



复旦大学电子工程系 陈光梦

第4章 集成放大器





集成电路

集成电路工艺简介
集成电路的特点

集成电路

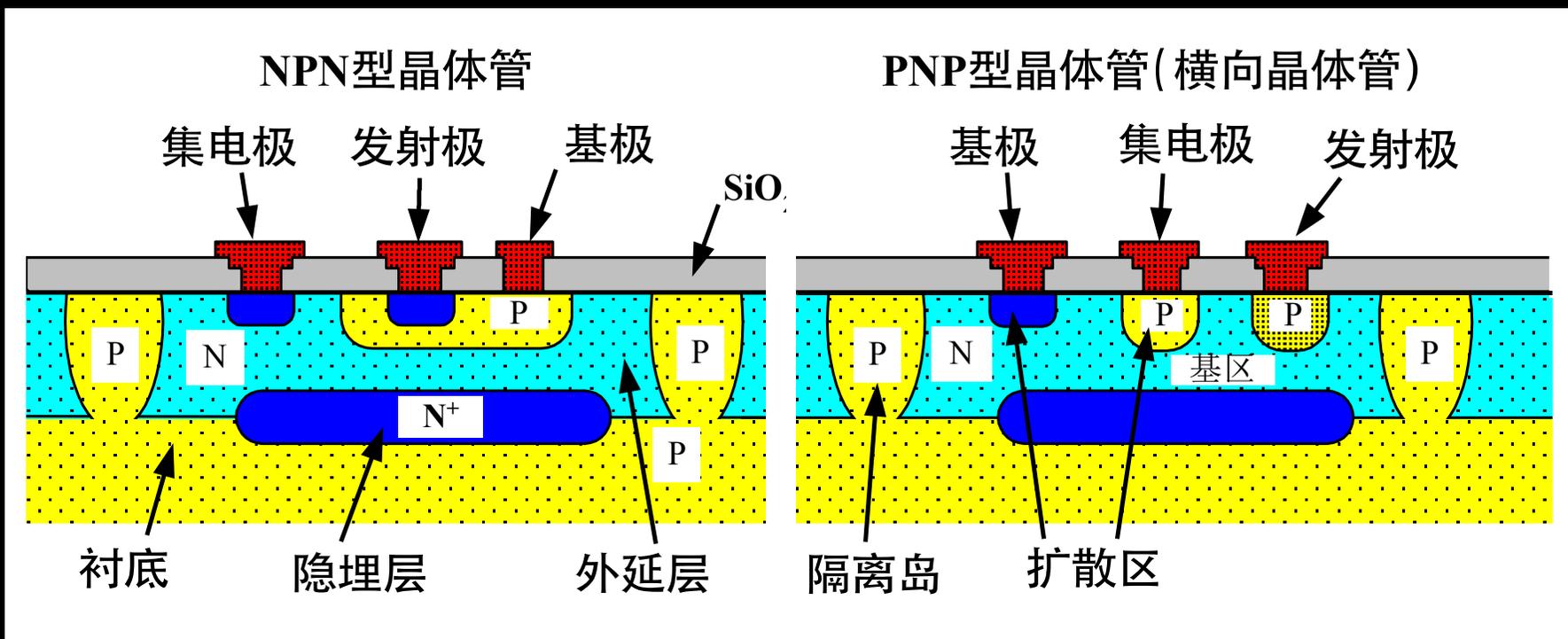
- 将晶体管、场效应管、二极管以及电阻、电容等元件通过一定的制造工艺制作在同一块半导体基片上的器件
- 基本材料是单晶硅，可以是P型或N型
- 通常在一块硅晶片上同时制造几百到几千个集成电路芯片（管芯），每个管芯经过初测后用划片机划开，将初测合格的管芯封装后，再经过老化、测试等工序，就成为集成电路产品。

集成电路工艺简介

- 基本工艺：氧化、掩模、光刻、扩散、外延、淀积、蒸发等
- 一个完整的制造过程包含一系列掩模、光刻和扩散过程

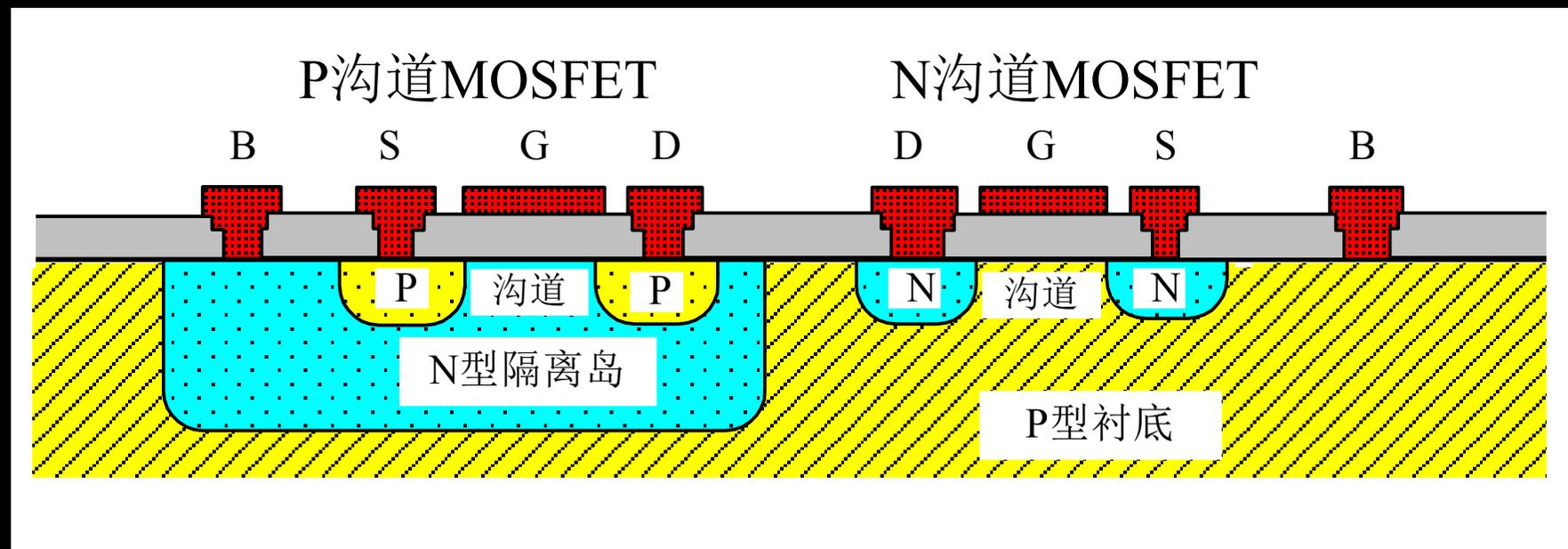
BJT晶体管的结构

- 同时制造NPN和PNP两种类型BJT



CMOS场效应管的结构

- 互补型金属-氧化物-半导体
Complementary Metal-Oxide-Semiconductor



集成电路的特点

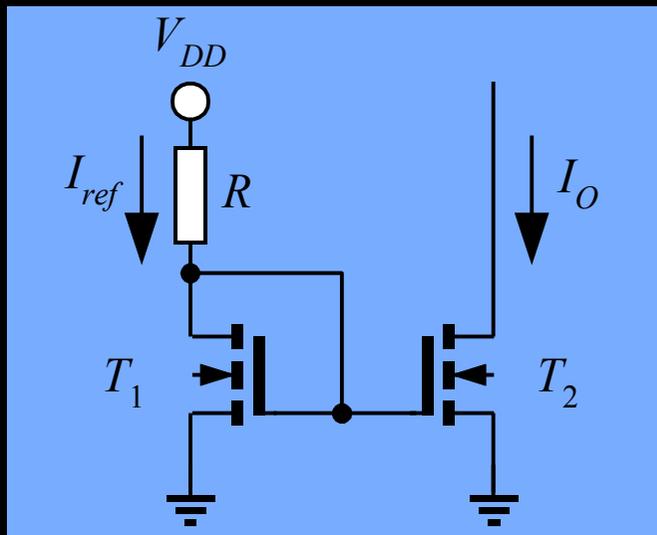
- 良好的对称性和较大的绝对误差
 - 元件之间的性能比较一致
 - 环境温度一致，同类器件的温度一致性很好
 - 元件的绝对误差比分立元件电路大许多
 - 在集成电路设计中，尽量利用元件的对称性进行设计，例如使用电流源、差分放大器等
- 大量采用有源器件
 - 制造电阻、电容和电感需要占据一定的面积，且在一般情况下数值越大占用的面积越大，同时误差较大，质量不高
 - 采用晶体管等有源器件替代电阻电容等无源器件

电流源与有源负载

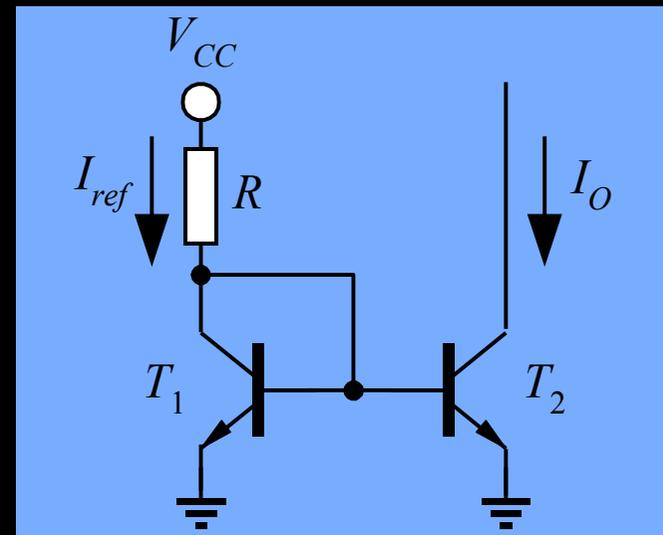
基本电流源电路
电流源电路的改进
有源负载放大电路

基本电流源电路

- 由一个电阻和两个晶体管组成，图中 I_{ref} 是参考电流， I_O 是输出电流。



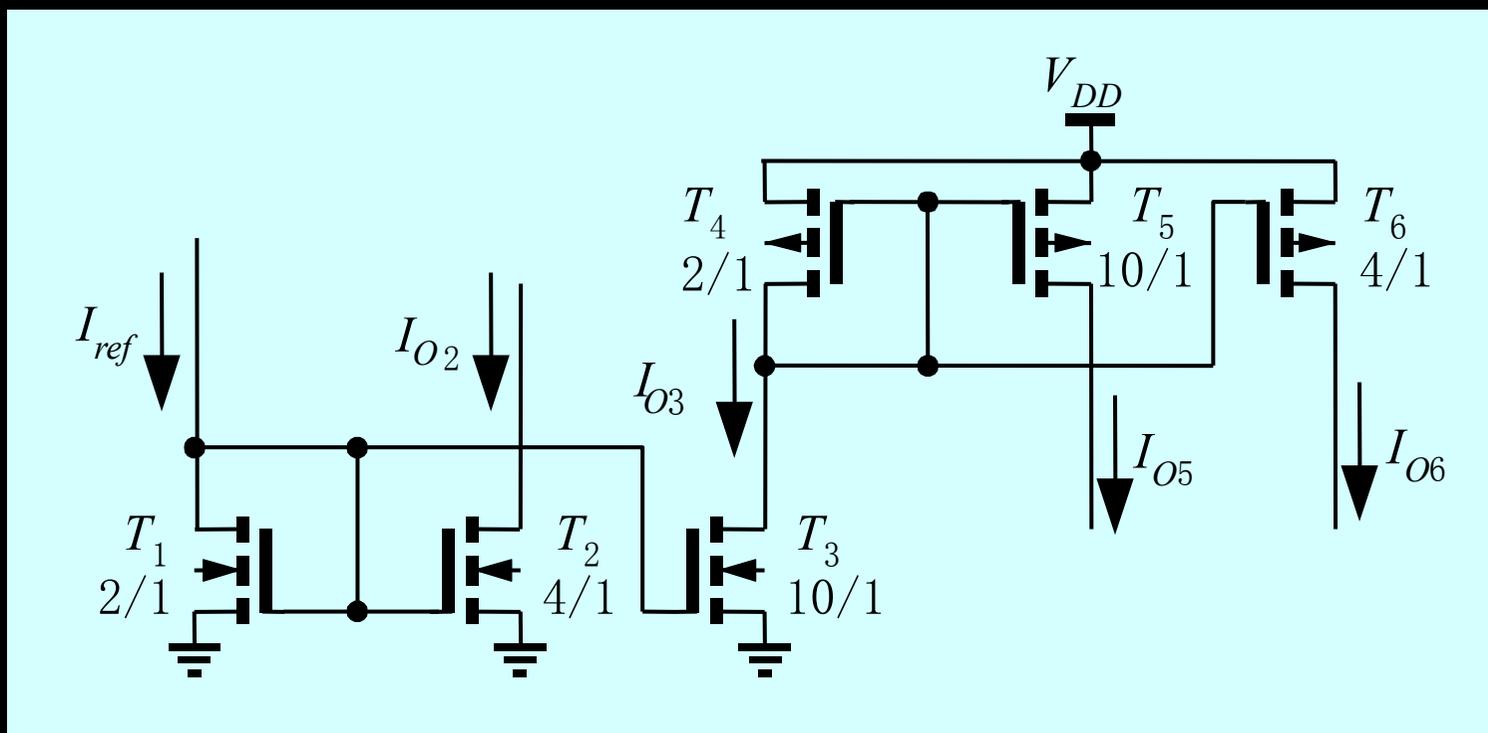
FET电路



BJT电路

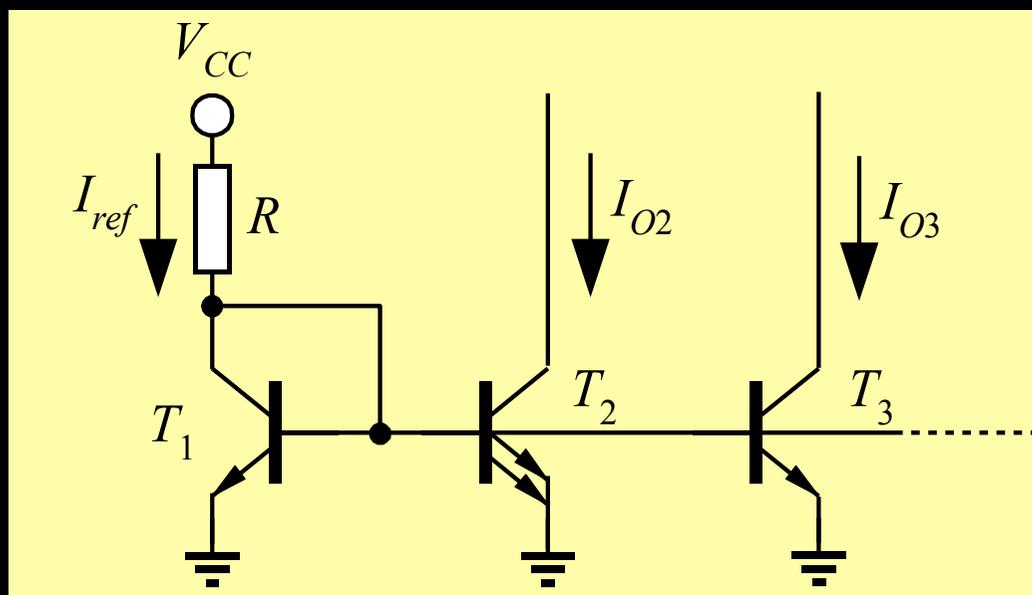
多路FET电流源

- FET的漏极电流与栅极宽长比成正比，改变栅极宽长比获得不同比例的输出电流



多路BJT电流源

- BJT反向饱和电流正比于发射区面积，改变发射区面积获得不同比例的输出电流



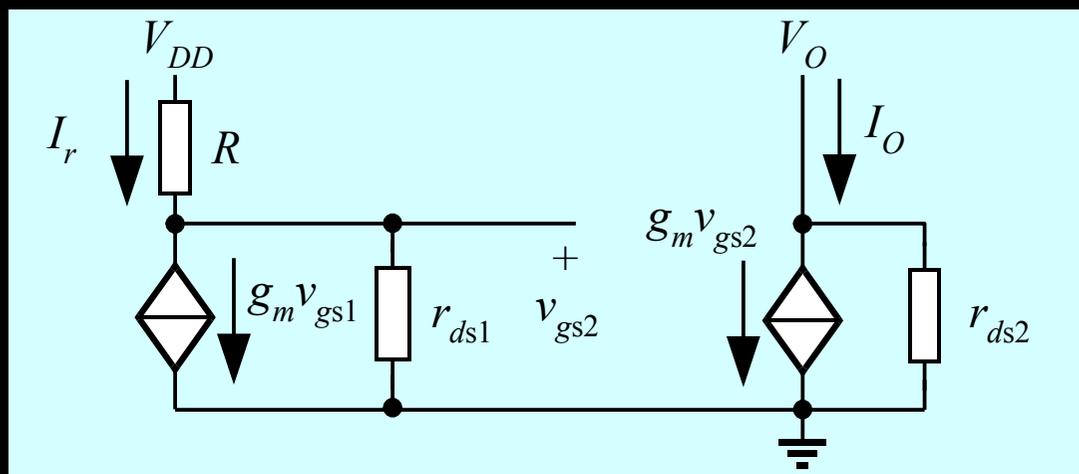
电流源电路的改进

由于在实际集成电路中，对于电流源的性能有各种不同的要求，所以实际的电流源需要在上述基本电流源的基础上加以改进：

- 提高电流源的输出阻抗
- 比例电流源
- 与电源无关的电流源
- 减小晶体管 β 的影响

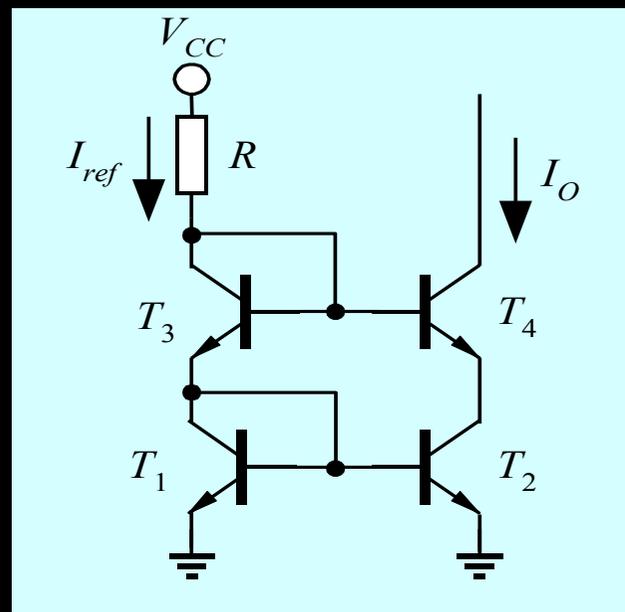
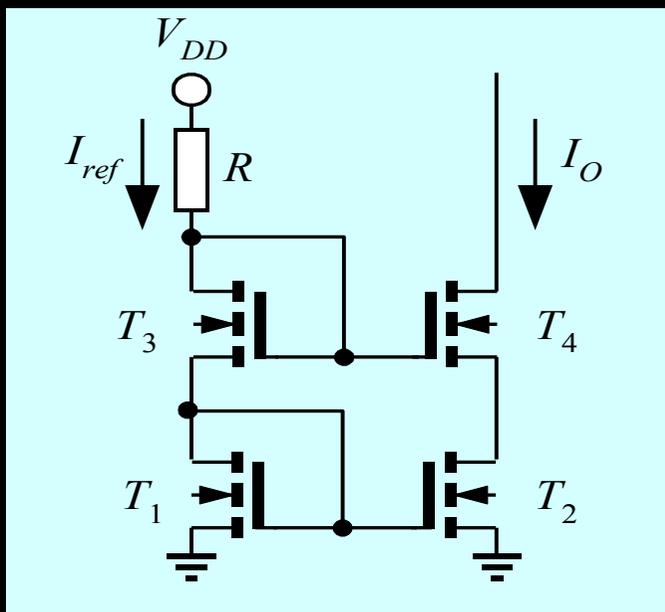
提高电流源的输出阻抗

- 增加电流源的输出电阻有利于减小输出电流与参考电流的比例误差



- 增加电流源的输出电阻有利于加大放大器的电压增益

提高电流源的输出阻抗的电路

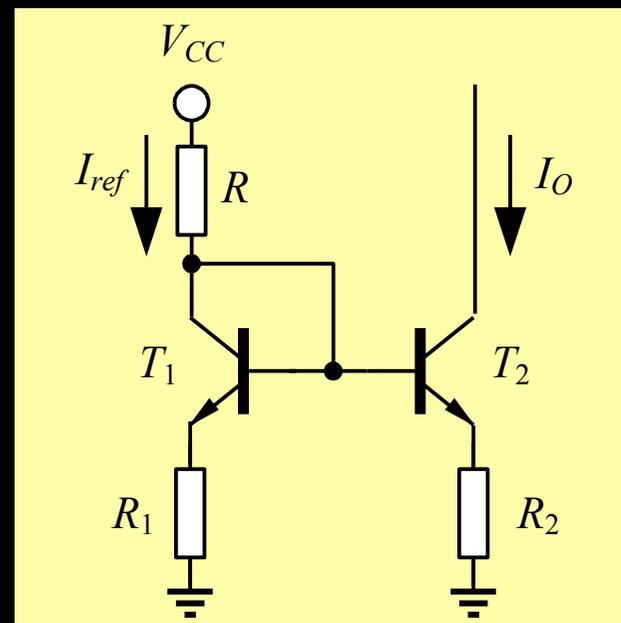


改进后输出电阻

$$r_{dg4} = r_{ds4} + (1 + g_{m4} r_{ds4}) r_{ds2}$$

比例电流源

- 改变发射结面积的比例电流镜的缺点
 - 比例关系比较简单
 - 比例过大时会占用过多的芯片面积
- 带发射极电阻的比例电流镜
 - 电流比等于电阻比的倒数
 - 通过改变电阻可方便地得到需要的工作电流值



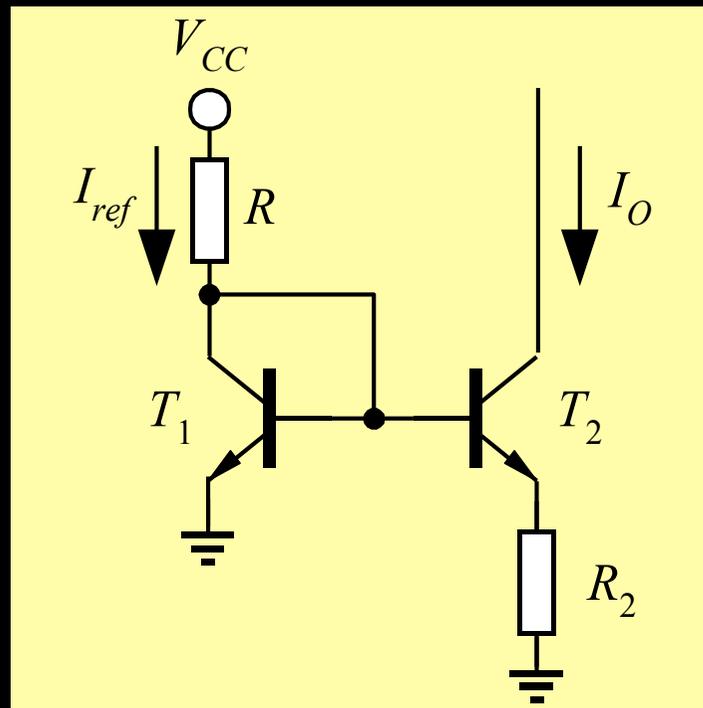
$$I_O \approx \frac{R_1}{R_2} I_{ref}$$

微电流源

- 只有一个发射极电阻的比例电流镜

$$I_O \approx \frac{V_T}{R_2} \ln \frac{I_{ref}}{I_O}$$

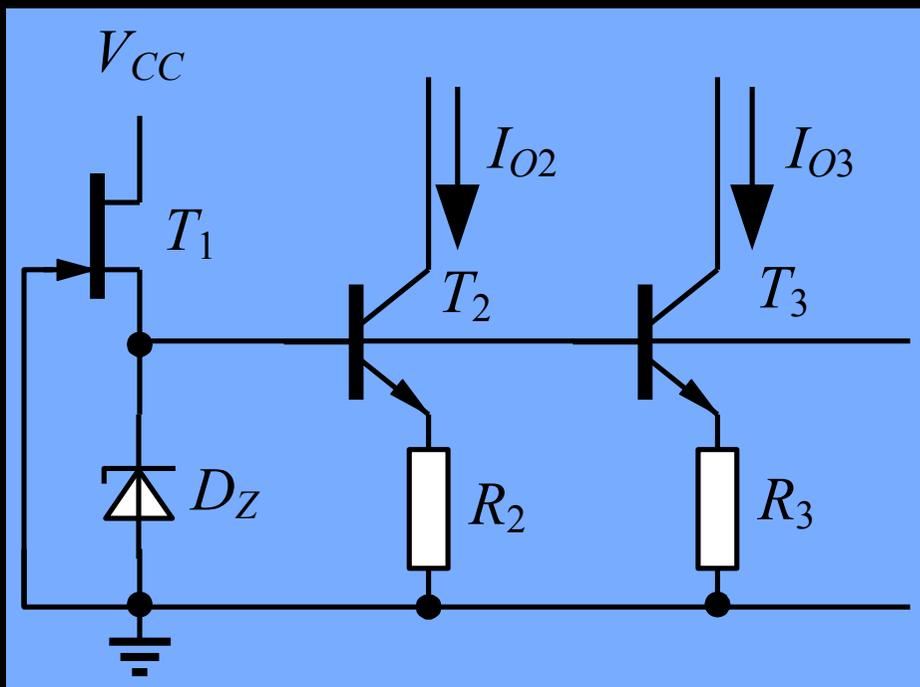
- 可以得到极微小的电流



与电源无关的电流源

- 基本电流源的参考电流与电源电压有关，导致输出电流与电源电压有关
 - 放大电路的各项指标与电源电压相关
 - 放大电路的电源抑制比下降
- 改进：让电流源的参考电流与电源电压无关
- 多种实现方式

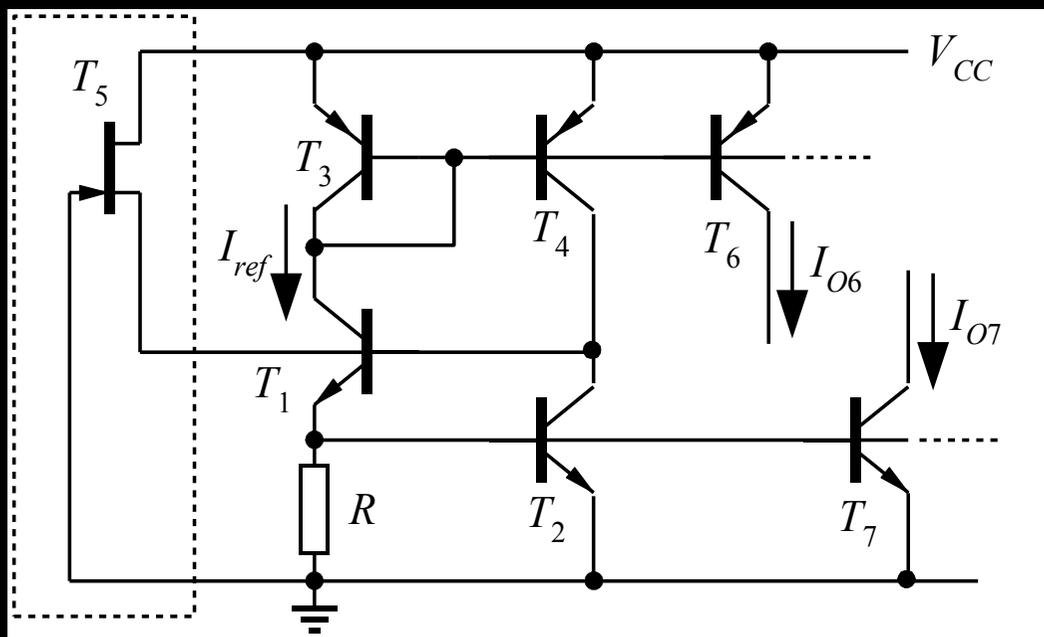
利用稳压管稳定参考电压的电流源



$$I_{O2} = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_2}$$

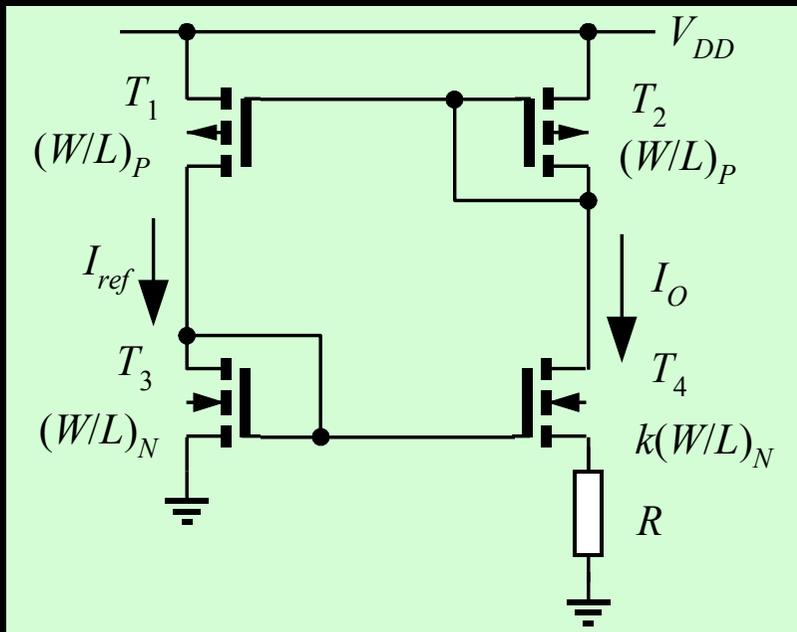
与电源无关的BJT电流源

$$\begin{cases} I_{ref} = \frac{V_{BE2}}{R} = \frac{V_T}{R} \ln \frac{I_{C2}}{I_{S2}} \\ I_{C2} = I_{ref} \end{cases}$$

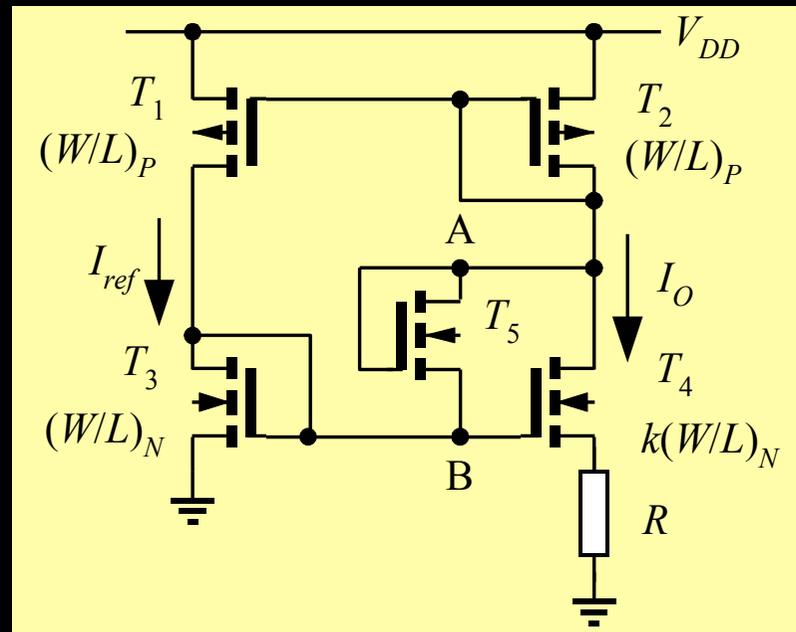


- 上述方程组的解可以确定 I_{ref} ，从而可以确定电路中其余晶体管的输出电流。由于方程中不包含电源，所以此电流源与电源无关。

与电源无关的FET电流源



不带启动电路



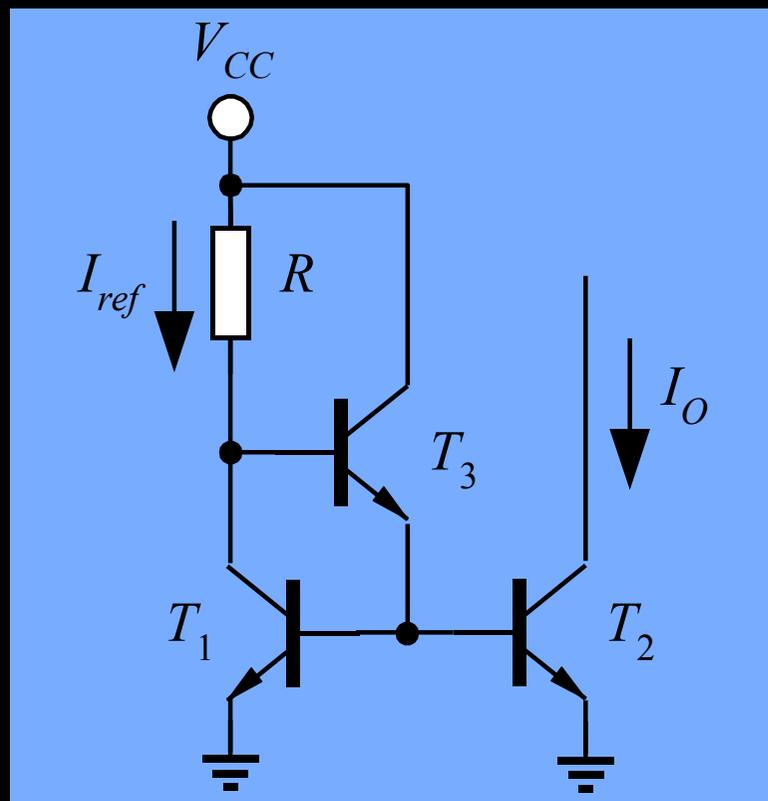
带启动电路

$$I_O = \frac{2}{\mu_n C_{OX} (W/L)_N} \cdot \frac{1}{R^2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k}}\right)^2$$

减小晶体管 β 的影响的电流源

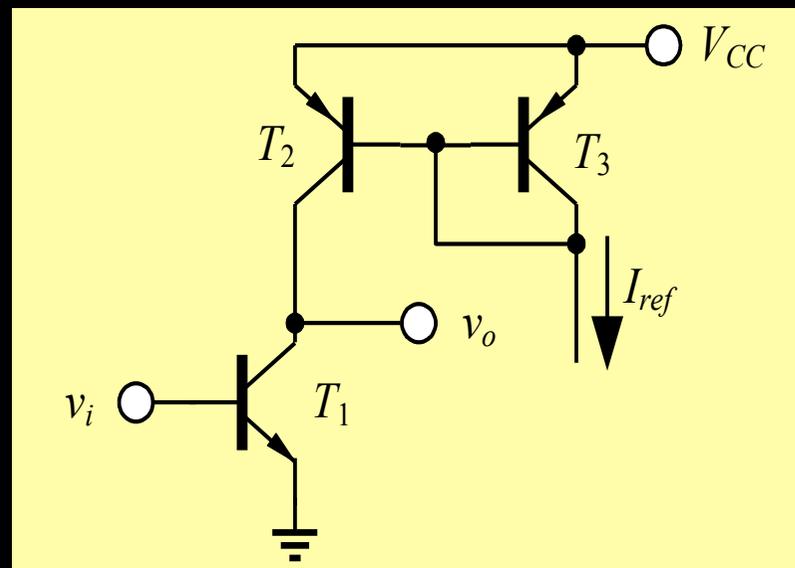
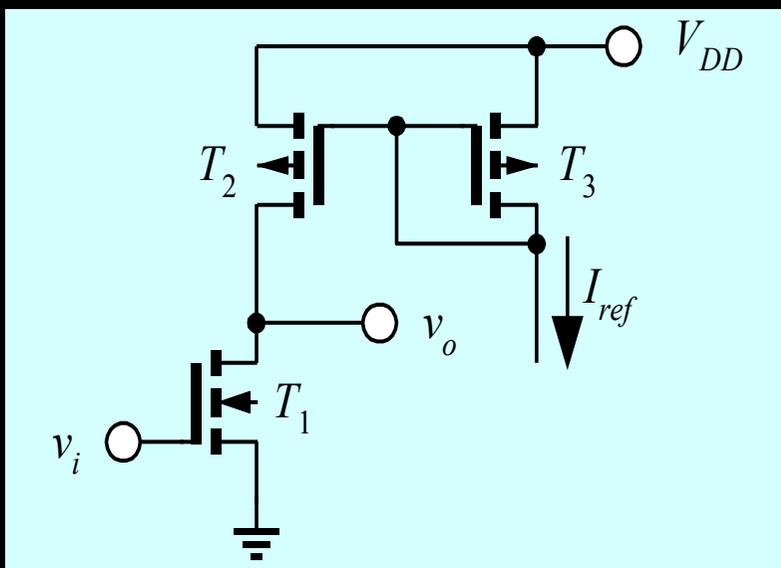
$$I_O = \frac{\beta^2 + \beta}{\beta^2 + \beta + 2} I_{ref}$$

- 晶体管电流放大系数 β 的影响有大幅度的减小
- 输出电流的精度有大幅度的提高

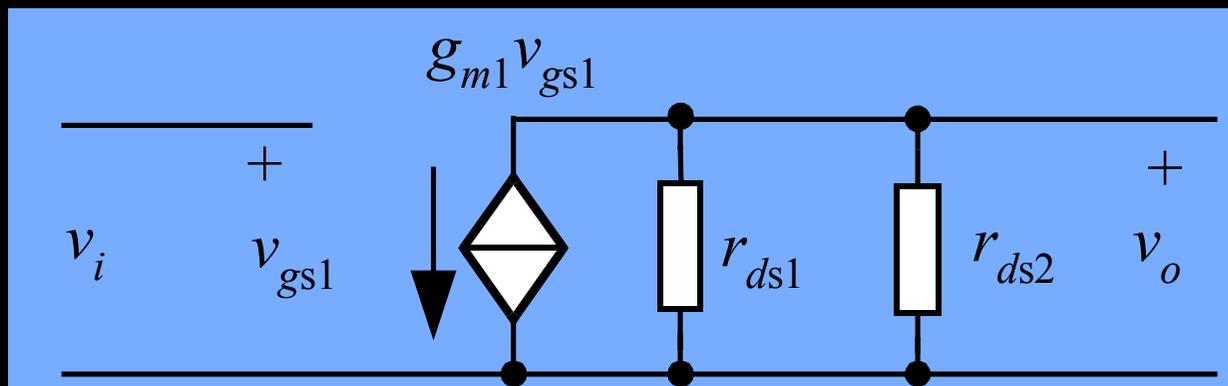


有源负载放大电路

- 在集成电路设计中，为了改善放大器的性能以及集成电路工艺的需要，通常用电流源代替放大器的负载电阻，称为放大器的有源负载



交流小信号等效电路



$$r_{ds1} = \frac{V_{A1}}{I_{DQ}}, \quad r_{ds2} = \frac{V_{A2}}{I_{DQ}}$$

$$A_v = g_{m1} (r_{ds1} // r_{ds2}) = 2 \sqrt{\frac{K_n}{I_{DQ}}} \cdot \frac{1}{1/V_{A1} + 1/V_{A2}}$$

有源负载共源放大器实例

- 参数: $I_{DQ} = 0.1\text{mA}$, Early电压均为 100V , $K_n = 5\text{mA/V}^2$
 - 可以算得: $A_v = 707$ (57dB)
- 电阻负载比较:
 - 电阻负载电路的电压增益为
 - 要达到57dB增益, 负载电阻将高达 10^6 欧姆。由于 $I_{DQ} = 0.1\text{mA}$, 所以电源电压将高达**100V!**

有源负载的放大器的特点

- 具有很高的电压增益
- 有源负载放大器的增益与电源电压无关
 - 前提是保证晶体管进入正常放大状态（BJT在放大区，FET在饱和区）
- 大大节约芯片面积
 - 原因是有源负载放大器在集成电路生产中不需要大电阻

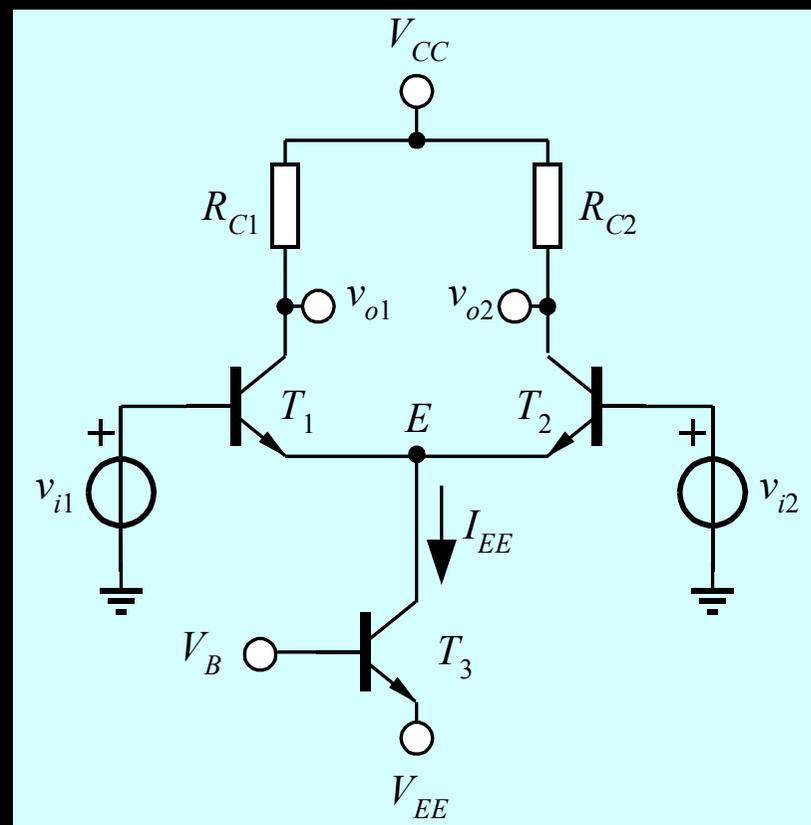
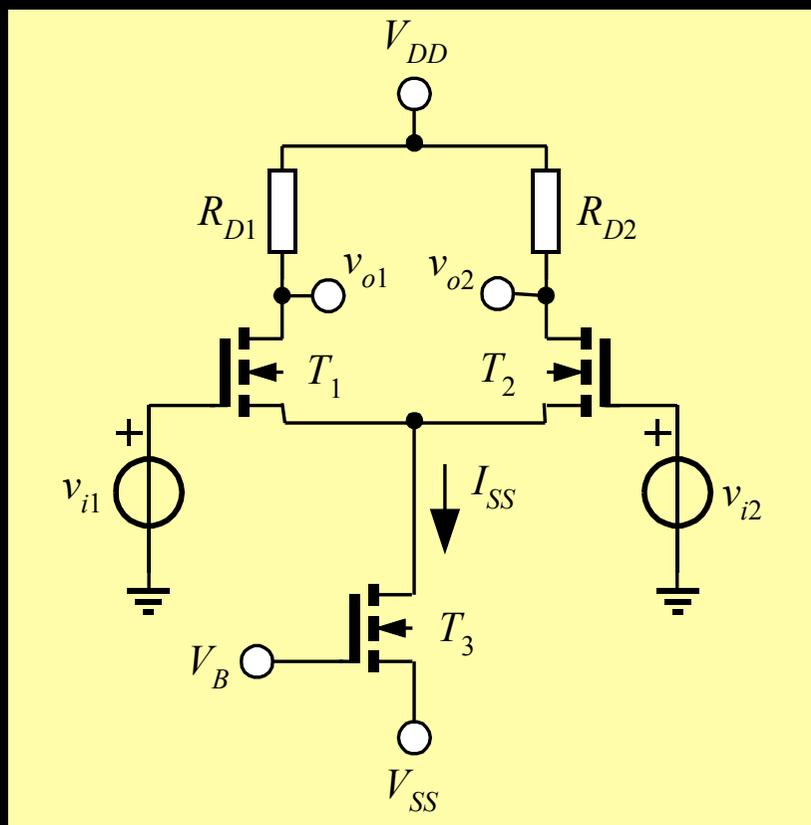
差分放大器

差分放大器的工作原理
差分放大器的直流传输特性
采用有源负载的差分放大器
差分放大器的输入失调

差分放大器

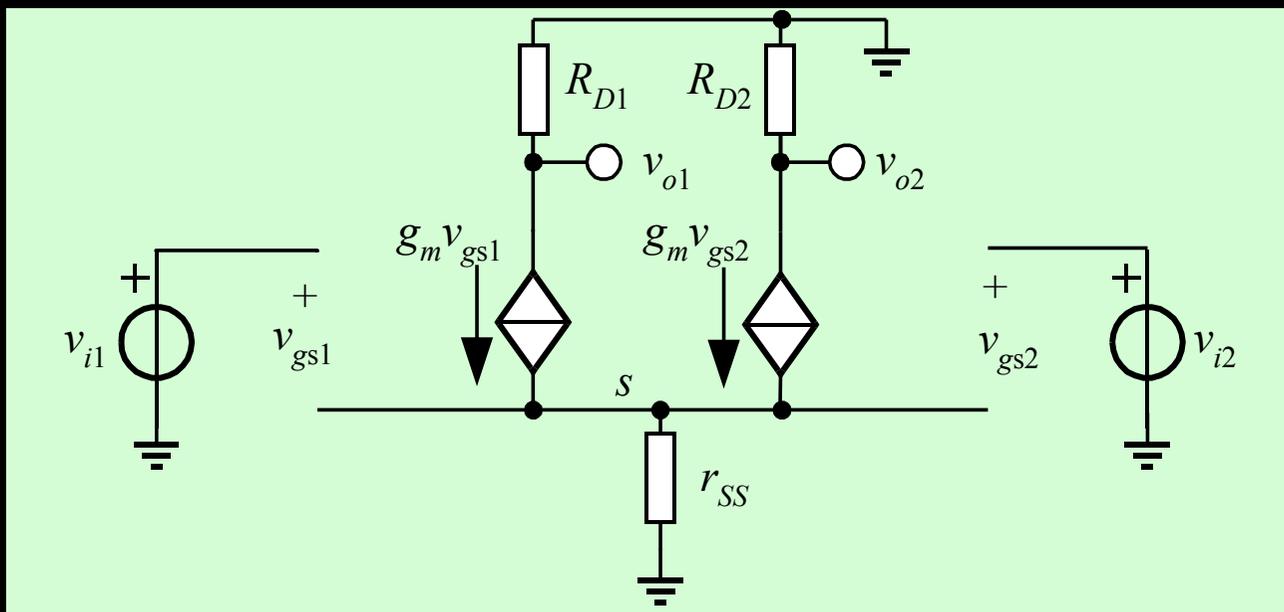
- 集成电路中最基本的放大器电路
- 电路对称、漂移小、抗共模干扰能力强
- 很强的通用性
- 相当宽的工作频率
- 还能够完成限幅、增益控制、混频、调制解调等许多非线性功能

差分放大器的结构



差分放大器的交流小信号分析

- 假设晶体管完全对称
- 忽略 r_{ds}



$$g_m = g_{m1} = g_{m2} = 2\sqrt{\frac{1}{2}\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \cdot I_{DQ}} = \sqrt{\mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \cdot I_{SS}}$$

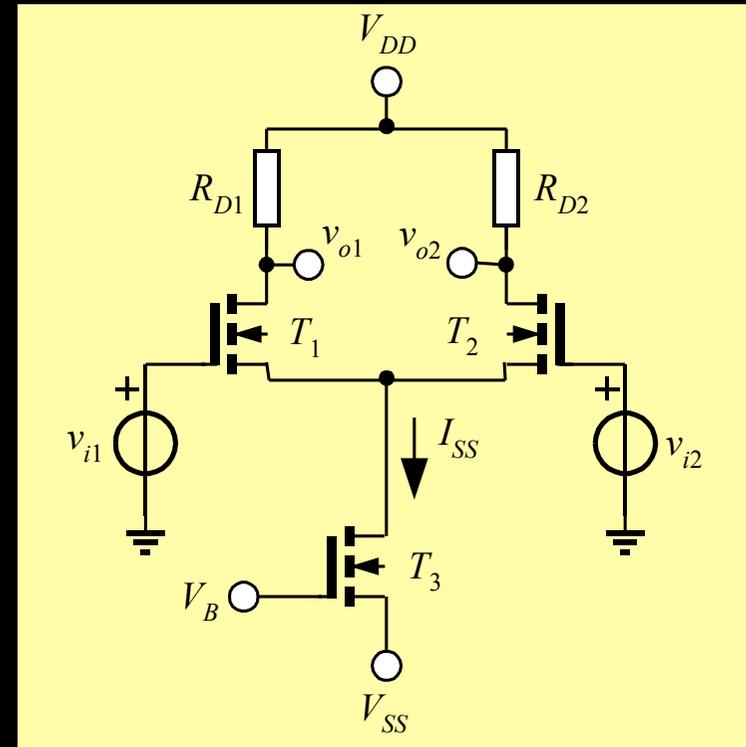
差模电压增益分析

- 差模输入信号

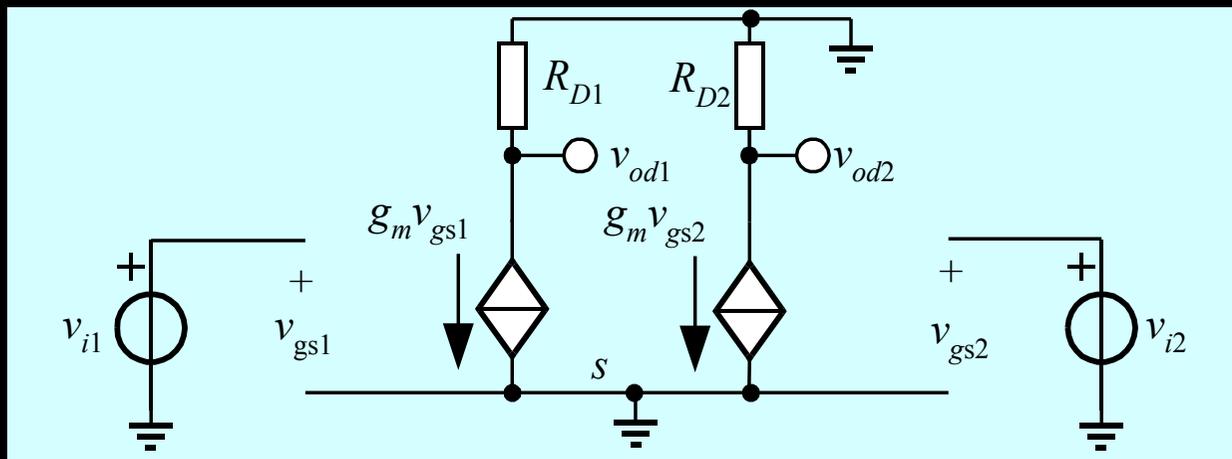
两个输入端分别输入幅度相等、相位相反的信号为，即 $v_{i1} = -v_{i2}$

- 差模电压增益

$$A_{vd} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{i1} - v_{i2}}$$



- 由于电路完全对称，所以当输入差模信号时，可以认为晶体管 T_1 的源极电流的增加量等于晶体管 T_2 的源极电流的减少量，这样，流过偏置电流源 T_3 的交流电流为0， T_1 和 T_2 的源极相当于交流接地



■ 输出电压表达式 $v_{od1} = -g_m R_{D1} \cdot v_{gs1}, \quad v_{od2} = -g_m R_{D2} \cdot v_{gs2}$

■ 双端输出差模电压增益

$$A_{vd} = \frac{v_{od1} - v_{od2}}{v_{i1} - v_{i2}} = -g_m R_D$$

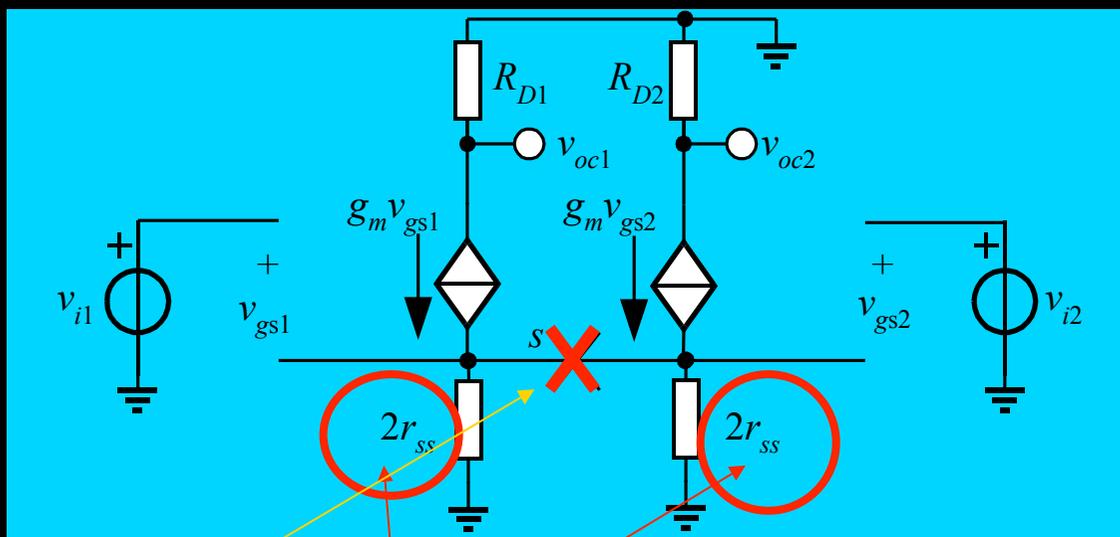
■ 单端输出差模电压增益

$$A_{vd1} = \frac{v_{od1}}{v_{i1} - v_{i2}} = -\frac{1}{2} g_m R_D$$

$$A_{vd2} = \frac{v_{od2}}{v_{i1} - v_{i2}} = \frac{1}{2} g_m R_D$$

共模电压增益分析

- 共模输入信号
两个输入端分别输入幅度相等、相位相同的信号，即 $v_{i1} = v_{i2}$
- 由于两个晶体管的源极电压相等，图中s点由于两边电压相等而无电流，所以可以如图所示断开



将原来的 r_{ss} 拆成两个

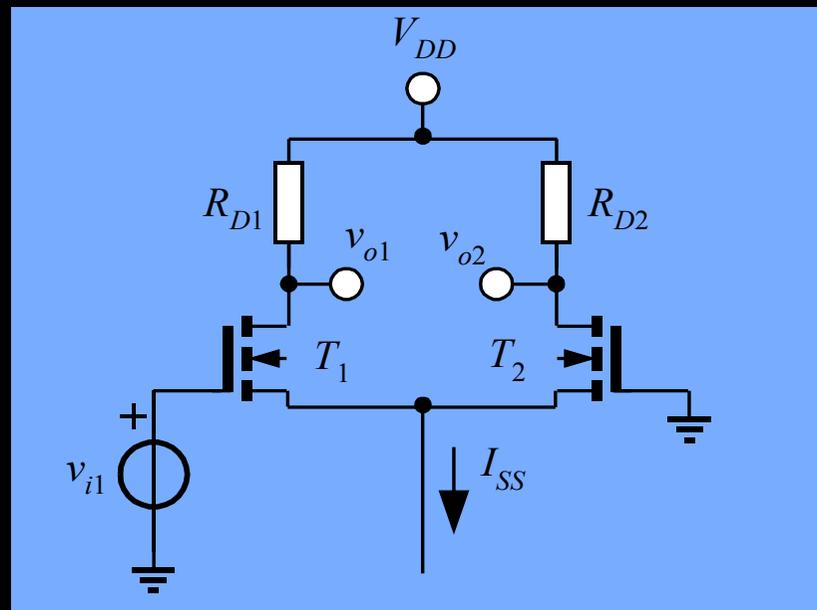
■ 单个晶体管的共模电压增益

$$A_{vc1} = \frac{v_{oc1}}{v_{i1}} = \frac{-g_m R_{D1}}{1 + 2g_m r_{ss}} \approx -\frac{R_{D1}}{2r_{ss}}$$

- 源极提供静态工作点的电流源的输出电阻 r_{ss} 越大，差分放大器的共模增益越小
- 在电路两侧完全对称的条件下，当 $v_{i1} = v_{i2}$ 时必有 $v_{oc1} = v_{oc2}$ ，即理想情况下的差分放大器的共模输出电压差值为零，所以讨论双端输出的共模增益没有意义

输入单端信号

- 差分放大器的四种不同信号接法：双端输入双端输出；单端输入双端输出；双端输入单端输出和单端输入单端输出。单端输入如下所示：



输入单端信号分析

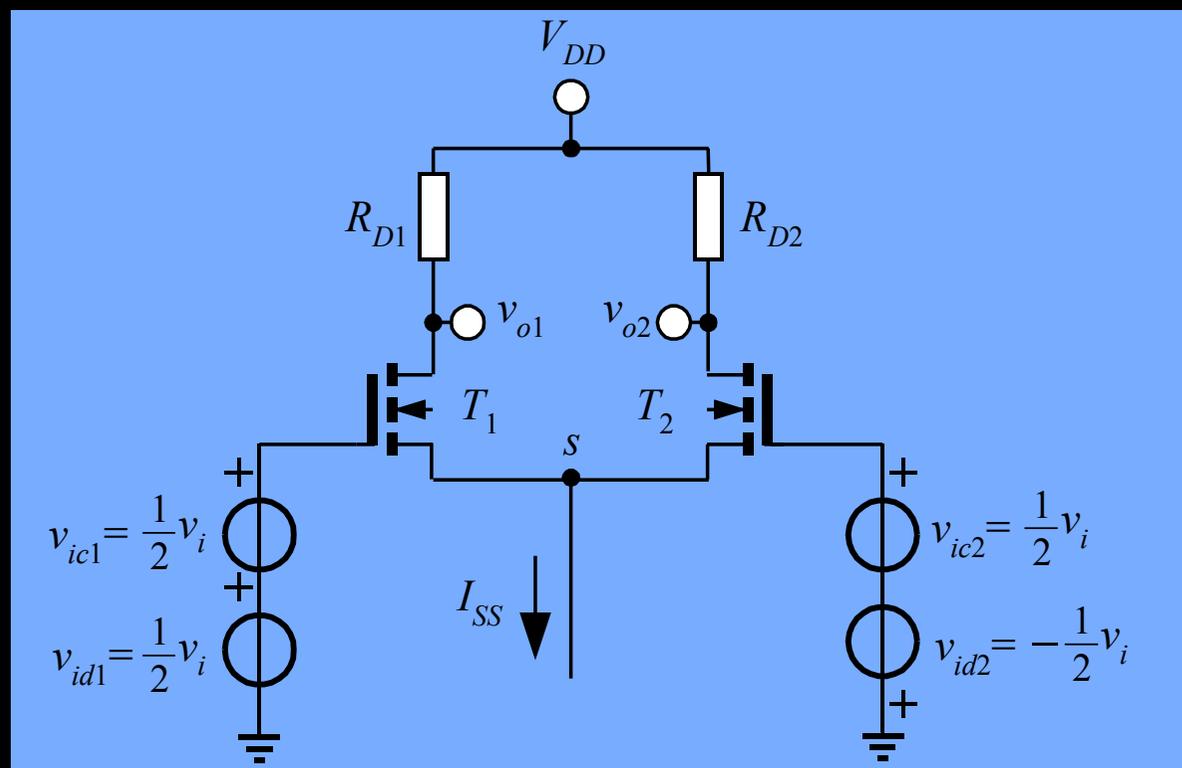
- 将输入信号拆分为共模与差模两部分

$$v_{i1} = v_{id1} + v_{ic1}$$

$$v_{i2} = v_{id2} + v_{ic2}$$

$$v_{id1} = -v_{id2}$$

$$v_{ic1} = v_{ic2}$$



输入单端信号电压增益

■ 单端输出模式：

- 输出由差模输出成分和共模输出成分两部分构成

$$v_{o1} = v_{od1} + v_{oc1} = -g_m R_{D1} v_{id1} - \frac{g_m R_{D1}}{1 + 2g_m r_{ss}} v_{ic1}$$

$$v_{o2} = v_{od2} + v_{oc2} = -g_m R_{D2} v_{id2} - \frac{g_m R_{D2}}{1 + 2g_m r_{ss}} v_{ic2}$$

■ 双端输出模式：

- 只有差模输出成分
- 电压增益与双端输入模式下的一致

$$A_v = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_i} = -g_m R_{D1}$$

共模抑制比

- 差动放大电路重要性能指标
- 定义

$$CMRR = \frac{\text{差模电压增益}}{\text{共模电压增益}} = \frac{A_{vd}}{A_{vc1}}$$

- 计算

$$CMRR = \frac{-g_m R_D}{-\frac{g_m R_D}{1 + 2g_m r_{ss}}} = 1 + 2g_m r_{ss}$$

- 共模抑制比越高，说明相对于差模信号而言，电路对于共模信号的放大作用越弱，输出电压中差模成分与共模成分之间的比例就越悬殊
- 由于共模信号往往是电路中的干扰信号，所以在差分放大器的设计中，一般总是要求获得尽可能高的共模抑制比
- 提高共模抑制比的一个重要途径就是提高源极电流源的输出电阻 r_{SS}

差分放大器的输入阻抗

- 差模输入阻抗定义：小信号差模输入电压对输入电流的比值
- 共模输入阻抗定义：小信号共模输入电压对一个输入端的输入电流的比值
- 对于场效应管差分放大器，在低频情况下不考虑电抗，差模与共模低频输入电阻都是无穷大
- 对于双极型差分放大器，由于存在基极电流，所以它们的输入电阻为有限值

双极型差分放大器输入阻抗

■ 差模输入电阻

$$r_{id} = \frac{v_{id}}{i_i} = \frac{v_{i1} - v_{i2}}{i_b} = r_{be1} + r_{be2} = 2r_{be}$$

■ 共模输入电阻

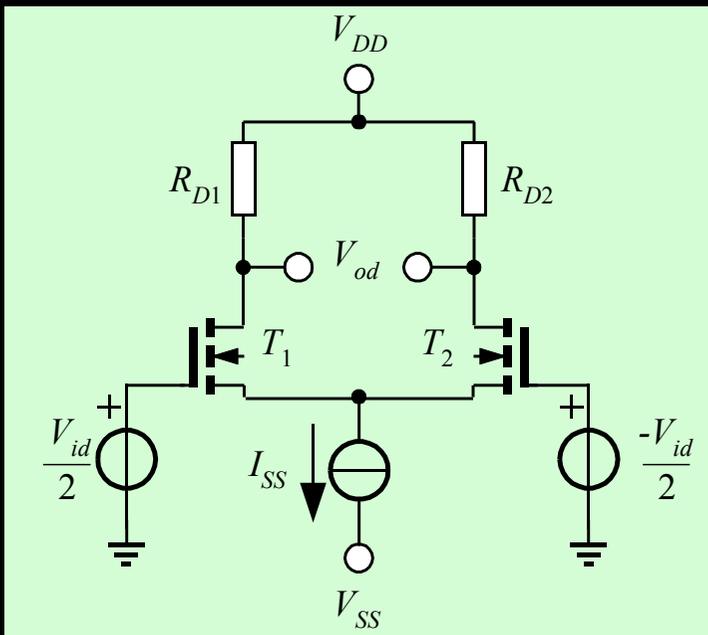
$$r_{ic} = \frac{v_{ic}}{i_i} = \frac{v_{i1}}{i_b} = r_{be} + 2(1 + \beta)r_{ee}$$

- 当 r_{ee} 很大时，共模输入电阻远大于差模输入电阻

差分放大器的直流传输特性

- 大信号（包含直流）差模输入输出关系
- 可以说明电路在小信号线性化近似时的允许输入范围，也可以说明晶体管进入饱和时的输入范围
- 为了简化分析过程，假定：一、晶体管偏置电流源为理想电流源；二、忽略晶体管的输出电阻
- 由于场效应管和双极型晶体管差分放大器的直流传输特性的表达式不同，分别进行讨论

场效应管差分放大器的直流传输特性



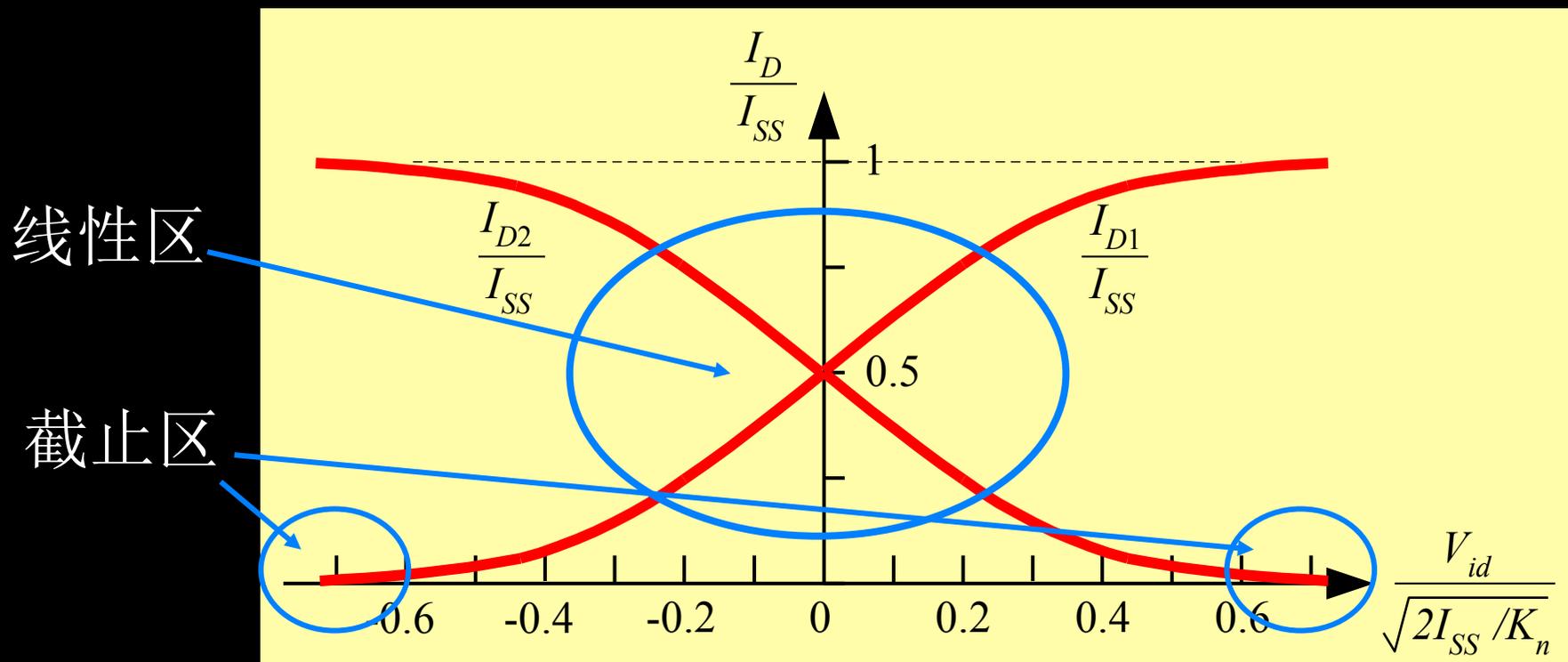
$$I_{D1} = K_n (V_{GS1} - V_{TH})^2$$

$$I_{D2} = K_n (V_{GS2} - V_{TH})^2$$

考虑到 $I_{D1} + I_{D2} = I_{SS}$ ，将上式作适当变换，并注意到 $V_{id} > 0$ ， $I_{D1} > I_{SS} / 2$ ，最后可以得到漏极电流的归一化形式：

$$\frac{I_{D1}}{I_{SS}} = \frac{1}{2} + V_{id}' \sqrt{1 - (V_{id}')^2}$$

$$\frac{I_{D2}}{I_{SS}} = \frac{1}{2} - V_{id}' \sqrt{1 - (V_{id}')^2}$$



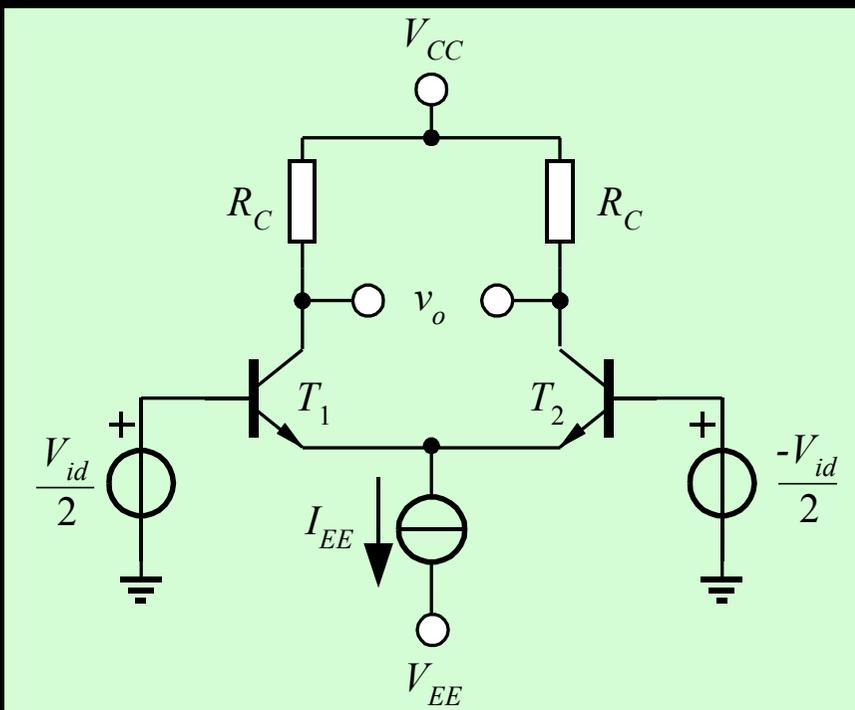
线性区范围

$$V_{ID} \leq 0.74(V_{GSQ} - V_{TH})$$

截止区范围

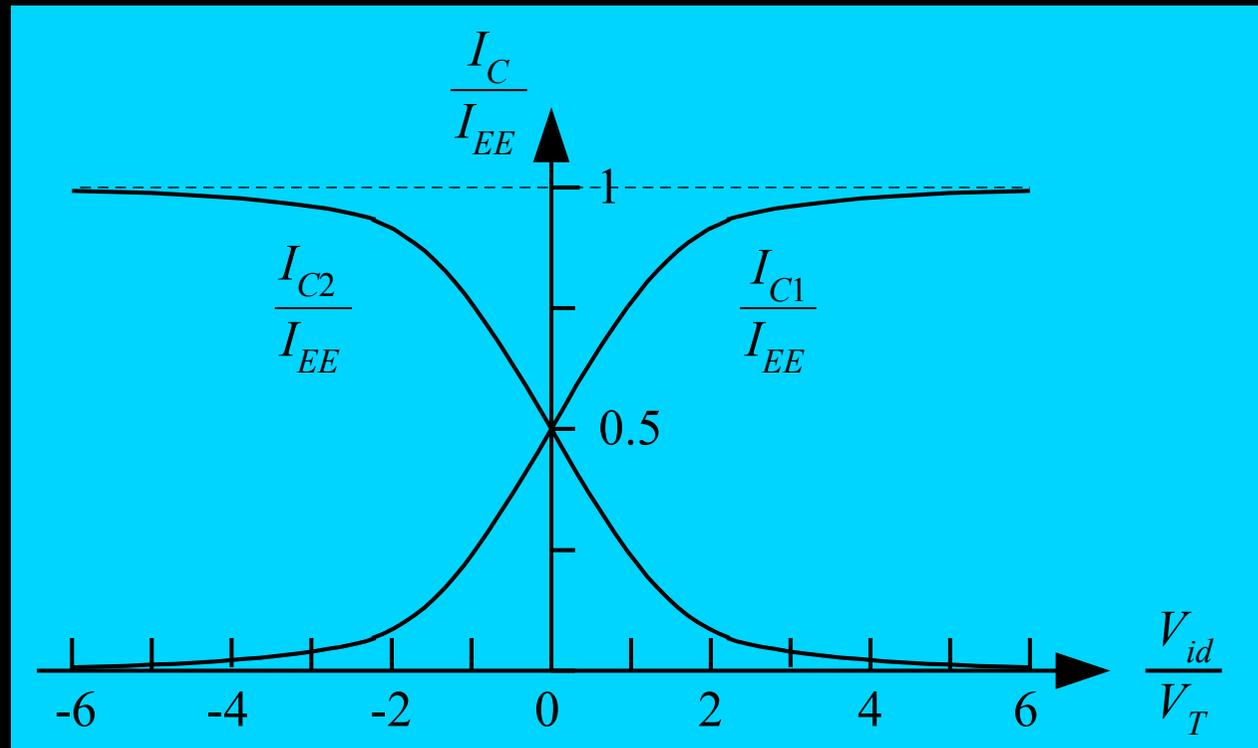
$$V_{ID} \geq 1.41(V_{GSQ} - V_{TH})$$

双极型差分放大器的直流传输特性



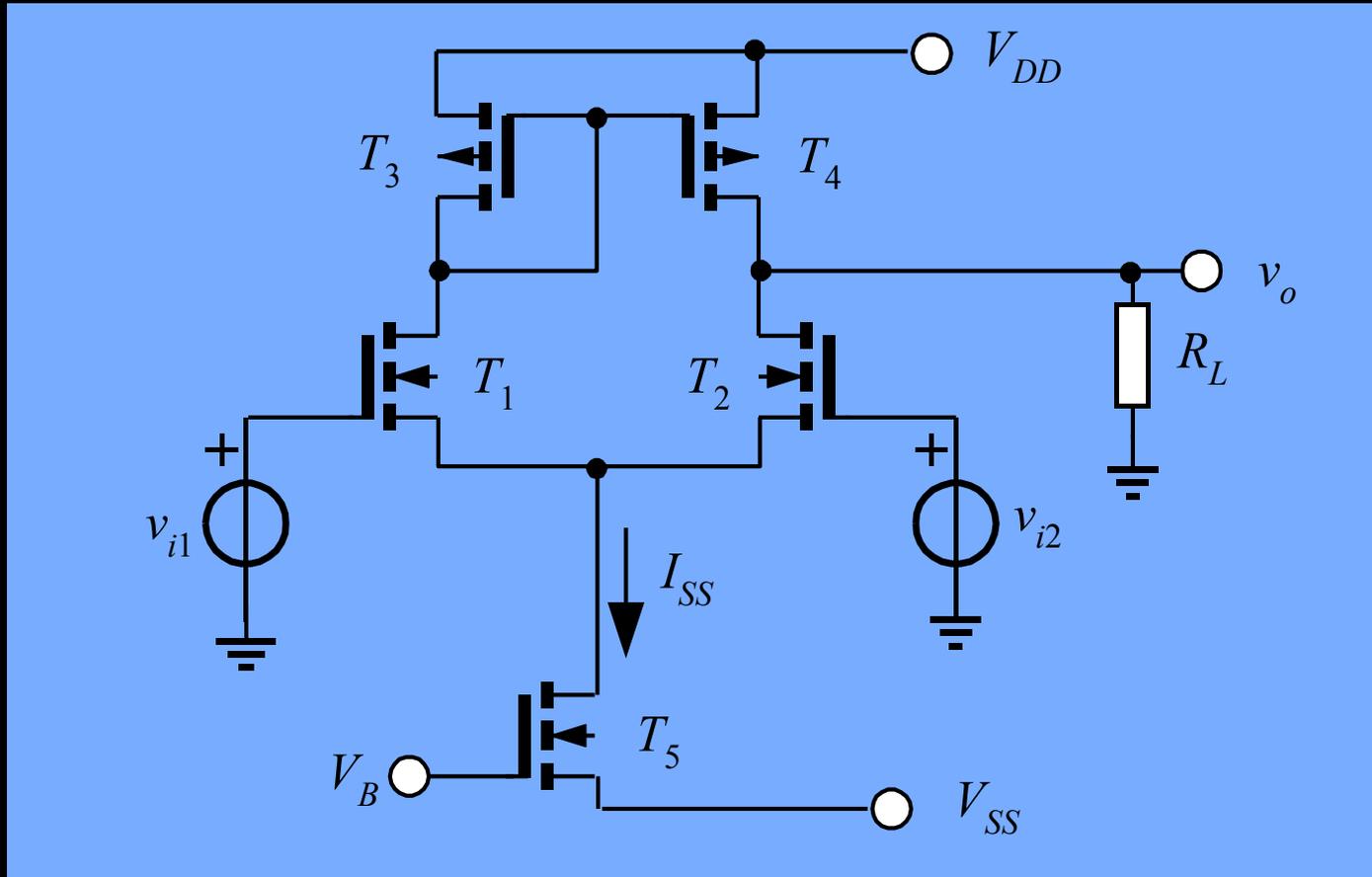
$$I_{C1} = \frac{I_{EE}}{1 + \exp(-V_{id} / V_T)}$$

$$I_{C2} = \frac{I_{EE}}{1 + \exp(V_{id} / V_T)}$$



- 输入线性范围: $1.3V_T$ (5%误差)
- 饱和-截止区范围: 大约 $\pm 4V_T$ (100mV)

采用有源负载的差分放大器



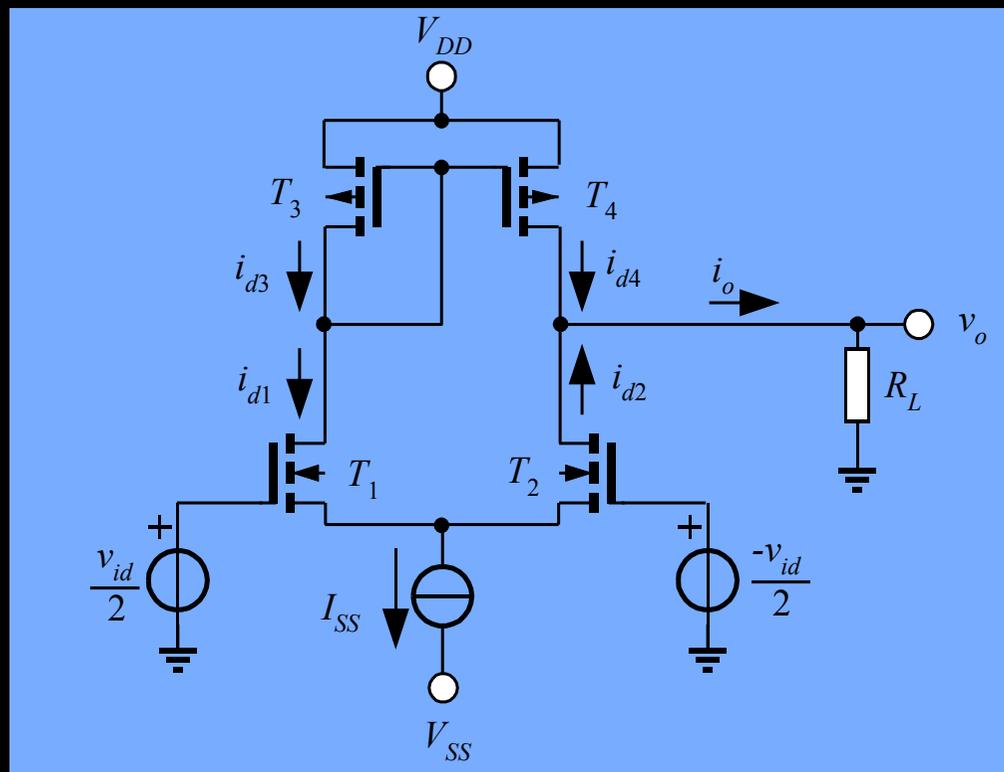
有源负载差分放大器的差模分析

重要特点:

漏极电流叠加!

$$A_{vd} = \frac{i_o R_L'}{v_{id}} = g_m R_L'$$

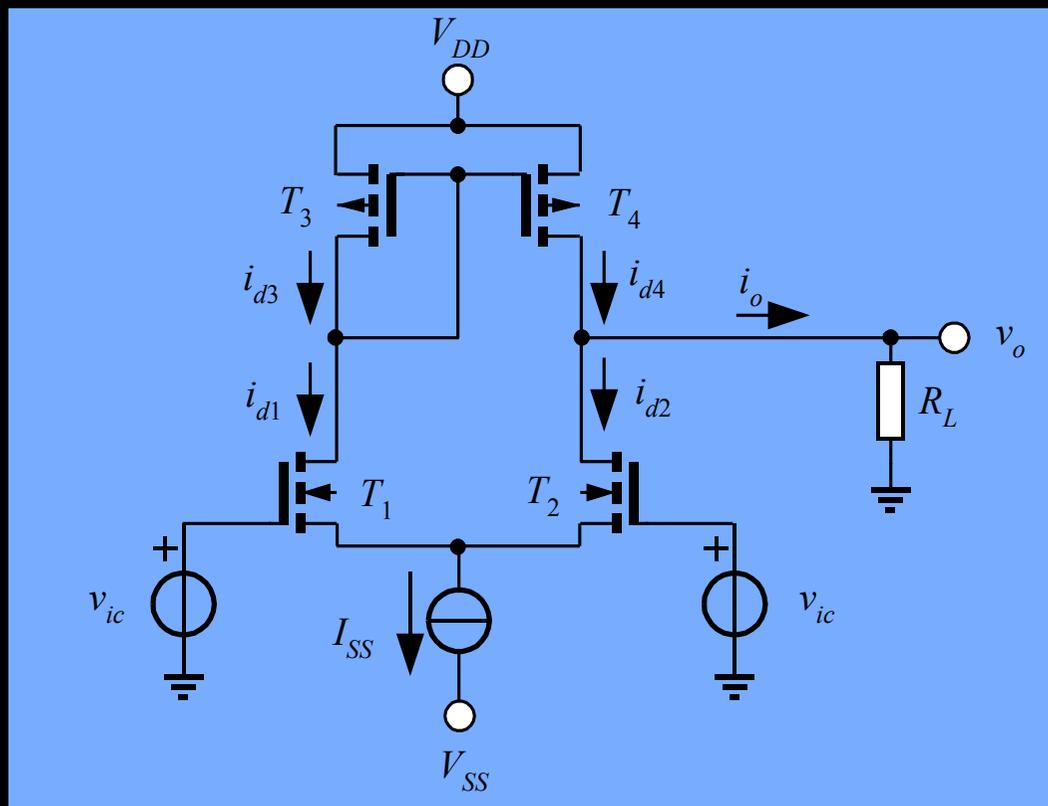
$$R_L' = r_{ds2} // r_{ds4} // R_L$$



- 由于 r_{ds2} 、 r_{ds4} 均为较大的电阻，所以有源负载差分放大器的最大电压增益可以达到很高的数值。

有源负载差分放大器的共模分析

- 理想情况下整个电路两边对称，必有 $i_{d1} = i_{d2}$ ， $i_{d4} = i_{d3}$ ，所以有 $i_{d4} = i_{d2}$ 。 $i_o = i_{d4} - i_{d2} = 0$ 。 **漏极电流相减！**
- 理想情况下共模增益为0， $CMRR$ 趋于无穷大
- 实际电路的 $CMRR$ 不可能等于无穷大，但是肯定比电阻负载差分放大器高得多



有源负载差分放大器的特征

- 有源负载差分放大器具有良好的差模放大特性和很高的共模抑制比，所以在集成放大器电路中得到广泛运用。
- 有源负载差分放大器能够使差模输入信号有效地转换为以地为参考点的单端输出信号。由于大部分放大器需要以地作为参考点，所以这个电路特点具有十分重要的意义。

差分放大器的输入失调

输入失调电压 V_{I0}

输入失调电流 I_{I0}

失调漂移

解决失调的办法

差分放大器的输入失调

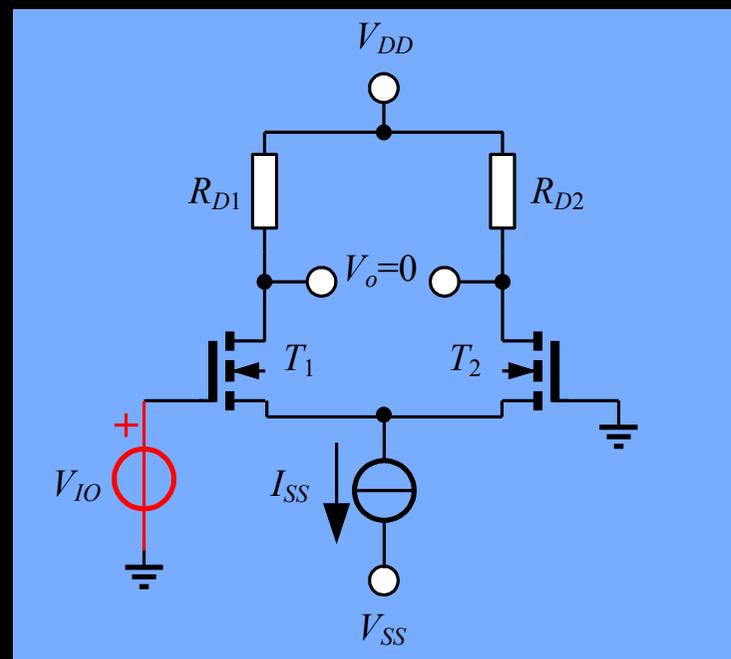
- **失调定义：** 一个理想的差分放大器，应该在输入差模信号为零时，两个输出端完全平衡，即输出电压为零。然而在实际的差分放大器中，两侧的元件不可能做到完全匹配，导致差分放大器在输入信号为零时输出信号不为零。
- **失调效应：** 由于失调造成的输出信号通常无法与被放大的输出信号加以区分，所以失调直接影响放大器的分辨能力。另外，对于理想的差分放大器，输入共模信号时，输出的差模电压应该为零，但是由于失调的存在，实际上将有一个差模电压输出，所以失调将使差分放大器的共模抑制比变差。
- **失调分类：** 通常将差分放大器的各种失调都等效到输入端，称为输入失调。输入失调可以分成输入失调电压和输入失调电流两种。

输入失调电压 V_{IO}

- **输入失调电压的定义：** 一个差分放大器由于电路不对称，在其输入为零时输出不为零。若在其输入端加上补偿电压 V_{IO} 可以导致输出为零，则称此补偿电压 V_{IO} 为差分放大器的输入失调电压。

场效应管差分放大器输入失调电压

- 场效应管差分放大器的输入失调电压的组成：
 - 漏极电阻不对称
 - 晶体管参数 K_n 不对称
 - 阈值电压不对称

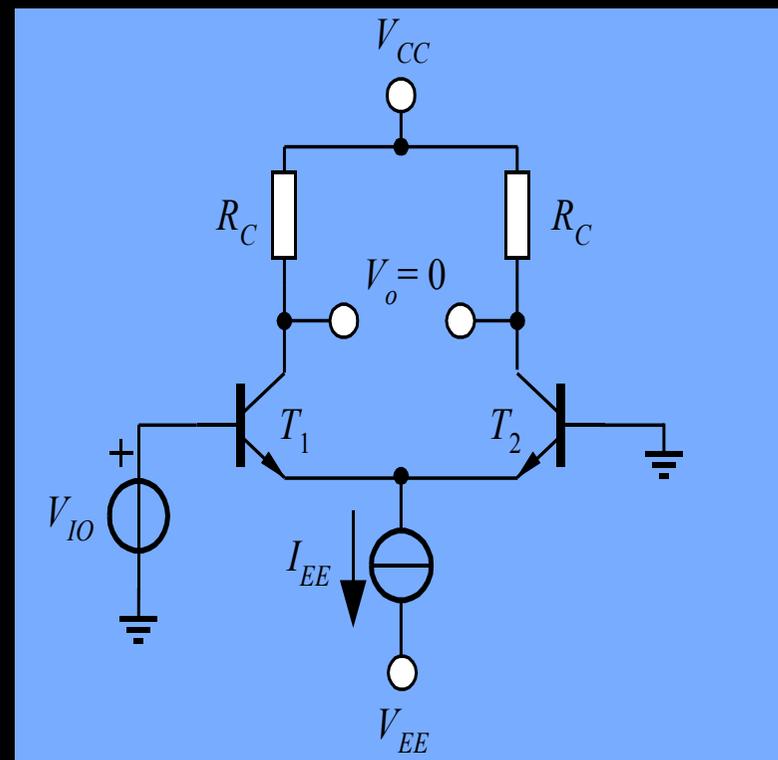


$$V_{IO} = \sqrt{\frac{I_{SS}}{2K_n}} \cdot \frac{\Delta R_D}{R_D} + \sqrt{\frac{I_{SS}}{2K_n}} \cdot \frac{\Delta K_n}{2K_n} + \Delta V_{TH}$$

双极型差分放大器的输入失调电压

- 双极型差分放大器的输入失调电压的组成
 - 集电极电阻不对称
 - 晶体管参数 I_S 不对称

$$V_{IO} \approx V_T \left(\frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{\Delta I_S}{I_S} \right)$$

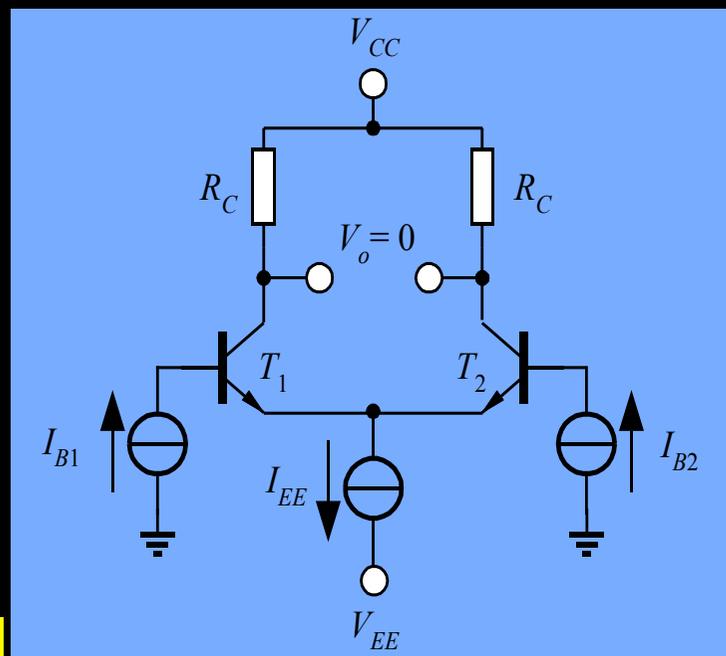


输入失调电流 I_{I0}

- 输入失调电流的定义：使差分放大器输出电压为零时，差分对管输入端偏置电流的差值
- 场效应管差分放大器的输入端偏置电流几乎为零，它的输入失调电流极小，通常在室温下只有若干pA

双极型差分放大器的输入失调电流

- 双极型晶体管差分放大器的输入失调电流主要是由于晶体管 β 的不一致引起的



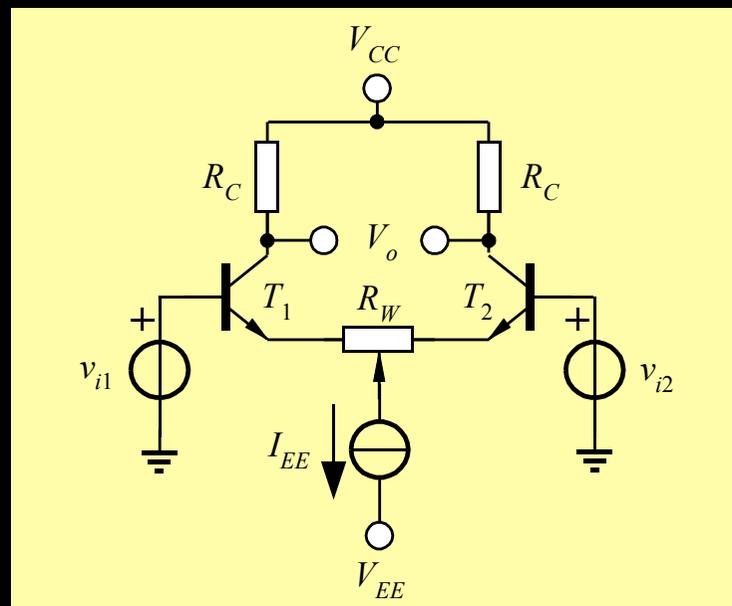
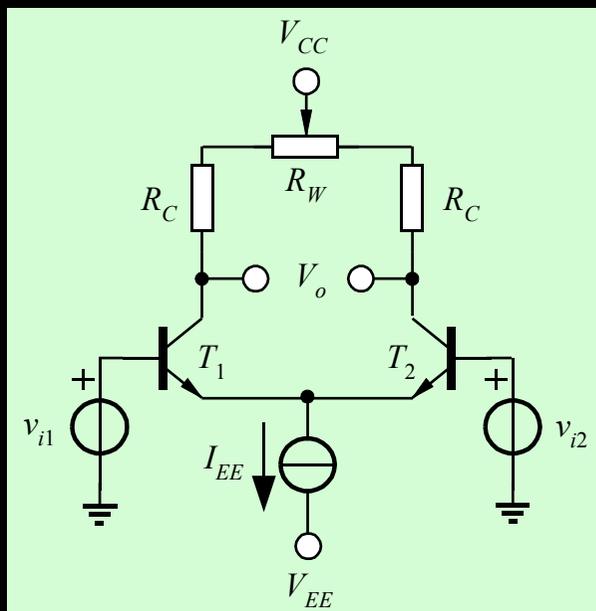
$$I_{IO} = I_{B1} - I_{B2} = I_C \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right) = I_C \frac{\Delta\beta}{\beta_1\beta_2} \approx I_B \frac{\Delta\beta}{\beta}$$

差分放大器的失调漂移

- 由于引起漂移的最常见的因素是环境温度，所以也常常将失调漂移称为失调温漂
- 当信号源具有低内阻时，漂移主要是由于失调电压的漂移引起的
- 当信号源的内阻很高时，漂移主要是由于失调电流的漂移引起的
- 要具体分析差分放大器的温度漂移，应该将输入失调电压或输入失调电流的表达式对温度求微分

解决失调的办法

- 失调影响差分放大器的综合性能
- 在要求较高的场合，需要采取一定的措施将失调消除
- 常用的解决办法有两种：集电极调零和发射极调零



功率输出电路

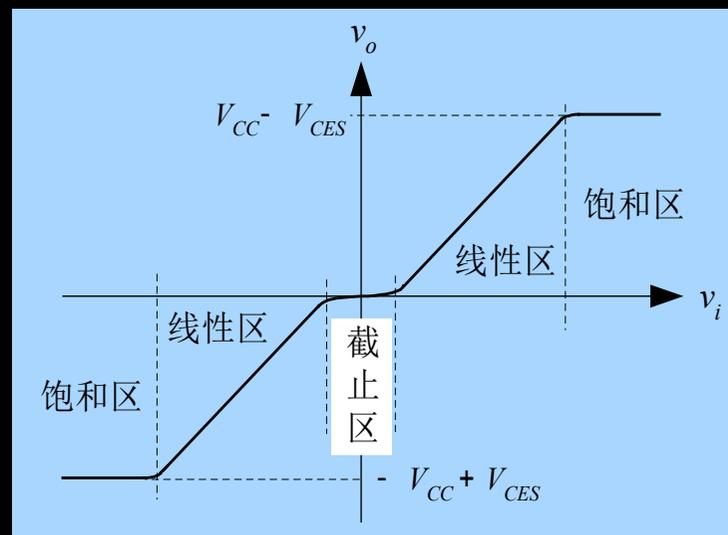
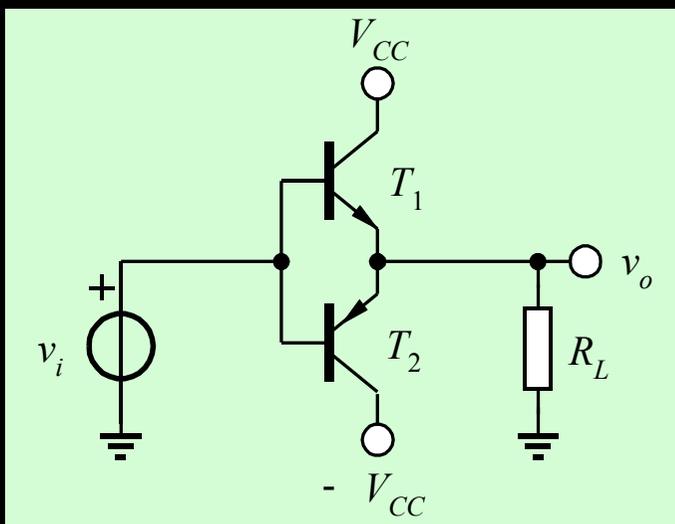
互补输出电路的工作原理
输出功率和电源利用效率
实际的互补输出电路

输出级电路要求

- **功率传输的要求。**即要求输出级能够在信号不失真的条件下，在规定的负载条件下能够输出较大的电压和电流。
- **阻抗匹配的要求。**阻抗匹配的目的在于希望在负载上得到尽可能高的信号功率。对于一个通用的电压放大器来说，就需要尽量降低输出级的输出阻抗。
- **电源利用效率的要求。**由于输出级的输出信号能量实际上由电源提供，为了降低功耗，希望电源提供的能量尽可能全部转换为输出信号，所以要求输出级具有较高的电源利用效率。
- **带宽的要求。**由于信号总具有一定的带宽，所以要求输出级具有一定的带宽以满足整个放大器的频响要求。

互补输出电路的工作原理

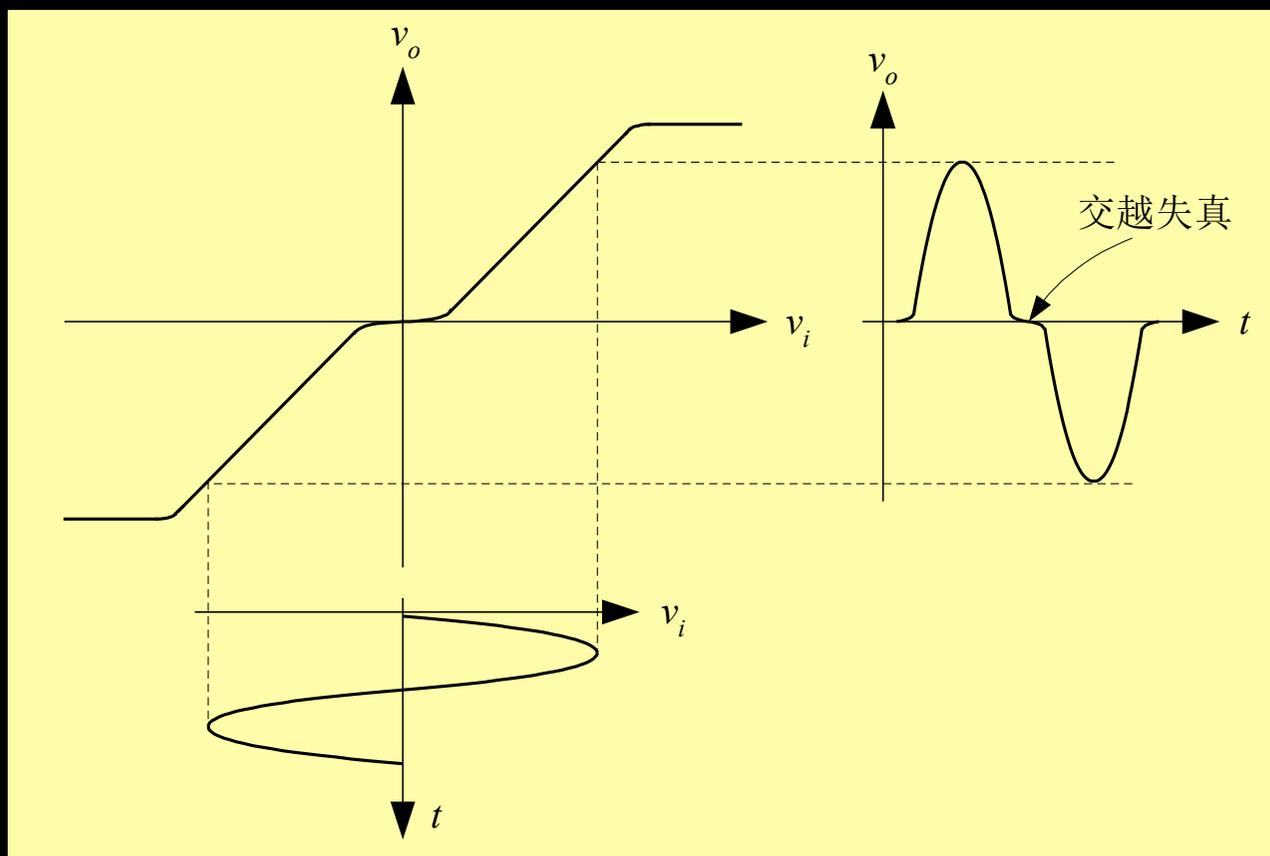
- 互补输出电路的基本结构和转移特性
- 采用两种极性互补的晶体管，所以被称为互补输出电路



$$v_i = \frac{kT}{q} \ln \frac{i_{c1}}{I_{S1}} + v_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{v_o}{I_{S1} R_L} + v_o$$

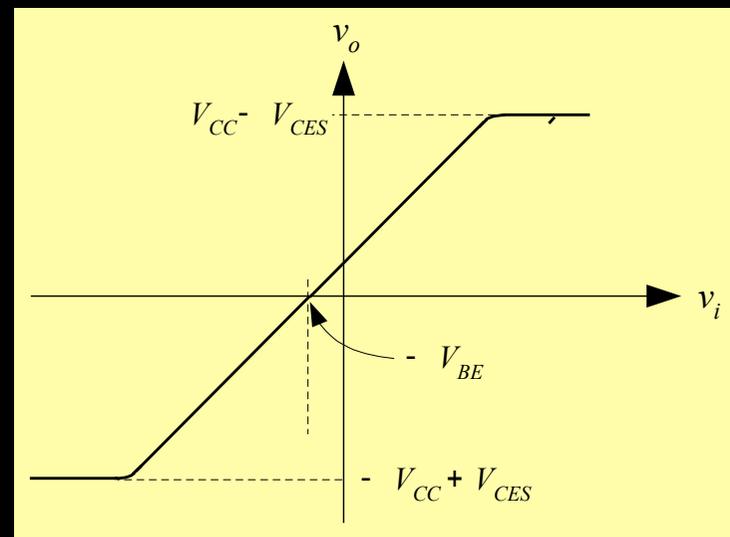
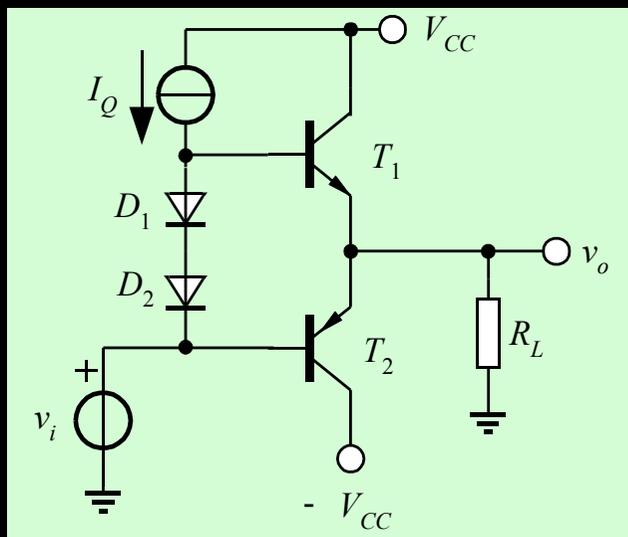
交越失真

- 两个晶体管的交替导通，但是存在导通阈值



交越失真补偿

- 预先在晶体管的输入端加上一个直流偏置，使得晶体管的 V_{BEQ} 达到阈值电压的边缘，处于一种微导通状态
- 降低交越失真的互补输出电路及其转移特性



- 这样的放大器称为甲乙类放大器。

输出功率和电源利用效率

- 乙类放大器的电源利用效率

$$\eta = \frac{P_L}{P_{DC}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{OM}}{V_{CC}}$$

- 互补放大器的输出幅度的最大值为 $V_{OM} = V_{CC} - V_{CES}$ ，所以，互补放大器的最大输出功率以及电源利用效率分别为

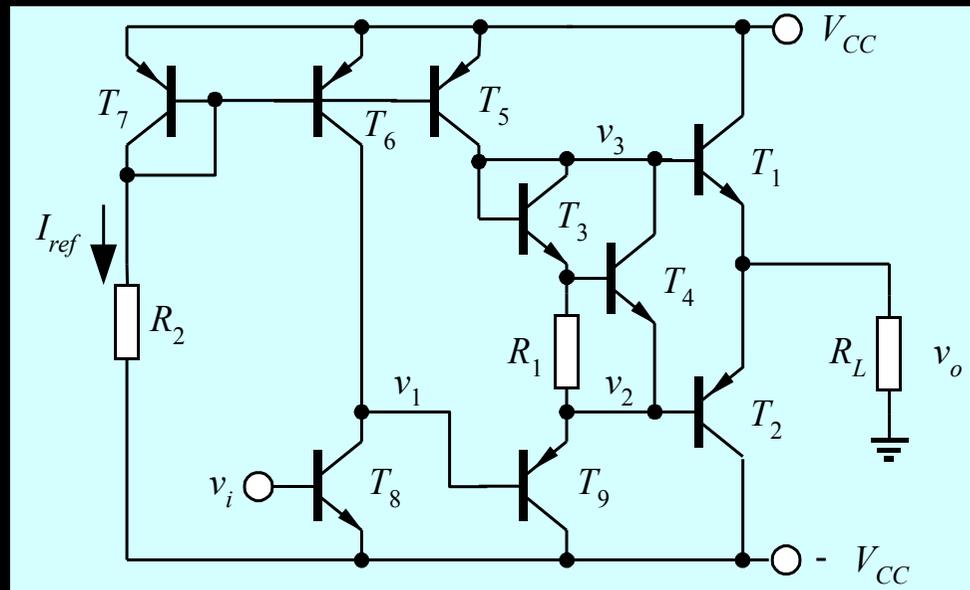
$$\eta = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{OM}}{V_{CC}} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{V_{CC} - V_{CES}}{V_{CC}}$$

- 理论上乙类放大器能够达到的最大电源利用效率为

$$\eta_{\max} = \frac{\pi}{4} = 78.6\%$$

实际的互补输出电路

- T_1 、 T_2 是互补输出管， T_3 、 T_4 以及 R_1 构成提供偏置的两个二极管， T_5 、 T_6 、 T_7 以及 R_2 构成提供偏置的电流镜， T_8 （共发射极电路）和 T_9 （射极跟随器）组成前置放大器。总的输入信号加在 T_8 的基极与 $-V_{CC}$ 之间。



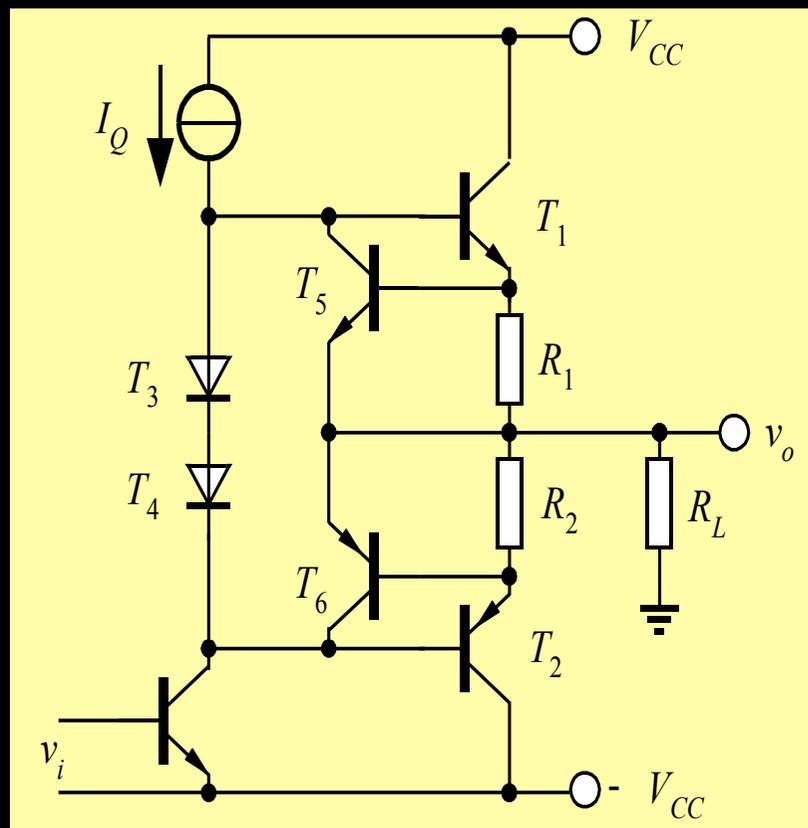
- 输出电压摆幅

$$V_{o+} = V_{CC} - V_{CES5} - V_{BE1}$$

$$V_{o-} = -V_{CC} + V_{CES8} + V_{BE9} + V_{BE2}$$

互补输出电路的过流保护

- **电路的保护原理：**
 输出电流通过取样电阻流向负载，取样电阻上的压降控制分流晶体管的导通程度。输出电流越大则分流作用越强，所以实际的输出电流将被限制在一定的范围内。



集成运算放大器

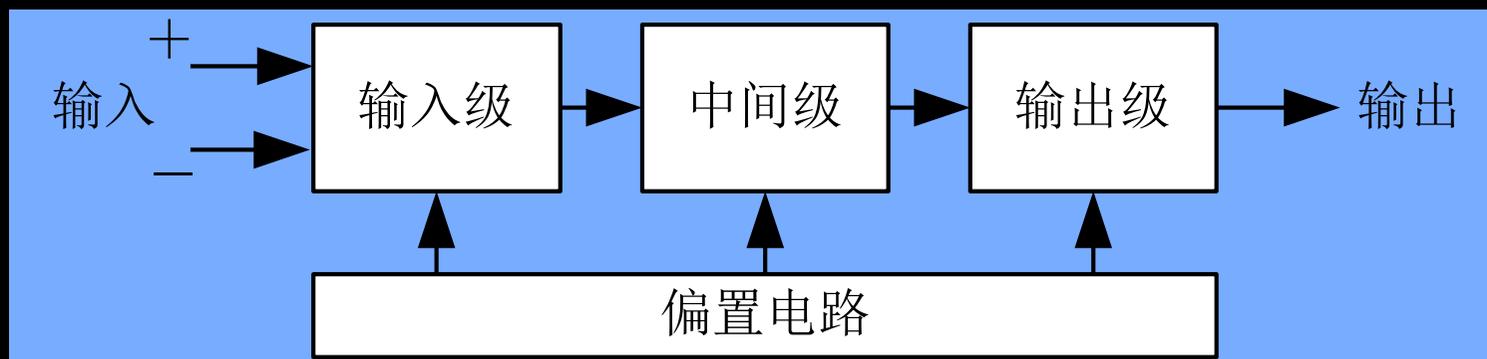
集成运算放大器的结构
等效模型和主要特性指标

集成运算放大器

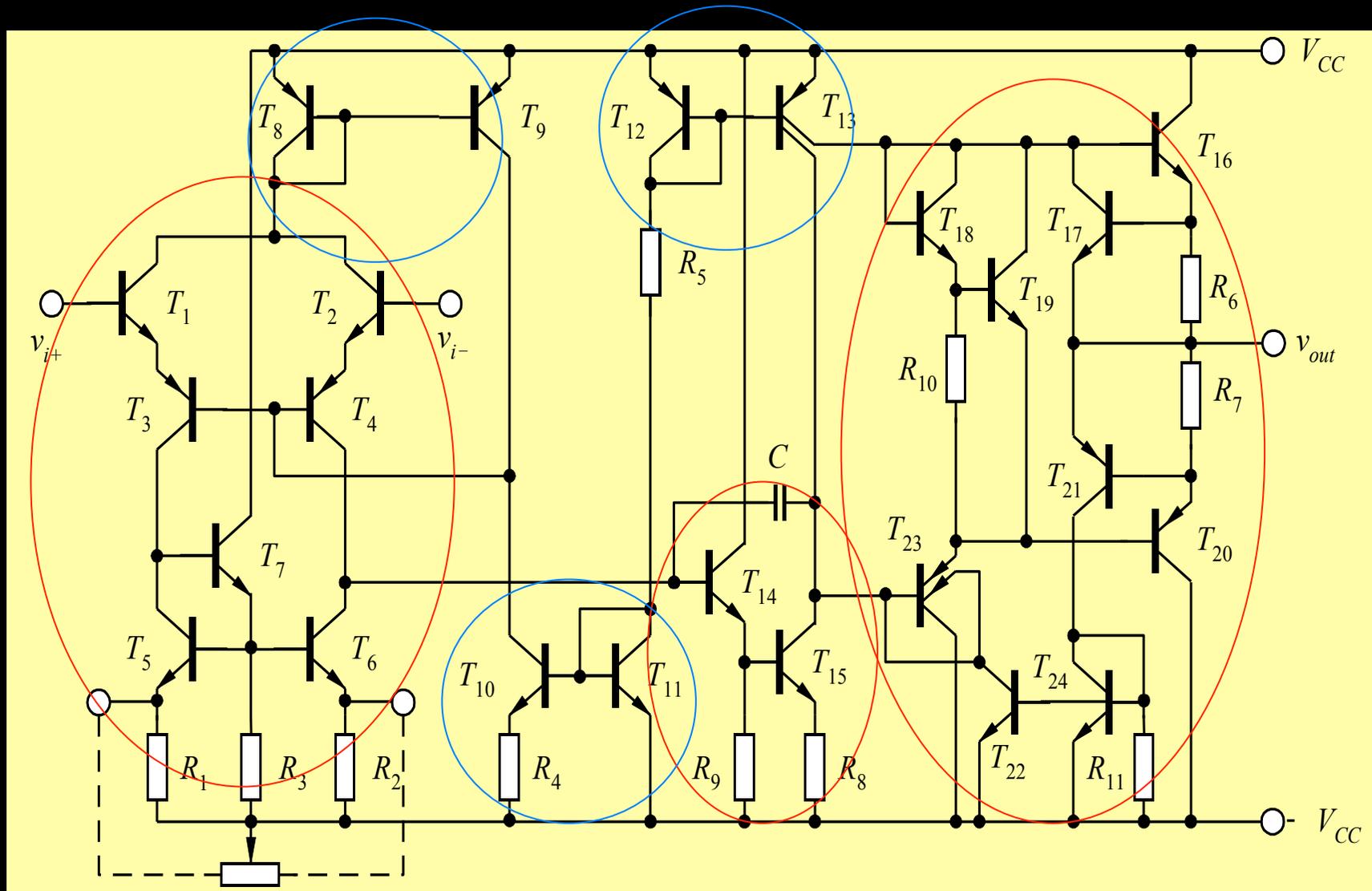
- 高增益放大器
- 可以构成具有多种数学运算功能的电路，例如加减、微积分等，所以被称作运算放大器
- 性能日益增强，成本日益下降
- 可靠性高、使用方便
- 目前除了一些特殊场合外，已经取代各种由分立元件构成的放大器，成为模拟信号处理电路中的一个基本元件

集成运算放大器的结构

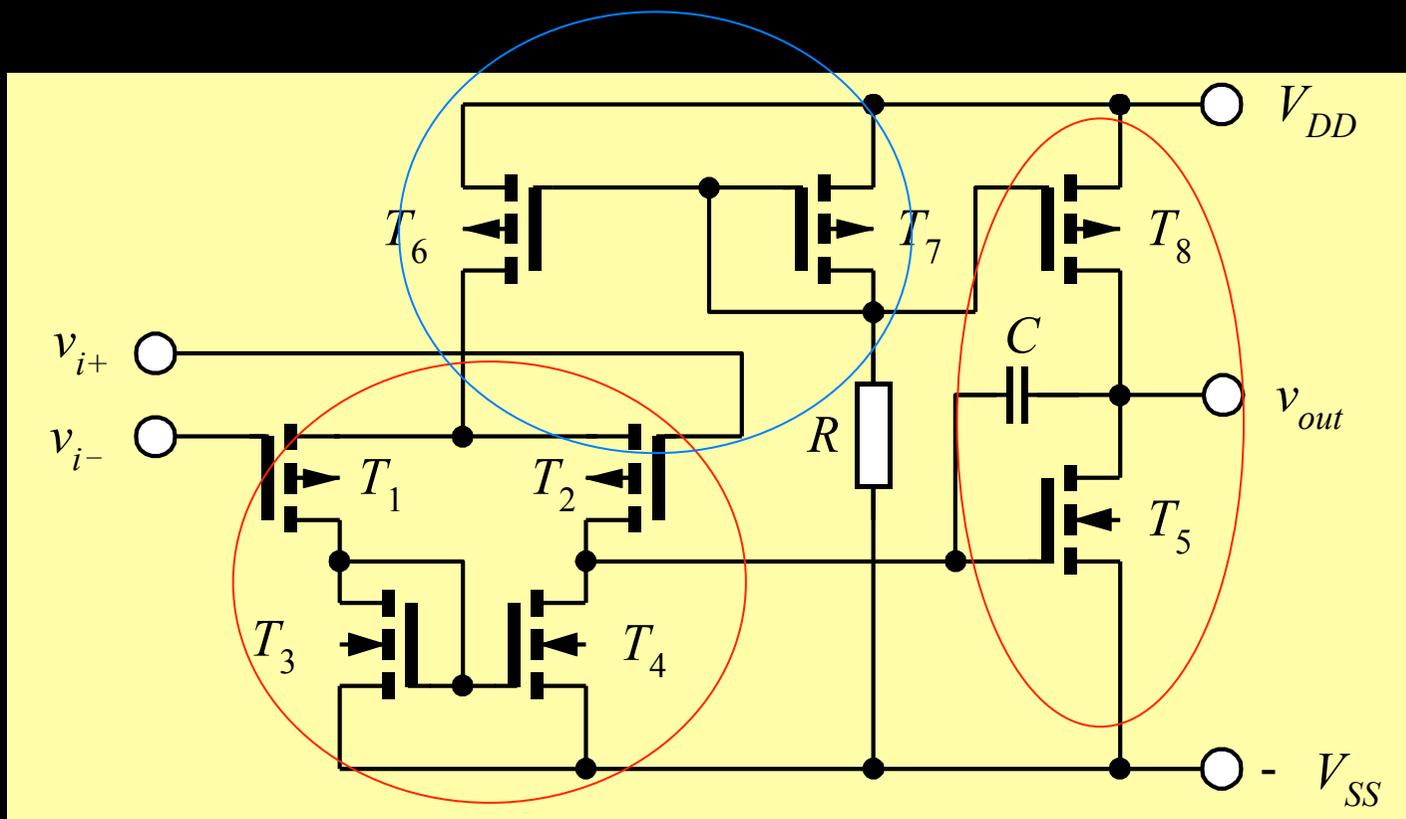
- 一般由输入级、中间级、输出级以及偏置电路构成
- 通常情况下，输入级采用差分放大器，中间级采用有源负载的共源或共射放大器，输出级则采用互补输出电路



集成运算放大器举例1



集成运算放大器举例2

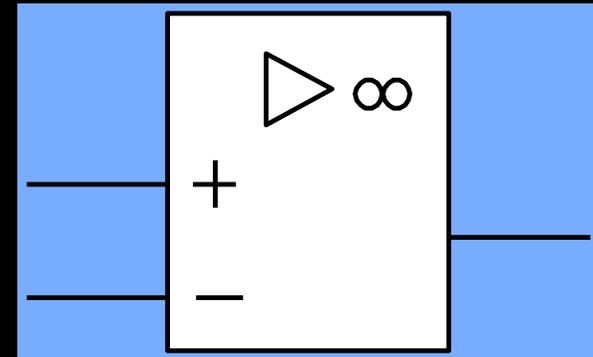


场效应管运放和双极型运放比较

- 场效应管运放
 - 结构比较简单
 - 极高输入阻抗
 - 输出阻抗一般较高
 - 负载能力比较弱
- 在模拟-数字混合集成电路里，不存在负载能力的问题，可以大量采用场效应管构成的集成放大器
- 双极型运放
 - 结构比较复杂
 - 高输入阻抗
 - 低输出阻抗
 - 负载能力强

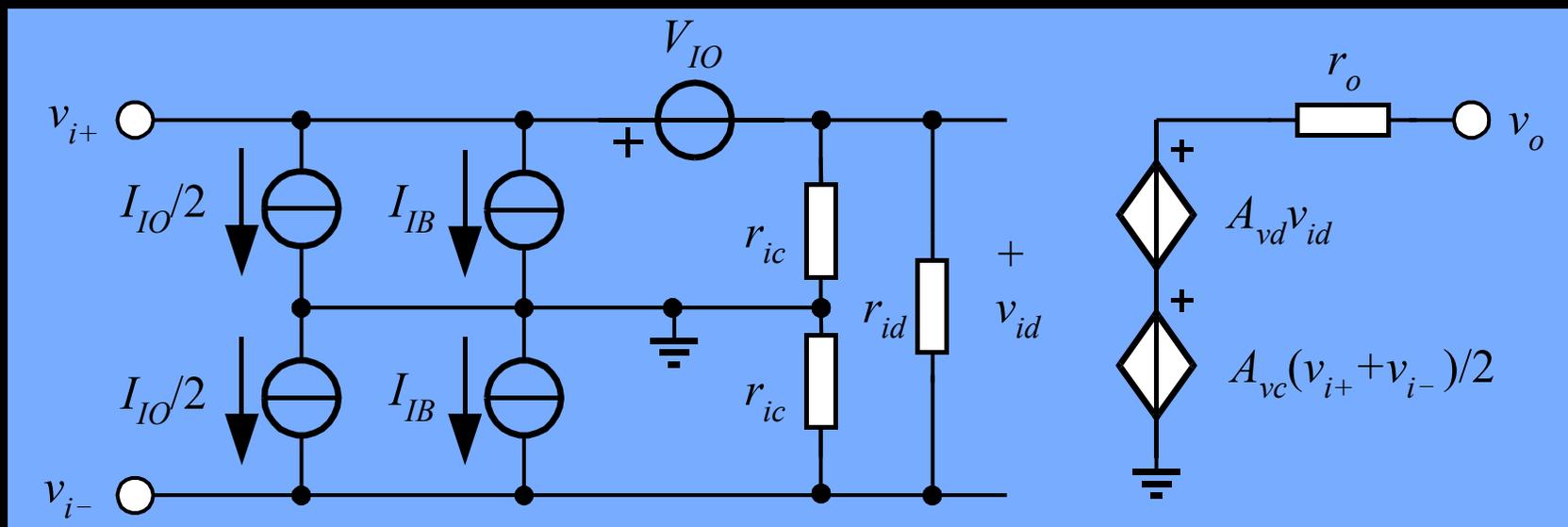
运算放大器的电路符号

- 总限定符号：三角形，表示这是一个放大器
- 三角形后面可以跟一个数字，表示该放大器的放大倍数
- 由于通用集成运放的放大倍数一般都很高，所以在不是特别关心这个值的时候，一般可以用无穷大符号表示
- 输入端：“+”，“-”符号分别表示输入与输出之间的相位关系，“+”表示输入与输出同相，“-”表示反相



集成运放的等效模型

- 由于集成运放的内部结构十分复杂，所以要精确等效一个集成运放的模型也是相当复杂的。为了分析问题的方便，通常采用一些简化模型。常用的集成运放的低频等效电路如图所示。

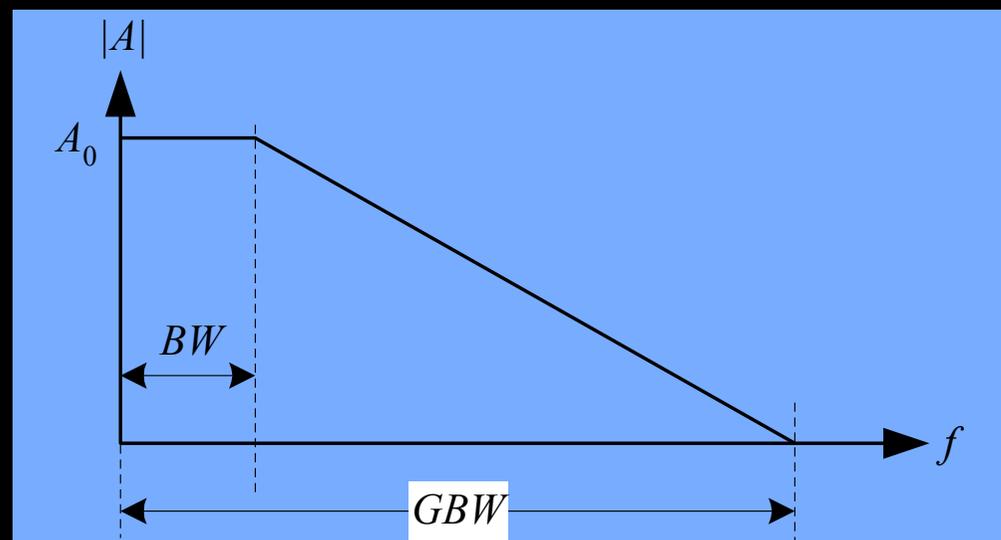


集成运放的基本性能指标

- **开环差模电压增益** A_{vd} : 集成运放在没有外加反馈时的差模电压增益称为开环差模电压增益, 通常用分贝表示
- **共模抑制比** $CMRR$: 差模放大系数与共模幅度系数之比, 通常用分贝表示
- **差模输入电阻** r_{id} : 集成运放输入级的差模输入电阻
- **共模输入电阻** r_{ic} : 集成运放输入级的共模输入电阻
- **输出电阻** r_o : 集成运放输出级的输出电阻
- **输入失调**: 包括输入失调电压 V_{IO} 、输入失调电流 I_{IO} 、输入失调电压温漂 dV_{IO}/dT 、输入失调电流温漂 dI_{IO}/dT 等几个参数
- **输入偏置电流** I_{IB} : 集成运放输入级的基极 (或栅极) 偏置电流的平均值

集成运放的稳态频率特性

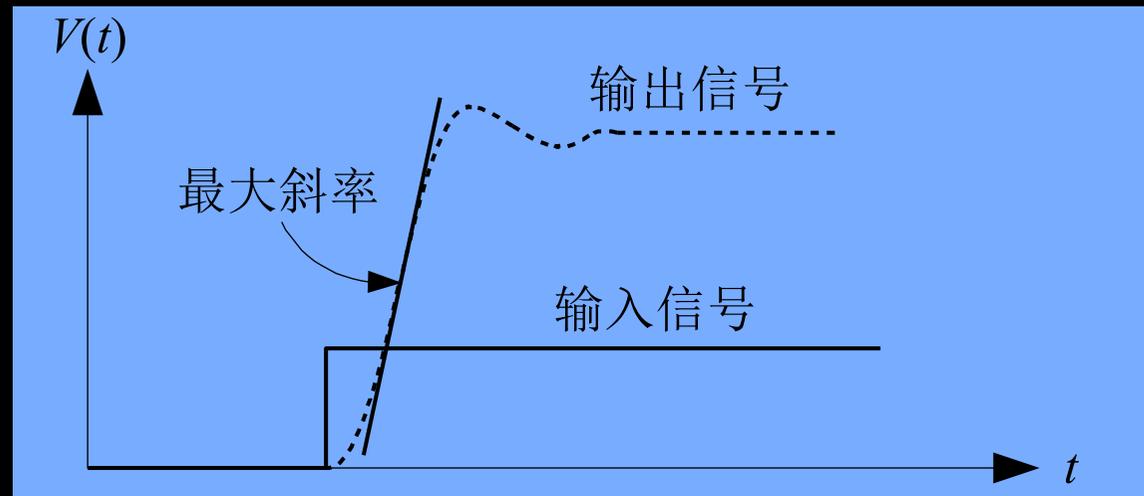
- **-3dB带宽 BW** : 运放开环电压增益下降3dB以内的频率范围。由于集成运放的下限截止频率一般都是0，所以这个参数的值实际就是集成运放在开环放大时的上限截止频率
- **单位增益带宽 GBW** : 这是指集成运放的开环增益下降到0dB（即放大倍数为1）时的频率



集成运放的瞬态响应特性

- **压摆率** SR : 也称转换速率, 表示集成运放输出端可能达到的最大电压变化速率

$$SR = \left| \frac{dV_o}{dt} \right|_{\max}$$



集成运放的极限参数

- **最大差模输入电压**：集成运放允许输入的最大差模信号
- **最大共模输入电压**：集成运放允许输入的最大共模信号
- **最大输出电流**：集成运放最大允许输出电流。运放的输出电流有流出电流和吸入电流的分别，这两个电流的最大允许值有可能是**不一致的**。在某些运放中这两个电流一致，便统称**最大输出电流**
- **最大工作电压**：这是一个极限参数，表示运放工作电压的极限值，在运放使用中不应超越此值，否则可能造成运放**永久损坏**



复旦大学电子工程系 陈光梦

第4章结束

