

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2016.01.001

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20151217.1002.002.html>

**[摘要]** 通过分析 ICT 发展对中国经济和社会可持续发展的重要意义,指出在中国发展 ICT,重点在于发展高性能核心电子及光子器件,并提出了目前两项最具影响力的新型技术——三维集成技术和光电子技术。认为三维集成技术以其独特优势,成为未来微纳光子的发展方向;而光电子技术在 ICT 发展中也正扮演着越来越重要的角色,是未来超高速通信的桥梁。

**[关键词]** ICT; 核心电子器件; 摩尔定律; 三维集成技术; 光电子技术

**[Abstract]** Information communication technology (ICT) plays a significant role in the sustainable development of both the economy and society of China. The focus of ICT in China is development of core electronic and opto-electronic components. Two of the most impressive emerging technologies are 3D integration technology and opto-electronic technology. 3D integration technology is the future development direction of micro/nano optoelectronic technology in the future. The development of the electronic technology in the ICT is also playing a more and more important role, and which becomes the bridge of future ultra high-speed communications.

**[Key words]** ICT; core electronic components; Moore law; 3D integration technology; opto-electronic technology

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 01-0002-03

# ICT 核心器件发展展望

## Development Prospects of ICT Core Components

李尔平/LI Erping

(浙江大学 信息学部, 浙江 杭州 310027)

(Faculty of Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)



**李尔平**, 浙江大学信息学部副主任、教育部“长江学者”讲座教授、IEEE Fellow、首批国家千人计划特聘教授; 研究领域为新型微纳光子器件集成技术、微波电子射频天线及电磁兼容等; 荣获多个国际奖项和荣誉, 包括 2015 年荣获国际 IEEE 最高奖之一——理查德-司徒达特奖; 发表国际论文 400 余篇, 英文专著两部, 申报多项美国、新加坡和中国专利。

收稿日期: 2015-11-25  
网络出版时间: 2015-12-17

信息通信产业是支撑中国经济与社会发展的关键支柱产业之一, 尤其是进入 21 世纪以来, 世界经济的信息化和全球化发展趋势日益明显, ICT 促进中国整体产业结构调整、转换和升级, 成为推动中国经济增长的重要手段, 支撑着国家的可持续发展。

大力发展 ICT 是中国中长期科学和技术发展方向的重要课题, 符合国家的重大战略需求。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中提到“重点开发高性能的核心网络设备和传输设备、接入设备, 建立可信的网络管理体系, 开发智能终端和家庭网络等设备和系统, 支持多媒体、网络计算等宽带、安全、泛在的多种新业务与应用<sup>[1]</sup>”。2015 年 5 月, 国务院公布《中国制造 2025》规划, 在新一代 ICT 产业中阐述: “掌握新型计算、高速互联、先进存储、体系化安全保障等核心技术, 超高速大

用量智能光传输技术、未来网络核心技术和体系架构, 推动核心信息通信设备体系化发展与规模化应用<sup>[2]</sup>”。

经过 30 多年的发展, 中国信息通信系统整机和设备制造能力已经位居世界前列, 例如在光通信领域, 自主整机产品已占全球网络的 2/5, 光接入设备占全球的 3/4, 光纤光缆占全球的 1/2。但中国在 ICT 核心电子器件技术领域还处于跟跑阶段, 单在 2013 年中国集成电路进口 2 322 亿美元, 超过原油进口, 信息产业的“芯”在外。制约中国 ICT 核心电子技术发展的突出问题包括电子器件加工设备研发实力薄弱, 缺乏标准化和规范化的电子器件工艺平台以及芯片模块化封装和测试分析技术落后等。ICT 核心电子器件在无线通信、高性能计算、智能交通、远程医疗、航空航天和深空探测, 以及与国家安全相关的空天平台上通信、雷达、导航和控制系统中的应用举足轻重。因

此,为了确保中国 ICT 在国际上的可持续引领作用和对国民经济的重大贡献,必须从基础的核心电子器件出发,重点发展 ICT 核心电子器件的相关技术。

## 1 ICT 核心器件发展的重大技术挑战

半个世纪以来,微纳光电子技术一直遵循摩尔定律,即芯片的集成度每 18 个月翻一番。对于电子器件小型化和多功能的需求已促使集成电路内的晶体管尺寸减小到了 10 nm 以下。但是,这一缩小的趋势受到了严峻挑战,其关键问题在于以下几点。

(1) 互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺已经逼近物理极限。首先,随着特征尺寸的不断降低,金属互连的延迟、功耗和噪声等在不断增加,互连已经取代晶体管成为决定集成电路性能的主要因素及限制其未来发展的真正瓶颈。其次,能耗密度的急剧增加也限制了高性能集成电路的发展。高度集成电路的能耗密度大幅提高,已经达到每平方米 100 W,使得芯片直接散热和冷却技术面临很大的挑战。如图 1 所示,多核高性能处理器对数据带宽的要求不断增加,而现有的互连以及目前的二维平面集成技术已经无法满足多核处理器对高速、宽带的数据通信的要求,功耗问题已是影响时钟速率提

升的关键问题。最后,更小尺寸的硅加工技术也是微电子进一步小型化面临的挑战。

(2) 系统集成各种功能模块需要多种工艺的支持。当前的嵌入式系统依赖系统芯片(SoC)实现,SoC 集成可实现存储器、数字电路、模拟电路、射频电路、大功率电路、光/电器件、电源管理电路、传感器电路等多种功能模块的集成。有些电路模块在特征尺寸减小时并不一定能提高性能,如射频电路模块。由于以上原因,很难将众多的电路均以最佳性能、利用同一工艺集成到一块 SoC 芯片中,或者单片 SoC 集成的成本过高。此外,高密度集成导致管脚开销急剧增加。

(3) 现有光电器件的系统集成方式速度低、损耗大。无线基站系统通常需要从光纤传输的光信号和由无线信道传输的射频信号之间进行转换。由于光信号和电信号的处理电路依赖不同工艺,无法在单一芯片上集成,因此在现有的系统方案中,这两部分电路只能以分立器件进行系统集成,这种方式造成信号转换过程中的损耗极大而且速度低,大大降低了系统的性能。

(4) 系统级封装(SiP)是一种被广泛采用的高集成度的方法,通过直接在封装层次集成多个芯片来提高集成度并解决不同工艺集成的问

题。但是一些 SiP 电路中需要用小尺寸工艺芯片驱动较大的外接负载,功耗依然很高。

为解决如上所述的问题,业界提出了几个重要的技术,其中最具影响力的为垂直互连的三维器件集成技术和光电子技术。

## 2 三维集成技术——超越摩尔定律

如图 2 所示的三维集成技术的基本思想是在垂直方向叠加芯片,并使用垂直硅通孔(TSV)互连<sup>[1]</sup>为各芯片之间提供直接、短距离的电路连接。三维集成电子器件和硅通孔技术使芯片能够更有效地安排空间版图,减少连线长度,总体连接缩短大约 30%~40%,从而显著提高封装密度,提高芯片速度。此外,三维集成允许不同工艺的芯片以自然的方式集成,如可以将无线芯片、传感器、光子器件、微机电系统(MEMS)及 CMOS 芯片集成在一个芯片上。因此,三维集成技术为目前集成电路面临的数据传输带宽、芯片功耗和速度以及异质芯片集成等问题提供了切实可行的解决途径<sup>[4]</sup>。三维集成电路和硅通孔技术将推动半导体行业向延续摩尔定律和超越摩尔定律发展,国际半导体技术发展蓝图(ITRS)也将以垂直硅通孔为基础的三维集成为微纳光电子科学与技术发展的一个非常重要的方向<sup>[5]</sup>。

三维集成技术对集成电路领域产生了巨大的影响,也带来了一系列挑战。首先,由于片上有许多硅通孔(几千甚至上万),需要占用片上面积,必须用小孔径以减少通孔所占面积,因此研究小孔径及高深宽比的制造工艺及集成技术,是极具挑战的技术。其次,三维集成的散热问题比二维集成重要许多,这是由于三维高集成度使电路系统的“表面积-体积”比下降很多,进而使得散热更加困难,寻求更先进热管理技术对于三维集成至关重要。除此之外,高度集成

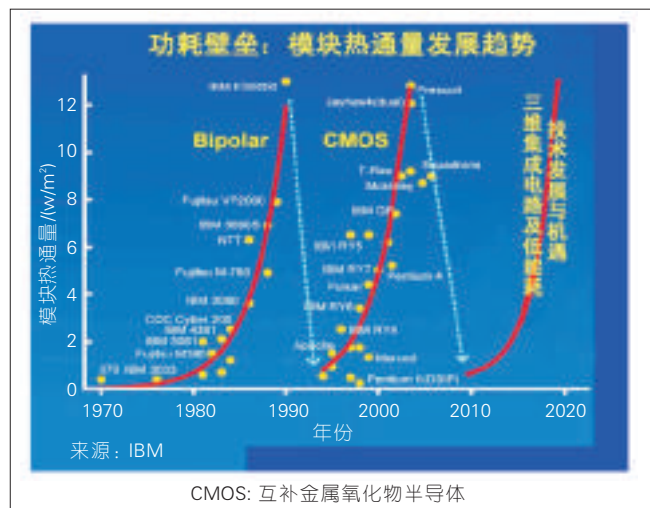
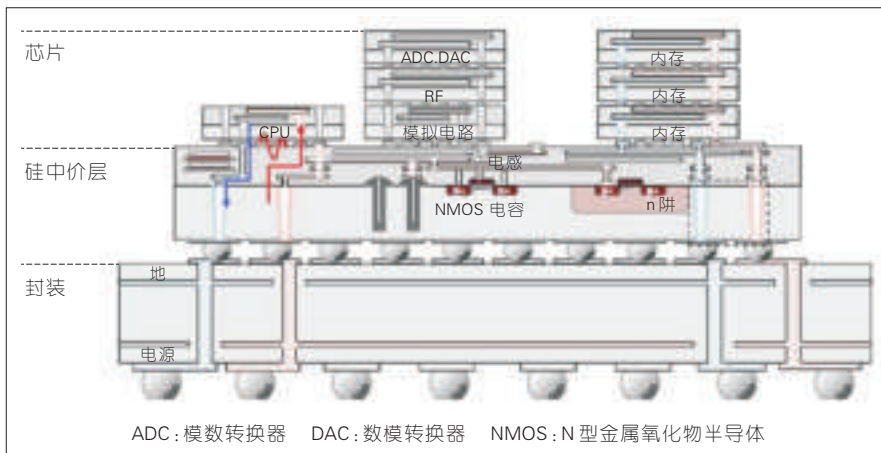


图 1 半导体技术的功耗发展及其技术预测



▲图2 垂直硅通孔互连的三维集成器件

的电路结构对于电、热、应力的可靠性研究,设计方法、设计规则以及测量测试方法也都提出了新的要求。综上所述,三维集成有其独特的优势,是未来微纳光电子的发展方向,但目前还存在着关键技术挑战,如热管理问题、垂直信号传输机制与制造技术等问题,解决这些关键技术是未来的研究重点。

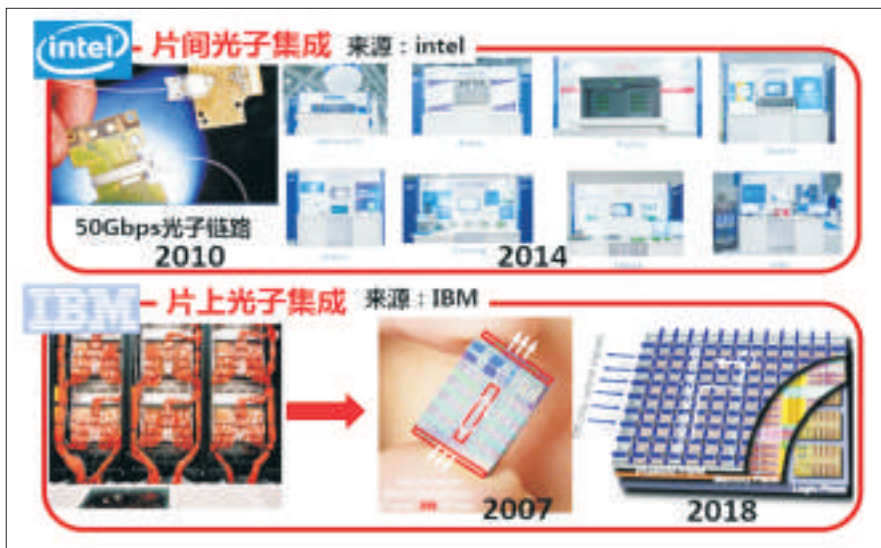
### 3 光电子技术——实现超高速通信

光电子技术在 ICT 中正扮演着越来越重要的角色<sup>[6]</sup>。在宽带通信网络方面,统计数据显示:传输和交换设备中光器件的成本比重高达 70%和

60%,对于高端的网络通信设备这个比例更高。而在移动通信方面,随着接入带宽需求的快速发展(从 3G 的 10 Mbit/s,到 4G 的 100 Mbit/s,甚至未来 5G 的 1 Gbit/s),移动的灵活性必须与光纤的宽带相结合,光与无线融合已经是大势所趋,光电子技术将成为移动通信繁荣 4G,推广 5G,甚至部署后 5G(B5G)技术的重要支撑。此外,在高性能计算方面,基于光电子器件的柜间光互联(即计算机机柜之间)已经走向板间光互联(即单台计算机电路板之间),未来更将走向片上光互联(即芯片内部之间),才能够支撑超级计算机的性能进一步提升。图 3 为 Intel 报道的片间光子集成与 IBM

报道的片上光子集成的发展趋势。

尽管光电子技术在近几年里发展迅速,但是由于总体发展时间短,该技术在未来较长时间内仍会存在诸多挑战。首先,集成化是光电子技术发展的必由之路,这是光电子科学技术发展已经证明了的事实,也是学界和产业界的共识。只有集成才能够支撑未来信息系统对速率宽带、能耗体积以及智能可调控等发展需求。然而,光电子集成与基于单一硅材料的微电子集成有着巨大的差别,涉及异质、异构、异速、异维等关键科学问题。其次,随着各种信息应用的动态化和复杂化,为了支撑信息传输、交换及处理的智能化需求,光电子功能模块必须具备可重构的能力,并且能够在对系统性能没有影响的情况下完成所需要的快速功能转换。最后,为了适应现代信息社会对宽带需求的高速增长,核心光网络系统所面临的信号维度已经不是传统的单一维度(如波长波分复用(WDM)、幅度二进制启闭键控(OOK)等),而是越来越复杂的维度组合(波长、偏振、模式、轨道角动量等等),因此提出高效的信号调控机制(包括产生、传输、交换、接收等)已经成为日益紧迫的要求。总的来说,光电子技术是未来超高速通信的桥梁,而芯片与器件层面的光电子集成,功能模块层面的可重构智能化,以及系统应用层面的多维信号调控将成为下一阶段的研究重点。



▲图3 Intel报道的片间光子集成与IBM报道的片上光子集成

#### 参考文献

- [1] 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)[EB/OL]. <http://www.most.gov.cn/kjgh/kjghzcg/>
- [2] 国务院印发《中国制造2025》[EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2015-05/19/content\\_2864538.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2015-05/19/content_2864538.htm)
- [3] LI E P. Electrical Modeling and Design for 3D System Integration [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012
- [4] 王喆焱. 三维集成技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2014
- [5] 国际半导体技术发展蓝图[EB/OL]. <http://www.itrs.net/>
- [6] LI E P, CHU H S. Plasmonics Nanoelectronic and Sensing Devices [M]. UK: Cambridge University Press, 2014