

# CMOS模拟集成电路设计

第七章: 运放的高级设计: Class-AB级

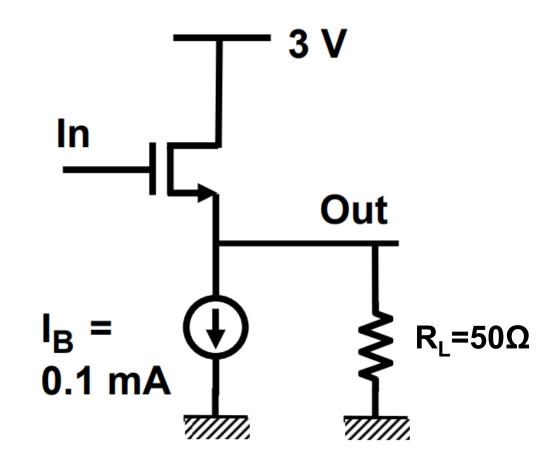
胡远奇

©2020

### **>>>** Class-AB级

- ·什么是Class-AB级
- •静态电流控制方法
  - 交叉耦合差分对
  - 动态偏置技术
  - 线性跨导回路

#### **>>>** 为什么需要推挽输出



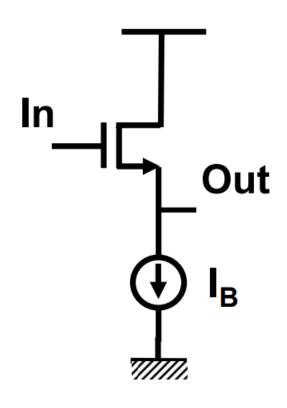
当输出电阻较大时:  $V_{OUT} = V_{IN} - V_{GS}$ 

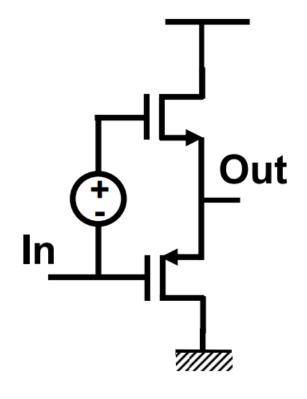
#### 当输出电阻较小时:

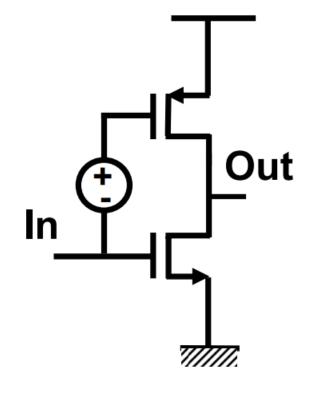
- 例如耳机索尼耳机阻抗 6 Ohm
- 输出级可以向外**输出(source)** 大电流, 从而形成正向摆幅
- · 输出级无法向内吸收 (sink) 大电 流, 负向摆幅受限
- 1V的负向摆幅,要求至少20mA的 电流 (50ohm负载), 意味着静态 功耗的增加



## 输出级的形式







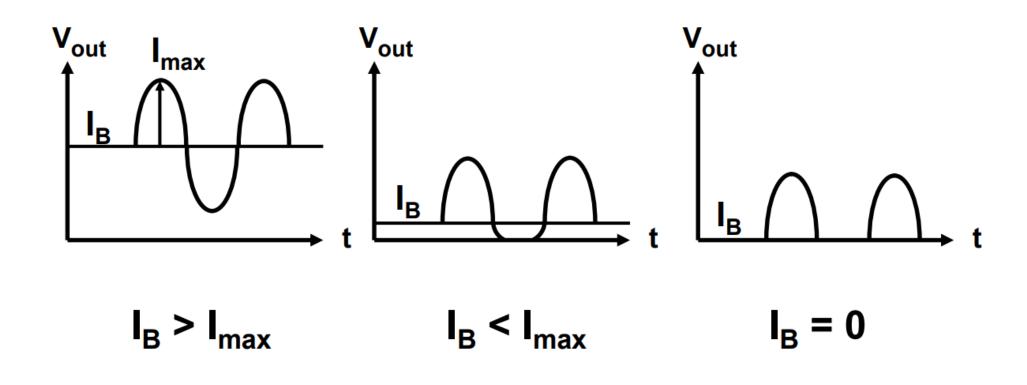
$$I_{max} < I_{B}$$

$$V_{Out} = V_{In} - V_{GS}$$

Push-Pull  
$$V_{out,max} = V_{DD}-2V_{GS}$$

Amplifier Rail-to-rail





Class A

**Class AB** 

Class B

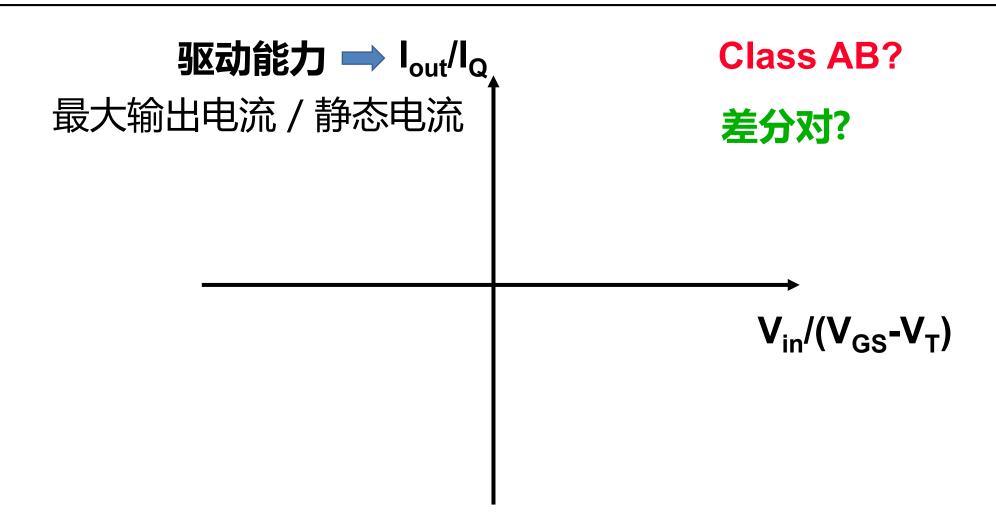


## **>>> Class-AB 级的要求**

- ✓轨到轨的输出
- ✓静态电流的精准控制
  - ✓低功耗
  - ✓独立于电源电压
- ✓大电流驱动能力 I<sub>max</sub>/I<sub>Q</sub>
- ✓尽量小的面积



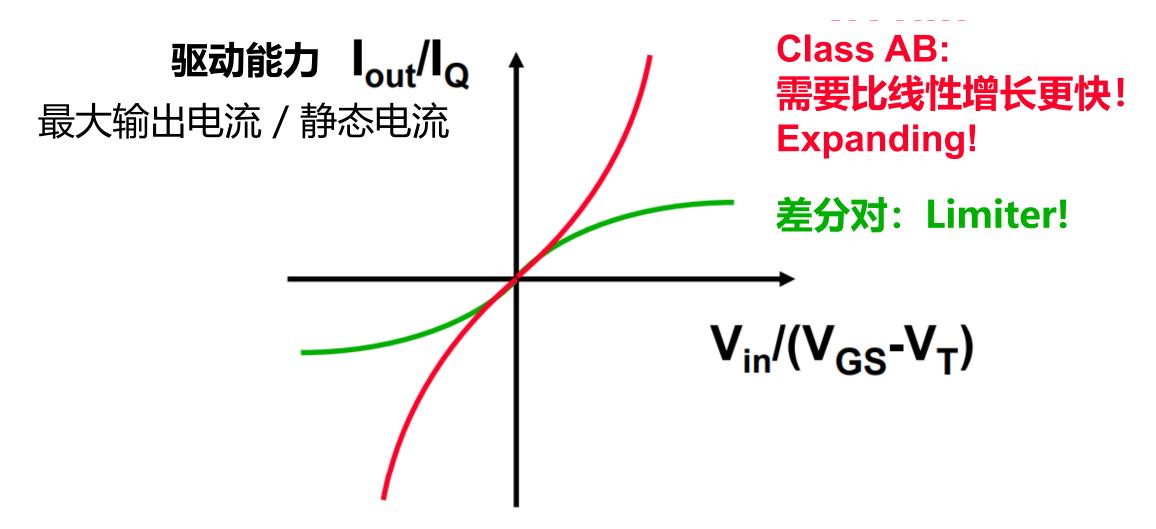
## **>>> Class-AB 输出级**



Class-AB:大失真->必须通过反馈修正->3级运放

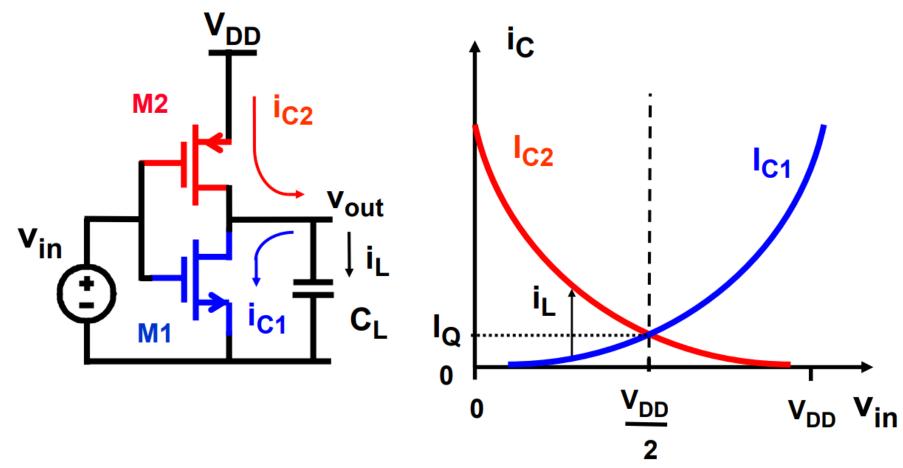


#### **>>> Class-AB 输出级**



Class-AB:大失真->必须通过反馈修正->3级运放

## >>> Class-AB 输出级: 反相器



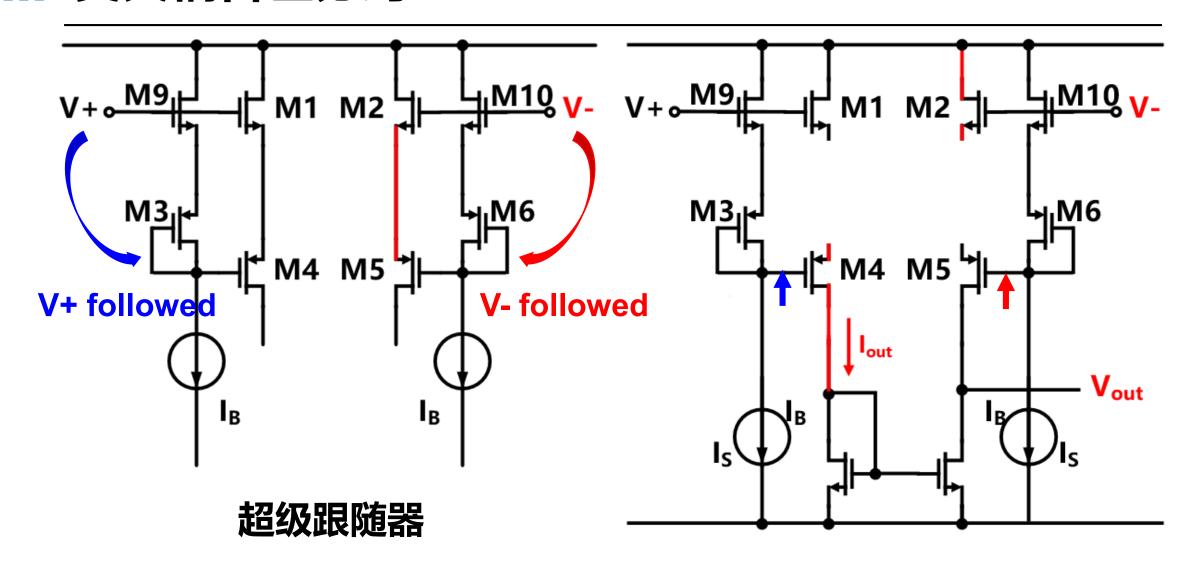
问题1: I<sub>Q</sub>无法控制

问题2:输出与电源电压直接相关

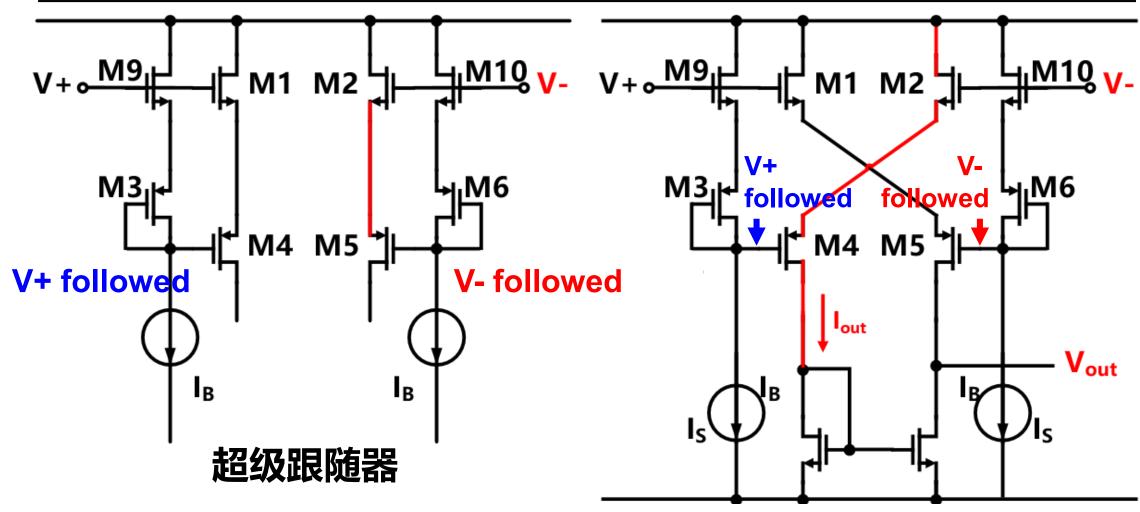
### **>>>** Class-AB级

- •什么是Class-AB级
- •静态电流控制方法
  - ・交叉耦合差分对
  - 动态偏置技术
  - 线性跨导回路

## >>> 交叉耦合差分对

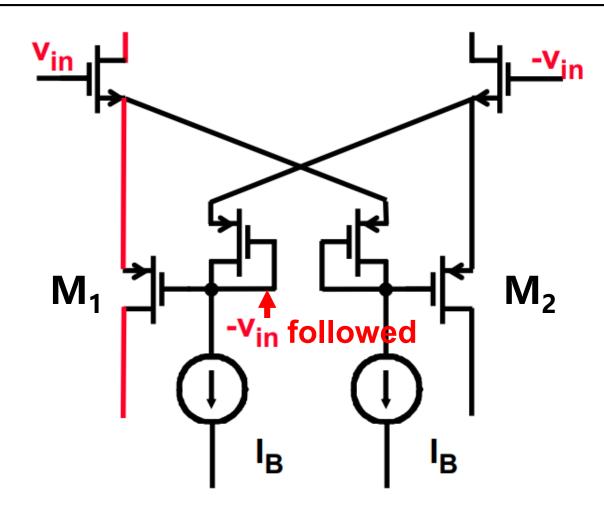


### >>> 交叉耦合差分对



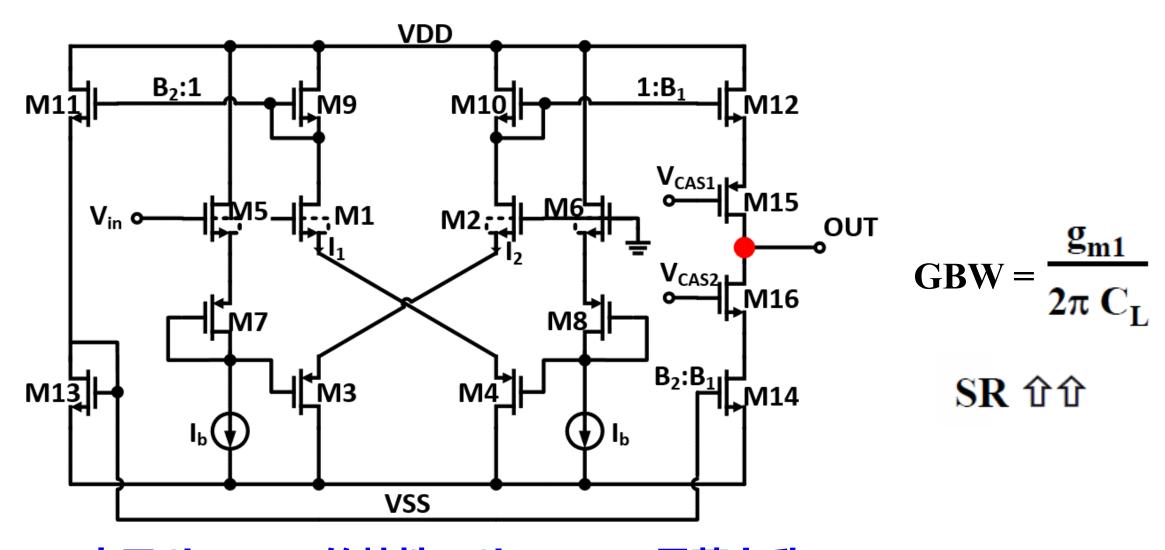
· Vin作用在晶体管M<sub>1-5</sub>和M<sub>2-4</sub>的V<sub>GS</sub>上,实现大电流输出;静态电流 通过电流镜得到控制

## >>> 交叉耦合差分对



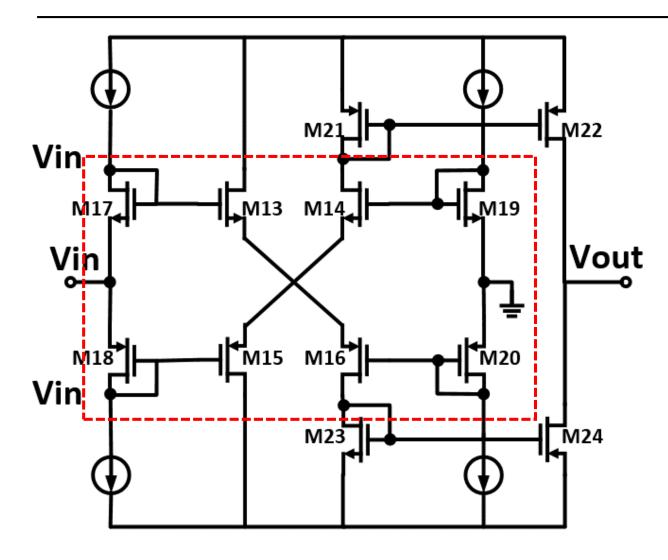
•  $Vin作用在晶体管M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>的<math>V_{GS}$ 上,实现大电流输出;对称性不如前者

## >>> Class-AB 输入级电路



由于Class-AB的特性, Slew Rate显著上升

## >>> 单端输入的Class AB (Double-Push)

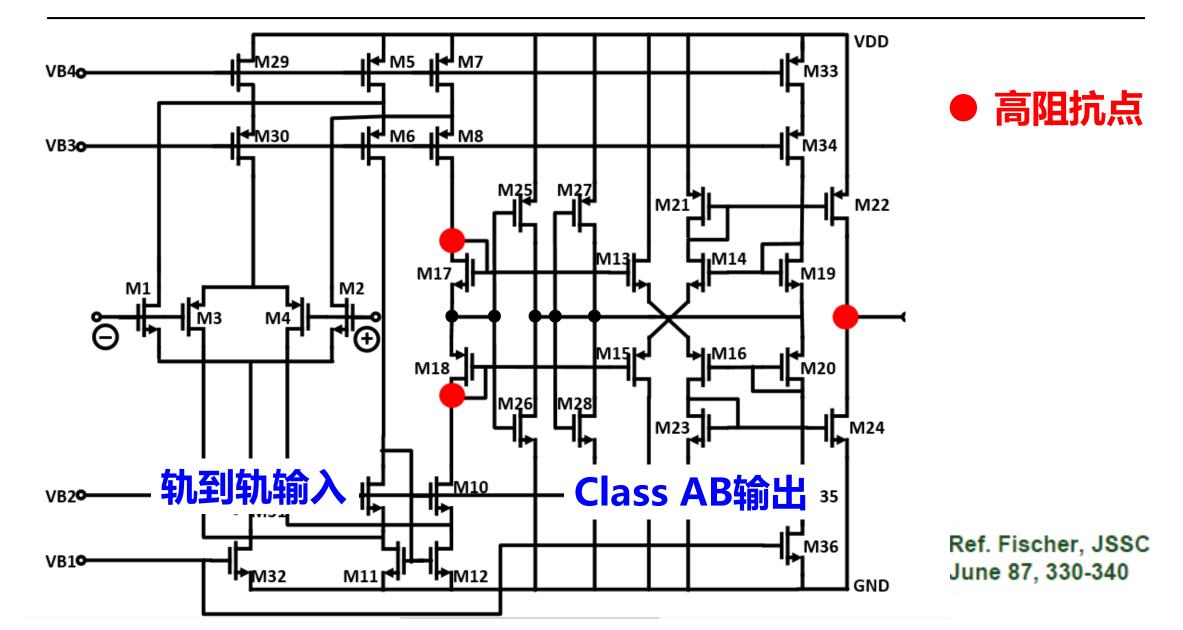


- M<sub>13</sub>-M<sub>20</sub>共同组成交叉耦 合电路
- M<sub>13</sub>-M<sub>16</sub>为核心耦合对
- M<sub>17</sub>-M<sub>20</sub>为静态电流控制 电路

静态电流由输入端的电流镜控制



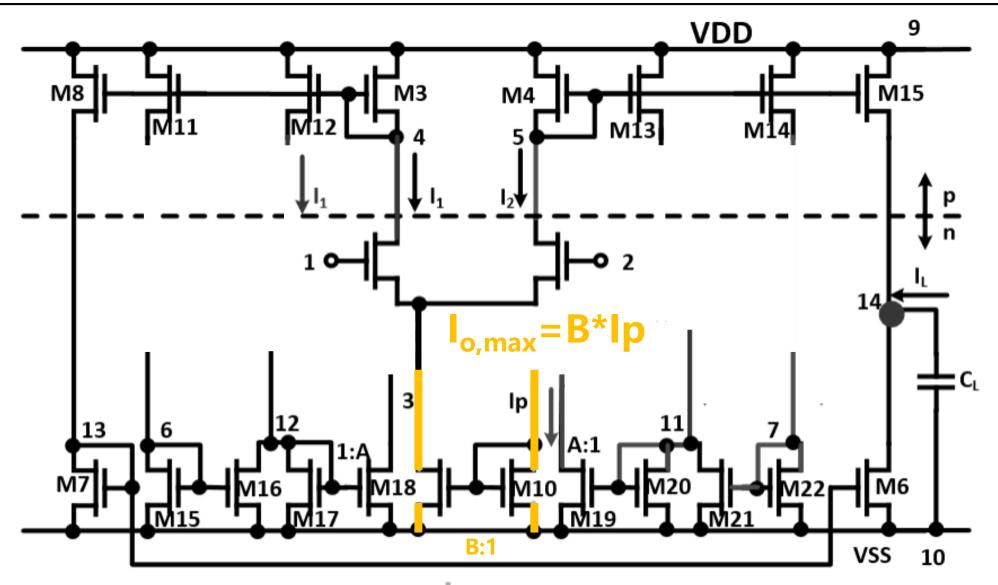
#### >>> Double-Push

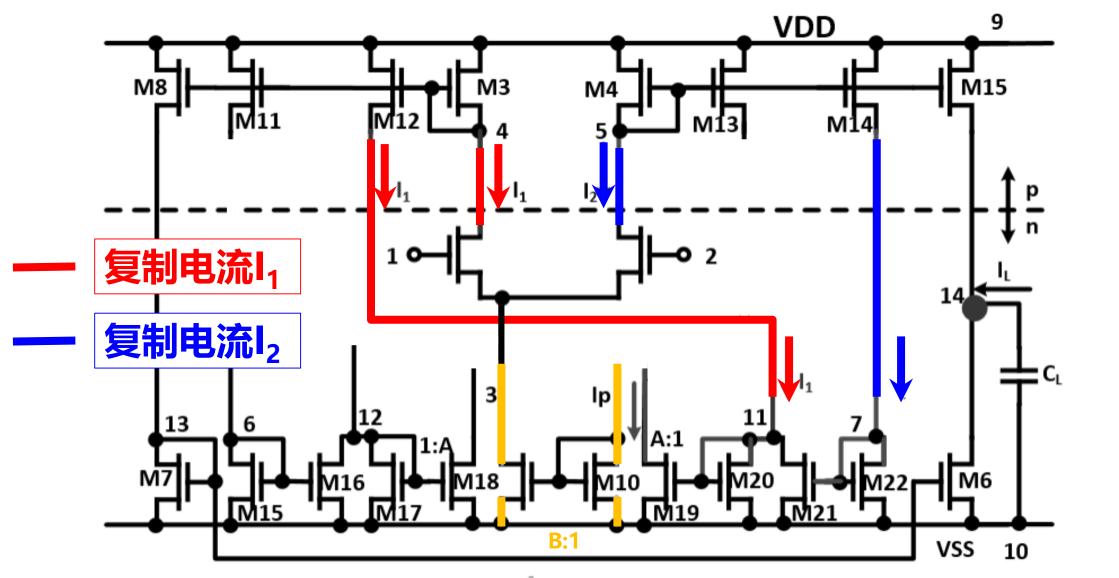


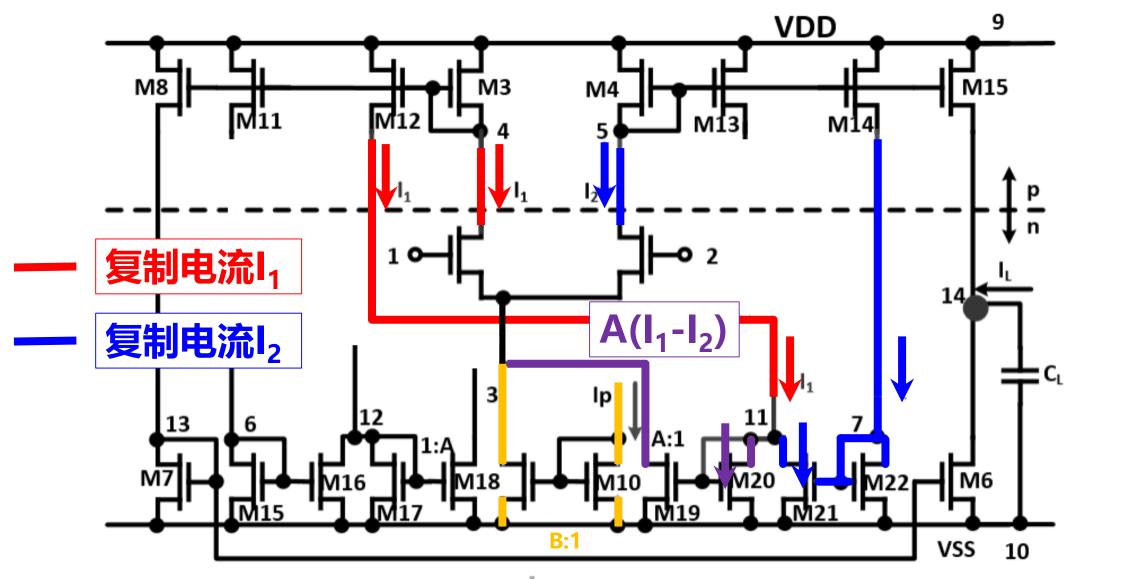
### **>>>** Class-AB级

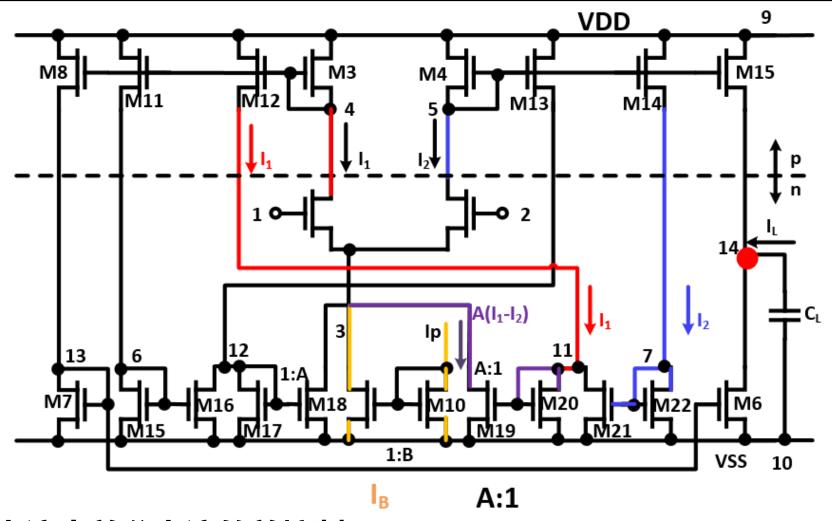
- •什么是Class-AB级
- •静态电流控制方法
  - 交叉耦合差分对
  - ・动态偏置技术
  - 线性跨导回路



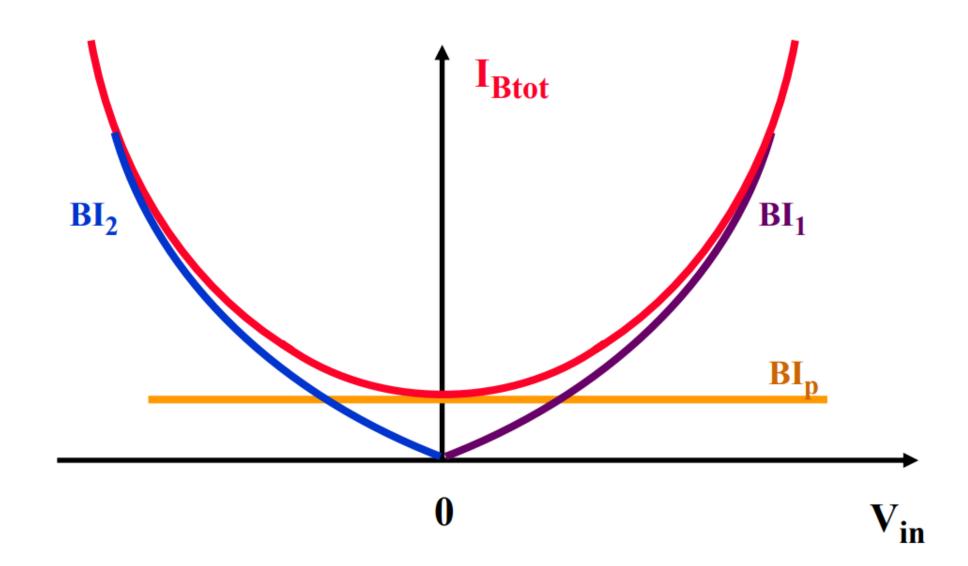




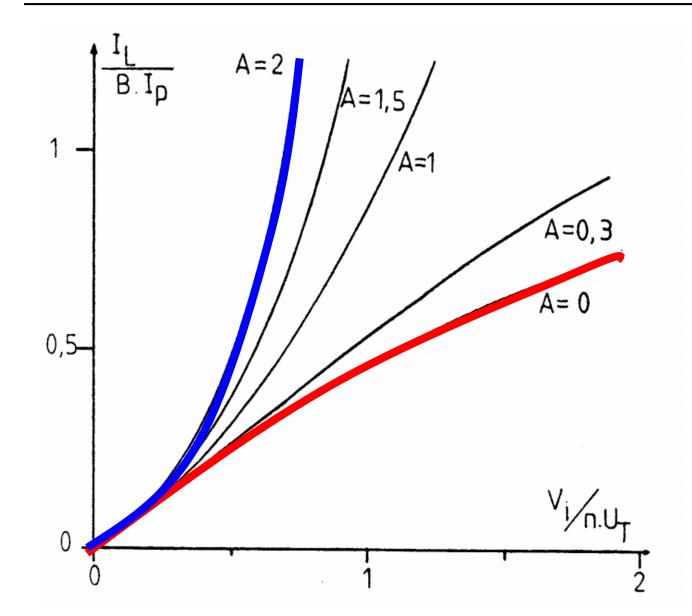




- 偏置电流由差分电流的差控制
- · 差分电流通过电流镜M<sub>17-18</sub>和M<sub>19-20</sub>的比例放大A倍







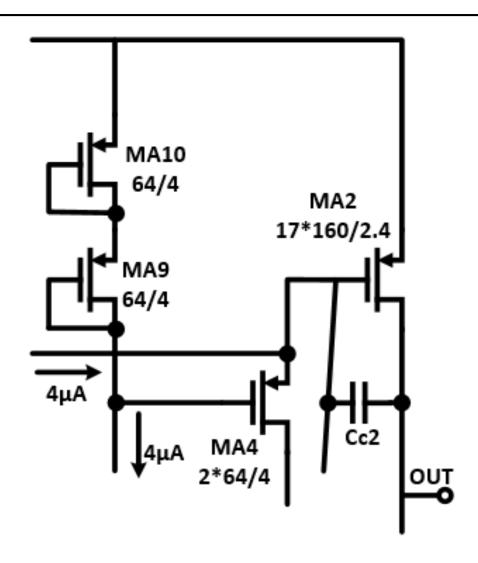
- · A=0时,没有动态 偏置技术,输出电 流受限
- A越大,Class-AB 的效果越明显
- 由于失配的存在 (Mismatch) 放大系数A不能过大, 通常不能超过10

### **>>>** Class-AB级

- •什么是Class-AB级
- •静态电流控制方法
  - 交叉耦合差分对
  - 动态偏置技术
  - ・线性跨导回路



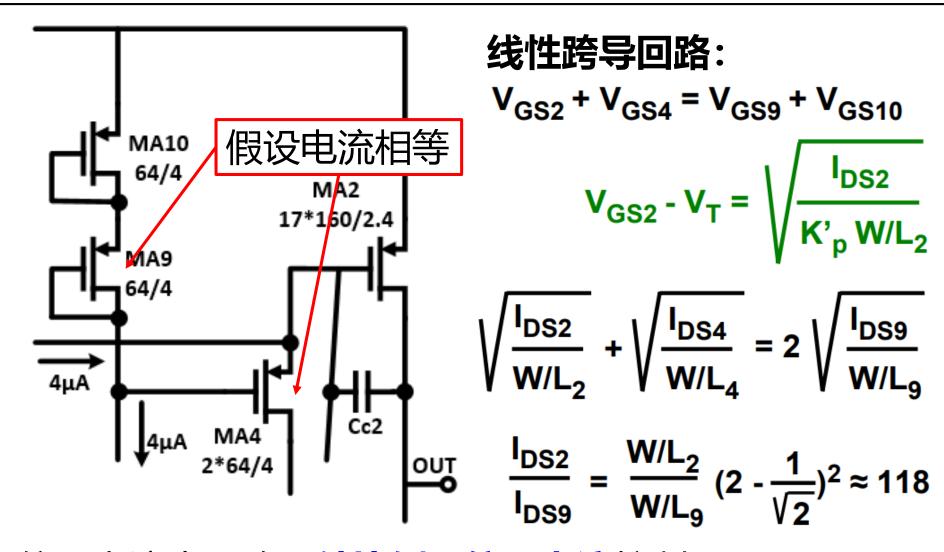
## 静态电流控制技术:线性跨导回路



#### 线性跨导回路:



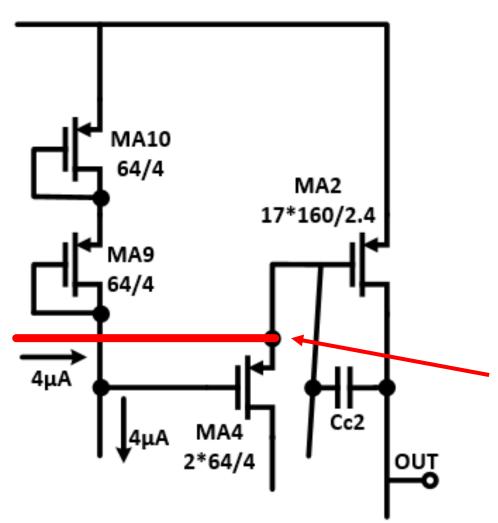
#### 静态电流控制技术:线性跨导回路



• 偏置电流由回路器件比例和偏置电流控制



### >>> 静态电流控制技术:线性跨导回路

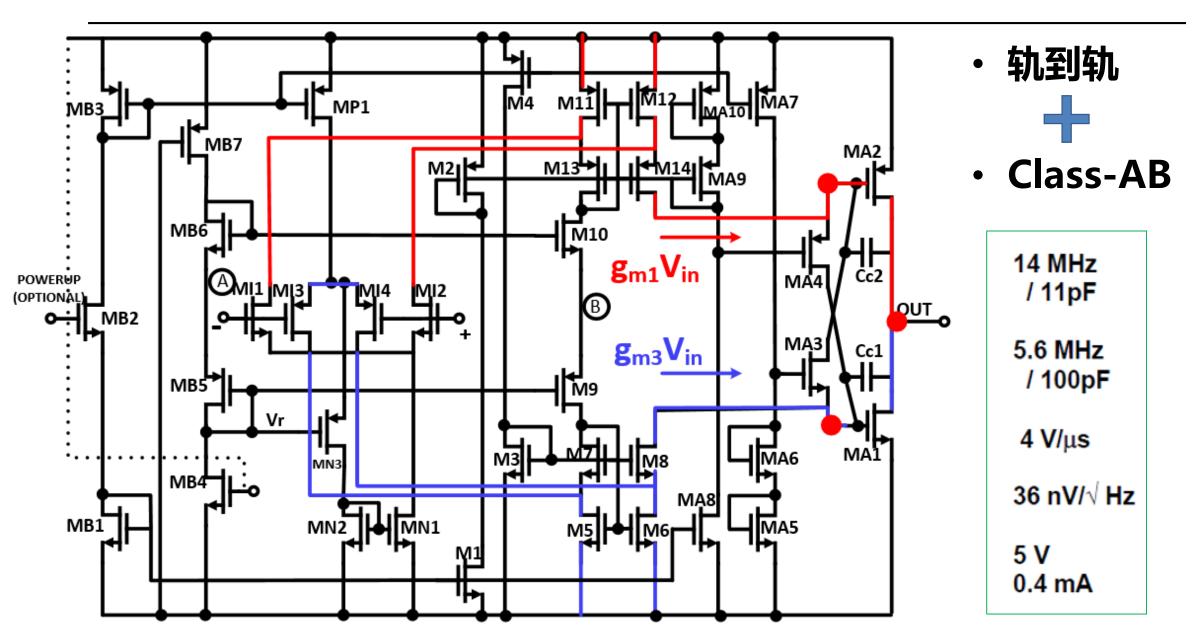


$$\frac{I_{DS2}}{I_{DS9}} = \frac{W/L_2}{W/L_9} (2 - \frac{1}{\sqrt{2}})^2 \approx 118$$

- I<sub>DS2</sub>达到最大值时, I<sub>DS4</sub>趋于0, 晶体管MA4接近截止
  - 输入信号

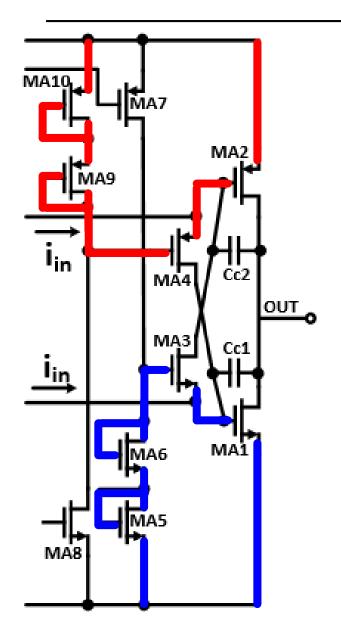


### >>> 静态电流控制技术:线性跨导回路





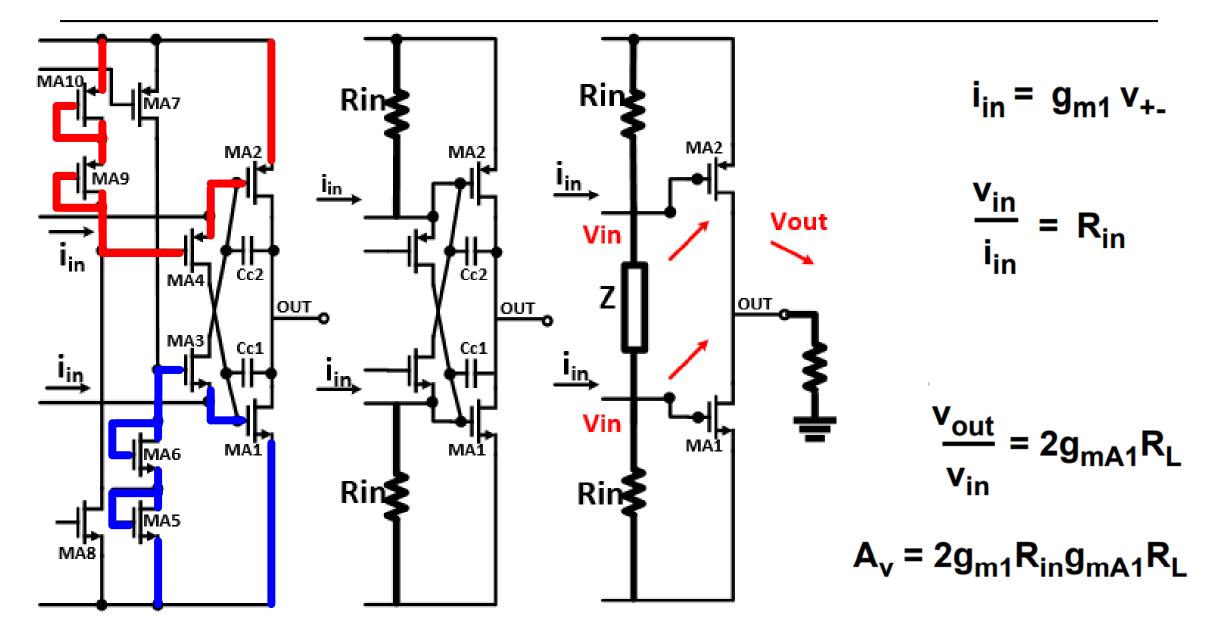
### >>> 线性跨导回路:输出级增益



- PMOS和NMOS线性跨导回路的输入电流 相位相同,极性一致
- 対于小信号模型而言: i<sub>in</sub>=i<sub>MA4</sub>+i<sub>MA3</sub>
- · 由于相位一致,MA4和MA3被自举 (Bootstrap) ,使得其等效阻抗无穷大
- · 晶体管MA4和MA3只用来提供静态偏置
- · 该输出级增益即为MA1和MA2晶体管的自增 益,或跨导与负载电阻的乘积



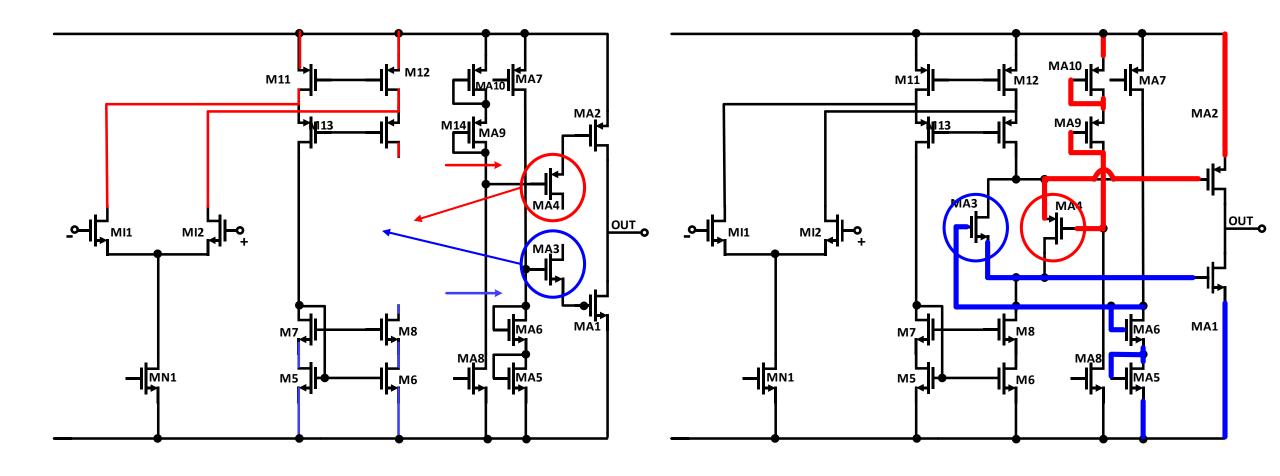
### >>> 线性跨导回路:输出级增益





## >>> 线性跨导回路:输出级增益

· 可以将偏置晶体管M3A和M4A并联,使其各自的电流动态调整

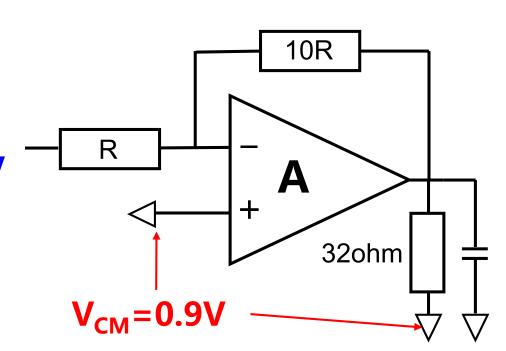


### >>> 课后习题

- ·设计一个线性跨导回路的Class-AB运放,其中:
  - $V_{DD} = 1.8V$ ,  $V_{SS} = 0V$ ,  $V_{CM} = 0.9V$
  - $C_L=10pF$ ,  $R_L=32ohm$
  - ・差模输入Vpp=100mV,输入频率200kHz,放大倍数10

#### •要求指标:

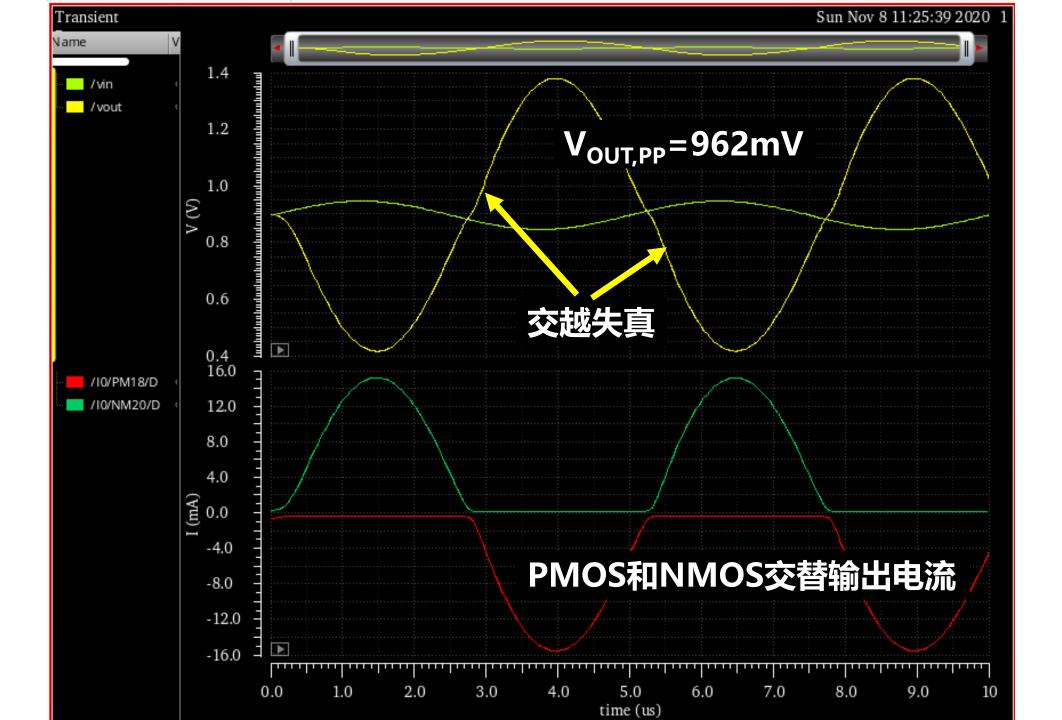
- ·要求输出正弦波峰-峰值大于950mV
- ·运放静态功耗小于1.5mA



#### >>> 课后习题

#### •思路:

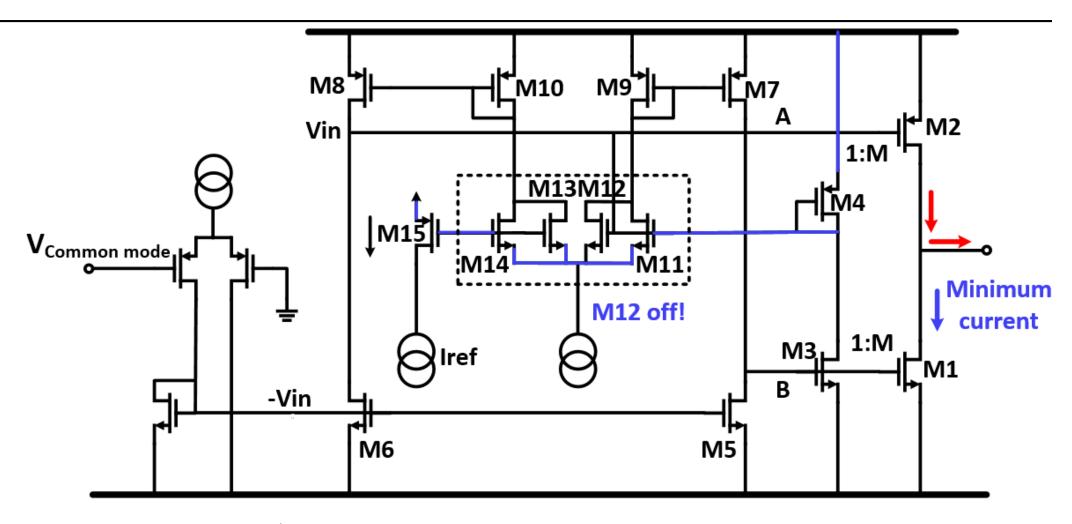
- 1. 根据x10的放大倍数和下式,确定所需的DC增益,建议留出5倍冗余 $V_{out} = -\frac{10\cdot A_0}{A_0+11}\cdot V_{in}$
- 2. 根据x10的放大倍数和输入频率估计GBW,建议5倍冗余
- 3. 根据所需要的输出电流预估线性跨导回路尺寸和偏置
  - ·峰值输出时,VDS=0.4V,因此峰值下V<sub>GST</sub><0.4V



### **>>>** Class-AB级

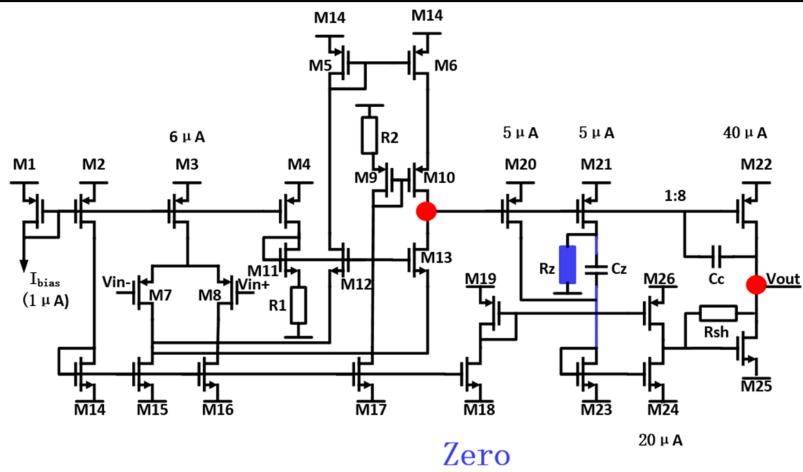
- •什么是Class-AB级
- •静态电流控制方法
  - 交叉耦合差分对
  - 动态偏置技术
  - 线性跨导回路
- ・其他

## >>> 线性跨导回路:多回路叠加



- ✓M3/M4检测输出电流
- ✓防止一侧输出晶体管在另一侧大电流输出时关断

## 》)低电压实现I



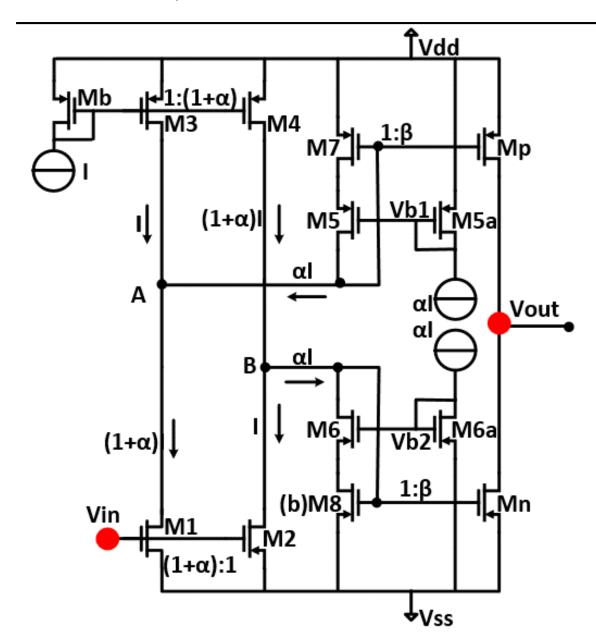
1.5 V 90  $\mu$ A 1 MHz/150 pF

Ref. Van Dongen, JSSC Dec.95, 1333-1337

- ✓第一级输出直接驱动Class-AB级的输入
- ✓静态电流的驱动没有很好的控制



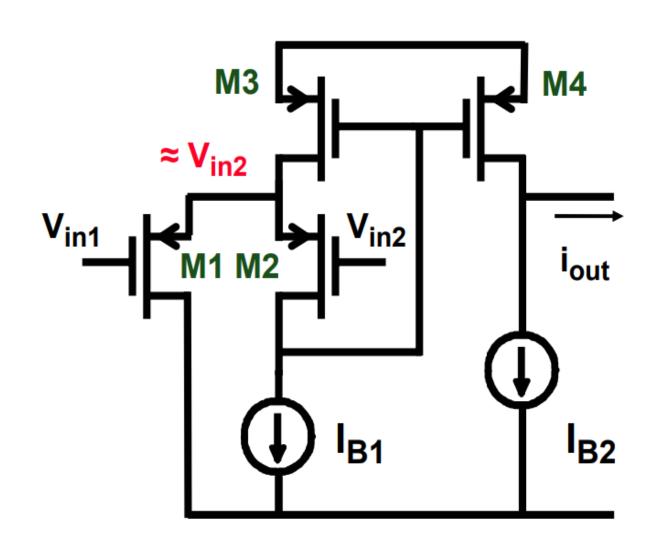
## 低电压实现II



- 静态电流控制优秀
- 在A点和B点获得最大摇摆范围,使得输出电流远大于静态电流
- $\alpha = 0.2$ 
  - 取值在增益和失配间平衡
- $\beta = 120$



## **》)低电压实现III**



M2是一个源极跟随器

VGS1 = Vin1 - Vin2

 $i_{out} \sim (Vin1 - Vin2)^2$ 

>>> Class AB