

封装天线技术发展历程回顾

A Review of the Development of Antenna-in-Package Technology

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 06-0041-09

摘要: 封装天线(AiP)是基于封装材料与工艺,将天线与芯片集成在封装内,实现系统级无线功能的一门技术。AiP技术顺应了硅基半导体工艺集成度提高的潮流,为系统级无线芯片提供了良好的天线解决方案,因而深受广大芯片及封装制造商的青睐。AiP技术很好地兼顾了天线性能、成本及体积,代表着近年来天线技术的重要成就。另外,AiP技术将天线触角伸向集成电路(IC)、封装、材料与工艺等领域,倡导多学科协同设计与系统级优化。AiP技术已逐渐趋于成熟,在技术方面有很多论文和专利可供参考,但还没有一篇专门回顾AiP技术发展历程及其背后的故事,文章旨在填补这一方面的空白。将以AiP技术发展过程中起到重要推动作用的经典设计为例,加上自己亲身经历的故事,为大家勾勒出AiP技术发展的来龙去脉。

关键词: 封装天线;射频芯片(RFIC);移动通信;物联网

Abstract: Antenna-in-Package (AiP) technology is an antenna solution technology that implements an antenna or antennas on (or in) an integrated circuit (IC) package that can carry a highly-integrated radio or radar transceiver die (or dies). Keeping with the trend of silicon semiconductor technologies, AiP technology provides elegant antenna solutions to radio-frequency system-on-chip. Hence, AiP technology has been widely adopted by chip makers for single-chip radios and radars. Having well balanced among performance, size, and cost, AiP technology represents an important antenna technology achievement in recent years. In addition, AiP knowledge is permeating from the antenna to packaging, IC, material, microwave, and wireless communication fields, AiP technology is getting matured. There are literally many papers and patents devoted to AiP technology. However, there is no paper about its development history. This paper aims to fill this void by reviewing those important design examples that have driven the development of AiP technology as we know today.

Key words: AiP; radio frequency IC (RFIC); mobile communications; Internet of things

无线通信发展迅速,4G的商用才刚刚铺开,5G研发的热潮已迎面扑来。在未来的几年里,5G旨在实现低时延、高速率、大容量万物互联,将会彻底改变我们同世界互动的方式。为了使5G的愿景变为现实,必须突破几个关键技术藩篱,其中一个核心技术的难题就与我们的领域

收稿日期: 2017-10-25
网络出版日期: 2017-11-13

息息相关,即如何利用大规模多输入多输出(MIMO)天线阵列实现波束成形、扫描、追踪、锁定来有效对抗毫米波移动信道的路径损耗^[1]。

汽车雷达在改善驾车安全的同时,也提升了全新的驾车体验。目前,汽车雷达主要工作在24 GHz和77 GHz的窄频带范围,仅起到预警及辅助驾驶的作用。未来汽车雷达将朝着工作在79 GHz宽频带发展,利

张跃平/ZHANG Yueping

(南洋理工大学,新加坡 639798)
(Nanyang Technological University,
Singapore 639798, Singapore)

用4 GHz带宽获得更高的空间分辨率,甚至实现无人驾驶^[2]。2015年,谷歌手势雷达一经问世,便立刻造成全球轰动。手势雷达工作在60 GHz频带,跟踪人手移动及其变化,非常适合嵌入在可穿戴设备、手机和其他电子产品中作为用户界面。

消费类电子产品的硬件主要是通过系统级芯片(SoC)和系统级封装(SiP)技术来实现。SoC技术通过半导体工艺在同一个芯片上集成实现系统功能的各种电路。而SiP技术则是通过封装工艺将各个功能模块集成在一个封装内^[3]。尽管SoC技术可以以更低的系统成本来提高系统的可靠性和功能,但是由于使用相同的材料和工艺,没办法使每个类型的电路性能达到最优,进而导致系统性能降低和系统功耗增加等问题。相反,SiP技术可以提升系统性能,降低系统功耗,但是由于功能模块和封装制作采用不同的材料和工艺,会导致系统的可靠性降低和系统成本增加。

天线是无线系统中的重要部件,有分离和集成两种形式。分离天线司空见惯^[4],集成天线也已悄悄地进入到我们的视线。集成天线包括片上天线(AoC)和封装天线(AiP)两大类^[5]。AoC技术通过半导体材料与

工艺将天线与其他电路集成在同一个芯片上^[6-10]。考虑到成本和性能, AoC 技术更适用于太赫兹频段^[11-13]。AiP 技术是通过封装材料与工艺将天线集成在携带芯片的封装内。AiP 技术很好地兼顾了天线性能、成本及体积,代表着近年来天线技术重大成就,因而深受广大芯片及封装制造商的青睐。如今几乎所有的 60 GHz 无线通信和手势雷达芯片都采用了 AiP 技术^[14-24]。除此之外,在 79 GHz 汽车雷达^[2], 94 GHz 相控阵天线, 122 GHz、145 GHz 和 160 GHz 的传感器,以及 300 GHz 无线链接芯片中都可以找到 AiP 技术的身影^[25-30]。毋庸置疑, AiP 技术也将会为 5G 毫米波移动通信系统提供很好的天线解决方案。

很显然 AoC 和 AiP 分别属于上述 SoC 和 SiP 概念的范畴,那么我们为什么要将它们从 SoC 和 SiP 技术中明确区分开来呢? 原因其实很简单,就是为了强调它们独有的辐射特性。关于 AoC 技术,需另辟专文详述,本文仅拟论及 AiP 技术。尽管 AiP 技术方面的论文和专利很多,但还没有一篇用于回顾 AiP 技术发展历程及其背后故事,本文旨在填补这一空白。

1 早期与蓝牙无线技术一起发芽

AiP 技术早在该术语被提出和普及之前就已经存在。AiP 技术继承与发扬了微带天线、多芯片电路模块及瓦片式相控阵结构的集成概念。它的发展主要得益于市场的巨大需求,硅基半导体工艺集成度的提高,驱动了研究者自 90 年代末不断深入探索在芯片封装上集成单个或多个天线。

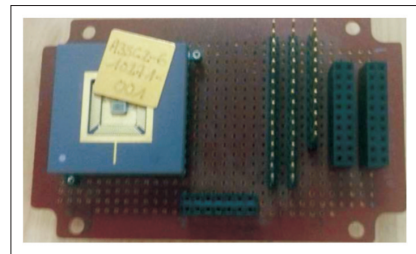
我于 1993 年初荣幸地成为香港中文大学国际知名卫星天线专家黄振峰博士课题组成员,有机会参与制造和测试多款微带天线。通过使用一种刚问世不久的低损耗高介电常数陶瓷材料,我们成功地将 900 MHz 微带天线小型化到只有指甲大小,利用几个小型化天线就可以实现手

机天线辐射方向图成形,减少向人体侧辐射。研究成果不知怎样引起了时任香港中文大学校长高锟教授的关注,有一天召集我们到他办公室向他汇报。然而,我们关于实现天线小型化的研究似乎没有给高锟教授留下深刻印象。他打比喻说:将 4 条腿的长凳缩小到 3 条腿的板凳只是进化而已,大学应该尝试做一些革命性的研究。高锟教授获 2009 年度诺贝尔物理学奖,也许高锟教授这样伟大的科学家更关注研究的科学价值,而我们则更强调潜在的应用。幸运的是,我们关于天线小型化的工作在天线领域受到欢迎,并在 1995 年电气与电子工程师协会(IEEE)天线与传播国际研讨会上与摩托罗拉公司设计的类似天线在同一会场宣读^[31],直接促进了陶瓷贴片天线的发展。1996 年,我加入了香港城市大学国际著名的天线实验室从事介质谐振器天线研究。偶然的机会我在香港城市大学遇到了材料科学家李国源博士,他热情地向介绍了他研究的低温共烧陶瓷(LTCC)材料与工艺,并用一块可以表贴集成电路内有埋置去耦电容的 LTCC 基板讲解了厚膜电路的优缺点,临别时还慷慨地向我赠送了好多块他烧好的 LTCC 基板用于天线研究。这些 LTCC 基板除了后来用于天线试验毁坏的以外,剩余的我还保留着。李国源博士现在是华南理工大学教授。1998 年,我离开任教的香港大学前往新加坡南洋理工大学就职。令我惊讶的是,我被分派到电路与系统系而非通信工程系,后者有几位教授及先进的实验室从事天线与电磁波传播研究。在参观集成电路实验室时,我看到了图 1 所示的装置,就问实验室一个研究生那是微带天线吗? 研究生回答:“不,那不是,那是一个集成电路芯片。”不久,电路与系统系启动了“片上软件无线电”的战略性研究项目,我的任务是为这个项目开发天线技术。因为对图 1 所示的集成电路芯片同微

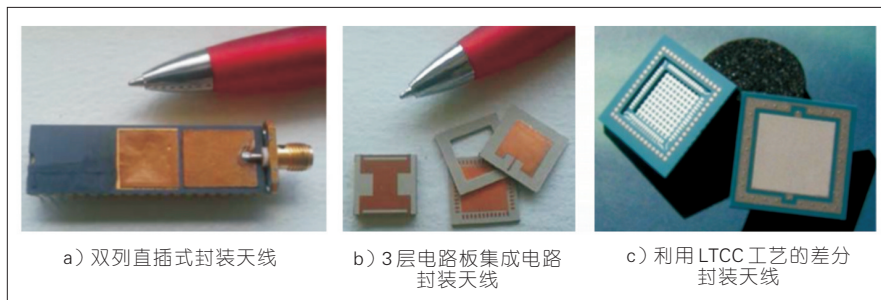
带天线结构相似性的着迷,预测到未来有可能产生一种革命性的天线解决方案,我很快决定研究图 1 所示集成电路芯片作为天线的可行性^[32]。

首先,我找来许多现成的陶瓷封装集成电路芯片来进行天线及电路实验,研究它们之间的相互影响。图 2a)就是当时实验过的一个在双列直插式封装上实现的 2.4 GHz 天线。后来发现利用现成的陶瓷封装集成电路芯片来进行天线实验有很大的局限性,于是决定利用印刷电路板(PCB)工艺加工集成电路封装结构模型且印制有天线。图 2b)所示的集成电路封装结构模型利用了 3 层电路板,天线印制在顶层板上,信号线及封装地在低层板上实现,中间层中空,夹在顶、低层之间形成腔体来携带裸芯片。顶层板印制了 5.2 GHz 微带天线,如果顶层板换成左下角所示的板,则模拟集成电路封装结构是一款集成有 2.4 GHz 及 5.2 GHz 双频微带天线。上述在现成的陶瓷封装集成电路芯片和 PCB 加工的模型上尝试,都获得了令人满意的实验结果。受其鼓舞,我和学生林伟、薛阳、王珺珺 2003 年利用 LTCC 工艺实现了多款真正工业意义上的封装天线^[33]。图 2c)是一款利用 LTCC 工艺为蓝牙芯片开发的差分封装天线。

与此同时,英国伯明翰大学 C. T. SONG, P. S. HALL 和 H. GHAFOURI-SHIRAZ 提出了两个有关天线封装的概念。第 1 个概念突出体现了将小天线埋入到芯片封装材料中,然后在埋入式天线近距离处放置一个寄生单元,从而改善封装天线的低增益并



▲ 图 1 拥有密封金属环及盖的陶瓷封装集成电路芯片



▲图2 封装天线技术的进化

增加带宽。第2个概念建议在半导体芯片上实现射频前端电路及电小馈电天线,并在馈电天线上方增加寄生单元并充当封装顶盖,密封整个芯片^[34]。HALL教授学识渊博、谦虚低调,是国际天线界一位德高望重的学者。为表彰他在微带天线方面所做出的杰出贡献,美国IEEE天线与传播学会授予他2012年the John Kraus Antenna Award,英国工程技术学会(IET)授予他2013年度the James R. James Lifetime Achievement Award。

几乎同时,封装工程师也在尝试解决相同的问题。D. J. MATHEWS等人^[35]申报了一项内置电磁防护罩和天线的用于蓝牙芯片封装的发明专利。美国佐治亚理工学院K. T. LIM等人设法在封装系统(SoP)上集成射频无源器件、天线和有源芯片,以增强封装系统的整体性能和增加更多功能^[36]。比利时校际微电子中心S. BREBELS等人也实现了集成有天线的SoP^[37]。但是,由于已经有SiP的概念,SoP的概念未被广泛接受。

稍后香港城市大学梁国华教授及新加坡微电子研究所A. P. POPOV博士分别独立发明基于介质谐振器天线的AiP技术^[38-39]。梁国华教授90年代初同我相识在香港中文大学微波实验室。当时他博士即将毕业。据说梁国华博士论文答辩时,答辩委员会主席认为他提交给中文大学的博士论文等于其他学校的两份博士论文。梁国华教授后来被任命为IEEE天线与传播汇刊的主编。梁国华教授的博士导师实际上是陆贵文

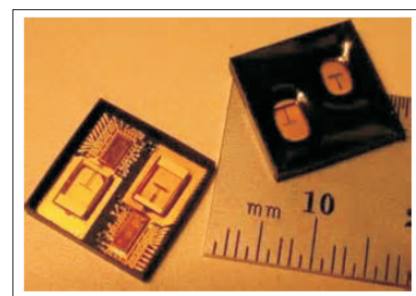
教授,陆贵文教授获得了2017年度IEEE天线与传播学会the John Kraus Antenna Award,另外曾长期在香港中文大学及城市大学工作过的李敏方教授也于2009年获此殊荣,微带天线的研究至少已产生了3位获奖者。

2 中期与60 GHz无线技术及毫米波雷达一起成长

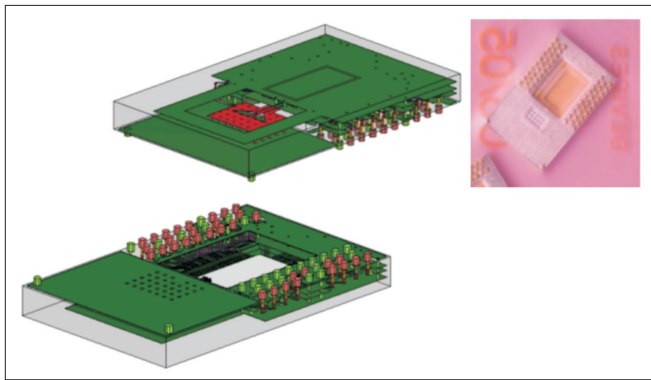
2005年3月初,在新加坡举办的第1届小型天线国际研讨会上,我第一次见到了来自IBM Thomas J. Watson Research Center的Brian GAUCHER先生和刘兑现博士,并邀请他们访问了南洋理工大学。Brian就IBM的60 GHz SiGe芯片、天线、封装和测试设备做了学术报告。图3为IBM用于概念验证的60 GHz芯片照片。SiGe裸芯片通过倒装焊技术与天线连接、封装成为栅格阵列模块。由于需要在封装内加金属墙及封装上开天线窗口,因此该概念封装天线不易大批量生产。我向Brian GAUCHER先生和刘兑现博士简要介绍了几款基于LTCC工艺适合批量生产的2.4 GHz和5.2 GHz频段的封装天线。双方当场就达成了基于LTCC工艺合作开发用于IBM 60 GHz SiGe芯片组的封装天线的可行性研究计划。我和我的学生孙梅博士负责设计工作,邀请新加坡制造技术研究所(SIMTech)的一个研究小组负责LTCC加工,刘兑现博士负责评估并向我反馈测试结果。

早期在封装上集成天线,所用英文名称五花八门。随着开发的深入

我意识到一个专门响亮的名称非常有利于去推广它。2006年起,我首先使用Antenna-in-Package的名称去推广这一新颖的天线解决方案^[40]。采用Antenna-in-Package(AiP)而不是Antenna-on-Package(AoP)主要考量是前者更有可能使天线靠近芯片,减少互连损耗^[40]。低插损的天线与芯片互连是毫米波AiP技术的一大挑战。2006年3月初,我参加了在美国纽约举办的第二届小型天线国际研讨会,并访问了IBM Thomas J. Watson Research Center,与刘兑现、U.R. PFEIFFER和Janusz GRZYB博士讨论了AiP技术问题。很遗憾,这次访问并没有见到已于2004年离开IBM的Thomas ZWICK博士。Thomas在开发探针式毫米波集成天线测试系统及AiP键合线互连方面做出了突出贡献。此次会面增强了双方合作,加速了AiP技术的发展。图4展示了设计阶段获取的截图和刘兑现博士评测的基于LTCC加工的AiP样品。这一样品集成了共面波导馈线、准腔体、定向保护环、基板材料调制的槽天线。天线输入阻抗故意设计成容性的与芯片通过感性的键合线互连,结果令人满意,并在2007年3月英国剑桥举办的第3届小型天线国际研讨会上被授予最佳论文奖^[41]。事实上,在赴英参会之前我在一次内部会议上就对孙梅博士及新加坡制造技术研究所的合作者预测到60 GHz AiP技术论文会获奖。而且,还有一件有趣的事情,那就是在剑桥大学的演讲厅等待颁奖时,我在一张会议用纸上



▲图3 IBM公司用于概念验证的60 GHz SiGe芯片、天线、封装模块照片



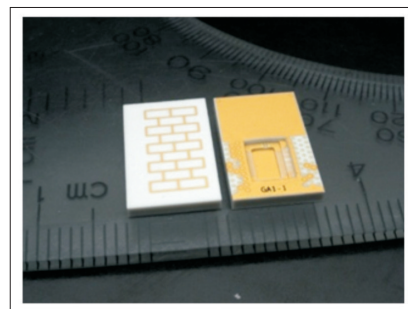
◀图4 LTCC 60 GHz AiP设计时截图及实物照片

写了个便条,再一次预测有关AiP的工作将会赢得更高奖项。我也请刘兑现博士在便条上签了字,便条至今由我保管。果然不出所料,2012年我、孙梅、刘兑现和陆亿泷博士荣获当年IEEE天线与传播学会谢昆诺夫论文奖^[42]。这是该奖项自1957年设立以来,亚洲研究者首次及至今唯一获此殊荣。谢昆诺夫是国际著名的电磁理论学家。他于1920年代初期从前苏联经中国移居美国。他在工程电磁场、天线理论、波导理论、电磁屏蔽等方面提出了许多定理、原理、概念、方法,做出了重要的贡献。他使应用数学焕发出光彩,许多工作带有奠基性质。就经典电动力学方法(即量子理论以外领域)而言,中国著名物理学家黄志询先生认为可以把他比作20世纪的麦克斯韦^[43]。

John KRAUS是对天线做出卓越贡献的老一辈天线专家。IEEE天线与传播学会的the John Kraus Antenna Award就是用他名字命名的。KRAUS发明的螺旋天线应用非常广泛,但他发明的栅格天线却鲜有应用^[44]。孙梅博士在2008年发现栅格天线的网状结构非常适合于LTCC工艺,故将其应用于60 GHz AiP设计中^[45]。紧接着,Wolfgang MENZEL等人将其应用于79 GHz^[2],陈梓浩等人将其应用于94 GHz^[46],THOMAS等人将其应用于122 GHz^[47],张冰等人将其应用在了145 GHz AiP设计中^[48]。几乎快被人遗忘的栅格天线得以在AiP技术中发扬光大。MENZEL教授是微带漏波

天线的发明者,曾访问南洋理工大学并做了有关车载雷达中毫米波天线的邀请报告,期间与我们交流了关于栅格天线的设计方法。图5是孙梅等人利用LTCC工艺为IBM 60 GHz SiGe接收机裸芯片设计的AiP。它采用了键合线球栅阵列(BGA)封装结构集成了14个网格的栅格天线,尺寸为 $13.5 \times 8 \times 1.265 \text{ mm}^3$ 。刘兑现博士测试了AiP的天线性能并给我发送了电子邮件,邮件中只写了两个字“excellent results”。确实,结果表明栅格天线具有频带宽、辐射效率高的优点,且在57~64 GHz频率范围内主波束辐射都在天顶方向,60 GHz频段最大增益可达到14.5 dBi^[49],代表了当时最好的60 GHz AiP设计。

AiP技术的成功主要归功于人们重拾了对60 GHz无线系统的研究与开发兴趣。2007年,AiP技术发展进入新阶段,IEEE开始着手制订60 GHz频带标准,很多企业开始重视60GHz芯片及封装天线的研发。美国Sibeam公司第一个将60 GHz天线阵与互补金属氧化物半导体(CMOS)裸

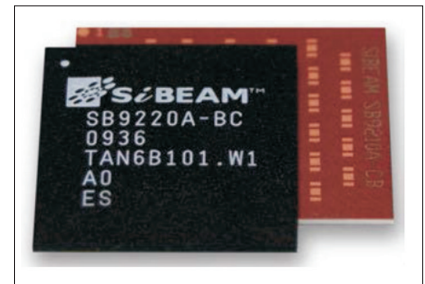


▲图5 LTCC 60 GHz AiP实物照片

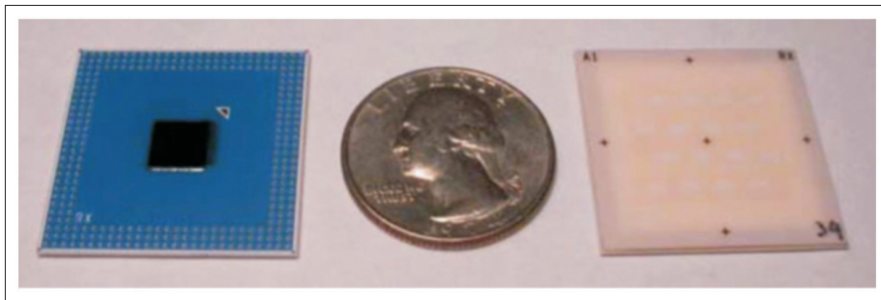
芯片利用LTCC工艺集成在一起,引入消费市场,用于高清视频内容的无线传输。图6是Sibeam公司60 GHz芯片的照片,集成的微带天线阵清晰可见。值得一提的是,我在2005年9月美国加州圣克克拉市举办的天线系统和短程无线会议上做主题演讲后,休息之余,与Sibeam的创始人之一、毫米波CMOS电路先驱者C. H. DOAN先生热情地讨论了一些有关基于LTCC封装天线集成的问题^[50]。

2010年,美国IBM公司公布了用于60 GHz相控阵系统的完整AiP方案^[51]。如图7所示,基于LTCC工艺,16个矩形微带天线被集成在BGA封装中,发射或接收裸芯片通过倒装焊技术与AiP相连。AiP尺寸为 $28 \times 28 \times 1.47 \text{ mm}^3$,在4个IEEE 802.15.3c通道中,天线单元增益均可达到5 dBi。2011年,IBM还展示了另外一个用于60 GHz相控阵系统的基于有机材料高密度互连工艺(HDI)的完整AiP方案^[52]。值得一提的是,IBM与封装材料及工艺商通过努力实现了在AiP中嵌入空气腔体来改善微带天线阻抗及辐射特性。

2011年,韩国Samsung公司发表了用于60 GHz相控阵系统的完整AiP方案^[53]。如图8所示,基于LTCC工艺,24个圆形微带天线被集成在BGA封装中,发射或接收裸芯片可以通过倒装焊技术与AiP相连。为了避免像IBM公司那样在AiP中嵌入空气腔体来改善微带天线阻抗及辐射特性可能带来的可靠性问题,Samsung公司AiP设计采用了圆形叠



▲图6 Sibeam公司60 GHz LTCC封装天线CMOS芯片实物照片



▲图7 IBM公司 60 GHz LTCC封装天线 SiGe 芯片实物照片

层微带天线。AiP 的尺寸为 $20 \times 15 \times 1.02 \text{ mm}^3$, 分别实现了 9 GHz 带宽及 14.5 dBi 增益。Samsung 公司还分别在 2012 和 2013 年提出了用于 60 GHz 相控阵系统的基于低成本 FR4 材料与 HDI 工艺的完整 AiP 方案^[19,21]。叠层微带天线有助于满足 HDI 工艺对金属密度的要求。Samsung 公司 AiP 技术主要贡献者是一位名叫 Wonbin HONG 的年轻学者, 我们经常通过电子邮件及在国际学术会议上交流 AiP 技术方面的心得。后来 HONG 博士率先报道了 28 GHz 5G 手机天线方面的工作, 引起天线界的关注。

2012 年, 美国英特尔 (Intel) 公司发表了用于 60 GHz 相控阵系统的完整 AiP 方案^[53]。如图 9 所示, 基于 LTCC 工艺, 36 个矩形微带天线 (含 4 个哑元) 被集成在 BGA 封装中, 收发裸芯片通过倒装焊技术与 AiP 相连。AiP 的尺寸为 $25 \times 25 \times 1.4 \text{ mm}^3$, 在 60 GHz 频段, $\pm 30^\circ$ 扫描范围内增益达 19 dBi。针对 60 GHz 相控阵系统, 英特尔还分别在 2013 年、2014 年和 2015 年提出利用 PCB^[57]、玻璃^[55] 和液晶聚合物 (LCP)^[56-57] 实现低成本低损耗 AiP 解决方案。

2015 年, 美国谷歌 (Google) 公司首次公开亮相的手势雷达名震四海。手势雷达使用 60 GHz 信号来快速追踪人手移动, 精度可以达到亚毫米级。也许对我而言, 最振奋人心的就是 AiP 技术被应用于手势雷达芯片, 如图 10 所示, 德国英飞凌 (Infineon) 公司利用嵌入式晶圆级封装 (eWLB) 技术, 在 AiP 中集成了 1 个

60 GHz SiGe 收发裸芯片、2 个用于发射的差分微带天线和 4 个用于接收的单端口微带天线^[24]。AiP 的尺寸为 $14 \times 14 \times 0.8 \text{ mm}^3$, 显而易见, 其尺寸已经足够小, 可用于穿戴设备。并且对于智能手表、手机和其他装置而言, 手势雷达作为用户界面潜力巨大。

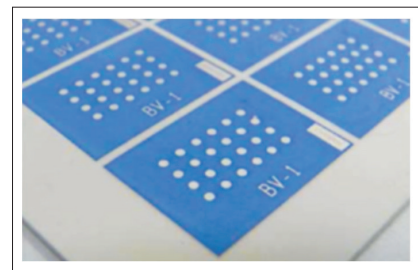
几乎所有主要的日本电子公司都开发出了适用于 60 GHz 应用的芯片组和 AiP 方案。图 11 所示的是日本 NEC 公司早期开发的 60 GHz 接收机模块, 以及 NTT 公司近期开发的 60 GHz 收发模块。两家公司分别用不同的 LTCC 工艺在模块中集成了缝隙天线及抛物面天线^[58-59]。

像 AiP 技术用于谷歌手势雷达中一样, 英飞凌公司也为 77 GHz 车载雷达研制了 SiGe 芯片组及基于 eWLB 工艺的 AiP 技术, 并自 2016 年 6 月以来就同比利时校际微电子中心合作开发基于 28 nm CMOS 的芯片组和基于低成本低损耗 PCB 工艺的 AiP 技术, 用于 79 GHz 车载雷达^[60]。比利时校际微电子中心负责 AiP 技术开发的是 Guy A. E. VANDENBOSCH 教授。VANDENBOSCH 教授每次来中国讲学, 都会在演讲前向学生们赠送著

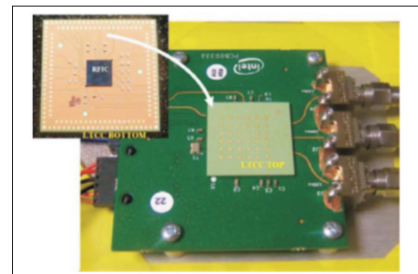
名的比利时巧克力, 很受学生们欢迎。IBM 公司将其 AiP 技术的工作频段推进到 94 GHz, 并在 2014 年实现了用于 W 波段的可扩展相控阵系统的 SiGe 芯片及完整 AiP 解决方案^[61]。如图 12 所示, 该 AiP 设计采用多层有机基板及 HDI 集成了 64 个双极化叠层微带天线和 36 个哑元, 其尺寸为 $16.2 \times 16.2 \times 0.75 \text{ mm}^3$ 。

在欧盟科技委员会的赞助下, 2009 年 11 月—2013 年 5 月, SUCCESS 合作团体基于 SiGe 工艺开发了如图 13 所示的 122 GHz 及 145 GHz 雷达芯片, 且用键合线将它们分别与天线阵列集成在 8 mm 见方的扁平无引脚 (QFN) 封装内。

图 14 是奥德利 JKU 在欧盟科技



▲图8 Samsung公司集成了24个天线的AiP实物照片



▲图9 Intel公司 60 GHz LTCC封装天线 CMOS 芯片实物照片

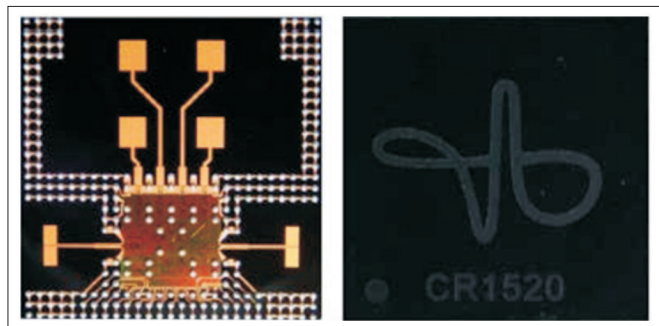
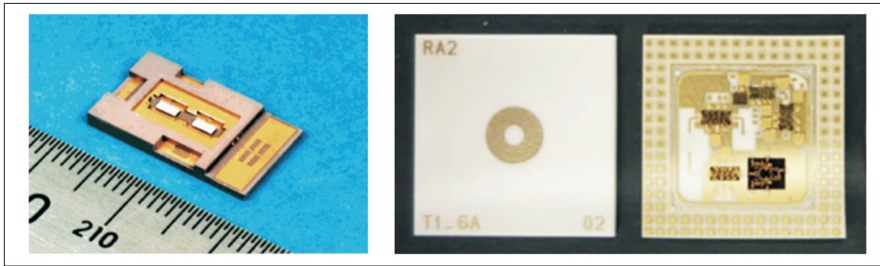
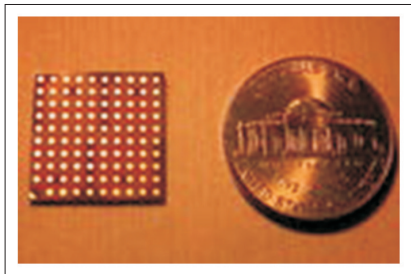


图 10 ▶
Google 公司 60 GHz
eWLB 封装天线 SiGe
芯片实物照片



▲图 11 NEC 公司和 NTT 公司 60 GHz LTCC 封装天线 GaAs 芯片实物照片



▲图 12 IBM 公司 94 GHz HDI 封装天线 SiGe 芯片实物照片

委员会、英飞凌等公司赞助下于 2013 年 10 月推出的基于 SiGe 工艺开发的 160 GHz 雷达芯片,基于 eWLB 工艺将芯片与天线阵集成在 BGA 封装内^[62]。

3 近期助力太赫兹、物联网和 5G 移动通信发展

太赫兹技术是改变未来世界的重要技术,已引起各国政府的重视。在日本政府的支持下,NTT、NICT 和 FUJITSU 都参与到世界上第一个使用 300 GHz 无线链接的收发信机研发工作中。NTT 成功研发了如图 15 所示用于 300 GHz 发射机芯片的 AiP 结构。该 AiP 设计采用 LTCC 工艺,其中喇叭天线尺寸为 $5 \times 5 \times 2.7 \text{ mm}^3$,最大增益为 18 dBi,带宽达 100 GHz^[63-65]。

物联网(IoT)是互联网发展的新阶段,它通过智能感知、识别技术与普适计算等手段实现万物互联。最近,美国 Silicon Labs 公司发布了如图 16 所示的世界上最小的蓝牙无线系统,它的封装内集成有天线,尺寸只有 $6.5 \times 6.5 \times 1.5 \text{ mm}^3$,这使得设计真正紧凑的物联

网络设备变得可行。

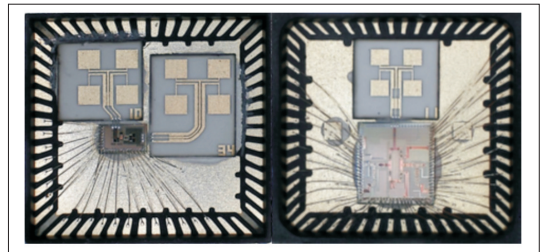
AiP 技术是近期国际上 5G 移动通信研发的一个重要课题,难点是如何实现高辐射效率及低成本量产。图 17 为 IBM 应用于未来 5G 基站 28 GHz AiP 照片^[66]。该 AiP 包含 4 个单片 SiGe 裸芯片和 64 个双极化天线,尺寸约为 $7.1 \times 7.1 \text{ cm}^2$ 。刘兑现博士是 IBM 公司所有 AiP 设计背后的灵魂人物,他指出相控阵列天线的并行双极化运作方式能够形成两个波束支持低于 1.4° 的波束扫描精度,同时保持发送和接收模式,进而使服务的用户量增加一倍。

图 18 为 Qualcomm 近日发布的用于 5G NR 首款智能手机参考设计中采用的 28 GHz 毫米波芯片^[67]。参考设计旨在手机的功耗和尺寸要求下,对 5G 技术进行测试和优化。该芯片天线方案采用 AiP 技术,尺寸约为 5 美分大小。Qualcomm 希望能在一年内将尺寸缩小一倍。

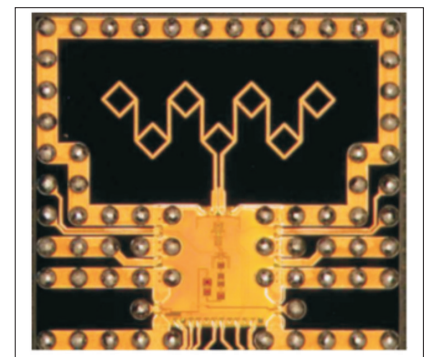
4 结束语

不知不觉 AiP 技术已走过了多年发展历程。早期 AiP 技术的研究主

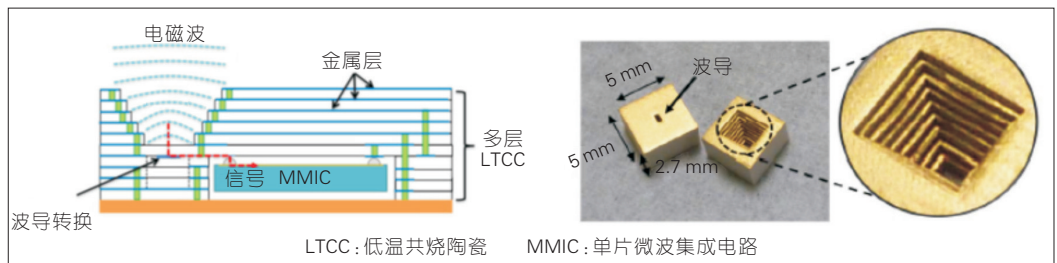
要集中在了大学的实验室,围绕着 2.4 GHz 蓝牙芯片展开。如何实现天线小型化是当时 AiP 研究者所面临的技术难题。中期 AiP 技术的开发主要集中在大公司,围绕着 60 GHz 芯片及毫米波雷达展开。如何实现宽频带、高增益天线及芯片与天线低损耗互连是中期 AiP 开发者所面临的挑战。中期也是 AiP 技术茁壮发展的阶段,很多大公司投入大量人力物力开发适合于 AiP 设计的新材料和新工艺,实属罕见。据我所知,也只有在 1970 年代微带天线曾获得过如此瞩目与投入。近期 AiP 技术的研发一方面向更高的频率扩展,另一方面正围绕着 IoT 及毫米波移动通信 5G 芯片如火如荼展开。更高频率



▲图 13 122 及 145 GHz 封装天线 SiGe 芯片实物照片



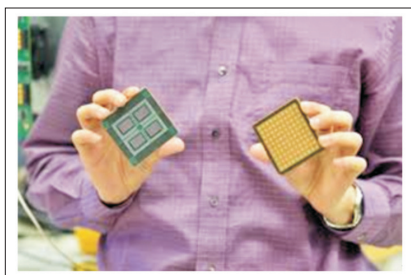
▲图 14 160 GHz eWLB 封装天线 SiGe 芯片实物照片



▲图 15 NTT 公司 300 GHz LTCC 封装天线实物照片



▲图16 Silicon Labs公司的蓝牙CMOS芯片内置封装天线实物照片



▲图17 IBM公司28 GHz HDI封装天线SiGe芯片实物照片



▲图18 Qualcomm公司用于5G NR首款智能手机参考设计中采用封装天线技术的28 GHz毫米波芯片实物照片

AiP技术的关键在于材料损耗及工艺精度,5G AiP技术的难点是如何实现高辐射效率及低成本量产。

如今AiP技术不仅仅被工业界广泛采用,也已从学术界天线领域扩散到集成电路、封装、材料与工艺、微波、雷达及通信等领域。这一点既可以从发表AiP技术相关文章的刊物看出,也可以从不同领域作者出版的书籍中窥到。比如国际著名的无线通信专家、美国纽约大学T. S. RAPPAPORT教授不仅在他发表的新书毫米波无线通信中专门详细介绍AiP技术^[65],也在很多无线通信类国际学术会议的演讲中用我们的AiP设计作为例子阐述封装天线的优点^[69]。再比如以前在射频集成电路

工程师眼中,天线只不过就是一片金属,现在他们意识到没有好的天线解决方案,设计再好的射频集成电路也就是一块石英。另外,IEEE微波理论与技术学会比天线与传播学会对推广AiP技术更加积极,几年前几乎在同一时段选择任命了两位杰出讲师讲授AiP技术。一位是德国Karlsruhe Institute of Technology的Thomas ZWICK教授,另一位是奥地利Johannes Kepler University的Andreas STELZER教授。同时在一个题目上任命了两位杰出讲师,在IEEE微波理论与技术学会历史上是前所未有的。德国Karlsruhe Institute of Technology是Heinrich Rudolf HERTZ 1887发现电磁波的地方,Thomas ZWICK教授是IBM Thomas J. Watson

Research Center前雇员,在AiP设计、制造及测试方面做出过突出贡献。Andreas STELZER教授由于在SiGe毫米波雷达芯片设计方面的贡献获2011年度IEEE微波理论与技术学会微波奖,在基于eWLB工艺开发差分AiP技术方面的贡献获首届IEEE亚太天线与传播年会最佳论文奖。

自20世纪90年代末,我有幸参与并推动了AiP技术的发展。早在2001年我就同上海交通大学毛军发教授团队就AiP技术进行学术交流。毛军发教授团队在三维系统级集成及多物理场仿真方面经验丰富、硕果累累。自行开发的热仿真软件对分析AiP热效应及散热设计非常有用。近期毛军发教授团队与中电

科41所进行合作,建成了中国第1套从50 GHz(为适应5G高频段天线测试已向下扩展到18 GHz)—325 GHz(为适应太赫兹频段天线测试可扩展到500 GHz或更高)集成天线远场自动测试平台。该测试平台达到世界先进水平,支持探针及波导馈电,110 GHz以下也可用同轴馈电。该测试平台已为中国多家科研院所的研究项目及公司产品开发提供了测试服务,极大地助进了中国在片上天线及封装天线方面的研究与发展。在各种科研计划的支持下,清华大学冯正和教授团队,东南大学洪伟教授团队、崔铁军教授团队,香港城市大学薛泉教授团队,香港城市大学梁国华教授团队,浙江大学尹文言教授团队,山西大学张文梅教授团队都对AiP技术发展做出了积极贡献。张文梅教授曾两次应邀在新加坡南洋理工大学进行长期学术访问与讲学。张文梅教授2008年回国后率先在国际上开展了用滤波器综合方法设计滤波天线。滤波天线目前是国际上微波与天线领域的一个研究热点,华南理工大学褚庆昕教授团队、章秀银教授团队分别在滤波天线的设计方面做出了突出贡献。中国公司尽管在AiP技术开发方面起步比较晚,但得益于后发优势,60 GHz AiP技术与相关芯片研发已取得重大突破,在交大测试平台多次所做的相控阵、大规模MIMO辐射测试获得令人满意的效果。毫米波频段5G移动通信AiP技术也已取得进展。

最后,让我将AiP与基片集成波导(SIW)联系起来结束这篇文章。我在2016年南京举办的华人微波论坛上讲过,吴柯教授及洪伟教授的合作将SIW技术做成微波领域的国际主流,我同刘兑现博士一起努力让AiP技术在国际天线领域引起人们的重视。我俩在相距很近的黄河东西岸边的乡村出生长大,相识却在远隔万里的南洋,珠联璧合,开创出封装天线一片天地,并且3次携手登上国

际天线领域的颁奖舞台,成就了一个小小奇迹,一段佳话。另外,我们几位都是77、78级大学生,我们的名字有着鲜明的时代特征,伟大的跃进,可否兑现?我想我们没忘初心,兑现了父辈的期望及我们自己的选择!

致谢

太原理工大学盛剑桓教授,香港中文大学黄振峰博士,香港中文大学程伯中教授,以及南洋理工大学杜茂安教授。

参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, WAN C, et al. What Will 5G Be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] BAUER F, WANG X, MENZEL W, et al. A 79-GHz Radar Sensor in LTCC Technology Using Grid Array Antennas [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61(6):2514–2521. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2260766
- [3] MAURELLI A, BELOT D, CAMPARDO G. SoC and SiP, the Yin and Yang of the Tao for the New Electronic Era [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(1):9–17. DOI: 10.1109/JPROC.2008.2007453
- [4] HEININGER N, KIVIKOSKI M, LEE Y H. Advanced Antenna for Mobile Phone [C]// Processing of. Int. Symp. Antennas Propag., USA:IEEE, 2005
- [5] ZHANG Y P, LIU D. Antenna-on-Chip and Antenna-in-Package Solutions to Highly Integrated Millimeter-Wave Devices for Wireless Communications [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2009, 57(10):2830–2841. DOI: 10.1109/TAP.2009.2029295
- [6] O KK, KIM K, FLOYD BA, et al. On-Chip Antennas in Silicon ICs and Their Application [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(7):1312–1323. DOI: 10.1109/ED.2005.850668
- [7] ZHANG Y P, SUN M, GUO L H. On-Chip Antennas for 60-GHz Radios in Silicon Technology [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(7):1664–1668. DOI: 10.1109/ED.2005.850628
- [8] ZHANG Y P, GUO L H, SUN M. High Transmission Gain Inverted-F Antenna on Low-Resistivity Si for Wireless Interconnect [J]. IEEE Electron Device Letters, 2006, 27(5):374–376. DOI: 10.1109/LED.2006.872351
- [9] BABAKHANI A, GUAN X, KOMIJANI A, et al. A 77-GHz Phased-Array Transceiver With On-Chip Antennas in Silicon: Receiver and Antennas [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(12):2795–2806. DOI: 10.1109/JSSC.2006.884811
- [10] SUN M, ZHANG Y P. 100-GHz Quasi-Yagi Antenna in Silicon Technology [J]. IEEE Electron Device Letters, 2007, 28(5):455–457. DOI: 10.1109/LED.2007.895447
- [11] OJEFORS E, PFEIFFER U R, LISAUSKAS A, et al. A 0.65 THz Focal-Plane Array in A Quarter-Micron CMOS Process Technology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(7):1968–1976. DOI: 10.1109/JSSC.2009.2021911
- [12] GRZYB J, STATNIKOV K, PFEIFFER U R. A 2 × 2 Lens-Integrated On-Chip Antenna System for A 820 GHz Multiplier-Chain Source in SiGe Technology [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. USA:IEEE, 2014:737–738. DOI: 10.1109/APS.2014.6904698
- [13] HAN R, JIANG C, MOSTAJERAN A, et al. A SiGe Terahertz Heterodyne Imaging Transmitter With 3.3 mW Radiated Power and Fully-Integrated Phase-Locked Loop [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(12):2935–2947. DOI: 10.1109/JSSC.2015.2471847
- [14] PFEIFFER U R, GRZYB J, LIU D, et al. A Chip-Scale Packaging Technology for 60-GHz Wireless Chipsets [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2006, 54(8):3387–3397. DOI: 10.1109/TMTT.2006.877832
- [15] ZHANG Y P, SUN M, CHUA K M, et al. Antenna-in-Package Design for Wirebond Interconnection to Highly Integrated 60-GHz Radios [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2009, 57(10):2842–2852. DOI: 10.1109/TAP.2009.2029290
- [16] DONG G K, LIU D, NATARAJAN A, et al. LTCC Packages With Embedded Phased-Array Antennas for 60 GHz Communications [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2011, 21(3):142–144. DOI: 10.1109/LMWCL.2010.2103932
- [17] KAM D G, LIU D, NATARAJAN A, et al. Organic Packages with Embedded Phased-Array Antennas for 60-GHz Wireless Chipsets [J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2011, 1(11):1806–1814. DOI: 10.1109/TCPMT.2011.2169064
- [18] HONG W B, GOUDELEV A, BAEK K H, et al. 24-Element Antenna-in-Package for Stationary 60-GHz Communication Scenarios [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2011, 10(1897):738–741. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2162640
- [19] HONG W B, BAEK K H, GOUDELEV A. Multilayer Antenna Package for IEEE 802.11ad Employing Ultralow-Cost FR4 [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(12):5932–5938. DOI: 10.1109/TAP.2012.2214196
- [20] COHEN E, RUBERTO M, COHEN M, et al. A CMOS Bidirectional 32-Element Phased-Array Transceiver at 60 GHz With LTCC Antenna [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61(3):1359–1375. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2243749
- [21] HONG W B, BAEK K H, GOUDELEV A. Grid Assembly-Free 60-GHz Antenna Module Embedded in FR-4 Transceiver Carrier Board [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(4):1573–1580. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232635
- [22] TSUTSUMI Y, ITO T, HASHIMOTO K, et al. Bonding Wire Loop Antenna in Standard Ball Grid Array Package for 60-GHz Short-Range Wireless Communication [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(4):1557–1563. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232262
- [23] BOERS M, AFSHAR B, VASSILIOU I, et al. A 16TX/16RX 60 GHz 802.11ad Chipset With Single Coaxial Interface and Polarization Diversity [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(12):3031–3045. DOI: 10.1109/JSSC.2014.2356462
- [24] NASR I, JUNGMAIER R, BAHETI A, et al. A Highly Integrated 60 GHz 6-Channel Transceiver With Antenna in Package for Smart Sensing and Short-Range Communications [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(9):2066–2076. DOI: 10.1109/JSSC.2016.2585621
- [25] GU XX, VALDES-GARCIA A, NATARAJAN A, et al. W-Band Scalable Phased Arrays for Imaging and Communications [J]. Communications Magazine IEEE, 2015, 53(4):196–204. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7081095
- [26] BHUTANI A, GULAN H, GOETTEL B, et al. 122 GHz Aperture-Coupled Stacked Patch Microstrip Antenna in LTCC Technology [C]// European Conference on Antennas and Propagation. USA:IEEE, 2016:1–5. DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481147
- [27] GOTTEL B, BEER S, PAULI M, et al. Ultra Wideband D-Band Antenna Integrated in A LTCC Based QFN Package Using A Flip-Chip Interconnect [C]// Microwave Conference (EuMC). USA:IEEE, 2013:227–230. DOI: 10.23919/EuMC.2013.6686632
- [28] BEER S, RUSCH C, GOTTEL B, et al. D-Band Grid-Array Antenna Integrated in The Lid of A Surface-Mountable Chip-Package [C]// European Conference on Antennas and Propagation. USA:IEEE, 2013:1318–1322
- [29] HAMIDIPOUR A, FISHER A, JAHN M, et al. 160-GHz SiGe-Based Transmitter and Receiver with Highly Directional Antennas in Package [C]// Microwave Integrated Circuits Conference. USA:IEEE, 2013:81–84
- [30] TAJIMA T, SONG H J, YAITA M, et al. 300-GHz LTCC Horn Antennas Based on Antenna-in-Package Technology [C]// Microwave Conference (EuMC). USA:IEEE, 2013:231–234. DOI: 10.23919/EuMC.2013.6686633
- [31] ZHANG Y P, LO K C, HWANG Y M. A Dielectric-Loaded Miniature Antenna for Microcellular and Personal Communications [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. USA:IEEE, 1995:1152–1155. DOI: 10.1109/APS.1995.530223
- [32] ZHANG Y P, DO M A. Integrated-Circuit Pressed-Ceramic Package Antenna for The Single-Chip Solution of A Wireless Transceiver [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2001, 30(5):330–332. DOI: 10.1002/mop.1305
- [33] Nanyang Technological University. Integrated Circuit Package Antennas, Internal Reports [R]. Singapore:NTU, 2003.
- [34] SONG P C T, HALL P S, GHAFOURI-SHIRAZ H. Novel RF Front End Antenna Package [J]. IEEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation, 2003, 150(4):290–294. DOI: 10.1049/ip-map:20030414

- [35] MATHEWS D J, HILL R J, GAYNOR M P, et al. Multi-Chip Semiconductor Package with Integral Shield and Antenna. USA: IEEE, 2001: 05-14.
- [36] LIM K, OBATOYINBO A, SUTONO A, et al. A Highly Integrated Transceiver Module for 5.8 GHz OFDM Communication System Using Multi-Layer Packaging Technology [C]// Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International. USA: IEEE, 2002: 1739-1742. DOI: 10.1109/MWSYM.2001.967242
- [37] BREBELS S, RYCKAERT J, COME B, et al. SOP Integration and Codesign of Antennas [J]. Advanced Packaging IEEE Transactions on, 2004, 27(2): 341-351. DOI: 10.1109/TADVP.2004.828822
- [38] LEUNG K W. The Hollow DRA and Its Novel Application as APackagingcover[R]. Hong Kong: Hong Kong Research Grants Council, 2004
- [39] POPOV A P, ROTARU M D. A Novel Integrated Dielectric Resonator Antenna for Circular Polarization[C]// Electronic Components and Technology Conference. USA: IEEE, 2003: 470-473. DOI: 10.1109/ECTC.2003.1216320
- [40] ZHANG Y P. Antenna-in-Package Technology for Modern Radio Systems[C]// IEEE International Workshop on Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials. USA: IEEE, 2006: 37-40. DOI: 10.1109/IWAT.2006.1608969
- [41] ZHANG Y P, SUN M, CHUA K M, et al. Antenna-in-Package in LTCC for 60-GHz Radiol[C]// IEEE International Workshop Antenna Technology. USA: IEEE, 2007.
- [42] ZHANG Y P, SUN M, LIU D, et al. Dual Grid Array Antennas in A Thin-Profile Package for Flip-Chip Interconnection to Highly-Integrated 60-GHz Radios[J]. IEEE Trans. Antennas Propaga., 2011, 59(4): 1191-1199
- [43] 黄志洵. S.A. 谢昆诺夫及其对波导理论的贡献[J]. 物理, 1988, 17(1): 53-56
- [44] KRAUS J. A Backward Angle-Fire Array Antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1964, 12(1): 48-50. DOI: 10.1109/TAP.1964.1138171
- [45] SUN M, ZHANG Y P. Design and Integration of 60-GHz Grid Array Antenna in Chip Package[C]// Microwave Conference. USA: IEEE, 2008: 1-4. DOI: 10.1109/APMC.2008.4958260
- [46] CHEN Z H, ZHANG Y P, BISOGNIN A, et al. An LTCC Microstrip Grid Array Antenna for 94-GHz Applications[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14(4): 1279-1281. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2402159
- [47] BEER S, RUSCH C, GOTTEL B, et al. D-Band Grid-Array Antenna Integrated in The Lid of A Surface-Mountable Chip-Package [C]// European Conference on Antennas and Propagation. USA: IEEE, 2013: 1318-1322
- [48] ZHANG B, GULAN H, ZWICK T, et al. Integration of a 140 GHz Packaged LTCC Grid Array Antenna with An InP Detector[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2015, 5(8): 1060-1068. DOI: 10.1109/TCPMT.2015.2453407
- [49] SUN M, ZHANG Y P, GUO Y X, et al. Integration of Grid Array Antenna in Chip Package for Highly Integrated 60-GHz Radios[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2010, 8: 1364-1366. DOI: 10.1109/LAWP.2009.2039031
- [50] ZHANG Y P. Integrated Circuit Package Antenna: An Elegant Antenna Solution for Single-Chip RF Transceiver[R]. USA: IEEE, 2005
- [51] DONG G K, LIU D, NATARAJAN A, et al. Low-Cost Antenna-in-Package Solutions for 60-GHz Phased-Array Systems[C]// Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems. USA: IEEE, 2010: 93-96. DOI: 10.1109/EPEPS.2010.5642554
- [52] LIU D, AKKERMANS J A G, CHEN H C, et al. Packages With Integrated 60-GHz Aperture-Coupled Patch Antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(10): 3607-3616. DOI: 10.1109/TAP.2011.2163760
- [53] COHEN E, RUBERTO M, COHEN M, et al. A CMOS Bidirectional 32-Element Phased-Array Transceiver at 60 GHz With LTCC Antenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61(3): 1359-1375. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2243749
- [54] COHEN E, RUBERTO M, COHEN M, et al. Antenna Packaging of A 32 Element TX/RX Phased Array RFIC for 60 GHz Communications[C]// IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems. USA: IEEE, 2013: 1-5. DOI: 10.1109/COMCAS.2013.6685306
- [55] KAMGAING T, ELSHERBINI A A, FRANK T W, et al. Investigation of A Photodefinable Glass Substrate for Millimeter-Wave Radios on Package[C]// Electronic Components and Technology Conference. USA: IEEE, 2014: 1610-1615. DOI: 10.1109/ECTC.2014.6897510
- [56] KAMGAING T, ELSHERBINI A A, OSTER S N, et al. Low-Profile Fully Integrated 60 GHz 18 Element Phased Array on Multilayer Liquid Crystal Polymer Flip Chip Package [C]// Electronic Components and Technology Conference. USA: IEEE, 2015: 994-998. DOI: 10.1109/ECTC.2015.7159716
- [57] KAMGAING T, ELSHERBINI A A, OSTER S N, et al. Ultra-Thin Dual Polarized Millimeter-Wave Phased Array System-in-Package with Embedded Transceiver Chip [C]// Microwave Symposium. USA: IEEE, 2015: 1-4. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7166967
- [58] OHATA K, MARUHASHI K, ITO M, et al. Millimeter-Wave Broadband Transceivers [EB/OL]. (2005-07-30)[2017-10-25]. <http://www.nec.com/en/global/techrep/journal/g05/n03/pdf/a211.pdf>
- [59] NTT. Near-Field High-Speed Transmission Technology Using 60-GHz Band [EB/OL]. (2017-10-25). <http://www.ntt.co.jp/mirai/organization/organization03/02.html>
- [60] Infineon, Imec. Infineon and Imec Cooperate On 79 GHz CMOS Radar Sensor Chips For The Automotive Industry [EB/OL]. (2016-05-24)[2017-10-25]. <http://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/press/market-news/2016/INFATV201605-062.html>
- [61] GU X, LIU D, BAKS C, et al. A Compact 4-Chip Package with 64 Embedded Dual-Polarization Antennas for W-Band Phased-Array Transceivers[C]// Electronic Components and Technology Conference. USA: IEEE, 2014: 1272-1277. DOI: 10.1109/ECTC.2014.6897455
- [62] STELZER A, FEGER R. Integrated Microwave Sensors in SiGe with Antenna in Package: From Concepts to Solutions[C]// International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. USA: IEEE, 2016: 1-7. DOI: 10.1109/ICECom.2016.7843873
- [63] TAJIMA T, SONG H J, YAITA M, et al. 300-GHz LTCC Horn Antennas Based on Antenna-in-Package Technology[C]// Microwave Conference. USA: IEEE, 2013: 231-234. DOI: 10.23919/EuMC.2013.6686633
- [64] TAJIMA T, SONG H J, AJITO K, et al. 300-GHz Step-Profiled Corrugated Horn Antennas Integrated in LTCC[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(11): 5437-5444. DOI: 10.1109/TAP.2014.2350520
- [65] Fujitsu. Fujitsu Develops World's First Compact 300 GHz Receiver for Wireless Communications of Tens of Gigabits per Second [EB/OL]. (2015-09-08)[2017-10-25]. <http://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2015/0908-02.html>
- [66] IBM. IBM & Ericsson Announce Research Advance for 5G Communications Networks [EB/OL]. (2017-02-07)[2017-10-20]. <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/51542.wss>
- [67] Qualcomm. Qualcomm Achieves World's First Announced 5G Data Connection on a 5G Modem Chipset for Mobile Devices [EB/OL]. (2017-10-18)[2017-10-25]. <https://www.qualcomm.com/news/releases/2017/10/17/qualcomm-achieves-worlds-first-announced-5g-data-connection-5g-modem>
- [68] RAPPAPORT T S, HEATH R W, DANIELS R C, et al. Millimeter-Wave Wireless Communications[M]. New York: Prentice Hall, 2015
- [69] RAPPAPORT T S, GUTIERREZ F. The Emerging World of Massively Broadband Devices: 60 GHz and Above [EB/OL]. (2009-06-04)[2017-10-25]. http://wireless.engineering.nyu.edu/presentations/Keynote_Rappaport.pdf

作者简介



张跃平，新加坡南洋理工大学电子工程学讲座教授、IEEE Fellow、IEEE 天线与传播学会杰出讲师、上海交通大学“千人计划”国家特聘专家、《ZTE COMMUNICATIONS》杂志编委；目前主要研究方向为无线电电子学；曾荣获 IEEE 天线与传播学会谢昆诺夫论文奖；已发表论文 260 篇，拥有授权美国专利 7 项。