

# 模拟集成电路分析与设计

课程讲师：刘 鸣  
冯 鹏

中国科学院半导体研究所  
2024年9月6日

# 课程描述和授课目标

## ● 对学生的基础要求

授课主要对象是电子科学与技术专业研究生；本科阶段学习过：模拟电子技术基础、信号与系统、微电子（半导体）器件相关课程

## ● 课程构成

**CMOS**模拟集成电路设计相关的半导体器件及非理想因素、单管放大器及频率特性、运算放大器的设计方法、负反馈以及频率补偿、全差分放大器、噪声、带隙基准电路、工艺和版图基础等基础性内容。并且，课程重视实践教学，增设了六个学时的课程设计内容，通过计算机仿真实验可以帮助学生进一步掌握和运用理论知识。

## ● 课程目标

通过本课程的学习，不仅可以让微电子方向的学生了解模拟集成电路设计在现代超大规模数模芯片中的地位和作用，同时可使学生掌握模拟集成电路分析与设计的基本技能，为微电子方向的研究生从事相关工作和研究打好基础。

## 2024—2025学年秋季学期(Autumn Semester)校历

## 2024—2025 学年秋季学期(Autumn Semester)校历

年度 Year	2024																		2025	
月份 Month	八月 (Aug)	九月 (Sep.)				十月 (Oct.)					十一月 (Nov.)				十二月 (Dec.)				一月 (Jan.)	
周次 Week	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
星期一 (Mon.)	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6
星期二 (Tues.)	27	3	10	17 中 秋节	24	1 国 庆节	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7
星期三 (Wed.)	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1 元 旦节	8
星期四 (Thur.)	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9
星期五 (Fri.)	30	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10
星期六 (Sat.)	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11
星期日 (Sun.)	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12
说 明	1.秋季学期从 2024 年 8 月 26 日开始; 3.2025 年 1 月 13 日——2025 年 2 月 23 日学生放寒假六周; 注: 教职工放假由党政办统一安排。										2.2025 年 1 月 12 日课程结束; 4.2025 年 2 月 24 日春季学期正式开课。									

# 课程的安排

讲课周次	讲授内容	备注
1	模拟电路设计导论 第一章 MOS器件基础(上)	刘鸣(9.6)
2	第一章 MOS器件基础(下)	刘鸣(9.13)
3	第二章 单级放大器和频率响应(上)	刘鸣(9.20)
4	第二章 单级放大器和频率响应(下)	刘鸣(9.27)
5	第三章 差分放大器和电流镜	刘鸣(10.11)
6	第四章 噪声	刘鸣(10.13)
7	第五章 反馈	刘鸣(10.18)
8	第六章 运算放大器(上)	刘鸣(10.25)
9	第六章 运算放大器(下)	刘鸣(11.1)
10	第七章 典型运放(上)	冯鹏(11.8)
11	第七章 典型运放(下)	冯鹏(11.15)
12	第八章 稳定性和频率补偿	冯鹏(11.22)
13	第九章 开关电容电路基础	冯鹏(11.24)
14	第十章 课程设计(一)	冯鹏(11.29)
15	第十章 课程设计(二)	冯鹏(12.6)
16	第十一章 失真和失调	刘鸣(12.13)
17	第十二章 带隙基准电路	刘鸣(12.20)
18	第十三章 工艺和版图	刘鸣(12.27)
19	模拟集成电路新进展以及复习	刘鸣, 冯鹏(01.03)
20	课堂考试	刘鸣, 冯鹏(01.10)

# 教材、作业和考试

## ◆ 教材

《Design of Analog CMOS Integrated Circuits》B. Razavi  
(英文版或者中文版) 第2版

Design of Analog CMOS Integrated Circuits  
(Second Edition)

模拟 CMOS 集成电路设计  
(第2版)

## 参考书：

《模拟集成电路设计精粹》，Willy M. C. Sansen (著)，陈莹梅 (译) 清华大学出版

## ◆ 作业和课程设计

会安排10次左右的作业，根据出席和作业完成情况给出作业成绩，满分占课程总成绩的30%，课程设计占10%，作业扫描成PDF，网上提交。

## ◆ 考试

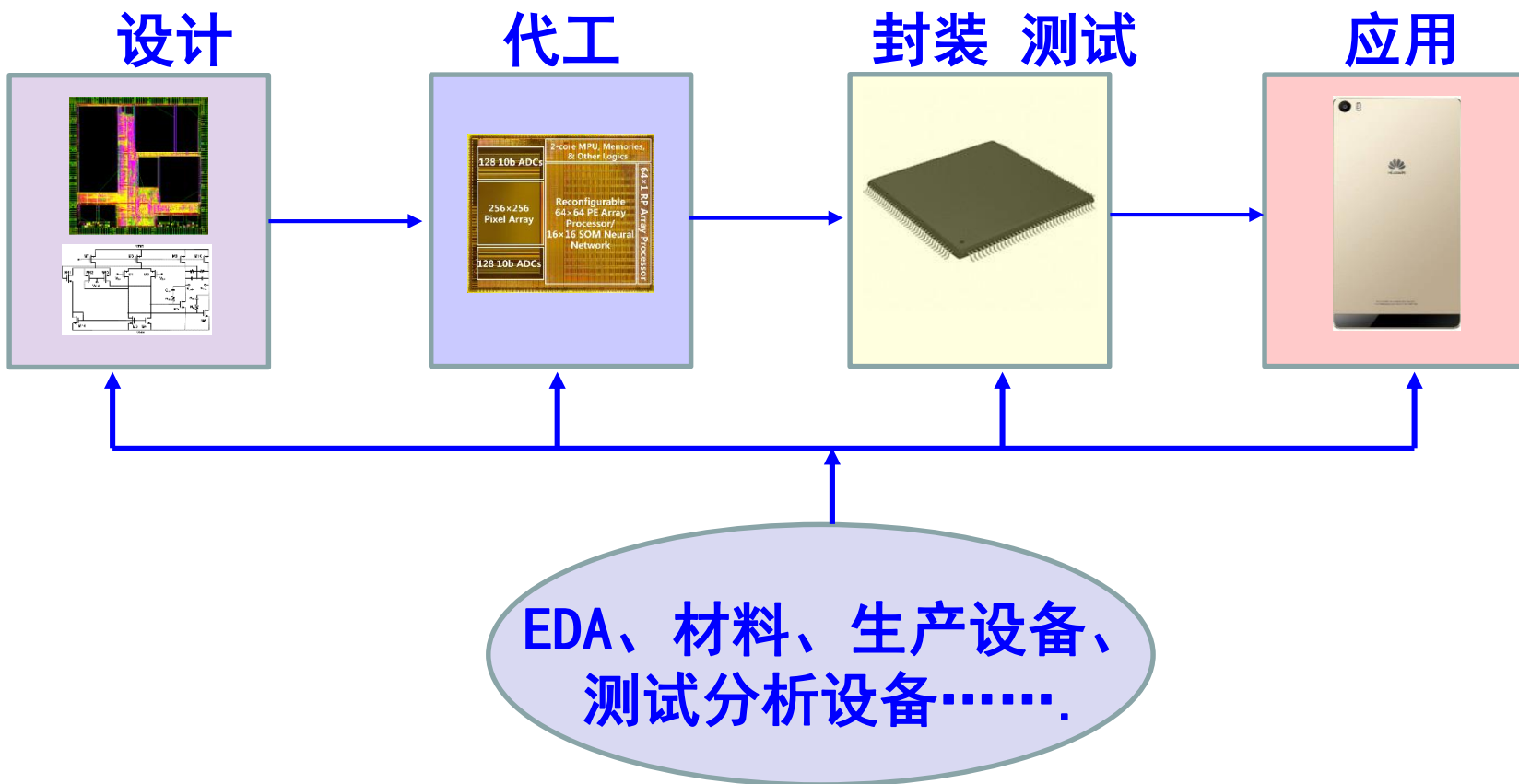
课堂闭卷方式，考试成绩占课程总成绩的60%

成绩评定：出席情况、作业及课程设计 40% + 期末考试 60%



# 集成电路产业的重要性

## 集成电路核心产业链



**企业形态：** 1) 设计企业； 2) 代工企业； 3) 封装测试企业； 4) 综合企业（IDM）

海思 兆易  
韦尔  
Qualcomm

中芯国际  
GF  
TSMC

长电  
通富  
日月光

Intel  
士兰微  
TI



# 集成电路的重要性

集成电路在一个国家、尤其是大国的经济和社会发展中具有不可替代的基础性和先导性作用，是国民经济和社会发展的战略性新兴产业，是衡量一个国家现代化程度和综合国力的重要标志，是国家的命门。

- 产业发展的基石
- 新兴经济的支柱
- 国家安全的保障



# 集成电路产业的重要性

## 信息化社会发展的基石

### 成像 信息显示

有机显示



自动驾驶



### 信息处理

CPU



存储器

固态硬盘



图形处理器

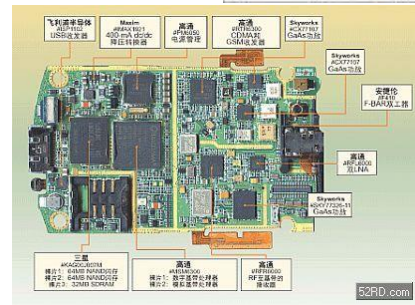


### 信息传输

交换机 路由芯片



基站/手机芯片

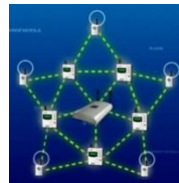


### 信息获取

传感器及其网络



传感网







# 集成电路产业的重要性

## 新兴产业的支柱

智能电网



物联网



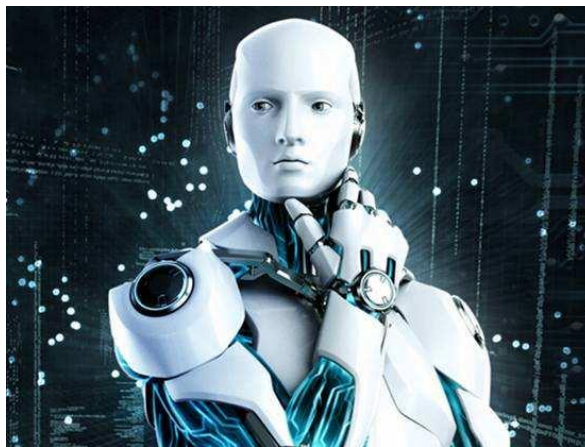
节能减排



生物科技



人工智能



工业4.0





# 集成电路产业的重要性

## 国家安全的保障





# 集成电路产业的重要性

集成电路在一个国家、尤其是大国的经济和社会发展中具有不可替代的基础性和先导性作用，是国民经济和社会发展的战略性新兴产业，是衡量一个国家现代化程度和综合国力的重要标志，是国家的命门。

- 产业发展的基石
- 新兴经济的支柱
- 国家安全的保障



# 集成电路电路功能分类

- **模拟集成电路 (Analog IC) :**

处理模拟信号的集成电路，如

放大集成电路，如运算放大器、无线收发机、电压比较器、跟随器、如振荡器、定时器等电路

- **数字集成电路 (Digital IC) :**

处理数字信号的集成电路

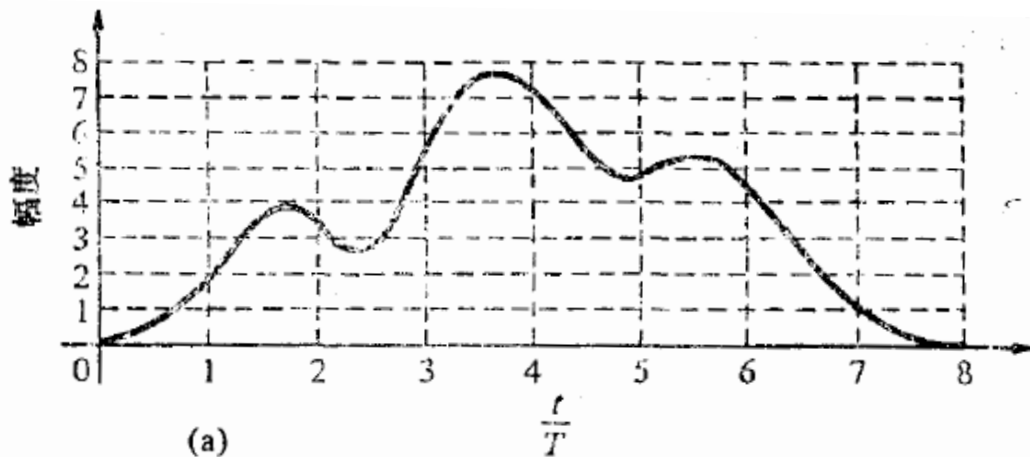
- **数模混合集成电路 (Digital - Analog Mixed IC) :**

例如数模 (D/A) 转换器和模数 (A/D) 转换器等

# 模拟信号和数字信号

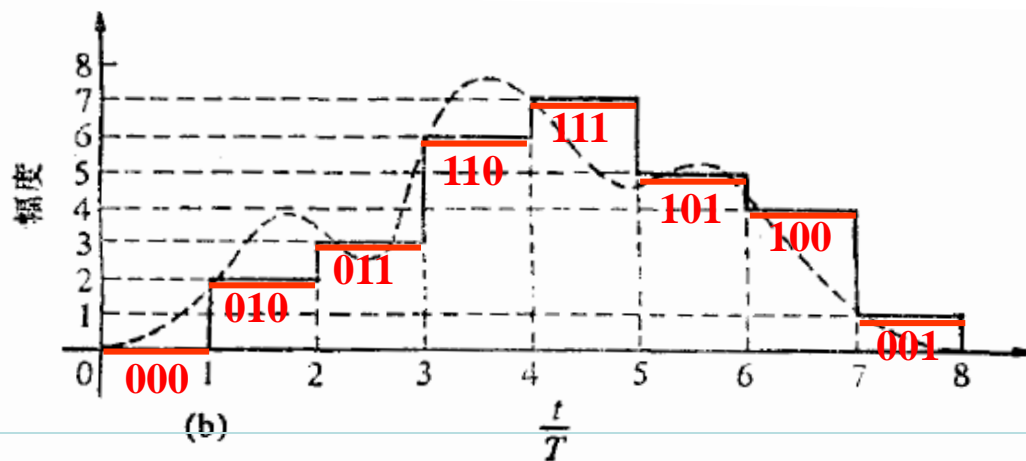
## 模拟信号：

连续时间连续幅度变化



## 数字信号：

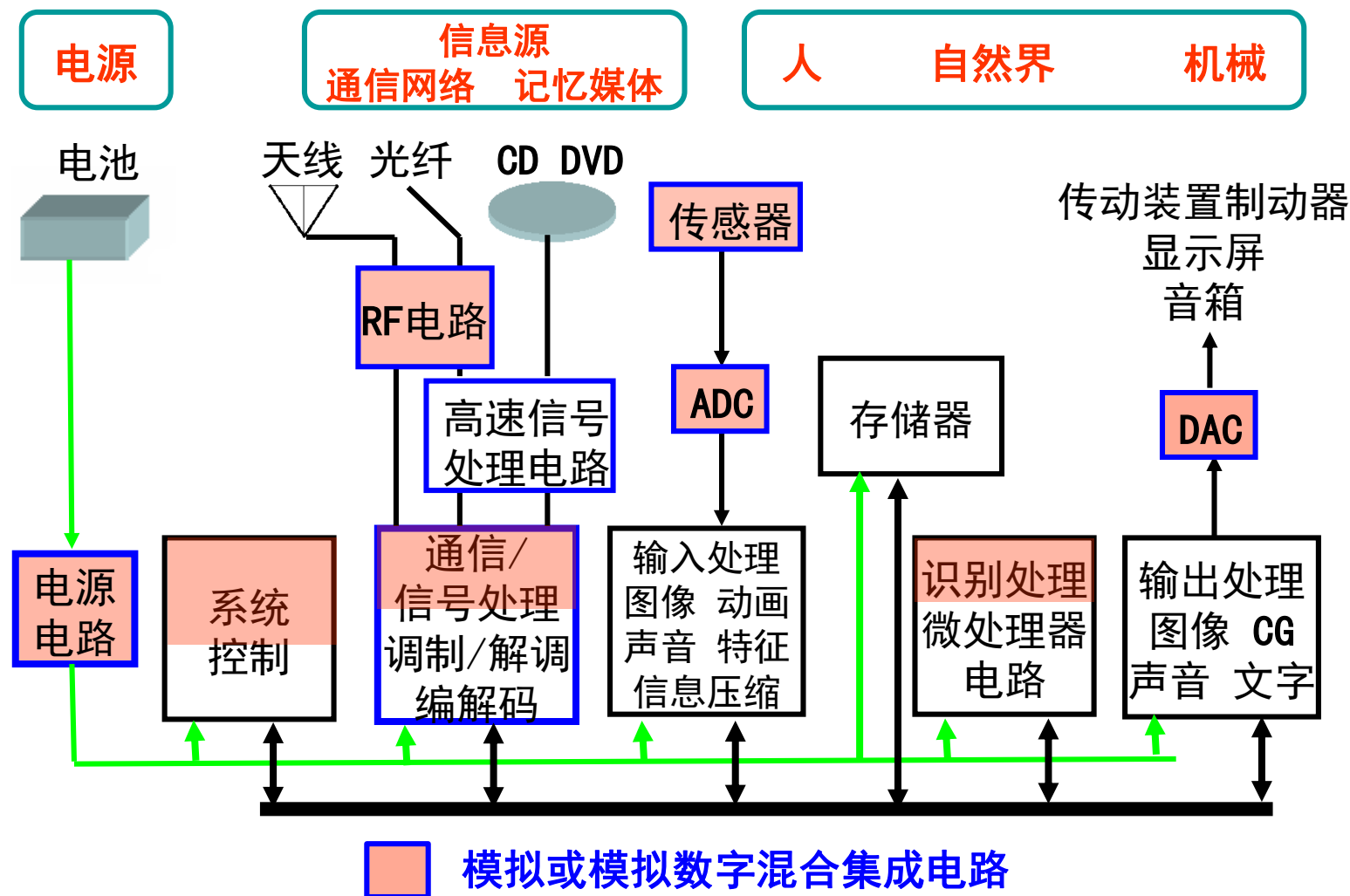
在一些离散时间、离散的幅值上定义的信号



# 模拟集成电路的重要性

- 单个芯片集成更多的功能
- 能够收集、处理和发送更多的信息和数据

- ◆ 信息处理系统都需要与模拟信号世界联系
- ◆ 模拟信号放大/处理/模数变换（功耗和面积优势）
- ◆ 先进工艺芯片的高速接口电路（模拟设计技术）

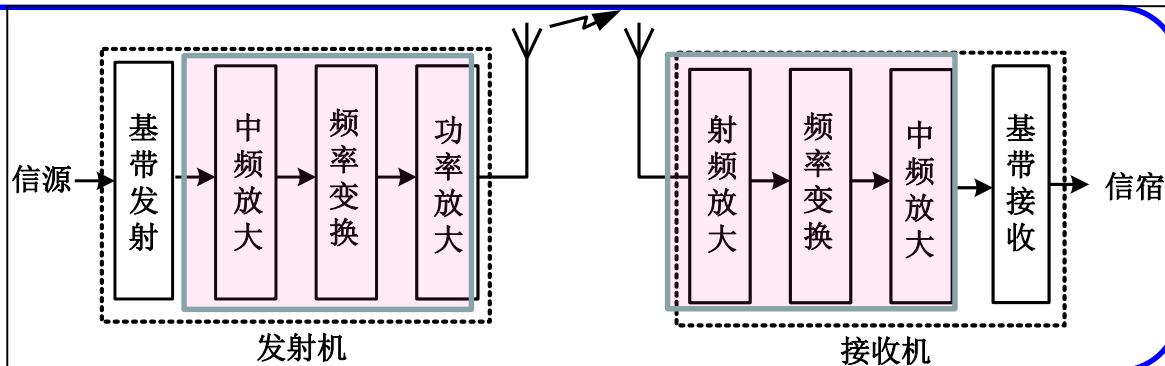


# 模拟集成电路的重要性

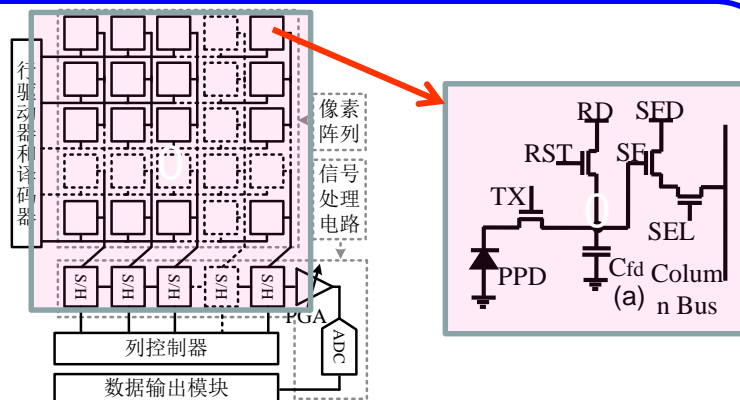
## 手机为例



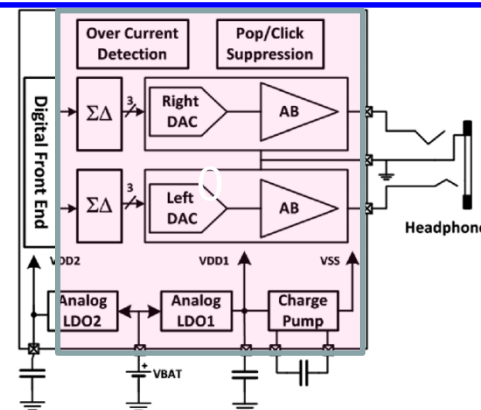
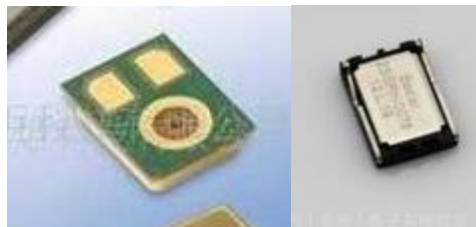
### 无线通信



### 照相系统



### 语音系统



模拟或模拟  
数字混合集  
成电路

# 模拟电路的发展历史

1946  
1948  
1950  
1952  
1954  
1956  
1958  
1960  
1962  
1964  
1966  
1968  
1970  
1972  
1974  
1976  
1978  
1980  
1982  
1984  
1986  
1988  
1990  
1992  
1994  
1996  
1998  
2000

◆ Point Contact Transistor  
■ Bipolar Junction Transistor (BJT)

▲ Invention of the I. C.  
× First Digital I. C.  
× First Analog I. C.  
■ I.C. Op Amp uA709  
+ μA741 / LM107  
+ I.C. PLL

— SPICE IC Simulation  
◆ MOS ADC  
■ MOS Op.Amp  
▲ MOS Sw-Cap. Filter

× Oversampling ADC  
× Pipeline ADC

● DAC with noise shaping

History of Analog Integrated Circuit Innovation

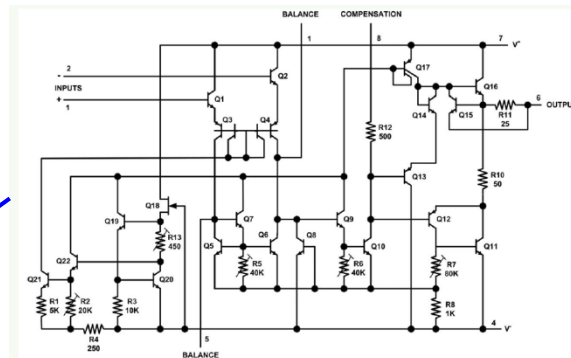


Figure 1: Schematic of LM101.

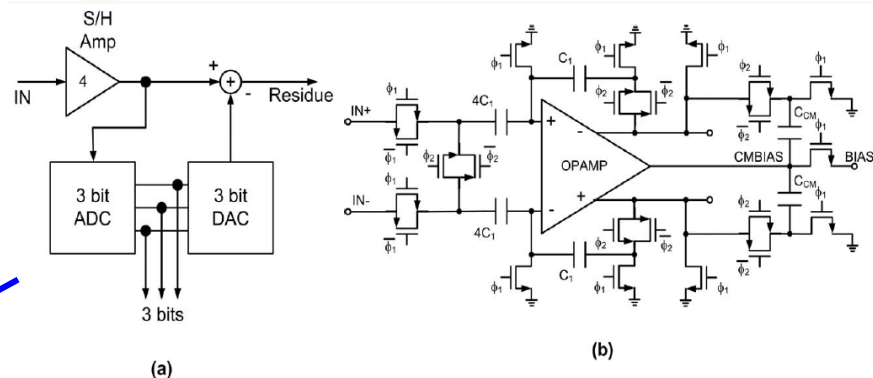


Figure 6: 5MHz 9b Pipeline ADC Circuits Diagram

双极

CMOS





# 集成电路的发明

## 晶体管的发明



1945年秋天，美国bell实验室成立了半导体研究小组，研究采用半导体材料锗和硅固体器件。肖克莱、巴丁和布拉顿利用两个靠得很近，间距为0.05毫米的触须接点来代替金箔接点，制成了“点接触型晶体管”。这一实验发现晶体管具有放大电流的作用。1947年2月6日，世界上最早的实用半导体晶体管问世了。它在首次实验时，能把音频信号放大100倍。



半导体晶体管



晶体管和真空管

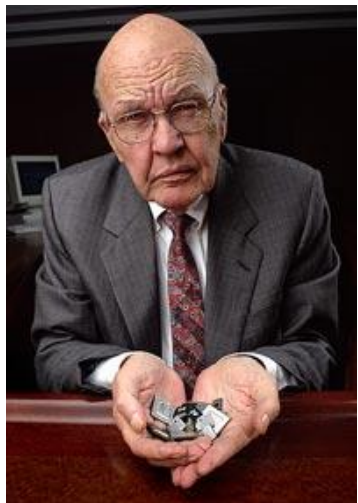


1956年 物理学诺贝尔奖

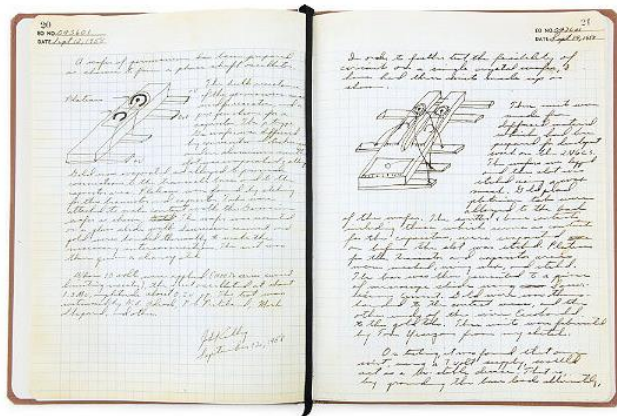


# 集成电路的发明

## 集成电路的发明



基尔比  
Kilby, Jack



笔记



罗伯特 诺伊斯  
(1990年因心脏病发作去世)  
原Intel 公司总裁

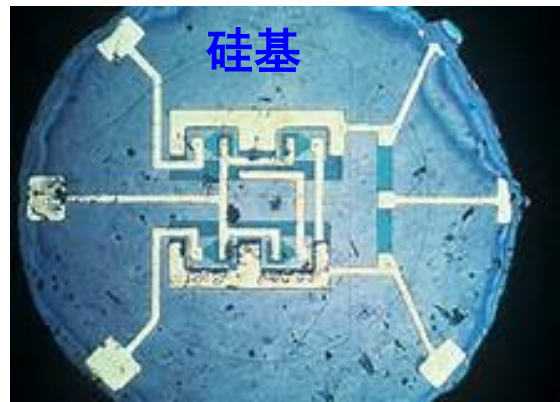


2000年 物理学诺贝尔奖



锗基

德克萨斯仪器公司 (TI) 1958



硅基

1959年 仙童半导体公司  
(Fairchild Semiconductor)

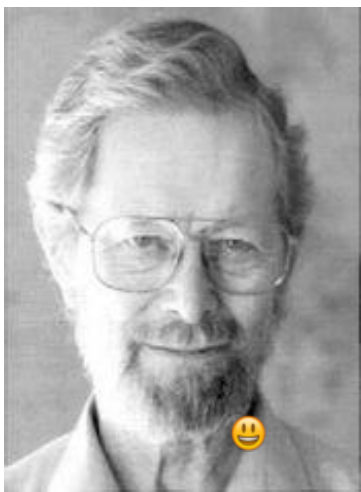


# 集成电路的发明

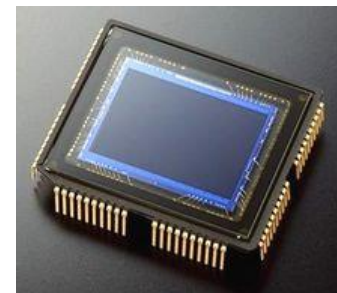
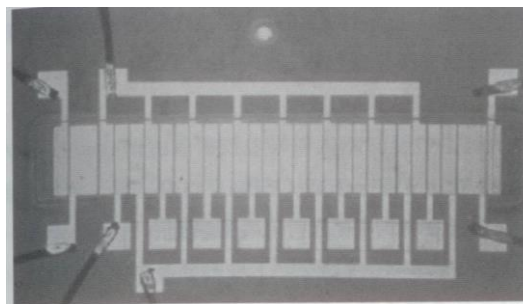
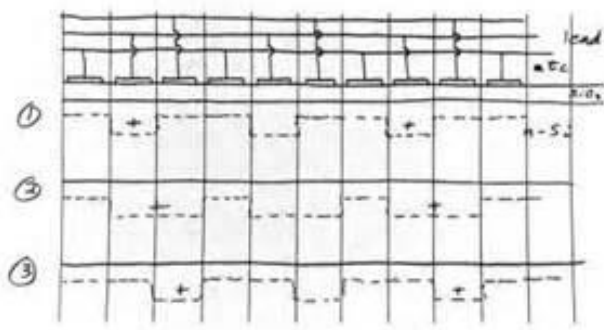
## CCD图像传感器的发明



维拉·博伊尔



乔治·史密斯



2009年 物理学诺贝尔奖

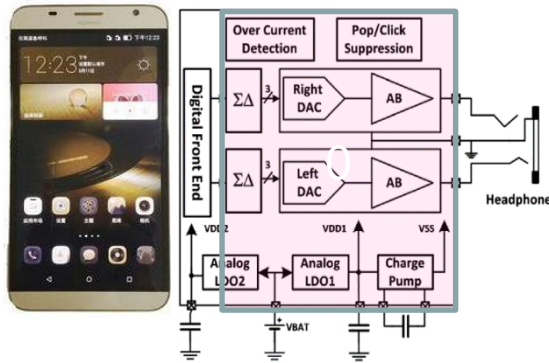
CCD是于1969年由美国贝尔实验室 (Bell Labs) 的维拉·博伊尔 (Willard S. Boyle) 和乔治·史密斯 (George E. Smith) 所发明的。

这种装置的特性就是它能沿着一片半导体的表面传递电荷，便尝试用来做为记忆装置，当时只能从暂存器用“注入”电荷的方式输入记忆。但随即发现光电效应能使此种元件表面产生电荷，而组成数位影像。



# 模拟集成电路设计的各个层次

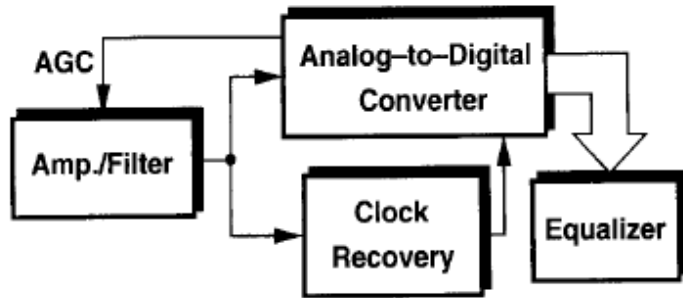
需求



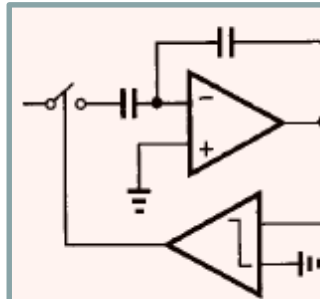
系统性能指标抽取

增益: 60dB  
噪声系数: 3dB  
输入信号: 0~50mV  
.....

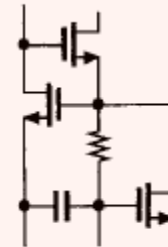
系统设计



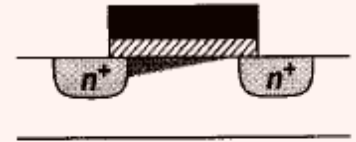
架构设计



电路设计



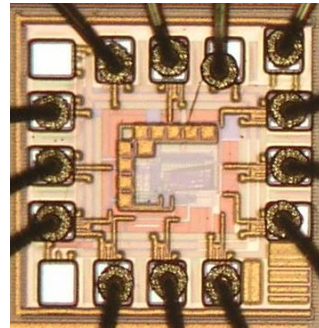
器件物理



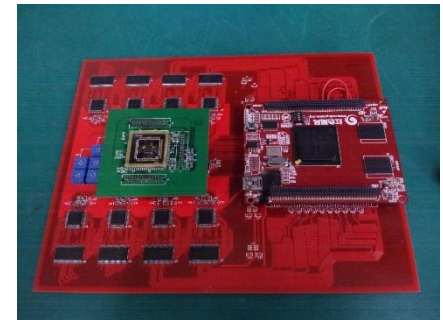
版图设计



芯片测试



芯片应用



# 如何学好模拟集成电路设计

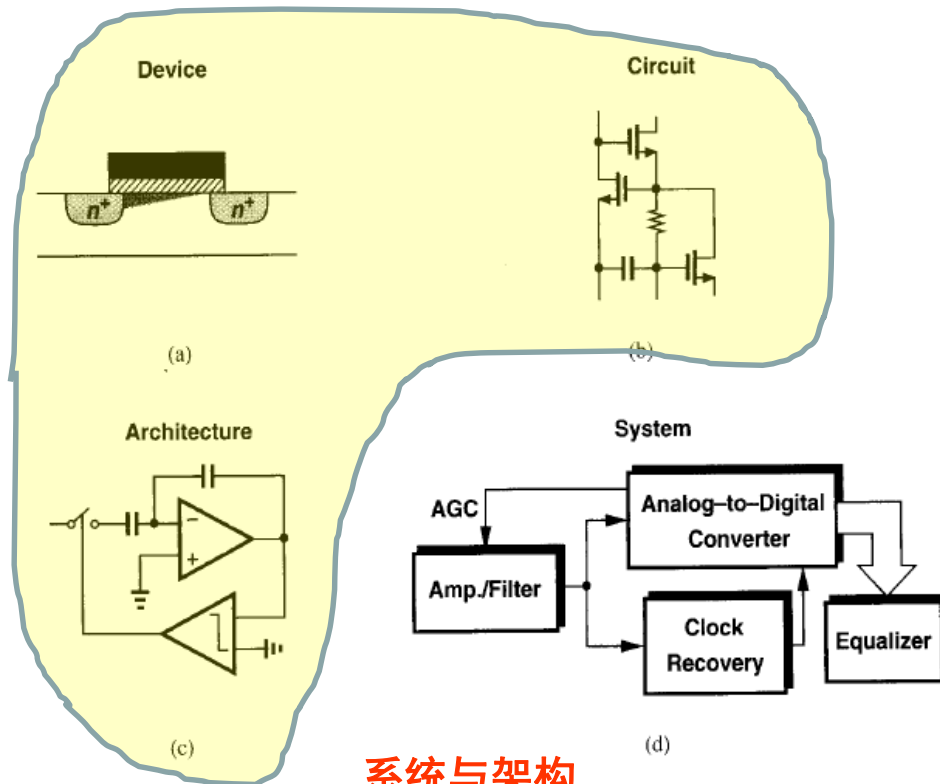
模拟电路设计是一们富有创造性的科学和技术，学会和掌握模拟集成电路设计，首先要学习模拟集成电路的原理、设计方法和技巧，学会模拟集成电路指标和规范间折中寻优的思维方式；然后通过模拟集成电路设计实践，提高设计水平。

## MOS晶体管工作原理

电极、电压:输入 输出

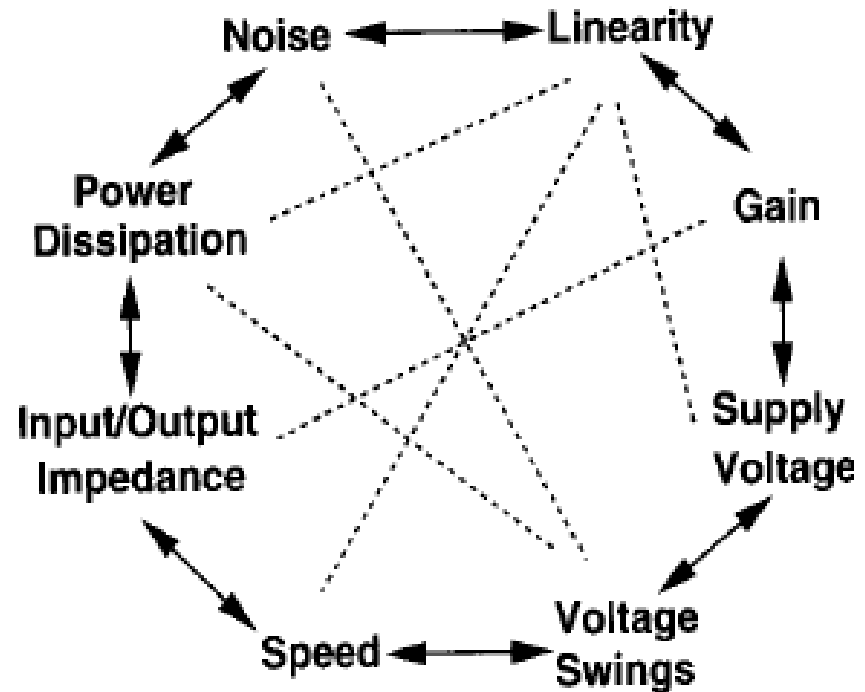
## 典型关键电路

功能、等效电路、电路分析  
仿真、输入、输出、指标



## 系统与架构

应用背景、电路功能、外部指标  
核心电路模块



模拟电路设计的八边形法则