

# 模拟集成电路原理与设计

## 第1章 绪论

陈中建

[chenzj@pku.edu.cn](mailto:chenzj@pku.edu.cn)

62759051, 理科2号楼2619

微电子学系

# 授课内容

绪论	重要性、一般概念
器件物理基础	MOSFET结构、IV特性、二级效应、器件模型
单级放大器	共源、共漏、共栅、共源共栅
差动放大器	定性分析、定量分析、共模响应、吉尔伯特单元
无源/有源电流镜	基本/共源共栅/有源电流镜
放大器的频率特性	米勒效应、极点与节点关系、各类单级放大器频率特性分析
噪声	统计特性、类型、电路表示、各类单级放大器噪声分析、噪声带宽
反馈	特性、四种反馈结构、负载影响、对噪声的影响
运算放大器	性能参数、一级运放、两级运放、各指标分析
稳定性和频率补偿	多极点系统、相位裕度、频率补偿
版图	叉指、对称、ESD等

# 本讲

- 研究模拟电路的重要性
- 模拟电路设计的难点
- 研究AIC的重要性
- 研究CMOS AIC的重要性
- 电路设计一般概念
  - ❖ 抽象级别
  - ❖ 健壮性设计
  - ❖ 符号约定

# 模拟电路

## □电路中的电信号

- ❖由电路产生、处理或传输的变化的电学量
- ❖任何可检测的电压、电流或电荷值

## □模拟电路

- ❖处理的电信号是模拟信号
- ❖模拟信号是在一定连续时间范围内和一定连续幅度范围内具有确定意义的信号

## □数字电路

- ❖处理的电信号是数字信号
- ❖数字信号是在时间和幅度的某些离散点上有确定意义的信号

# 为什么要研究模拟电路？

## □ 现代电路系统不可或缺的一部分

- ❖ 数字电路的信号处理能力不断增强
- ❖ 再强大也无法完全取代模拟电路在电路系统中的角色
  - **RF、ESD、ADC、DAC、PLL**

## □ 应用实例

- ❖ 自然界信号的处理
- ❖ 数字通信
- ❖ 磁盘驱动电路
- ❖ 无限接收器
- ❖ 光接收器
- ❖ 传感器
- ❖ 微处理器和存储器

# 自然界信号的处理

## □ 自然界信号是模拟量

❖ 声音、光、震动等

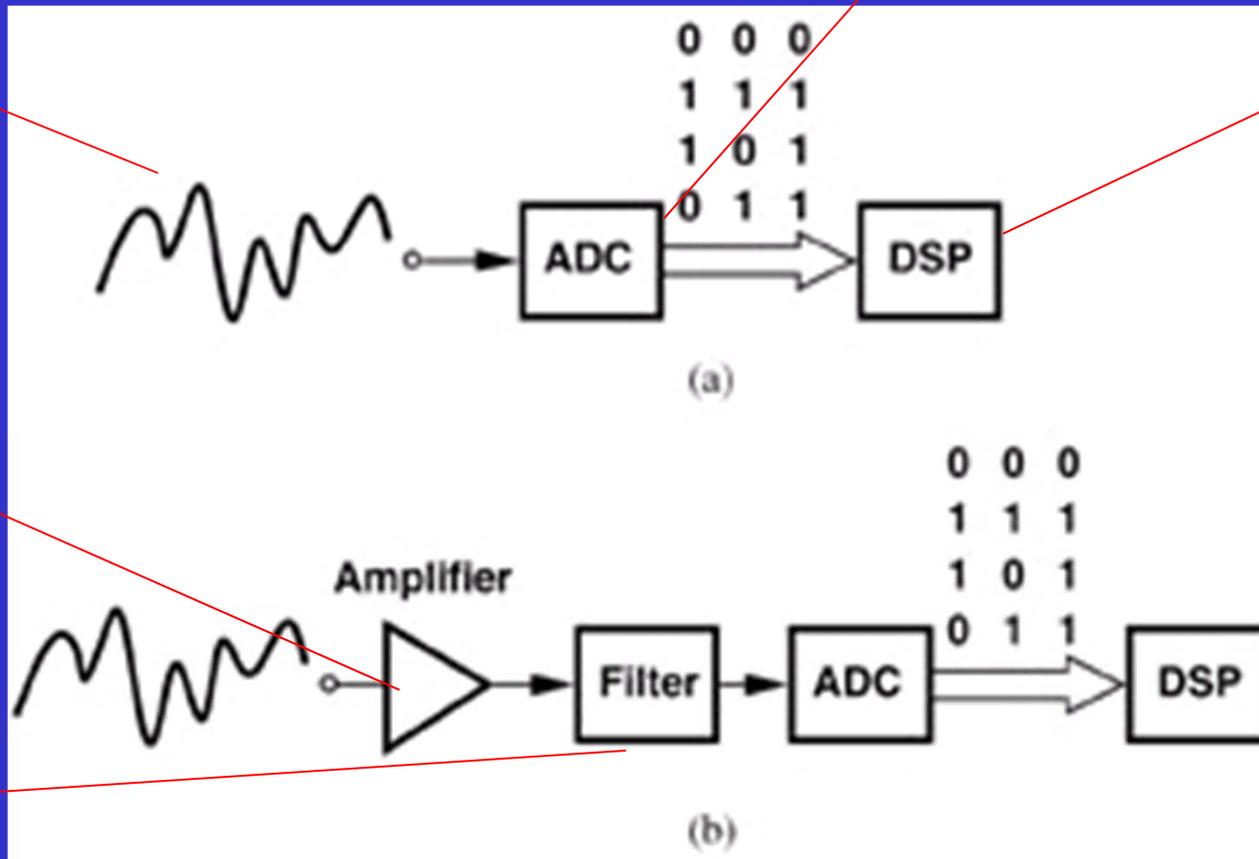
速度、精度、功耗

探测器输出

信号处理

信号太小时  
需要先放大

滤除信号  
频带外的  
干扰



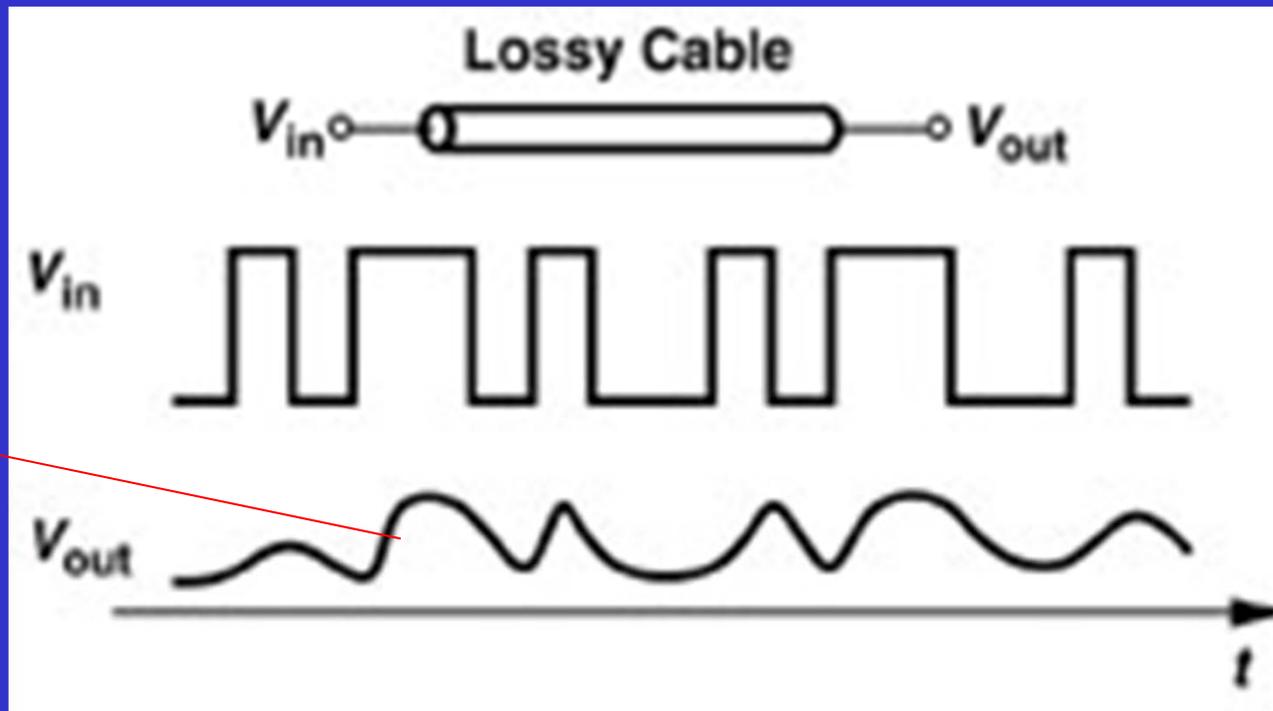
# 数字通信

## □ 电缆数据传输

### ❖ 长距离、高速时

- 有限带宽，衰减大，不适于高速远距离传输

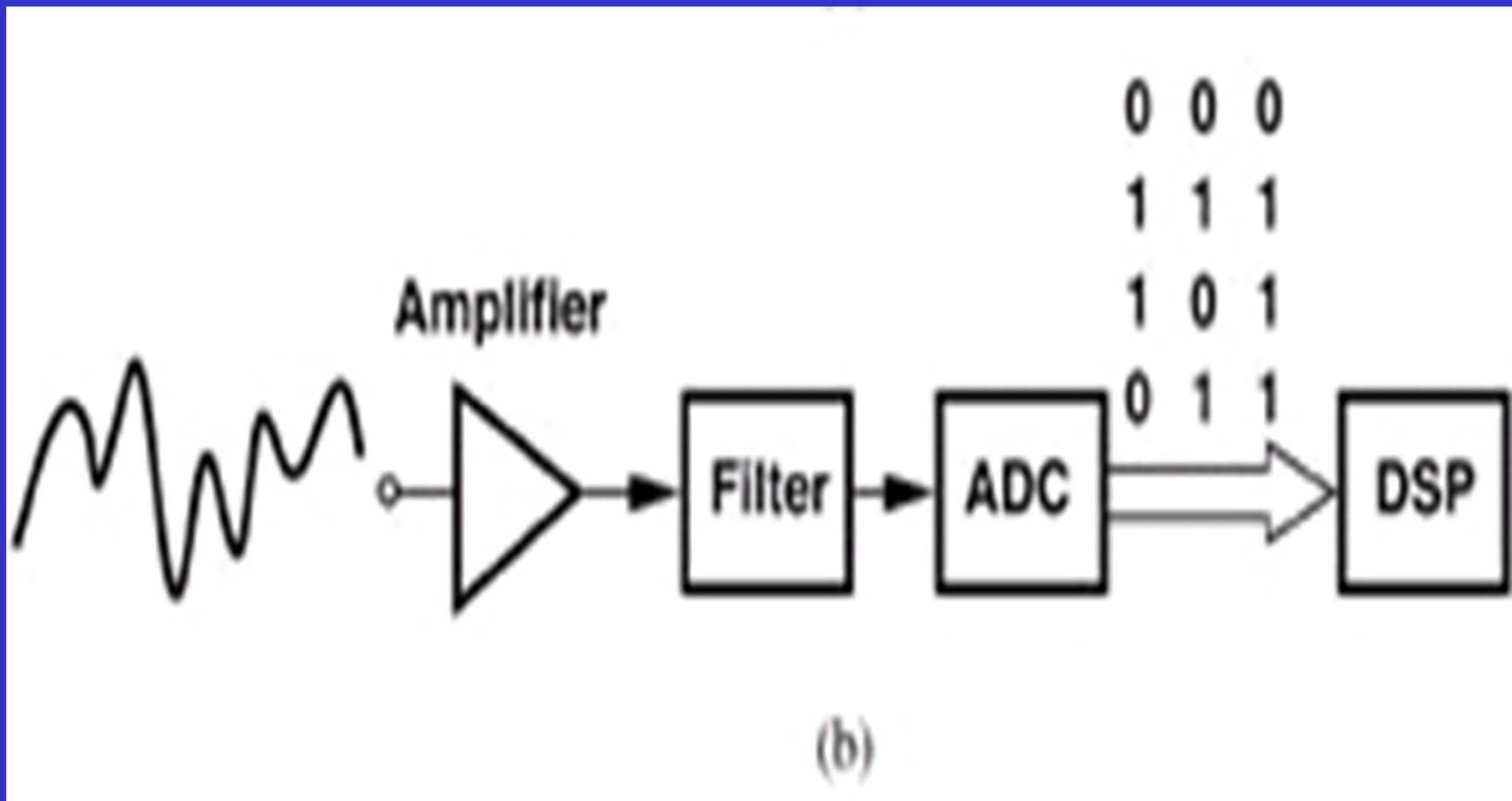
### ❖ 解决办法？



信号衰减、  
失真

# 数字通信

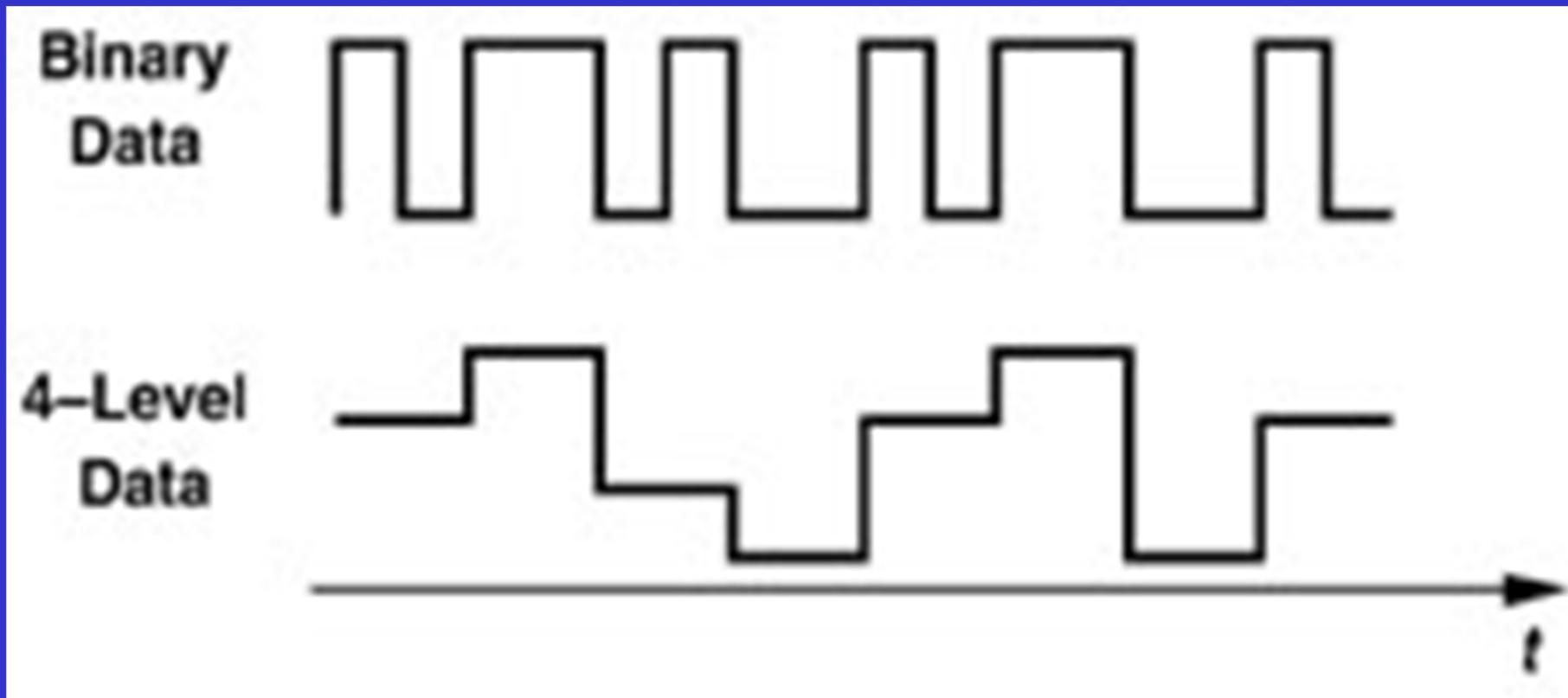
□用如下接收电路



# 数字通信

## □ 采用多电平传输以降低信号带宽

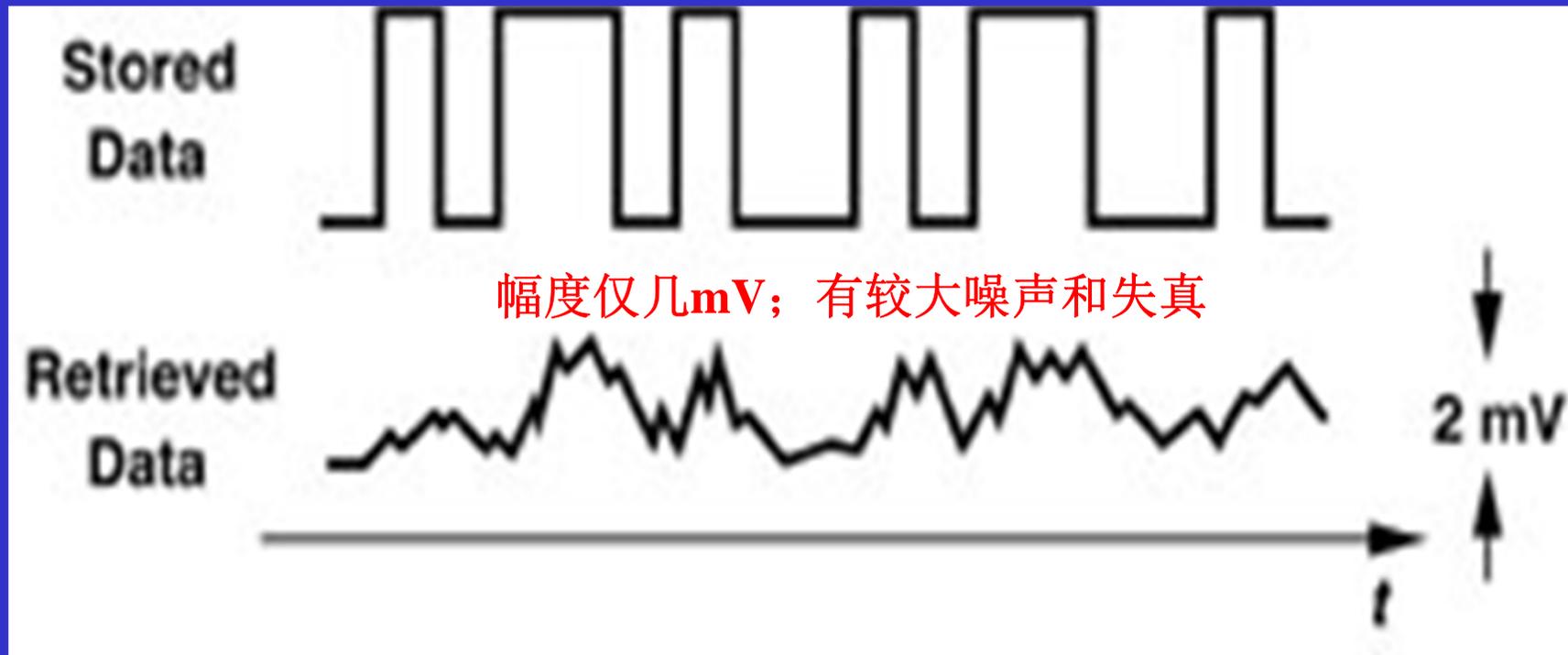
- ❖ 降低了发送和接收电路的带宽要求
- ❖ 发送端增加DAC，接收端用ADC识别



# 磁盘驱动电路

## □ 磁盘数据读取

- ❖ 磁性信号数据——磁头——电信号数据
- ❖ 读取方法：放大——滤波——数字化
- ❖ 挑战：速度（500Mb/s）



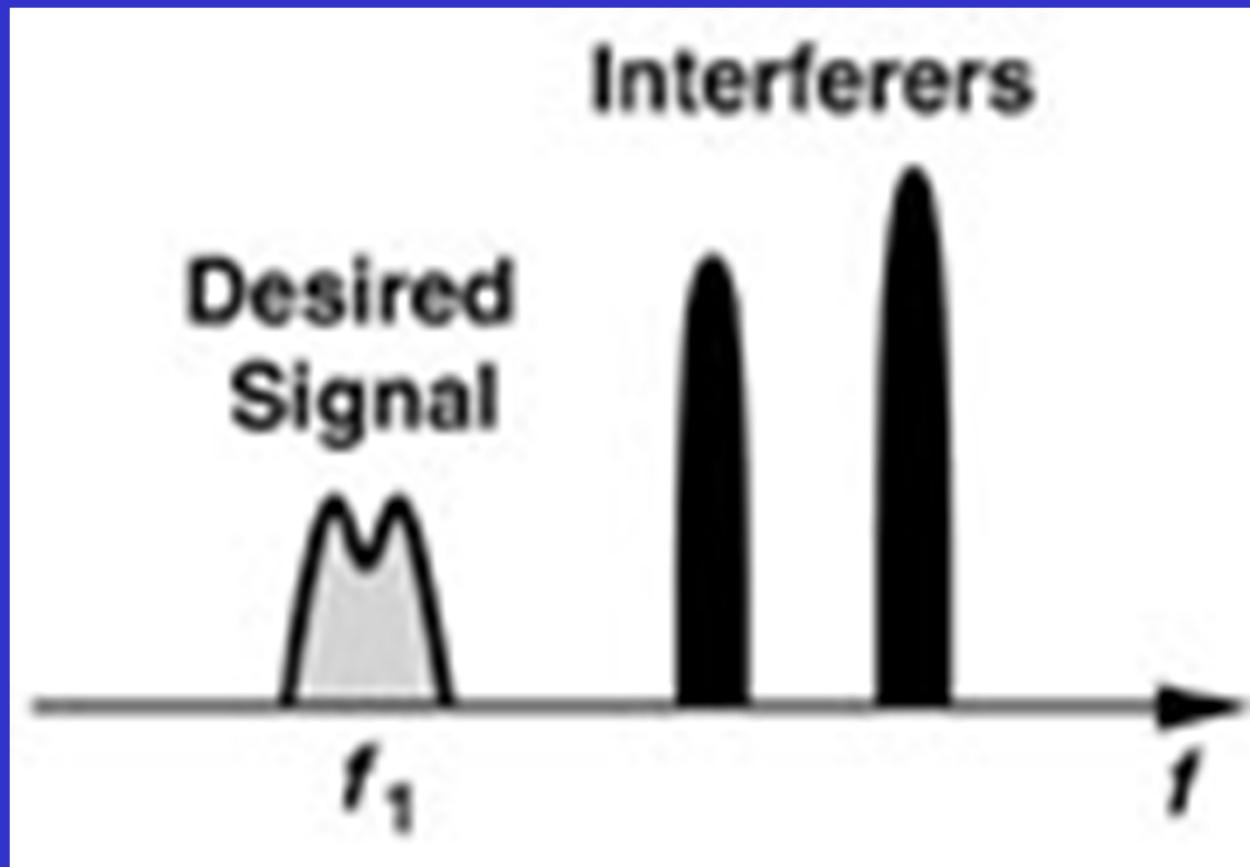
# 无线接收器

## □RF接收器的天线接收的信号

❖幅度仅几 $\mu\text{V}$ ，有很大干扰信号，中心频率1GHz以上

### 对接收电路要求

- 放大小信号，极低噪声
- 抑制干扰信号
- 高频工作
- 功耗，成本等

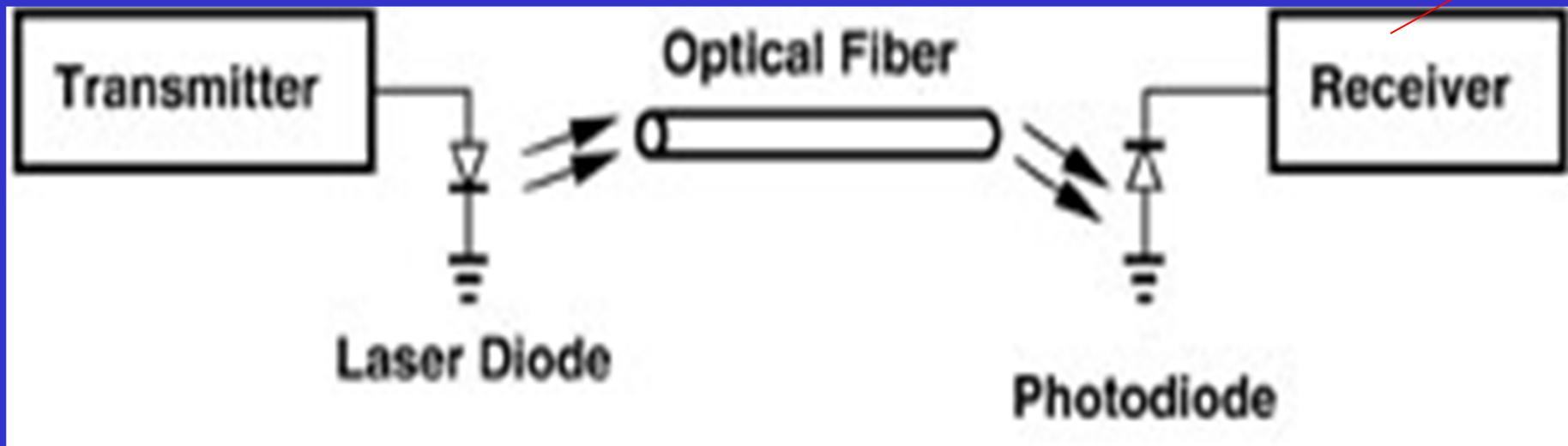


# 光接收器

## □ 光纤数据传输

- ❖ 极高带宽，很低损耗，适用于高速、远距离传输
- ❖ 电信号数据——光信号数据——电信号数据（小电流）
- ❖ 接收电路要低噪、宽带，以高速检出小信号

10~40Gb/s



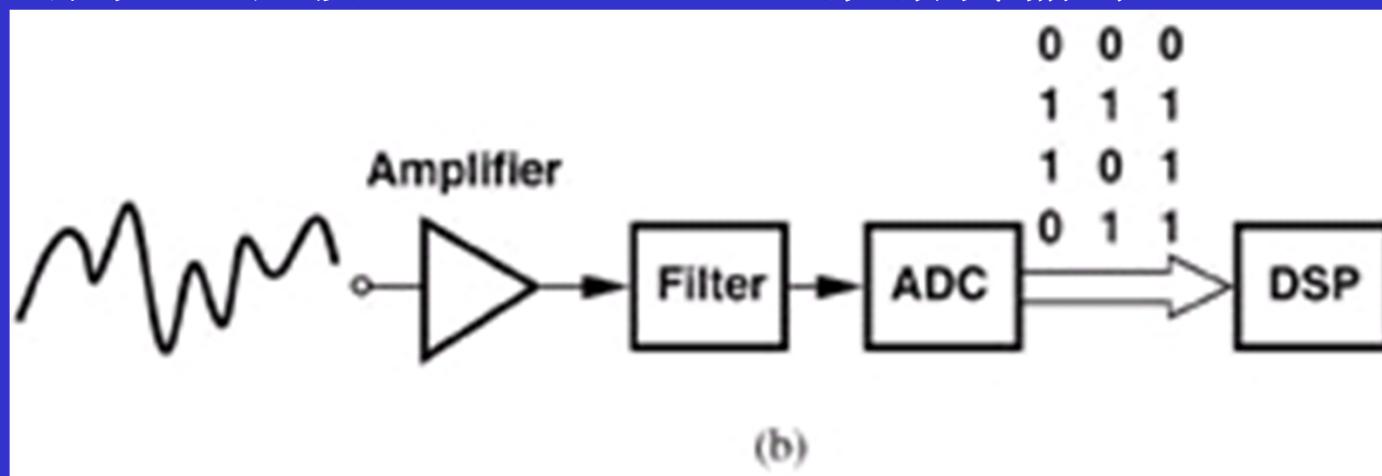
# 传感器信号的处理电路

## □ 传感器系统

- ❖ 遍布生活各角落
- ❖ 力（加速度计），热（电子温度计），声（麦克风，超声系统），光（数码相机），磁（磁头），高能粒子（安检X光机）等

## □ 探测器信号的处理电路

- ❖ 放大、滤波、ADC、DSP、数据传输等



# 传感器信号的处理电路

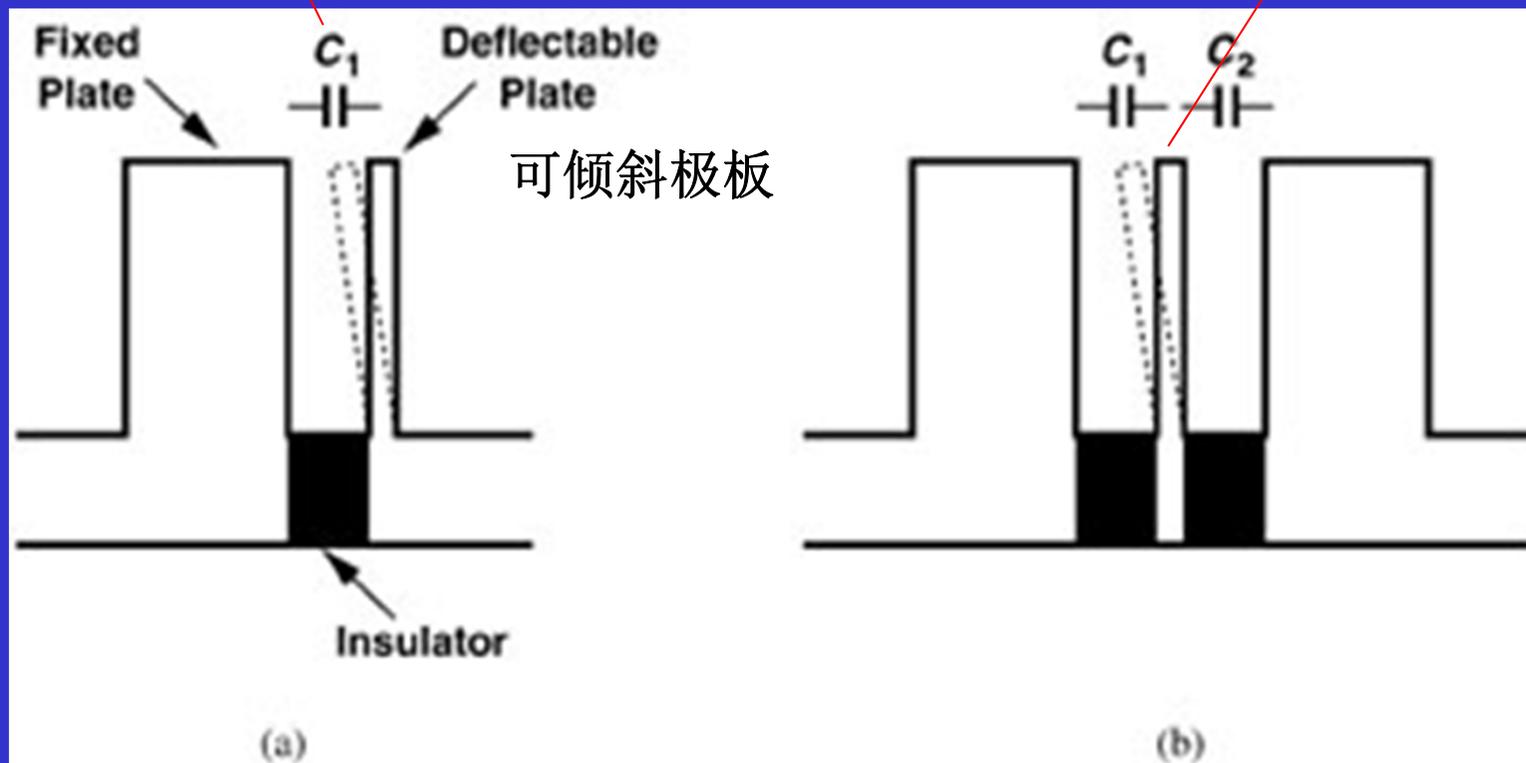
## □ 加速度计探测器信号处理电路

检测该电容绝对值的变化量

1%的改变量，高精度信号检出电路很难设计

检测两个电容的差值

降低信号检出电路的设计难度



# 微处理器和存储器

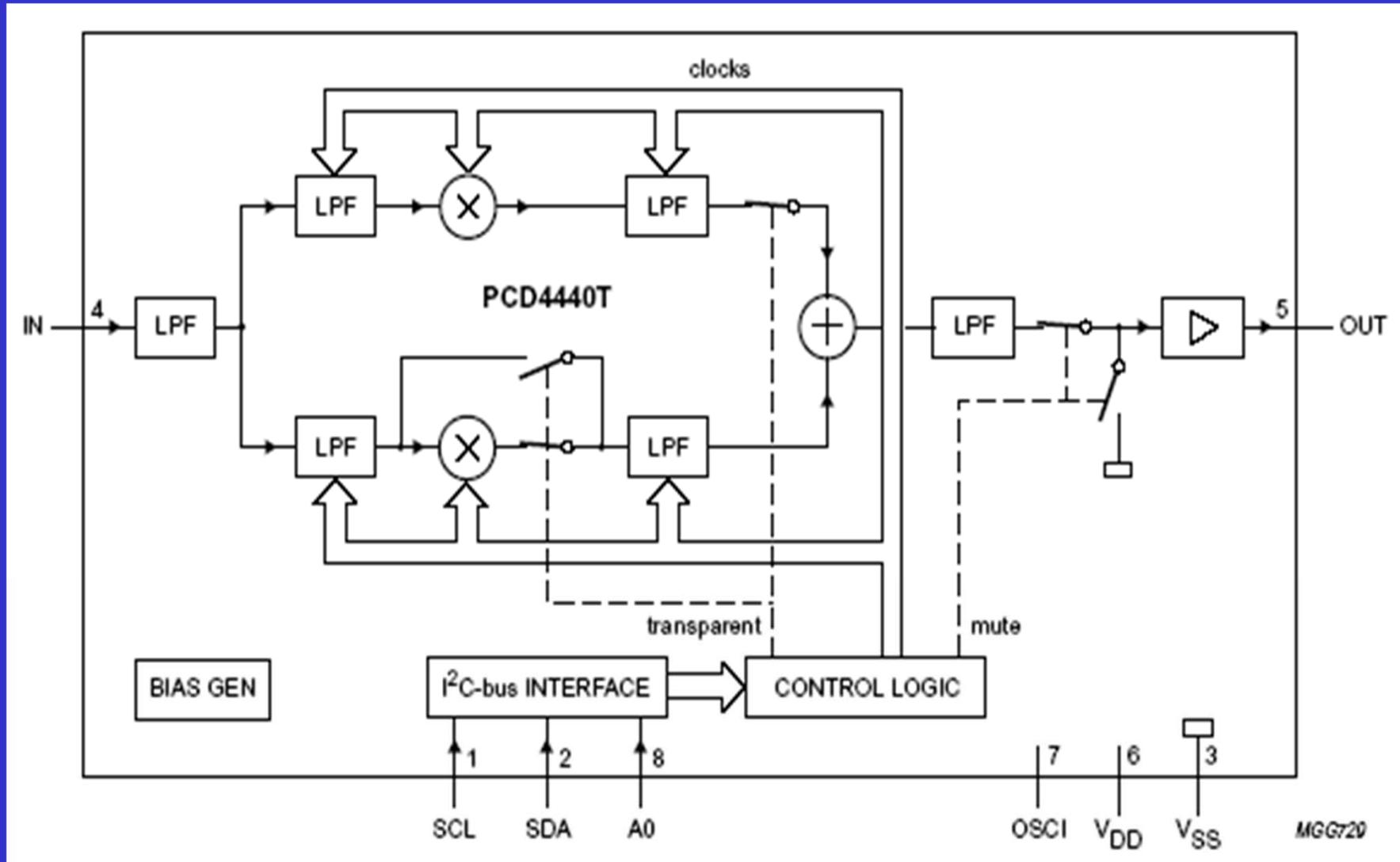
## □微处理器

- ❖典型的数字电路
- ❖高端CPU的设计离不开资深AIC设计师的参与
  - 寄生电容/电阻/电感、封装等对电路性能指标（速度等）的影响
  - 高速数据线、时钟线的时序正确性保障
- ❖必须把很多数字信号当作模拟信号来考虑、处理

## □存储器

- ❖存储单元、灵敏放大器等都必须由AIC设计师设计。高速、大规模存储器更是如此

# 语音加密



## Philip PCD4440T

北京大学微电子学系—陈中建—模拟集成电路原理与设计

# 小结

- 模拟电路是现代电路系统中必不可少的一部分
- 数字电路无法完全取代模拟电路
- 电子产业需要大量优秀的模拟电路设计师

# 本讲

- 研究模拟电路的重要性
- 模拟电路设计的难点
- 研究AIC的重要性
- 研究CMOS AIC的重要性
- 电路设计一般概念
  - ❖抽象级别
  - ❖健壮性设计
  - ❖符号

# 模拟电路设计的难点在哪里？

## □设计关注点多

- ❖包括速度、功耗、增益、精度、电源电压等；  
数字电路主要是速度、功耗

## □高精度模拟电路设计难度大

- ❖对低噪声、低串扰、抗干扰等要求很高
- ❖数字电路在这方面要求低很多

## □器件的二阶效应对电路性能影响大

- ❖体效应、沟长调制效应等

## □对工艺参数变化的敏感度比数字电路高很多

# 模拟电路设计的难点在哪里？

## □设计的自动化程度低

- ❖很多靠手工设计
- ❖数字电路设计自动化程度高

## □模拟电路的建模和仿真难度大

- ❖对设计者经验和直觉的要求高

## □针对DIC加工工艺设计AIC，会增加设计难度

- ❖开发的工艺没有针对AIC需要进行优化

## □数模混合会增大AIC的设计难度

# 本讲

- 研究模拟电路的重要性
- 模拟电路设计的难点
- 研究AIC的重要性
- 研究CMOS AIC的重要性
- 电路设计一般概念
  - ❖ 抽象级别
  - ❖ 健壮性设计
  - ❖ 符号

# 模拟电路为什么要走向IC?

## □ 模拟电路的实现方式

- ❖ 在PCB板上，用分离元件搭建电路系统
- ❖ 在一个衬底上加工出各类基本元件并实现元件间的互连，构成整个电路系统——AIC
  - 集成度在逐年增加，特征尺寸逐年下降（Moore定律），能集成的电路规模在增大

## □ AIC的优点

- ❖ 高集成度
- ❖ 高速度
- ❖ 高精度
- ❖ 低功耗
- ❖ 大批量时低成本

# AIC的实现工艺

## □基于Si材料

### ❖双极工艺

- 核心元件为NPN、PNP晶体管

### ❖MOS工艺

- 核心元件为NMOS、PMOS晶体管
- 体硅工艺、SOI工艺等

## □基于其他材料

### ❖GaAs（极高迁移率，超高速）、锗等

# 本讲

- 研究模拟电路的重要性
- 模拟电路设计的难点
- 研究AIC的重要性
- 研究CMOS AIC的重要性
- 电路设计一般概念
  - ❖ 抽象级别
  - ❖ 健壮性设计
  - ❖ 符号

# 用CMOS工艺实现AIC的优势？

## □ CMOS工艺的核心元件——MOSFET

- ❖ 金属-氧化物-半导体场效应晶体管
- ❖ 发明早（1930），在IC上实用晚（1960's初期）

## □ CMOS工艺

- ❖ 发明于60年代中期
- ❖ 特点：低功耗、高集成度、制造成本低
- ❖ 首先用于DIC，再用于AIC

# 用CMOS工艺实现AIC的优势？

## □与双极工艺比

## □优点

- ❖ 输入阻抗大，加工成本低，低功耗，易于实现数模混合电路（是实现SOC较佳选择），设计自由度大（小信号特性依赖于器件尺寸和直流偏量，双极只依赖于直流偏量）

## □缺点

- ❖ 低增益
- ❖ 速度慢（在改善，几十GHz）
- ❖ 噪声大（也在改善）

# CMOS AIC

Top-gate transconductance	$g_m = \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \sqrt{2I_D \mu C_{ox} \frac{W}{L}}$
Transconductance-to-current ratio	$\frac{g_m}{I_D} = \frac{2}{V_{GS} - V_t}$
Body-effect transconductance	$g_{mb} = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}} g_m = \chi g_m$
Channel-length modulation parameter	$\lambda = \frac{1}{V_A} = \frac{1}{L_{eff}} \frac{dX_d}{dV_{DS}}$
Output resistance	$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{L_{eff}}{I_D} \left( \frac{dX_d}{dV_{DS}} \right)^{-1}$
Effective channel length	$L_{eff} = L_{drwn} - 2L_d - X_d$
Maximum gain	$g_m r_o = \frac{1}{\lambda} \frac{2}{V_{GS} - V_t} = \frac{2V_A}{V_{GS} - V_t}$

# 双极AIC

Transconductance

$$g_m = \frac{qI_C}{kT} = \frac{I_C}{V_T}$$

Transconductance-to-current ratio

$$\frac{g_m}{I_C} = \frac{1}{V_T}$$

Input resistance

$$r_{\pi} = \frac{\beta_0}{g_m}$$

Output resistance

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{1}{\eta g_m}$$

Maximum gain

$$g_m r_o = \frac{V_A}{V_T} = \frac{1}{\eta}$$

# 本讲

- 研究模拟电路的重要性
- 模拟电路设计的难点
- 研究AIC的重要性
- 研究CMOS AIC的重要性
- 电路设计一般概念
  - ❖ 抽象级别
  - ❖ 健壮性设计
  - ❖ 符号

# 抽象级别

## □ 抽象

- ❖ 从不同高度（角度）“观察”同一个事物

## □ 为什么要抽象？

- ❖ 我们关心的对象或感兴趣的程度是变化的
- ❖ 把复杂度控制在一定范围内

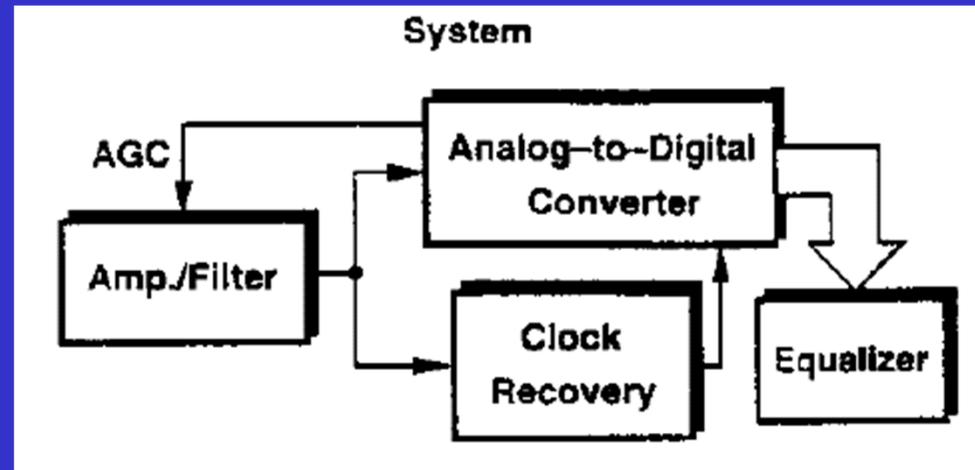
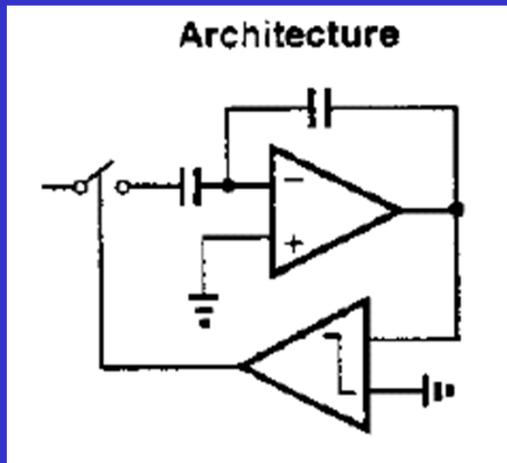
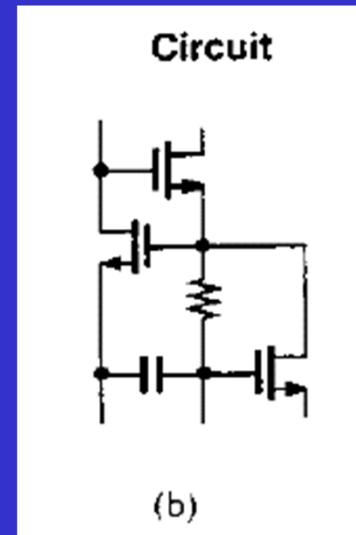
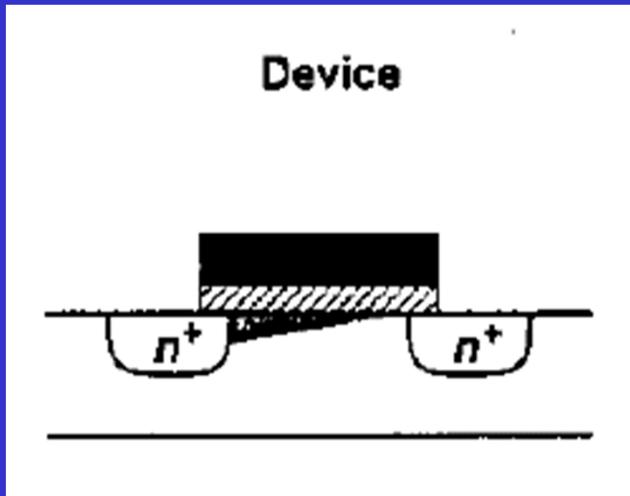
## □ 抽象级别

- ❖ 器件级
- ❖ 晶体管级（电路级）
- ❖ 结构级
- ❖ 系统级

## □ AIC设计师应能在不同抽象级间自由切换

## □ 成功的高性能IC都是分工协作、优势汇总的结果，IC设计师需要学会协作

# 抽象级别



# 健壮性AIC设计

## □设计过程

❖ 设计要求——确定工艺线——设计、仿真——  
——流片加工——测试分析

## □电路性能会随工艺、电源电压、温度变化而改变

❖ PVT

## □健壮性AIC对PVT的变化敏感度低

❖ “免疫力”强

# 符号

## □信号

- ❖ 直流偏置信号
- ❖ 交流小信号
- ❖ 总信号=直流偏置+交流小信号

## □教材上

- ❖ 一般用大写字母表示信号量
- ❖ 根据上下文判断出它属于哪一类信号

# 总结

## □ 产业有需求

- ❖ 数字电路无法完全取代模拟电路，模拟电路是现代电路系统中必不可少的一部分

## □ 设计难度大

- ❖ 模拟电路设计的难点与数字电路不同
- ❖ 关注点、噪声和干扰、器件二阶效应、设计自动化程度、建模和仿真、工艺、数模混合

## □ 走向IC实现方式是必然趋势

- ❖ AIC具有高速度、高精度、低功耗、大批量时成本等优点

## □ CMOS工艺是目前AIC的最广泛选择

- ❖ 用CMOS工艺设计、加工AIC具有加工成本低、易实现数模混合等优点，被广泛采用
- ❖ 是SOC的首选工艺

# 下一讲

绪论	重要性、一般概念
器件物理基础	MOSFET结构、IV特性、二级效应、器件模型
单级放大器	共源、共漏、共栅、共源共栅
差动放大器	定性分析、定量分析、共模响应、吉尔伯特单元
无源/有源电流镜	基本/共源共栅/有源电流镜
放大器的频率特性	米勒效应、极点与节点关系、各类单级放大器频率特性分析
噪声	统计特性、类型、电路表示、各类单级放大器噪声分析、噪声带宽
反馈	特性、四种反馈结构、负载影响、对噪声的影响
运算放大器	性能参数、一级运放、两级运放、各指标分析
稳定性和频率补偿	多极点系统、相位裕度、频率补偿
版图和封装	叉指、对称、ESD等