



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

国家示范性微电子学院

School of Microelectronics

模拟集成电路设计课程

第1章 模拟电路设计绪论

程 林，韩 旭

eecheng@ustc.edu.cn



本章内容

- 课程简要信息
- 集成电路产业常识
- 模拟集成电路的重要性
- 模拟集成电路设计特点
- 模拟集成电路设计EDA工具



老师介绍

- 主讲：程林；助理：韩旭；助教：张弛/王子康/郭晓宇

程林，中国科大国家示范性微电子学院，副院长、教授/博士生导师，国家青年千人

- 研究方向：电源管理及模拟集成电路设计
- 发表论文40余篇，第一或通讯作者在集成电路设计领域顶级会议和期刊(ISSCC&JSSC)论文17篇，Google引用近800次
- 获2020年ASP-DAC最佳设计奖、2018年香港青年科学家（提名）和2015年IEEE固态电路协会博士成就奖

韩旭，中国科大国家示范性微电子学院，副研究员/硕士生导师

- 研究方向：电源管理集成电路设计
- 在IEEE等期刊和会议上发表文章10余篇

微信公众号：功率和混合信号集成电路实验室





课程简要信息

- 课程涉及领域
 - 基于CMOS工艺的模拟集成电路设计
- 先修课程
 - 电路基本理论、半导体物理、信号与系统等
- 上课时间与地点
 - 1~15周 GT-B110, 周二&周四上午第3, 4节
- 参考教材
 - 模拟CMOS集成电路设计, [美]毕查德. 拉扎维Behzad Razavi著, 陈贵灿等译
 - 其他教材: Analog Design Essentials by Willy Sansen等



课程简要信息

- 课程目标
 - 培养做模拟电路的思维
 - 学会设计简单的模拟电路
- 考核方式
 - 期末考试：80%，开卷
 - 作业和随堂小测验：20%



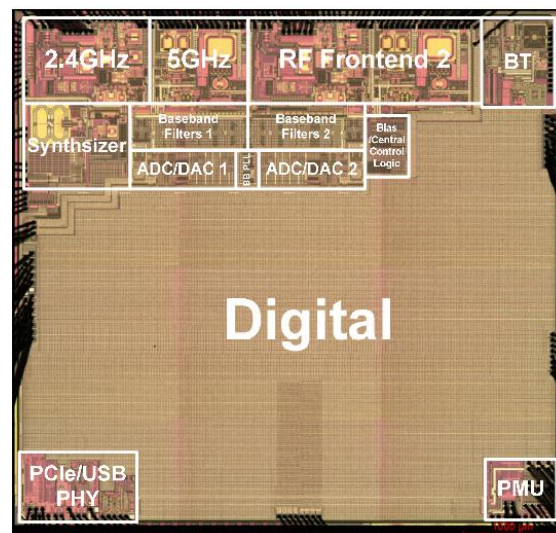
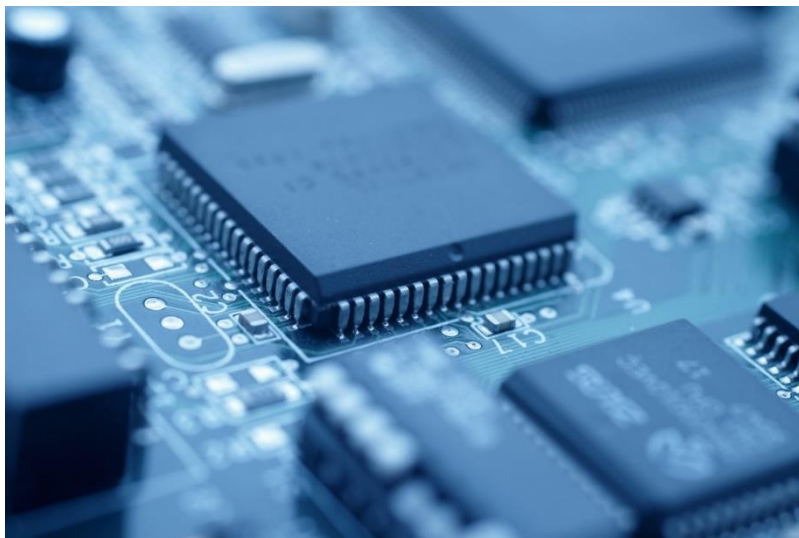
课程内容简介

- 第1章 (2课时) 绪论
- 第2章 (6课时) MOS器件物理基础
- 第3章 (10课时) 单级放大器
- 第4章 (6课时) 差动放大器
- 第5章 (6课时) 电流镜与偏置技术
- 第6章 (6课时) 放大器的频率特性
- 第7章 (6课时) 噪声
- 第8章 (6课时) 负反馈
- 第9章 (6课时) 运算放大器
- 第10章 (6课时) 稳定性与补偿



什么是集成电路（芯片）

集成电路（Integrated Circuit）：一种微型电子器件或部件，采用一定的工艺，把一个电路中所需的**晶体管**、**电阻**、**电容**和**电感**等元件及**布线**互连一起，制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，然后封装在一个管壳内，成为具有所需电路功能的微型结构。

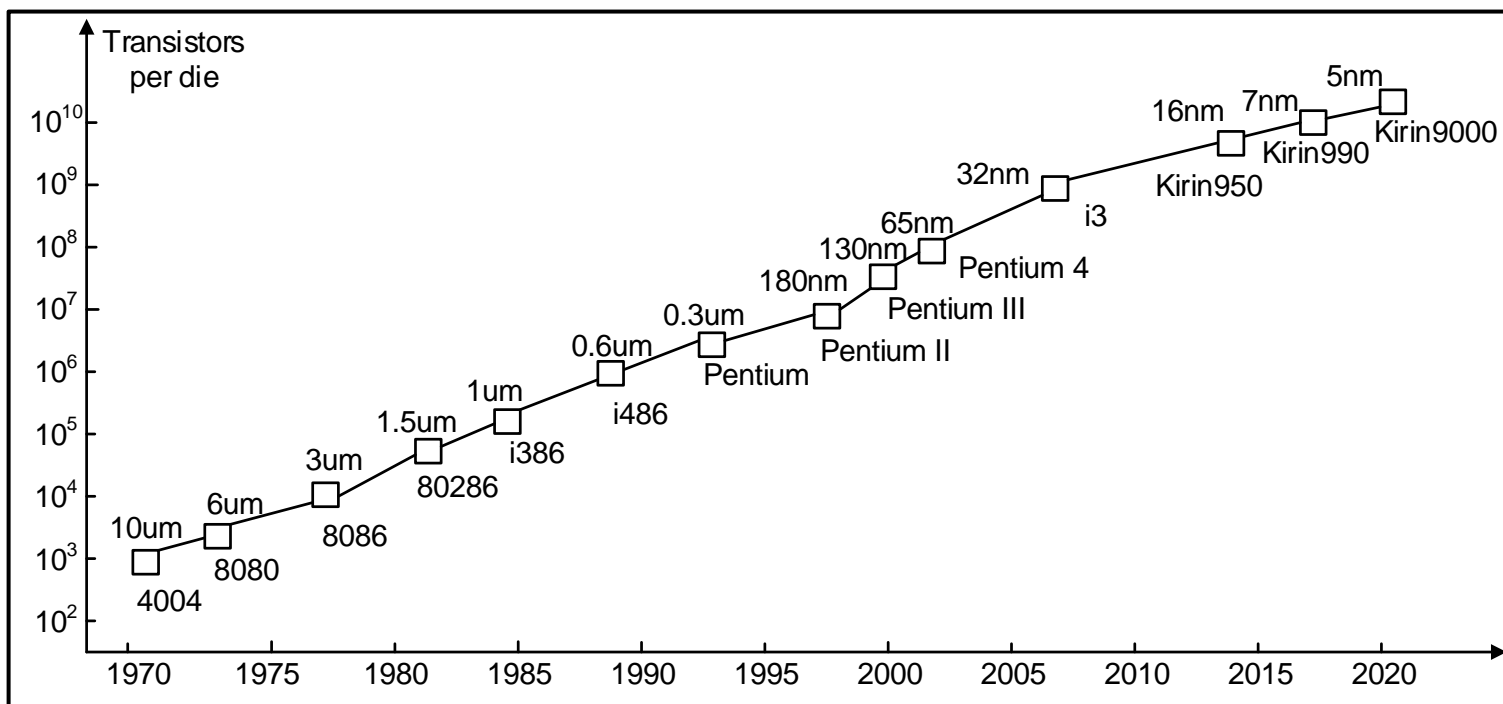




摩尔定律 (Moore's Law)

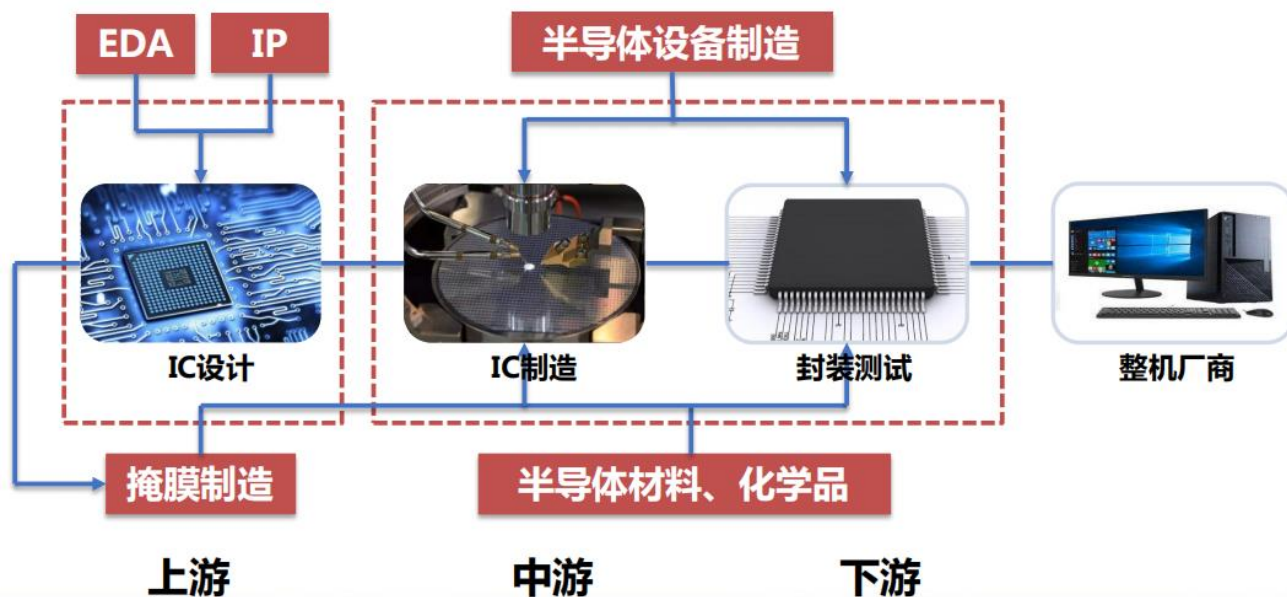
硅基半导体技术发展的Moore定律：

- IC芯片集成度每18个月提高1倍，器件特征尺寸缩小1.4倍
- 相同价格能买到芯片的性能每18个月翻两倍。





集成电路产业链概况



IC设计： IC设计公司

IC制造： Foundry（代工厂）指专门负责生产、制造芯片的厂家
台积电TSMC，中芯国际SMIC，晶合集成

封装： 把集成电路裸片（Die）
装配为芯片最终产品的过程

测试： 通过检测评估集成电路功能和性能的过程。
长电科技，通富微电，华天科技



全球集成电路市场

- 集成电路设计

- 全球集成电路的销售额在4000亿美金，2018年集成电路的市场占有率第一名是三星（Samsung）年销售额约为750亿美元
- 全球分离器件的市场规模约为750亿美元

- 集成电路制造与封测

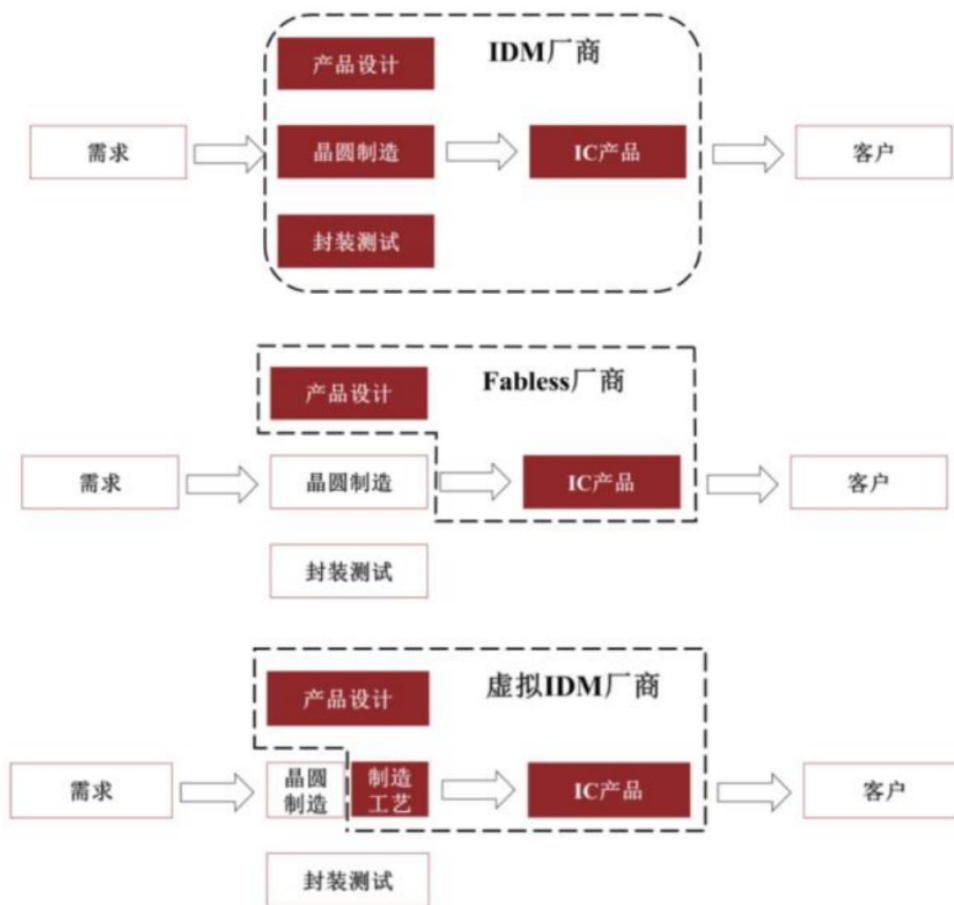
- 全球集成电路制造的市场规模约为600亿美元，2018年集成电路的代工企业市场占有率第一名是台积电（TSMC）年销售额约为340亿美元
- 全球集成电路封测的市场规模约为280亿美元，2018年半导体封测企业市场占有率第一名是日月光（ASE）年销售额约为53亿美元

- 集成电路材料与设备

- 全球集成电路设备的市场规模约为500亿美元，2018年半导体设备市场占有率第一名是应用材料（Applied Materials）年销售额约为110亿美元
- 全球集成电路材料的市场规模约为470亿美元



IDM、Fabless、虚拟IDM模式



Fabless(Design house)

不拥有芯片制造工厂的、只专注于IC设计的一种公司运作模式，设计的创新是重点。

高通，海思，联发科

IDM(Integrated Design and Manufacturer)

指的是从设计到生产制造都包揽的公司模式

英特尔，三星，TI

虚拟IDM、Fablite轻晶圆模式

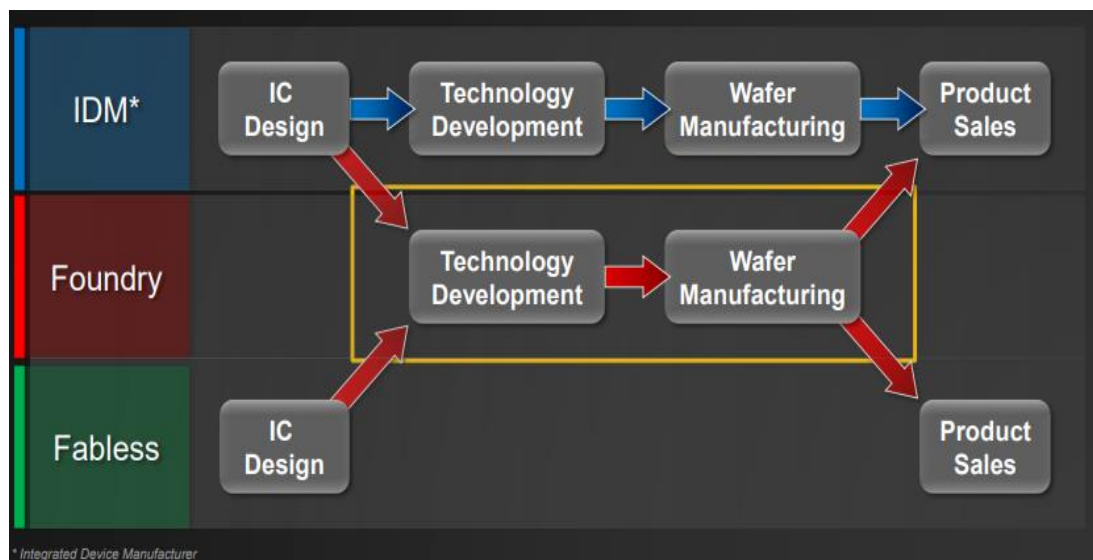
由于半导体芯片工艺更新换代快和设备维护成本大，众多公司放弃Foundry的运营，转向虚拟IDM模式，利用第三方的生产线，但核心制造工艺还是由自己开发。

- NXP、MPS
- 模拟芯片由于其性能与工艺关系密切，头部设计公司偏好此模式



Fabless模式驱动集成电路产业快速发展

在20世纪80年代到90年代初期，随着集成电路设计的复杂性增加和制造成本的上升，一些公司开始专注于芯片设计而将制造环节外包给其他公司。这种模式使得许多小型和中型企业能够在没有巨额资本投入建立制造工厂的情况下进入半导体行业，促进了行业的创新和发展



张仲谋1987年创立的台积电（TSMC），推动了Fabless（无工厂）半导体公司模式的快速发展



中国大陆地区芯片进出口情况

2015-2019年中国集成电路进出口金额统计情况



资料来源：前瞻产业研究院整理

中国芯依然对外依赖度比较高，自给率比较低，自己生产的更多的还是低端芯片。

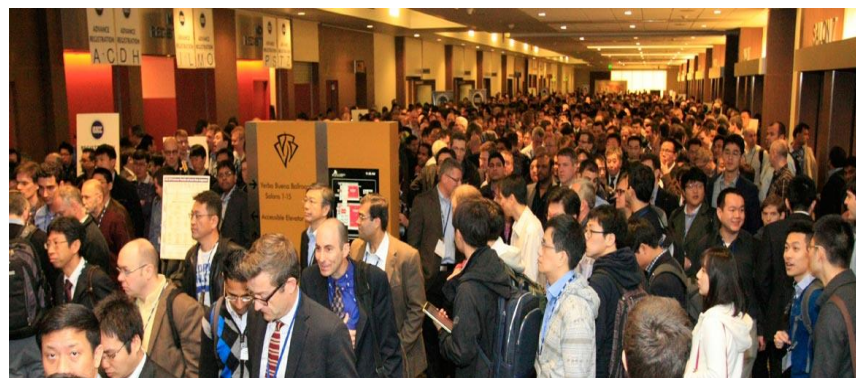


集成电路设计顶级学术会议和期刊

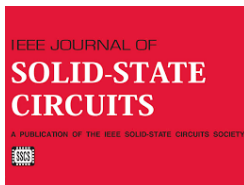
ISSCC学术会议



- 国际固态电路年会，是学术界和产业界公认的集成电路设计领域最高级别会议，被誉为**芯片“奥林匹克”**；
- ISSCC的投稿成果必须流片测试验证，且在**概念上有创新型、性能上有先进性**。每年有相当一部分成果来自产业界，特别是国外芯片龙头公司。
- VLSI, CICC, ESSCIRC, A-SSCC



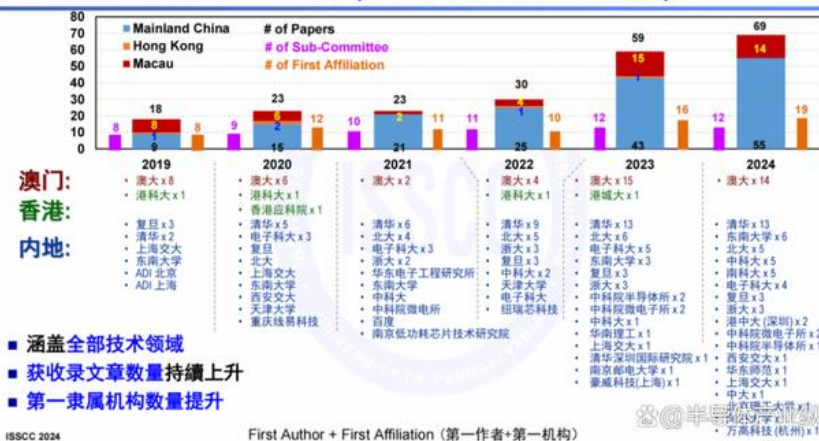
JSSC学术期刊



- IEEE固态电路期刊，集成电路设计领域**顶级期刊**
- IEEE TCAS-I, TCAS-II, TVLSI...



ISSCC 趋势 (中国内地+香港+澳门)

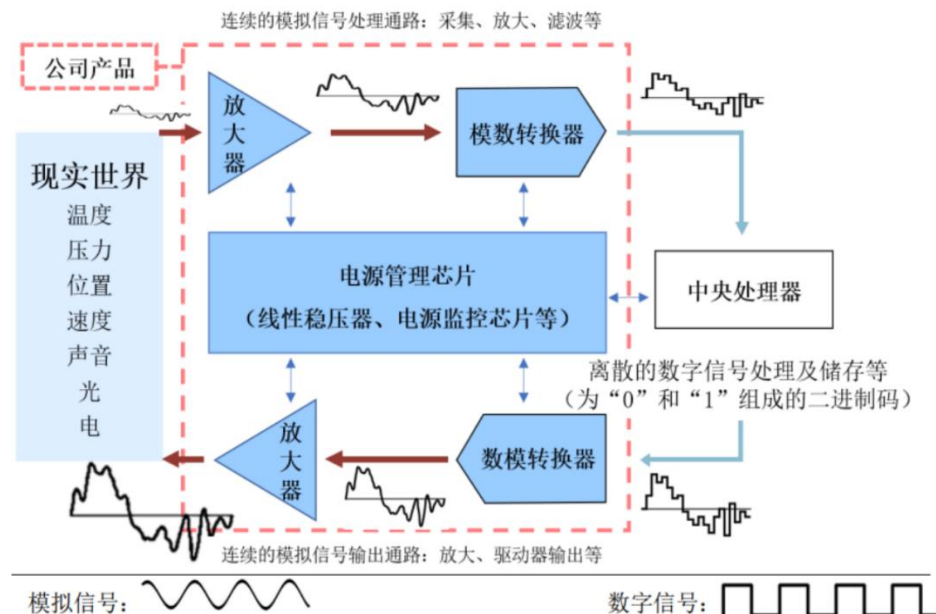




数字芯片与模拟芯片

现实世界的信号是模拟的，需要模拟电路将其数字化。

模拟芯片—处理连续性的声、光、电、速度和温度等自然模拟信号的集成电路



用数字信号进行算术运算和逻辑运算。
逻辑门是数字逻辑电路的基本单元。
存储器是用来存储二进制数据

模拟信号经由传感器转换为电信号（电压信号、电流信号），再通过模拟集成电路进行放大、滤波等处理后，可以直接输出至执行器，也可以由模数转换器转换为数字信号“1”“0”进入数字系统进行运算。

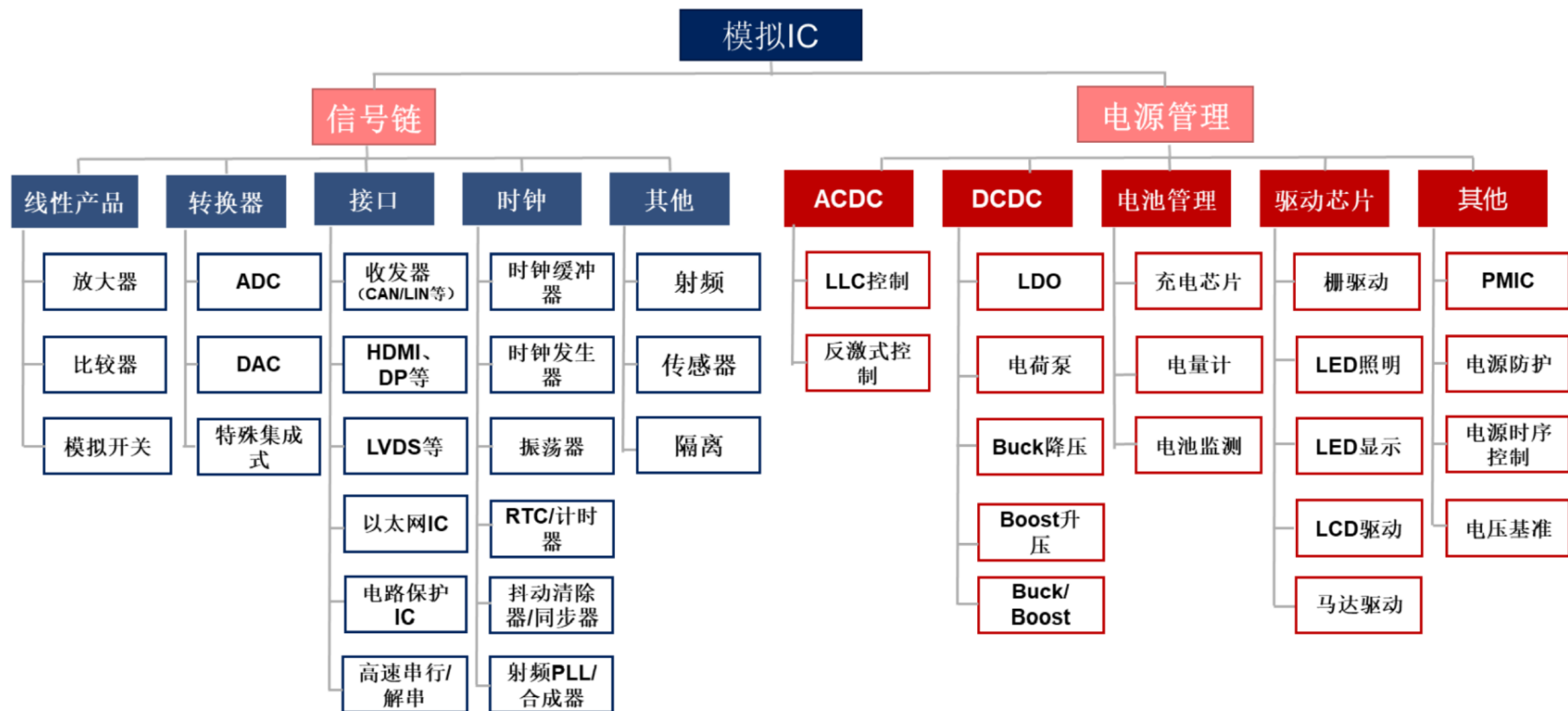


模拟IC vs 数字IC

	模拟IC	数字IC
信号传输形式	连续的模拟信号	二进制数字信号
产品应用	放大器、接口、转换器、电源管理等	微处理器、存储器等
失真程度	更易失真	0或1，不易失真
技术特点	基于器件模型设计，如BSIM模型	代码为主，不需要熟悉器件和工艺，易上手
人才培养	设计门槛高，学习曲线5-10年	EDA辅助设计，学习曲线2-3年
设计难点	非理想效应较多，需要考虑各种情况和变化，保证鲁棒性，需要扎实的多学科基础和丰富经验	芯片规模大，工具运行时间长，工艺要求复杂，需要多团队共同协作
版图设计	需要手工设计	EDA软件自动生成
工艺制程	大量使用0.18um/0.13um，目前逐渐向90nm等升级，射频电路需要较先进工艺	依赖先进工艺，目前已达3nm
产品特点	少量多样	样少量多
产品生命周期	一般5年以上	1-2年



模拟芯片：信号链与电源管理



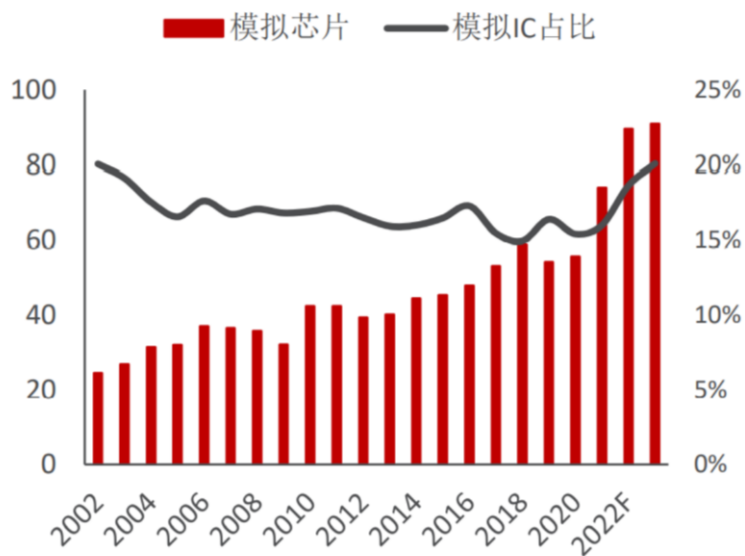
资料来源：德州仪器，民生证券研究院整理



模拟IC市场规模

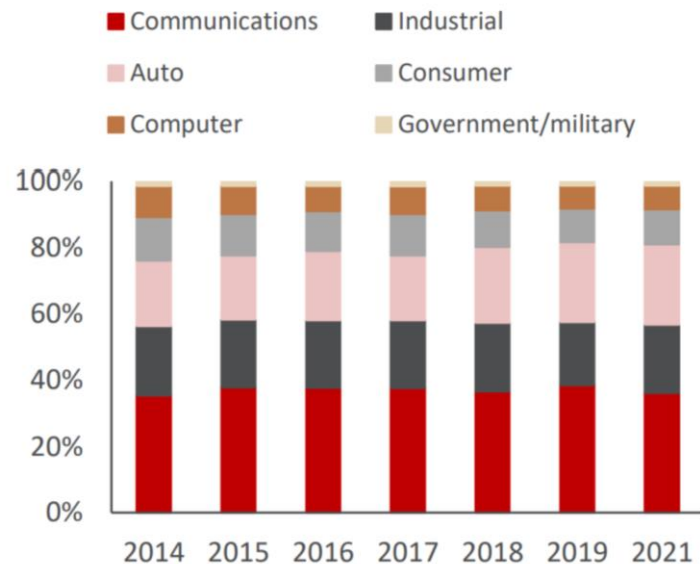
- 模拟IC 2021年全球市场规模高达741.05亿美元，在集成电路市场占比16.01%。
- 下游市场分散，广泛应用于通信、工业、消费、汽车等应用场景，因而市场增速较为平稳。
- 增长波动小，受行业周期影响明显少于数字IC。

图5：全球模拟 IC 市场规模及占 IC 比重(十亿美元, %)



资料来源：WSTS，民生证券研究院

图6：2014-2021 年模拟 IC 下游市场占比



资料来源：statista，民生证券研究院



模拟IC市场格局

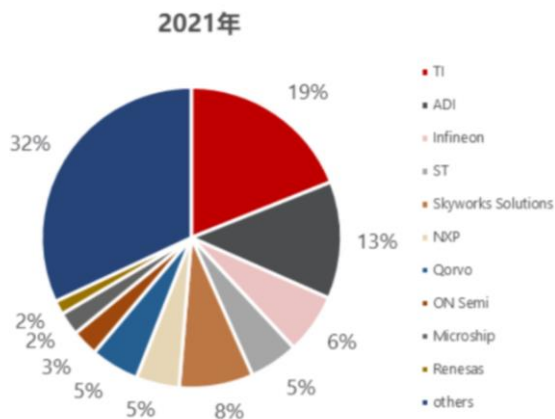
- 模拟IC市场格局一超多强，海外龙头掌握绝对话语权。

2021年，TI（德州仪器）市占率为19%，亚德诺、英飞凌、意法半导体等业内知名厂商位居此后。前5家公司市占率为51%，且掌握高端模拟芯片供应的绝对话语权。

- 国内模拟 IC 市场规模大，进口替代空间广阔。

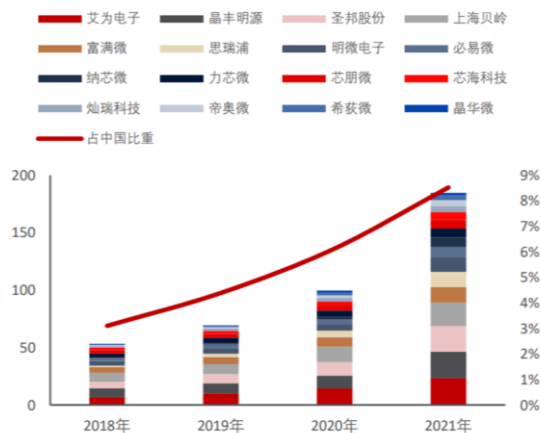
根据IC Insights数据，2021年中国模拟IC市场约2166亿人民币。同年，国内16家模拟IC上市公司营收总和为184.55亿元，占中国模拟芯片市场只达8.52%。

图: 2021 年模拟前十大公司排名变动



资料来源: IC insights, 民生证券研究院

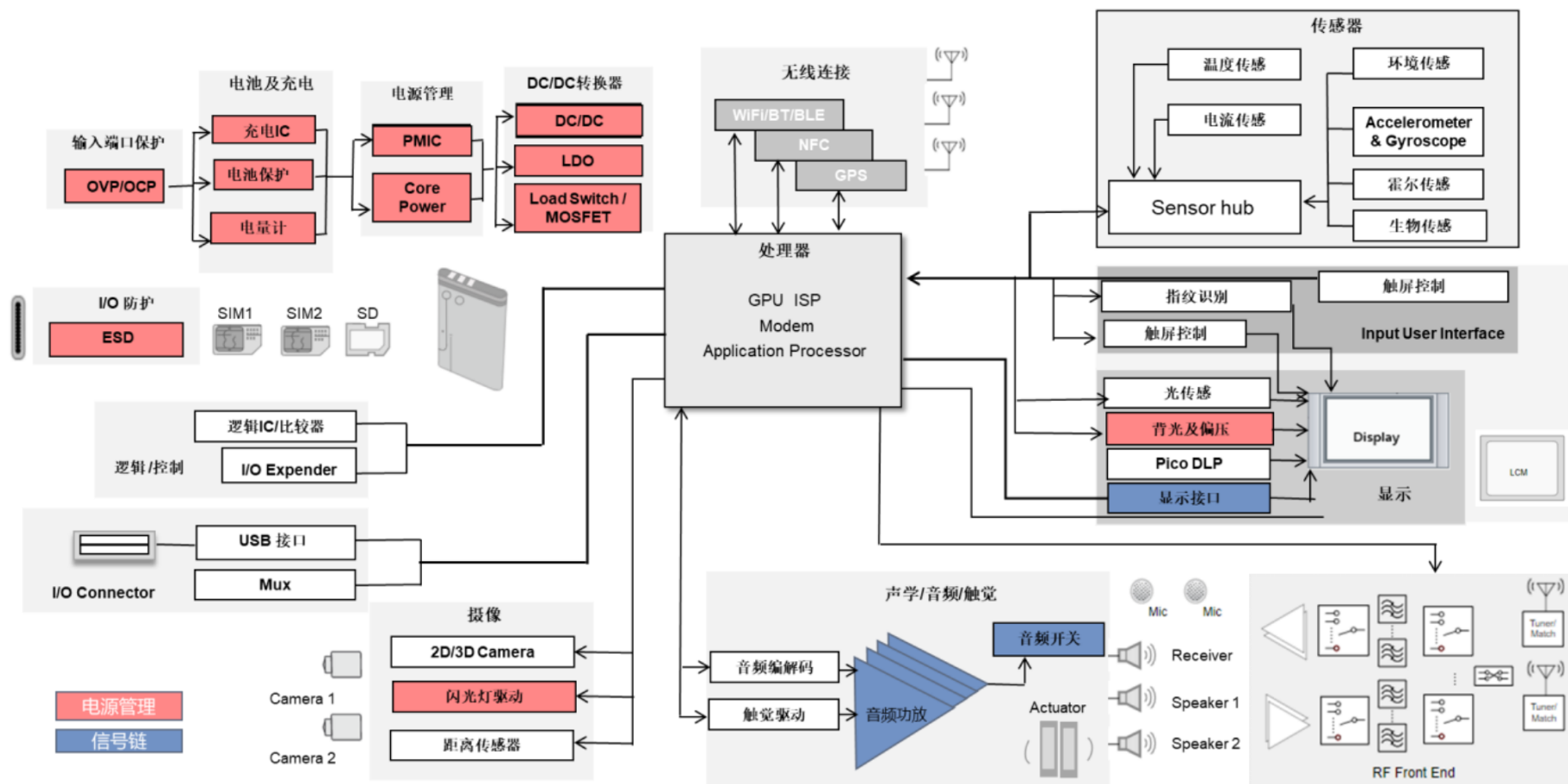
图10: 国内模拟 IC 上市公司营收总计及占比(亿元, %)



资料来源: Wind, IC Insights, WSTS, 民生证券研究院



模拟IC应用举例——手机



资料来源：德州仪器官网，民生证券研究院



模拟IC应用举例——汽车

- 目前汽车电动化、智能化趋势，模拟芯片需求也大幅提升
- 电动智能汽车中有超过100个终端电子设备需用到模拟芯片
- 自中美贸易纠纷开始，国外芯片无法提供稳定供应，车企开始加速切换国产芯片。

高级驾驶辅助系统 (ADAS) :

ADAS域控制器、雷达、激光雷达、摄像头、超声波

混合动力、电动动力传动系统:

电池管理系统BMS、DC-DC转换器、逆变器和电机控制、OBC、车辆控制单元、动力总成传感器、发动机管理、变速器、动力转向

车身电子及照明:

车身电机、车身控制模块、加热和制冷、汽车照明、电动座椅、汽车门禁和安全系统、转向柱、辅助电源、后视镜

信息娱乐与仪表盘:

汽车仪表组、汽车显示屏、远程信息处理、数字驾驶室控制器、音响主机、智能设备集成、高端音响

电源管理: LDO、DCDC、PMIC、电荷泵、负载开关、马达驱动、栅驱动、LED驱动、LCD和OLED驱动、I2C、热插拔控制器、监控器和复位IC、电池监测器和平衡器、串/并联电压基准

信号链: 接口 (CAN、LIN、Serdes、LVDS、RS-485 和 RS-422 收发器、RS-232、以太网 PHY、HDMI、DP 和 MIPI IC、PCIe、SAS 和 SATA IC)、隔离、ADC、DAC、放大器、比较器、音频功放、模拟开关)、传感器FAE、时钟 (发生器、缓冲器等)

资料来源: 德州仪器官网, 民生证券研究院



模拟IC应用举例——汽车

- 按英飞凌数据统计，48V轻混汽车中半导体用量572美金，强混及纯电动车中半导体用量达834美金，以模拟芯片占比30%计算，平均单车模拟芯片价值量可达200-250美金。
- 随着汽车电动化和智能化进一步发展，模拟芯片的应用增长将进一步提升。

	种类	ASP (元)	备注	海外厂商
三电动力系统	BMS	200	400V 用 8 颗 12 通道，12 通道 4 美金/颗，共 30 美金；800v 用 12 颗 16 通道，16 通道 6 美金/颗，共 70 美金。目前以 400V 车为主，假设 200 元/车	TI、ADI
	隔离	250	传统燃油车约 50 元，新能源车三电中隔离驱动用 50 颗以上，单颗 4 元，其余为隔离采样、数字隔离器	TI、ADI
	运放	25	用在 OBC、DCDC 上，在充电时检测电压，用量 10 颗以上，一颗 0.3-0.4 美金	TI、ADI
ADAS	LVDS	400	单车 15-20 个，高像素单颗 5 美金，低像素 2 美金	TI、美信
车身电子及照明	LED 驱动	150	单车至少 300 颗以上 LED，需约 20 美金以上	TI
信息娱乐	音频功放	40	独立功放方案：一般汽车至少 4 个喇叭，1-2 颗音频功放驱动，单颗 3-4 美金；假设平均价值量 40 元	TI、MPS
其他	栅驱动（电机驱动）等	200	用量零散，为 MCU 与功率器件的中间电路	英飞凌、TI、安森美、
	LDO、DCDC、CAN 接口等其余 IC	300	用量零散，但各个部分均会用到	TI、英飞凌、ADI、安森美、ST 等

资料来源：IC Insights，民生证券研究院



国内模拟芯片现状

国内产品仍以中低端为主，正往高端发力

- 国内模拟芯片仍主要以1元及以下的为主，仍集中于中低端市场。
- 国内公司开始瞄准AC/DC转换器，汽车LED驱动，大电流DCDC、隔离电源等高壁垒产品。

图21：国内上市及拟 IPO 公司主流产品类型及平均售价梳理

技术： 易 难						
信号链	线性产品	放大器 (0.5元+)	比较器 (0.5元+)	模拟开关 (1元+)		
	接口	RS232	RS485	I2C	LVDS	CAN/LIN
	转换器	高精度/高速 DAC	高精度/高速 ADC	高精度高速 DAC	高精度高速 ADC	AFE (BMS, 20元+)
	传感	磁开关 (0.3元+)	气流传感 0.8元+	磁电流 (5元+)	磁角度 (5元+)	磁轮数
	其他	端口保护与信号 切换0.8元+	电量计 (1元+)	音频功放 (1元+)	隔离芯片 (2元+)	时钟芯片 (15元+)
电源管理	LED驱动	照明驱动 (0.2元+)	显示驱动 (0.2元+)	背光/闪光 (0.3元+)	呼吸灯 (1元+)	汽车LED灯 (2-20元)
	AC/DC	普通充 (0.4元+)	低功率快充 (1元+)	家电 (1元+)	高功率快充 (3元+)	
	DC/DC	低压/小电流 (0.3元+)	充电IC (0.5元+)	无线充IC (1元+)	电荷泵 (3元+)	服务器电源 (10元+)
	其他	LDO (0.1元+)	OVP (0.2元+)	AMOLED电源 (3元+)		
价格： 低 高						

资料来源：圣邦股份、思瑞浦、纳芯微等招股书，民生证券研究院

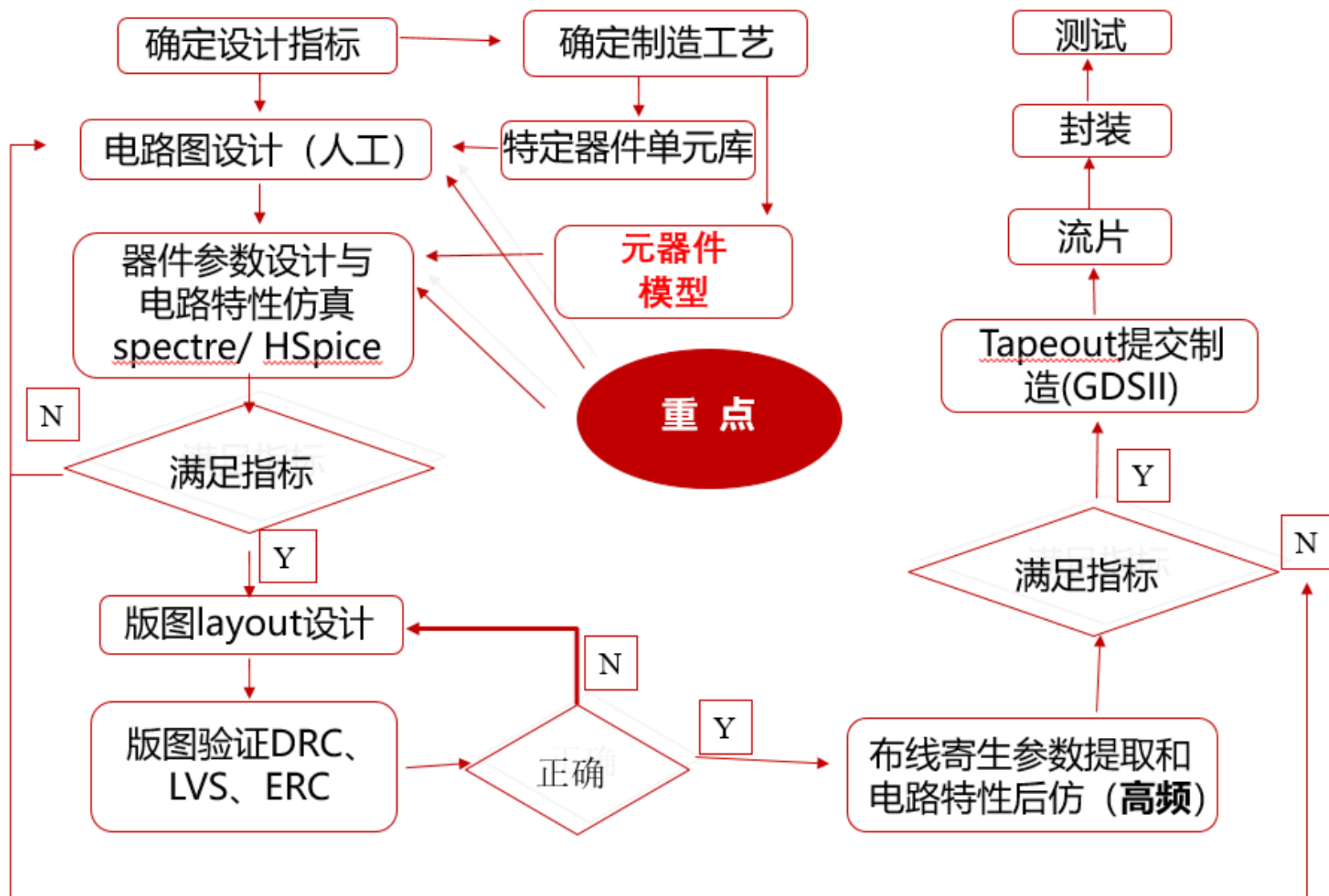


模拟电路设计的挑战和特点

- 存在的挑战
 - 晶体管的缺陷
 - 电源电压的降低
 - 速度、功耗、增益、精度等相互制约
 - 建模的精确性、工艺局限性
 - PVT变化
- 设计特点：电路设计以人工为主
 - 根据设计指标，人工设计或选择电路结构（因结构与性能指标相关，可能需进行多次）
 - 人工方法大致确定**工作点**（尤其是电压、电流）
 - 借助EDA仿真工具和工艺器件模型，设计优化器件**尺寸参数**；



模拟IC设计流程





IC设计基础：器件模型

- 器件模型参数的完备性和准确性，PDK(process design kits) 工艺设计文件包。
- 器件模型参数是**测量的统计结果！**
- 器件模型有频率、温度、电流密度等参数范围限制，
- 器件模型和参数与**具体工艺线相关**
- 现代工艺（制程）器件有大量非理想效应，手工只能计算模拟电路的工作点等重要参数，误差较大。
- 学习模拟CMOS IC设计的主要目的：
 - 选择电路结构（分析工作原理），
 - 提高参数优化效率（有针对性改进电路参数），
 - 把握正确仿真方法和查验仿真结果正确性！
 - 后端（版图）设计基础知识。



模拟IC设计的主流EDA工具

- 前端电路设计（工具Cadence Virtuoso）
- 仿真器：
 - Synopsys HSPICE(simulation program with integrated circuits emphasis, 起源于1970年代美国加州伯克利)
 - Cadence Spectre, 具有图形化和RF（射频）特性仿真。
- **必须设置合理的输入信号、清楚了解所需要的结果，才能进行有意义仿真！**
- 后端设计：版图设计（工具Virtuoso）与验证
- 物理验证（Cadence Assura, Mentor Calibre）
 - DRC：设计规则检查，LVS：版图与原理图比较检查。
- 后仿post simulation：版图寄生参数提取后仿真(工具Mentor Calibre或Cadence QRC)。



后端设计（版图设计+物理验证）术语

- 设计检查
 - 设计规则检查, Design Rules Check, DRC
 - 电气规则检查, Electrical Rules Check, ERC
 - 版图线路图对比, Layout Versus Schematic, LVS
 - 天线效应检查, Antenna Effect
 - 金属密度检查, Metal Density , 加dummy和开槽
 - 大功率芯片要进行热分析
- 物理效应分析（酌情）
 - 寄生参数提取, Parasitic Extraction, PEX
 - 信号完整性, Signal Integrity, SI
 - 串扰, Crosstalk
 - IR电压降, IR Drop
 - 电迁移, Electromigration, EM



如何学好这门课？

- 认真听课，多思考
- 多交流讨论
- 多看书、论文
- 多实践



毕查德·拉扎维

好的模拟电路设计需要直觉、严密和创新，作为模拟电路设计者

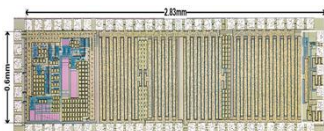
- 以**工程师的眼光**快速而直觉地理解一个大的电路
- 以**数学家的智慧**量化电路中难以捉摸而又重要的效应
- 以**艺术家的灵感**发明新的电路结构

模拟电路设计，不仅是一门技术，更是一门艺术。

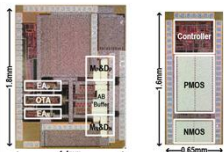


PMIC实验室芯片设计成果

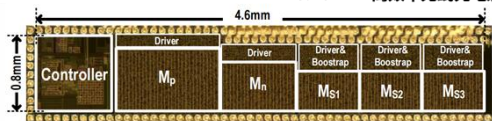
消费类电子设备



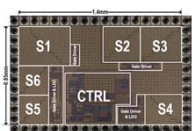
ISSCC 2023
高效率、高电流密度降压-升压直流-直流转换器芯片



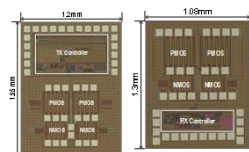
ISSCC 2024
超高带宽包络跟踪电源调制器



ISSCC 2024
低交调大功率单电感多输出降压转换器

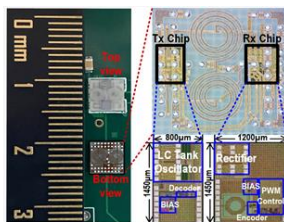


ISSCC 2024
高效率、高功率密度单电感双向输出直流-直流转换器芯片

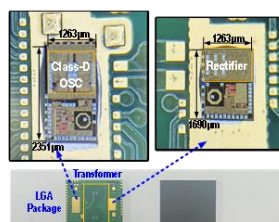


ISSCC 2024
6.78MHz高效率无线充电系统

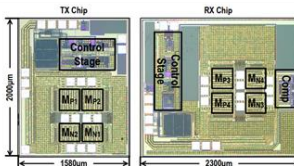
工业级



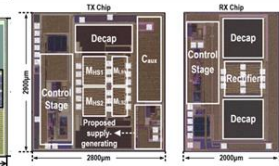
ISSCC 2021
基于扇外型晶级封装的
隔离电源芯片



ISSCC 2022
高效率低EMI隔离电源芯片

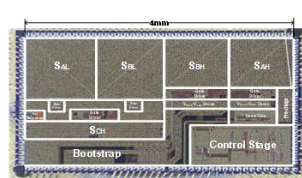


VLSI 2024在投
基于LLCC的高效率低EMI
隔离电源芯片

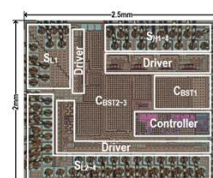


CICC 2024
高压全集成隔离电源芯片

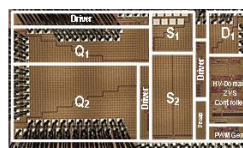
云端服务器



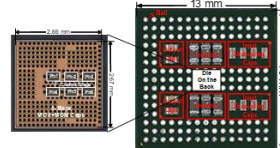
ISSCC 2022 & JSSC 2022
24V-1V快速响应开关电源芯片



ISSCC 2024
高效率、高电流密度
直流-直流转换器



VLSI 2024在投
高压软开关直流-直流转换器



在投
六相全集成电压调制器

2021年发表了安徽省以及中科大历史上的第一篇ISSCC论文；
2022年和2023年连续发表两篇和一篇论文；
2024年创纪录发表了五篇论文，其中四篇为亮点论文！

Thank you

程 林

Email: eecheng@ustc.edu.cn