



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，潘东方

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：潘东方；助教：吴云典/熊帅

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30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12篇，Google引用600余次
- 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

潘东方，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：电源管理及射频集成电路设计
- 在JSSC，ISSCC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 3A205, 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
 - 会做模拟电路 \neq 能做好模拟电路
- 考核方式
 - 期末考试：80%，开卷
 - 作业和随堂小测验：20%



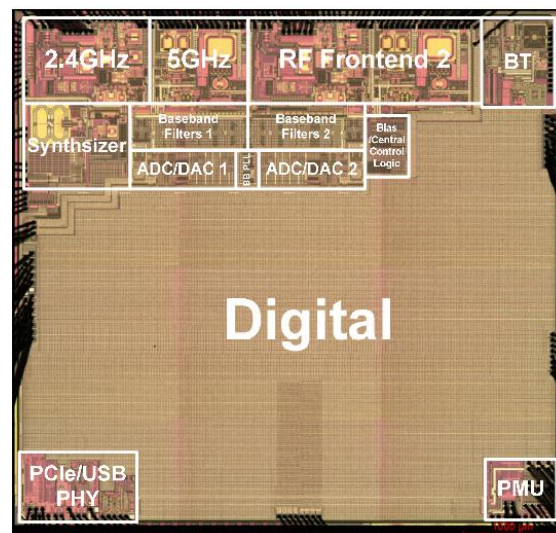
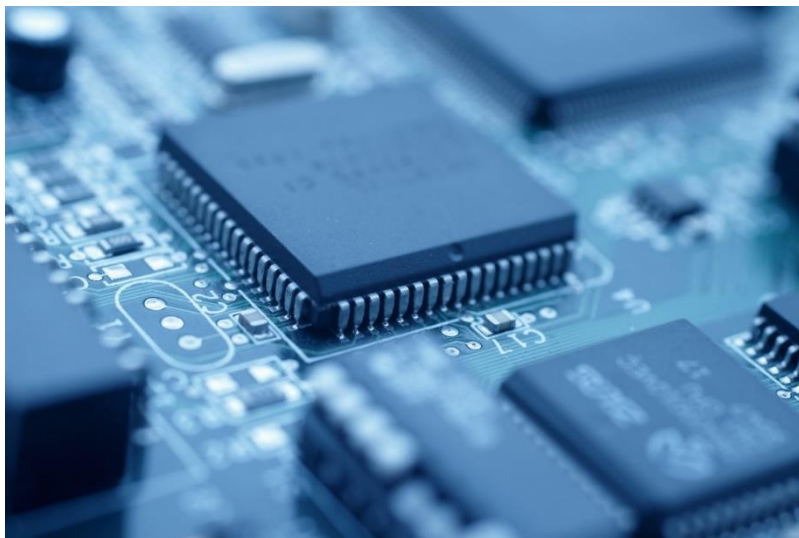
课程内容简介

- 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。

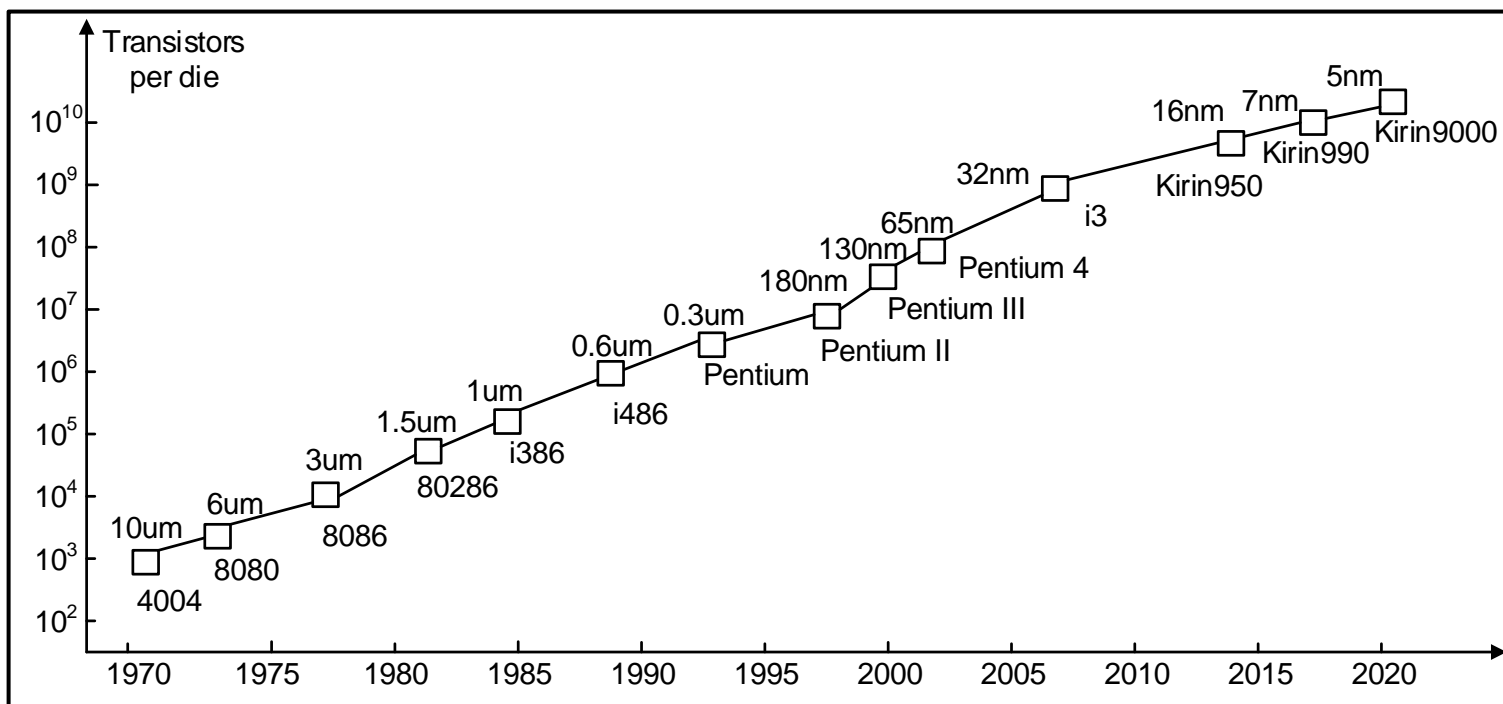




摩尔定律 (Moore's Law)

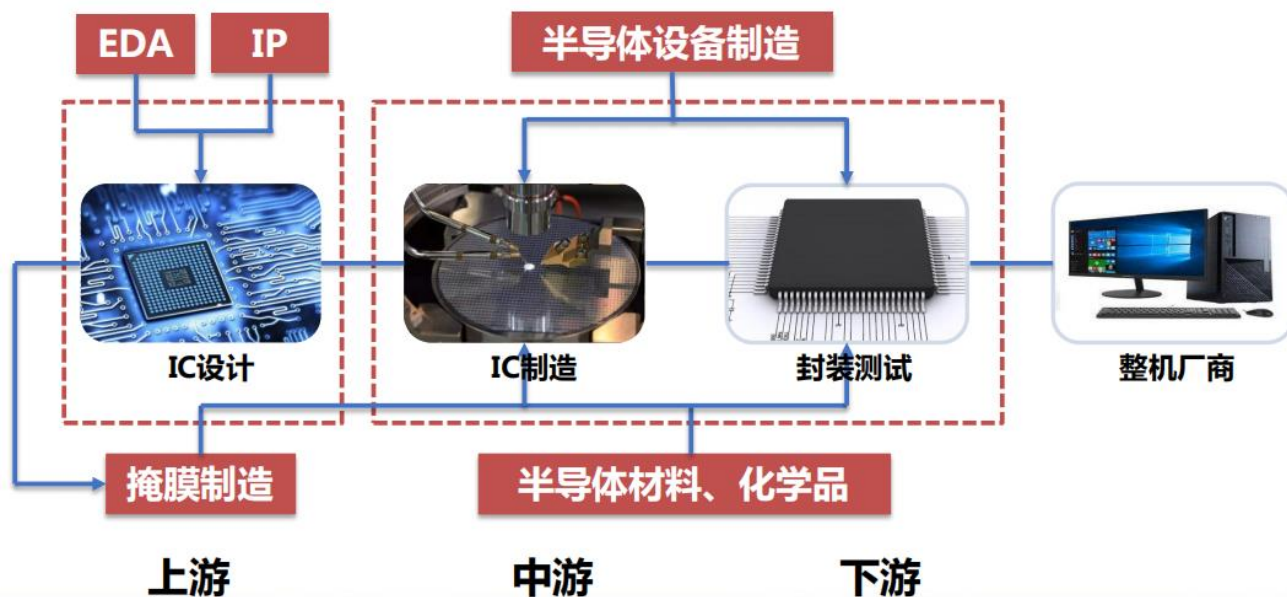
硅基半导体技术发展的Moore定律：

- 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
- 每一美元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

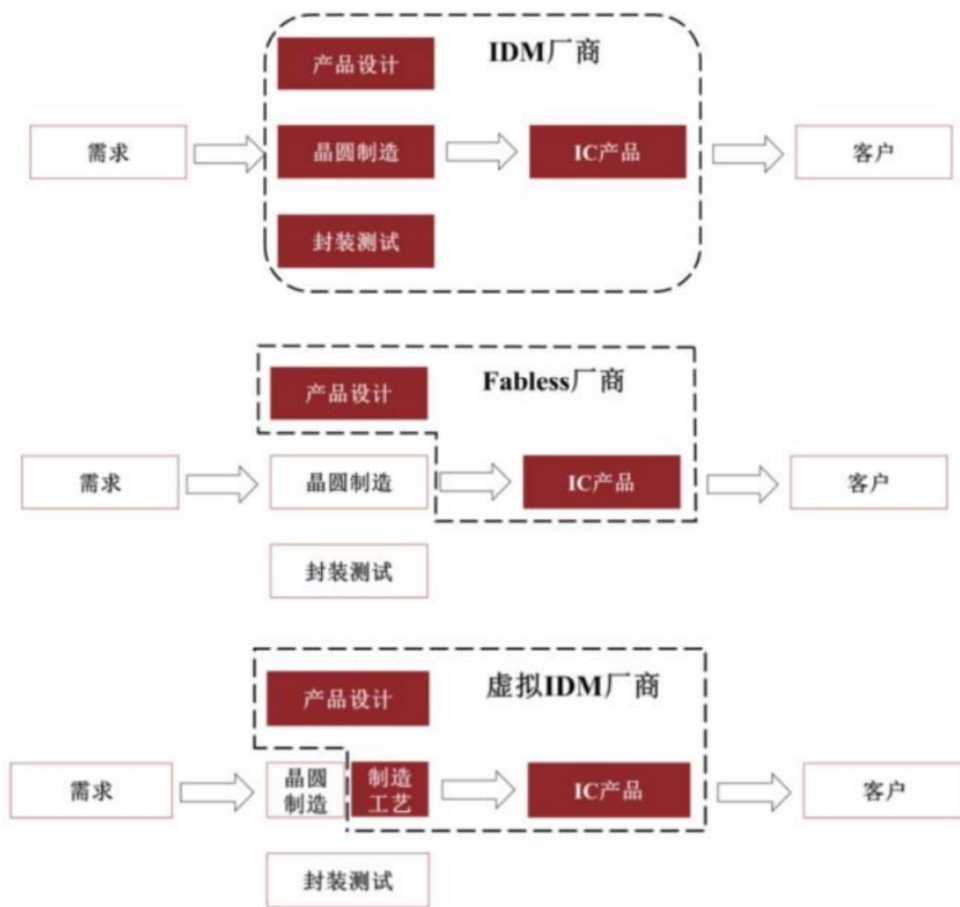
- 全球集成电路制造的市场规模约为600亿美元，2018年集成电路的代工企业市场占有率第一名是台积电（TSMC）年销售额约为340亿美元
- 全球集成电路封测的市场规模约为280亿美元，2018年半导体封测企业市场占有率第一名是日月光（ASE）年销售额约为53亿美元

- 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设计的的一种公司运作模式。

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



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。



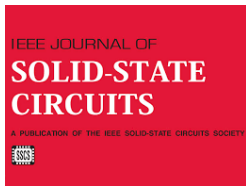
集成电路设计顶级学术会议和期刊

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...

近8年中国大陆地区ISSCC论文数量

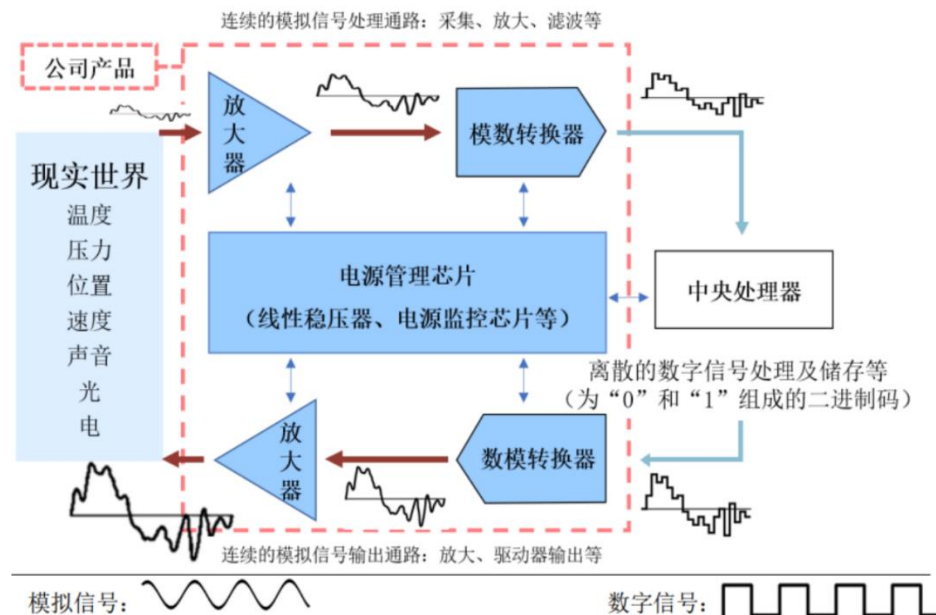




数字芯片与模拟芯片

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。

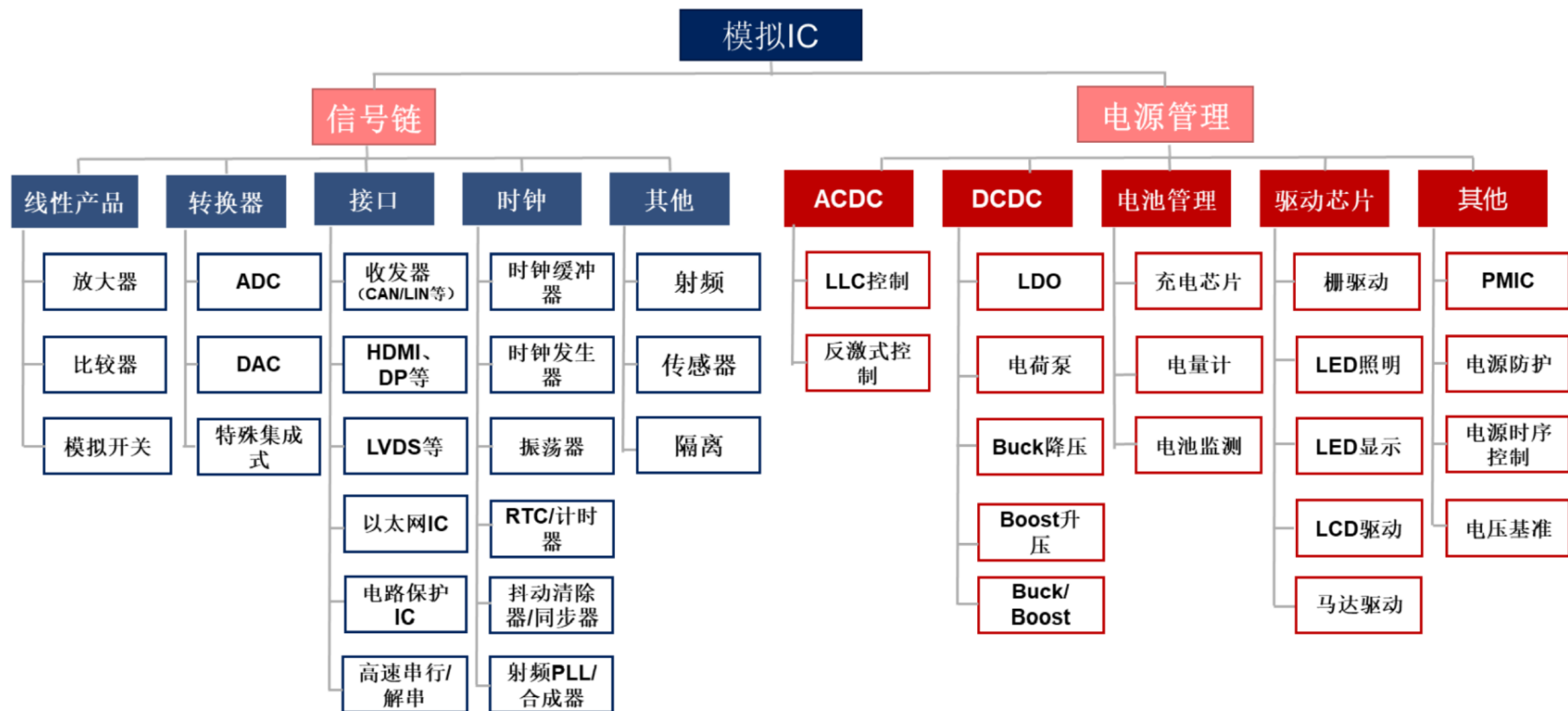


模拟IC vs 数字IC

	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



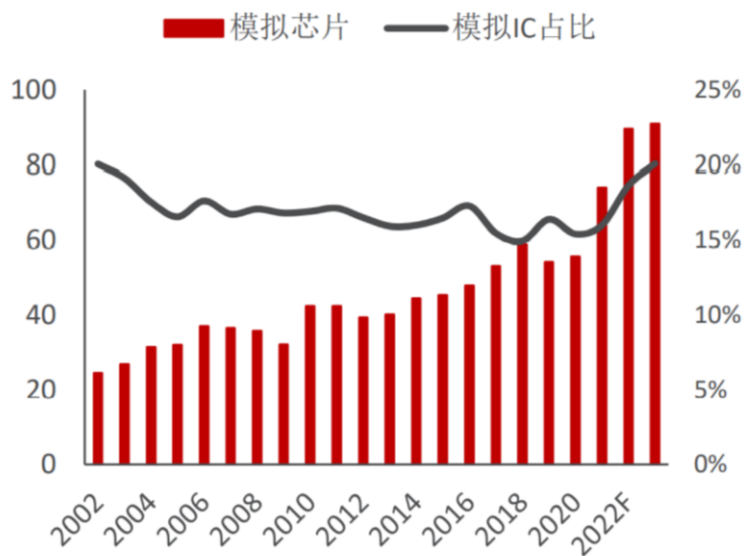
资料来源：德州仪器，民生证券研究院整理



模拟IC市场规模

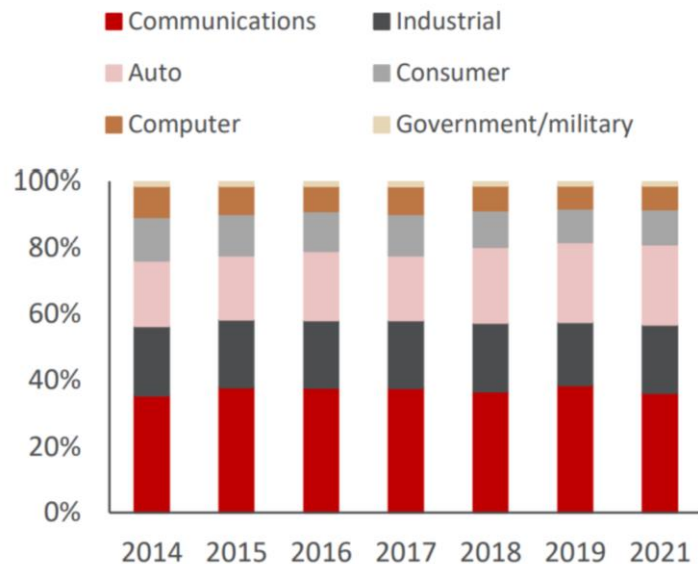
- 模拟IC 2021年全球市场规模高达741.05亿美元，在集成电路市场占比16.01%。
- 下游市场分散，广泛应用于通信、工业、消费、汽车等应用场景，因而市场增速较为平稳。
- 增长波动小，受行业周期影响明显少于数字IC。

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

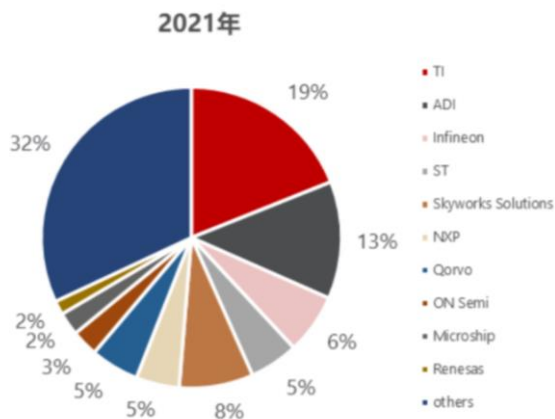
- 模拟IC市场格局一超多强，海外龙头掌握绝对话语权。

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。

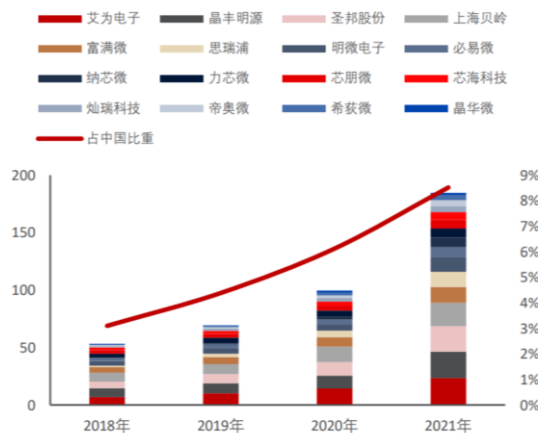
根据IC Insights数据，2021年中国模拟IC市场约2166亿人民币。同年，国内16家模拟IC上市公司营收总和为184.55亿元，占中国模拟芯片市场只达8.52%。

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

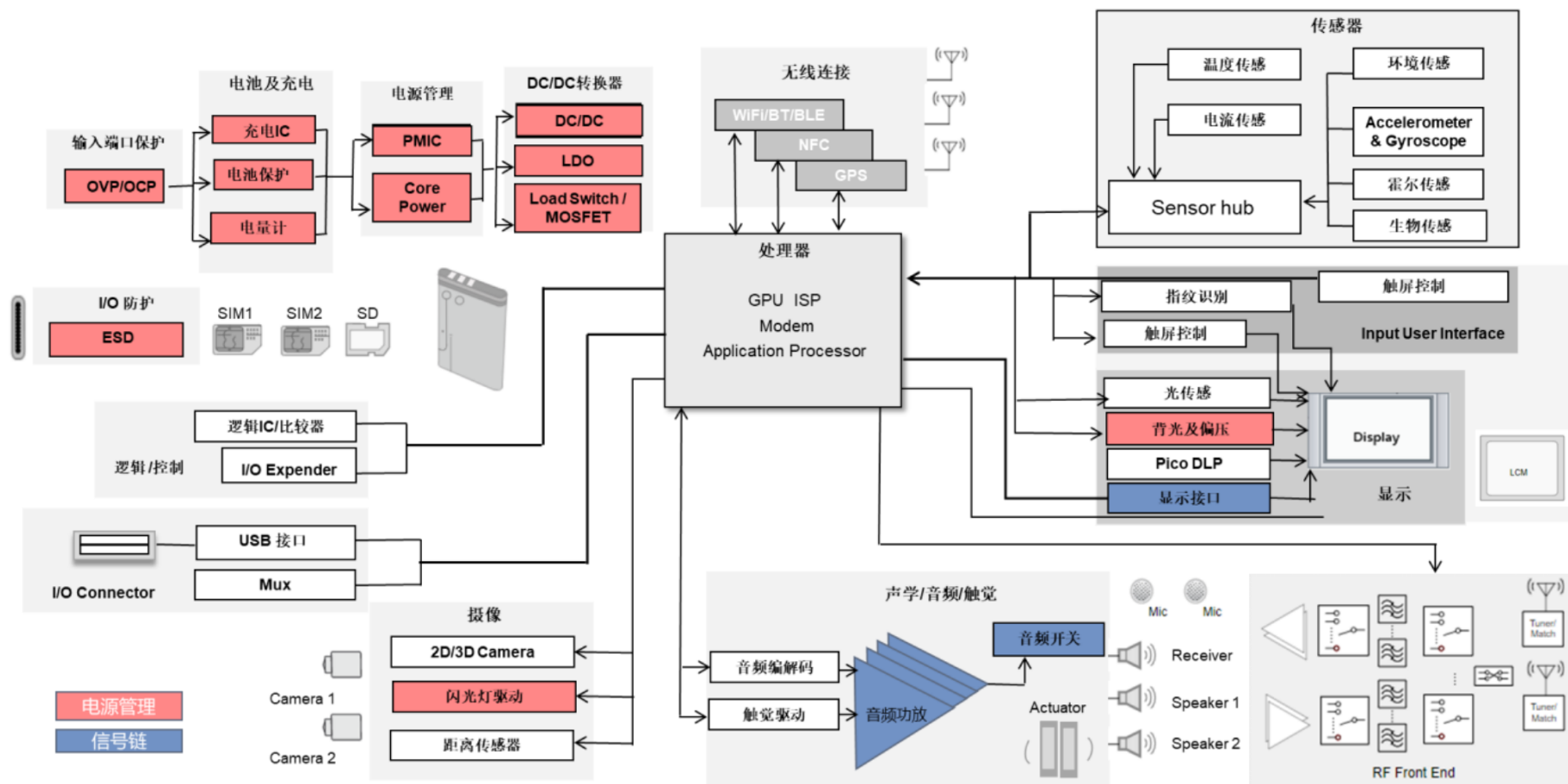
图10: 国内模拟 IC 上市公司营收总计及占比(亿元, %)



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、数字驾驶舱控制器、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

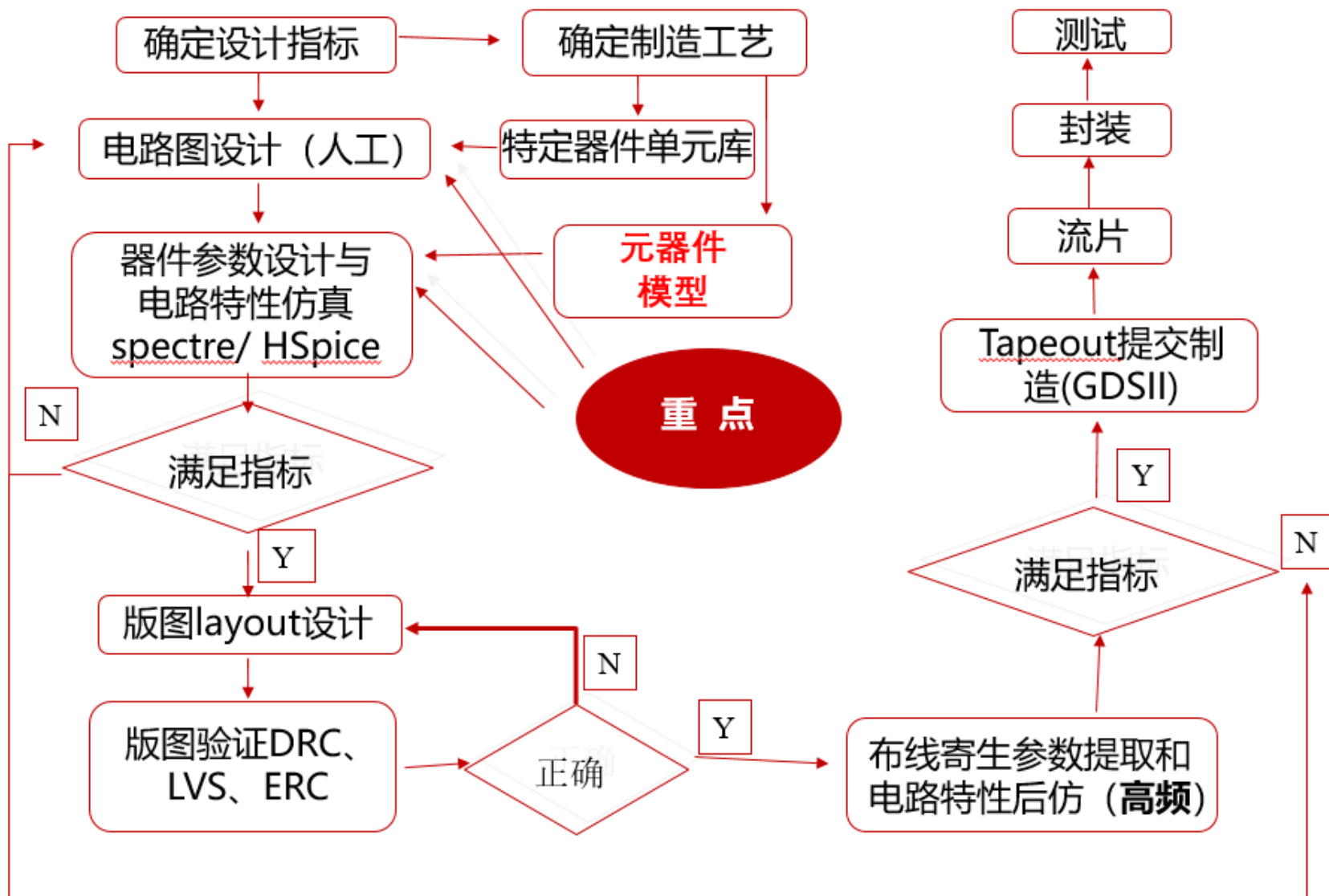


模拟电路设计的挑战和特点

- 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

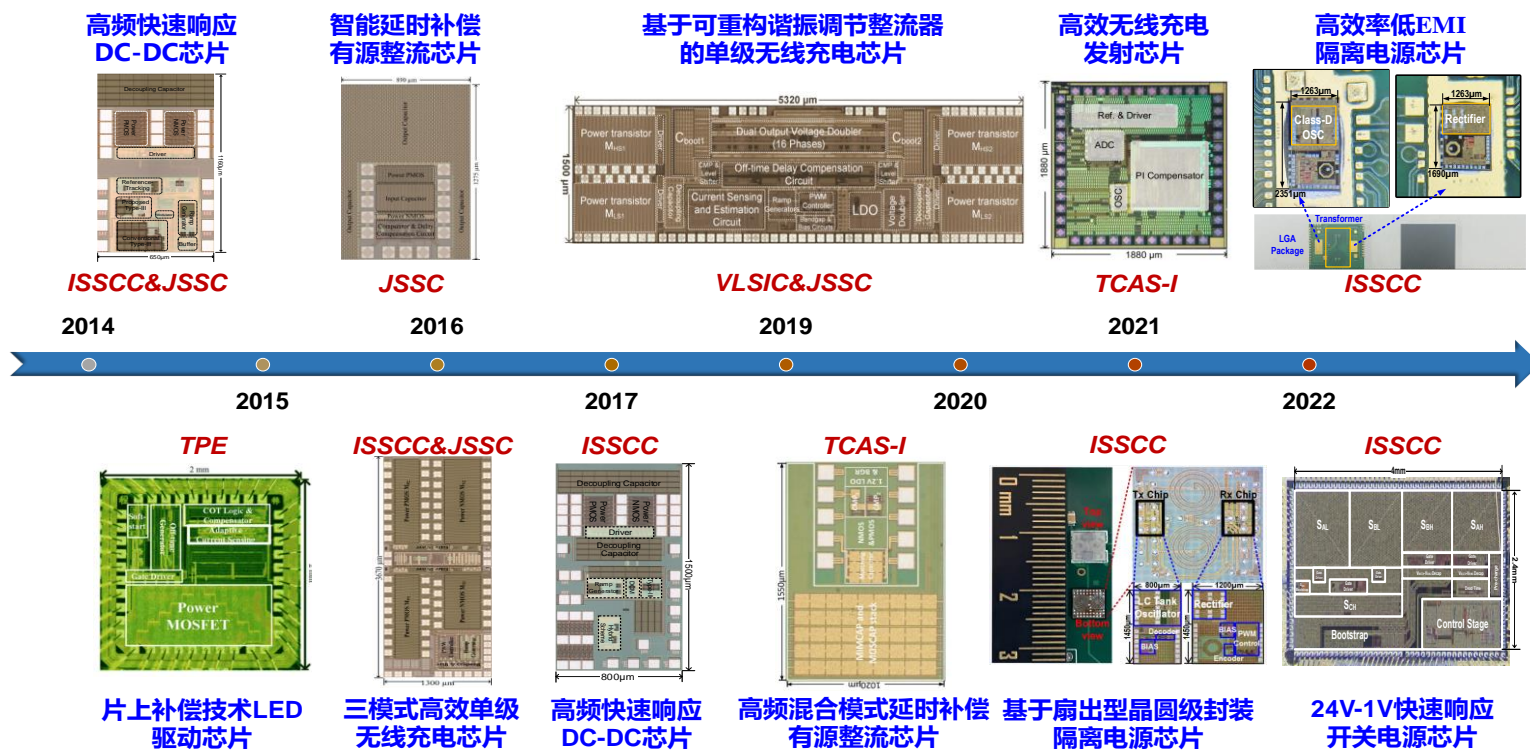
好的模拟电路设计需要直觉、严密和创新，作为模拟电路设计者

- 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。



科大电源管理芯片设计团队成果



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年又连续发表两篇和一篇论文，占据大陆地区近三年电源芯片发文数量的50%

Thank you

程 林

Email: eecheng@ustc.edu.cn