

基于人工磁导体的芯片内/芯片间无线互连 单极子天线传输特性研究

杨曙辉^{1,2}, 李邓化⁴, 陈迎潮², 王文松^{2,3}, 汪海鹏⁴, 陈文瀚⁴, 冯梦璐⁴, 贺学忠⁵

(1. 中国传媒大学理工学部通信工程系, 北京 100024; 2. 南卡罗来纳大学电气工程系, 哥伦比亚 SC29208;
3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016; 4. 北京信息科技大学信息与通信工程学院, 北京 100101;
5. 北卡罗来纳大学格林斯堡分校文理学院, 格林斯堡 NC27412)

摘要: 提出了一种新的用于芯片内/芯片间无线通信系统中的基于人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)结构的单极子管脚天线阵列模型. 印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)采用厚度3mm的FR4介质, 形状为边长50mm正方形. 4个单极子天线分布在PCB基板中心15mm×15mm的正方形各顶点上, 代表4个芯片的4个管脚. 天线为铜材质, 长度2.6mm, 直径1.5mm. 在PCB介质中嵌入了一个周期性人工磁导体铜质平面, 4个单极子天线形成一个4端口网络. 在仿真基础上, 进了实物加工测试. 实测结果表明, 具有AMC的天线阵列回波损耗(S_{11}) -10dB频带为13.02GHz~15.73GHz; 在14.22GHz处, S_{11} 的幅度达到最小值-27.25dB, S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别为-26.26dB、-19.23dB、-21.14dB. 与不含AMC结构的天线阵列相比, S 参数得到了有效改善, 其中 S_{11} 改善了约3.63dB, S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别提高了2.05dB、7.21dB、5.28dB. 验证了在PCB介质中嵌入AMC结构, 可以有效提高单极子天线间的电压传输系数, 增加信号的功率传输增益.

关键词: 人工磁导体; 芯片内/芯片间无线互连; 单极子天线; 散射参数; 功率传输增益

中图分类号: TN43 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2016)12-2861-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.12.008

Study of Signal Transmission Characteristics of Monopole Antennas Applied for Wireless Intra-/Inter-chip Connection Based on Artificial Magnetic Conductor

YANG Shu-hui^{1,2}, LI Deng-hua⁴, CHEN Yin-chao², WANG Wen-song^{2,3}, WANG Hai-peng⁴,
CHEN Wen-han⁴, FENG Meng-lu⁴, HE Xue-zhong⁵

(1. Faculty of Science and Technology, Communication University of China, Beijing 100024, China;

2. Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina SC29208, USA;

3. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

4. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;

5. College of Arts and Sciences, University of North Carolina at Greensboro, Greensboro NC, North Carolina 27412, USA)

Abstract: A new type of monopole pin antenna array model based on an artificial magnetic conductor (AMC) structure is proposed in this paper, which will be potentially used in a wireless intra-/inter-chip (WIIC) communication system. The PCB substrate is FR4 with the thickness of 3mm and its square area is 50mm by 50mm. On the PCB center, the four monopole antennas for four chips are mounted at the four corners of a square with dimensions of 15mm×15mm. The pin antennas are made of copper with the length of 2.6mm and the diameter of 1.5mm. A periodical AMC copper plane is embedded above the lower PCB plane. The four monopole antennas form a four-port network. Based on this WIIC prototype simulation and prediction, its actual circuits are fabricated and measured. It is found that from the measurement the -10dB bandwidth of the return loss S_{11} ranges from 13.02GHz to 15.73GHz for this proposed antenna array. At 14.22GHz the magnitude of S_{11} reaches the minimum value of -27.25dB, and the measured S_{21} , S_{31} , S_{41} are -26.26, -19.23, and -21.14dB, respectively. In comparison to the antenna array without an AMC, the scattering parameters are improved effectively. The S_{11}

is enhanced about 3.63dB and S_{21} , S_{31} , and S_{41} increase 2.05, 7.21, 5.28dB, respectively. Consequently, it is demonstrated that the embedded AMC structure in the PCB dielectric can significantly improve the signal voltage transmission coefficients between monopole antennas and increase the signal power transmission gains.

Key words: artificial magnetic conductor; wireless intra-/inter-chip connection; monopole antenna; scattering parameters; power transmission gain

1 引言

随着集成电路规模越来越大,芯片间通过管脚以及金属互连线连接所引起的信号反射、串扰等信号完整性问题日趋突出^[1,2].为解决这个问题,国内外学者不断提出一些用于芯片内/芯片间互连的新概念、新方法:基于传输线的射频(RF)互连^[3]、电感耦合互连^[4]、电容耦合互连^[5]、3D互连^[6]、光互连^[7]以及基于片上天线的无线互连^[8,9]等.这些互连新方法,局限于改造芯片内电路,缺乏考虑PCB级电子系统结构问题.为此,本课题组提出利用PCB作为通信信道介质,改造芯片管脚为微型收发天线,实现芯片间无线互连的构想^[10].不足之处是所验证的无线互连距离最长仅为14.14mm,且4个单极子天线间的电压传输系数偏低.

为了进一步提高无线互连距离,改善单极子天线在PCB介质中的传输特性,本文提出了一种基于人工磁导体的芯片内/芯片间无线互连单极子天线阵列设计方法.人工磁导体也称为高阻抗表面(High-Impedance Surface, HIS),具有同相反射特性^[11],可用于改善天线性能^[12-15].例如,文献[12]利用人工磁导体减少了硅基集成电路衬底损耗影响,提高了片上圆极化天线性能.文献[13]设计了一种包含AMC的吸波材料,应用于微带天线,有效降低了天线雷达散射截面(RCS).文献[14]采用棋盘结构AMC,使天线的相对工作带宽提高到51.9%.图1所示为本文设计的基于人工磁导体的芯片内/芯片间无线互连结构示意图.其中芯片A、芯片B各包含两个由芯片管脚改造成的单极子收发天线,利用嵌入PCB介质(FR4)中的人工磁导体结构,使反射波与入射波同相叠加.仿真及电路实物测试结果表明,采用AMC结构可有效改善发射天线的输入回波损耗,提高天线间的电压传输系数,增加信号功率传输增益.

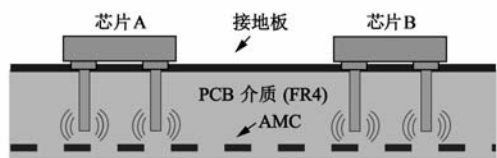


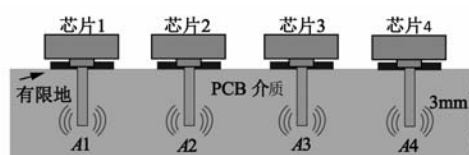
图1 基于AMC的芯片内/芯片间无线互连结构示意图

2 基于PCB介质的芯片间无线互连模型

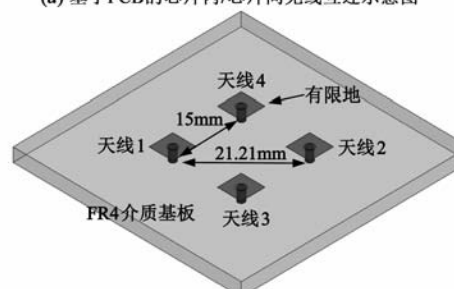
2.1 不含人工磁导体的4单极子天线阵列

作为对比,本文首先设计一种基于FR4介质(相对

介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ 、损耗角正切 $\tan\delta = 0.02$)的4单极子天线阵列模型,分别代表了芯片1、2、3、4的各1个管脚天线(A1、A2、A3和A4),如图2所示.信号馈线为同轴电缆,PCB顶层的有限地连接同轴电缆的屏蔽地线.PCB基板是边长为50mm的正方形,厚度3mm,4个单极子天线分布在PCB基板中心15mm×15mm的正方形各顶点上.天线的长度为2.6mm,直径1.5mm,材质为铜,中心工作频率17.6GHz.



(a) 基于PCB的芯片内/芯片间无线互连示意图



(b) 4单极子天线阵列三维图

图2 不含AMC的无线互连单极子天线阵列

采用HFSS电磁软件对图2中的天线阵列模型进行了全波仿真.设置天线1为发射天线,其余三个为接收天线,通信信道主要为PCB介质,得到的发射天线三维辐射及方向性如图3所示.

从图3中可以看出,受有限地及PCB介质的影响,单极子天线的辐射图已不再是空气中单极子天线的半球形辐射,改变为压扁的形状,此时天线的增益峰值为1.745dBi,方向性系数为2.064dB.设置4个单极子天线形成一个4端口网络,图4所示为仿真得到的天线间S

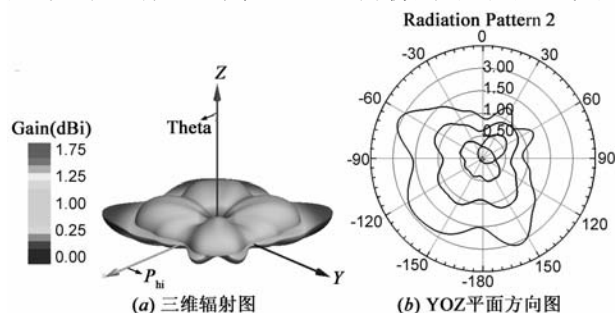


图3 单极子天线的辐射图

参数曲线. 其中 S_{11} 为发射天线(天线 1)的回波损耗, S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别代表了三个接收天线和发射天线间的插入损耗, 表示三个接收天线从发射天线处获得了多少能量. S_{11} 幅度小于 -10 dB 的频带为 16.8 GHz \sim 18.6 GHz; 在 17.6 GHz 处, S_{11} 达到最小值 -26.473 dB; S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 的幅度分别为 -30.061 dB、 -25.329 dB、 -25.348 dB. 由于天线 2 距离天线 1 最远, 接收到的能量最少; 天线 3、天线 4 与天线 1 的距离相等, 结构对称, 因此插入损耗曲线重合相等.

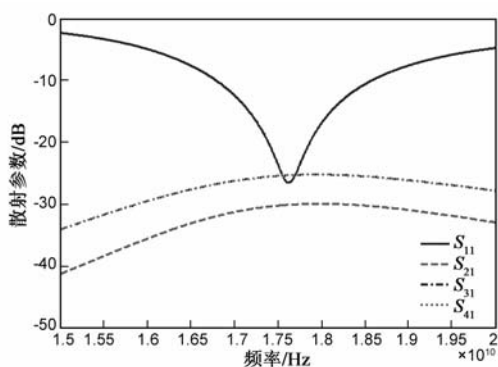


图4 不含AMC的单极子天线阵列S参数

根据文献[16]中 Friis 传输方程, 对于自由空间中两个单极子天线, 接收天线(i 端口)接收到的功率 P_r 与发射天线(j 端口)发射功率 P_t 之间满足以下关系:

$$\begin{aligned} P_r/P_t &= |S_{ij}|^2 \\ &= (1 - |\Gamma_t|^2) \times (1 - |\Gamma_r|^2) \times [G_t G_r \lambda^2 / (4\pi R)^2] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, λ 为波长; R 为两个天线间的直线距离; Γ_t 、 G_t 和 Γ_r 、 G_r 分别为发射天线和接收天线的反射系数以及增益(单位为 dB). 另有 S 参数定义为:

$$S_{ij} = 20 \lg \left(\frac{U_i}{U_j} \right) \quad (2)$$

结合式(1)和式(2), 可根据发射端电压计算得到接收端信号电平. 需要注意的是式(1)是在不考虑损耗的情况下得出的结论, 而在图 2 所示的天线阵列中, 需考虑介质损耗, 此时若以天线 1 和天线 2 为例, 两个天线间传输的功率增益 G_a 可通过下式计算^[17]:

$$G_a = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 e^{-2\alpha R} \quad (3)$$

其中, α 为考虑了介质损耗的衰减常数. 如以分贝形式表示, 式(3)变为:

$$G_a(\text{dB}) = 10 \lg \left[\frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} \right] \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知, 两个天线间的功率传输增益与发射天线、接收天线的电压反射系数(回波损耗)有关, 还与天线间的电压传输系数(插入损耗)有关. 因此

当天线的输入阻抗匹配达到一定程度时, 提高天线间的电压传输系数, 将有利于提高天线间的功率传输增益, 改善接收性能. 由于图 2 中的 4 个单极子天线尺寸相同, 且 PCB 基板为正方形, 4 个天线结构对称, 如果忽略加工误差, 可认为这 4 个天线的回波损耗基本是相等的, 即: $|S_{11}| = |S_{22}| = |S_{33}| = |S_{44}|$, 则式(4)可简化为:

$$G_a(\text{dB}) = 2 \times 10 \lg \left(\frac{|S_{21}|}{1 - |S_{11}|^2} \right) \quad (5)$$

当发射天线处于谐振辐射状态时, 输入阻抗处于良好匹配状态, 在工作频率处的回波损耗 S_{11} 的幅度一般小于 -10 dB. 因此, $1 - |S_{11}|^2 \approx 1$, 则两个天线间的传输增益可进一步简化为: $G_a(\text{dB}) \approx 2 \times 10 \lg |S_{21}|$, 由此可见, 当天线的输入阻抗匹配良好情况下, 天线间的功率传输增益将主要由天线间的电压传输系数的幅度所决定.

2.2 人工磁导体

AMC 平面可对特定频段的电磁波产生有益的同相反射, 产生增强电磁波辐射的效果. 针对单极子天线工作频率为 17.6 GHz, 根据文献[12], 本文设计的 AMC 单元结构及尺寸如图 5(a) 所示. 正方形单元的边长 $a = 4.8$ mm, 金属图案由长 $l = 4.4$ mm, 宽 $w = 0.6$ mm 的米字形线条及边长 $b = 2.25$ mm 的正方形组成. 图 5(b) 为 AMC 周期性单元在 HFSS 中的仿真模型, 通过仿真充满空气的单端口波导的散射参数, 可以计算 AMC 结构的反射波相位特性. 其中的左边图表示 AMC 的形状及波端口激励, 中间图表示腔体的左右壁为理想电导体(PEC), 右边图表示前后壁为理想磁导体(PMC).

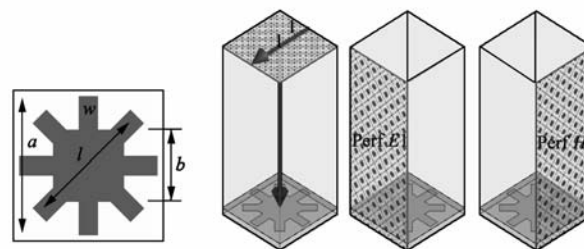


图5 AMC单元尺寸及仿真模型

AMC 单元周期性地排布起来, 形成频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)^[18] 或高阻抗表面, 可通过传输线理论和周期性电路进行分析^[12]. 通过设计 AMC 的结构尺寸可得到不同的谐振频率. 图 6 显示的是电磁波入射到 AMC 结构时反射波相位特性曲线, 在工作频率 17.6 GHz 处, 相位为 0° .

2.3 基于人工磁导体的芯片间无线互连结构模型

构建图 7 所示具有 AMC 层的芯片无线互连单极子天线阵列模型, 其中 AMC 铜质平面嵌入介质内距离底面 0.3 mm 处.

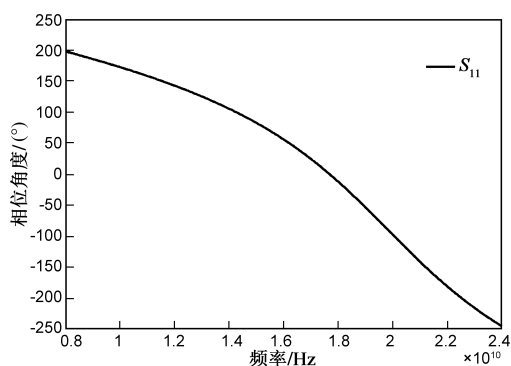


图6 入射到AMC结构的电磁波反射相位特性

与图2相比,图7保持了4个单极子天线的尺寸及在PCB上的相对位置,主要进行了如下改进:(1)在PCB介质顶层增加了完整的接地板,可减少电磁信号辐射到介质外;(2)在介质中间,距离顶层2.7mm处,嵌入了AMC结构层,PCB介质总厚度仍保持3mm.对图7(b)的结构进行全波仿真,天线1为发射天线,其余3个为接收天线,得到图8所示的单极子发射天线辐射图.

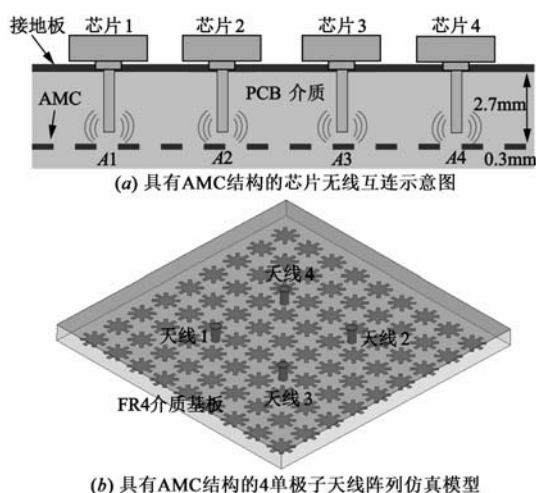


图7 具有AMC的芯片无线互连及单极子天线阵列

从图8中可以看出,在人工磁导体作用下,单极子天线辐射不同于图3中的形状,提高了方向性.此时天线的增益峰值略降为1.158dBi,但方向性系数提高为2.648dB.同样设置4个单极子天线形成4端口网络,图9所示为天线间S参数曲线,可以看出受人工磁导体的影响,天线工作频率向高频段略有偏移, S_{11} 幅度小于-10dB的频带为17.75GHz~18.53GHz;在18.1GHz处, S_{11} 达到最小值-16.603dB; S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 的幅度分别为-16.111dB、-20.417dB、-20.614dB.与不含人工磁导体的单极子天线阵列的S参数仿真结果相比,可以看出三个接收天线与发射天线间的电压传输系数都有较大幅度提高,特别是

S_{21} 提高了约14dB, S_{31} 、 S_{41} 分别提高了4.9dB和4.7dB.天线间S参数的改善,将增加天线间的功率传输增益,提高信号传输性能.

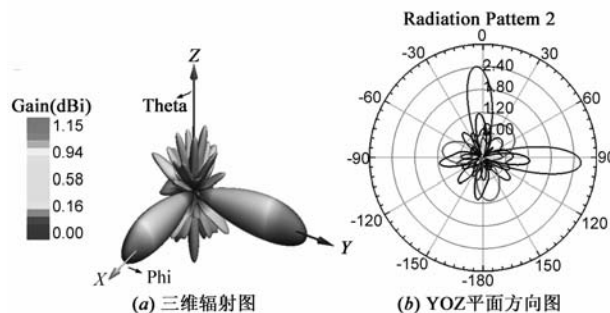


图8 具有AMC结构的单极子天线辐射图

作为对比,本文还给出了去掉PCB介质中的AMC,保留顶层完整接地板平面时,4个单极子天线间的S参数仿真结果,如图9(b)所示.可以看出,此时的发射天线(天线1)的回波损耗都大于-10dB,无法正常工作.由此可见,仅有顶层完整接地板,没有人工磁导体平面无法保证单极子天线间的正常无线通信.

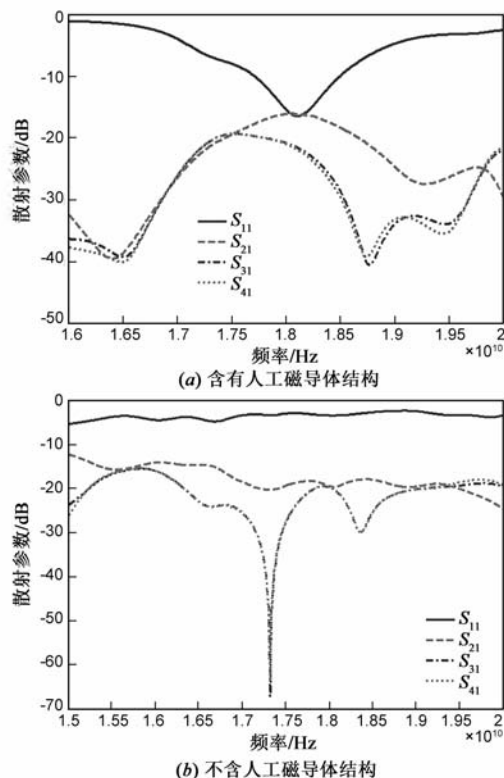


图9 PCB基板顶层为完整接地板时天线间S参数

3 电路实物加工及测试分析

在仿真基础上,设计加工了天线阵列电路实物,并采用Agilent矢量网络分析仪进行了S参数测试,如图10所示.图10(a)为不含AMC的印制板电路

(介质为 FR4, 厚度 3mm), 正面没有完整的地平面, 只包含 SMA 端子的有限地. SMA 的信号针长度为 2.6mm, 作为单极子天线, 从背面图可以看出天线处于介质内. 图 10(b) 为含有 AMC 结构的印制板电路, 正面为完整地平面, 背面图中可以看出 AMC 结构嵌入于 PCB 介质中. 图 10(c) 为天线阵列 S 参数测试环境.

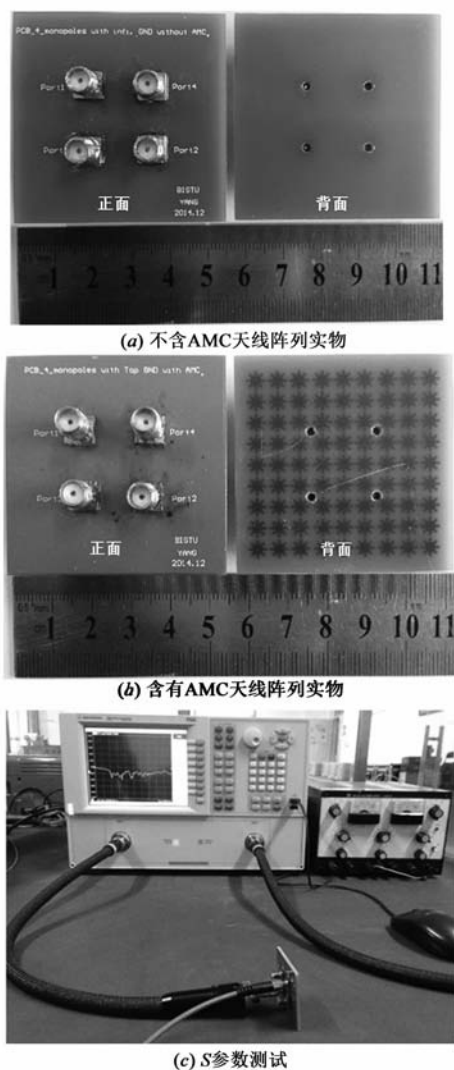


图 10 天线阵列电路实物及 S 参数测试

图 11(a) 所示为不含 AMC 的天线阵列 S 参数实测结果. 可以看出 S 参数的趋势与图 4 中仿真结果基本吻合. 由于实测采用 SMA 信号针的直径为 1mm, 不同于仿真设置的直径 1.5mm, 因此工作频率向高频段略有偏移.

实测结果表明, S_{11} 幅度小于 -10dB 的频带为 $16.76\text{GHz} \sim 20.04\text{GHz}$, 在 18.21GHz , S_{11} 的幅度达到最小值 -24.62dB ; S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别为 -28.31dB 、 -26.43dB 、 -26.42dB , S_{31} 与 S_{41} 基本相等. 含有 AMC 电

路 S 参数实测结果如图 11(b) 所示. 由于 AMC 层的影响, S_{11} 幅度小于 -10dB 频带为 $13.02\text{GHz} \sim 15.73\text{GHz}$, 在 14.22GHz 处, S_{11} 幅度达到最小值 -27.25dB ; S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别为 -26.26dB 、 -19.23dB 、 -21.14dB .

对比图 11(a) 和 (b), 可以观察到: 采用 AMC 结构天线阵列的 S_{11} 改善了 3.63dB ; S_{21} 、 S_{31} 、 S_{41} 分别提高了 2.05dB 、 7.21dB 、 5.28dB . 实测结果验证了人工磁导体可以有效提高单极子天线阵列的电压传输系数, 有利于增加天线间信号传输增益, 同时也进一步验证了基于 PCB 介质实现芯片内/芯片间无线互连的可行性. 与仿真结果相比, S_{21} 改善程度有所降低, 且 S_{31} 和 S_{41} 存在较小的误差, 原因在于 SMA 端子的信号针标准长度为 3.5mm , 为了进行本文中的测试, 采用人工方式截短为 2.6mm , 形成单极子天线, 存在一定的加工误差.

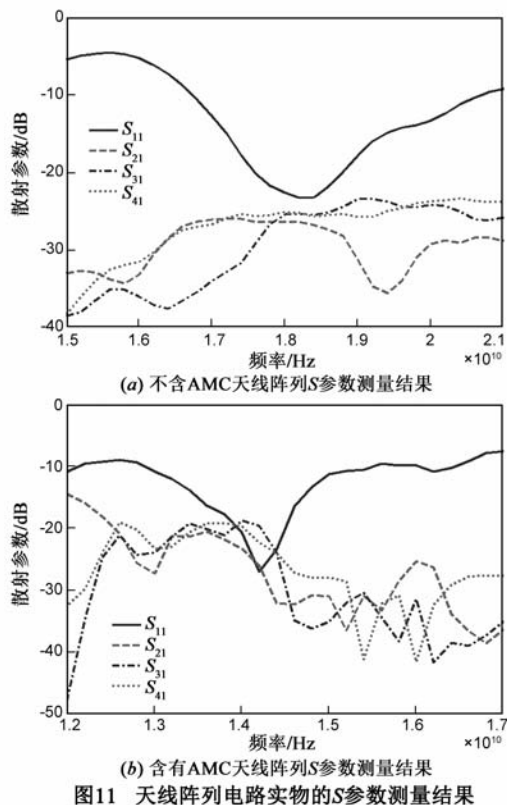


图 11 天线阵列电路实物的 S 参数测量结果

4 结论

针对基于 PCB 介质的芯片内/芯片间无线互连系统, 本文提出利用人工磁导体结构改善单极子天线间的功率传输增益. 仿真结果表明, 不含 AMC 的单极子天线方向性系数为 2.064dB . 采用 AMC 结构后, 单极子天线方向性系数提高为 2.648dB . 电路实测结果表明, 具有 AMC 的天线阵列与不含 AMC 的天线阵列相比, 散射参数得到有效改善, 其中 S_{11} 改善了约 3.63dB , S_{21} 、 S_{31} 、

S_{41} 分别提高了 2.05 dB、7.21 dB、5.28 dB。仿真及实测结果验证了在 PCB 介质中嵌入 AMC 结构层,可以有效提高单极子天线间的电压传输系数,增加发射天线和接收天线间信号功率传输增益,该方法使得基于 PCB 介质实现芯片内/芯片间无线互连结构的可行性研究又有进一步的发展。

参考文献

- [1] ITRS teams. The international technology roadmap for semiconductors [EB/OL]. <http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/Summary2013.htm>, 2014-12-05.
- [2] J T Bialasiewicz, D Gonzalez, J Balcells, et al. Wavelet based approach to evaluation of signal integrity [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4590 - 4598.
- [3] C Changm, I Verbaughede, C Chien, et al. Advanced RF/baseband interconnect schemes for inter and intra ULSI communications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(7): 1271 - 1285.
- [4] H Sangwook, D D Wentzloff. In-Phase resonant inductive coupling for multi-layer vertical communication in 3D-ICs [A]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI) [C]. Chicago, USA; IEEE, 2012. 1 - 2.
- [5] R Cardu, E Franchi, R Guerrieri, et al. Characterization of chip-to-chip wireless interconnections based on capacitive coupling [A]. 18th IEEE/IFIP International Conference on VLSI and System-on-Chip [C]. Chicago, USA; IEEE, 2010. 375 - 380.
- [6] X He, et al. Crosstalk modeling and analysis of through silicon via connection in 3D integration [A]. Progress in Electromagnetic Research Symposium [C]. Taipei; PIERS, 2013. 857 - 861.
- [7] X Wu, J Xu, Y Ye, et al. An inter/intra-chip optical network for manycore processors [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2014, 23(4): 678 - 691.
- [8] M Seyyed-esfahlan, M Kaynak, B Gottel, et al. SiGe process integrated on-chip dipole antenna on finite-size ground plane [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, (12): 1260 - 1263.
- [9] H-C Kuo, H-L Yue, Y-W Ou, et al. A 60-GHz CMOS subharmonic RF receiver with integrated on-chip artificial magnetic-conductor Yagi antenna and balun bandpass filter for very-short-range gigabit communications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(4): 1681 - 1691.
- [10] 杨曙辉, 王彬, 陈迎潮, 等. 基于 PCB 介质的芯片间无线互连及 60GHz 天线设计 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2014, 31(1): 16 - 22.
- Yang Shu-hui, Wang Bin, Chen Yin-chao, et al. PCB medium based inter-chip wireless connections and design of 60 GHz antenna [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2014, 31(1): 16 - 22. (in Chinese)
- [11] 高强, 闫敦豹, 袁乃昌. 一种基于遗传算法的 AMC 结构设计 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1686 - 1689.
- Gao Qiang, Yan Dun-bao, Yuan Nai-chang. A genetic algorithm-based AMC structure [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1686 - 1689. (in Chinese)
- [12] X Y Bao, Y X Guo, Y Z Xiong. 60GHz AMC based circularly polarized on-chip antenna using standard 0.18m CMOS technology [J]. IEEE Transactions on Antennas Propag, 2012, 60(5): 2234 - 2241.
- [13] 李有权, 张光甫, 袁乃昌. 基于 AMC 的吸波材料及其在微带天线中的应用 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(2): 353 - 357.
- Li You-quan, Zhang Guang-pu, Yuan Nai-chang. Ultra-thin absorber based on the AMC structure and its application to the microstrip antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(2): 353 - 357. (in Chinese)
- [14] 鲁磊, 屈绍波, 马华, 等. 宽带雷达散射截面减缩人工磁导体复合结构 [J]. 物理学报, 2013, 62(3): 034206(1 - 6).
- Lu lei, Qu Shao-bo, Ma Hua, et al. A broadband artificial magnetic conductor composite structure for radar cross section reduction [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3): 034206(1 - 6). (in Chinese)
- [15] 赵一, 曹祥玉, 高军, 等. 人工磁导体正交布阵的宽带低雷达截面反射屏 [J]. 物理学报, 2013, 62(15): 154204(1 - 9).
- Zhao Yi, Cao Xiang-yu, Gao Jun, et al. A wideband low RCS reflection screen based on artificial magnetic conductor orthogonal array [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(15): 154204(1 - 9). (in Chinese)
- [16] C A Balanis. Antenna Theory: Analysis and Design (2nd ed.) [M]. New York: Wiley, 1997.
- [17] B A Floyd, C M Hung, K K O. Intra-chip wireless interconnect for clock distribution implemented with integrated antennas, receivers, and transmitters [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2002, 37(5): 543 - 552.
- [18] 袁子东, 高军, 曹祥玉, 等. 一种性能稳定的新型频率选择表面及其微带天线应用 [J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014102(1 - 11).
- Yuan Zi-dong, Gao Jun, Cao Xiang-yu, et al. A novel frequency selective surface with stable performance and its application in microstrip antenna [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014102(1 - 11). (in Chinese)

作者简介



杨曙辉(通信作者) 男,1971年3月出生于黑龙江宝清县,现为中国传媒大学工学部教授,主要研究方向为射频通信、高速电路信号完整性、人工电磁材料等。

E-mail: huishuyang@sina.com



李邓化 女,1956年3月出生于河南南阳市,现为北京信息科技大学教授,主要研究方向为信息获取与处理等。



陈迎潮 男,1956年1月出生于江苏省南京市,现为美国南卡罗来纳大学教授,主要研究方向为计算电磁学、高速电路信号完整性、人工电磁材料等。

王文松 男,1986年2月出生于河南邓州市,博士研究生,主要研究方向为射频集成电路、高速电路信号完整性等。

汪海鹏 男,1989年10月出生于北京市,硕士研究生,主要研究方向为射频放大器及无源器件等。

陈文瀚 男,1990年9月出生于河南省信阳市,硕士研究生,主要研究方向为微带天线、片上天线等。

冯梦璐 女,1991年10月出生于湖南省岳阳市,硕士研究生,主要研究方向为射频通信系统及微波滤波器等。

贺学忠 男,1970年5月出生于河南省洛阳市,现为美国北卡罗来纳大学格林斯堡分校研究员,主要研究方向为半导体器件、人工电磁材料等。