

## ELP

**Band model:** is a theoretical framework used to explain the electronic structure and behavior of solids.

(解释固体的电子结构和行为, 特别是与其导电性能相关的理论框架。该模型对于理解导体、半导体和绝缘体的行为至关重要。)

结构: [Energy Bands](#) (Valence band & Conduction band) and [Band Gap](#) 导带和价带之间的能隙。带隙的大小对于确定材料的电性能至关重要)

**Electrical conductivity:** ability to transport electrical charge carriers after applying an external electric field.

**Intrinsic semiconductor** is a pure semiconductor material without any significant impurity doping. This type of semiconductor is composed of a single element or compound with a crystalline structure, and its electrical properties are entirely determined by the material itself. The most common examples of pure silicon (**Si**) and germanium (**Ge**).

(本征半导体是没有任何显著杂质掺杂的纯半导体材料。这类半导体由具有晶体结构的单一元素或化合物组成, 其电性能完全由材料本身决定。最常见的例子是纯硅 (Si) 和锗 (Ge)。)

特点: Electron-Hole Pairs: Lower Conductivity: Band Gap; Temperature Dependence

**intrinsic conductivity:** the electrical conductivity of a pure semiconductor material without any significant impurity doping. This type of conductivity is inherent to the semiconductor itself and is determined by its crystal structure and band gap energy. (是指没有任何显著杂质掺杂的纯半导体材料的电导率。这种类型的导电性是半导体本身固有的, 由其晶体结构和带隙能量决定。)

**Extrinsic semiconductor of type N**, (N-type semiconductor) is a semiconductor material that has been doped with impurities to increase its electrical conductivity. The dopant atoms added to the semiconductor have more valence electrons than the semiconductor itself. For example, in silicon, a common N-type dopant is phosphorus or arsenic  
N 型非本征半导体, 是一种掺杂了杂质以提高其导电率的半导体材料。在 N 型半导体中, 添加到半导体中的掺杂剂原子比半导体本身具有更多的价电子。例如, 在硅 (具有四个价电子) 中, 常见的 N 型掺杂剂是磷或砷, 它们各自具有五个价电子。

Donor = donating free electron

At the room temperature all the donors are ionized

The free electrons concentration = concentration of the donors:

$n = N_D \Rightarrow \text{Conductivity } \sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$  is given by  $N_D$  (set during fabrication)

**Extrinsic semiconductor -type P:** the semiconductor material has been doped with impurities to increase its electrical conductivity. the dopant atoms have fewer valence electrons than the semiconductor material itself. For instance, in silicon, a common P-type dopant is boron or gallium, each of which has three valence electrons.

P 型半导体是一种非本征半导体, 其中半导体材料掺杂有杂质以增加其电导率。掺杂剂原子的价电子比半导体材料本身的价电子少。例如, 在硅中, 常见的 P 型掺杂剂是硼或镓, 它们各自具有三个价电子。

Acceptor = accepting the valence electron

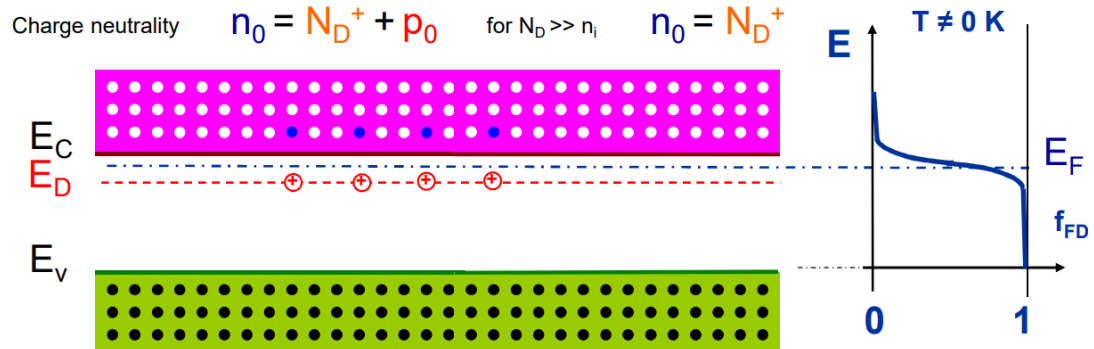
At the room temperature all the donors are ionized

Concentration of the holes = concentration of the acceptors:

$p = N_A \Rightarrow \text{Conductivity } \sigma = e \cdot n \cdot \mu_p$  given by  $N_A$  (set during fabrication)

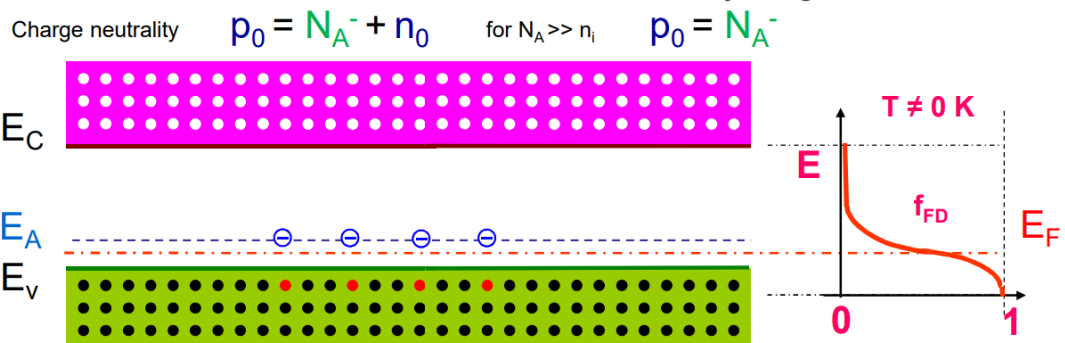
## Extrinsic semiconductor type-N

Majority charge carriers - **electrons**  
Minority charge carriers - **holes**



## Extrinsic semiconductor type-P

Majority charge carriers - **holes**  
Minority charge carriers - **electrons**



**Extrinsic semiconductor preparation:** Single crystal drawing-Cutting the wafers-Polished wafers with surface treatment and defined properties- Doping process(diffusion or Ion implantation)

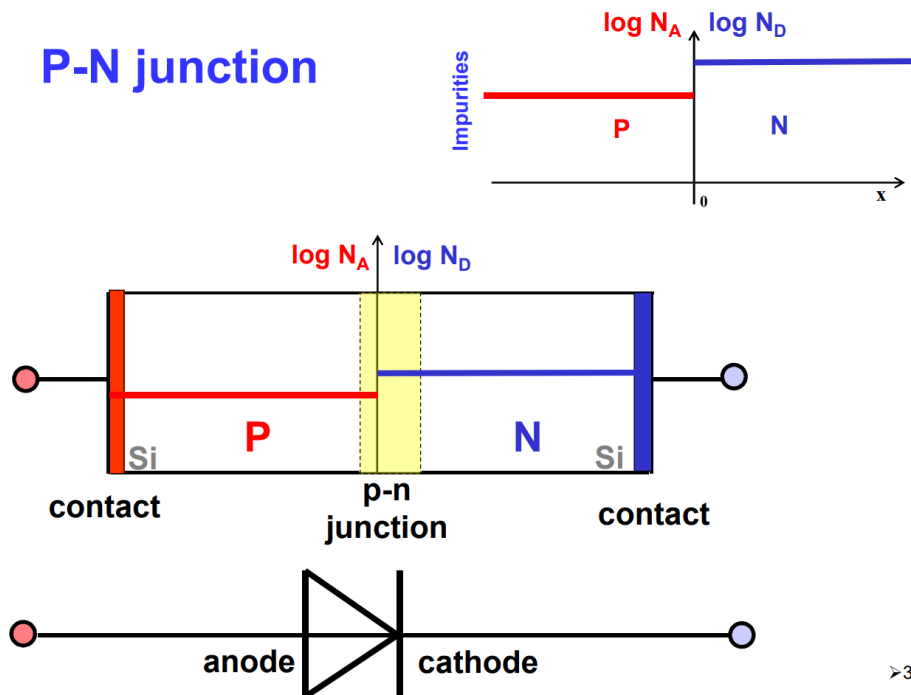
单晶拉丝-切割晶圆-经过表面处理和规定性能的抛光晶圆

**Transport of the charge carriers in semiconductors (半导体中载流子传输) :**

**Drift & Diffusion**

(漂移是由于施加电场而导致的电荷载流子的移动。扩散是电荷载流子从浓度较高的区域移动到浓度较低的区域)

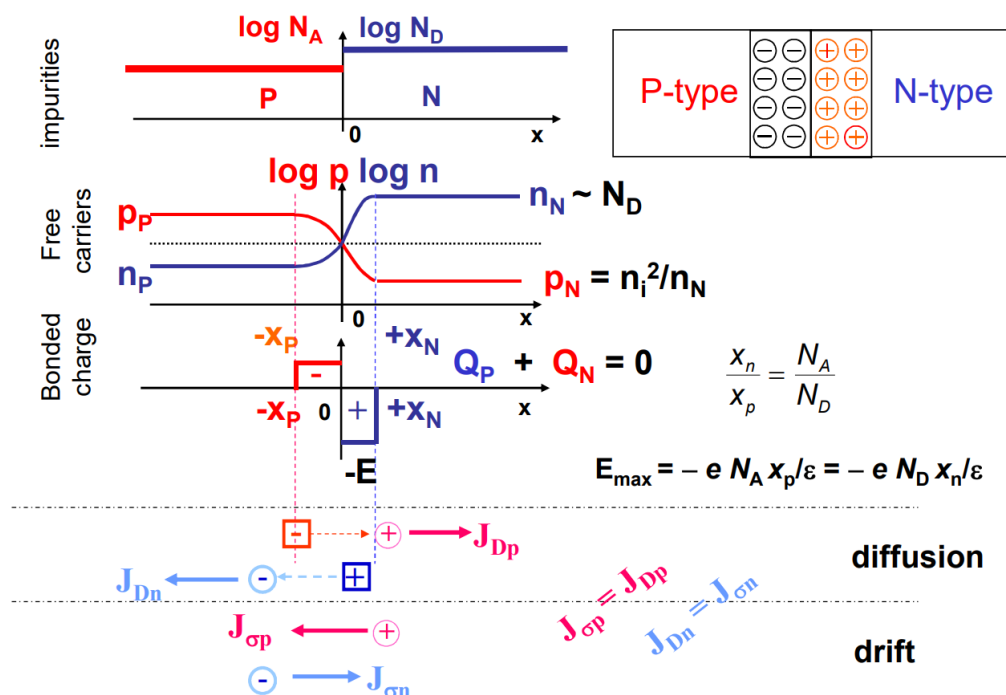
## P-N junction



➤32

**PN junction** is a fundamental element in semiconductor devices, formed by joining P-type and N-type semiconductor materials. This junction is key to the operation of various electronic components such as diodes, transistors, and solar cells. Its ability to control the flow of current and respond to external voltages makes it indispensable in the field of electronics. PN 结是半导体器件的基本元件，由 P 型和 N 型半导体材料连接而成。该结对于二极管、晶体管 and 太阳能电池等各种电子元件的运行至关重要。P 型和 N 型材料之间的相互作用赋予 PN 结独特的电学特性。它控制电流和响应外部电压的能力

### PN junction – equilibrium between diffusion and drift current



PN junction with forward voltage applied:

with the applied forward voltage  $V_F$ , the potential barrier decreases and the injection of minority charge carriers is increasing

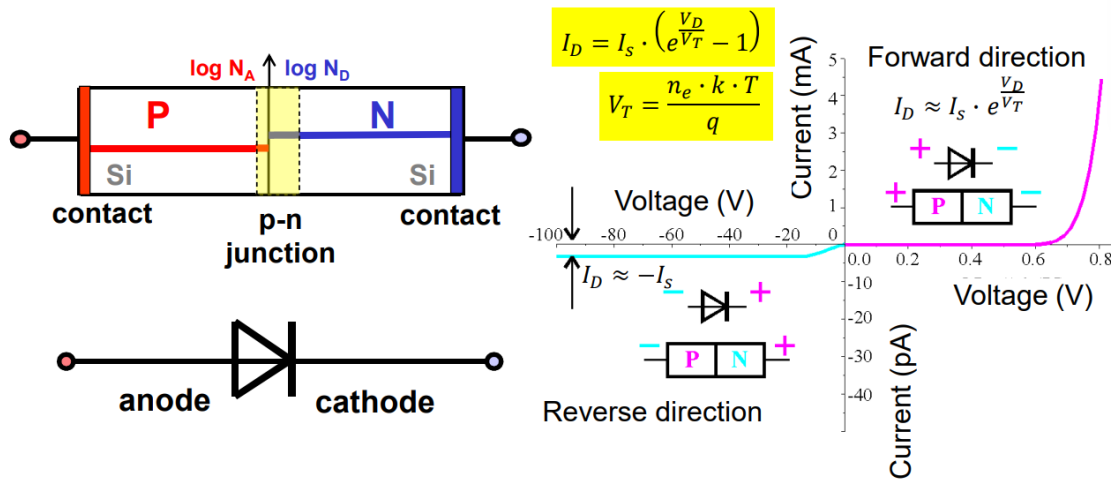
(随着施加的正向电压  $V_F$ ，势垒减小，少数载流子的注入增加)

PN junction with reversed voltage applied

with the applied voltage  $V_R$  in the reversed direction, the potential barrier increases the SCR expands and only a tiny stream of minority carriers passes through

(当外加电压  $V_R$  方向相反时，势垒增大，SCR 膨胀，只有极少量少数载流子通过)

semiconductor P – p-n junction – semiconductor N + contacts = diode



Diode rectifies voltage and current.

Ideal case:

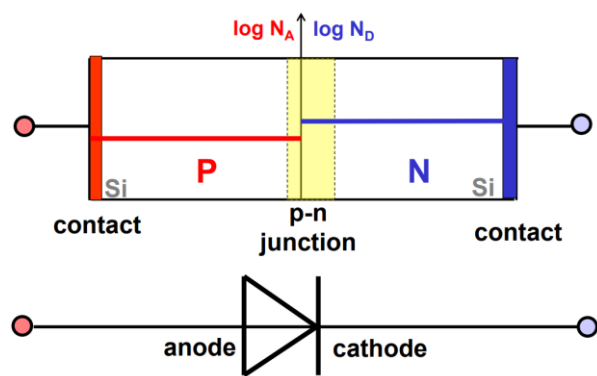
In forward orientation the current flows after threshold voltage is overcome.

In reverse orientation the current does not flows.

二极管对电压和电流进行整流。

理想情况：在正向方向上，电流在克服阈值电压后流动。在反向方向上，电流不流动。

Diode with P-N junction:

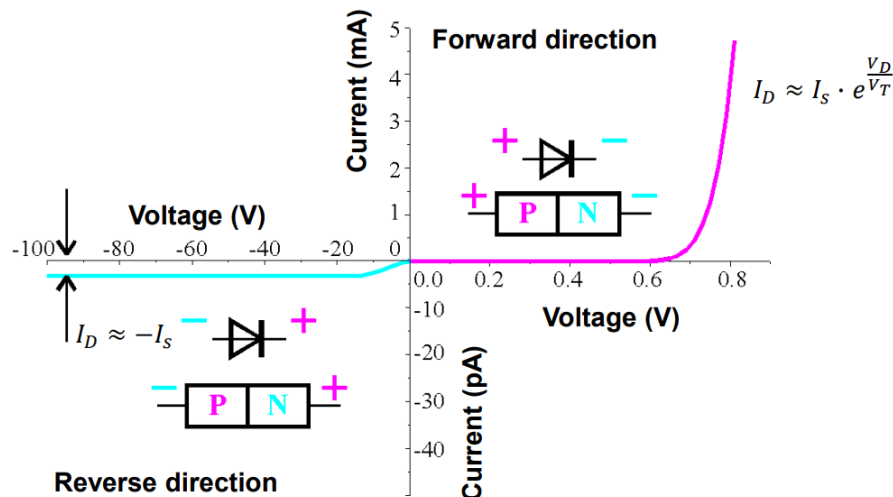


## Shockley equation

$$I_D = I_S \cdot \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{n_e \cdot k \cdot T}{e}$$

- $I_D$  - Diode current
- $V_D$  - Diode voltage
- $I_S$  - Saturation current
- $V_T$  - temperature voltage (26 mV at 25 °C)
- $n_e$  - emission coefficient (quality factor) for ideal PN junction it is 1, for real diode it is between 1 and 2
- $K$  - Boltzmann constant  $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
- $e$  - elementary charge  $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- $T$  - thermodynamic temperature in (K)



3

肖克利方程模拟了正向偏置下二极管电流和电压之间的指数关系，并且还描述了反向偏置下相对恒定的反向饱和电流。在正向偏置中，指数项占主导地位，导致电流随着电压的增加而快速增加。在反向偏置中，指数项可以忽略不计，并且电流保持接近反向饱和电流，通常是非常小的值

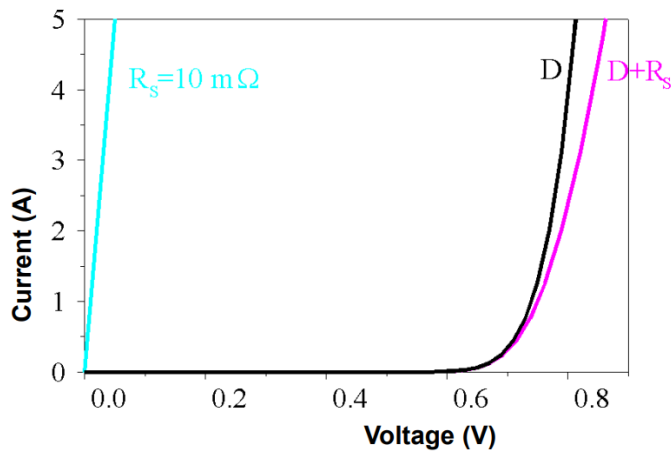
The Shockley equation models the exponential relationship between the diode current and voltage in forward bias, and it also describes the relatively constant reverse saturation current under reverse bias. In forward bias, the exponential term dominates, leading to a rapid increase in current with increasing voltage. In reverse bias, the exponential term is negligible, and the current remains close to the reverse saturation current, typically a very small value.

## Built-in voltage

$$V_D = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}\right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_{N0}}{n_{P0}}\right) = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{p_{P0}}{p_{N0}}\right)$$

**The build-in voltage** increases with concentration of donors and acceptors  
内建电压随着施主和受主浓度的增加而增加

## V-A characteristic of real diode Forward direction

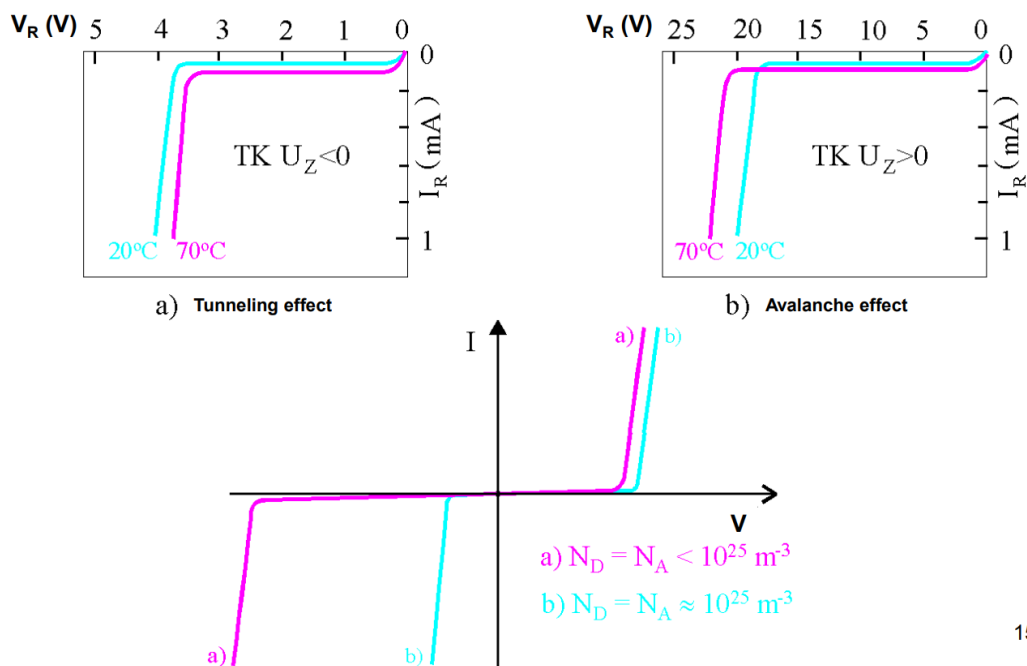


**D** = Ideal diode (p-n junction)

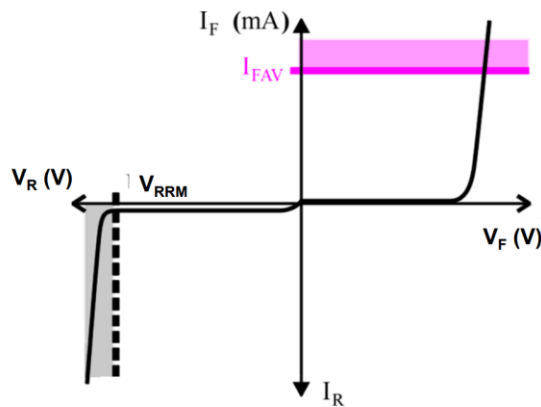
**$R_s$**  = serial resistance of device's wires, contacts and semiconductor

## V-A characteristic of real diode - reverse direction

### V-A characteristic's dependence on concentrations



## Limit parameters of the diode



$V_{RRM}$ : Reverse Repetitive Maximum voltage

$I_{FAV}$ : Forward Average current

1:

**Diode commutation** refers to the process in which a diode switches from its conducting (on) state to its non-conducting (off) state, or vice versa.

二极管换向是指二极管从导通（导通）状态切换到非导通（截止）状态或反之亦然的过程。

**Diodes:** **Bipolar:** • Both types of charge carriers

• p-n junction

**Unipolar:** • only one type of charge carriers

• junction metal – semiconductor

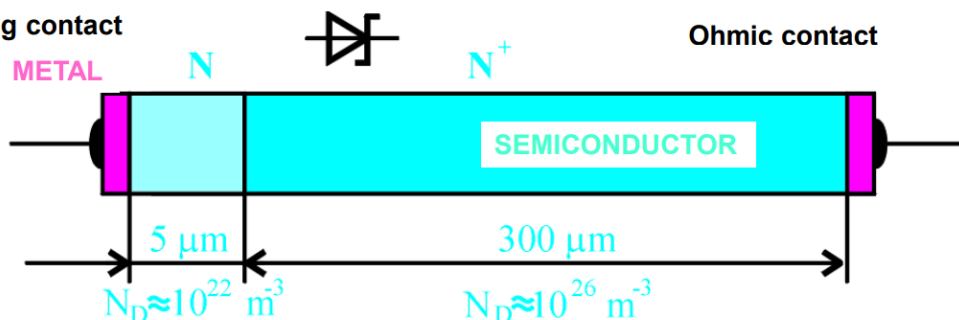
**Schottky diode:** a type of semiconductor diode with a metal-semiconductor junction

Low forward voltage drop, fast switching speed, relatively low reverse breakdown voltage.

是一种具有金属-半导体结的半导体二极管，而不是传统的 PN 二极管的半导体-半导体结。

特点是正向压降低、开关速度快、反向击穿电压相对较低。

**Rectifying contact**



**Schottky diode properties:**

**Advantages:**

- small  $V_F$  (0.25V) for small currents and small  $V_{RRM}$  (Si)
- negligible reverse recovery  $\Rightarrow$  fast switching

**Disadvantages:**

- large  $V_F$  for large currents and higher values of  $V_{RRM}$  (Si)
- low values of  $V_{RRM}$  (typically up to 200 V in silicon)



Large band-gap materials needed:

GaAs, GaP, **SiC**

$V_{RRM} \sim 600 \text{ V}, 1200 \text{ V}, \dots$

$V_F \sim 1 - 2 \text{ V}$

higher operating temperatures

# Diodes' applications

Rectification	- <i>general-purpose</i> - <i>fast recovery</i>
Zener	- <i>Voltage stabilization (reference voltage)</i>
Varicap	- <i>tuning circuits, VCO, ...</i>
Varaktor	- <i>frequency multiplication ...</i>

## Optoelectronic devices:

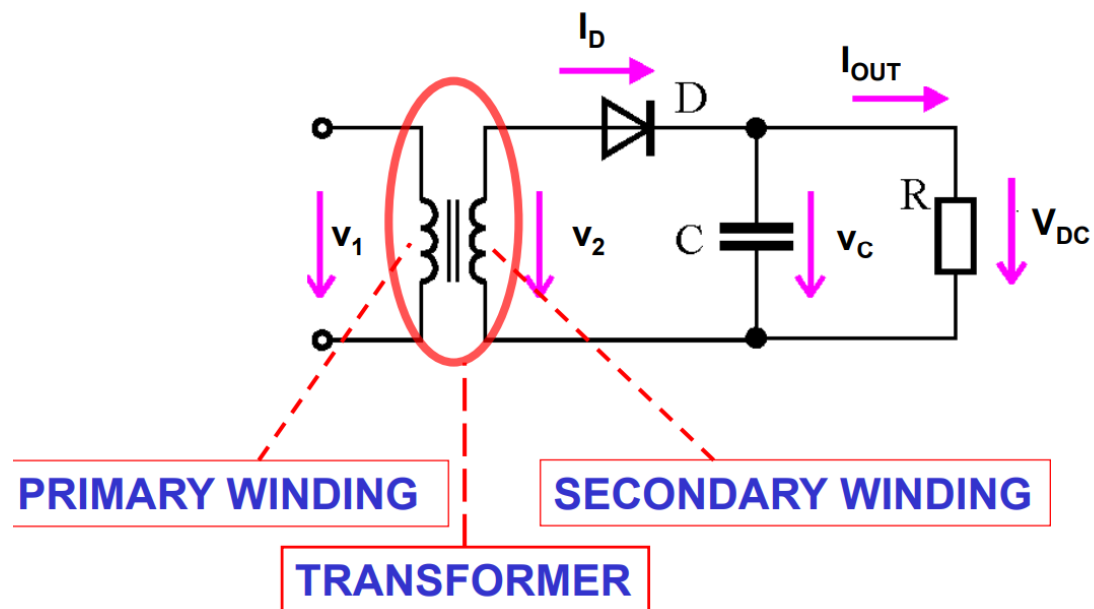
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
PD	<i>Photodiode</i>

47

**One-pulse rectifier:** a half-wave rectifier, a type of rectifier that converts alternating current (AC) to direct current (DC) using a single diode. In a half-wave rectification, only one half (either the positive or the negative half) of the AC waveform is passed through, while the other half is blocked.

单脉冲整流器通常称为半波整流器，是一种使用单个二极管将交流电 (AC) 转换为直流电 (DC) 的整流器。在半波整流中，只有交流波形的一半（正半部分或负半部分）通过，而另一半则被阻挡。

单脉冲整流器是一种基本的整流电路，是理解整流器操作和将交流电转换为直流电的过程的基本概念。然而，对于需要更高效的功率转换和更平滑的直流输出的应用，通常首选全波或桥式整流器。

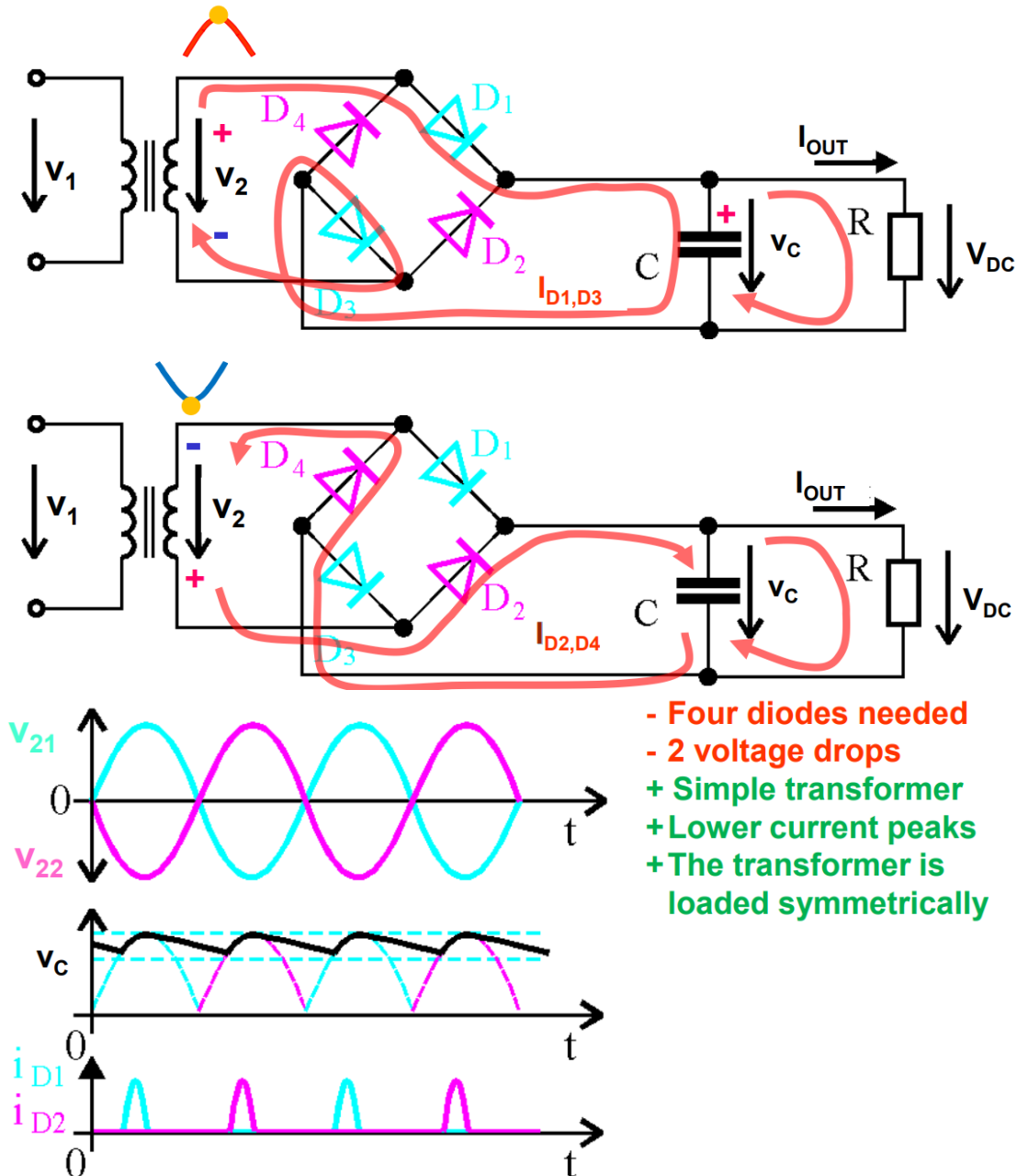




**Diode bridge (Graetz bridge) rectifier:** a type of full-wave rectifier circuit that uses four diodes arranged in a bridge configuration to efficiently convert alternating current (AC) to direct current (DC). This rectifier allows the use of both halves of the AC input waveform.

二极管桥或格雷茨桥整流器是一种全波整流电路，它使用以桥式配置排列的四个二极管来有效地将交流电 (AC) 转换为直流电 (DC)。该整流器允许使用交流输入波形的两半。

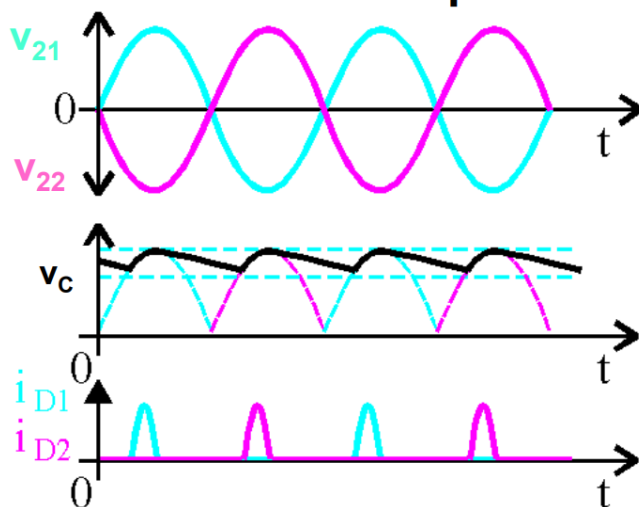
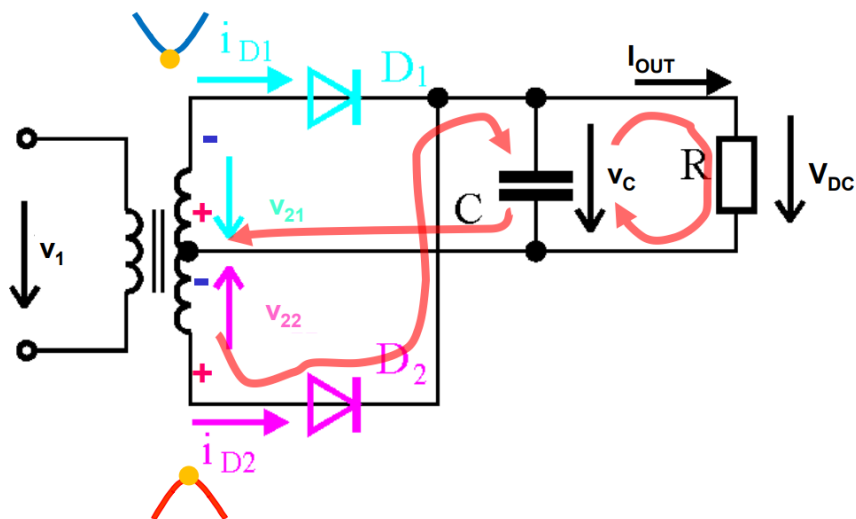
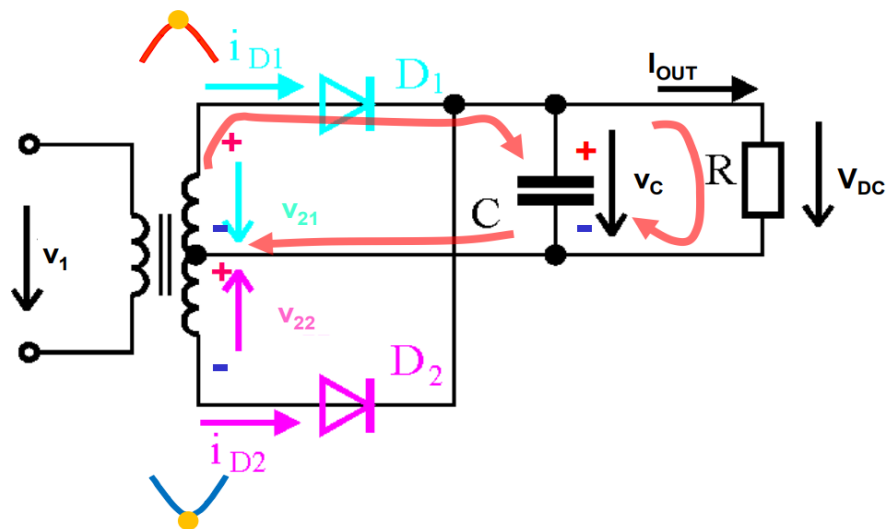
二极管桥式整流器能够利用完整的交流波形，这使得它在许多应用中比单脉冲（半波）整流器更加高效和有效。其简单而坚固的设计是现代交流到直流电源转换电子产品的主要内容。



$$I_{FAV} = I_{OUT} / 2$$

$$V_{RRM} = \sqrt{2} \cdot v_{2ef}$$

Two-pulses rectifier:



- Complex transformer design

+ 1 voltage drop

+ Lower current peaks

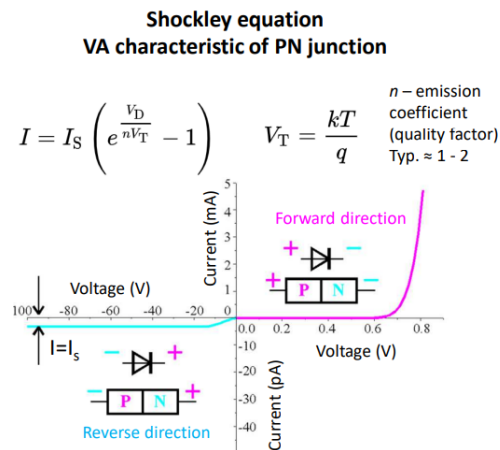
+ The transformer is loaded symmetrically

$$I_{FAV} = I_{OUT} / 2$$

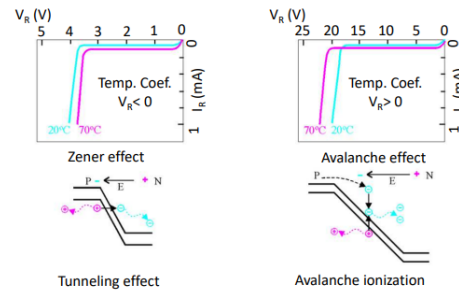
$$V_{RRM} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot v_{2ef}$$

$$i_{D1} \leq I_{D1} \quad i_{OUT} \leq I_{OUT}$$

# Diode – Shockley equation, basic model



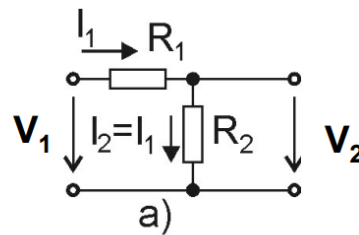
**VA characteristics of the diode – reverse direction and temperature dependency of the breakdown voltage**



**Resistive voltage divider:**

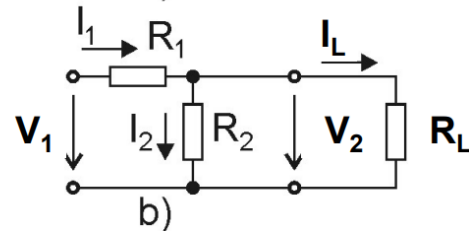
## a) Unloaded divider

$$P = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$$



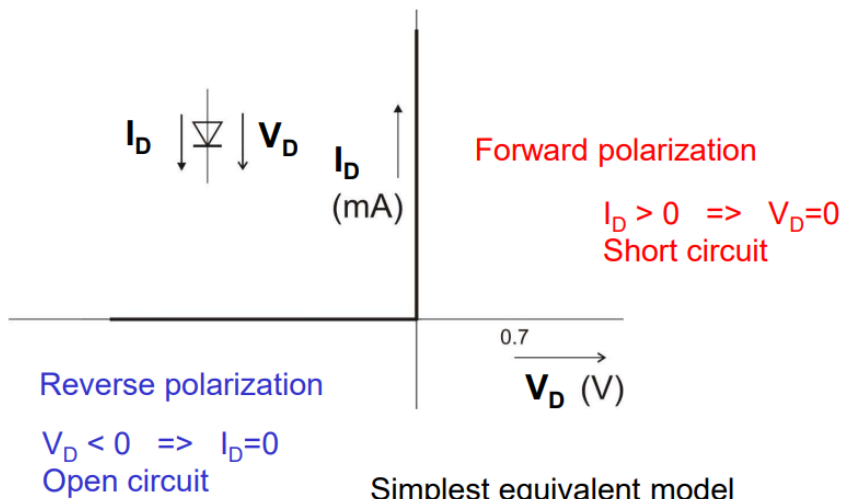
## b) Loaded divider

$$P = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_L}}$$



**Linearized model of the diode:**

## Ideal diode

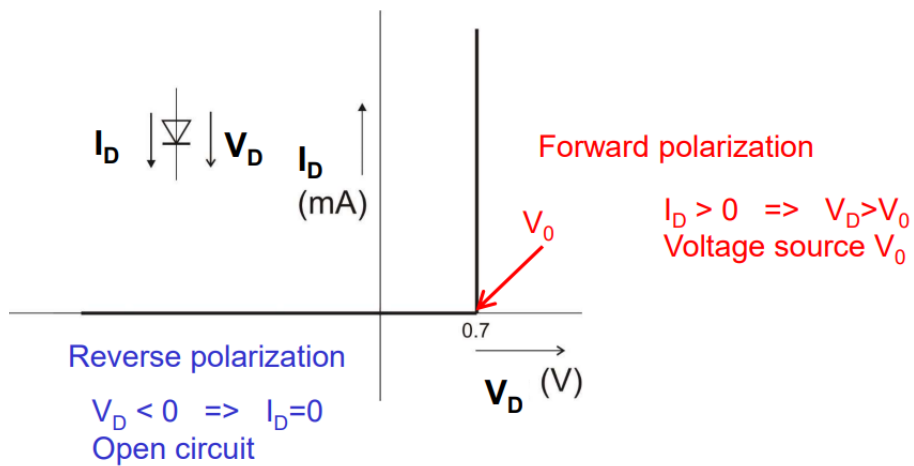


Simplest equivalent model

Good for raw estimation of the circuit's behaviour

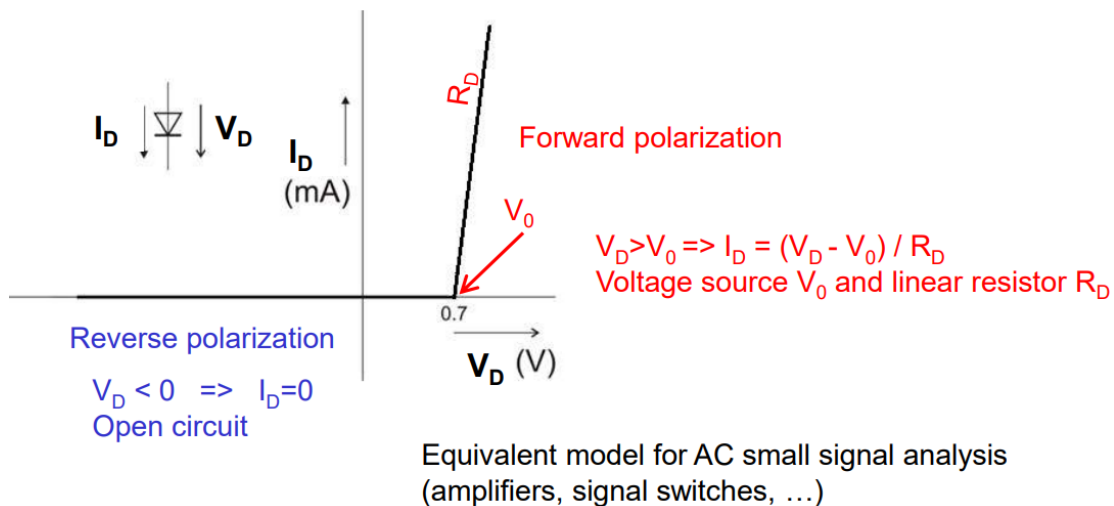
Diode behaves as a switch driven by the polarity

## Constant voltage source approximation

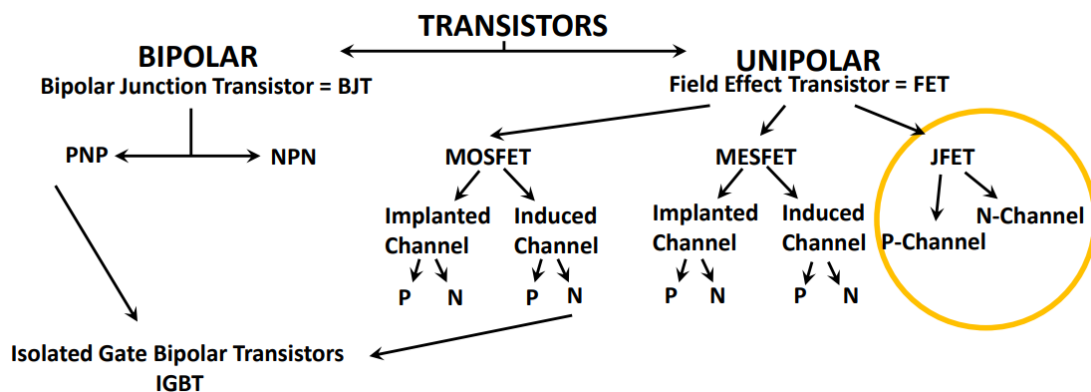


Equivalent model for DC circuits (LEDs, rectifiers, etc.)

## Linearized per parts



**Graphical method for finding the steady operating point:** An intersection between the loading characteristic and the Volt-Ampere characteristic



## TRANSISTORS:

**Bipolar:** The current is based on **both** types of a charge carriers Electrons and Holes

**Unipolar:** The current is based on **one** type of a charge carriers Electrons or Holes

## JFET (Junction Field Effect Transistor)

A type of field-effect transistor that controls the flow of current by applying a voltage to the gate terminal, which in turn affects the conductivity of a semiconductor channel. JFETs are voltage-controlled devices and are known for their high input impedance. They are used in low-noise amplification.

JFET (结型场效应晶体管) 是一种场效应晶体管，它通过向栅极端子施加电压来控制电流的流动，从而影响半导体沟道的导电性。JFET 是电压控制器件，以其高输入阻抗而闻名。它们用于各种应用，特别是需要低噪声放大的应用。JFET 是电子领域的重要组件，特别是在低噪声特性的模拟电路和应用中。

结构: JFET 由半导体沟道 (由 N 型或 P 型材料制成) 和由相反类型的半导体材料形成的

栅极组成。栅极和沟道相交的区域形成 PN 结。根据沟道所用半导体的类型, JFET 分为 N 沟道或 P 沟道。

Consists of a semiconductor channel (made of either N-type or P-type material) with a gate formed by the opposite type of semiconductor material. The region where the gate and channel meet forms a PN junction. JFETs are classified as N-channel or P-channel based on the type of semiconductor used for the channel.

**耗尽模式** Depletion Mode: JFET 在耗尽模式下工作, 这意味着沟道自然导电, 施加栅极电压会降低导电性。JFET 没有像其他一些类型的 FET 那样的增强模式。

**高输入阻抗:** High Input Impedance

**应用:** JFET 通常用于需要高输入阻抗的应用, 例如阻抗缓冲和低噪声放大器。它们还用于模拟开关、压控电阻器和射频应用。High input impedance is beneficial, such as in impedance buffering and low-noise amplifiers.

**优点和局限性:** 低噪声、高输入阻抗和简单偏置。与 MOSFET 相比, 它们通常具有较低的跨导, 并且对过压条件更敏感。Low noise, high input impedance, and simple biasing.

即使没有施加电压, 器件也能导电, 并且通道通过外部电压关闭

JFETs can be used as an electronically-controlled switches, amplifiers, or voltage-controlled resistors.

**JFET –  $V_{DS}$  and  $V_{GS}$  influence on the channel:**

$V_{DS}$  (漏极和源极之间的电压) 和  $V_{GS}$  (栅极和源极之间的电压) 在影响沟道的电导率以及流经器件的电流方面起着至关重要的作用。

$V_{GS}$  (栅源电压) 影响: 通道控制 Channel Control: 截止电压 Cutoff Voltage:

$V_{DS}$  (漏源电压) 影响: I-V 特性 Current-Voltage Characteristics 饱和和夹断 Saturation and Pinch-Off

在 JFET 中,  $V_{DS}$  和  $V_{GS}$  的综合影响决定了器件的操作。 $V_{GS}$  通过控制通道宽度来设置电流流动的电位, 而  $V_{DS}$  则影响通道建立后实际流动的电流。

JFET – applications – constant current source, small signal amplifier

**BJT – Bipolar Junction Transistor:**

a type of transistor that uses both electron and hole charge carriers. It's a fundamental building block in electronic circuits, widely used for amplification and switching. BJTs consist of three regions: the emitter, base, and collector. There are two types of BJTs, which are distinguished by the doping types of these regions: NPN and PNP.

双极结型晶体管 (BJT) 是一种同时使用电子和空穴载流子的晶体管。BJT 广泛用于放大和开关应用。它们由发射极、基极和集电极三个区域组成, 有两种类型: NPN 和 PNP。

主要特性:

**三层半导体材料:** 在 NPN BJT 中, 夹层结构由两层 N 型材料 (发射极和集电极) 之间的薄层 P 型材料 (基极) 组成。在 PNP BJT 中, 结构相反, 具有 N 型基极和 P 型发射极和集电极

**电流控制:** 从发射极流向集电极的电流 ( $I_C$ ) 由流入基极的电流 ( $I_B$ ) 控制。这种控制机制使 BJT 成为电流控制器件。

**工作模式:** BJT 可以根据结的偏置以不同的模式工作:

**有源模式:** 在此模式下 (用于放大), 发射极-基极结正向偏置, 集电极-基极结反向偏置。发射极电流大部分流向集电极, 较小的基极电流控制大得多的集电极电流。

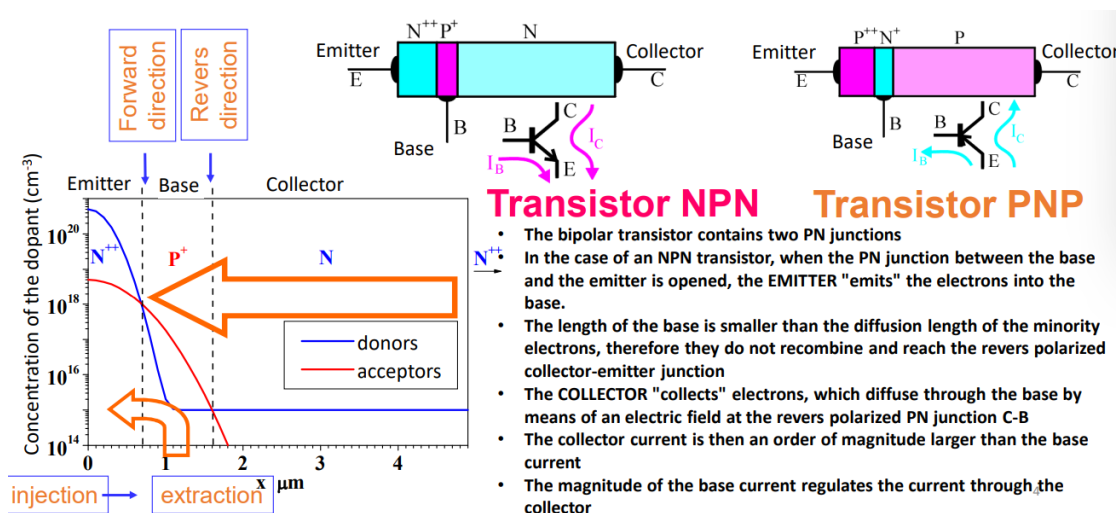
**饱和模式**: 两个结点均正向偏置。BJT 从集电极到发射极的传导能力最大, 通常用于晶体管完全“导通”的开关应用。

**截止模式**: 两个结点均反向偏置。BJT 完全“关闭”, 集电极电流接近于零, 也用于开关应用

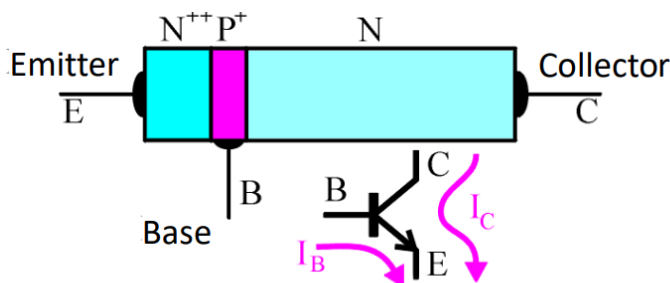
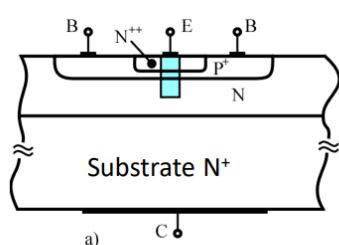
**放大**: BJT 广泛用作放大器。小的基极电流控制较大的集电极电流, 从而实现信号放大。集电极电流与基极电流之比称为电流增益, 表示为  $\beta$  (beta) 或  $h_{FE}$

**开关**: BJT 也用作数字电路中的开关。它们可以在截止 (关闭状态) 和饱和 (开启状态) 模式之间快速切换。

BJT 是模拟和数字电子产品中的基本元件, 它们作为放大器和开关的功能使其用途广泛并广泛用于各种电子设备和系统



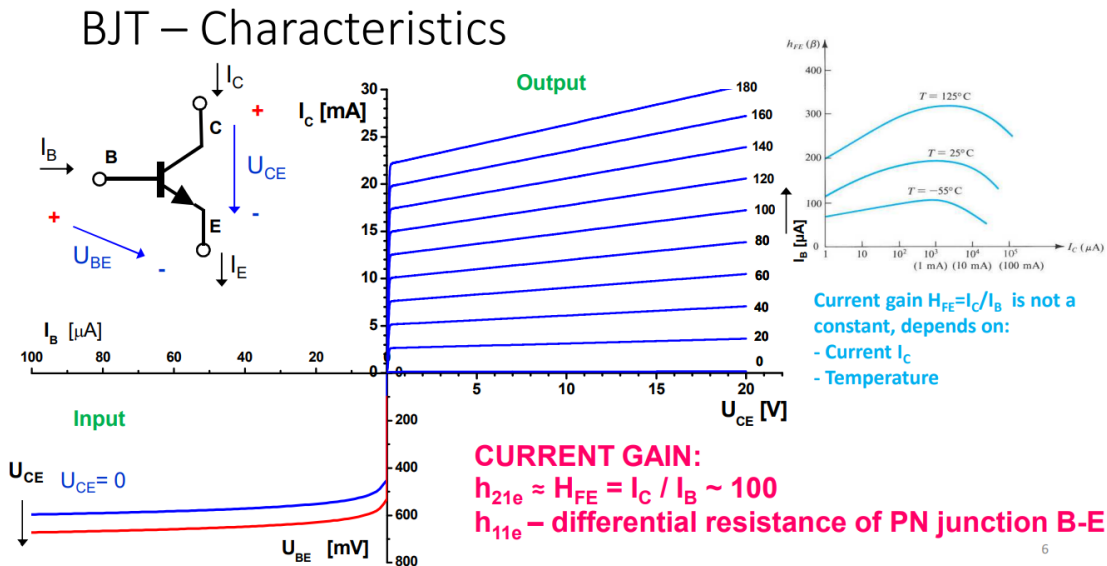
- 双极晶体管包含两个 PN 结
- 对于 NPN 晶体管, 当基极和发射极之间的 PN 结打开时, 发射极将电子“发射”到基极中。
- 基极的长度小于少数电子的扩散长度, 因此它们不会复合并到达反向极化的集电极-发射极结
- 收集器“收集”电子, 电子通过反向极化 PN 结 C-B 处的电场扩散通过基极
- 集电极电流比基极电流大一个数量级
- 基极电流的大小调节通过集电极的电流



## Transistor NPN

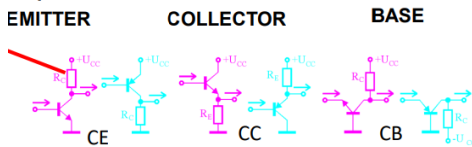
- 第一个晶体管是对称的, 因此集电极和发射极没有区别 (考虑到技术实现的可能性)
- 现代晶体管是不对称的 - 在反向模式下使用时, 增益和击穿电压显著降低
- 现代晶体管的不对称性主要是由于发射极的掺杂浓度较高 (与集电极相比)
- 与基极相比, 发射极中的掺杂剂浓度越高, 发射极的发射系数就越高
- 较低的收集者捐赠有助于创建广泛的 DL 和更好的电荷载流子集合, 这些电荷载流子已

## 通过基础扩散



- 根据我们连接输入信号的方式、从哪里获取输出信号以及晶体管的哪个端子接地，我们区分了三个基本放大级（CE、CC、CB）
- 调节级 (RS) 是一个特殊的连接 - 原理是公共底座连接，只是输入输出端子互换了。它用于抑制干扰 - 它会衰减收集器上存在的交流信号。负载连接到发射极。该连接用于直流稳压器

Amplifier with common:



- 我们必须始终将晶体管设置为静态工作点
- 我们使用阻塞来确定晶体管的哪个端子将针对小交流信号接地
- 电容器 CB
- 使用耦合电容器 CV1 和 CV2，我们确定放大器的输入和输出的连接位置
- CB、CV1、CV2 的值必须足够大，以免限制放大器的频率响应
- 对于交流分析，我们通过短接隔直电容器和耦合电容器、短接直流电压并用相应的 ELC 替换晶体管来修改图表
- 然后可以执行小交流信号放大的分析 - 例如节点电压法

## MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

A type of field-effect transistor (FET) that is widely used in electronic devices for switching and amplifying signals. 是场效应晶体管 (FET) 的一种，广泛用于电子设备中用于开关和放大信号。

特点: high input impedance and are voltage-controlled devices.

特点: 高输入阻抗，并且是电压控制器件

结构: MOSFET 由三个端子(three terminals)组成: 源极、漏极和栅极(the source, the drain, and the gate)。它的源极和漏极之间有一个半导体沟道(semiconductor channel)，可以是 N 型或 P 型材料。栅极通过一层薄薄的氧化物 oxide (通常是二氧化硅) 与沟道绝缘，MOSFET



因而得名。

类型：MOSFET 根据沟道材料分为两种主要类型：

-N 沟道 MOSFET (N-Channel MOSFET)：沟道由 N 型半导体材料制成，电子是主要电荷载流子。N 沟道 MOSFET 通常比 P 沟道 MOSFET 速度更快且导通电阻更低。

-P 沟道 MOSFET (P-Channel MOSFET)：沟道由 P 型材料制成，空穴是主要载流子。P 沟道 MOSFET 用于需要与 N 沟道器件互补运行的应用。

工作模式：MOSFET 可以在两种模式下工作：

-增强模式(Enhancement Mode)：最常见的类型，当栅源电压为零时，器件通常处于关闭状态（不导通）。向栅极施加适当的电压可以增强沟道的导电性。

-耗尽模式(Depletion Mode)：当栅源电压为零时，器件通常处于导通状态，向栅极施加电压会降低沟道的电导率。

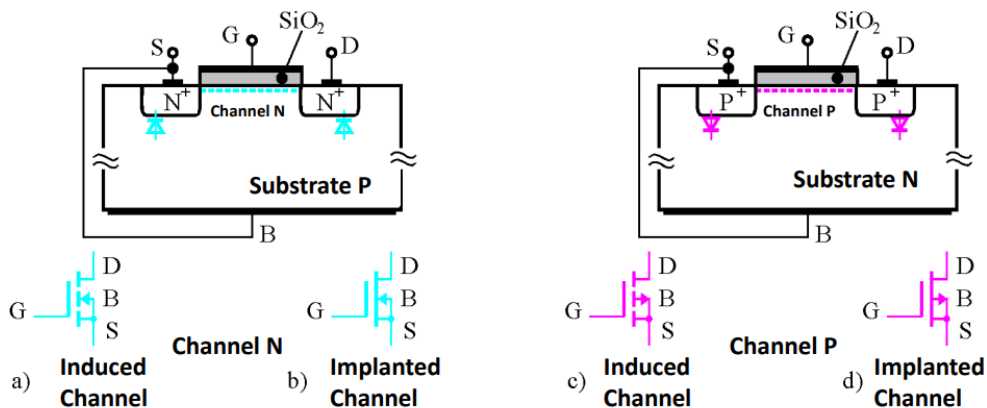
高输入阻抗：绝缘栅极导致非常高的输入阻抗，这意味着 MOSFET 需要很少的电流来控制栅极，并且不太可能降低前级的负载。

应用：MOSFET 应用广泛，包括电源转换、放大器、数字电路以及各种电子设备中的开关。由于尺寸小、功耗低，它们在集成电路中特别受欢迎。(power conversion, amplifiers, digital circuits, switches)

优点：MOSFET 具有快速开关速度、高效率以及与低压逻辑电平的兼容性，使其适用于现代数字和模拟电路。fast switching speeds, high efficiency, compatibility with low-voltage logic levels

MOSFET 技术一直是现代电子技术进步的基础，有助于各种电子设备的小型化和性能改进

- MOS 结构是一般结构 MIS（金属绝缘体半导体）的特例
- 在栅极上施加正偏压的情况下，来自半导体表面的空穴被推向半导体内部（耗尽态），随后来自半导体体的少数电子被吸引 - 在栅极下方，电导率从 P 变化到 N（反转状态）。
- 从弱反转过渡到强反转所需的  $V_{GS}$  电压称为晶体管的阈值电压  $V_{th}$
- 晶体管的输出特性与 JFET 晶体管类似——我们区分线性（三极管）区域和饱和区域。
- 传输特性近似为二次抛物线
- 由于有氧化层，输入特性等于开路特性



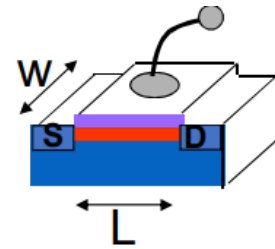
**Induced channel – the channel must be formed using the external voltage**

**Implanted channel – the channel is build-in during fabrication process by putting impurities. External voltage is then modulating the channel**

感应通道——必须使用外部电压形成通道

植入通道——通道是在制造过程中通过放入杂质而内置的。 然后外部电压调制通道

## MOSFET - Channel N



### MOSFET – equivalent linear circuit



y-parameters are optimal:  $i_1 = y_1 (v_1, v_2) = 0$   
**There is no input current.**  $i_2 = y_2 (v_1, v_2)$

For small changes only one equation is applicable:

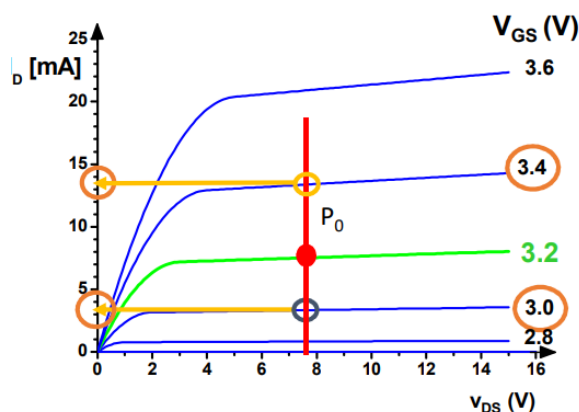
$$\Delta i_2 = y_{21} \Delta v_1 + y_{22} \Delta v_2$$

### MOSFET – equivalent linear circuit

For small changes only one equation is applicable:

$$\Delta i_D = y_{21} \Delta v_{GS} + y_{22} \Delta v_{DS} = 0$$

$$y_{21S} \approx \left( \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \right)_{\Delta v_{DS}=0} \bigg|_{P_0}$$



Differential slope at constant output voltage mA/V (or incorrectly mS).

$$y_{21S} = \left( \frac{(13,5 - 3,5) \cdot 10^{-3}}{3,4 - 3,0} \right)$$

$$y_{21S} = 25 \text{ mA/V}$$

**Class A amplifier:** is a type of electronic amplifier characterized by its high linearity and low distortion. In a Class A amplifier, the output transistors conduct electrical current for the entire cycle (360 degrees) of the input signal. This means that the active elements (transistors or tubes) are always on and never completely shut off, regardless of whether there is an input signal.

A 类放大器是一种电子放大器，其特点是高线性度和低失真。在 A 类放大器中，输出晶体管在输入信号的整个周期（360 度）内传导电流。这意味着无论是否有输入信号，有源元件（晶体管或电子管）始终处于开启状态并且永远不会完全关闭。

**特性：**

**线性度和低失真:** A 类放大器提供出色的线性度，这意味着输出信号忠实再现输入信号，且失真度最小。这会产生高质量的声音再现，这在高保真音频应用中尤其理想。

**连续传导:** 在 A 类操作中，输出设备在整个输入信号周期内连续传导。这种连续传导避免了输出设备打开和关闭的其他放大器类别中可能出现的交叉失真。

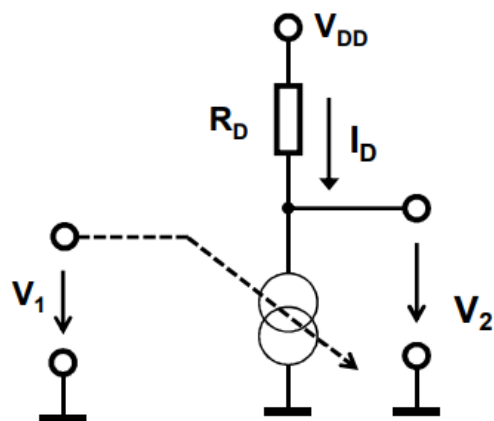
**效率低下和发热(inefficiency and heat):** A 类放大器的效率相对较低，在基于晶体管的设计中最大理论效率约为 25-30%，在基于电子管的设计中甚至更低。它们会产生大量热量，因为即使没有输入信号，输出设备也始终处于导通状态。

**偏置 biasing:** A 类放大器中的输出设备被偏置，以便它们在输入信号的整个范围内工作在线性区域。这需要将静态电流（没有输入信号时流动的电流）设置在确保器件始终处于活动区域的水平。

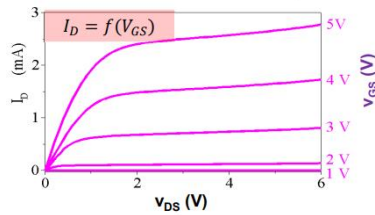
**应用:** high-end audio and studio equipment A 类放大器通常用于音质比效率更重要的应用，例如高端音频和录音室设备。然而，由于它们效率低且发热，它们在便携式或功率敏感型应用中不太常见。

**简单性:** A 类放大器电路比其他放大器类别更简单，使其成为可以管理低效率和发热的低功耗应用的良好选择。

- 放大器基于单个晶体管（JFET、BJT、MOSFET），它代表压控电流源
- 输出电流通过串联电阻（ $R_D$ ）转变成输出电压
- 输出电压  $V_2$  由电阻器上的压降降低的电源电压给出：
- 因此，输出交流信号与输入信号反相
- 为了获得输出电压的最大幅度，需要设置静态电流，使电压  $V_2$  对应于电源电压  $V_{DD}$  的一半
- 放大器的能效较低，因为即使在零输入信号下电流也会通过晶体管 - 它适合用作前置放大器和功率级的激励
- 必须使用耦合电容器提供输入交流信号和输出信号，以消除直流分量



# Class A amplifier – voltage gain



- The output characteristics of the MOSFET in the saturation region correspond to the characteristics of the current source (for sufficiently large  $V_{DS}$  voltages)

Instantaneous value of the output voltage :  $V_2 = V_{DD} - R_D \cdot I_D$

AC component of output voltage:  $\Delta V_2 = -R_D \cdot \Delta I_D$   $\Delta I_D = g_m \cdot \Delta V_{GS}$

$$\Delta V_2 = -R_D \cdot g_m \cdot \Delta V_{GS}$$

$$\Delta V_{GS} = \Delta V_1$$

$$A_V = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} = \frac{-R_D \cdot g_m \cdot \Delta V_{GS}}{\Delta V_{GS}}$$

$$A_V = -R_D \cdot g_m$$

- $R_D$  is resistance of the component,
- $g_m$  is transconductance and it is given by the steady operating point of the transistor

- This relationship is generally valid regardless of the transistor's type - compare with the BJT where it applies:  $A_V = -\frac{h_{21e} \cdot R_C}{h_{11e}}$ , where  $h_{21e}$  is the dimensionless current gain and  $h_{11e}$  corresponds to the input resistance in ohms

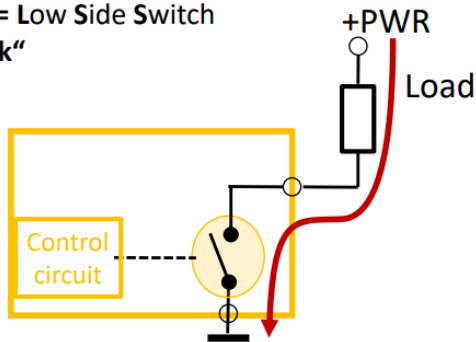
14

## Switch configuration

OC / OD = Open Collector / Drain

LSS = Low Side Switch

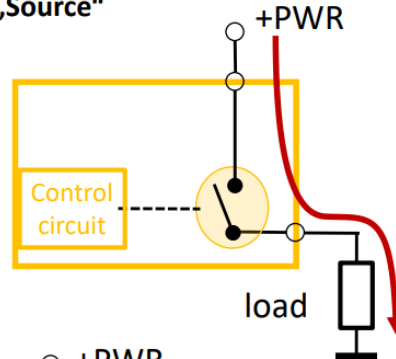
„Sink“



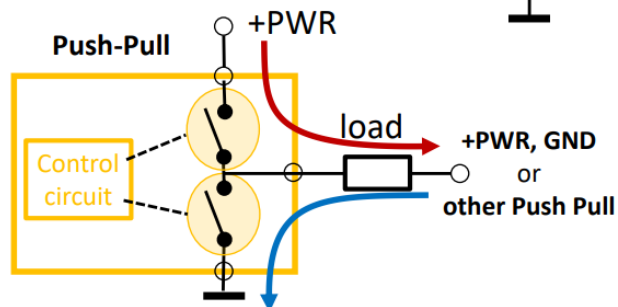
OE / OS = Open Emitter / Source

HSS = High Side Switch

„Source“

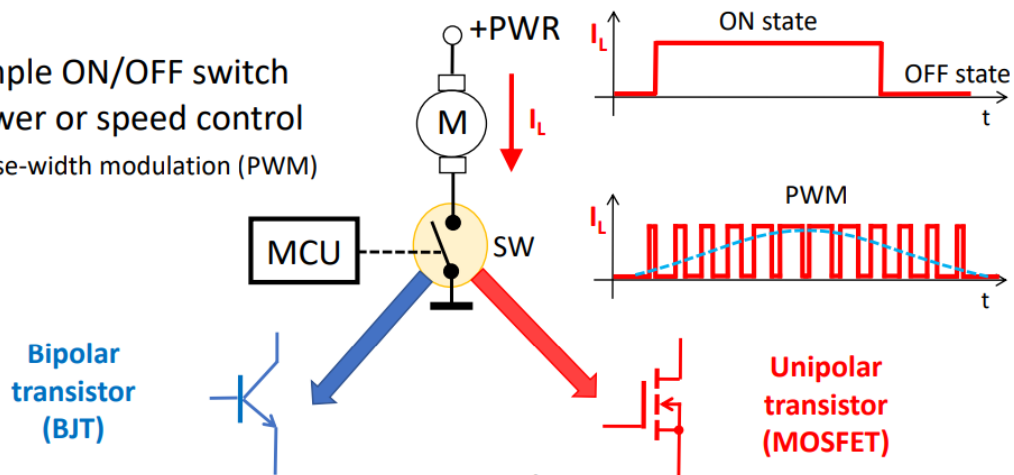


Push-Pull



## Application example

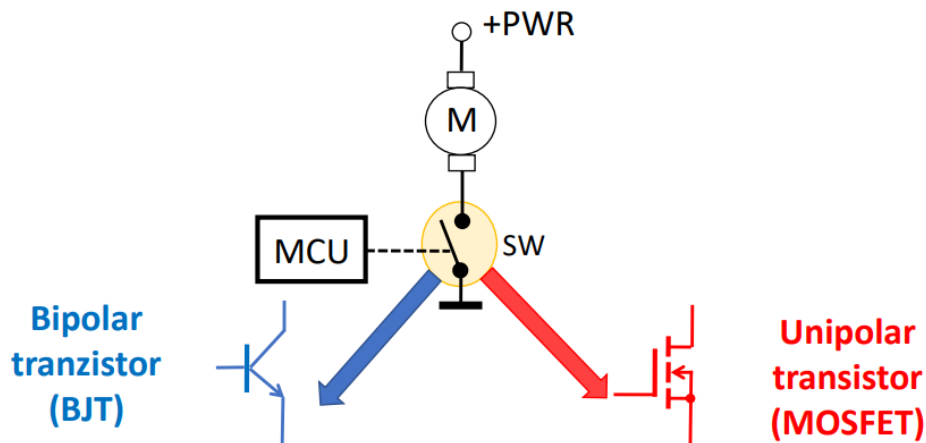
- Simple ON/OFF switch
- Power or speed control  
= pulse-width modulation (PWM)



### Demands:

- Negligible voltage drop on the switch during ON state  
= minimum static power losses on the transistor during the ON state
- Maximum speed of switching  
= minimalization of dynamic losses on the switch
- Minimum power to control the switch  
= minimum loading of the control circuit
- ON 状态期间开关上的压降可以忽略不计 = 晶体管导通状态期间的最小静态功率损耗
- 最大切换速度 = 开关动态损耗最小化
- 控制开关的最小功率 = 控制电路的最小负载

## Application example – BJT or MOSFET ???



- ☺ Small  $V_{CE(sat)}$
- ☺ Small  $V_{BE}$  (typ. 0.8V)
- ☹ Slow ON/OFF switching
- ☹ Large steady current  $I_B$

☹ Usually NOT preferred

- ☺ Small  $R_{DS(on)}$
- ☺ Fast ON/OFF switching
- ☹ Large current pulse  $I_G$
- ☹ Needs large  $V_{GS}$

☺ Usually better then BJT

## Application example – Some driving circuit is needed !!!

BJT/MOSFET 功率晶体管无法直接从常规微控制器驱动 (仅适用于 IC 或 ID 最大 1 A 的低功率开关晶体管)

### Power MOSFET – driving circuit (driver):

功率 MOSFET 驱动器是用于控制功率 MOSFET 栅极的专用电路。是电压控制器件，需要一定的栅极电压才能有效地导通和关断。MOSFET 驱动器为栅极提供必要的电压和电流，以高效、快速地开关 MOSFET，这在高速和高功率应用中尤其重要。

### Application example

**Inductive load => needs a protection !!!**

Inductive load switching – protection:

#### Protection using Clamp Diode

The diode limits the voltage induced during switching

#### Protection using RC network

RC circuit limits the voltage increase speed

#### RCD Snubber

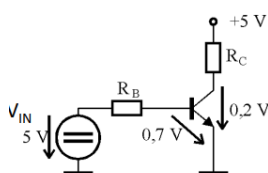
The capacitor limits the speed of voltage increase (charging via D, discharge via R)

- 当电路中断时，电流充电电感器充当电流源
- 关闭后线圈的磁场开始减小，从而产生感应 - 线圈中感应出高电压，该电压与变化率和电流大小成正比
- 感应出较大的电压峰值，会损坏晶体管，因此必须对其进行保护
- 该效应可用于升压（升压）转换器的设计

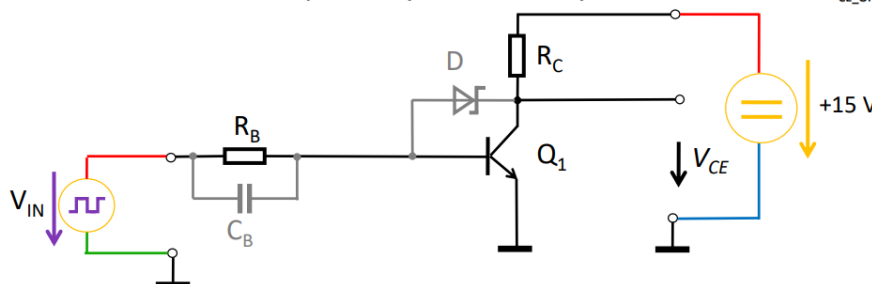
BJT and MOSFET Switches comparison

BJT – Switch, Saturation

## BJT – Switch, Saturation



- The resistance  $R_B$  must be large enough to fully open the transistor (to provide given  $I_C$ )
- $R_B = (V_{IN} - 0.7V) / I_B$ ,  $I_B = I_C / H_{21E}$
- In saturation mode,  $V_{BE} > 0.7V$  and  $V_{BC} > 0.7V$ . Both junctions are opened.
- In saturation mode,  $H_{21E}$  decreases significantly, so a large  $I_B$  is needed
- To close the transistor again, the charge needs to be sucked out from the PN junctions - it can be accelerated using  $C_B$
- The saturation mode is undesirable for fast switching (switching off) - saturation can be prevented by means of a Schottky diode between B and C, but  $V_{CE,ON}$  will increase

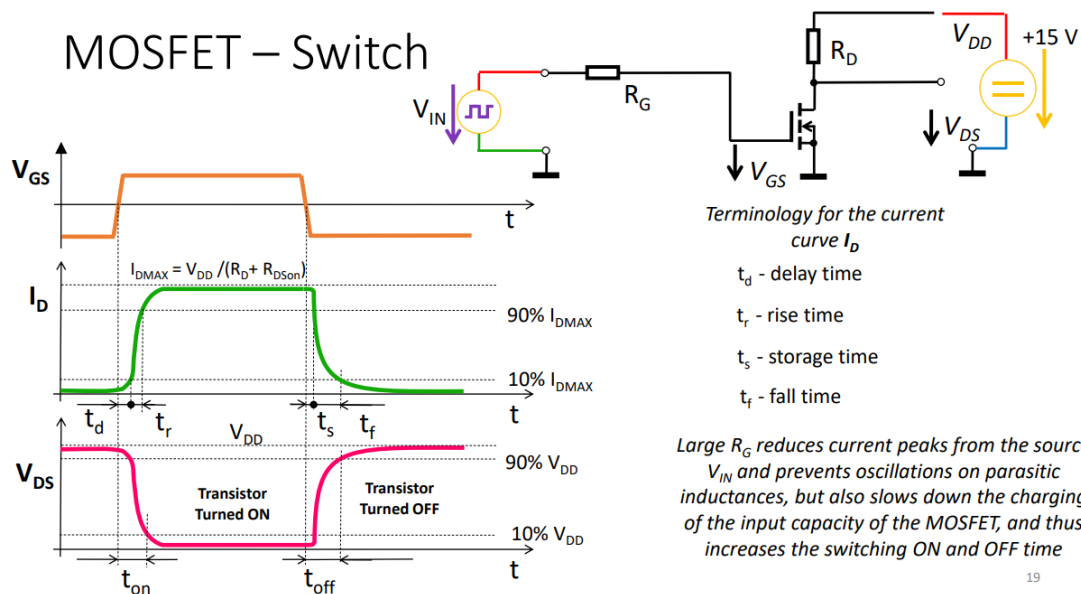


18

- 电阻  $R_B$  必须足够大以完全打开晶体管（以提供给定的  $I_C$ ）
- $R_B = (V_{IN} - 0.7V) / I_B$ ,  $I_B = I_C / H_{21E}$
- 在饱和模式下， $V_{BE} > 0.7V$  且  $V_{BC} > 0.7V$ 。两个结均打开。



- 饱和模式下， $H_{21E}$  显著下降，因此需要较大的  $I_B$
- 要再次关闭晶体管，需要从 PN 结吸出电荷 - 可以使用 CB 加速
- 饱和模式不适合快速开关（关闭） - 可以通过 B 和 C 之间的肖特基二极管来防止饱和，但  $V_{CE\_ON}$  会增加



大的  $R_G$  可降低来自源极  $V_{IN}$  的电流峰值并防止寄生电感振荡，但也会减慢 MOSFET 输入电容的充电速度，从而增加开关导通和关断时间

**Operational amplifier:** 运算放大器，通常称为运 op-amp，是模拟电路中通用且广泛使用的电子元件。它是一种具有非常高增益的电压放大器，设计用于与外部反馈组件（例如电阻器和电容器）一起使用，以控制其行为和功能。

is a versatile and widely used electronic component in analog circuitry. It is a type of voltage amplifier with a very high gain and is designed to be used with external feedback components, such as resistors and capacitors, to control its behavior and functionality.

**High Gain:** Op-amps have a very high voltage gain, often in the order of tens or hundreds of thousands. This high gain allows for precise amplification of small input signals.

**Differential Input:** Op-amps have two input terminals: inverting ( $-$ ) and non-inverting ( $+$ ).

The output voltage of the op-amp is proportional to the difference in voltage between these two inputs.

**High Input Impedance:** The input impedance of an op-amp is typically very high, minimizing the current drawn from the input sources and making it suitable for a wide range of signal sources.

**Low Output Impedance:** The low output impedance of an op-amp allows it to drive various loads without significantly affecting the output voltage.

**Feedback Control:** Op-amps are usually used with feedback components connected between the output and one of the inputs. Feedback determines the overall gain and behavior of the circuit, allowing the same op-amp to be used in different configurations, such as amplifiers, filters, integrators, differentiators, and oscillators.

**Offset Voltage and Current:** Op-amps have small offset voltages and currents (imperfections that cause the output to deviate from zero when the inputs are equal) which can be critical in high-precision applications.

**Power Supply:** Op-amps typically require a dual (positive and negative) power supply, although there are single-supply op-amps designed to operate with a single voltage source.

**Common Applications:** Op-amps are used in a wide range of applications, including signal conditioning, active filtering, analog computing, and in complex circuits like analog-to-digital converters (ADCs) and digital-to-analog converters (DACs).

Operational amplifiers are fundamental building blocks in both analog and digital electronics due to their versatility, reliability, and ease of use. They are available in a variety of integrated circuit (IC) packages, each with different characteristics tailored to specific applications.

**高增益:** 运算放大器具有非常高的电压增益，通常为数万或数十万的量级。这种高增益可以精确放大小输入信号。

**差分输入:** 运算放大器有两个输入端子：反相 (-) 和同相 (+)。运算放大器的输出电压与这两个输入之间的电压差成正比。

**高输入阻抗:** 运算放大器的输入阻抗通常非常高，最大限度地减少从输入源汲取的电流，使其适用于各种信号源。

**低输出阻抗:** 运算放大器的低输出阻抗使其能够驱动各种负载，而不会显著影响输出电压。

**反馈控制:** 运算放大器通常与连接在输出和输入之一之间的反馈组件一起使用。反馈决定了电路的整体增益和行为，允许相同的运算放大器用于不同的配置，例如放大器、滤波器、积分器、微分器和振荡器。

**失调电压和电流:** 运算放大器具有较小的失调电压和电流（当输入相等时，这些缺陷会导致输出偏离零），这在高精度应用中至关重要。

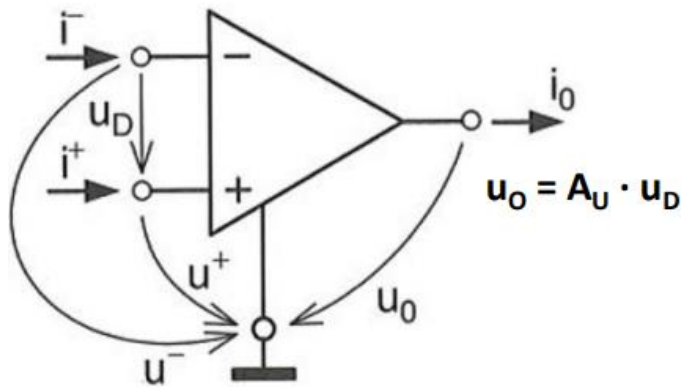
**电源:** 运算放大器通常需要双电源（正和负）电源，尽管也有设计用于使用单电压源运行的单电源运算放大器。

**常见应用:** 信号调理、有源滤波、模拟计算以及模数转换器 (ADC) 和数模转换器 (DAC) 运算放大器因其多功能性、可靠性和易用性而成为模拟和数字电子产品的基本构建模块。它们采用各种集成电路 (IC) 封装，每种封装都具有针对特定应用定制的不同特性。

运算放大器是一种通用的、通用的放大器件。

- 它是一个高增益、低输入干扰的直流放大器，能够在闭环反馈环路中稳定运行。
- 抽象，我们称之为“理想运算放大器”，经常用于参数的近似估计和系统设计。
- 实际运算放大器的参数仅接近理想值
- 在分析实际 OA 时必须考虑到非理想参数





- The real operational amplifier is based on a differential amplifier, a gain stage in class - A and an output stage.
- Classic operational amplifier requires bipolar power supply (positive  $V_{S+}$  and negative  $V_{S-}$ )
- The real properties of the operational amplifier are divided into static (input voltage and current asymmetry, input impedance, limited gain, output resistance, output offset,...) and dynamic (frequency limitation, phase shift, slew rate, ...)
- 真正的运算放大器基于差分放大器、A 类增益级和输出级。
- 经典运算放大器需要双极电源（正  $V_{S+}$  和负  $V_{S-}$ ）
- 运算放大器的实际属性分为静态（输入电压和电流不对称、输入阻抗、有限增益、输出电阻、输出偏移等）和动态（频率限制、相移、转换速率等）

#### Operational Amplifier – Real static properties:

- 输入电压和电流不对称表现为放大器的输出偏移 - 可以通过以下方式进行补偿  
特殊端子 (P1) 或由外部元件
- 通过在两个输入端 ( $R_1$ 、 $R_2$ ) 使用相同的阻抗, 可以最大限度地减少双极晶体管中的电流不对称性
- 当电压过励磁时, 输出信号受供电电压最大值限制
- 输出过载时, 由于输出端口内阻的影响, 输出电压下降
- 对于直流电流, 最大增益  $A_U$  通常大于 105

#### Operational Amplifier - Transimpedance amplifier:

- 它将电流转换为电压
- 在正确负反馈的情况下, 反相输入端的电压始终接近于零, 因此它可以用作电流吸收器
- 输入电流不能直接流向地, 而必须通过电阻  $R_1$ , 因此:
- 电阻器  $R_2$  和电容器  $C_1$  用于确保稳定性 (消除容性负载的影响, 例如由以下 ADC 引起的)
- 光电二极管充当电流源, 由照明控制 - 它必须工作以短路 ( $V_{AK} \rightarrow 0 \text{ V}$ ) 或反向极化 ( $V_{AK} < 0 \text{ V}$ )。在电压模式 ( $I_{AK} \rightarrow 0 \text{ V}$ ) 下, 光电二极管具有很强的非线性。

#### Operational Amplifier – Current source:

- 它将电流转换为电压
- 在正确负反馈的情况下, 反相输入端的电压始终接近于零, 因此它可以用作电流吸收器
- 输入电流不能直接流向地, 而必须通过电阻  $R_1$ , 因此:
- 电阻器  $R_2$  和电容器  $C_1$  用于确保稳定性 (消除容性负载的影响, 例如由以下 ADC 引起)

的影响)

- 光电二极管充当电流源，由照明控制 - 它必须工作以短路 ( $V_{AK} \rightarrow$  电流源 - 电流流出到负载)
- 负反馈保证电阻器  $R_1$  和  $R_3$  上的电压相同
- 电流大小由分压器  $V_{cc}$ 、 $R_1$  和  $R_2$  以及  $R_1$ 、 $R_3$  之间的比率设置。
- 例如，它适合用作精密电阻温度传感器 (Pt100、Pt1000、Ni1000...) 的电流偏置。
- 双极型和单极型晶体管均可使用 (对于双极型晶体管，必须考虑 由基极电流引起的精度晶体管)
- 与仅由 JFET 晶体管 0 V) 或反向组成的电流源相比，电流设置的稳定性要好得多极化 ( $V_{AK} < 0$  V)。在电压模式 ( $I_{AK} \rightarrow 0$  V) 下，光电二极管具有很强的非线性。

## Operational Amplifier – Current sink

### Zener diode - stabilization of supply voltage ripple: 齐纳二极管 - 稳定电源电压纹波

齐纳二极管是一种特殊类型的二极管，设计用于在达到特定的设定反向电压 (称为齐纳电压) 时可靠地允许电流“向后”流动。齐纳二极管通常用于电压调节，特别是稳定和减少电源电压的纹波。

**反向击穿电压 Reverse Breakdown Voltage:** 与常规二极管不同，齐纳二极管设计用于在反向击穿区域工作而不会损坏。当齐纳二极管两端施加的反向电压超过其齐纳电压 ( $V_Z$ ) 时，它会反向传导电流，使两端的电压保持接近齐纳电压。

**电压调节 Voltage Regulation:** 为了稳定电源电压，齐纳二极管与需要稳定电压的负载并联。当输入电压超过齐纳电压时，二极管导通并将输出电压钳位到大约齐纳电压，从而减少纹波。

**串联电阻 Series Resistor:** 串联电阻通常与齐纳二极管一起使用，以将通过二极管的电流限制在安全值。该电阻器的值是根据最大输入电压、齐纳电压和二极管可以处理的最大电流来选择的。

**纹波减少 Ripple Reduction:** 齐纳二极管通过改变其传导来响应输入电压的变化，以保持稳定的输出电压。当输入电压波动高于齐纳电压时，二极管吸收多余的电压，从而平滑纹波。

**负载调节 Load Regulation:** 虽然齐纳二极管可以有效调节电压和减少纹波，但它们更适合低功率应用或负载变化最小的应用。在显着的负载变化下，串联电阻器上的压降会发生变化，这会影响调节性能。

**散热 Heat Dissipation:** 齐纳二极管在调节电压时会消耗功率 (以热量的形式)，这是其应用中的一个考虑因素。功耗是二极管两端的电压和流过二极管的电流的乘积。

*齐纳二极管稳压器简单且经济高效，但在负载电流和输入电压变化相对较小的应用中最为有效。对于更高功率的应用或需要更精确调节的情况，通常使用基于集成电路或更复杂设计的稳压器。*

- 齐纳二极管是齐纳二极管和雪崩二极管的通用名称
- 该组件用于基本电压稳定
- 工作点的位置由二极管的  $V_A$  特性和电阻器  $R_1$  的负载特性的交点给出
- 二极管在击穿时负载有电流，从而将其加热，因此必须相应地确定二极管的尺寸 (最好考虑上限估计值)
- 由于二极管击穿时的最终斜率，输出电压也会发生变化，但明显较小
- 在所示示例中，纹波  $\pm 1$  V 变为约  $\pm 0.1$  V

- 击穿电压通常与温度有关。 齐纳二极管的温度系数为负，雪崩二极管的温度系数为正。对于击穿电压约为 6 V 的二极管，温度系数接近于零。

## Zener diode – overvoltage protection

### Switched DC / DC converters

electronic circuits that convert a source of direct current (DC) from one voltage level to another. 从一种电压电平转换为另一种电压电平的电子电路。

用于调节直流电压大小的电路。

- 与线性稳定器相比，它们通常具有更高的效率（更低的损耗）
- 与线性稳定器相比，它们可以降低电压、增加和反转极性
- 开关逆变器允许您使用公共或独立（虚拟）接地
- 它们使用开关元件和能量存储元件（线圈或电容器）
- 对于电源应用，我们通常使用线圈或变压器连接
- 带有开关电容器的电路可用于低功耗应用
- 开关 DC/DC 转换器种类繁多； 这里仅介绍最重要的低电压和功率
- 开关逆变器通常会高干扰并在输出端产生较大纹波。 因此，对于要求苛刻的模拟测量，有必要对该电压进行滤波，通过调节级或 LDO 的帮助来稳定它



### Boost converter (Step-Up):

升压转换器也称为升压转换器，是一种 DC/DC 转换器，可增加（升压）从输入到输出的电压，同时降低电流。它通常用于需要提高某些组件或电路的电源电压的应用中。

用于提高输入电压  $U_2 > U_1$

- 在第一个时间间隔  $T_a$ ，线圈充满电流，二极管 D 闭合，因为输出电压  $U_2$  高于  $U_1$ 。
- 在第二个区间  $T_b$ ，线圈充当前源。通过线圈的电流通过二极管 D 连接到充电电容器 C 和负载。
- 带电线圈的能量集中在其磁场中。关断开关 S 后，该磁场逐渐瓦解，导致线圈中感应出电压，该电压可能比感应电压高许多倍。输入电压  $U_1$  的大小。

### Buck converter (Step-Down)

降压转换器也称为降压转换器，是一种 DC/DC 转换器，可降低（降压）从输入到输出的电压，同时增加电流。它广泛用于需要将电源（如电池或电源）提供的电压降低到负载所需的较低水平的应用中。

- 用于降低输入电压  $U_2 < U_1$
- 在第一个时间间隔  $T_a$  中，线圈充满电流，该电流也流入负载 - 线圈充满电流，其上的电压逐渐下降
- 二极管 D 闭合，因为它是反向极化的。
- 在第二个间隔  $T_b$  中，线圈充当

当前源。通过线圈的电流通过二极管 D 到达充电电容器 C 和负载。

- 仅当输出电压低于输入电压时 ( $U_2 < U_1$ )

### **Inverting converter (Buck-Boost):**

反相转换器，也称为降压-升压转换器，是一种 DC/DC 转换器，可以降低（降压）或升高（升压）输入电压，而且重要的是可以反转其极性。它是一款多功能转换器，适用于输出电压需要与输入电压极性相反以及输出电压可能高于或低于输入电压的应用。

- 用于反转输入电压
- 在第一个时间间隔  $T_a$ ，线圈充电

与电流

- 二极管 D 闭合，因为它是反向极化的。
- 在第二间隔  $T_b$  中，线圈充当电流源。通过线圈的电流通过二极管 D 到达充电电容器 C 和负载。
- 由于二极管的方向和通过线圈的电流方向， $U_2$  相对于  $U_1$  的极性发生变化
- 之所以称为降压-升压是因为绝对值， $U_2$  可以小于、大于甚至等于  $U_1$