключить ток (отключить рубильник или выключатель), надо перерезать провод инструментом (топором) с непроводящей ток сухой деревянной ручкой или кусачками с защитной изоляцией на рукоятке, став на сухую доску, сверток сухой одежды и т.д.

Если и это невыполнимо, надо оттащить пострадавшего или приподнять его от пола, пользуясь сухим неметаллическим предметом (палкой, доской, верёвкой и пр.) или руками, обернутыми в непроводящую ток ткань, не касаясь обнаженных частей тела.

Если на пострадавшего упал конец оборвавшегося провода, надо его отбросить или оттащить пострадавшего от проводника, действуя таким же образом.

Первая помощь

Если пострадавший находится в обморочном состоянии, но дыхание и пульс у него есть, необходимо привести его в чувство: дать понюхать нашатырный спирт, похлопать по щекам, побрызгать водой.

Если пострадавший не дышит или дышит судорожно, необходимо немедленно приступить к искусственному дыханию «рот в нос» или «рот в рот» и непрямому массажу сердца при отсутствии пульса. Одновременно позвать других людей, которые должны оказать содействие и вызвать Скорую помощь.

Прежде чем начать процедуру искусственного дыхания, надо уложить пострадавшего на спину, запрокинув голову назад для освобождения воздухоносных путей для прохождения воздуха.

Подложив одну руку под шею, другой надавливают на темя. Корень языка отодвигается от задней стенки гортани и восстанавливается проходимость дыхательных путей.

При сжатых челюстях надо выдвинуть нижнюю челюсть вперед и, надавливая на подбородок, раскрыть рот, затем очистить салфеткой ротовую полость от слюны или рвотных масс и приступить к искусственному дыханию: на открытый рот пострадавшего положить в один слой салфетку (носовой платок), зажать ему нос, сделать глубокий вдох, плотно прижать свои губы к губам пострадавшего, создав герметичность, с силой вдуть воздух ему в рот. Вдувать надо такую порцию воздуха, чтобы она каждый раз вызывала возможно более полное расправление легких, что обнаруживается по движению грудной клетки. Небольшие порции воздуха не дадут никакого эффекта. Воздух вдувают ритмично через каждые 5 – 6 секунд, что соответствует 10—12 раз в минуту до восстановления естественного дыхания.

Не следует прекращать оживление до прибытия Скорой помощи, если дыхание у

Методы защиты:

- применение малых напряжений (не более 42 В).

В производстве используют сети напряжением 12 В и 36 В с использованием понижающих трансформаторов);

- электрическое разделение сетей;
- электрическая изоляция;
- защита от опасности при переходе с высшей стороны на низшую;
- контроль и профилактика повреждения изоляции;
- защита от случайного прикосновения к токоведущим частям;
- защитное заземление, зануление, защитное отключение;
- применение индивидуальных защитных средств.

Применение малых напряжений

Малое напряжение — это напряжение не более 42 В, применяемое в цепях уменьшения опасности поражения электрическим током. Наибольшая степень безопасности достигается при напряжениях до 10 В. В производстве чаще используют сети напряжением 12 В и 36 В. Для создания таких напряжений используют понижающие трансформаторы.

Электрическое разделение сетей

Разветвленная электрическая сеть большой протяженности имеет значительную емкость и небольшое сопротивление фаз относительно земли. Разделение сетей осуществляется путем подключения отдельных электроустановок через разделительные трансформаторы (допускается лишь для сетей до 1000 В).

Электрическая изоляция

Слой диэлектрика, которым покрывают поверхность токоведущих элементов, или конструкция из непроводящего материала, с помощью которой токоведущие части отделяются от остальных частей электрооборудования. Виды изоляции:

рабочая — электрическая изоляция токоведущих частей электроустановки, обеспечивающая ее нормальную работу и защиту от поражения электрическим током;

дополнительная — электрическая изоляция, предусмотренная дополнительно к рабочей изоляции для защиты от поражения электрическим током при повреждении рабочей изоляции;

двойная — изоляция, состоящая из рабочей и дополнительной изоляции;

усиленная — улучшенная рабочая изоляция, которая обеспечивает такую же защиту от поражения электрическим током, как и двойная изоляция; сопротивление изоляции должно быть не менее 0.5 МОм.

Ток I определяется величиной электрического заряда q , протекающего через поперечное сечение проводника в единицу времени t : $I = q / t$

Единицей измерения тока является **ампер** (А).

При токе в 1 А через поперечное сечение проводника за секунду (с) протекает заряд, равный одному **кулону** (Кл): $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$. Заряд $6,24151 \cdot 10^{18}$ электронов равен –1 Кл.

Величина тока зависит от напряжения (разности потенциалов на концах проводника) и от способности материала проводника проводить электрический ток. Закономерную связь между этими величинами установил в 1826 г. немецкий физик Георг Симон Ом (1787–1854 гг.).

Закон Ома гласит: ток I в проводнике прямо пропорционален приложенному напряжению U и обратно пропорционален сопротивлению проводника R (2.2):

$$I = U / R$$

Напряжение U , измеряемое в **вольтах** (В), определяет силы, вызывающие движение заряженных частиц в проводнике, а сопротивление R , измеряемое в **омах** (Ом), — противодействие материала проводника направленному движению зарядов.

Физический смысл явления электрического сопротивления состоит в том, что заряженные частицы при упорядоченном движении наталкиваются на молекулы вещества проводника, которые препятствуют их свободному движению. В металлах сопротивление оказывают ионы в узлах кристаллической решётки.