

Integrated Circuit

孙寒石
电子科学与技术学院

2020年6月5日

摘要

听了电子学院杨军老师的讲课后，我对集成电路起了浓厚的兴趣，于是在课后进行了额外的学习。集成电路（integrated circuit）是把一定数量的常用电子元件，如电阻、电容、晶体管等，以及这些元件之间的连线，通过半导体工艺集成在一起的具有特定功能的电路。但是，支持IC发展的摩尔定律（Moore's Law）正在接近极限。我们不能再仅仅依靠片上集成了，就需要一种创新的解决方案来解决连接问题^[1]。

目录

1	问题背景	2
1.1	IC的伟大历程	2
1.2	Moore's Law接近极限	2
2	三大方向	3
2.1	More Moore	4
2.2	More-than-Moore:Functional diversification	4
2.2.1	SiP	4
2.2.2	3D封装	5
2.2.3	新材料	5
2.3	Beyond CMOS	5
3	我的想法	7
	参考文献	8

1 问题背景

1.1 IC的伟大历程

在课上，老师告诉告诉我们，Intel的摩尔提出摩尔定律，预测晶体管集成度将会每18个月增加1倍。随后，以摩尔定律为参考标准，IC技术进入高速发展，在1980年前后，全球集成电路市场增长率甚至达到了20%。如今，芯片上所集成的晶体管数量已达到了空前的水平。这让我记起来，日本学者黑田忠広所说的，到2025年，芯片的密度将超过人类细胞的数量。（2025年になると、チップの集積度はヒトの細胞の数を超えます。）作为电子类技术的基石，将来，IC将提供更强大的计算能力，将继续给社会带来超越我们想象的变革。

1.2 Moore's Law接近极限

在课件PPT里面，老师给出了下图¹，从图中我们可以看出，集成电路今后的发展有三个大方向：“More Moore”、“More than Moore”、“Beyond CMOS”。虽然近年来，集成电路发展放缓，人们一直在预言摩尔定律的终结，大家都认为摩尔定律发展到特征尺寸5nm的时候，继续简单粗暴地缩小特征尺寸会变得几乎不可能。但是杨军老师告诉我们并不是这一回事，今后集成电路会在这三个方向蓬勃发展。

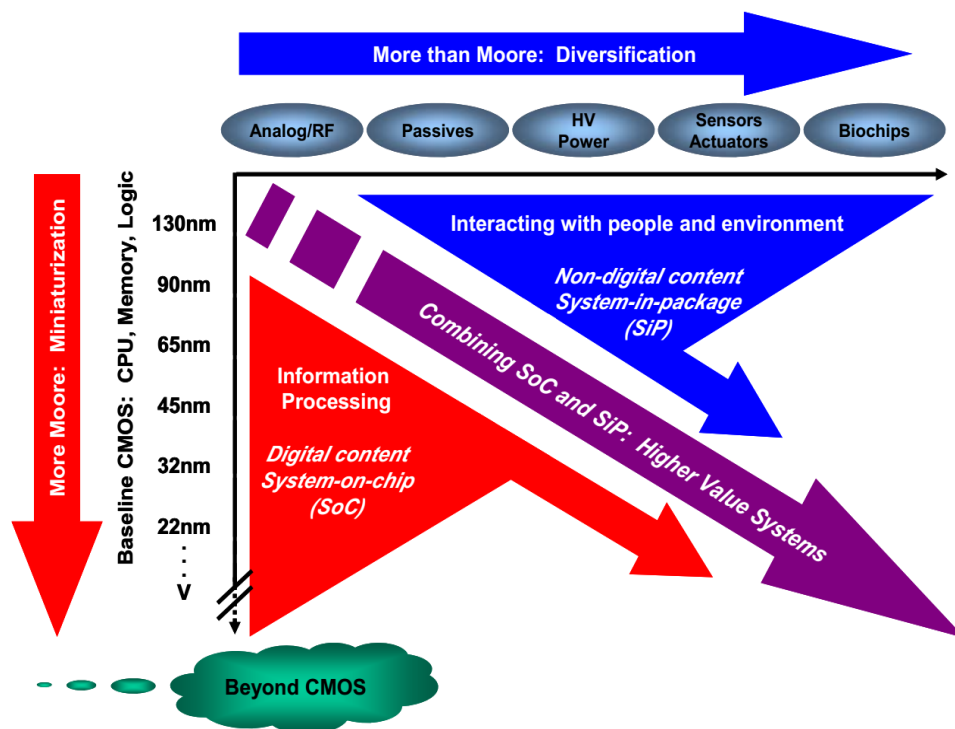


图 1: The combined need for digital and non-digital functionalities in an integrated system is translated as a dual trend in the International Technology Roadmap for Semiconductors: miniaturization of the digital functions (“More Moore”) and functional diversification (“More-than-Moore”). ^[2]

¹课后我在《“More-than-Moore” White Paper》中找到了此图

2 三大方向

正如上文所提到的，将来集成电路将主要有三个发展的方向，分别是：

- I) “More Moore （深度摩尔）”做的是想办法沿着摩尔定律的道路继续往前推进。
- II) “More than Moore （超越摩尔）”做的是发展在之前摩尔定律演进过程中所未开发的部分。
- III) “Beyond CMOS （新器件）”做的是发明在硅基CMOS遇到物理极限时所能倚重的新型器件。

[3]

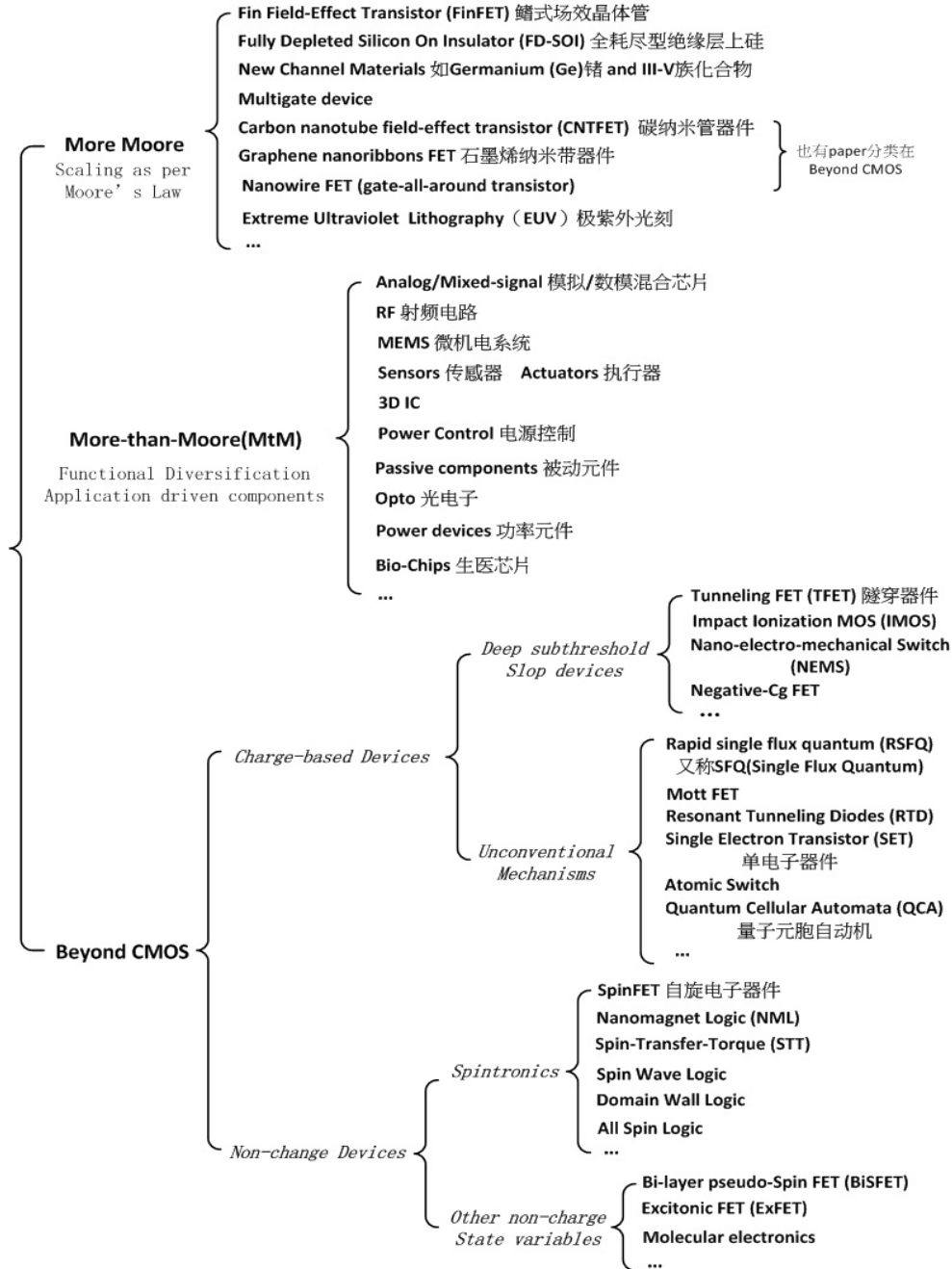


图 2: More Moore, More-than-Moore and Beyond CMOS

2.1 More Moore

Short definition: Continued shrinking of physical feature sizes of the digital functionalities (logic and memory storage) in order to improve density (cost per function reduction) and performance (speed, power).^[2] “More Moore” 延续CMOS的整体思路，在器件结构、沟道材料、连接导线、高介质金属栅、架构系统、制造工艺等等方面进行创新研发，沿着Moore’s Law一路scaling（每两到三年左右，晶体管的数目翻倍）。但是，在研究过程之中，专家们发现，More Moore会遇到漏电的问题，当特征尺寸缩小到10nm的时候，栅氧化层的厚度仅仅只有十个原子那么厚，在那个时候会产生诸多量子效应，导致晶体管的特性难以控制，例如量子隧穿效应。这些都导致晶体管漏电非常严重。在传统的摩尔定律时代，工艺制程进化时对于晶体管的优化主要在于性能方面。Intel的执行副总Bill Holt在ISSCC 2016的演讲中提到，在More Moore时代，对于晶体管的优化将从侧重于性能提升转向侧重于减小漏电，即所谓的“由功耗驱动的制程进化 (Power-Driven Technology Transition)”。Intel和TSMC在先进制程所使用的FinFET就是一个典型的例子。FinFET由于使用三维结构，可以更好地控制漏电，但是晶体管的速度相比平面工艺并没有多少提升。

2.2 More-than-Moore: Functional diversification

Short definition: Incorporation into devices of functionalities that do not necessarily scale according to “Moore’s Law”，but provide additional value in different ways. The “More-than-Moore” approach allows for the non-digital functionalities to migrate from the system board-level into the package (SiP) or onto the chip (SoC).^[2] “More than Moore” 侧重于功能的多样化，是由应用需求驱动的。之前集成电路产业一直延续摩尔定律而飞速发展，满足了同时期人们对计算、存储的渴望与需求。但芯片系统性能的提升不再靠单纯的暴力晶体管 scaling，而是更多地依靠电路设计以及系统算法优化，同时集成度的提高不一定要靠暴力地把更多模块放到同一块芯片上，而是可以靠封装技术来实现集成。举个例子，杨军老师上课提到的3D集成封装便是路径之一，随后课后我在查资料的过程又看到了其他的方法。

2.2.1 SiP

引用ITRS对SiP的定义：SiP是一种新的封装技术，将多个具有不同功能的有源电子元件与可选无源器件，以及诸如MEMS或者光学器件等其他器件优先组装到一起，实现一定功能的单个标准封装件，形成一个系统或者子系统。SiP是“System in Package”的缩写，意思为：系统级封装，一种设计或产品将不同的半导体器件整合使用的方式，如将存储器与SoC(System on Chip, 系统级芯片)封装在同一单芯片中。

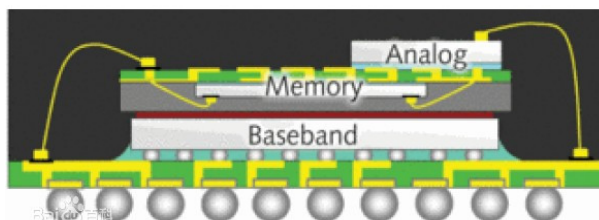


图 3: SiP

2.2.2 3D封装

3D晶圆级封装(WLP)，包括CIS发射器、MEMS封装、标准器件封装。是指在不改变封装体尺寸的前提下，在同一个封装体内于垂直方向叠放两个以上芯片的封装技术，它起源于快闪存储器(NOR/NAND)及SDRAM的叠层封装。主要特点包括：多功能、高效能；大容量高密度，单位体积上的功能及应用成倍提升以及低成本。[4]

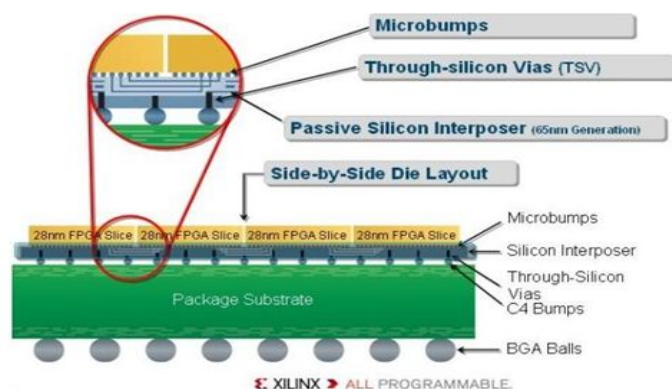


图 4: 3D封装与TSV

2.2.3 新材料

目前，硅是半导体器件的主流，碳化硅和氮化镓是补充方案，在硅器件达不到目标性能和指标时，碳化硅和氮化镓就可以发挥作用，例如碳化硅主要定位成高功率、高电压领域，从600V~3.3kV是碳化硅器件比较适合应用的场景。氮化镓则定位中央的低压产品，大概是100~600V左右。氮化镓的产品还有一个特性是能够在高频下无损耗地进行开关，该特性能更好的适用于高频LED和电源类产品。未来很长一段时间内硅、碳化硅和GaN的市场将同时发展。

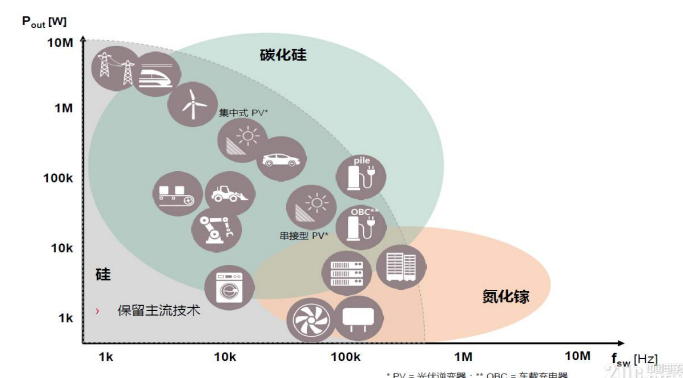
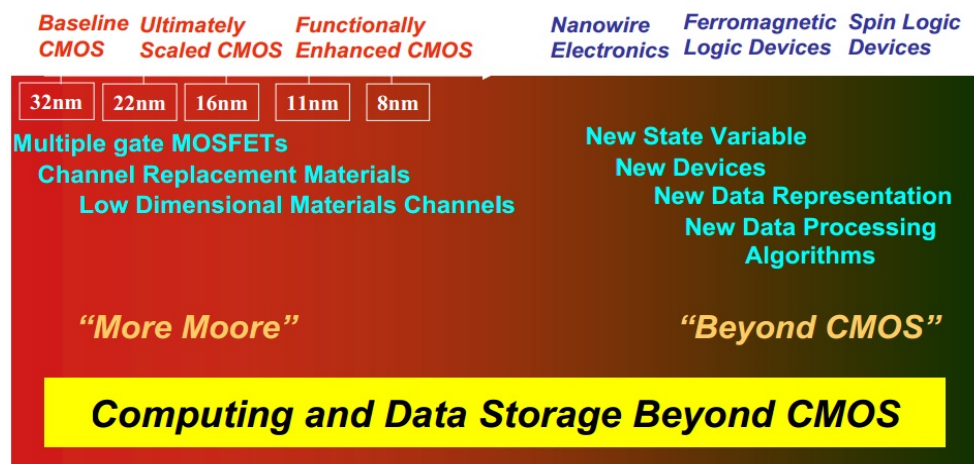


图 5: 硅、碳化硅和氮化镓的应用定位

2.3 Beyond CMOS

Beyond CMOS的主要思路就是发明制造一种或几种“新型的开关”来处理信息，以此来继续CMOS未能完成之事。因此理想的这类器件需要具有高功能密度、更高的性能提升、更低的能耗、可接受的制造成本、足够稳定以及适合大规模制造等等的特性。Beyond CMOS带来的不仅仅是电路性能的提升，还可能是整体系统架构的更新并带动新的应用，从而开创一个崭新的信息时代。Beyond

CMOS的新型器件包括：Tunneling FET (TFET)，Nano-electro-mechanical Switch (NEMS)，Single Electron Transistor (SET)等。



Source: Emerging Research Device Working Group

图 6: Beyond CMOS

3 我的想法

听完本学期的新生研讨课之后，我明确了我的分流志愿，因为我对集成电路比较感兴趣，所以我将选择在电子学院进行下一阶段的学习。如果有可能，我希望我未来从事集成电路相关研究工作。现阶段，我国的IC技术有很大的发展空间。正如杨军老师所说，我国芯片产品大部分是依靠进口国外产品的，我国的芯片进口总规模非常大，甚至超过了石油的进口规模。目前美国拥有着芯片的绝大部分核心科技，几乎达到了垄断的地步。中国集成电路的人才缺口十分大，需要大家齐心协力。

参考文献

- [1] 丸善.ICの物語『パリテ』.2015
- [2] “More-than-Moore” White Paper,Wolfgang Arden, Michel Brillouët, Patrick Coge, Mart Graef, Bert Huizing, Reinhard Mahnkopf,ITRS
- [3] <https://zhuanlan.zhihu.com/p/21262704>
- [4] <https://baike.baidu.com/item/3D%E5%B0%81%E8%A3%85/4171315?fr=aladdin>