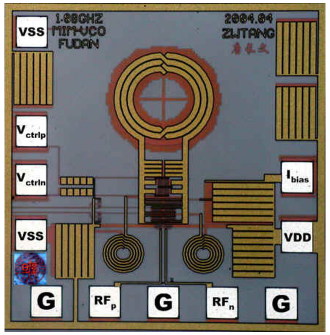


CMOS射频集成电路设计

2006年9月29日

唐长文 助理研究员

zwtang@fudan.edu.cn

http://me.fudan.edu.cn/faculty/personweb/tangzhangwen/RFIC/RFIC.htm

复旦大学 专用集成电路与系统国家重点实验室

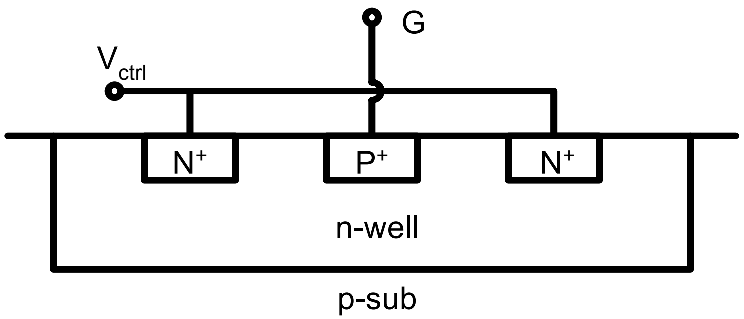
片上可变电容、电容、电阻和有源器件

- 片上可变电容的种类
- 片上可变电容的工作原理分析
- 电容
- 电阻
- 有源器件

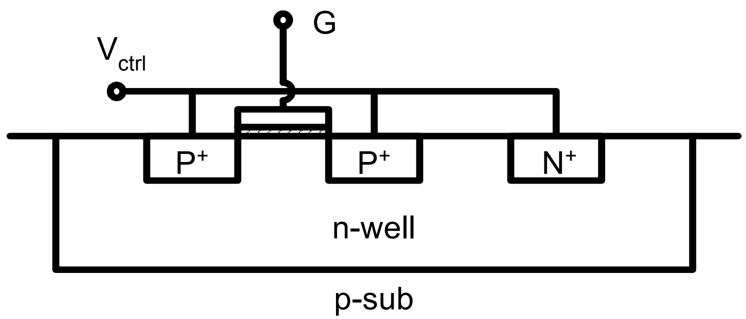
片上可变电容的种类

- 硅CMOS工艺中的四种可变电容

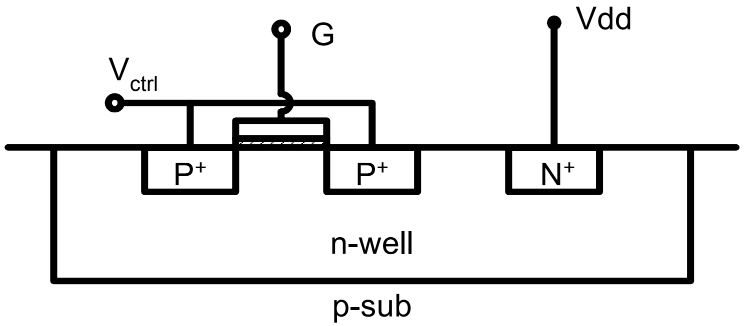
PN结、标准**MOS**管电容、**I-MOS**管电容、**A-MOS**管电容



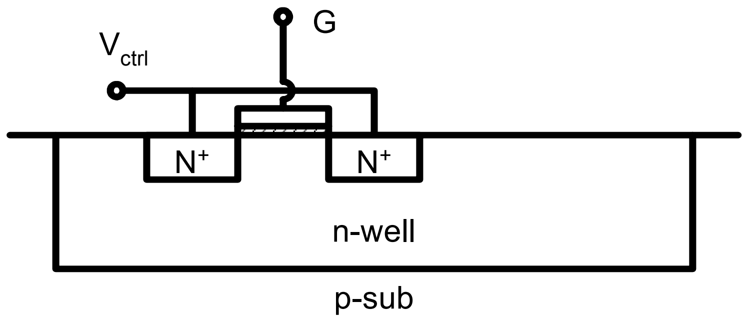
(a) p+/n-well Junction



(b) D=S=B MOS



(c) Inversion MOS

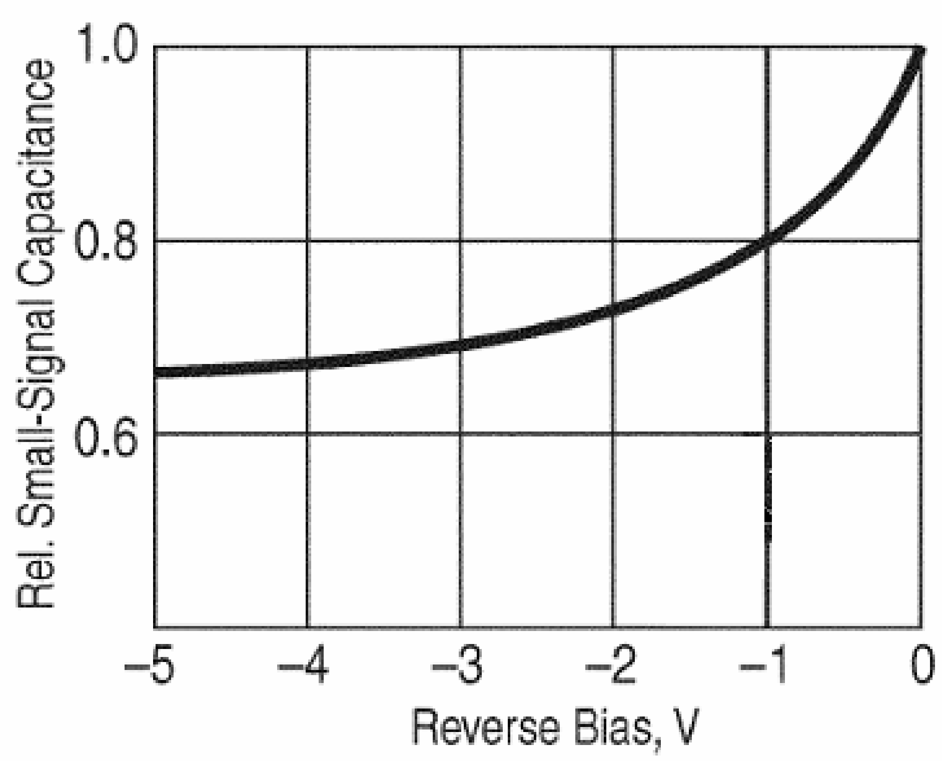


(d) Accumulation MOS

反偏PN结的C-V曲线

- *m*为结电容梯度因子
  - 线性缓变结，***m* = 1/3**;
  - 突变结，***m* = 1/2**;
  - 超突变结，***m* = 1/2~6** 。

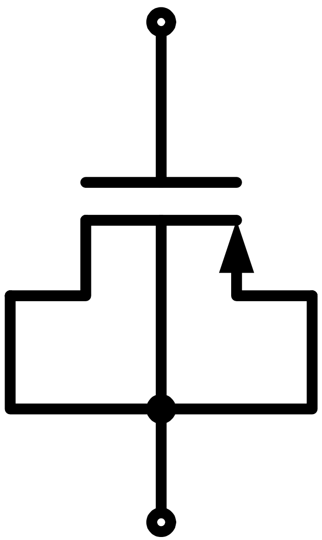
$$C(V)=\frac{C_{j0}}{\left(1-\dfrac{V}{\phi_j}\right)^m}$$

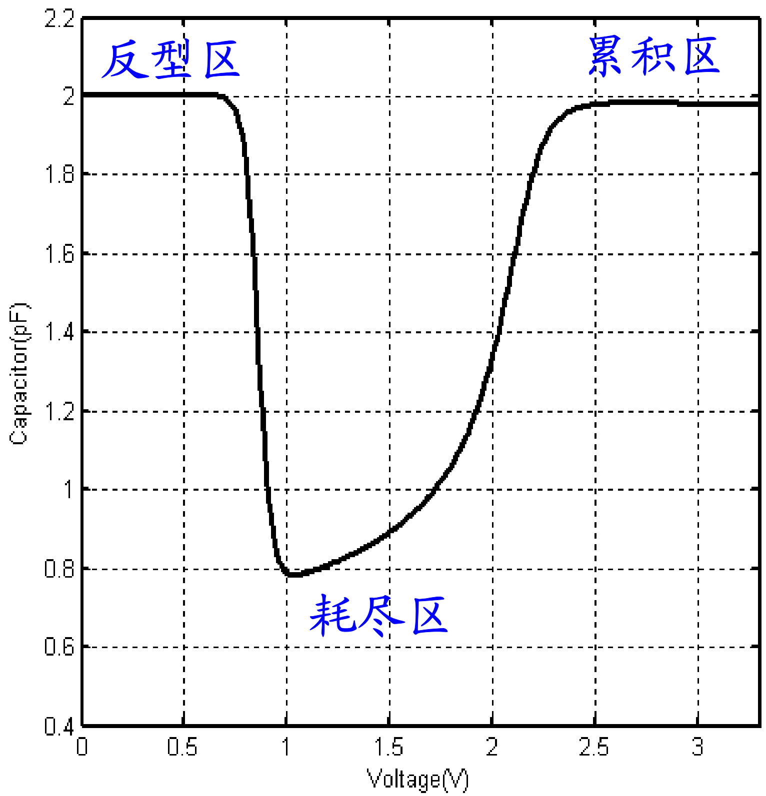


MOS管可变电容的C-V曲线(I)

- 标准MOS管电容

D=S=B MOS管



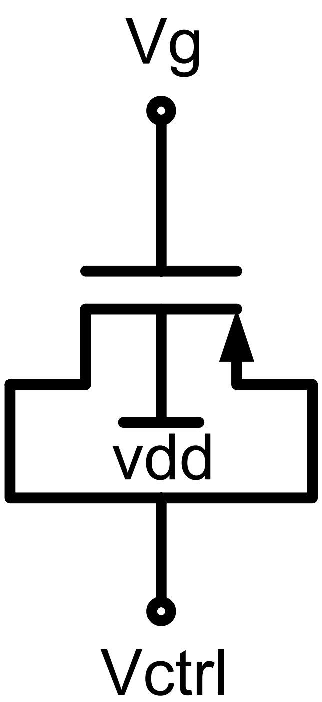


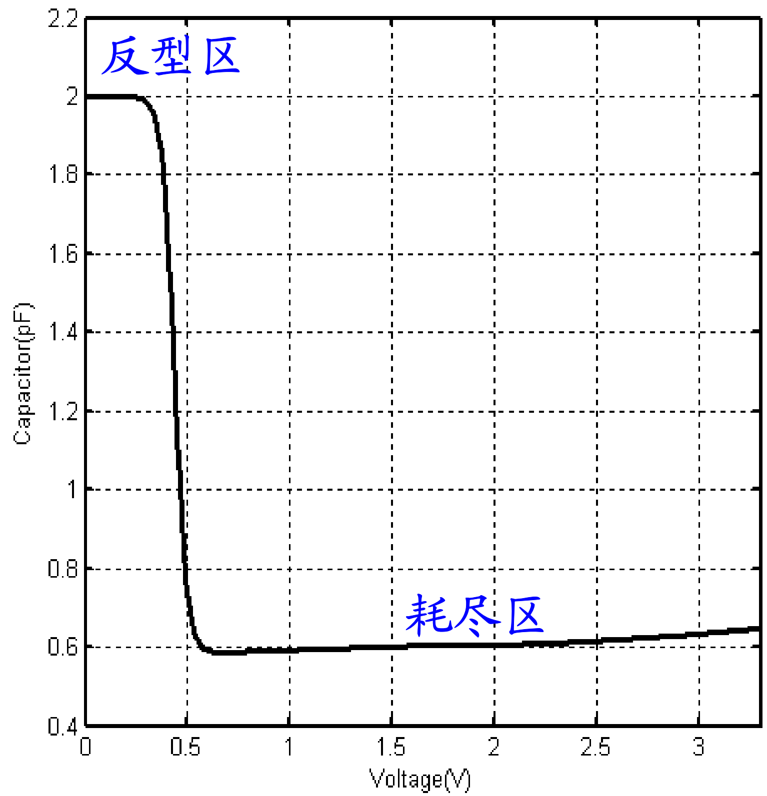
V_{gs}@V_{ctrl}=1.65V

S=D=B PMOS Varactor

MOS管可变电容的C-V曲线(II)

- Inversion-MOS管电容





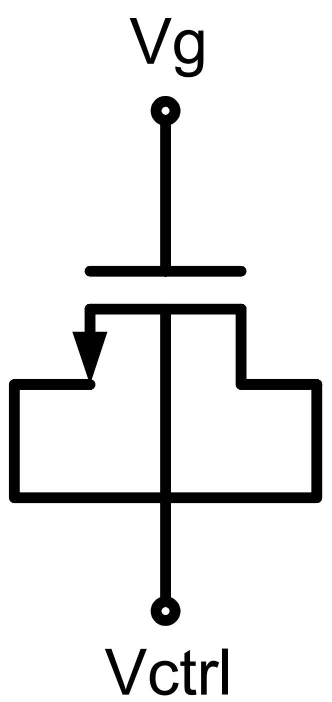
V_{gs}@V_{ctrl}=1.65V

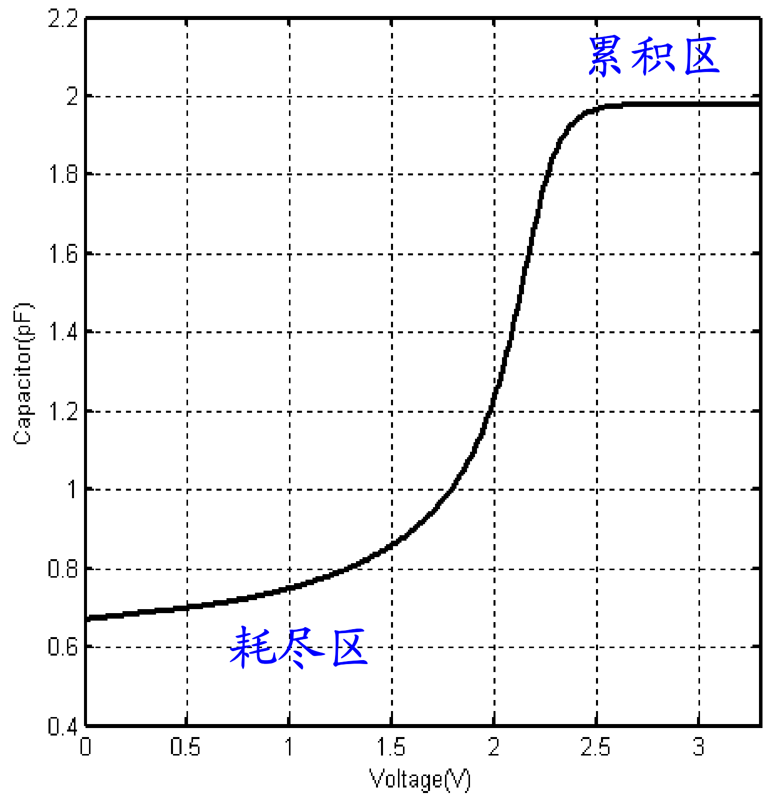
Inversion PMOS Varactor

MOS管可变电容的C-V曲线(III)

- **Accumulation-MOS管电容**

Nwell中的NMOS管





V_{gs}@V_{ctrl}=1.65V

Accumulation NMOS Varactor

片上可变电容的工作原理分析

在分析可变电容之前,让我们回顾一下**MOS**管跨导的推导

- **MOS**管漏极电流

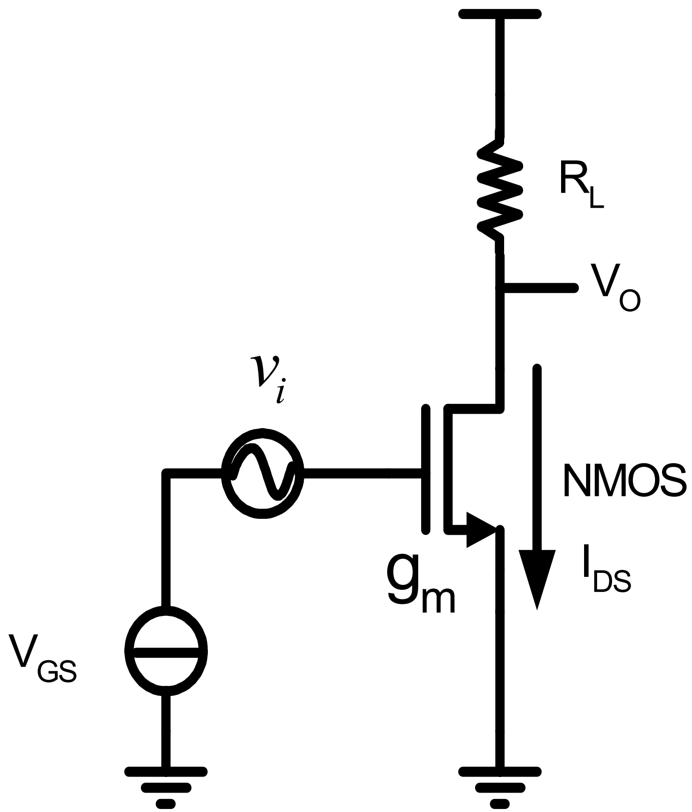
$$I_{DS}=\frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L}\left(V_{GS}-V_{TH}\right)^2$$

- 小信号跨导

$$g_m=\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}=\mu C_{ox}\frac{W}{L}\left(V_{GS}-V_{TH}\right)$$

- 输出小信号

$$v_o=g_m\big|_{V_{GS}+v_i}\cdot R_L\cdot v_i$$



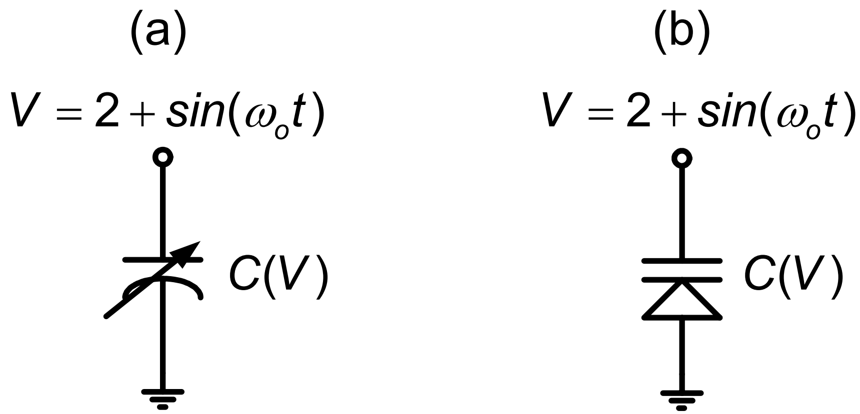
可变电容的大信号和小信号分析

- 大信号分析

$$I=\frac{dQ}{dt}=\frac{d\left(C_{ss}\left(V\right)\cdot V\right)}{dt}=C_{ss}\left(V\right)\frac{dV}{dt}+V\frac{dC_{ss}\left(V\right)}{dt}$$

- 小信号分析

$$I=C_{ss}(V)\frac{dV}{dt}$$

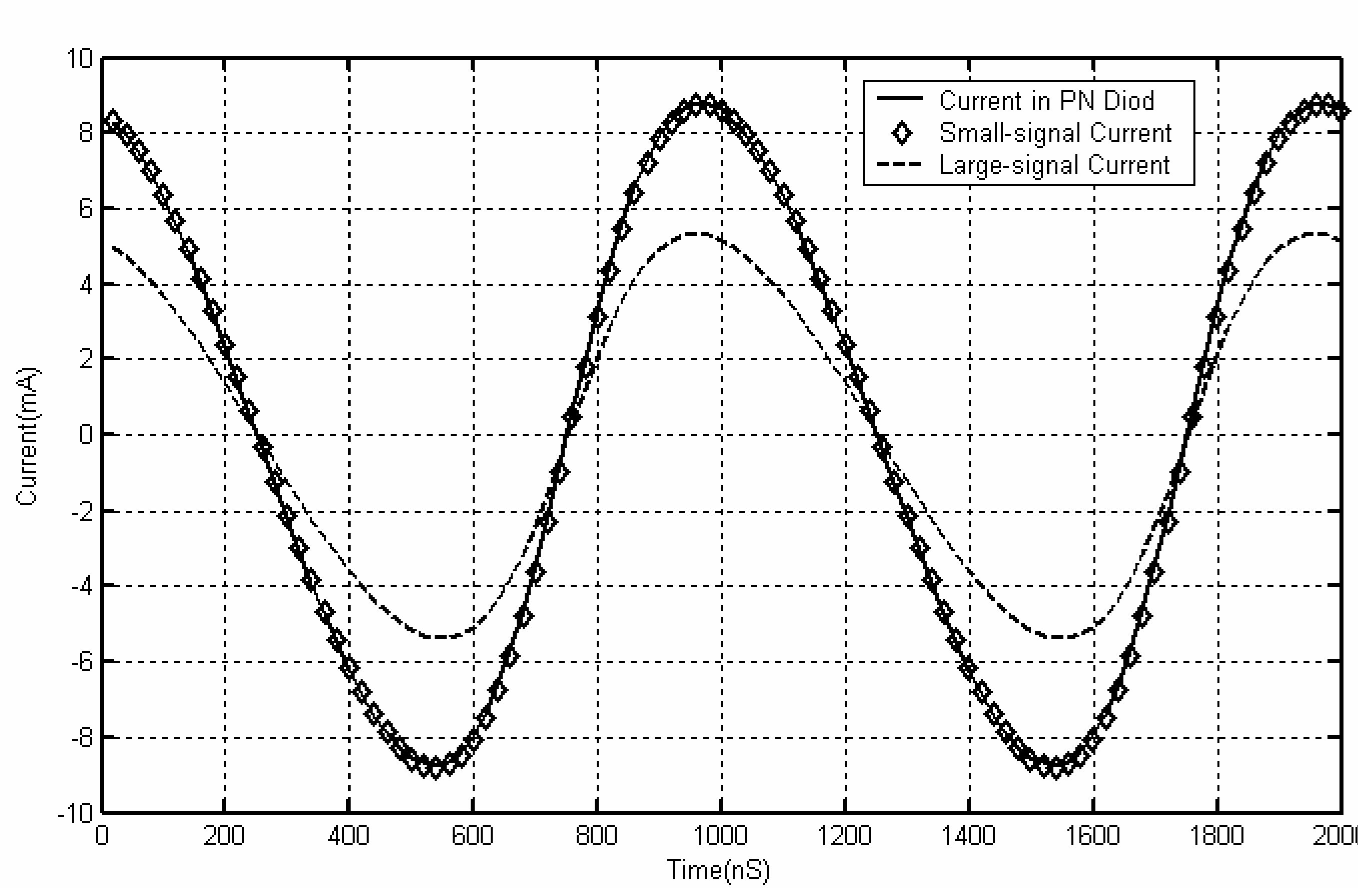


(a) Variable Capacitor Model

(b) PN Junction Varactor

HSPICE仿真结果

- 大信号分析的电流与小信号分析的电流有差别



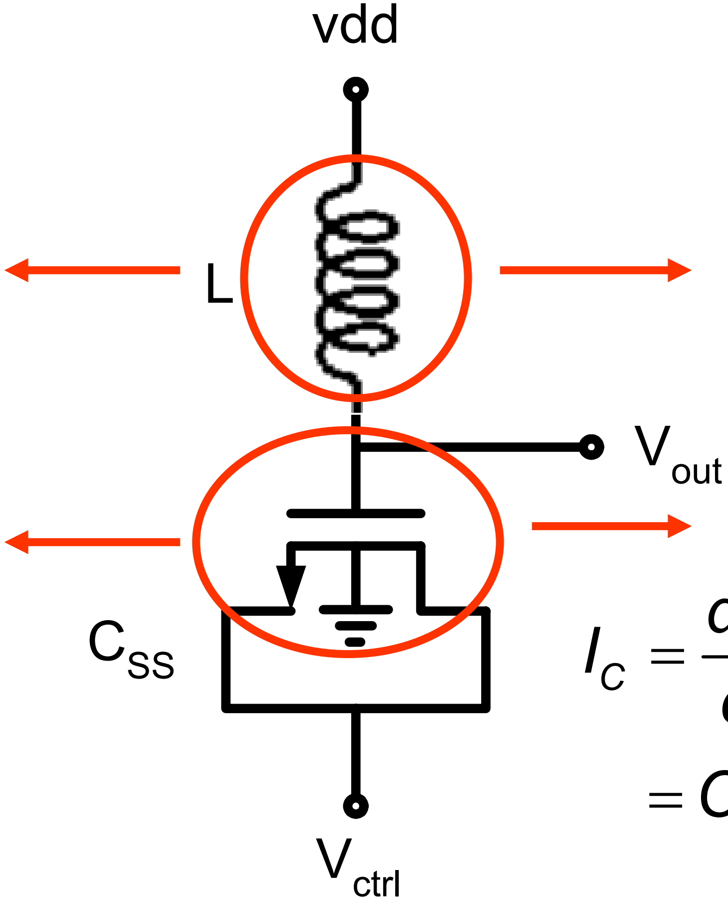
值得注意的是目前大多数商用软件都是基于小信号分析!

LC回路中可变电容的非线性分析(I)

电压

$$V_L = V_{dd} - V_{out}$$

$$V_C = V_{out} - V_{ctrl}$$



电流

$$I_L = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t} V_L(t)dt = \frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t} (V_{dd} - V_{out})dt$$

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \frac{dC_{ss}(V_C)V_C}{dt} = C_{ss}(V_C)\frac{dV_C}{dt} + V_C\frac{dC_{ss}(V_C)}{dt}$$

LC串联条件： $I_L = I_C$

LC回路中可变电容的非线性分析(II)

- 傅立叶展开:忽略三次和三次以上谐波成份

$$V_{out}(t) = V_0 + 2\sum_{n=1}^{\infty} A_n cos(n\omega t) \approx V_0 + 2A_1 cos(\omega t) + 2A_2 cos(2\omega t)$$

- 可变电容的小信号电容的傅立叶展开

$$C_{ss}(V_C) = C_{ss}^{(0)} + 2\sum_{n=1}^{\infty} C_{ss}^{(n)} cos(n\omega t)$$

- 谐波平衡方法:方程两边一次谐波相等

$$I_L = I_C$$

$$\frac{1}{L}\int_{-\infty}^{t}(V_{dd} - V_{out})dt = C_{ss}(V_C)\frac{dV_C}{dt} + V_C\frac{dC_{ss}(V_C)}{dt}$$

$$\frac{A_1}{L\omega} = \omega\left\{A_1 C_{ss}^{(0)} + A_1 C_{ss}^{(2)} + (A_2 - V_{ctrl})C_{ss}^{(1)} + A_2 C_{ss}^{(3)}\right\}$$

LC回路的有效电容

- 有效电容定义:基频上的等效电容

$$C_{eff}=\frac{1}{L\omega^2}=C_{ss}^{(0)}+C_{ss}^{(2)}+\frac{A_2-V_{ctrl}}{A_1}C_{ss}^{(1)}+\frac{A_2}{A_1}C_{ss}^{(3)}$$

- 谐波平衡方法
  - 忽略了高次谐波,存在精度误差
  - 表达式非常复杂
- Hegazi小信号模型: [JSSC 2003 June]

$$C_{eff}=C_{ss}^{(0)}-C_{ss}^{(2)}$$

可变电容小信号模型在正弦波激励下的有效电容

电容

- 电容的类型
  - ❑面-面电容　　　　$\propto$ 面积，1/距离
  - ❑边缘-面电容　　　$\propto$ 长度，1/距离
  - ❑边缘-边缘电容　　$\propto$ 长度，1/距离

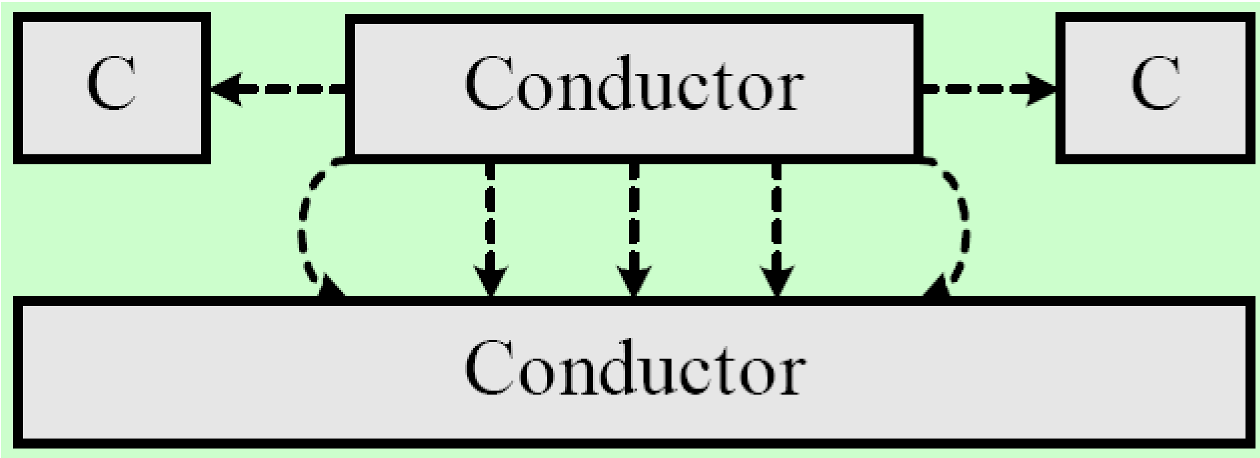
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t}$$

A：面积

t：绝缘层介质厚度

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$

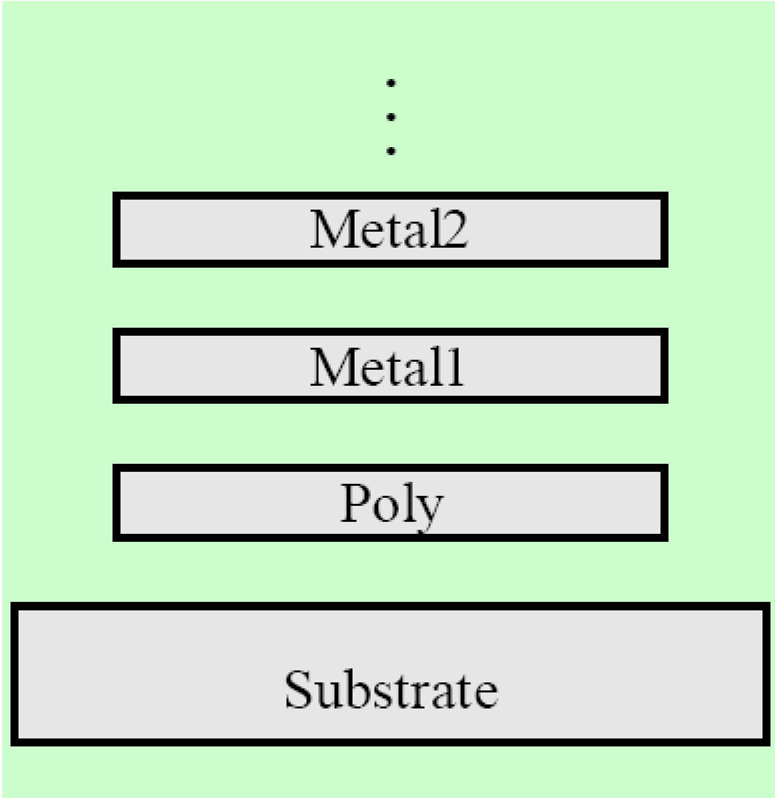
$\varepsilon_{SiO_2} = 3.9$



寄生电容

- 以Metal2为例

	Area C (fF/um^2)	Fringe C (fF/um)
M2-M2 (spacing = 0.3 um)	-	0.0900
M2-M1	0.0110	0.0280
M2-Poly	0.0049	0.0170
M2-Substrate	0.0045	0.0160



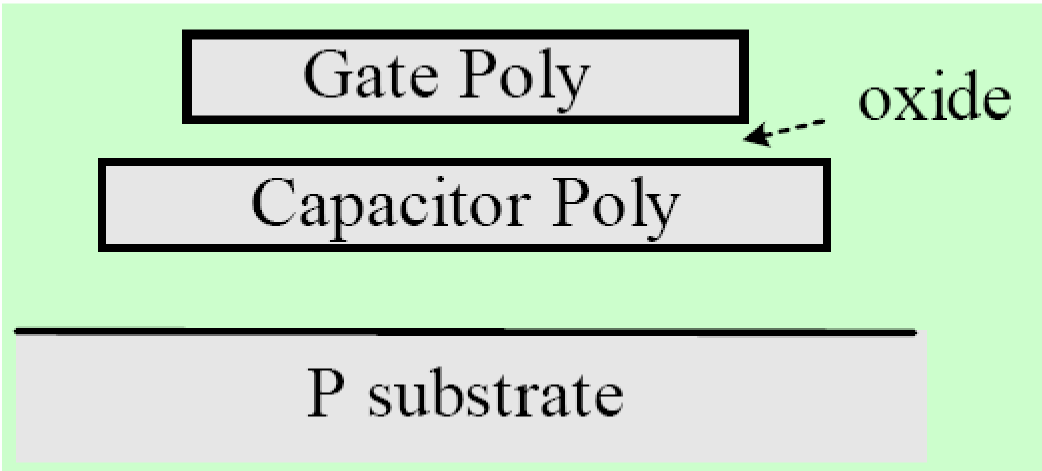
PIP电容

- PIP电容值

$$C_{unit} = 1 - 1.3 fF / \mu m^2 \qquad C_{fringe} = 0.08 - 0.09 fF / \mu m$$

- 需要额外Poly电容掩模层

- 电容底板的寄生电容大

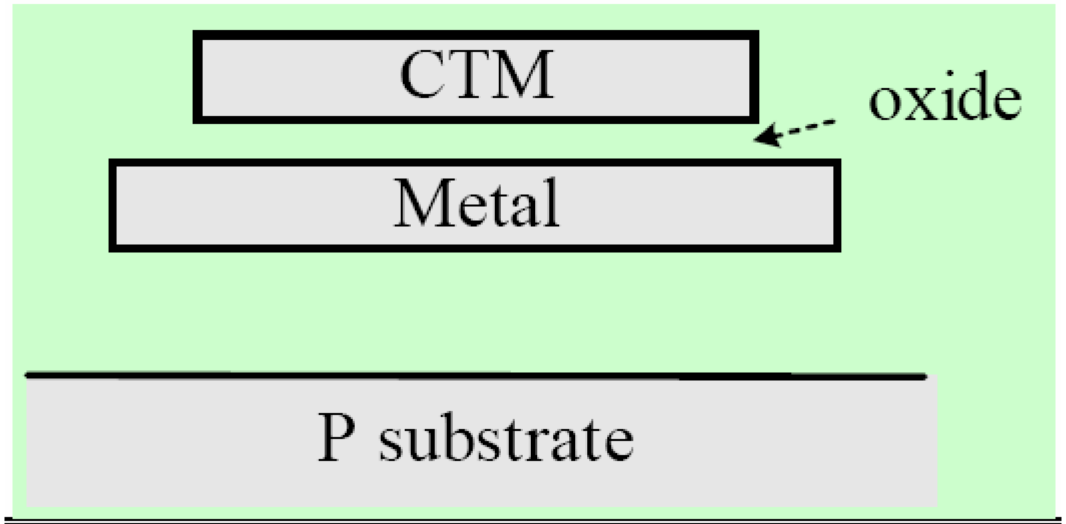


MIM电容

- **MIM电容**

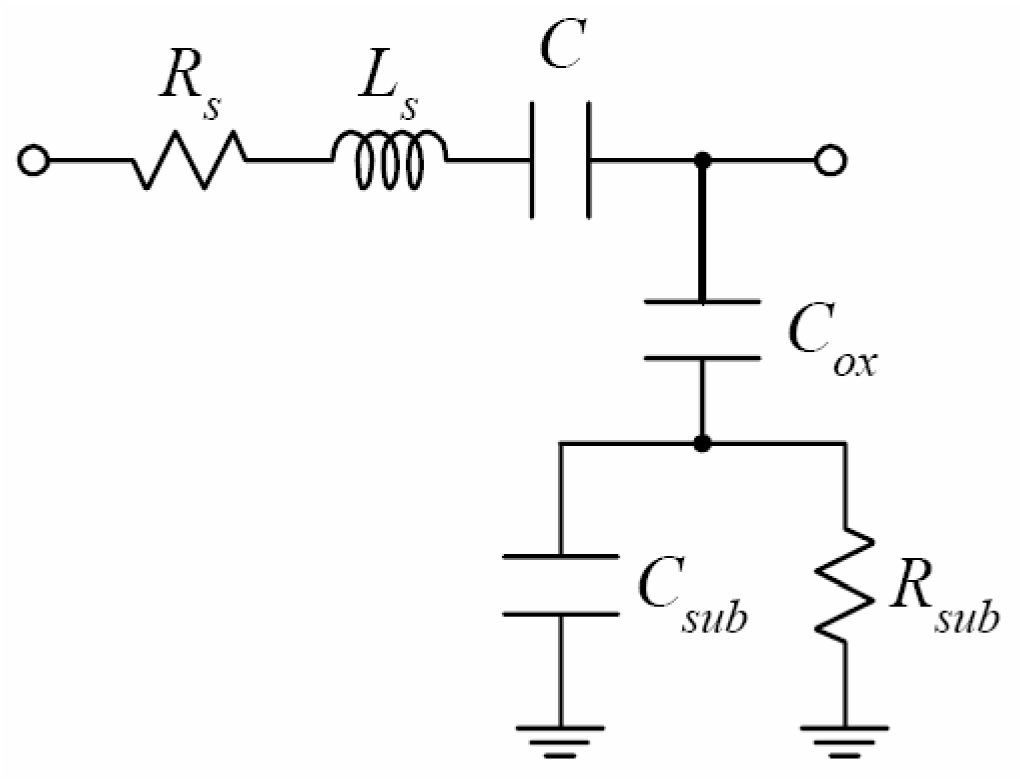
$$C_{unit} = 0.8 - 1.15 fF/\mu m^2 \quad C_{fringe} = 0.073 - 0.077 fF/\mu m$$

- 额外需要CTM(Capacitor Top Metal)掩模层
- 寄生电容和串联电阻都很小



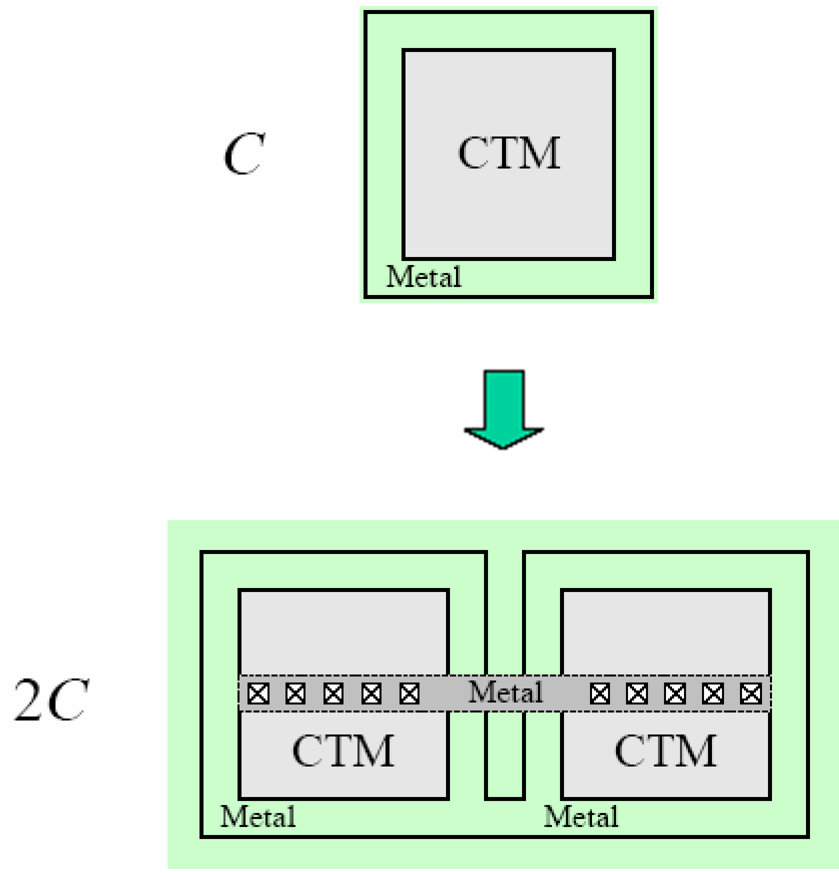
电容模型

- 等效电路模型



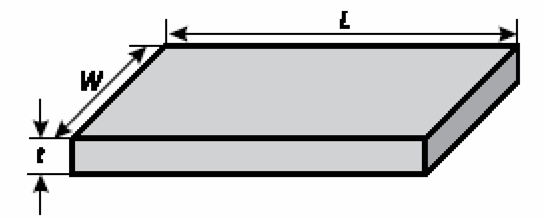
电容精度

- 绝对精度
  - ❑工艺偏差大于 ∓10%
    - ❖掩模和光刻偏差
    - ❖电容边缘效应
    - ❖绝缘层厚度偏差
- 相对精度(匹配)
  - ❑∓1% 的偏差
  - ❑使用单位电容



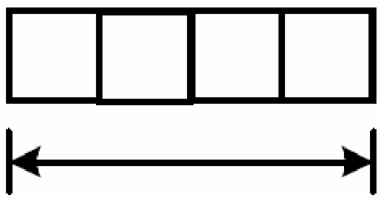
电阻的类型

- 方块电阻的计算
  - ❑电导率 σ
  - ❑电阻率 $\rho = \dfrac{1}{\sigma}$

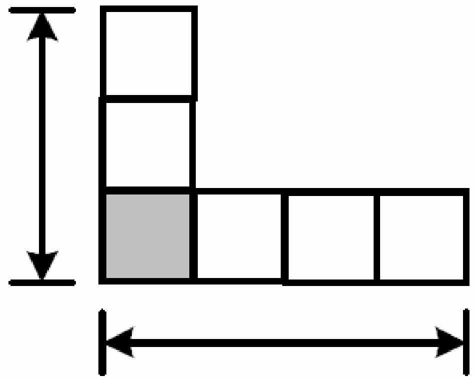


$$R = \frac{\rho L}{Wt} \rightarrow R_{SH} = \frac{\rho}{t} = R\left(\frac{W}{L}\right)$$

$R_{SH} = 50\Omega/square$



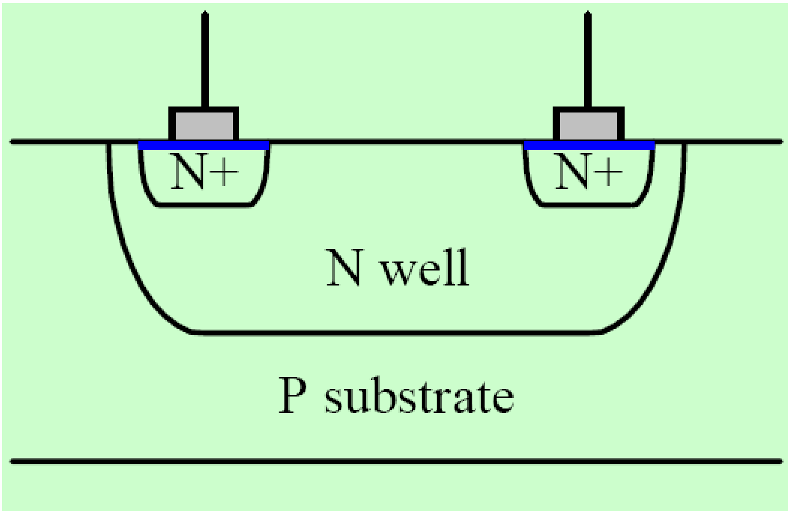
$R_{total} = 200\ \mathrm{ohm}$



$R_{total} < 300\ \mathrm{ohm}$

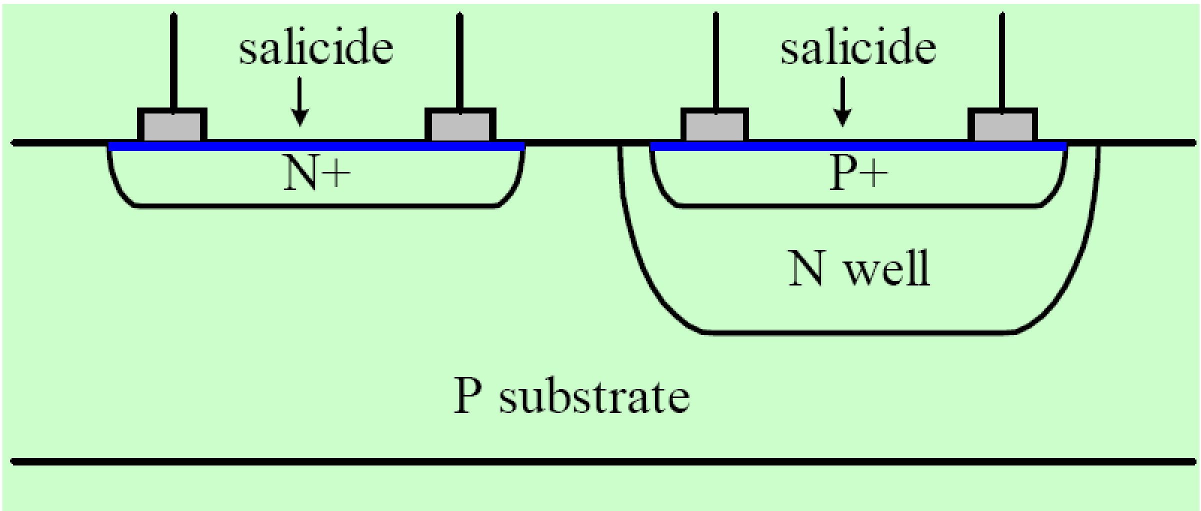
阱电阻

- 通常是**Nwell**电阻
  - ❑寄生电容很大
  - ❑方块值 $R_{SH} = 460 - 600\Omega / square$



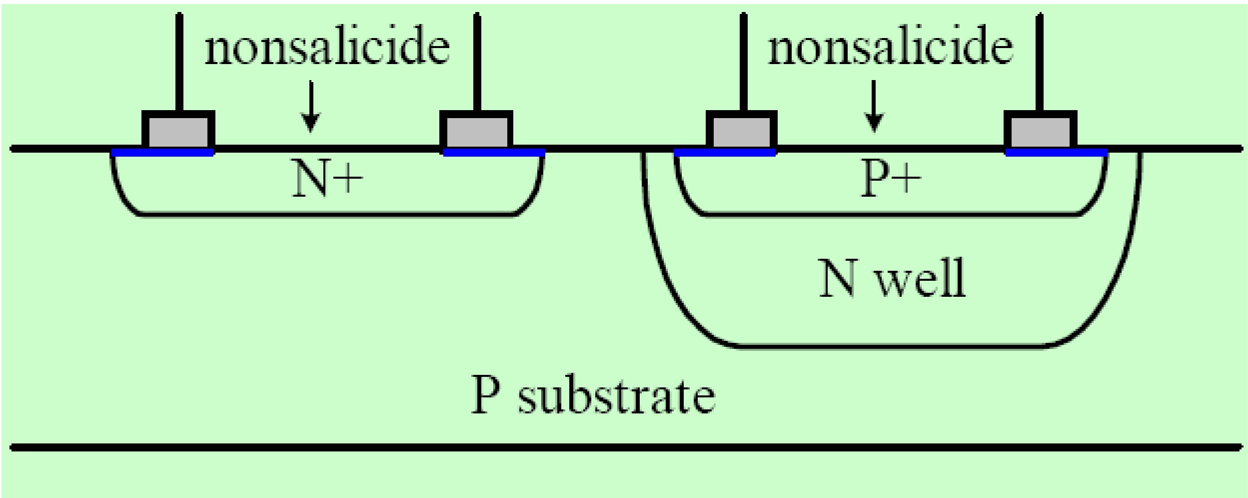
扩散电阻(I)

- Salicide P+/N+有源区扩散电阻
  - ❑寄生电容很大
  - ❑方块值 $R_{SH} = 1-9\Omega/square$



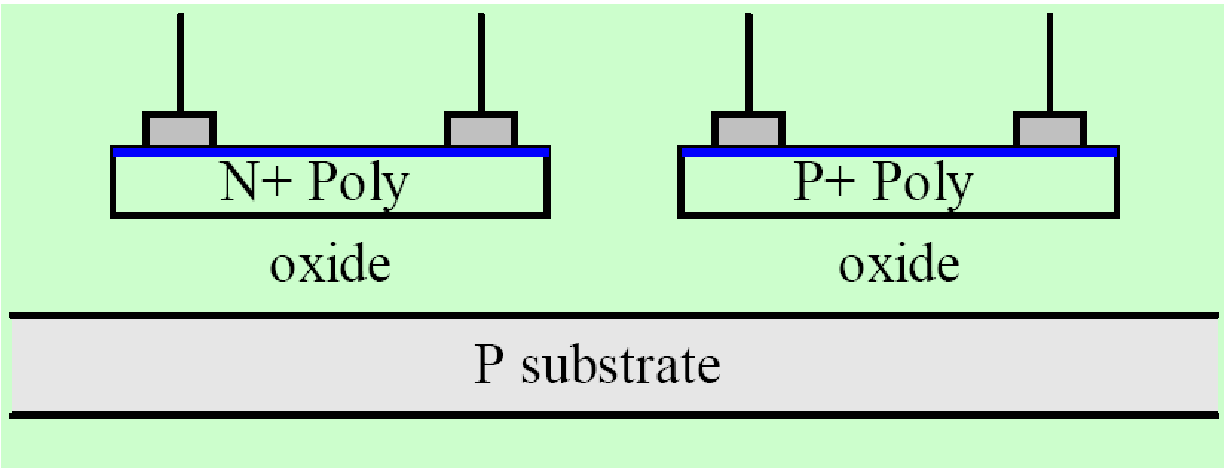
扩散电阻(II)

- Non-salicide P+/N+栅电阻
  - 方块值 $R_{SH\_P+} = 125 - 165\Omega/square$
    $R_{SH\_N+} = 63.5 - 68.5\Omega/square$
  - 只能在低频电路中使用
  - 额外需要salicide阻挡层



栅电阻(I)

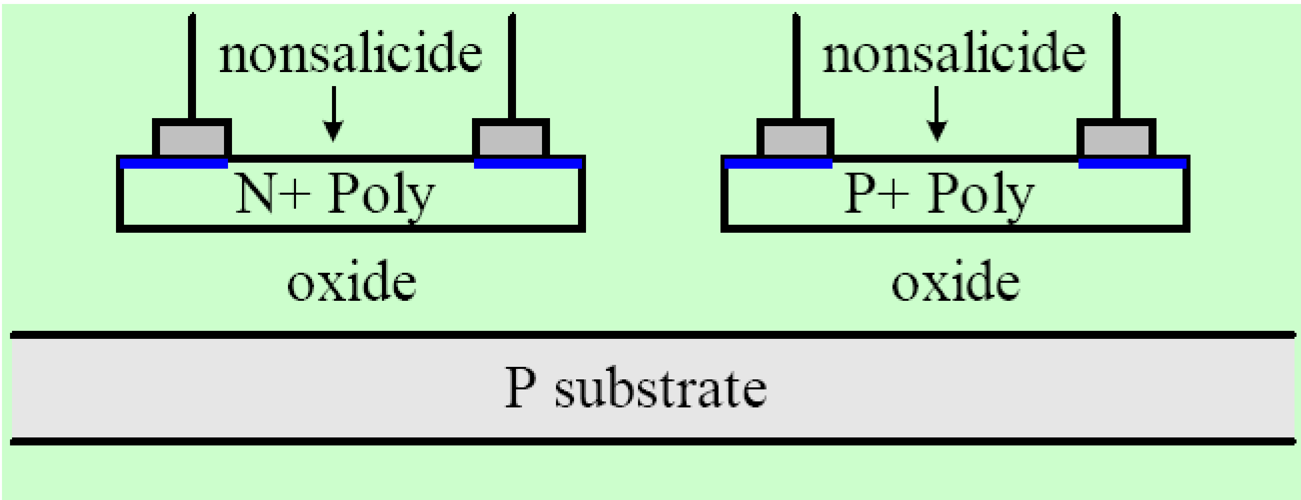
- Salicide P+/N+栅电阻
  - 寄生电容小
  - 方块值 $R_{SH} = 1-9\Omega/square$



栅电阻(II)

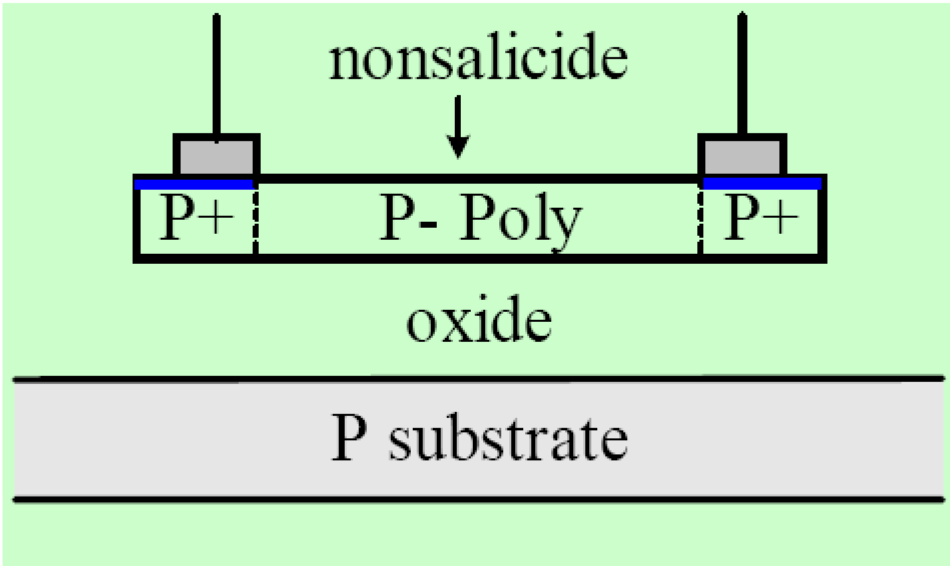
- Non-salicide P+/N+栅电阻
  - ❑方块值 $R_{SH\_P+} = 130 - 190\Omega/square$

    $R_{SH\_N+} = 160 - 210\Omega/square$
  - ❑能在高频电路中使用
  - ❑额外需要salicide阻挡层



栅电阻(III)

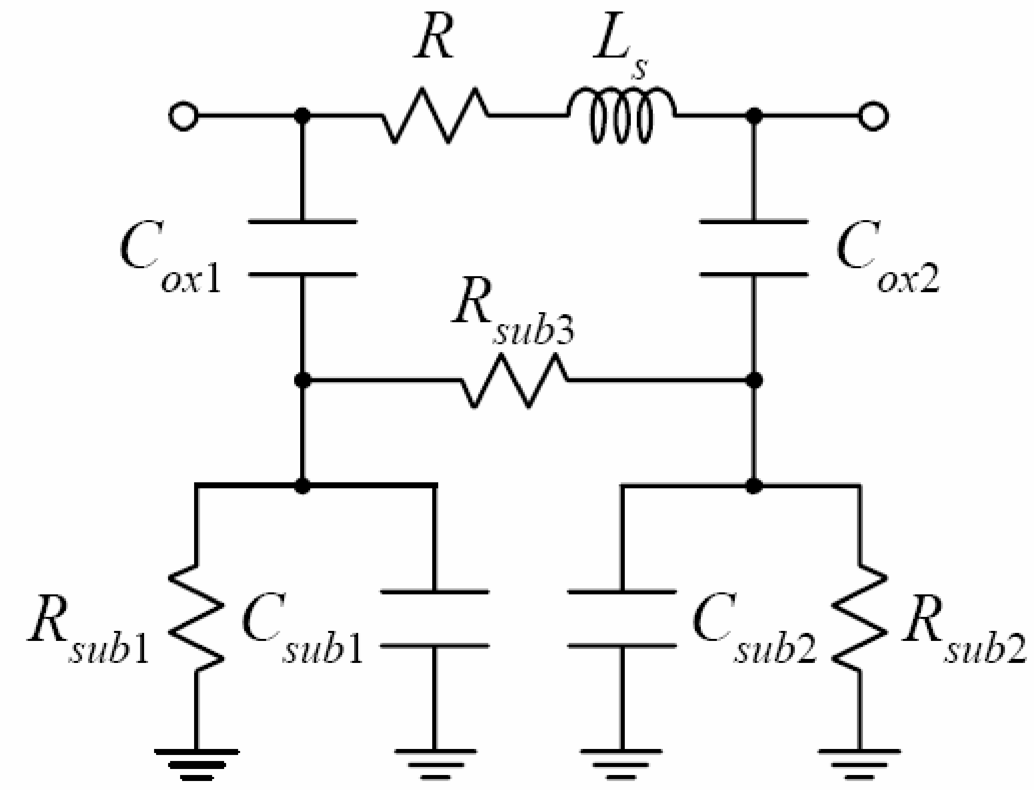
- Non-salicide HR(High resistance)栅电阻
  - ❑方块值 $R_{SH\_HR} \approx 400\Omega/square$
  - ❑能在高频电路中使用
  - ❑额外需要salicide阻挡层和高阻掩模层



电阻模型

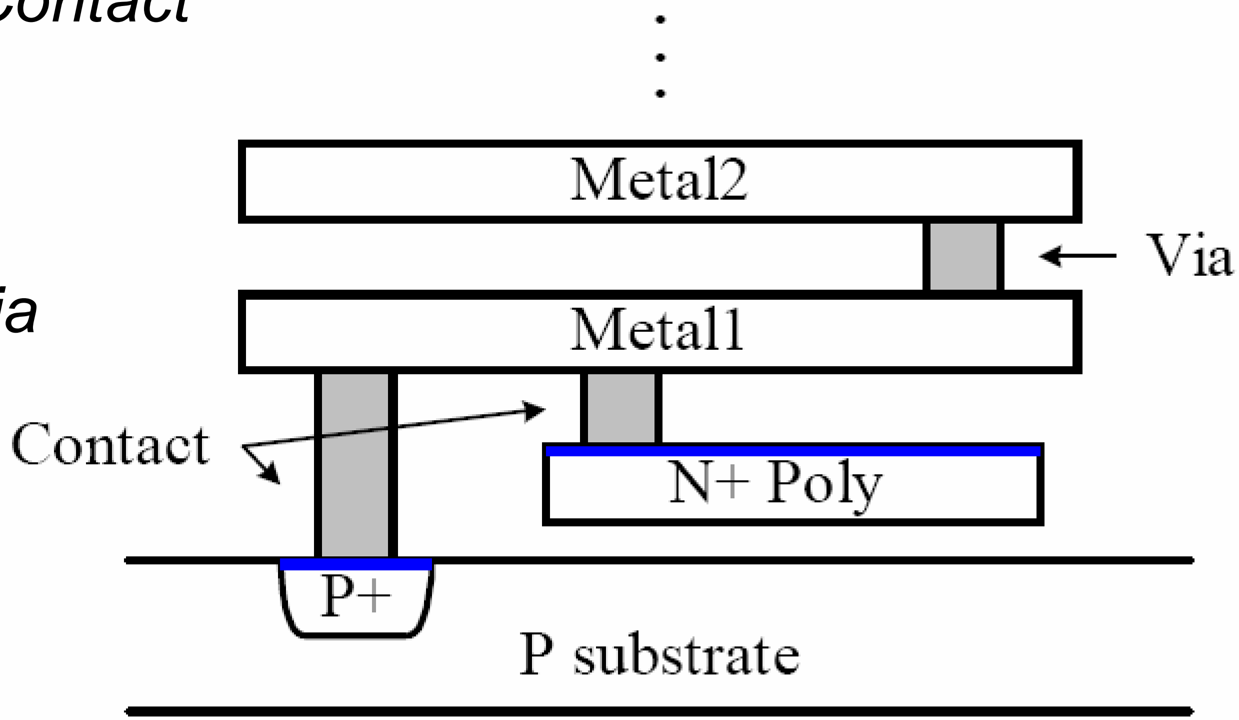
- 等效电阻模型

与片上电感的模型相同，区别在于L_S感值很小



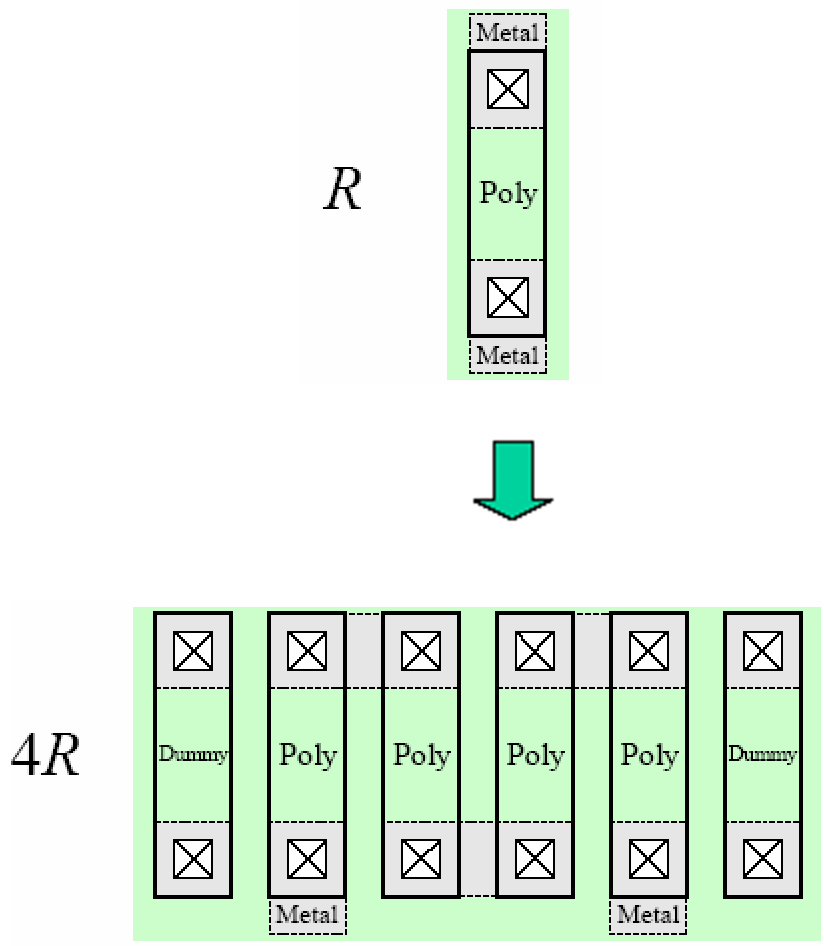
寄生电阻

- 金属串联电阻 $R_{SH} = 0.025 - 0.115\Omega/square$
- 接触(Contact)电阻
  - P+/N+ Contact, P+/N+ Poly Contact
  - 阻值 $5 - 25\Omega/Contact$
- 过孔(Via)电阻
  - Via12, Via23, ..
  - 阻值 $2 - 15\Omega/Via$



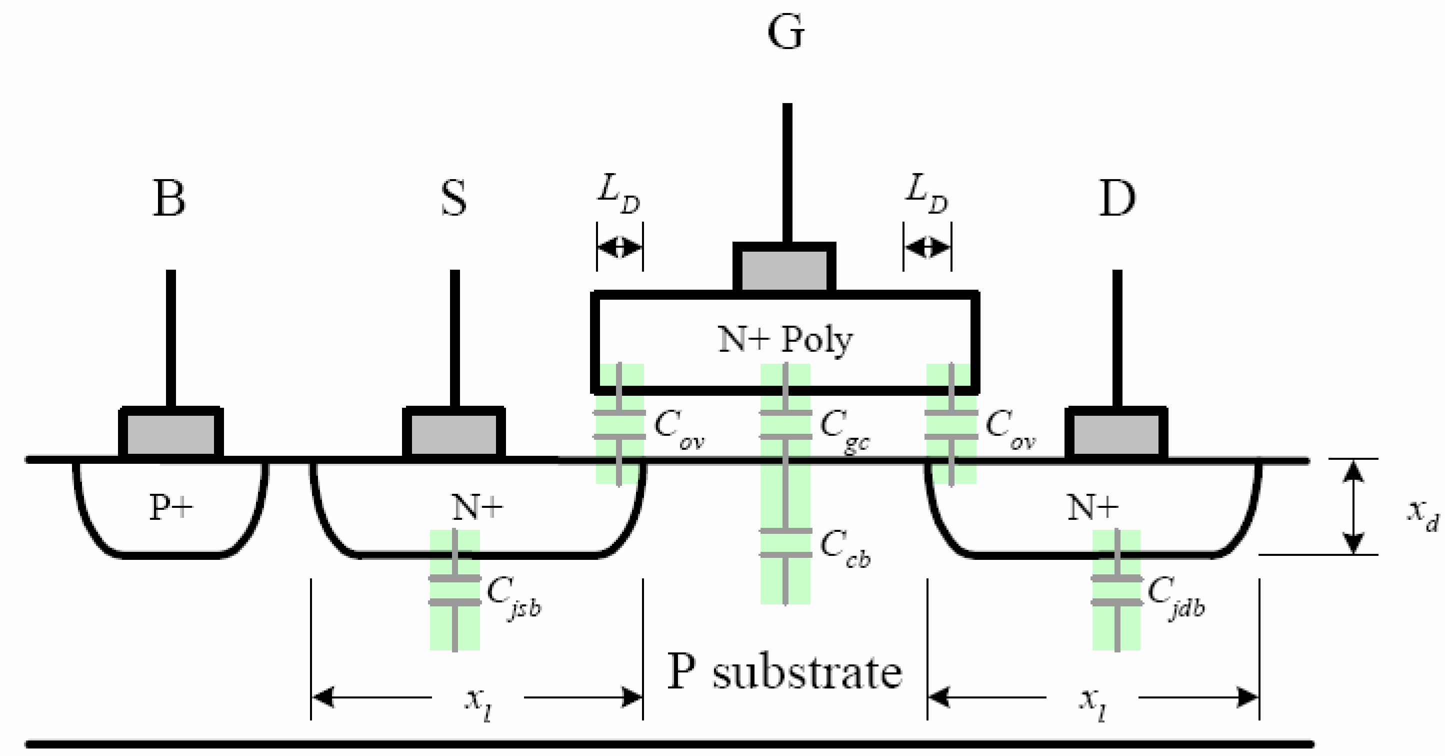
电阻精度

- 绝对精度
  - ❑工艺偏差大于 ∓10%
    - ❖掩模和光刻偏差
    - ❖离子注入偏差
    - ❖电阻末端效应
- 相对精度(匹配)
  - ❑∓1% 的偏差
  - ❑使用单位电阻



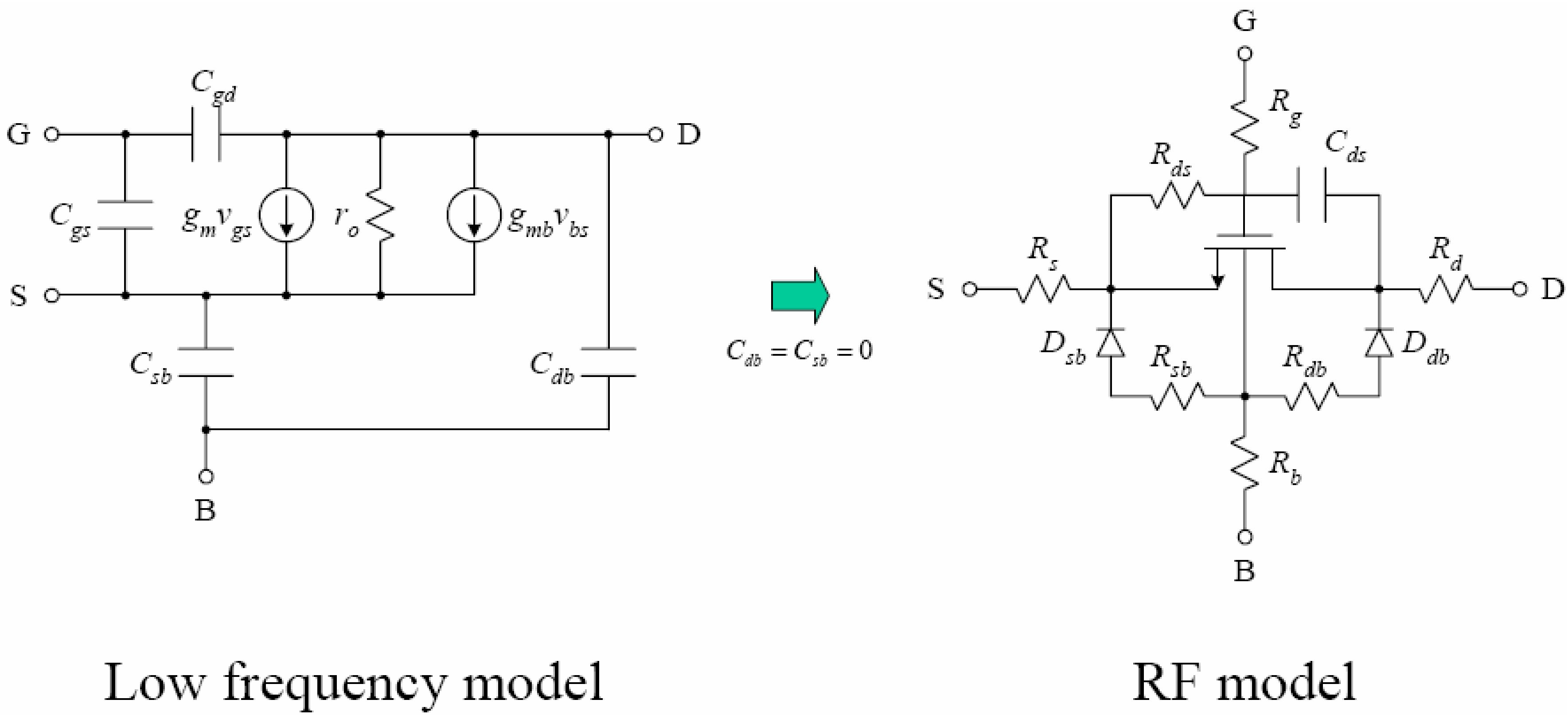
有源器件

- 射频MOS管：W/L尺寸相对固定
  - ❑MOS管寄生电容必须考虑



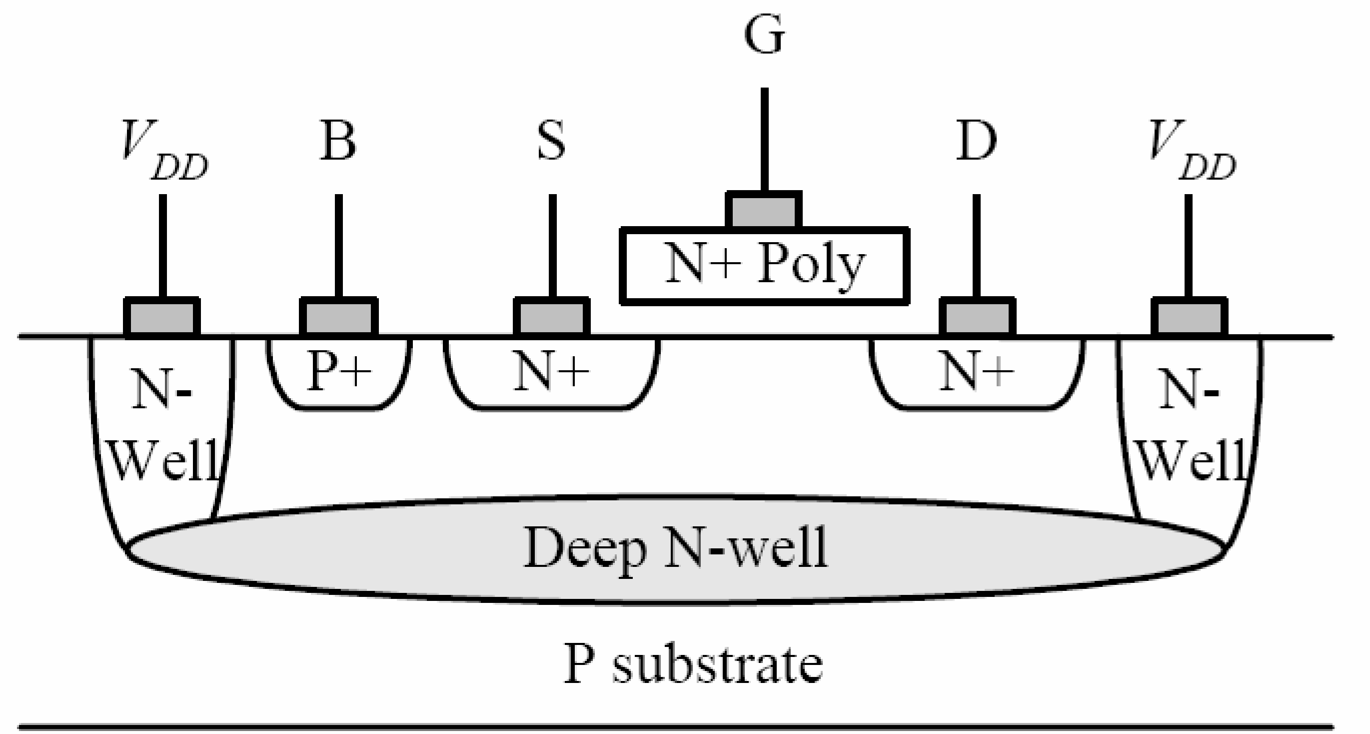
MOS管小信号模型

- 低频和高频模型的比较



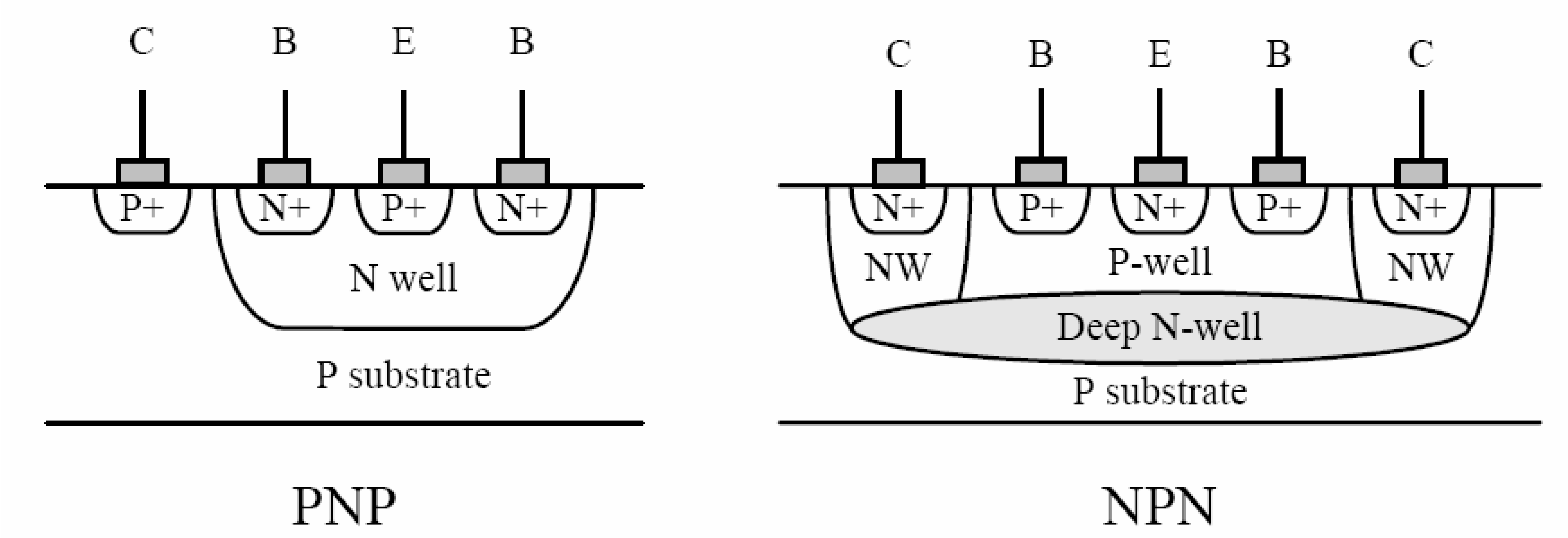
深阱中的NMOS管

- 没有衬偏效应
- 需要额外的掩模层和工艺流程
- 占用面积很大



纵向双极型晶体管

- 横行剖面图



参考文献

博士论文

- 唐长文，“电感电容压控振荡器”，第四章，2004年5月，复旦大学博士论文

杂志文章

- 唐长文，何捷，菅洪彦，张海青和闵昊，“电感电容压控振荡器调谐曲线的时域分析”，电子学报，第33卷，第8期，第1467－1472页，2005年8月
- S. Levantino, C. Samori, A. Bonfanti, S. L. J. Gierkink, A. Lacaita, and V. Boccuzzi, “Frequency dependence on bias current in 5-GHz CMOS VCOs: Impact on tuning range and flicker noise upconversion,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 37, pp. 1003-1011, Aug.2002.
- R. L. Bunch, and S. Raman, “Large-signal analysis of MOS varactors in CMOS —G_m LC VCOs” *IEEE J. Solid-State Circuits,* vol. 38, no.8, pp.1325-1332, Aug. 2003.
- E. Hegazi, and A. Abidi, “Varactor characteristics, oscillator tuning curves, and AM-FM conversion,” *IEEE J. Solid-State Circuits,* vol. 38, no.6, pp.1033-1043, June 2003.
- S. Levantino, C. Samori, A. Zanchi and A. L. Lacaita, “AM-to-PM conversion in varactor-tuned oscillator” *IEEE Trans. on Circuits and Systems-II, Analog and Digital Signal Processing,* vol. 49, no.7, pp.509-513, July 2002.
- K. Molnar, G. Rappitsch, Z. Huszka and E. Seebacher, “MOS varactor modeling with a subcircuit utilizing the BSIM3v3 model” *IEEE Trans. on Electron Devices,* vol. 49, no.7, pp.1206-1211, July 2002.