

第七章 典型运放-下

冯 鹏

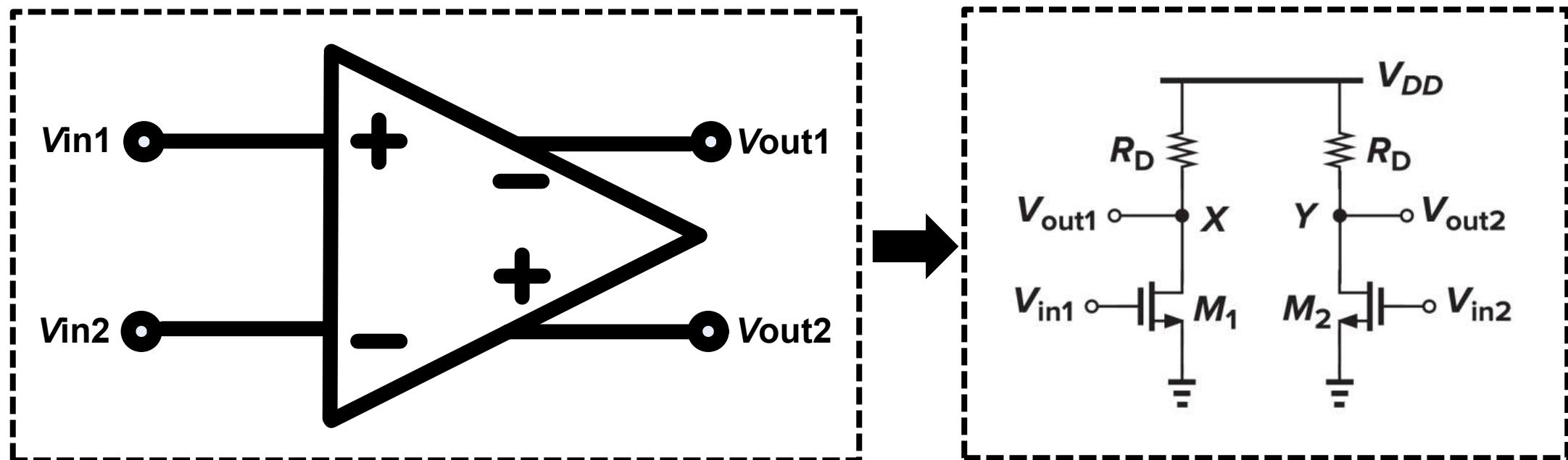
fengpeng06@semi.ac.cn

中国科学院半导体研究所

本章内容

- ◆ 全差分放大器
- ◆ 共模反馈
- ◆ 全差分两级放大器
- ◆ 常用的全差分放大器结构
- ◆ 开关电容共模反馈

全差分放大器



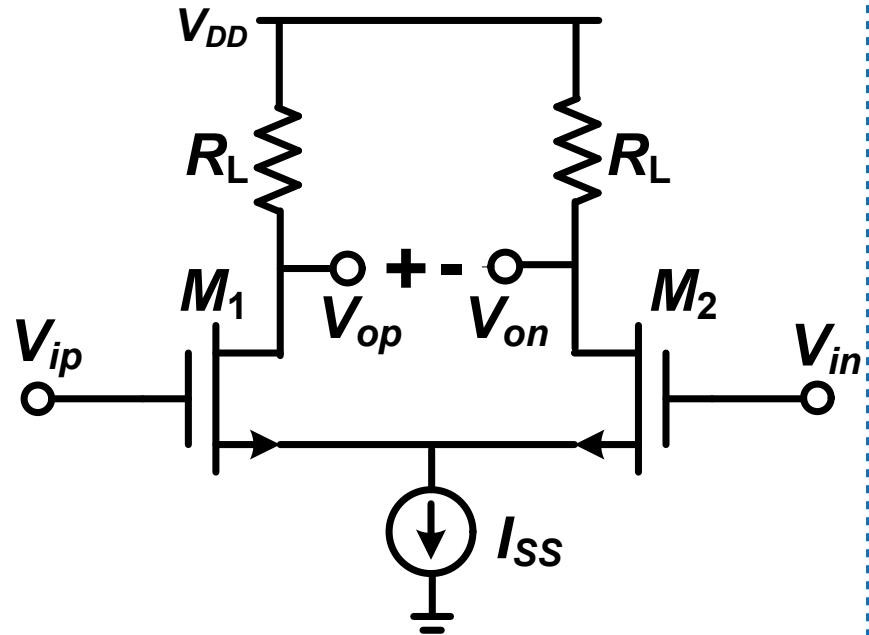
- 特点：输入、输出均为差分信号
- 优点：摆幅加倍、共模噪声抑制好、偶次谐波失真低
- 缺点：电路规模加倍，一般需要共模反馈电路

本章内容

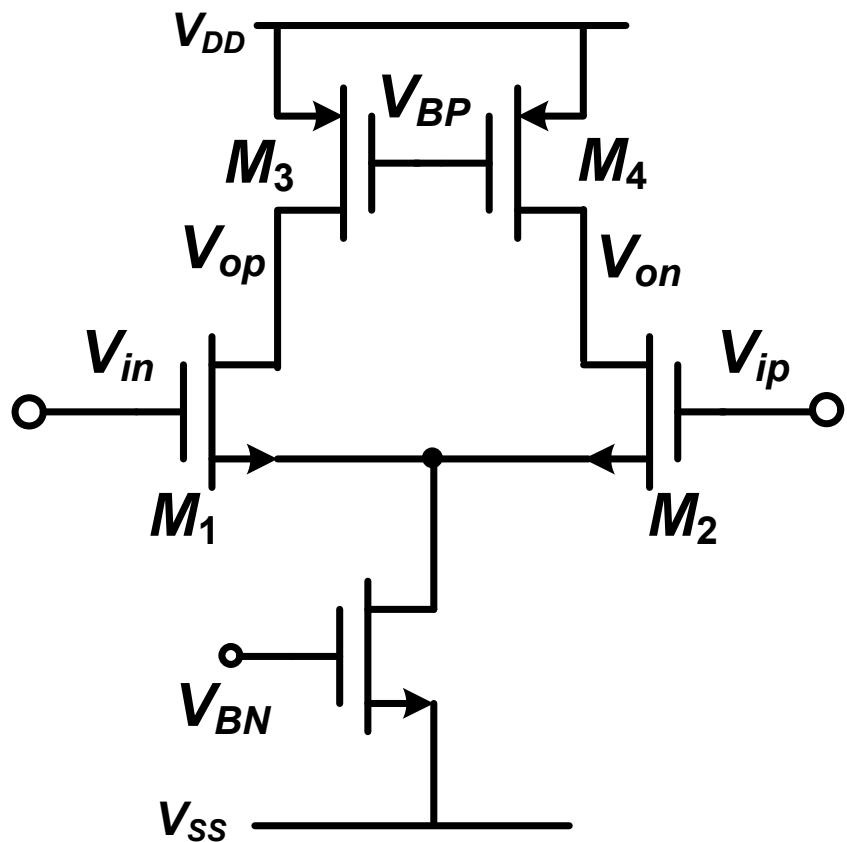
- ◆ 全差分放大器
- ◆ 共模反馈
- ◆ 全差分两级放大器
- ◆ 常用的全差分放大器结构
- ◆ 开关电容共模反馈

共模反馈的必要性-1

■ 为什么需要共模反馈？



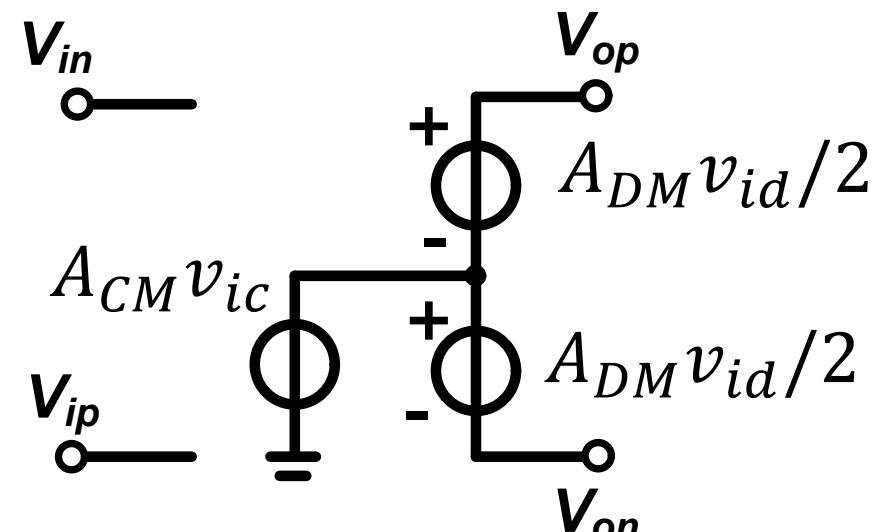
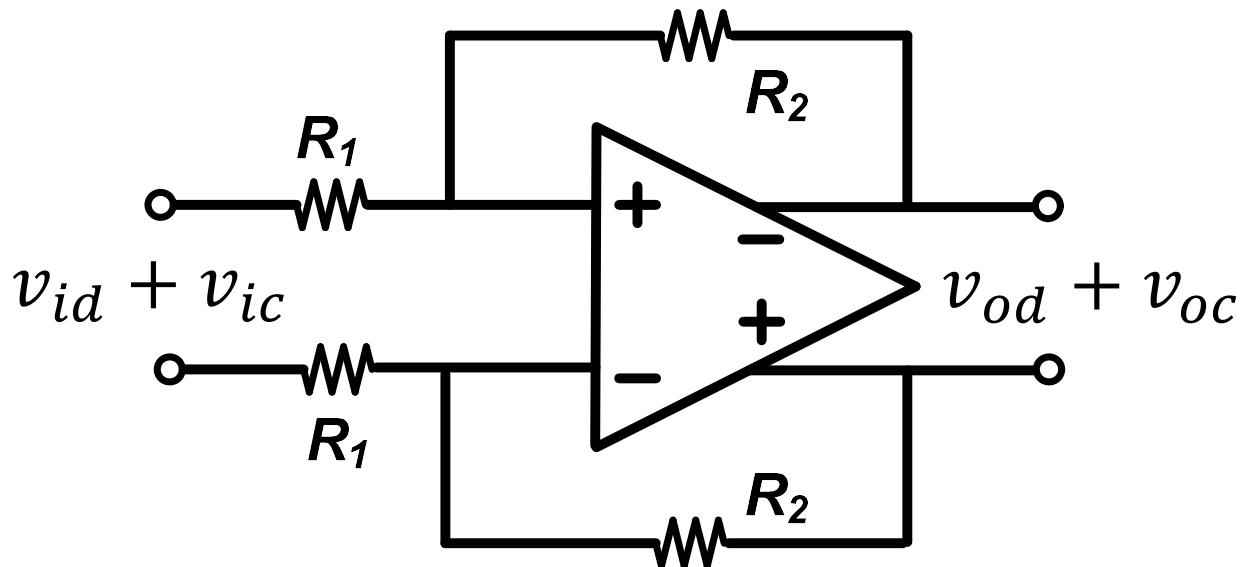
$$V_{CM,OUT} = V_{DD} - \frac{1}{2} I_{SS} R_L$$



- 尾电流源和负载电流源电流大小不匹配！！
 - 输出节点阻抗高

共模反馈的必要性-2

■ 为什么需要共模反馈?



$$\frac{v_{od}}{v_{id}} = -\frac{A_{DM}R_2/(R_1 + R_2)}{1 + \underline{A_{DM}R_1/(R_1 + R_2)}} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

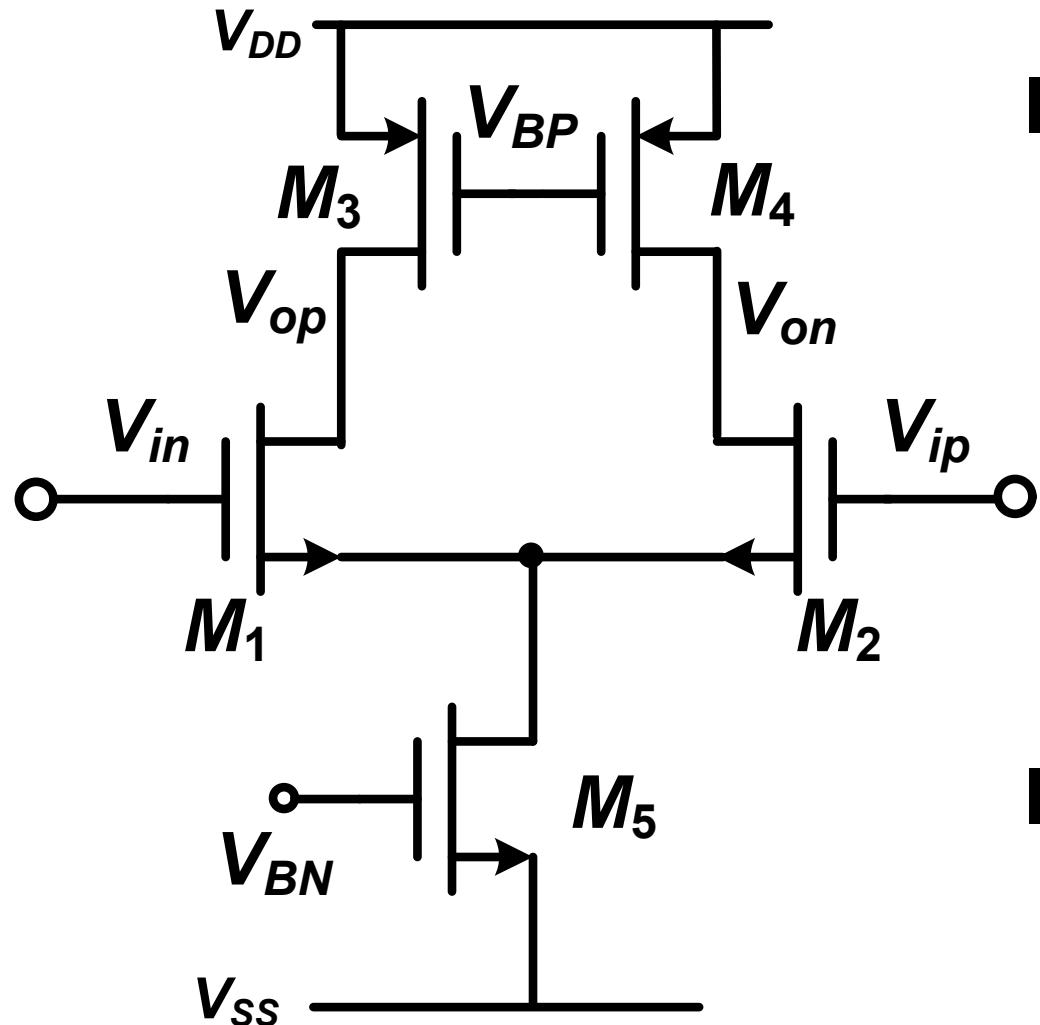
开环，远大于1

$$\frac{v_{oc}}{v_{ic}} = -\frac{A_{CM}R_2/(R_1 + R_2)}{1 + \underline{A_{CM}R_1/(R_1 + R_2)}}$$

开环，远小于1

■ 差模反馈无法稳定共模! → 需要额外的共模反馈电路

共模反馈的要求



- 输出共模电压的选择：
使得所有晶体管工作于饱和区，并最大化输出摆幅；
- 通过控制 V_{BP} 或 V_{BN}
使得 $|I_{D5}| = |I_{D3}| + |I_{D4}|$

共模反馈环路的结构

$$-A(V_{oc} - V_{CM}) = V_{oc}$$

$A = a_{cms}a_{cmc}$ 足够大时

$$V_{oc} \approx V_{CM}$$

反馈点要求对共模信号有足够的增益而对差模信号没有放大作用

$$v_{cms} = a_{cms}(V_{oc} - V_{CM})$$

CM感知放大器
提供直流偏置

感知共模信号

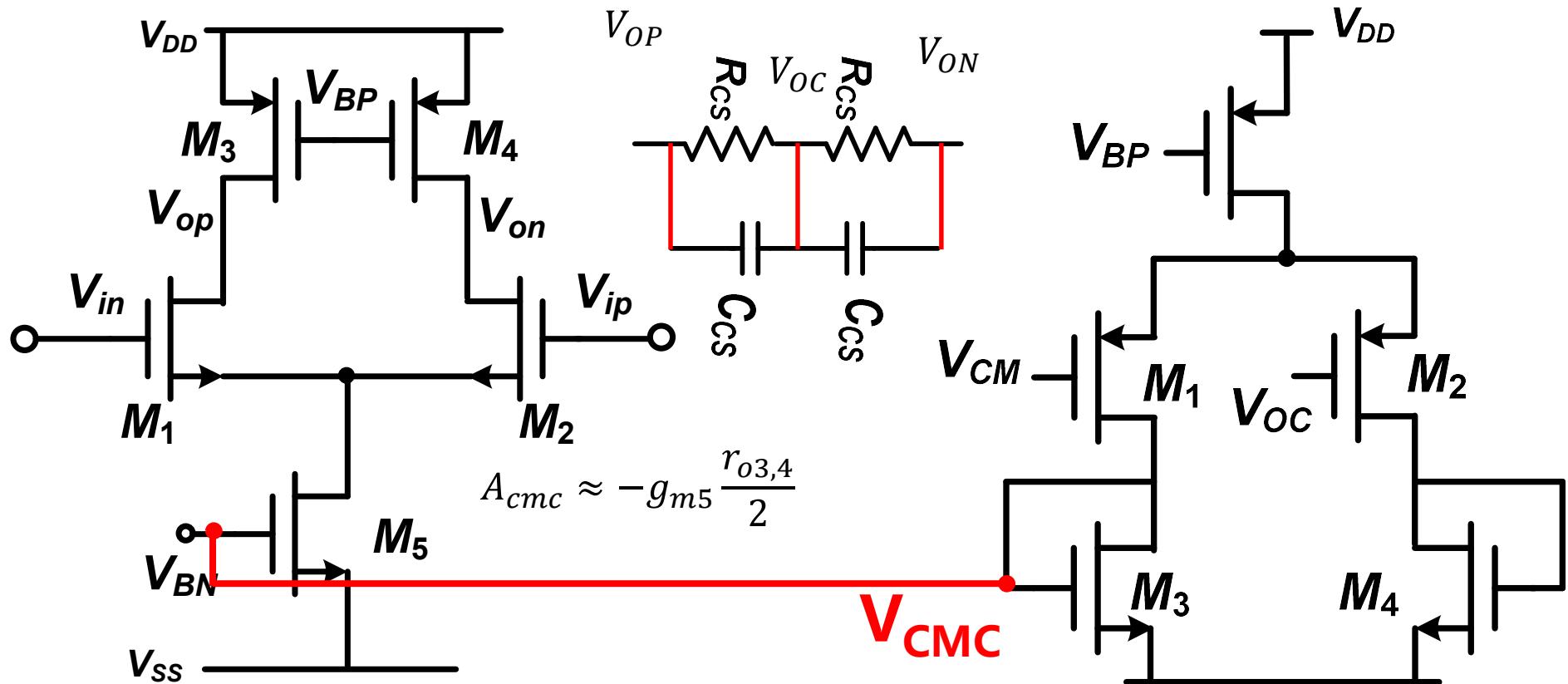
$$V_{oc} = \frac{1}{2}(V_{op} + V_{on})$$

低增益宽带宽

$$a_{cms}(V_{oc} - V_{CM})$$

V_{CM} 是目标共模电压

共模反馈环路的实现

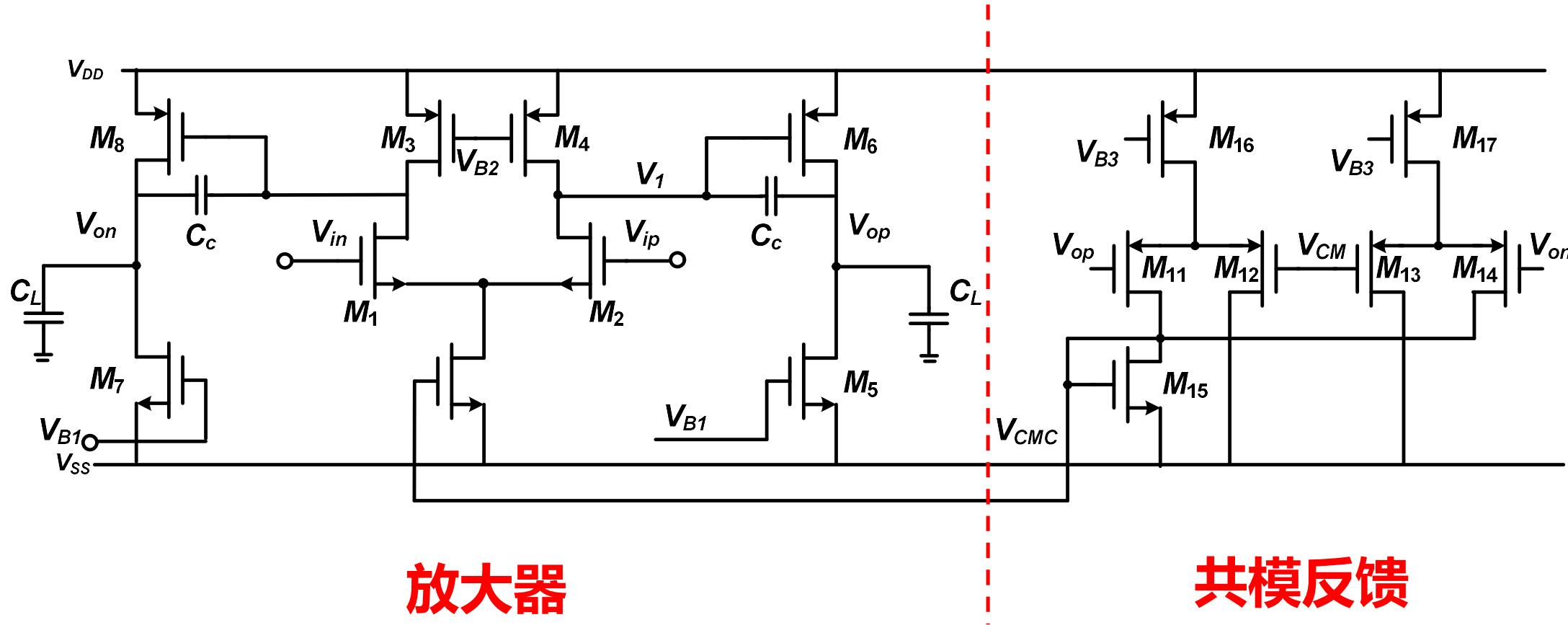


- 用于感知共模的电阻需足够大，否则影响差模增益
- V_{OC} 测量电路和CM感知放大器输入电容形成新极点
- 共模感知放大器不会影响差模增益
- 但是会限制输出电压摆幅

本章内容

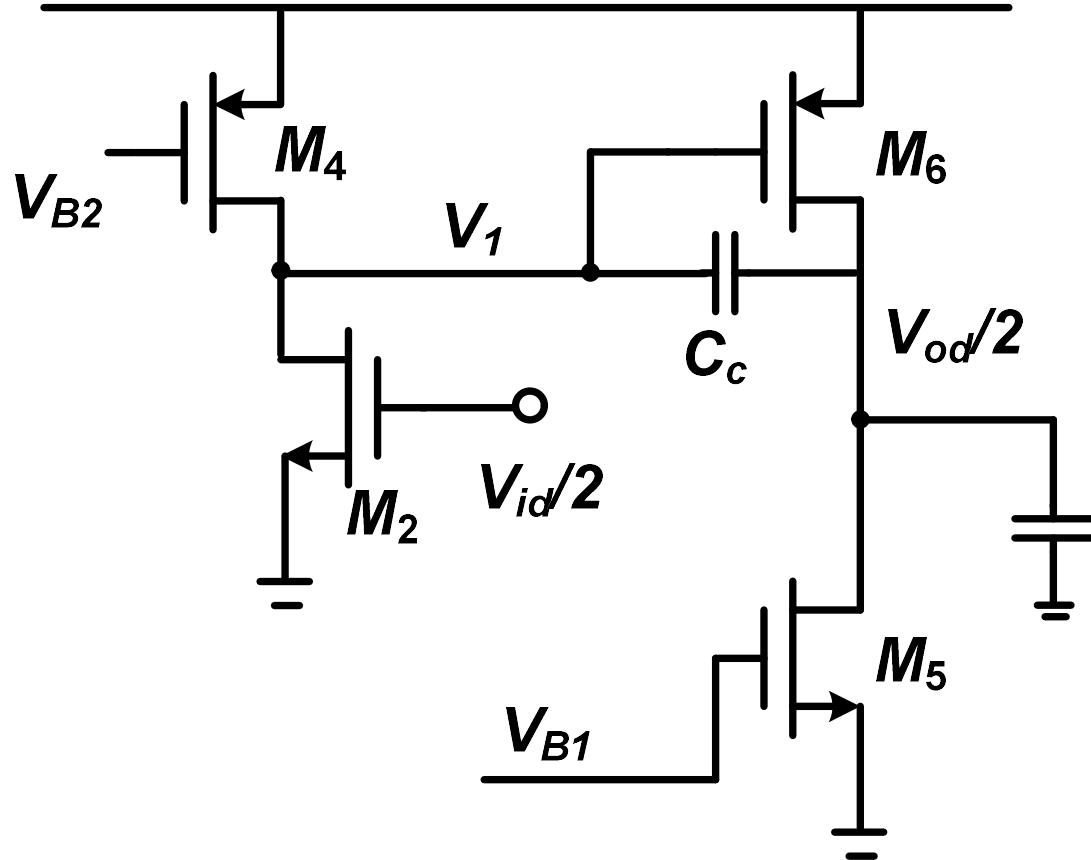
- ◆ 全差分放大器
- ◆ 共模反馈
- ◆ 全差分两级放大器
- ◆ 常用的全差分放大器结构
- ◆ 开关电容共模反馈

全差分两级放大器



- 与单端输出两级运放相比，不存在镜像极点与零点；
- 需要共模反馈电路稳定共模。

差模分析



$$A_{vd} = g_{m2}(r_{o2}/r_{o4})g_{m6}(r_{o5}/r_{o6})$$

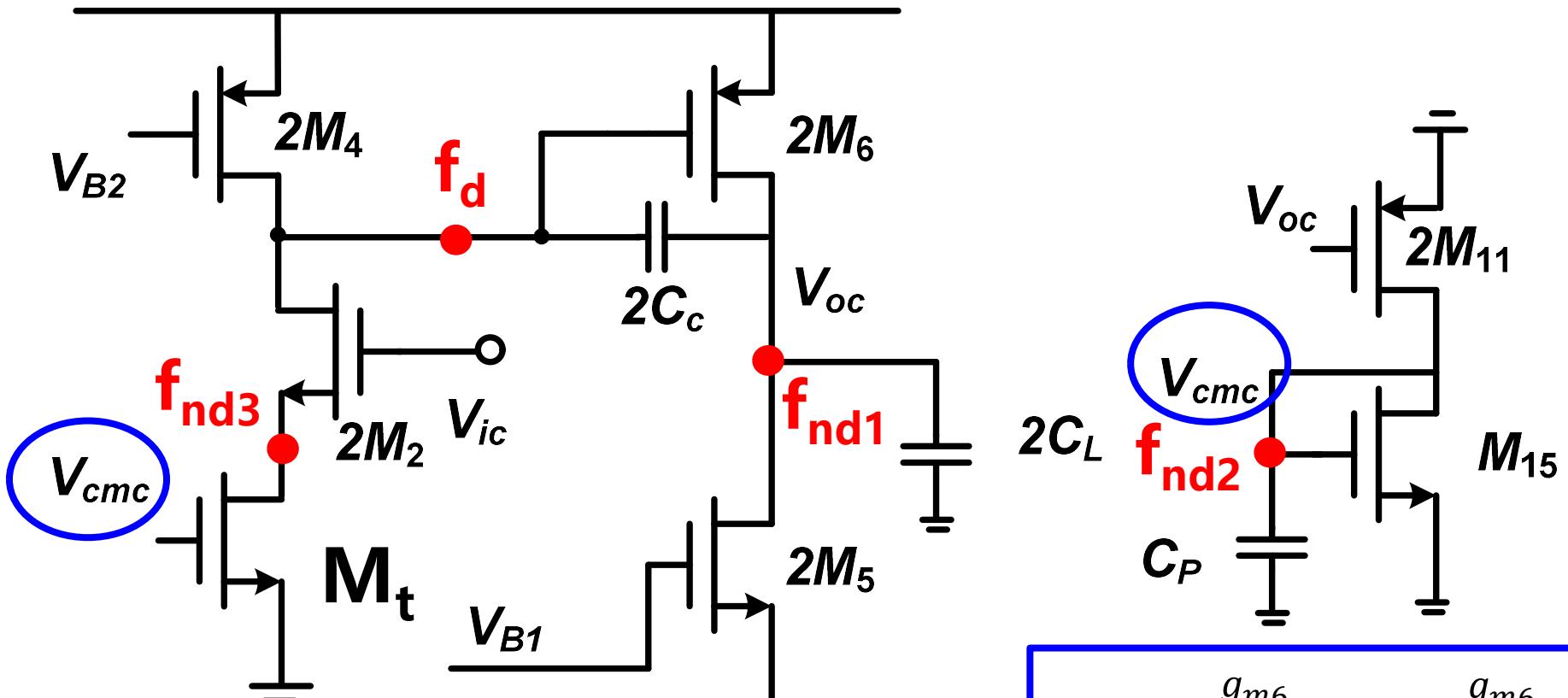
$$GBW = \frac{g_{m2}}{2\pi C_c}, f_{nd} = \frac{g_{m6}}{2\pi C_L}$$

$$SR = \frac{I_{SS}}{C_c} \quad f_z = \frac{g_{m6}}{2\pi C_c}$$

$$\overline{v_n^2} = 2 \times \frac{4kT\gamma}{g_{m2}} \frac{g_{m2}}{2\pi C_c} \frac{\pi}{2} = \frac{2kT\gamma}{C_c}$$

差模半边等效电路

共模分析



■ C_c 对共模反馈环路起补偿作用。

$$A_v(0) = g_{mt} \frac{r_{o4}}{2} A_2 \frac{g_{m11}}{g_{m15}}$$

$$f_d = \frac{1}{2\pi(r_{o4}/2)(A_2 2C_c)}$$

$$\left. \right\} \rightarrow GBW_{CM} = \frac{g_{m11}g_{mt}}{4\pi g_{m15} C_c}$$

$$f_{nd1} = \frac{g_{m6}}{2\pi C_L} \quad f_z = \frac{g_{m6}}{2\pi C_c}$$

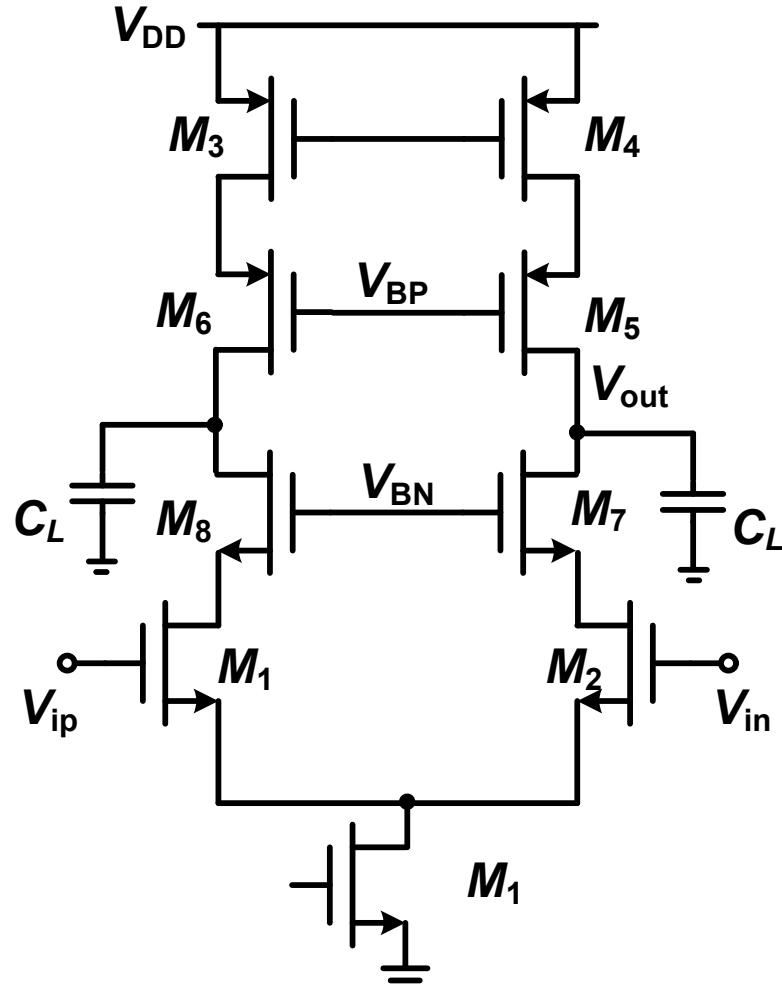
$$f_{nd2} = \frac{g_{m15}}{2\pi C_P}$$

$$f_{nd3} \approx \frac{2g_{m2}}{2\pi 2C_{GS2}} = f_{T2}$$

本章内容

- ◆ 全差分放大器
- ◆ 共模反馈
- ◆ 全差分两级放大器
- ◆ 常用的全差分放大器结构
- ◆ 开关电容共模反馈

套筒式全差分放大器



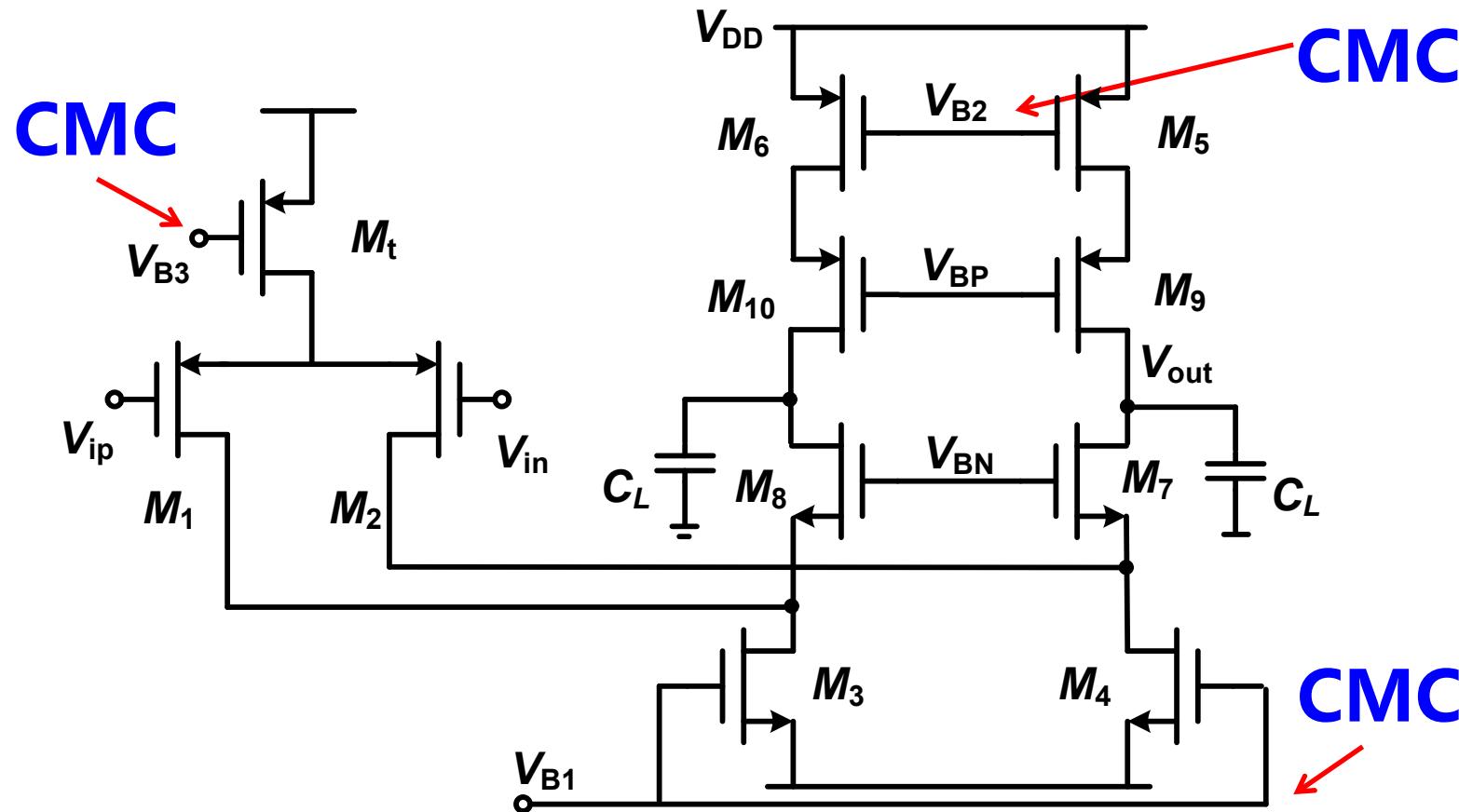
$$A_{vd} \approx g_{m2}(g_{m7}r_{o7}r_{o2}/g_{m5}r_{o5}r_{o4})$$

$$GBW = \frac{g_{m2}}{2\pi C_L}, f_{nd} = \frac{g_{m7}}{2\pi C_P} \rightarrow \text{假设M7源端对地寄生电容为 } C_P$$

$$SR = \frac{I_{SS}}{C_L}$$

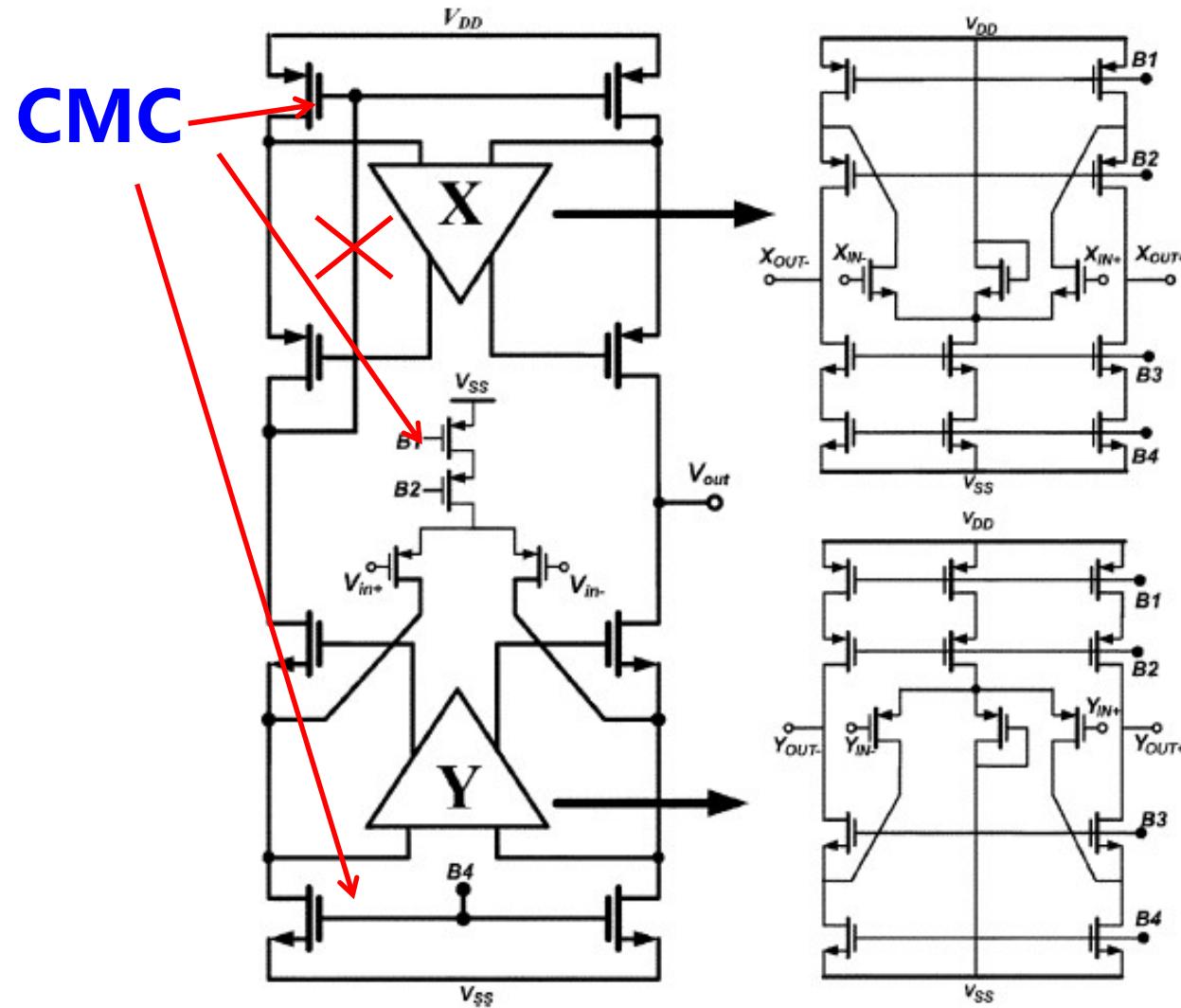
$$\overline{dv_{in}}^2 = 2 \times \frac{4kT\gamma}{g_{m2}} \left(1 + \frac{g_{m4}}{g_{m2}}\right) \Delta f$$

折叠式全差分放大器



- 共模输入范围比套筒式放大器大
- 功耗、噪声要比套筒式大

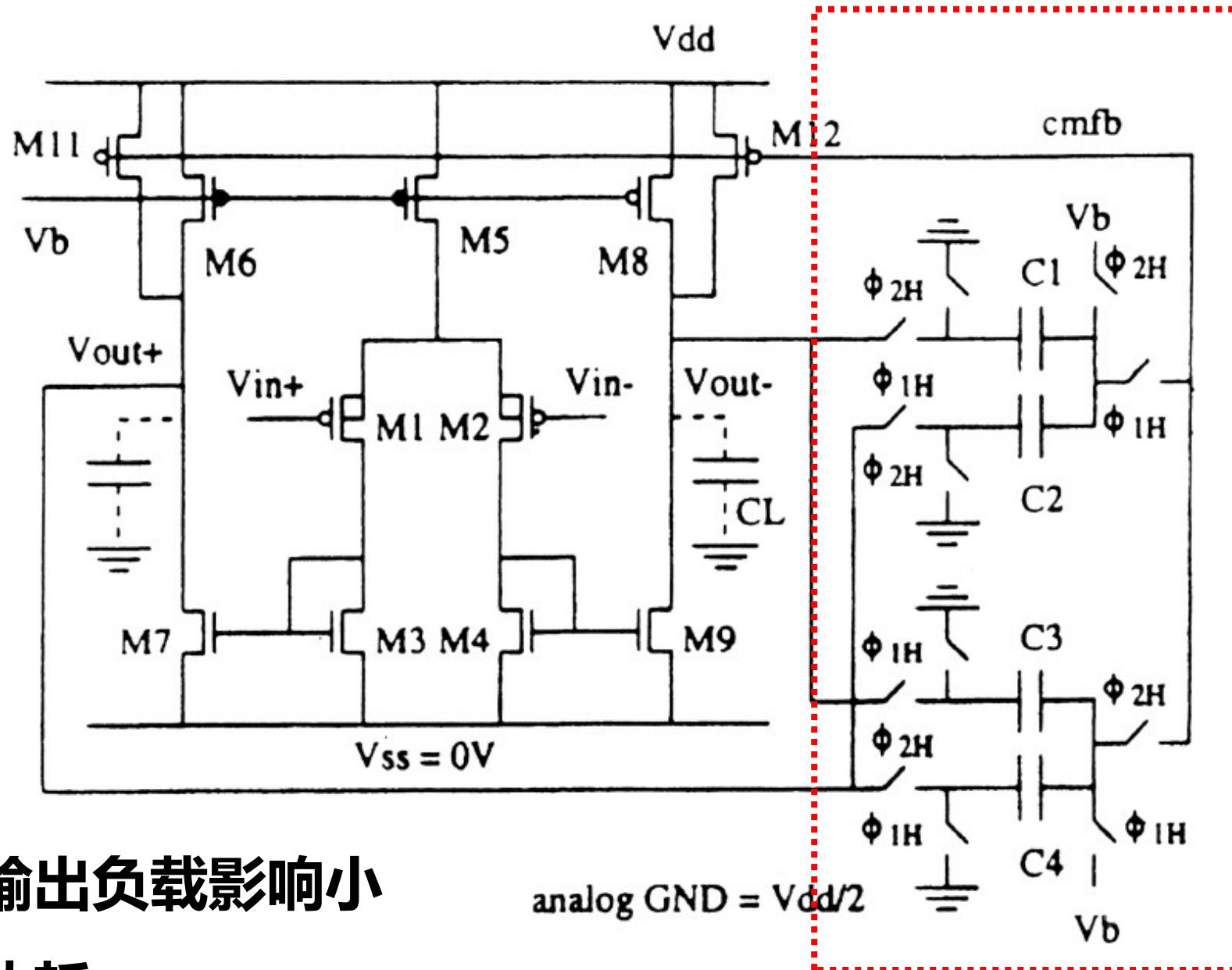
增益自举式全差分放大器



本章内容

- ◆ 全差分放大器
- ◆ 共模反馈
- ◆ 全差分两级放大器
- ◆ 常用的全差分放大器结构
- ◆ 开关电容共模反馈

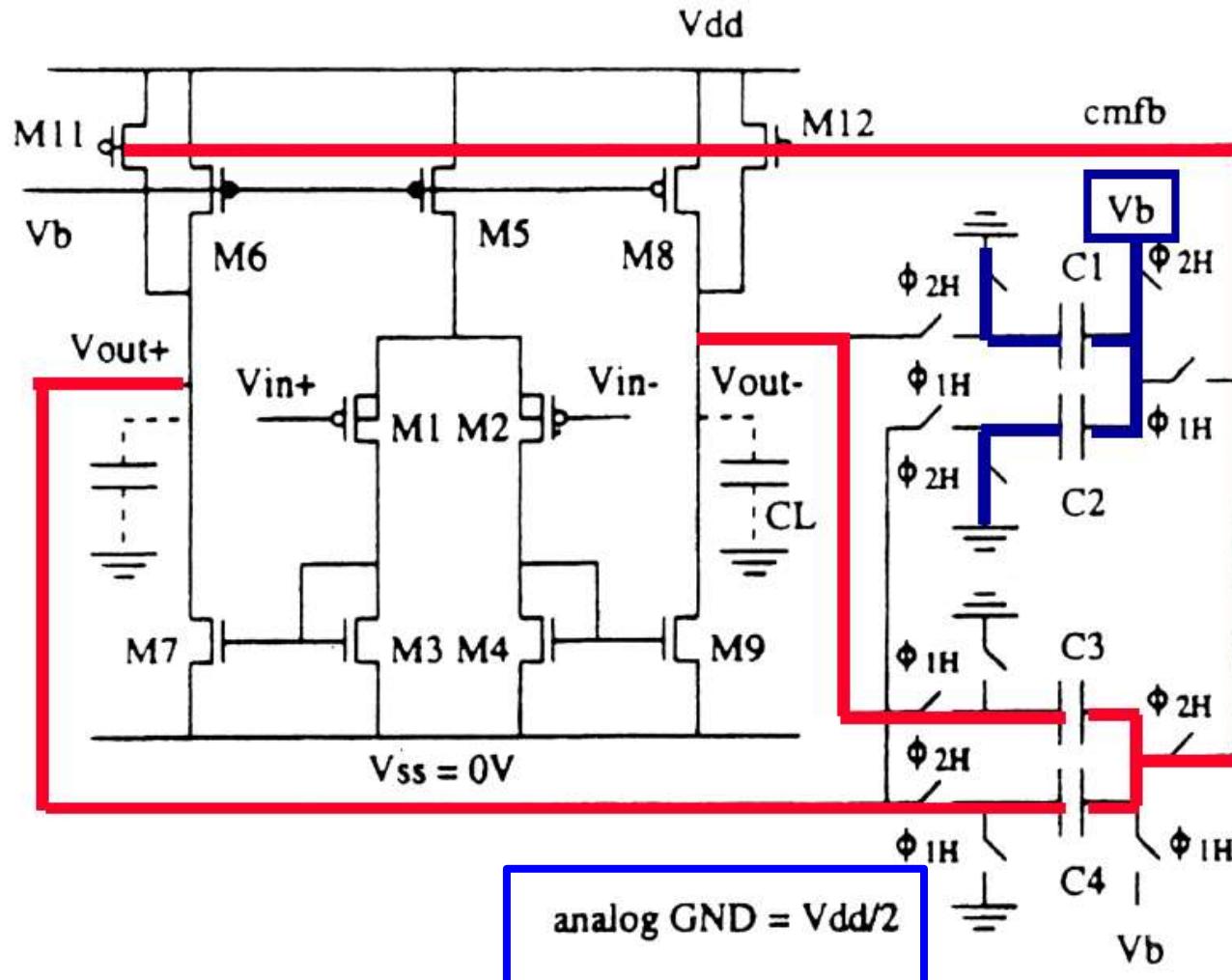
开关电容共模反馈



- 对输出负载影响小
- 低功耗

$$analog\ GND = V_{dd}/2$$

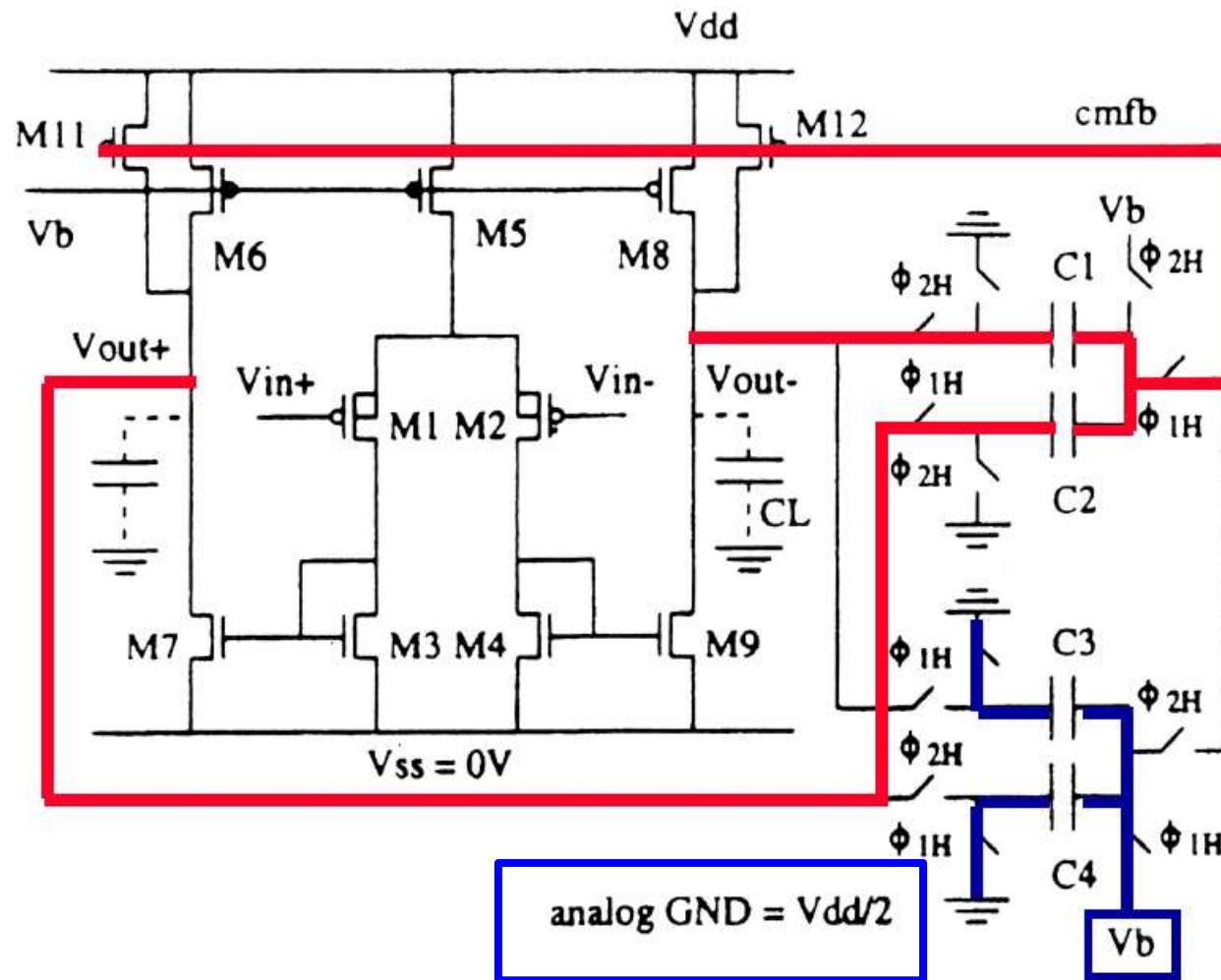
开关电容共模反馈



Switches
 ϕ_{2H} closed
gives CMFB
and
precharge C

■ 实现准连续的共模反馈

开关电容共模反馈



Switches
 ϕ_{1H} closed
 gives CMFB
 and
 precharge C

$$(0 - V_b)C_1 + (0 - V_b)C_2 = (V_{op} - V_{cmfb})C_2 + (V_{on} - V_{cmfb})C_1$$

电容右极板电荷守恒

$$C_1 = C_2$$

$$V_{cmfb} = \frac{V_{op} + V_{on}}{2} + V_b$$

第七章 典型运放-下（补）

冯 鹏

fengpeng06@semi.ac.cn

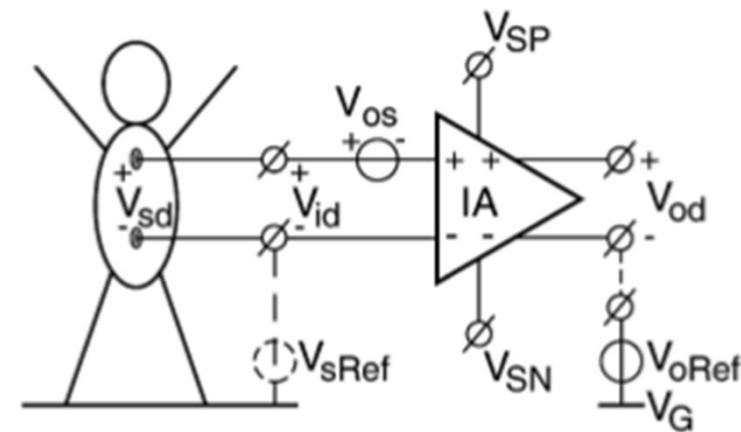
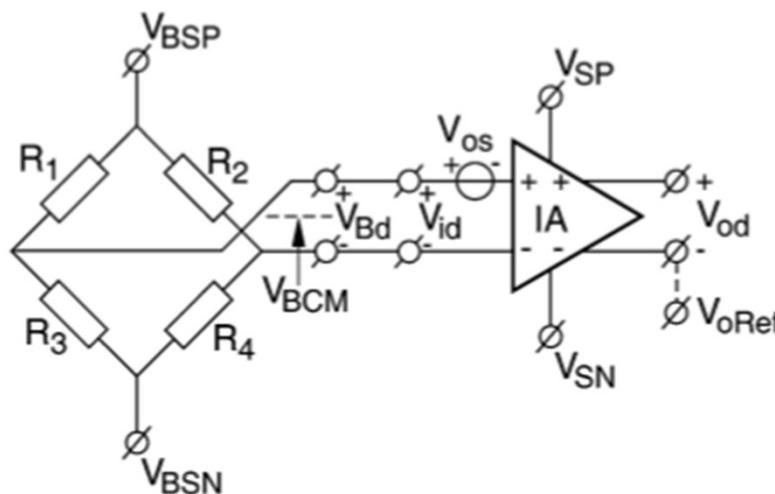
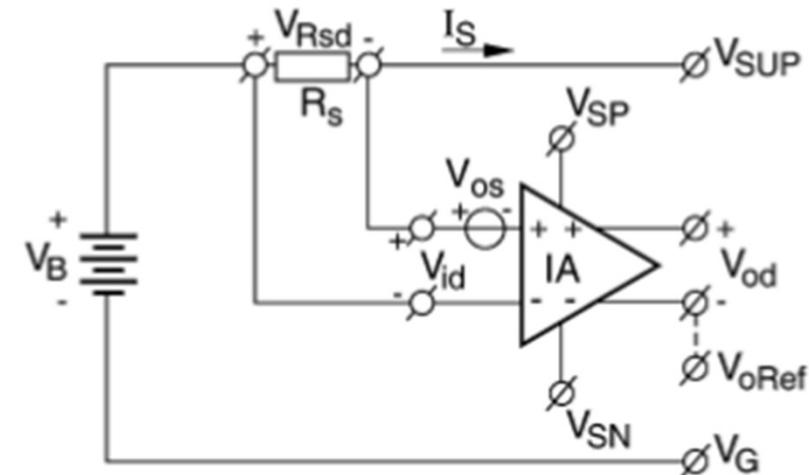
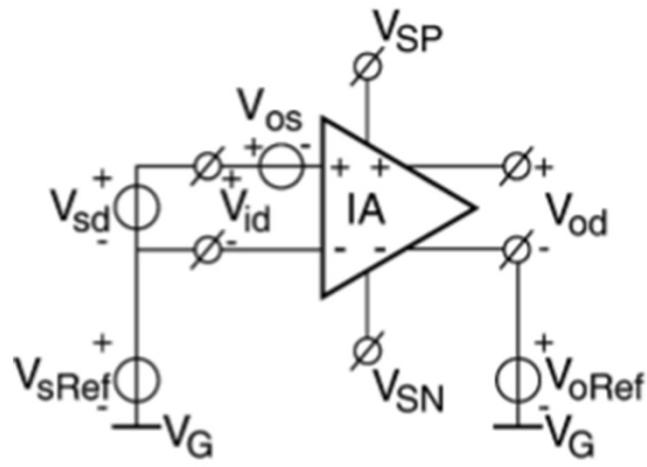
中国科学院半导体研究所

本章内容

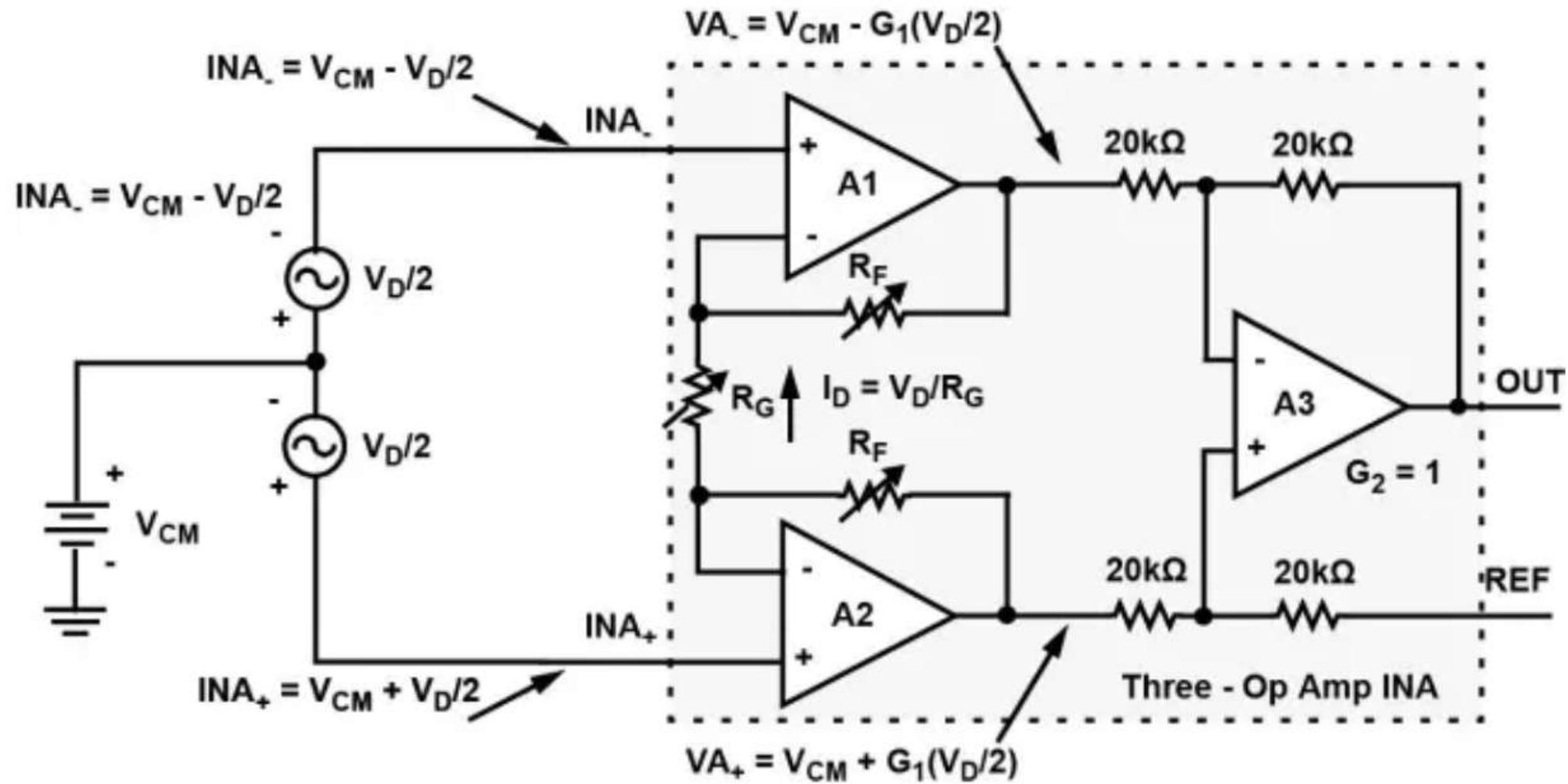
- ◆ 仪表放大器
- ◆ 动态放大器
- ◆ 放大器设计研讨

仪表放大器用途

- 仪表放大器是传感器微弱信号检测领域广泛采用的放大器，具有低失调、低噪声、高共模抑制等特点。



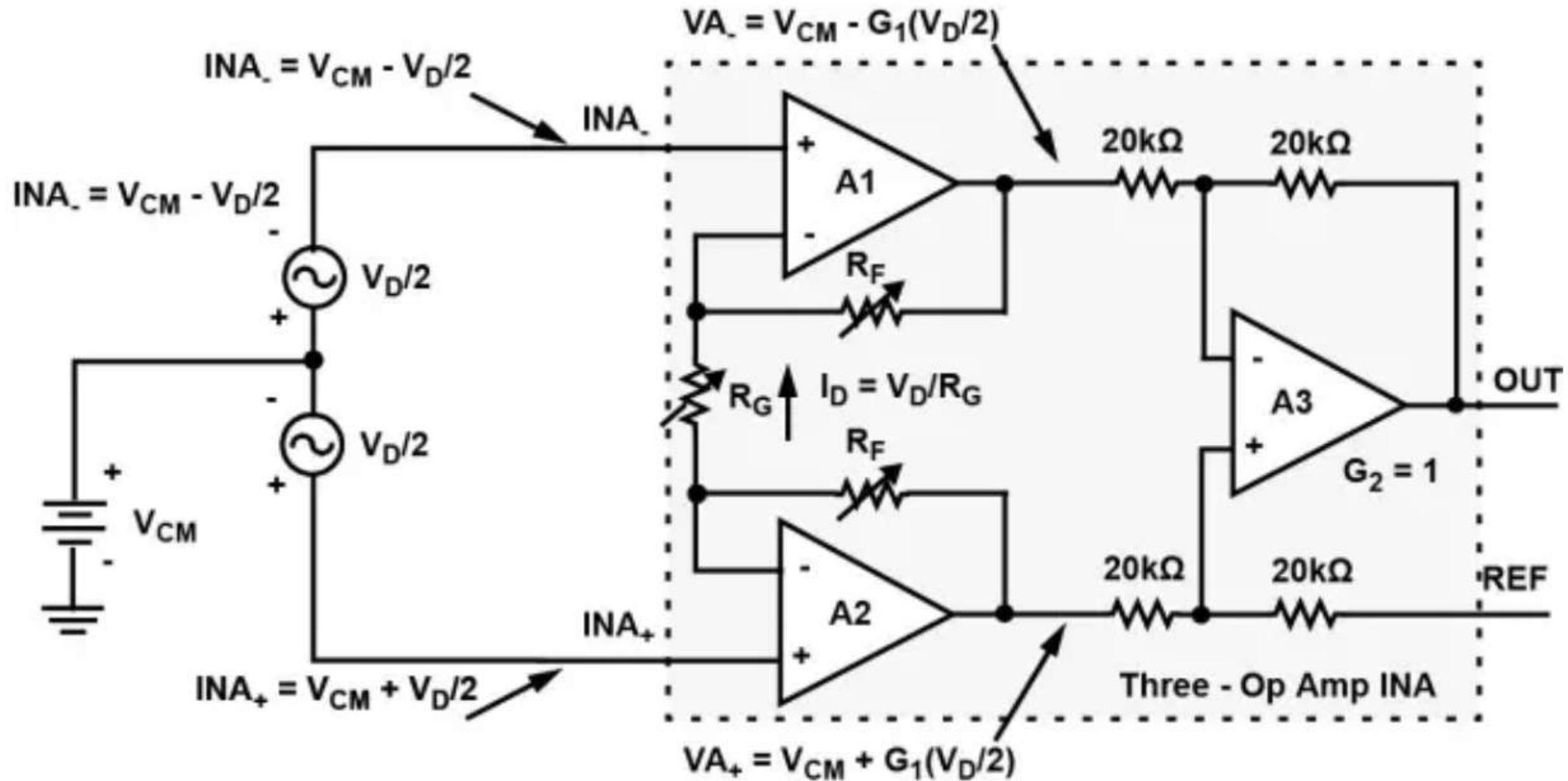
三运放仪表放大器结构



$$V_{CM} = \frac{(INA_+ + INA_-)}{2}, \quad V_D = INA_+ - INA_-$$

$$INA_+ = V_{CM} + \frac{V_D}{2}, \quad INA_- = V_{CM} - \frac{V_D}{2}$$

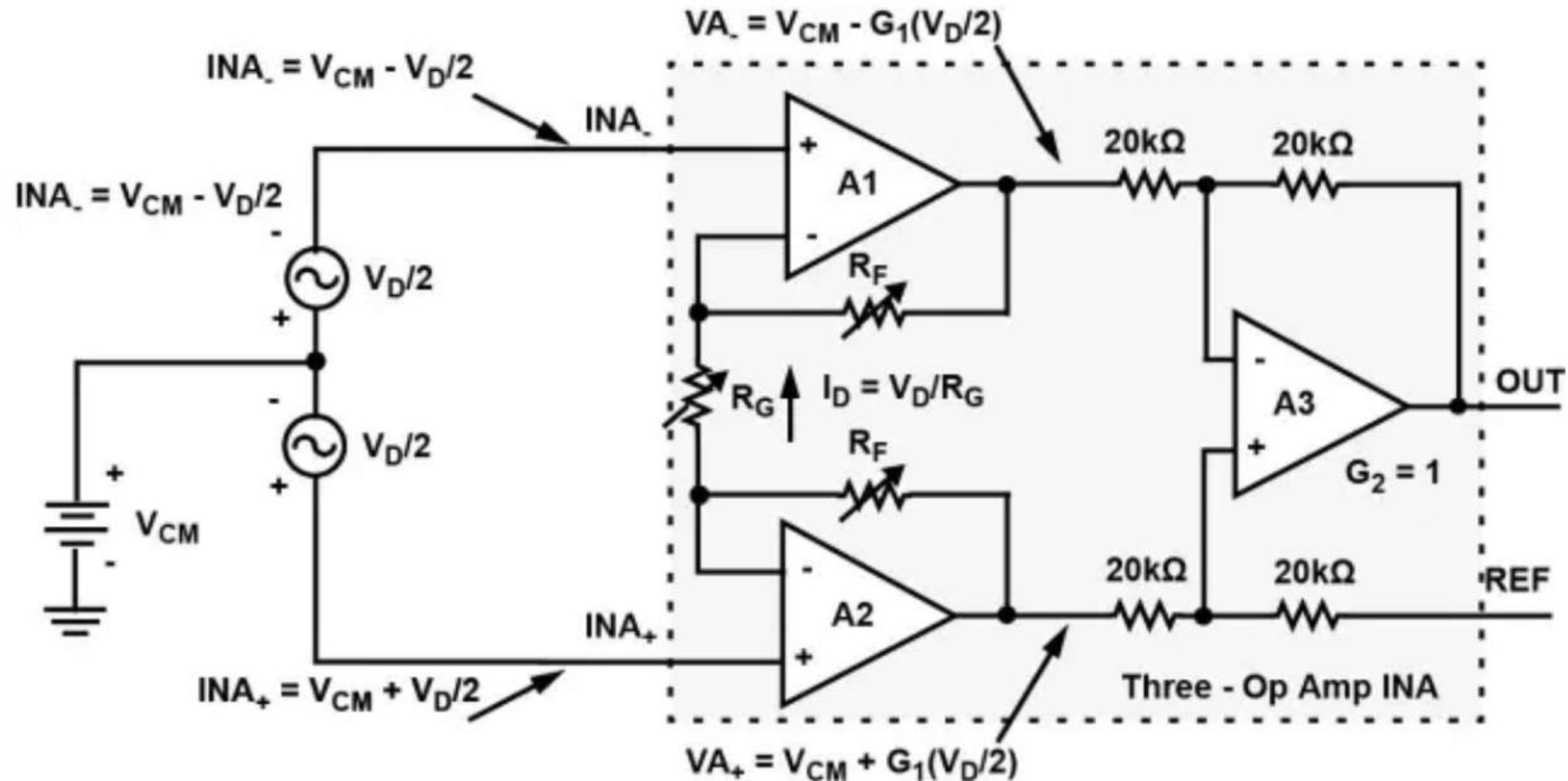
三运放仪表放大器结构



$$I_D = \frac{(INA_+ - INA_-)}{R_G} = \frac{V_D}{R_G}$$

$$VA_+ = V_{CM} + \frac{V_D}{2} + I_D R_F, \quad VA_- = V_{CM} - \frac{V_D}{2} - I_D R_F$$

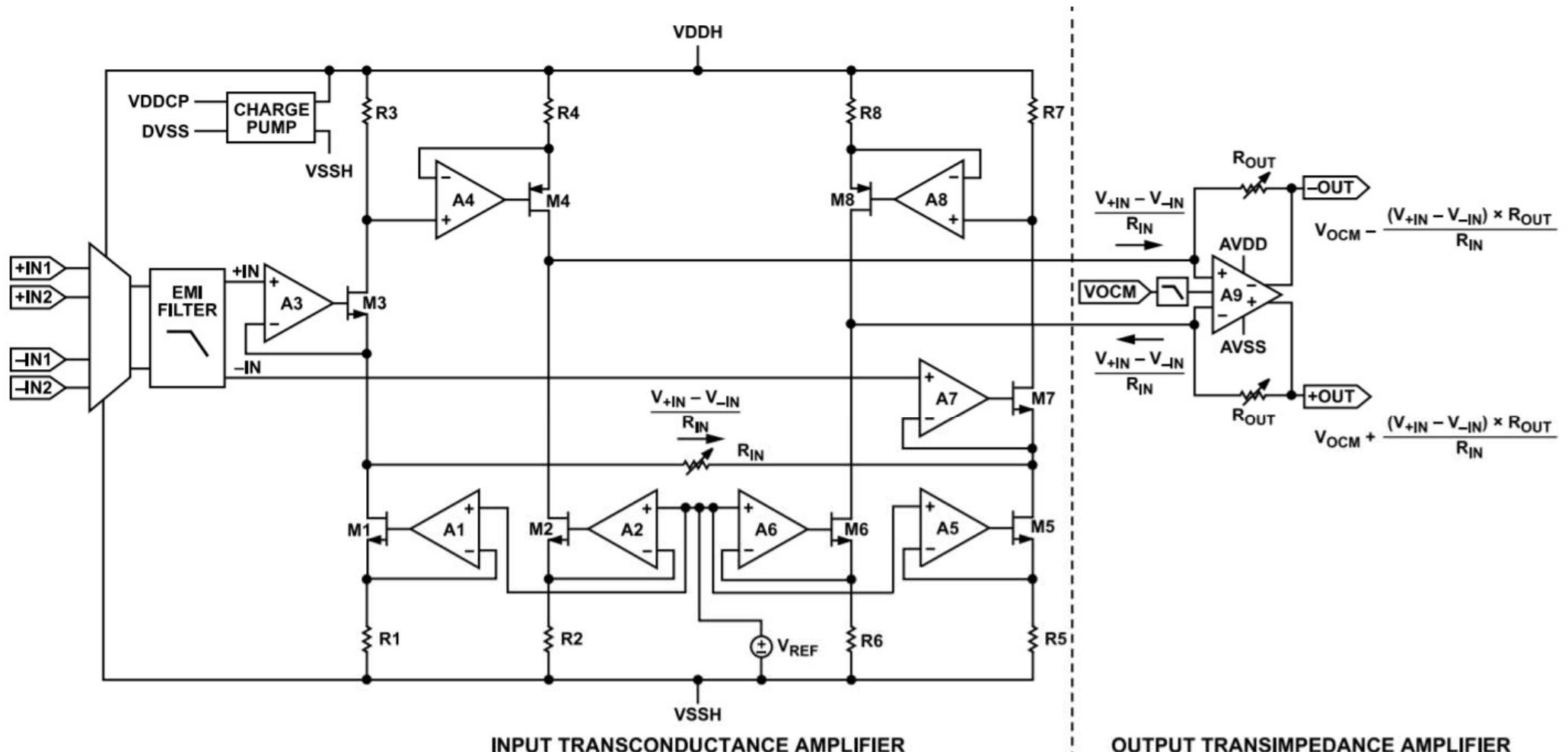
三运放仪表放大器结构



$$VA_+ = V_{CM} + \frac{V_D}{2} G_1, \quad VA_- = V_{CM} - \frac{V_D}{2} G_1$$

$$G_1 = 1 + 2 \frac{R_F}{R_G}$$

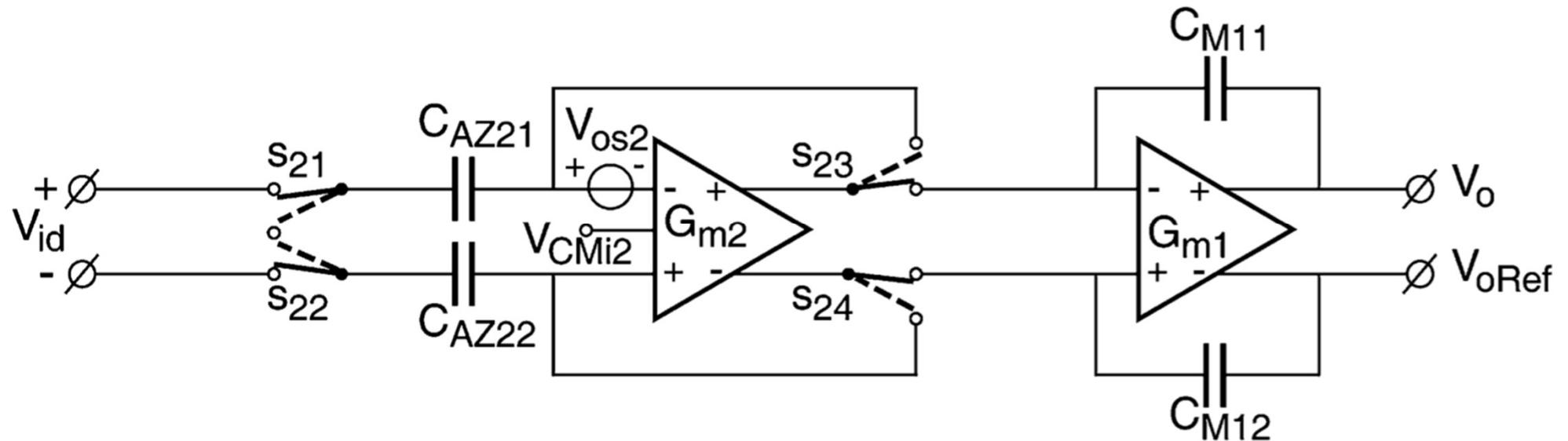
一种零失调可编程仪表放大器



Simplified ADA4255 Programmable Gain Instrumentation Amplifier Topology

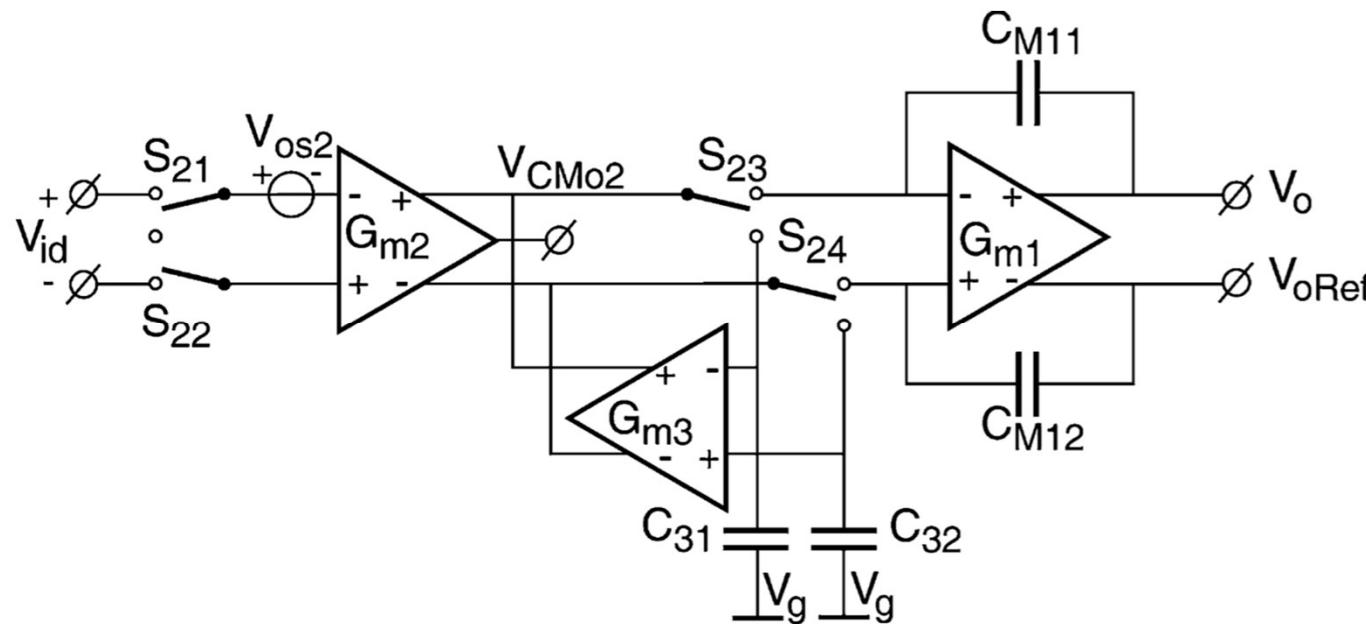
$$V_{OUT, DIFF} = \frac{(V_{+IN} - V_{-IN}) \times R_{OUT} \times 2}{R_{IN}}$$

失调消除技术-自归零(AZ)



- AZ放大器有两个工作相位，一个是自归零相，另一个是放大相；
- 自归零相，电容 C_{AZ21} 、 C_{AZ22} 存储了失调电压；存储的失调电压会抵消掉失调电压。

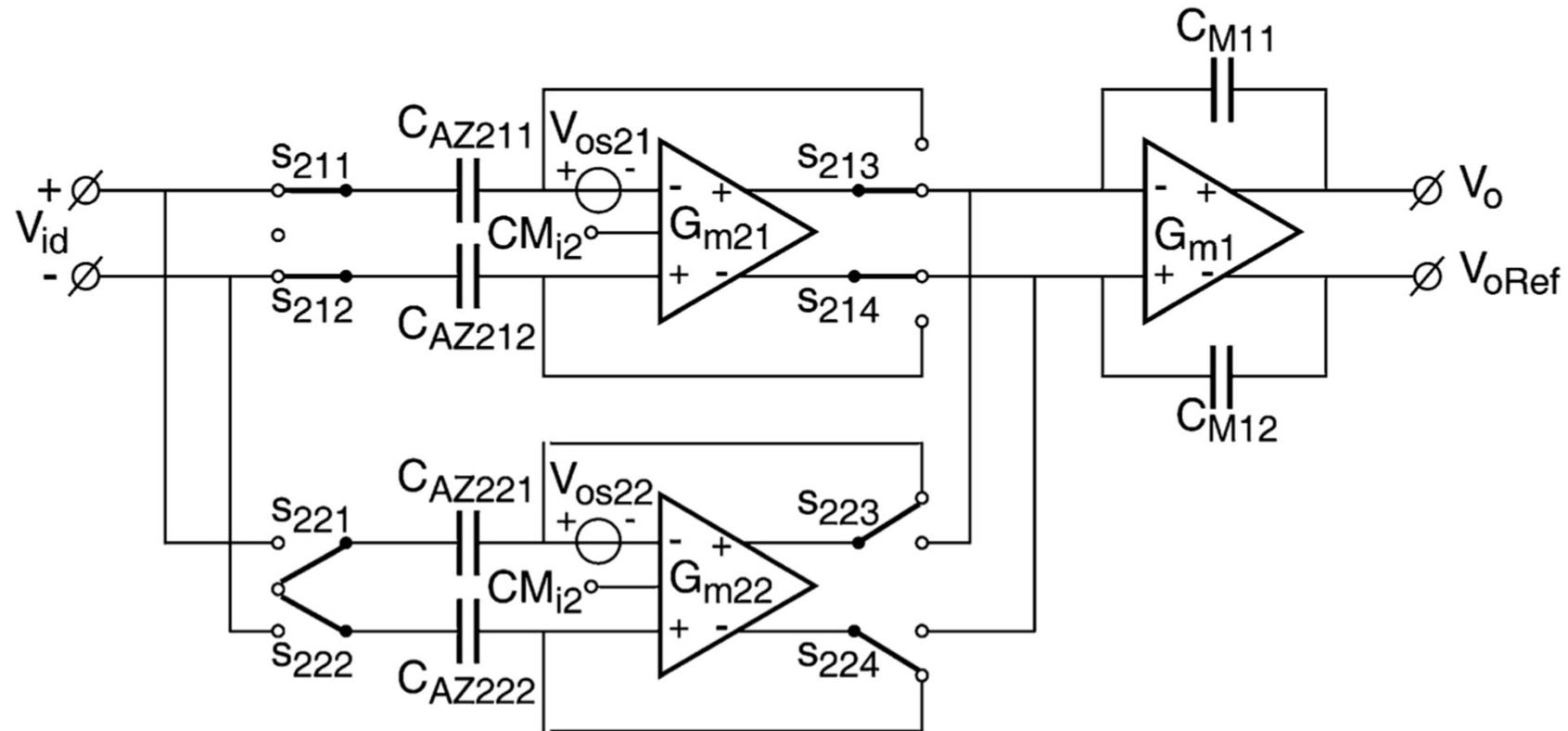
失调消除技术-自归零(AZ)



■ 采用 G_{m3} 和 C_{31} 、 C_{32} 电路采样并消除 G_{m2} 失调。

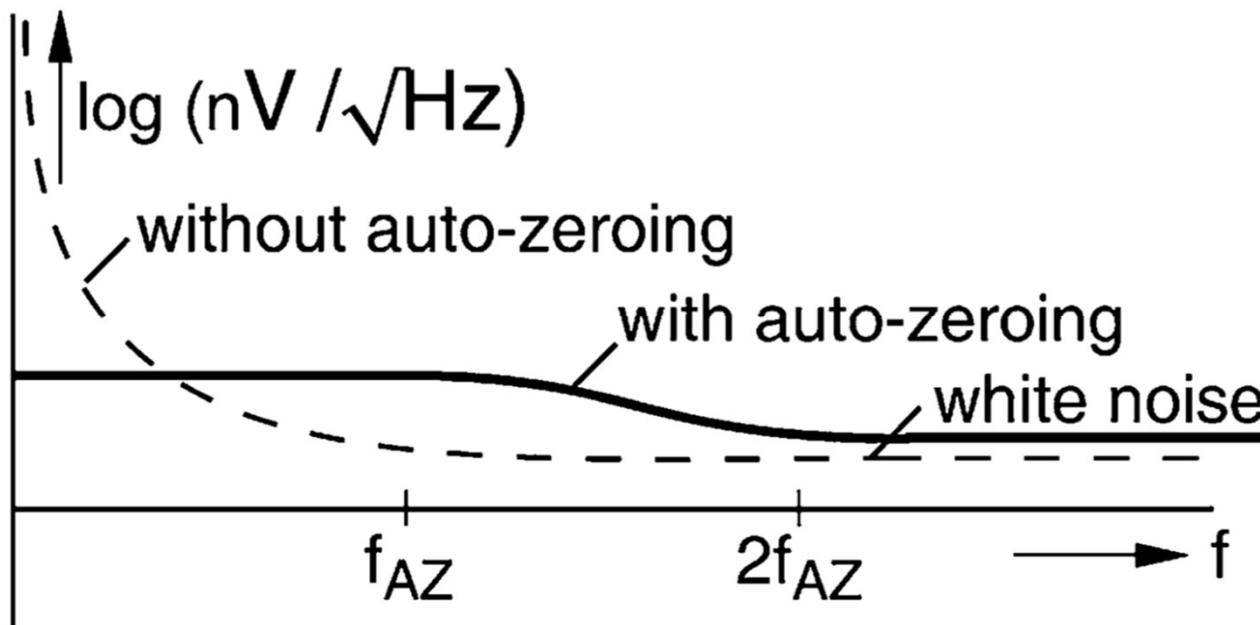
$$V_{os2}G_{m2} + V_{31}(-G_{m3}) = 0 \Rightarrow V_{31} = \frac{G_{m2}}{G_{m3}}V_{os}$$

失调消除技术-自归零(AZ)



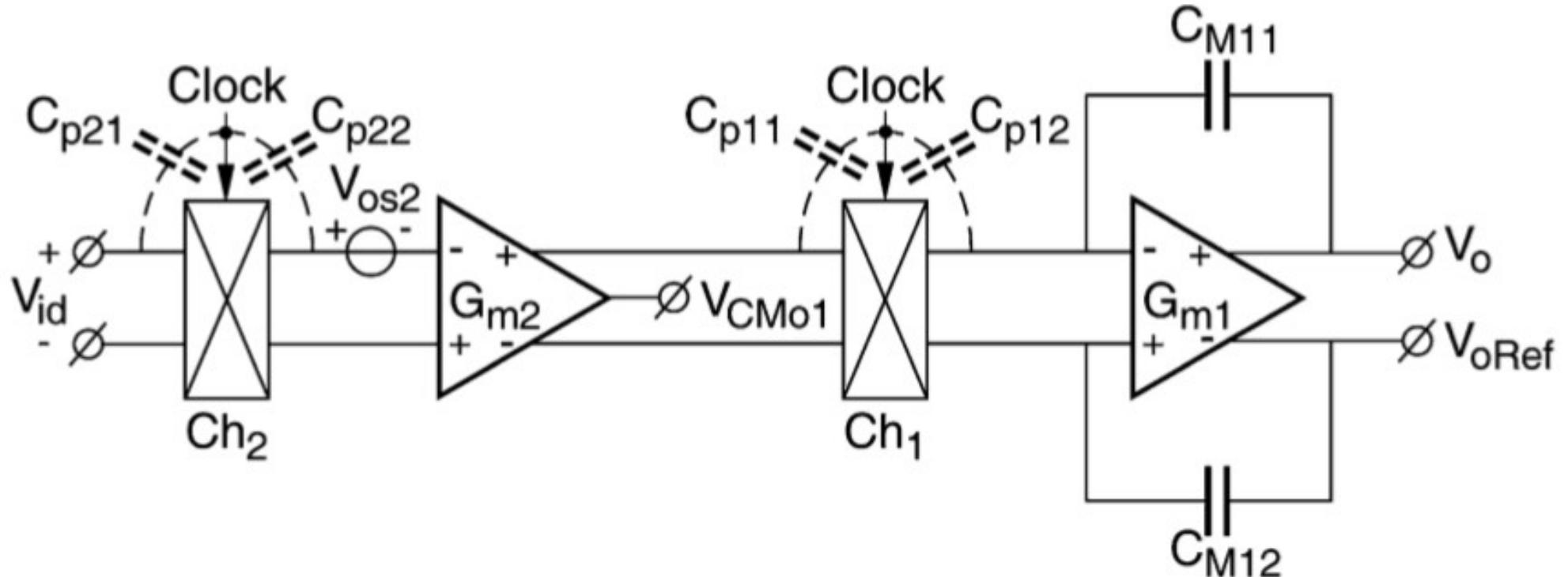
- AZ的两相工作模式打断了放大器的工作，为了获得连续工作的模式，可采用ping-pong模式。

失调消除技术-自归零(AZ)



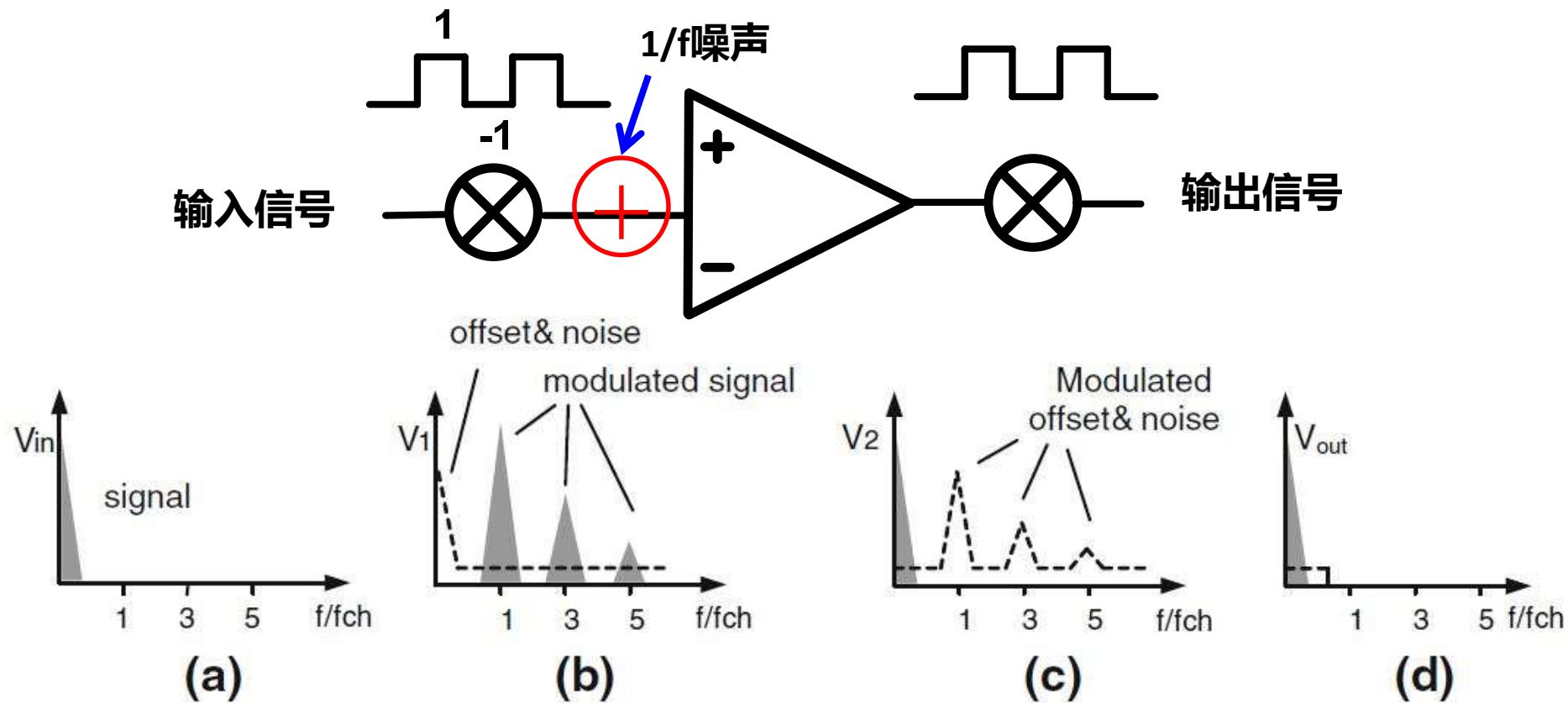
- AZ利用信号采样消除失调，同时也消除了 $1/f$ 噪声。消除效果也与AZ的频率有关，高于AZ频率的 $1/f$ 噪声无法被消除。AZ引入采样混叠，导致热噪声升高。

失调消除技术-斩波(chop)



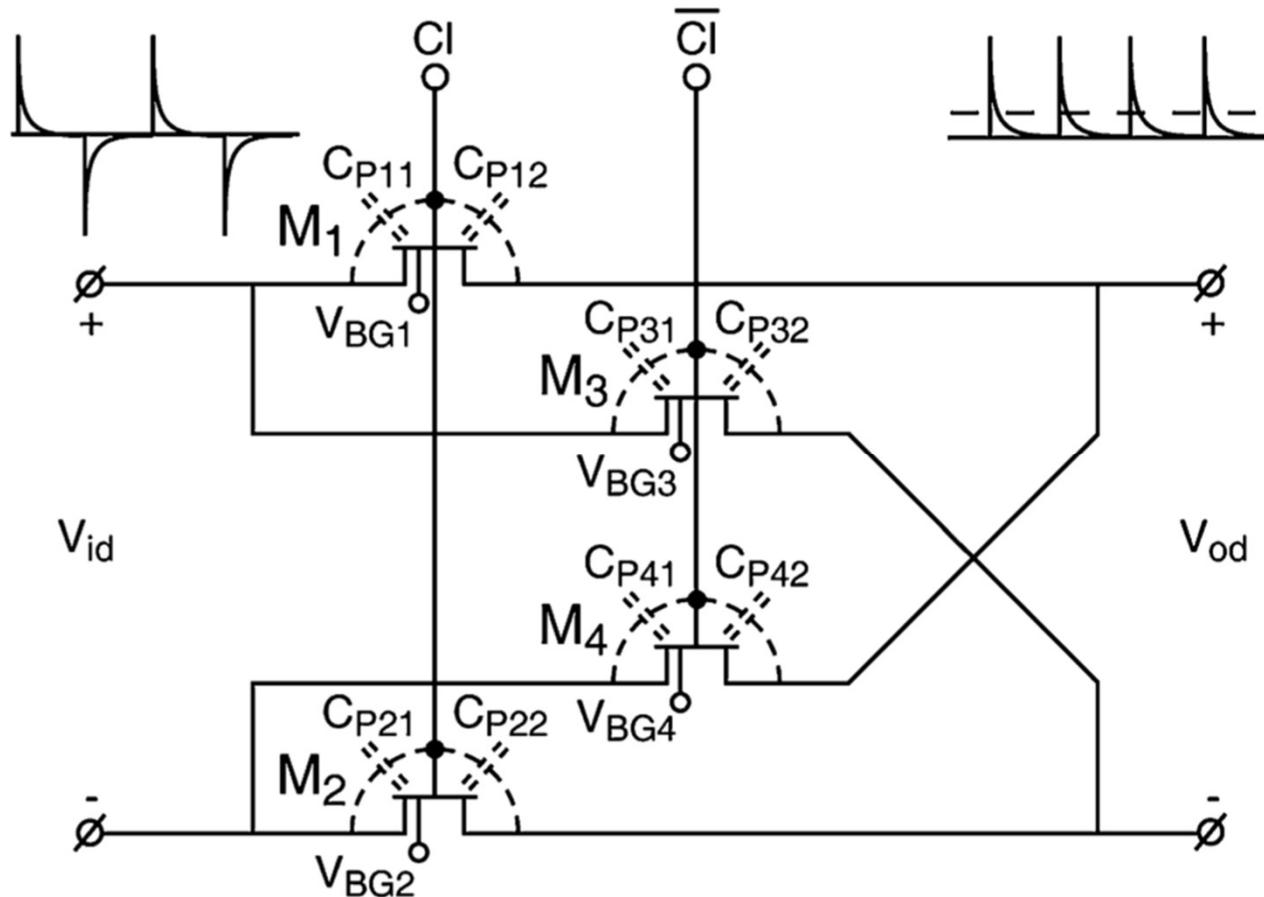
- Chop技术是一种调制技术，将低频 $1/f$ 噪声、失调等调制到 f_{chop} 频率处。

失调消除技术-斩波(chop)



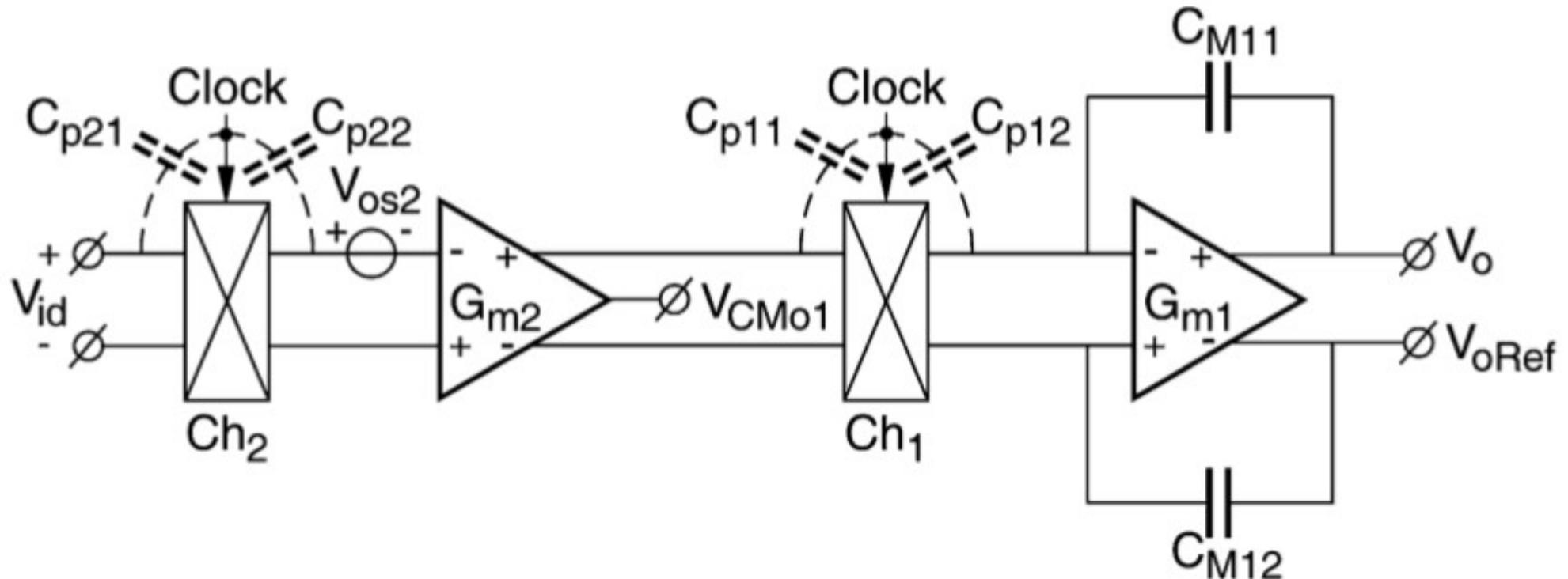
- Chop技术是一种信号调制技术；
- 可将 $1/f$ 噪声和低频信号分离。

失调消除技术-斩波(chop)



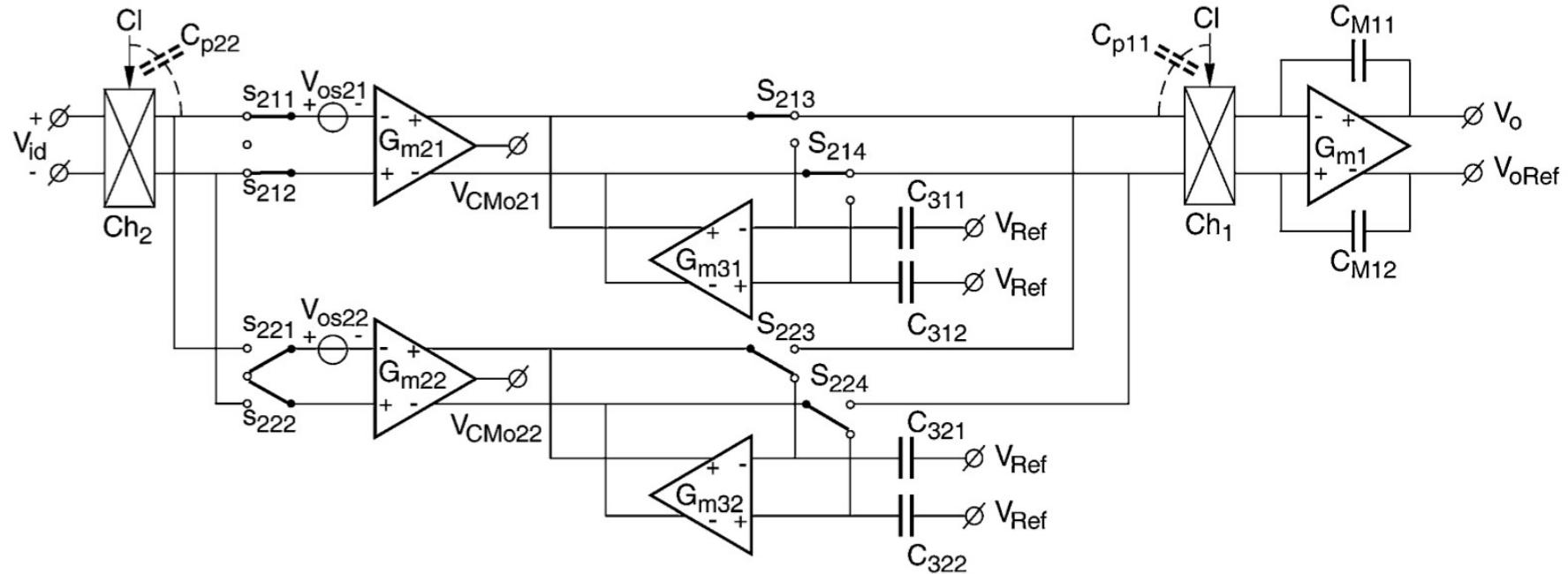
- 电荷注入在斩波开关作用下的效果。

失调消除技术-斩波(chop)



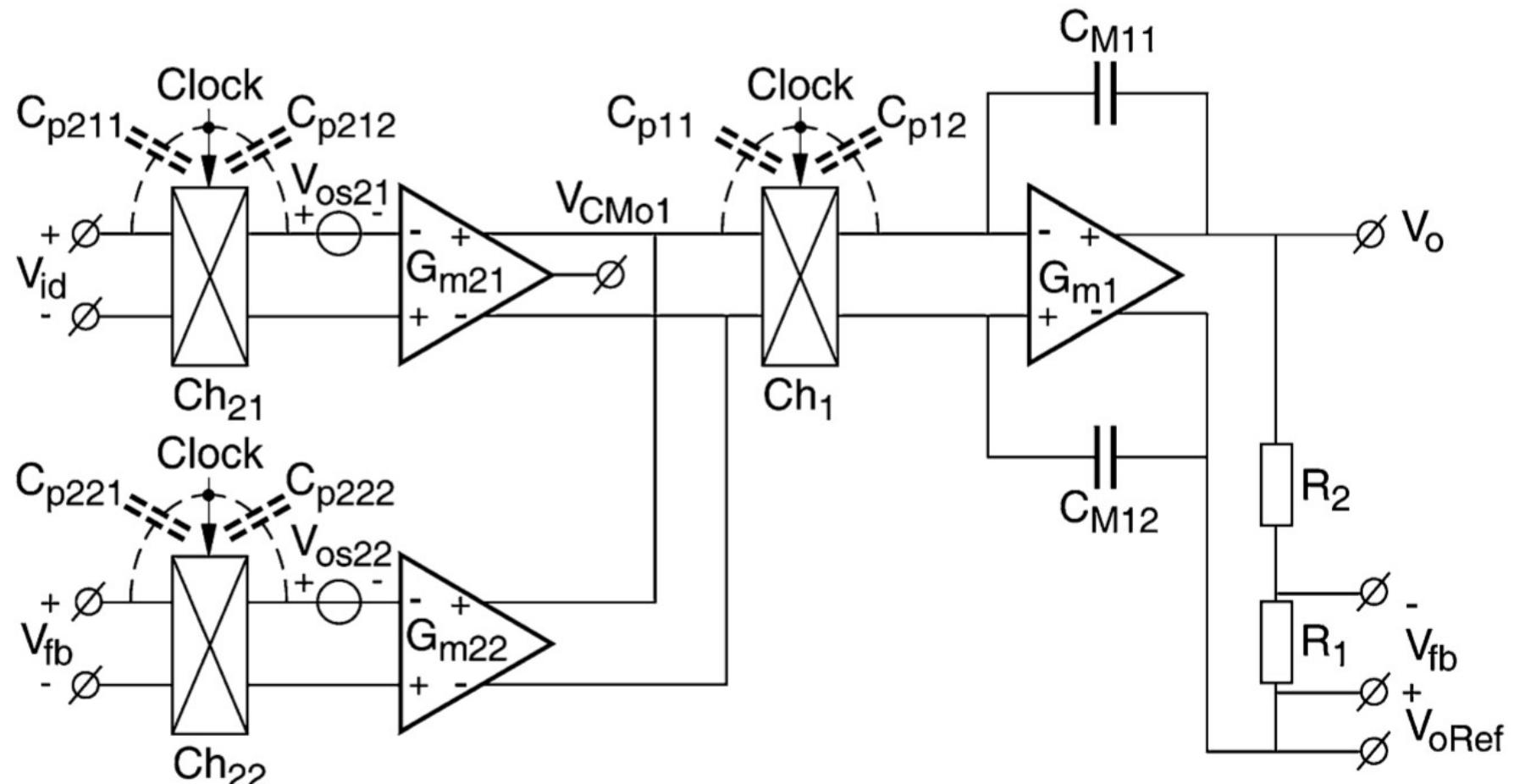
- Cp21的电荷注入无影响，Cp22的注入会产生等效失调
- Cp12的电荷注入无影响，Cp11的注入会产生等效失调
- Cp11的等效失调会被Gm2抑制

失调消除技术-斩波(chop)



- 第一级的失调在输出会表现为波纹，为了消除波纹，可以将chop技术和AZ技术结合。利用AZ技术将第一级的失调校准掉。

失调消除技术-斩波(chop)



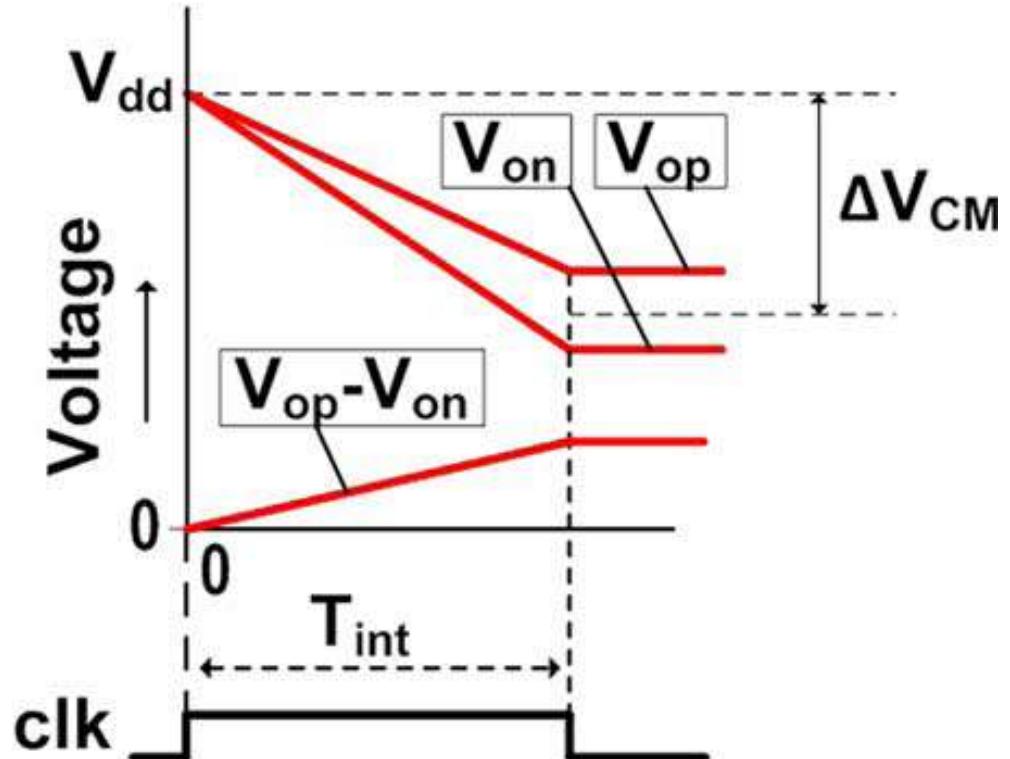
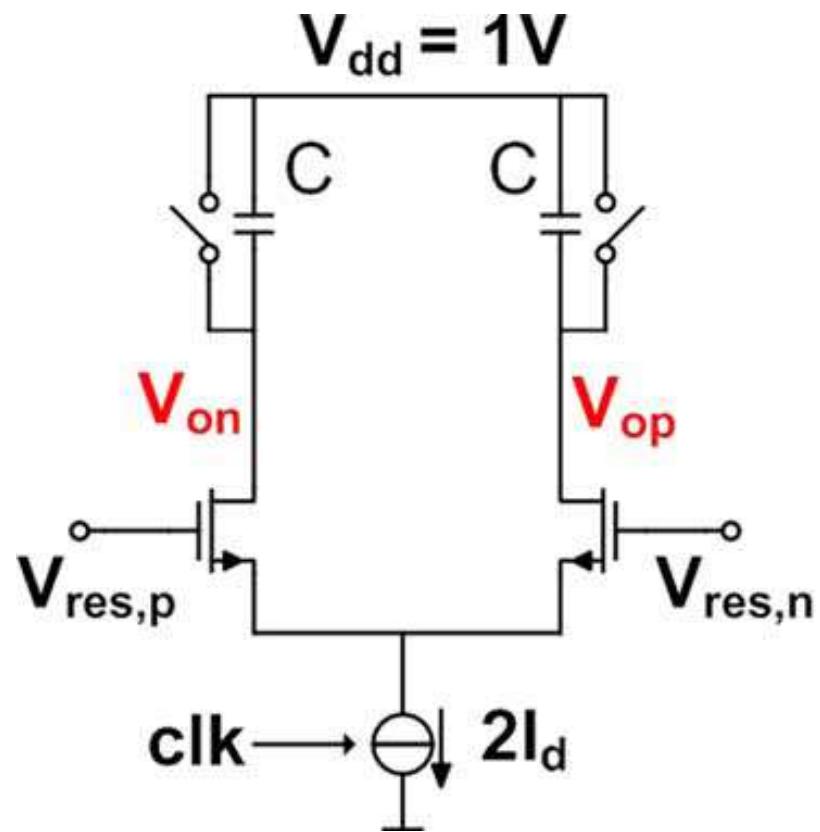
■ 电流反馈型放大器的失调消除方法。

$$V_{id}G_{m21} - V_o \frac{R_1}{R_2 + R_1} G_{m22} = 0 \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_{id}} = \frac{G_{m21}R_2 + R_1}{G_{m22}R_1}$$

本章内容

- ◆ 仪表放大器
- ◆ 动态放大器
- ◆ 放大器设计研讨

动态放大器



$$g_m v_{id} T = \Delta V C \Rightarrow A_v = \frac{\Delta V}{v_{id}} = \frac{g_m T}{C}$$

■低功耗

■低电源电压

本章内容

- ◆ 仪表放大器
- ◆ 动态放大器
- ◆ 放大器设计研讨

放大器设计研讨

- 如何提高增益?
- 如何提高带宽?
- 如何降低噪声、失调?
- 如何降低功耗?
- 如何增加放大器驱动?
- 如何扩展共模输入?
- 如何提高共模抑制比?

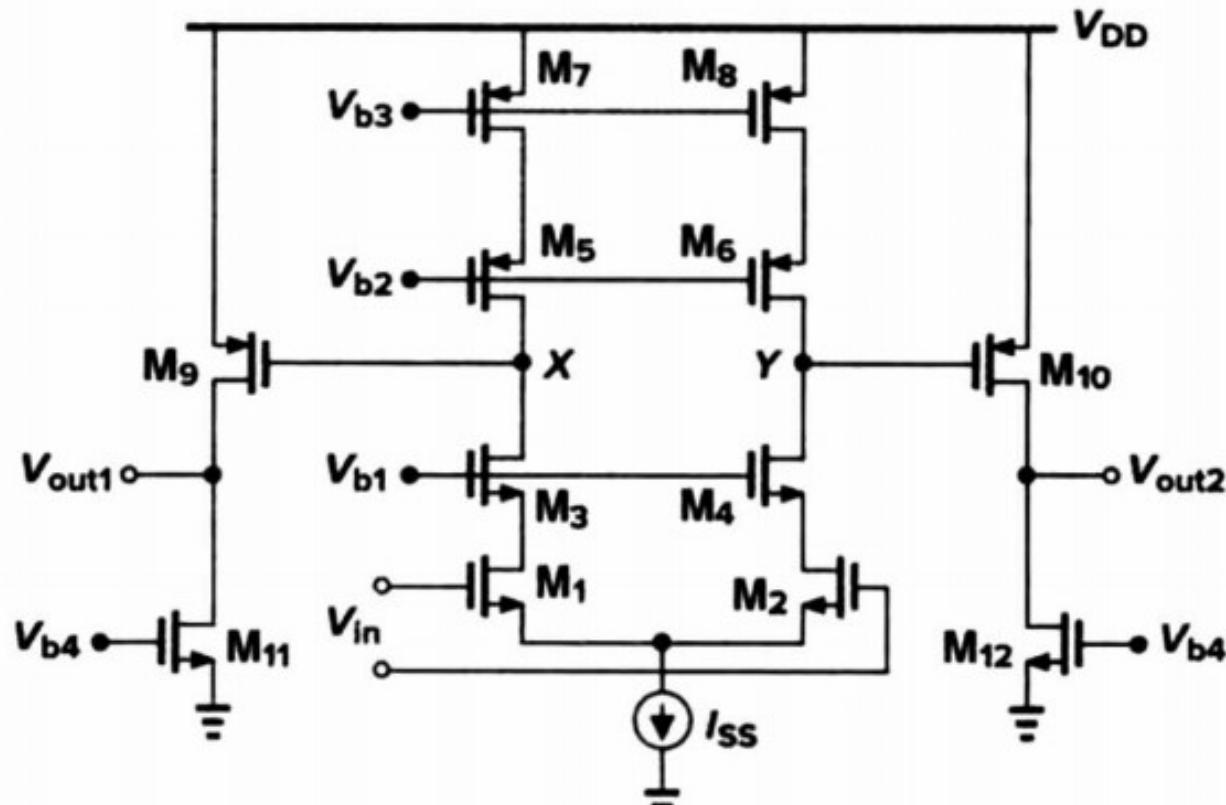
作业

9.8 假定图 9.24 中的电路设计成 $I_{ss} = 1 \text{ mA}$, $I_{D9} - I_{D12}$ 等于 0.5 mA , 以及 $(W/L)_{9-12} = 100/0.5$ 。

(a) 在 X 点和 Y 点所要求的 CM 电平是多少?

(b) 如果 I_{ss} 要求的最小电压为 400 mV , 为了在 X 和 Y 提供的峰-峰摆幅为 200 mV , 请选择 $M_1 \sim M_8$ 的最小尺寸。

(c) 计算总的电压增益。



Razavi Book, 9.8

图 9.24 采用共源共栅的两级运放

本章结束