

基于超材料构建的 PCB 通信信道 芯片无线互连通信研究

王文松^{1,2}, 陈迎潮², 杨曙辉^{2,3}, 曹群生^{1,4}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016; 2. 南卡罗莱纳大学电气工程系, 美国南卡罗莱纳州 29208;
3. 北京信息科技大学信息与通信工程学院, 北京 100101; 4. 毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 提出了一种基于蘑菇型电磁超材料构建的 PCB(Printed Circuit Board) 的芯片间/芯片内射频通信设计模型. 该设计用单极子天线模拟芯片管脚, 利用 PCB 介质作为通信信道, 并填充一层超材料吸收多径传播中部分电磁波, 降低天线回波损耗和改善天线之间相关度. 分析电磁波在 PCB 介质内传播途径及超材料对其影响. 对发射天线输入频率为 20GHz 不归零伪随机二进制信号, 接收天线输出信号的眼图清晰端正. 从频域和时域结果分析表明芯片-PCB 无线互连可行, 而且超材料能够明显改善通信信道而提高信号传输质量.

关键词: 芯片无线互连; 超材料; 芯片管脚天线; 射频通信; 眼图

中图分类号: TN43 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)12-2455-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.016

Study of Inter-Chip Wireless Connection with Mushroom-Type Metamaterial-Constructed Innovative PCB Channels

WANG Wen-song^{1,2}, CHEN Yin-chao², YANG Shu-hui^{2,3}, CAO Qun-sheng^{1,4}

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

2. Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina 29208, USA;

3. School of Telecommunication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;

4. State Key Laboratory of Millimeter Wave, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Based on an innovative two-layer PCB(Printed Circuit Board) medium, a monopole antenna is proposed for inter-chip wireless interconnection communications. The antenna is inserted into the PCB medium as an extended chip pin. The lower plate of the PCB is built up with a mushroom-type metamaterial to construct an electromagnetic wave absorbing layer. The interconnect communication model is analyzed and its scattering parameters are extracted. One antenna performs as a transmitter with a frequency 20GHz pseudo random binary signal with the high and low voltages at 1V and -1V, respectively. And others work as receivers whose received signals are represented through eye diagrams. The result shows that the mushroom-type metamaterial absorbs transmitted electromagnetic waves in the PCB medium, which reduces reflected waves and improves the system return loss for the two antenna system. In comparison with a metal supported PCB system, the eye-diagram derived for the metamaterial grounded PCB system can be improved. It is apparent that the proposed PCB system provides a good wireless inter-chip communication channel with the application of the absorbing feature of the metamaterials.

Key words: inter-chip wireless connection; metamaterial; chip's pin antenna; radio frequency communication; eye diagram

1 引言

随着大规模集成电路功能日益增多和半导体技术不断进步, 印制电路板上芯片管脚越来越密集, 工作频率越来越高, 使电路朝着密集型、多层型、高速化方向发

展. 当芯片连接的总线工作频率大于 10GHz 后, 引脚引起的信号完整性问题日益突出, 诸如信号的反射、串扰及寄生参数分布等^[1,2]. 为解决这些问题, 一方面积极改善传统互连技术, 使用低电阻率的导体或低介电常数材料, 或采用三维堆叠结构; 另一方面为了彻底消除

收稿日期: 2014-04-14; 修回日期: 2014-07-17; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61171039); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(No. CXZZ13_0164); 毫米波国家重点实验室开放课题(No. K201314)

对有线互连的依赖,诸多学者提出多种实现芯片间高速互连的可行方案,如电磁耦合、光互连、电磁无线互连等方法^[3~8].电磁无线互连方式具有信噪比恒定、功耗低、兼容性好和可扩展性等优点,不仅减少了集成电路中传输线的数量,还可以用来替换 I/O 管脚,成为实现芯片高速互连技术的最佳候选方案^[9].

在我们所提出的设计理念中,如图 1 所示将芯片 A 和芯片 B 的各个管脚作为微型天线实现芯片间或芯片内的射频通信,包括芯片-PCB(Printed Circuit Board)介质电磁无线互连和超宽带射频两部分.超宽带射频则分为接收信号处理和发射信号处理两部分电路.将要发射的信号控制脉冲发生器产生标准幅度的数字序列,经过功率放大器输入到发射天线,然后经过天线辐射出去.当目的地天线感应到辐射信号,经过低噪声放大器处理,进行滤波去噪声,接着输入到阈电路处理成满足数字信号处理需要的标准电压.在文献[10]中对 PCB 介质内 60GHz 单极子天线的辐射性能以及电磁波经介质传播到接收天线感应的信号电平进行研究,验证所提出芯片间无线互连结构的可行性,但该文献中介质接触面采用理想开放空间,电磁波完全被吸收.另外,自 2008 年 Landy 等人首次基于超材料电磁谐振实现完美吸收的设计^[11]以来,超材料在吸波体设计中已得到广泛的应用^[12~15].

本文提出一种用于芯片间/芯片内无线互连的新型 2 层 PCB 设计模型,在介质内填充吸波材料以消除对外部电路的电磁污染,利用 PCB 介质形成射频通信信道以提高电路的整体集成度.同时设计一款在介质中辐射单极子天线,对天线输入端使用 50Ω 同轴线进行匹配;分析电磁波在芯片-PCB 间的多径传播问题;设计一种蘑菇型电磁超材料覆盖在介质的下表面,探索超材料对通信信道的影响.最后,设置其一天线为发射天线,输入以高低电平为 $\pm 1V$ 、频率为 20GHz 的伪随机二进制信号,而其余为接收天线,观察接收信号的眼图.

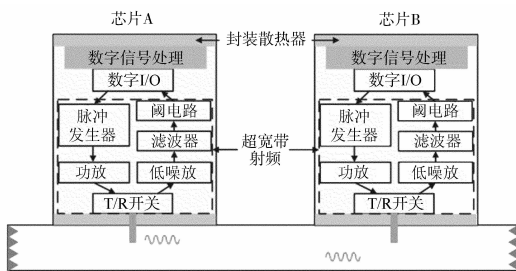
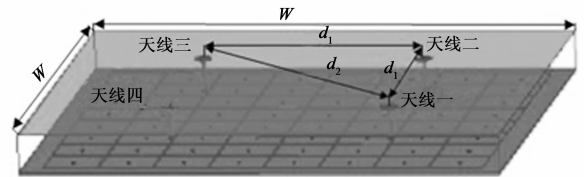


图1 芯片间/芯片内无线互连收发通信系统

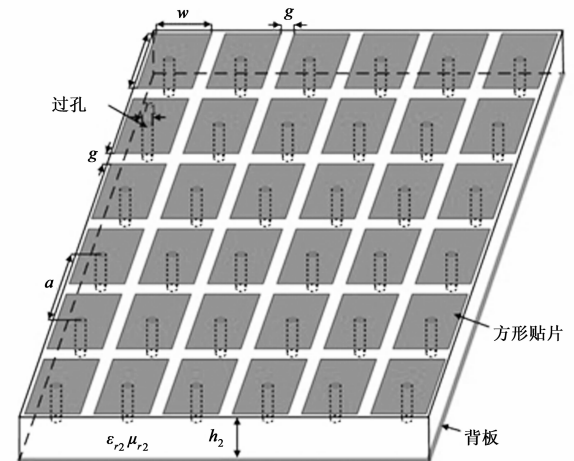
2 芯片间/芯片内的电磁无线互连

本文选取相对介电常数 2.2 和损耗正切值 0.0009 的 Rogers 5880 材料作为 PCB 介质,在此基础上设计和

构建芯片内/芯片间射频无线通信模型如图 2. 利用单极子天线替代传统的芯片管脚,不仅保留芯片固定功能,而且作为 I/O 端口的辐射天线.图 2(a)中天线一、天线二、天线三和天线四为模拟芯片管脚的单极子天线,称作“芯片管脚天线”,天线的辐射空间填充介质 1,在介质 1 的下表面覆盖蘑菇型电磁超材料如图 2(b).另外,用金属板替换超材料覆盖在介质 1 下表面的模型,作为参考模型.



(a) 具有超材料的芯片-PCB无线互连示意图



(b) 蘑菇型电磁超材料示意图

图2 基于PCB介质无线互连结构

2.1 单极子天线设计

单极子天线由直立振子和无限大的地板组成,结构简单,其长度因地面镜像法的引入而为半波长偶极子天线长度的一半,即

$$l = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (1)$$

其中, c 为电磁波在自由空间中传播速度; ϵ_{r1} 为传播媒质的相对介电常数; f_0 为天线工作的中心频率. 该天线最大增益为 0.79dB, 其辐射功率^[10]为半波偶极子天线的 1/2.

为了防止外部电磁波干扰,在单极子天线输入端使用同轴电缆馈电,内导体为铜线,外导体为铜管,把电磁场封闭在内外导体之间.同轴电缆的特性阻抗为 50Ω,根据式(2)确定铜管内径 D 与内导体直径 d 之比,即 D/d .

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} \ln \frac{D}{d} \quad (2)$$

其中, Z_0 为特性阻抗; ϵ_{r1} 为介质相对介电常数. 同时, 同轴线的长度设置为 0.1mm , 因为芯片单极子天线馈电处不均匀导致电磁波传输反射后产生多种模式, 延长同轴连接线可以让多模最大限度衰减, 减少多模存在.

2.2 蘑菇型电磁超材料设计

图 2(b) 中蘑菇型电磁超材料有三层: 方形贴片、金属背板及介质 2. 方形贴片通过介质 2 中过孔连接到背板, 介质 2 选取 FR-4 材料(相对介电常数 4.4 和损耗正切 0.02), 它的厚度为 h_2 . 设方形贴片单元结构长度为 w , 周期为 a 和间隙为 g .

在这里带宽设计为 $\Delta f = 2\text{GHz}$, 利用介质 1 介电常数 ϵ_1 、磁导率 μ_1 及相对带宽公式(3)

$$\text{BW} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\sqrt{L_s/C_s}}{\sqrt{\mu_1/\epsilon_1}} \quad (3)$$

结合式(4)

$$\text{BW} = \beta_1 h_2 = \omega_0 \sqrt{\mu_1 \epsilon_1} h_2 \quad (4)$$

可以确定介质 2 的厚度 h_2

$$h_2 = \frac{\text{BW}}{\omega_0 \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}} \quad (5)$$

由于谐振频率 ω_0 与片电容 C_s 、片电感 L_s 之间关系如下式

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (6)$$

片电感表达式为

$$L_s = \mu_2 h_2 \quad (7)$$

再结合式(3), 片电感的表达式可以改写为

$$L_s = \mu_2 \frac{\text{BW}}{\omega_0 \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}} = \frac{\mu_2}{\sqrt{\mu_1 \epsilon_1}} \left(\frac{\text{BW}}{\omega_0} \right)^{\frac{\mu_2}{\mu_1}} = \eta_1 \left(\frac{\text{BW}}{\omega_0} \right) \quad (8)$$

其中 η_1 为电磁波在介质 1 中传播的波阻抗. 将式(8)代入式(6)中, 片电容的表达式为

$$C_s = \frac{1}{(\omega_0)^2 L_s} = \frac{1}{\omega_0 \eta_1 \cdot \text{BW}} \quad (9)$$

每一个蘑菇型单元结构的电容 ΔC 与片电容 C_s 有如下关系^[16,17]

$$C_s = \Delta C \cdot F \quad (10)$$

其中 F 为几何校正因子. 由于电磁超材料使用方形贴片, 所以 F 为 1, 从而每一个单元结构的电容等于 C_s . 根据集成电路工艺技术, 贴片间隙选择为 $100\mu\text{m}$. 对于两层蘑菇型电磁超材料设计, 可以用式(10)和选择的单元结构贴片形状确定. 另外, 单元结构的电容 ΔC 也可以用式(11)非线性设计等式确定^[16,17]

$$\Delta C = \frac{w\epsilon_0(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{a}{g}\right) \quad (11)$$

利用式(10)和式(11)求解出 w .

2.3 电磁波传播途径分析

图 3(a) 为参考模型内一对收发天线的电磁波传播途径, 假设电磁波从发射天线一传播到接收天线三, 除了视距路径①, 还有介质上表面金属反射路径②和下表面金属反射路径③, 以及介质四壁的 4 条反射路径, 图中只显示④和⑤两条. 即使同一时刻发射相同频率的电磁波, 通过不同路径到达接收天线三处所需时间不同, 这样就会使前一刻信号幅度叠加到后一刻的信号上, 导致信号失真. 而具有超材料的芯片间/芯片内电磁互连中电磁波传播途径如图 3(b) 所示, 比直接在介质 1 下表面覆盖金属减少了三条传播途径, 这是因为蘑菇型超材料“吸收”了这部分电磁波.

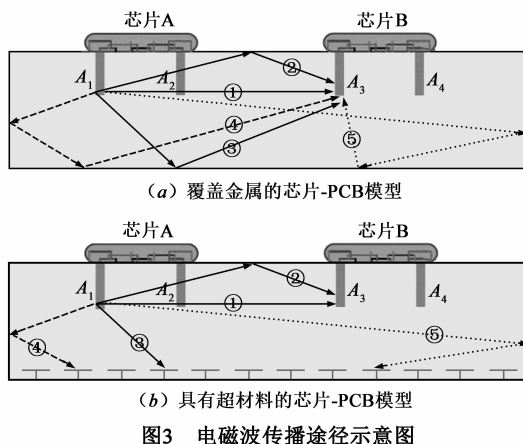


图3 电磁波传播途径示意图

根据等效媒质理论^[18], 电磁波的电、磁分量在电磁超材料结构中产生电磁谐振, 可以优化设计出具有不同等效介电常数和等效磁导率超材料, 使得电磁波在入射表面处阻抗与介质 1 中特性阻抗一致, 从而反射率 $R(f)$ 趋于 0. 用吸波率 $A(f)$ 描述超材料对电磁波的吸收情况, 即

$$A(f) = 1 - R(f) - T(f) \quad (12)$$

其中, $T(f)$ 为透射率. 通过降低反射率和透射率, 使得吸波率达到最大, 实现对电磁波的完美吸收. 透射面尽量设计不匹配, 这里简化设计采用金属背板, 透射率趋于 0, 则

$$A(f) = 1 - R(f) \quad (13)$$

根据式(13)计算出蘑菇型电磁超材料吸波率如图 4 所示, 图中左上角是电磁超材料单元的正视图 and 侧视图.

电磁超材料在 TE 和 TM 波垂直入射下的吸波性能如图 4 所示, TE 和 TM 波吸波率曲线重合在一起, 具有极化不敏感的特性. 吸波率大于 50% 的吸波频带为 $19.48\text{GHz} \sim 20.46\text{GHz}$, 其中最大值在 19.96GHz , 吸波率为 61.82%.

对图 2(a) 模型进行优化, 蘑菇型电磁超材料主要参数: $w = 3.9\text{mm}$, $g = 0.13\text{mm}$, $a = 4.03\text{mm}$. 设计中电路

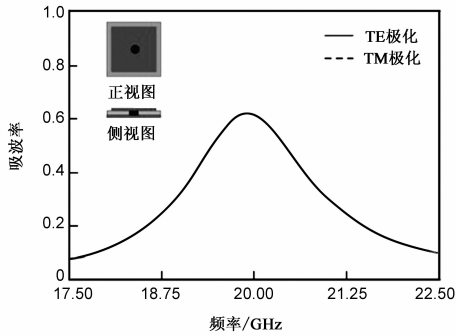


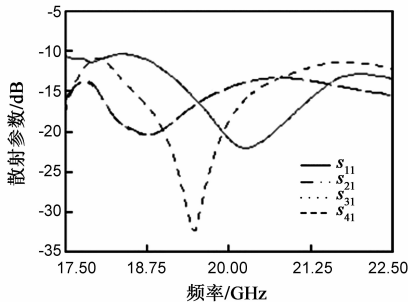
图4 单元结构和吸波率

板长和宽均为 32.11mm,其介质 1 和介质 2 厚度分别为 2.73mm、0.16mm,以及对铜厚度工艺采用 $18\mu\text{m}$;四个单极子天线长度均 2.38mm,内径 0.1mm,材质为铜.天线一作为发射天线,天线二、天线三和天线四均作为接收天线.天线一到天线二和天线四的距离均为 8.06mm,到天线三的距离为 11.40mm.

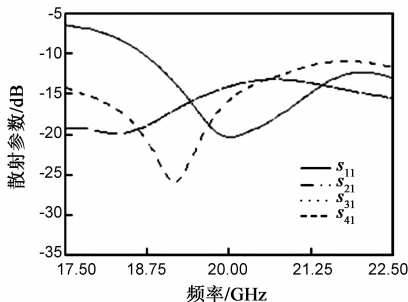
3 仿真结果及理论分析

3.1 电磁仿真散射参数

图 5(a)是电磁仿真软件 HFSS 对构建的具有超材料的芯片-PCB 无线互连模型分析获取的散射参数.天线一的回波损耗 S_{11} 在频率 20.25GHz 处为最小值 -22.09dB ,而在中心频率 20GHz 处的值为 -20.94dB ;天线一到天线二和天线四相关度分别为 -14.55dB 和 -14.55dB ;天线一到天线三的相关度为 -18.69dB .图 5(b)是把电磁超材料更换为金属板后仿真结果,天线一



(a) 具有超材料的芯片-PCB模型仿真



(b) 覆盖金属的芯片-PCB模型仿真

图5 电磁超材料对散射参数影响

的回波损耗 S_{11} 在中心频率 20GHz 处出现最小值 -20.36dB ,天线一到天线二和天线四相关度分别为 -14.08dB 和 -14.08dB ,天线一到天线三的相关度为 -15.78dB .

与覆盖金属的芯片-PCB 无线互连模型相比,具有超材料的模型能够降低单极子天线的回波损耗和改善天线之间的相关度,即传输性能.这是因为天线辐射的电磁波传播到介质 1 下表面而被超材料吸收,从而减少一部分反射波和改善介质 1 内电磁波传播环境.

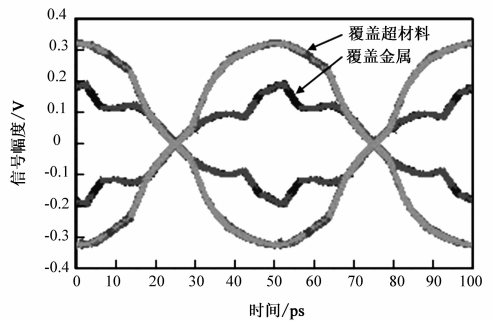
3.2 电路设计与时域分析

为验证超宽带数字脉冲信号可直接通过天线发射,且方便观测接收信号眼图.根据转折频率 $F(\text{knee})$ 公式(14)^[19],计算出方波信号的上升沿或下降沿时间.因为在转折频率处,数字脉冲的大部分能量集中在该频率以下,而对其以上的频率信号处理几乎没有影响.

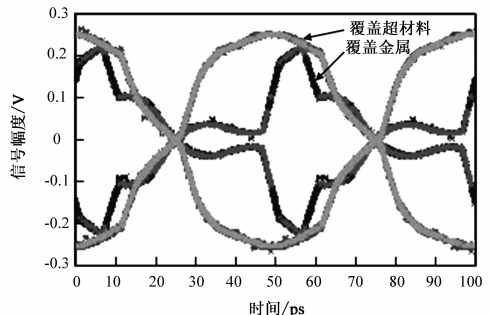
$$F(\text{knee}) = \frac{0.5}{T_r} \quad (14)$$

其中,占空比为 0.5,上升沿时间为 T_r .选取转折频率 50GHz,利用 HFSS 仿真图 2(a)模型,其频率范围从直流到 60GHz、步长 10MHz.提取出散射参数矩阵,导入 ADS 软件进行联合仿真.

在发射天线一的输入端加入激励信号:高低电平为 1V 和 -1V ,上升和下降时间均为 10ps,码元周期 50ps,速率为 20Gbit/s 的不归零伪随机二进制序列,而在其它天线端口分别接入 50Ω 负载,并用虚拟示波器显示接收天线输出的信号眼图.为观测到稳定后信号



(a) 天线二接收信号眼图



(b) 天线三接收信号眼图

图6 伪随机二进制信号传输

状态,在联合仿真的接收端观测时间从 200ps 起持续到 500200ps,共 1 万个码元周期,其信号眼图如图 6。

从图 6(a)可以看到,具有电磁超材料时天线二处信号眼图的眼高为 0.615V、眼宽约为 49.889ps;而改用金属板时天线二处信号眼图的眼高为 0.272V、眼宽约为 49.889ps。图 6(b)显示具有电磁超材料时天线三处信号眼图的眼高为 0.486V、眼宽约为 47.413ps,而改用金属板时天线三处信号眼图的眼高为 0.208V、眼宽约为 29.126ps。由于信号从天线一传输到天线三的距离大于传输到天线二的距离,导致更大的路径损耗,使天线二处信号眼图“眼睛”睁开程度比天线三处大。整体上,利用具有超材料的芯片-PCB 无线互连结构传输信号获取的眼图清晰端正,“眼睛”睁开比较大。

仿真结果对比表明,可以利用电磁超材料吸收芯片-PCB 介质内电磁波,减少反射和多径传播,提高接收信号的质量。通过时域中对信号眼图观测,提出的模型对信号传输可以改善很多。

4 结论

本文基于 PCB 介质设计了一种芯片间/芯片内电磁无线互连模型。用 HFSS 分析了该模型的散射参数,无论回波损耗或传输函数性能都有一定程度提高;分析了电磁波在 PCB 介质内传播途径及超材料对其影响。同时,提取出散射参数矩阵,与 ADS 软件联合仿真。通过收发天线传输伪随机二进制信号,验证了数字信号在基于 PCB 的芯片间/芯片内无线互连通信的可行性,同时验证了超材料能够改善该结构性能。

参考文献

- [1] BIALASIEWICZ J T, et al. Wavelet-based approach to evaluation of signal integrity [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4590 – 4598.
- [2] CHEN Y, et al. Frequency and time domain crosstalk signal analysis for integrated high-density circuits [A]. Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems [C]. Xi-amen, China; IEEE, 2009. 334 – 337.
- [3] HE X, et al. Crosstalk modeling and analysis of through-silicon-via connection in 3D integration [A]. Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium [C]. Taipei: PIERS, 2013. 857 – 861.
- [4] MIURA N, et al. A 195Gb/s 1.2W inductive inter-chip wireless superconnect with transmit power control scheme for 3D-stacked system in a package [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(1): 23 – 34.
- [5] KUMAR A, et al. Active crosstalk cancel for high-density inductive inter-chip wireless communication [A]. Proceedings of

- 19th International Conference on VLSI Design Held Jointly with 5th International Conference on Embedded Systems and Design [C]. Hyderabad, India: IEEE, 2006. 271 – 276.
- [6] IWATA A, et al. A 3D integration scheme utilizing wireless interconnections for implementing hyper brains [A]. Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2005. 262 – 267.
- [7] RAHAMAN M S, CHOWDHURY M H. Time diversity approach for intra-chip RF/wireless interconnect systems [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Seattle, WA, USA: IEEE, 2008. 2434 – 2437.
- [8] KENNETH K O, et al. On-chip antennas in silicon ICs and their application [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2005, 52(7): 1312 – 1323.
- [9] JUNG B, YUE C P. Trends and outlook of wireless I/O's for short-range connectivity and beyond [A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology [C]. Beijing, China: IEEE, 2011. 33 – 36.
- [10] 杨曙辉, 王彬, 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, 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] LANDY N I, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [12] LANDY N I, et al. Design theory and measurement of a polarization insensitive absorber for terahertz imaging [J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 125104.
- [13] AVITZOUR Y, et al. Wide angle infrared absorber based on negative-index plasmonic metamaterial [J]. Physical Review B, 2009, 79(04): 045131.
- [14] 沈晓鹏, 崔铁军, 等. 基于超材料的微波双波段吸收器 [J]. 物理学报, 2012, 61(5): 058101.
SHEN Xiao-peng, CUI Tie-jun, et al. Dual band metamaterial absorber in microwave regime [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 058101. (in Chinese)
- [15] PADOORU Y R, et al. New absorbing boundary conditions and analytical model for multilayered mushroom-type metamaterials: applications to wideband absorbers [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(12): 5727 – 5742.
- [16] SIEVENPIPER D. High-Impedance Electromagnetic Surfaces [D]. Los Angeles: Department of Electrical Engineering, University of California, 1999.
- [17] BALANIS C A. Modern Antenna Handbook [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 737 – 777.

[18] SMITH D R, PENDRY J B. Homogenization of metamaterials by field averaging[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(3): 391 – 407.

[19] JOHNSON H W, GRAHAM M. High-Speed Digital Design, A Handbook of Black Magic[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1993. 1 – 5.

作者简介



王文松 男, 1986年2月出生于河南省邓州市. 博士研究生. 主要从事芯片内/芯片间无线互连、高速电路信号完整性和射频集成电路等研究.

E-mail: uscnuaa@gmail.com



陈迎潮 男, 1956年1月出生于江苏省南京市. 现为南卡罗莱纳大学教授、博士生导师. 主要研究方向为计算电磁学和高速电路信号完整性.

E-mail: chenyn@cec.sc.edu

杨曙辉 男, 1971年3月出生于黑龙江省宝清县. 现为北京信息科技大学教授. 主要研究方向为射频通信电路设计和高速电路信号完整性.

E-mail: yangshuhui@bistu.edu.cn

曹群生 男, 1959年6月出生于安徽省合肥市. 现为南京航空航天大学教授、博士生导师. 主要研究方向为计算电磁学、微波和天线技术、高速电路信号完整性.

E-mail: qunsheng@nuaa.edu.cn