

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.07.030

引用格式:王宜文,李学华.芯片内/间无线互连技术发展综述[J].电讯技术,2014,54(7):1031-1038.[WANG Yi-wen,LI Xue-hua. Summarization of Intra/Inter Chip Wireless Interconnection Technology[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(7):1031-1038.]

芯片内/间无线互连技术发展综述*

王宜文,李学华**

(北京信息科技大学 信息与通信工程学院,北京 100101)

摘要:为了解决超大规模集成电路布线复杂的问题,无线互连技术(WIT)应运而生。介绍了实现芯片内/间无线互连的两类技术,一类是基于片上天线的无线互连技术,另一类是基于 AC 耦合的无线互连技术。从实现成本、功耗,传输性能方面对这两类技术进行了分析与比较,讨论了它们的具体应用及适用范围,同时也总结了两者目前存在的问题,并指出了其未来的研究方向,对今后芯片内/间无线互连技术的应用研究具有一定的参考意义。

关键词:芯片内/间无线互连; AC 耦合; 片上天线; 超宽带; 综述

中图分类号:TN803.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)07-1031-08

Summarization of Intra/Inter Chip Wireless Interconnection Technology

WANG Yi-wen, LI Xue-hua

(School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: To solve the complex wiring problem of very large scale integrated circuit (VLSI), wireless interconnection technology (WIT) emerges as the times require. This paper introduces two techniques to realize intra/inter chip wireless interconnection, namely wireless interconnection technique based on on-chip antennas and wireless interconnection technique extended from AC-coupling. The two major technologies are analyzed and compared in terms of the implementation cost, power consumption, and transmission performance. Their potential application scopes and technical limitations are discussed. The innovative directions in future research are predicted. The content in this paper can provide a reference for future research on the intra/inter chip wireless interconnection technologies.

Key words: intra/inter chip wireless interconnection; AC-coupling; on-chip antenna; UWB; summarization

1 引言

伴随着微电子和高速硅基电路技术的迅猛发展,超大规模集成电路(VLSI)已经历了 50 载。遵

循摩尔定律的发展规律,当今计算机硬件电路日益复杂化,电路的集成度和时钟速率都在不断提高,加之芯片尺寸越来越小,引脚数目越来越多,工作频率

* 收稿日期:2014-01-06;修回日期:2014-04-04 Received date:2014-01-06;Revised date:2014-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61171039);北京市教委科技面上项目(KM201311232009);北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD201404114)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61171039); Science and Technology Project of Beijing Municipal Education Commission (KM201311232009); The Importation and Development of High-Caliber Talents Project of Beijing Municipal Institutions (CIT&TCD201404114)

** 通讯作者:lixuehua@bistu.edu.cn Corresponding author:lixuehua@bistu.edu.cn

越来越高,使得电路正在朝密集型、多层型、小型高速化方向发展,由此导致 PCB 上芯片连线数目愈加庞大,系统内多个电路板间的连接工艺更加复杂,而且速率的提高对高速互连的要求也愈发严格。在如今大多数 PCB 板电路中,芯片间靠传统的金属线进行互连,不仅占据了大量面积,随之还引起了电路中功率损耗、传输延时、压降、电磁串扰,并产生寄生电阻、电感、电容等问题,不仅浪费了资源,还增加了开发的难度,使得开发成本急剧增长,这将大大限制 VLSI 的发展。因此,研究出一种减轻或解决芯片内/间有线互连限制的新型技术是十分必要的。

目前减轻传统金属有线互连限制的方法有使用铜线降低导体电阻率,使用介电常数较低的低聚合物充当板间介质材料,将同步计算架构改为异步,或采用三维堆叠结构(如 TSV 技术)缩短互连线距离等方法。此外,为进一步改善导体的性能和介电特性,可使用冷却的超导体金属减少互连产生的功耗问题。但这些技术不能从根本上解决传统有线互连给 VLSI 带来的瓶颈。为了彻底消除人们对有线互连的依赖,必须开发出新兴的芯片内/间互连技术代替之。目前国内外很多研究者都在致力于该课题的研究,提出了多种实现芯片间高速互连的可行性方案,如光互连、射频无线互连,3D 集成技术,为从根本上实现对芯片内/间传统有线互连的革命,推进未来 VLSI 更好更快的发展做出了重要贡献,其中尤以无线互连技术的发展潜力巨大。本文将重点介绍现有实现芯片内/间无线互连的两大主流技术。

2 无线互连主流技术

由于无线互连与 CMOS 良好的兼容性使其在非布线系统应用中受到了极大的关注。无线互连具有可靠信噪比、低功率、低开销、兼容性好及可扩展性强等优点,有助于解决 VLSI 上传统共享总线结构并行和扩展性差、延迟和功耗较高、通信效率低下的问题,还可以减少导线和芯片管脚的数量,提高设计灵活性,其优越性如图 1 所示。目前国外进行芯片无线互连技术研究的团队大致包括:新加坡南洋理工大学;日本的东京大学、广岛大学和应庆义塾大学;德国的慕尼黑大学;美国的佛罗里达大学;还有 Sun、SONY、IBM 和 Inter 等公司。国内的研究团队比较少,主要是上海交通大学、华中科技大学、北京信息科技大学、国防科技大学等。目前无线互连技术可分为

两类,一类是通过片上天线实现自由空间电磁波传输,另一类则是采用 AC 耦合互连实现。下面将对两大技术的原理及发展现状进行详细介绍。

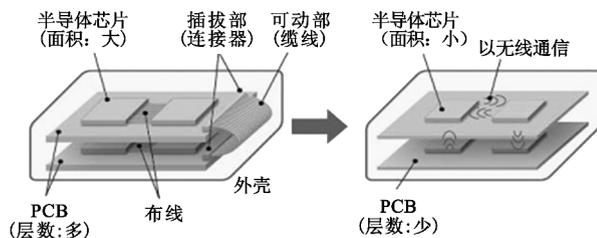


图 1 芯片内/间无线互连技术的优势
Fig. 1 Advantages of the intra/inter-chip WIT

2.1 基于片上天线的无线互连方式

随着 CMOS 工艺和技术的不断改进,片上天线和其他集成电路的成本逐渐降低,使用片上天线将会更加自由。早在本世纪初,采用传统 CMOS 工艺技术的新型无线/RF 互连技术就已被 Kenneth 教授提出,但其一直致力于片上天线高频全局时钟分布技术的研究,并未提及如何实现芯片内/间高速数据传输^[1]。直到 2001 年, Mau-Chung 等人定义了射频无线互连系统是由片上天线、发射机和接收机组成,采用片上天线代替传统金属互连线,通过低损耗无色散的电磁波进行信号传输,以实现芯片内/间某些模块的无线互连^[2];之后又结合 FDMA 和 CDMA 技术将互连速率提高至 5 ~ 10 Gb/s^[3]。2004 年,张跃平在文献[2]的基础上首次提出了无线芯片域网络(Wireless Chip Area Network, WCAN)的概念^[4],即采用无线互连技术实现封装在同一芯片内(Intrachip)和多芯片模块间(Interchip)的无线通信,为芯片内/间无线互连技术的具体应用指明了方向,图 2 为其提出的片上无线互连系统的结构模型^[5-7]。2007 年, Jau Lin 等人^[8]采用片上天线实现了载波频率为 24 GHz 的芯片间无线收发系统,证实了采用标准 CMOS 技艺实现无线互连系统的可行性。而文献[9]指出,评价片上天线性能的主要参数包括增益、方向性、天线效率、辐射电阻、阻抗匹配等,并介绍了几种常见的片上集成天线,指出偶极和环形天线比较适合芯片内/间无线互连。而国内对芯片内/间无线互连系统的研究较少,目前还处在探索阶段,在 2007 年才由上海交通大学毛军发教授提出,但仅限于片上天线的设计^[10]。到 2011 年,北京信息科技大学、国防科技大学也相继加入到该课题

的研究。其中北京信息科技大学主要致力于芯片内/间数据通信技术的研究^[11-12],国防科技大学则主要从事片上天线全局时钟分布的研究^[13-14]。

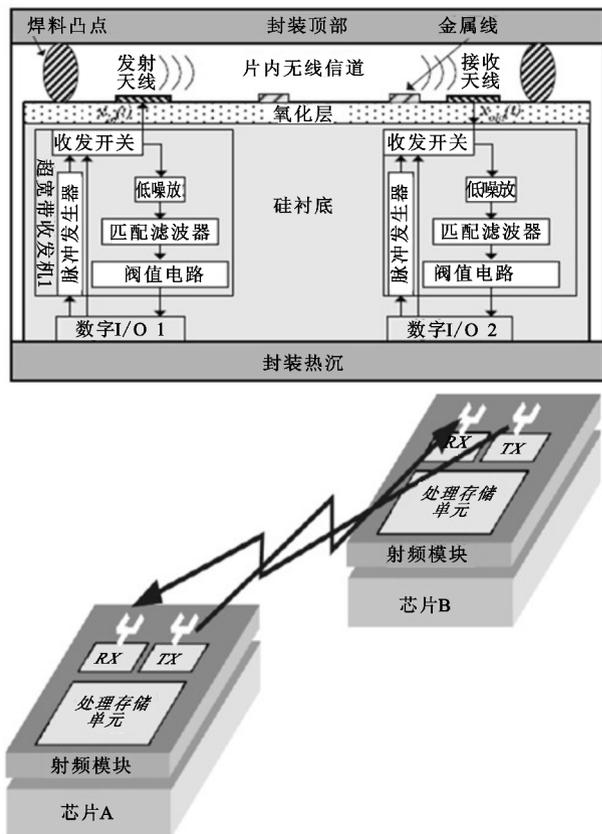


图 2 芯片内/间无线互连系统结构框架
Fig. 2 Intra /inter -chip wireless interconnection system architecture

纵览全球,目前国内外对基于片上天线无线互连方式的研究主要集中在 UWB 通信系统和60 GHz 毫米波通信系统中。这两类通信系统研究潜力巨大,下面将具体介绍。

2.1.1 IR-UWB 系统

由于 UWB 技术低成本、低功耗、高带宽、结构简单、保密性强的特点,使其在短距离高速传输中具备强大的优势。吉川和张跃平等人对文献[2]进行了验证并在其基础上提出了使用 IR-UWB (Impulse Radio-Ultra Wideband) 技术实现芯片内/间无线互连^[15-16]。其中张在文献[15]中首次提出使用 IR-UWB 技术进行芯片间无线互连,并从收发机结构设计、信道特性、噪声模型、传输速率、误码率等方面分析了该系统的性能和优势,提出射频芯片的发射机由 UWB 脉冲发生器、调制器和驱动放大器(DA)组成,接收机由低噪声放大器(LNA)、相关器(包括一

个乘法器和一个积分器)、模数转换器(ADC)以及时钟同步电路组成,同时,指出芯片间无线信道服从莱斯分布;系统的性能取决于信噪比,而该信道内的噪声主要包含开关噪声与热噪声,且热噪声占主导地位;经过仿真得到芯片内/间误码性能随着传输速率、收发天线间距离以及噪声数目的增加而减少,随着频率的增加而增加。该系统的收发机结构原理图如图 3 所示。除了发射机,文献[18]还对应用于芯片间无线互连的 UWB 接收机进行了设计,其实物如图 4 所示,片上天线采用长度为 30.58 mm 的曲折偶极天线,接收机芯片面积为 0.54 mm²。

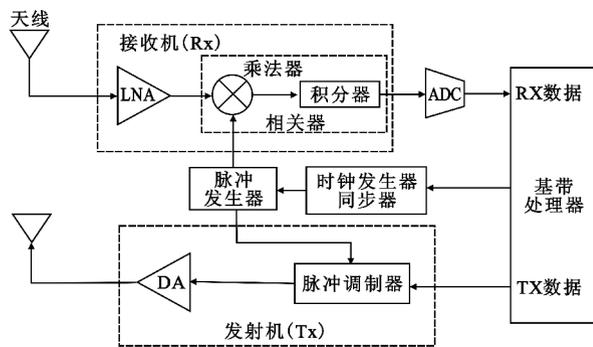


图 3 IR-UWB 收发机结构
Fig. 3 Architecture of IR-UWB wireless transceiver

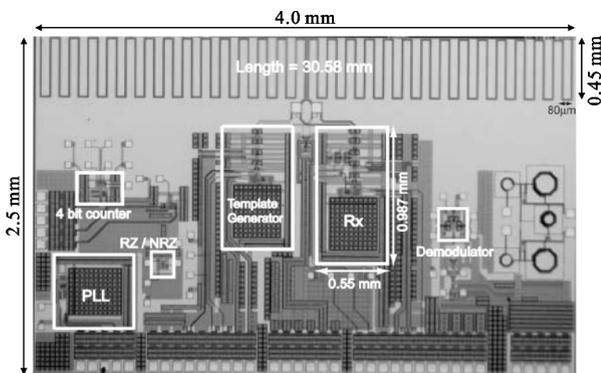


图 4 芯片间无线通信 UWB 接收机实物图
Fig. 4 UWB receiver for inter-chip wireless interconnection

文献[7]、[15]、[19-24]在上述发射机构架的基础上提出了各自实现芯片间无线连的 UWB 发射机电路的改进方案,使得数据传输速率从 50 Mb/s 提高到 10 Gb/s,发生了质的飞跃。其中张跃平^[7,15]实现了距离为 20 cm、数据速率为 2.5 Gb/s、采用 BPSK 调制、误码率小于 10⁻⁶和距离为 20 mm、数据速率为 3.33 Gb/s、采用 PPM 调制、误码率小于 10⁻⁶的无线互连;王和 Iniewski 采用 OOK 调制在 30 μm 实现了 5 Gb/s 无线传输^[19];吉川采用 BPSK 在 10 mm 距离

实现了5 Gb/s的无线通信^[20];IBM 采用平均脉冲宽度为152 ps、峰峰值为404 mV的 UWB 发射机,通过 BPSK 调制实现了5 Gb/s的信号传输^[21]。孟加拉大学则实现了10 Gb/s使用 BPSK 调制的芯片间无线互连^[22]。这些改进方案主要从 UWB 通信系统的脉冲波形、调制方式、多址技术、接收技术、实现容易度等方面进行了深入的研究,经过比较得到:当发射机的发射脉冲采用 ps 级高斯单脉冲、调制方式采用 BPSK、多址方式采用直扩或跳时技术、接收方式采用相关接收时,无线互连系统的性能将达到最优水平。此外,2013 年,吴信达等人验证了在 PCB 板封闭和未封闭环境下芯片间无线互连的性能,并得出在封闭环境下,片上天线传输增益将保持较高水平,有利于实现芯片内/间无线互连^[23]。

虽然 UWB 技术在现有芯片间无线互连系统中应用比较多,但目前其标准化进程还未完成,频率许可范围仍存在争议,还有一些技术问题需要不断完善,无疑限制了该技术的进一步发展。

2.1.2 60 GHz 毫米波系统

60 GHz 无线通信最初应用于军事领域,且在这一频段内可免费使用的带宽大约为 7 ~ 9 GHz,频带资源十分丰富。随着各国相继开放60 GHz附近连续频谱资源,极大地刺激了60 GHz无线通信系统的研究。此外,60 GHz还具有抗干扰能力强、体积小、速率高、保密性好等特点,使得60 GHz毫米波技术成为实现短距离高速率无线传输又一有效的手段。

60 GHz 集成电路芯片的研究和设计是60 GHz 短距离通信技术的研究热点。美国加州大学在2004 年对60 GHz毫米波系统进行建模研究^[25],并在2007 年采用0.13 μm CMOS 工艺设计了60 GHz 射频芯片^[26]。2006 年,美国 IBM 公司发布了世界首款 Si 基60 GHz全集成射频收发机芯片,其接收机部分的功耗仅有0.5 W,芯片尺寸为3.3 mm \times 1.7 mm^[27]。之后,一些学者对60 GHz系统下片上天线进行了设计并对相应的传输方案进行了研究^[28-31],研究表明在 WCAN 中使用60 GHz毫米波无线通信技术可以实现高速率、低开销的系统性能^[12,31]。2010 年,吉川教授采用基于40nm CMOS 工艺的毫米波电路实现了芯片间高速无线互连,并通过 ASK 调制和相关解调的方式在14 mm距离内实现了11 Gb/s、误码率低于 10^{-11} 的无线通信,收发机面积仅为0.13 mm²^[30]。在同年的 ISSCC 会议上,索尼公司又演示了使用60 GHz毫米波传输代替

电路板布线,该系统可在 20 ~ 60 mm的距离内确保 4.3 Gb/s的数据传输速度。

此外,2009 年5月,英特尔、微软、诺基亚、松下等15家公司联手成立了 WiGig(Wireless Gigabit)联盟,该联盟采用基于60 GHz毫米波技术可实现7 Gb/s以上的超高速无线传输,为短距离高速互连技术勾勒出了美好的前景。

我国也有多家科研院所和大学开始了毫米波技术的研究,其中中科院微电子所研制成功了60 GHz收发芯片,可以满足60 GHz高速通信射频前端的要求;东南大学毫米波国家重点实验室正在开展单片接收发前端的设计与研制;中国科学技术大学在毫米波器件、通信技术、测量技术等面取得了重大成果^[32]。

相比 UWB 技术,60 GHz毫米波技术具有更宽的有效带宽、更高的允许发射功率以及可靠性更强的超高速传输速率^[32],并且,随着60 GHz通信协议的研究和半导体工艺的发展,更具应用前景的60 GHz无线通信芯片将陆续问世。但是该系统仍然存在很多挑战,如自适应定向天线阵列设计难度大,信道损耗大,测试设备昂贵,设备体积较大等,为推广60 GHz毫米波技术的应用市场,这些问题亟待解决。

近年来也有学者致力于 UWB 与60 GHz毫米波技术相融合的研究^[33],旨在在高频段提高 UWB 系统的通信容量和传输速率,还能最大限度地降低功耗并节约成本,这将是基于片上天线实现的芯片内/间无线互连系统最大的发展趋势。

2.2 基于 AC 耦合的无线互连方式

实现芯片内/间无线互连的另一项技术是 AC 耦合无线互连技术,可在一个具有多管脚的集成电路中实现 Gb/s 的无线数据传输,而且 AC 耦合互连比传统的接触式互连有更好的可靠性、抗氧化和防磨损的性能,不仅能增加电路的使用寿命还提供稳定的信号传输。AC 耦合主要分为电容耦合和电感耦合。文献[34-35]提出了使用 AC 耦合技术在堆叠芯片间进行无线互连,从信号产生、电路设计、IC 布局、磁场分布、能耗分析和抗串扰措施等方面详细讨论了该高速数据通信系统的设计方案,并指出其性能、实现容易度比采用硅通孔(TSV)和 micro bumps 等接触式连接技术要优越。图5是带有埋藏焊块结构的 AC 耦合互连结构图^[36]。下面将具体介绍电容耦合和电感耦合技术。

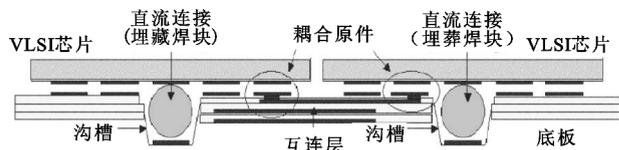


图 5 AC 耦合无线互连结构图

Fig. 5 AC coupling wireless interconnection structure

2.2.1 电容耦合

如图 6 所示,电容耦合互连要求形成电容结构的两个极板充分靠近,且芯片与芯片必须面对面精确堆叠,通过发射板发出的耦合信号驱动接收板上的芯片接收信号。1995 年,Salzman 最早提出在倒装芯片 MCM 设计中使用电容耦合代替导电接口^[37]。2002 年,Mick 实现了片对片电容耦合,可实现数据率为 4 Gb/s 的 NRZ 信号传输^[37]。2003 年,Kanda 使用一个 $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 的电容耦合电路实现了每引脚 1.27 Gb/s 的信号传输,其功耗为每引脚 3 mW^[38]。2006 年,罗磊等人在 5.6 cm 传输线上通过电容耦合实现了 3 Gb/s 的芯片无线互连^[39],误码率低至 10^{-12} ;2012 年,研究人员又实现了基于三维垂直电容耦合的芯片间无线互连系统,扩展了电容耦合技术的应用范围^[40]。

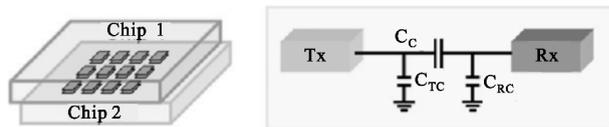


图 6 3D 电容耦合结构图

Fig. 6 3D capacitive coupling structure

但电容耦合互连受到通信片数的限制(2 片),而且还受到通信距离的限制。又由于电容耦合互连是一种电压驱动方式,当工艺尺寸减小时工作电压将降低,其数据传输会受到限制;而且,由于电容的面积较大,也很容易受到其他通道信号的干扰,将产生一系列串扰问题,因此限制了电容耦合无线互连技术的发展。

2.2.2 电感耦合

电感耦合主要通过是在芯片上形成多个缠绕多层布线的收发线圈,利用磁场耦合进行无线通信。相比电容耦合中最多只能叠层 2 个芯片,且芯片必须相向放置,电感耦合则可以在 3 个以上的叠层芯片之间进行通信,而且不必考虑芯片朝向问题。此外,电感耦合采用的是电流驱动方式,在电压很小时也可提高较高的传输功率,图 7 为其结构图。相比而言电感耦合技术较电容耦合技术优越。

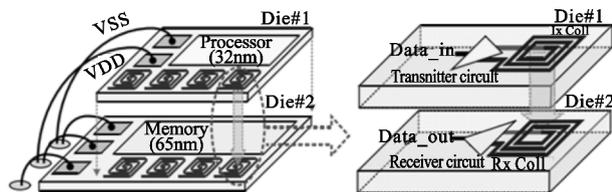


图 7 3D 电感耦合结构图

Fig. 7 3D inductively-coupled structure

电感耦合具有低功耗体积小性能高的特点,是实现无线互连一门很有前途的技术,国外对该技术的研究主要集中在日本庆应义塾大学和东京大学。2004 年,应庆大学黑田忠广教授首次提出利用电感耦合实现芯片间 1 Gb/s 的无线通信;2005 年,他们又在 2004 年的基础上采用动态电路和自预充电技术在无时钟的情况下实现了异步通信^[41]。在 2006 年,开发出一款采用 1 024 条并行数据链路的电感耦合收发器芯片,可在芯片内实现 1 Tb/s 的无线传输,采用 BPM 调制,功耗为 3 W,误码率为 10^{-13} ,且面积仅有 $1\ \text{mm}^2$ ^[42];同年,又提出了三维垂直的电感耦合互连系统,在 4 层芯片堆叠的近距离连接中,实现了数据速率为 195 Gb/s、功耗为 1.2 W 的高速低功耗的无线通信^[43]。2008 年,提出了耦合通道串行传输的方案,即利用两个正交差分电感在垂直方向进行重叠,实现了 2 Gb/s 的数据通信^[44]。2009 年,在 $15\ \mu\text{m}$ 内实现了 11 Gb/s 的数据通信,将文献[44]研究的每信道传输速率提高了 11 倍,通信距离也比之前提高 5 倍之多^[45]。2012 年,黑田又将电荷回收技术引入到电感耦合电路中,大大降低了无线互连所产生的功耗^[46]。而根据黑田教授的设计,今后使用该技术有望将芯片间传输速率提高至 10 Tb/s。

国内对此技术研究起步较晚,在 2011 年之后才开始研究,目前还处在初级研究阶段,参与研究的单位主要有中科大和西安电子科技大学。

3 比较与展望

通过上节对两类技术的分析介绍可以看出:相比于基于片上天线的无线互连技术,AC 耦合技术主要优点是传输性能高,成本低,可靠性高,速度快,功耗低,面积小,可拆卸,且不需 ESD 保护电路等,因此该技术要比基于片上天线的互连技术更具潜力。

文献[16,18]从近场远场的角度出发分析了基于电感耦合和基于片上天线无线互连系统的传输性能,实验得到当芯片间距离小于 $100\ \mu\text{m}$ 时,使用电

感耦合产生的信号具有高保真度且传输速率相对较高;当距离为0.1 mm时,采用电感耦合产生的 $|S_{21}|$ 值与采用片上天线产生的该值十分接近,两者传输性能相近;但当距离超过300 μm 时电感耦合产生的传输系数急剧下降,而采用片上天线则下降较小,将具有更好的传输性能。

对于 AC 耦合技术,除了受传输距离限制外,同样面临晶圆较薄、不同层次之间的器件对齐、粘接、散热不良等问题,因此,如何解决 AC 耦合传输范围限制及散热封装问题将是未来研究者亟待解决的问题。

对于基于片上天线的无线互连技术,由于采用的是集成天线,无需传输线便可与电路直接相连,也无需设定特定的输入阻抗,其结构紧凑,可靠性高,批量制作成本也相对较低,这为天线设计师提供了更多的设计空间。但受到金属电导率小、尺寸难缩小、介电常数高且衬底电阻率低等半导体工艺的限制,将明显降低片上天线的性能,特别是辐射效率和方向图,使其在设计时面临不小的挑战。因此,今后对片上天线进行设计时需要考虑电导率、尺寸、衬底电阻率等因素产生的影响。此外,片上天线附近的金属层会影响信号的传输性能,而且其封装技术一直是难题,如何克服并解决这些问题,将是今后基于片上天线进行芯片无线互连研究的重中之中。

综上,基于 AC 耦合与基于片上天线的芯片内/间无线互连技术各有千秋,虽然目前对两者的研究还不够成熟,仍有很多技术问题亟待解决,但其对实现高速、低功耗的短距离无线通信都有重要的贡献。AC 耦合技术的通信距离仅限于300 μm 以内,而使用片上天线则无通信距离的限制,因而我们可以得到:当芯片间距离小于100 μm (近场)时适合采用电感耦合和电容耦合技术进行局部芯片无线互连,而距离大于1 mm(远场)时,适合采用片上天线技术进行全局无线互连,在具体设计时,往往要结合两者各自的优势,以实现集成电路中某一局部及全局的高速无线互连。

4 结 论

为了解决超大规模集成电路布线复杂的问题,无线互连技术应运而生。本文主要介绍了实现芯片内/间无线互连的两大主流技术,一类是片上天线无线互连技术,一类是 AC 耦合无线互连技术,通过对两类技术进行分析与比较,得到在考虑到成本、功耗、传输性能时采用电容和电感耦合的 AC 耦合技

术来代替传统有线互连具有很大的潜力,但是该技术受到传输距离的限制,只有当芯片间距离小于100 μm 时才能发挥其最大的作用;而片上天线技术则突破了距离的限制,适合距离大于1 mm时的远场通信。所以在今后具体设计时,需结合两者各自的优势,实现集成电路中局部及全局的芯片高速无线互连。总体而言,本文对今后进行芯片内/间无线互连技术的应用研究具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] K K O, Kim K, Floyd B, et al. Inter and Intra-chip Wireless Clock Signal Distribution Using Microwaves: A Status of a Feasibility Study [C]//Proceedings of Government Microcircuit Applications Conference. [S. l.]: IEEE, 1999:306-309.
- [2] Chang M F, Roychowdhury V P, Zhang L Y, et al. RF/wireless interconnect for inter- and intra-chip communications [J]. Proceeding of the IEEE, 2001, 89(4):456-466.
- [3] Chang M F, Chien C, Xu Z W, et al. Advanced RF/baseband interconnect schemes for inter- and intra-ULSI communications [J]. IEEE Transactions on Electronic Devices, 2005, 52(7): 1271-1285.
- [4] Zhang Y P. Wireless chip area network: A new paradigm for antennas, RF (MM) IC's and communications [C]//Proceedings of 2004 Asia-Pacific Microwave Conference. [S. l.]: IEEE, 2004:1-7.
- [5] Zhang Y P. Bit-error-rate performance of intra-chip wireless interconnect system [J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(1): 39-41.
- [6] Sun M, Zhang Y P, Zheng G X, et al. Performance of intra-chip wireless interconnect using on-chip antennas and UWB radios [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(9):2756-2762.
- [7] Sun M, Zhang Y P. Performance of inter-chip RF-interconnect using CPW, capacitive coupler, and UWB transceiver [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2005, 53(9):2650-2655.
- [8] Lin J J, Wu H T, S Y, et al. Communication Using Antennas Fabricated in Silicon Integrated Circuits [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(8):1678-1687.
- [9] Kenneth K O, Kim K, Floyd B A, et al. On-Chip Antennas in Silicon ICs and Their Application [J]. IEEE Transactions on Electronic Devices, 2005, 52(7):1312-1323.
- [10] 江亮. 片上天线与射频/无线互连研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2011.
JIANG Liang, study of on-chip antenna and RF/wireless interconnect [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [11] Wang T L, Yang S H, Chen Y C. Design of the 40GHz UWB Transmitter for Wireless Intra/inter Chip Commu-

- nication [C] // Proceedings of ICSMIM 2012. Guilin: IEEE, 2012: 1830–1833.
- [12] Jia Z C, Li X H, Wang Y F, et al. 60 GHz millimeter-wave electromagnetic propagation characteristic for inter/intra chip wireless interconnection [C] // Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing. Kunming: IEEE, 2013: 1–5.
- [13] 何小威, 张民选, 李晋文. 用于无线互连的片上天线金属干扰分析与设计规则 [J]. 红外与毫米波学报, 2011 (5): 475–480.
HE Xiao-wei, ZHANG Min-xuan, LI Jin-wen. Metal interference analysis and design rules of on-chip antennas for wireless interconnection [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011 (5): 475–480. (in Chinese)
- [14] 何小威. 基于片上天线的高频全局时钟无线分布关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
HE Xiao-wei. Research on High Frequency Global Clock Wireless Distribution Technique Using On-chip Antennas [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [15] Zheng Y J, Zhang Y P, Tong Y. A novel wireless interconnect technology using impulse radio for inter-chip communications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2006, 54 (4): 1912–1920.
- [16] Kikkawa T. Wireless inter-chip interconnects [J]. ACM Microelectronic Engineering, 2011, 88 (5): 767–774.
- [17] Zhang Y P, Chen Z M, Sun M. Propagation Mechanisms of Radio Waves over Intra-Chip Channels with Integrated Antennas: Frequency – Domain Measurements and Time-Domain Analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55 (10): 2900–2906.
- [18] Sasaki N, Kimoto K, Kikkawa T, et al. A Single-Chip Ultra-Wideband Receiver With Silicon Integrated Antennas for Inter-Chip Wireless Interconnection [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44 (2): 382–393.
- [19] Wang Y J, Niknejad A M, Gaudet V, et al. A CMOS IR-UWB transceiver design for contact-less chip testing applications [J]. IEEE Transactions on Circuits Systems – IT: Express Briefs, 2008, 55 (4): 334–338.
- [20] Kubota S, Sasaki N, Kikkawa T, et al. 5Gbps BPSK CMOS transmitter with on-chip antenna using Gaussian monocycle pulses [C] // Proceedings of 2011 IEEE Custom Integrated Circuits Conference. [S. l.]: IEEE, 2011: 19–21.
- [21] Karim M N, Istiaque Hossain S M, Saha P K, et al. A high data rate 130nm CMOS IR-UWB transmitter for inter-chip wireless communication [C] // Proceedings of 2012 7th International Conference on Electrical & Computer Engineering. Dhaka: IEEE, 2012: 434–437.
- [22] Afroz S, Amir M F, Saha A, et al. A 10Gbps UWB transmitter for wireless inter-chip and intra-chip communication [C] // Proceedings of 2010 International Conference on Electrical and Computer Engineering. Dhaka: IEEE, 2010: 104–107.
- [23] Wu H T, Lin J J, Kenneth K O. Inter-chip wireless communication [C] // Proceedings of 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation. Gothenburg: IEEE, 2013: 3647–3649.
- [24] Kulkarni V V, Muqsith M, Niitsu k, et al. A 750 Mb/s, 12pJ/b, 6 – to – 10 GHz CMOS IR – UWB Transmitter With Embedded On-Chip Antenna [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44 (2): 394 – 403.
- [25] Doan C H, Emami S, Niknejad A M, et al. Design of CMOS for 60GHz applications [C]. Solid-State Circuits Conference, 2004. Digest of Technical Papers [C] // Proceedings of 2004 IEEE International ISSCC. [S. l.]: IEEE, 2004: 440–538.
- [26] Emami S, Doan CH, Niknejad A M, et al. A Highly Integrated 60GHz CMOS Front-End Receiver [C] // Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, CA: IEEE, 2007: 190–191.
- [27] 何仲夏. 60GHz 射频芯片——无线通信学术和产业界研究的新热点 [J]. 前沿科学, 2010, 4 (2): 50–56.
HE Zhong-xia. Wireless communication chipsets on 60GHz—the research hotspot of academe and industry [J]. Frontier Science, 2010, 4 (2): 50–56. (in Chinese)
- [28] Yeh H H. Developments of 60GHz antenna and wireless interconnect inside multi-chip module for parallel processor system [D]. Tucson, AZ: University of Arizona, 2013.
- [29] Yeh H H, Melde K L. Development of 60-GHz Wireless Interconnects for Interchip Data Transmission [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 3 (11): 1946–1952.
- [30] Kawasaki K, Akiyama Y, Komori K, et al. A Millimeter-Wave Intra-Connect Solution [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45 (12): 2655–2666.
- [31] Fujishima M. Short-Millimeter-Wave CMOS Design for Ultrahigh Speed Wireless Communication [C] // Proceedings of 2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. La Jolla, CA: IEEE, 2012: 1–4.
- [32] 王静, 杨旭, 莫亭亭. 60GHz 无线通信研究现状和发展趋势 [J]. 信息技术, 2008 (3): 140–144.
WANG J, YANG Xu, MO Ting-ting. Status and development of 60 GHz wireless communications [J]. Information Technology, 2008 (3): 140–144. (in Chinese)
- [33] Stallo C, Mukherjee S, Cianca E, et al. IR – UWB for high bit rate communications beyond 60 GHz [C] // Proceedings of 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Istanbul: IEEE, 2010: 2597–2602.
- [34] Kuroda T, Miura N. Perspective of Low-Power and High

- Speed Wireless Inter–Chip Communications for SiP Integration [C] // Proceedings of the 36th European Solid–State Device Research Conference. Montreux; IEEE, 2006; 3–6.
- [35] Sang W H. Wireless Interconnect using Inductive Coupling in 3D–ICs [D]. Ann Arbor; University of Michigan, 2012.
- [36] Mick S, Wilson J, Franzon P. 4 Gbps high–density AC coupled interconnection [C] // Proceedings of 2002 IEEE Custom Integrated Circuits Conference. [S. l.] : IEEE, 2002; 133–140.
- [37] Kühn S A, Kleiner M B, Thewes R, et al. Vertical signal transmission in three–dimensional integrated circuits by capacitive coupling [C] // Proceedings of 1995 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle, WA; IEEE, 1995; 37–40.
- [38] Kanda K, Antono D D, Ishida K, et al. 1.27 Gb/s/pin 3 mW/pin wireless superconnect (WSC) interface scheme [C] // Proceedings of 2003 IEEE International Solid–state Circuits Conference. [S. l.] : IEEE, 2003; 186–187.
- [39] Luo L, Wilson J M, Xu J, et al. 3Gb/s AC coupled chip–to–chip communication using a low swing pulse receiver [J]. IEEE Journal of Solid–State Circuits, 2006, 41 (1) : 287–296.
- [40] Myat T L A, Lim E, Yoshikawa T, et al. Design of Simultaneous Bi–Directional Transceivers Utilizing Capacitive Coupling for 3DICs in Face–to–Face Configuration [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2012, 2 (2) : 257–265.
- [41] Sasaki M, Iwata A. A 0.95mW/1.0Gbps spiral–inductor based wireless chip–interconnect with asynchronous communication scheme [C] // Proceedings of 2005 VLSI Circuits. [S. l.] : IEEE, 2005; 348–351.
- [42] Miura N, Kuroda T. A 1Tb/s 3W Inductive–Coupling Transceiver Chip [C] // Proceedings of Asia and South Pacific Design Automation Conference. Yokohama; IEEE, 2007; 92–93.
- [43] Miura N, Sakurai T, Kuroda T, et al. A 195Gb/s 1.2W inductive inter–chip wireless superconnect with transmit power control scheme for 3–D–stacked system in a package [J]. IEEE Journal of Solid–State Circuits, 2006, 41 (1) : 23–34.
- [44] Yoshida Y, Miura N, Kuroda T. A 2Gb/s Bi–Directional Inter–Chip Data Transceiver With Differential Inductors for High Density Inductive Channel Array [J]. IEEE Journal of Solid–State Circuits, 2008, 43 (11) : 2363–2369.
- [45] Pmiura N, Kohama Y, Kuroda T, et al. A High–Speed Inductive Coupling Link With Burst Transmission [J]. IEEE Journal of Solid–State Circuits, 2009, 44 (3) : 947–955.
- [46] Niitsu K, Kuroda T, Kawai S, et al. A 65fJ/b Inter–Chip Inductive–Coupling Data Transceivers Using Charge–Recycling Technique for Low–Power Inter–Chip Communication in 3–D System Integration [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2012, 20 (7) : 1285–1294.

作者简介:



王宜文 (1990—), 男, 甘肃陇西人, 北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为射频通信及高速电路传输;

WANG Yi-wen was born in Longxi, Gansu Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns RF communications and high–speed circuit transmission.

Email: wywbuct@126.com

李学华 (1977—), 女, 湖南长沙人, 副教授、硕士生导师, 主要从事无线通信关键技术、高速电路信号完整性等方面的研究。

LI Xue-hua was born in Changsha, Hunan Province, in 1974. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research interests include wireless communication technology and signal integrity in high–speed circuit.

Email: lixuehua@bistu.edu.cn