

Ku 波段编码式电控超薄周期单元设计与验证

杨欢欢 杨帆 许慎恒 李懋坤 曹祥玉 高军

Design and verification of an electronically controllable ultrathin coding periodic element in Ku band

Yang Huan-Huan Yang Fan Xu Shen-Heng Li Mao-Kun Cao Xiang-Yu Gao Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 054102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.054102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单层超薄高效圆极化超表面透镜

Ultra-thin single-layered highefficiency focusing metasurface lens

物理学报.2016, 65(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074101>

基于极化旋转超表面的圆极化天线设计

A circular polarization antenna designed based on the polarization conversion metasurface

物理学报.2016, 65(2): 024101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024101>

一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计

A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures

物理学报.2015, 64(23): 234101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234101>

基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号空间功率合成

Single frequency spatial power combining using sparse array based on time reversal of electromagnetic wave

物理学报.2015, 64(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204101>

电力线谐波辐射在分层各向异性电离层中的传播特点

Propagation characteristics of power line harmonic radiation into the stratified anisotropic ionosphere

物理学报.2015, 64(19): 194101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194101>

## Ku波段编码式电控超薄周期单元设计与验证\*

杨欢欢<sup>1)2)†</sup> 杨帆<sup>1)</sup> 许慎恒<sup>1)</sup> 李懋坤<sup>1)</sup> 曹祥玉<sup>2)</sup> 高军<sup>2)</sup>

1)(清华大学电子工程系, 北京 100084)

2)(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2015年10月13日收到; 2015年11月15日收到修改稿)

编码式电控周期单元通过加载电子控制器件使周期结构具有编码式的电可调特点. 本文利用PIN二极管, 设计实现了一种工作在Ku波段的超薄平面电控单元结构. 当外加电压控制二极管导通或截止时, 该结构的反射相位呈现出 $180^\circ$ 的相位差, 并且具有较低的反射损耗. 因此, 当对周期排列的单元外加不同的电压时, 可等效为用不同组合的“1”, “0”对结构进行编码, 从而可以获得不同的电磁功能. 为验证单元的编码特性, 从“场”与“路”两个角度考虑, 设计了实际的偏置电路, 制作了单元样品, 并基于波导法测试了其性能. 实验结果表明: 在加载不同的控制电压时, 制作的单元结构实现了设计的低损耗和相位差; 实验与仿真符合良好. 提出的周期单元形式简单, 厚度超薄, 其电控编码式特性在主动式隐身表面或波束捷变天线设计等许多方面都有潜在应用.

关键词: 周期结构, 编码, 电可控

PACS: 41.20.Jb, 73.90.+f, 84.90.+a

DOI: 10.7498/aps.65.054102

## 1 引言

周期结构是设计新型人工电磁材料的一种有效途径<sup>[1]</sup>. 近年来, 基于周期排列的金属、介质设计的人工结构已经表现出负折射<sup>[2-4]</sup>、同向反射<sup>[5-7]</sup>、完美吸波<sup>[8-10]</sup>、电磁带隙<sup>[11-13]</sup>、频率选择<sup>[14-16]</sup>、极化旋转等<sup>[17-19]</sup>诸多奇异的电磁特性. 2014年, Giovampaola和Engheta<sup>[20]</sup>首次提出“数字”人工周期结构的概念, 即将呈现不同媒质参数的周期结构通过类似于数字通信的编码方式组合在一起, 从而获得有别于单一周期结构(也称为“模拟”人工周期结构)的新颖特性. 随后, Cui等<sup>[21]</sup>分析了不同周期单元构成的“数字”人工结构对电磁波的空间散射性能, 并通过控制单一周期结构的不同偏置电压, 实现了X波段编码式的电可调周期设计. 与文献<sup>[2-19]</sup>的周期结构相比, 这类材料利用人工周期结构的“数字化”重组这种简化的方式, 实现了更加复杂、多样、独特的电磁特性. 此外, 从结

构上看, 与文献<sup>[20]</sup>的“数字”人工周期结构相比, 这类材料的所有单元形式完全相同, 其“数字化”过程仅通过每个单元上电子器件的不同工作状态实现. 这不仅简化了整个设计, 还使材料整体的“数字化”编码方式具备实时可调的“可编程”特性, 这一自由度极大丰富了此类材料对电磁波的控制作用. 上述特点表明: 这类编码式电控周期结构所具有的比传统周期结构更加灵活的新奇特性, 不仅为新型电磁材料的研究提供了新思路, 也使其在隐身设备、电磁聚焦、新型透镜等许多领域都有更加广阔的应用前景.

尽管文献<sup>[20, 21]</sup>分别从理论和实验方面证实了编码式周期结构对电磁波传输及散射的调控效果, 文献<sup>[21]</sup>还设计制作了工作在8.3 GHz的电控周期结构, 但总体而言, 对于编码式电控周期结构的实验研究仍然较少, 尤其是在更高频段, 相关研究更是鲜有报道. 究其原因, 一方面, 受实际电子器件限制, 周期单元的损耗往往较大; 另一方面, 对

\* 清华信息科学与技术国家实验室和国家自然科学基金(批准号: 61271100, 61371013, 61471389)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jianye8901@126.com

周期单元每个电子器件的独立直流偏置控制往往会影响其射频性能, 或使单元结构变得十分复杂. 针对上述问题, 本文将PIN二极管应用于贴片形周期单元, 提出了一种结构简单、损耗较小的超薄电控周期单元, 综合“场”和“路”的分析方法, 给出直流偏置设计的一般性原则, 并结合所提结构设计了实际偏置电路, 最后基于波导的镜像原理对加载有PIN二极管的单元进行了验证. 仿真与实验结果表明: 在Ku波段, 设计的超薄周期单元呈现出电控可调相位的反射特性, 当加载不同的偏置电压时, 其反射损耗均较小, 而反射相位相差 $180^\circ$ , 具有类似于“0”或“1”的编码式电控特性. 这些特点使得该结构可以直接应用于可实时调控的隐身表面或波束扫描及赋形天线设计.

## 2 编码式电控周期结构

### 2.1 电控周期单元设计

图1(a)给出了编码式电控周期结构的示意图. 其单元结构为 $l \times w$ 的矩形贴片, 贴片一端经

PIN二极管和金属通孔连接至金属地板, 如图1(b)所示. PIN二极管在导通(ON)和截止(OFF)两种状态下分别等效为电阻或电容与电感串联, 如图1(c)—(d)所示. 因此, 通过对结构的参数优化, 可使周期单元对入射电磁波表现出不同的反射特性, 如相位相差 $180^\circ$ . 这里单元的两种状态可以用二进制中的“1”或“0”编码表示, 即将PIN在导通状态下的单元记为“1”, 截止状态记为“0”. 因此, 对于图1(a)示的周期结构, 当对每个单元独立外加不同的偏置电压时, 即可得到不同编码组合的电控周期结构.

采用 Ansoft HFSS 全波电磁仿真软件得到的线极化波垂直入射条件下的反射性能如图2中“1”或“0”所示. 所用介质板材为 Taconic TLX-8, 相对介电常数为2.55, 厚度 $t = 1.58 \text{ mm}$  ( $0.076\lambda$ ,  $\lambda$ 为14.5 GHz对应自由空间波长), 损耗角正切0.0019, 单元的结构参数为:  $p = 9.5 \text{ mm}$ ,  $l = 4.8 \text{ mm}$ ,  $w = 4 \text{ mm}$ , PIN二极管为MACOM MADP-000907-14020, 其等效电路参数 $R = 7.8 \Omega$ ,  $C = 0.025 \text{ pF}$ ,  $L = 30 \text{ nH}$ . 从图2(a)可以看出, 在13.5—15.5 GHz,

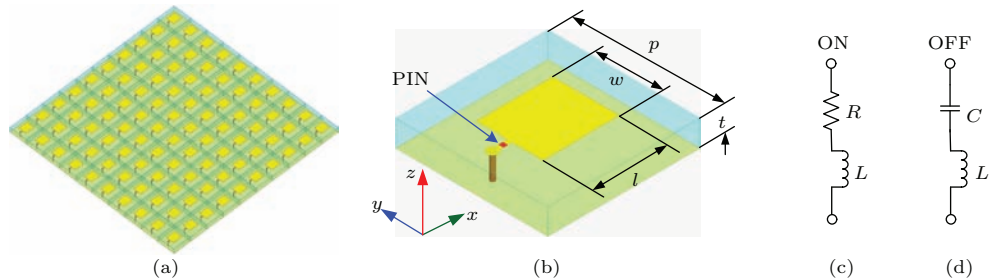


图1 (网刊彩色) 电控周期结构及PIN等效电路 (a) 周期结构; (b) 单元结构; (c) PIN导通时等效电路; (d) PIN截止时等效电路

Fig. 1. (color online) Electrically controllable periodic structure and equivalent circuit of PIN: (a) Periodic structure; (b) unit cell structure; (c) equivalent circuit when PIN is on; (d) equivalent circuit when PIN is off.

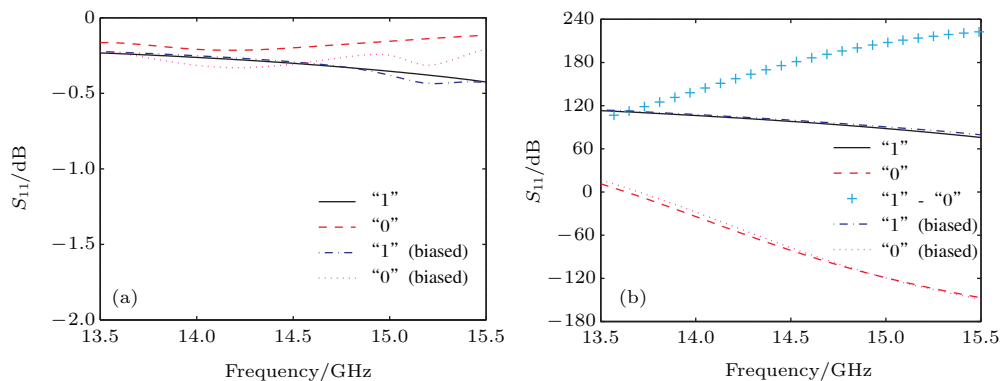


图2 (网刊彩色) 单元反射性能 (“1”, “0”表示不加偏置电路时通断状态; “1”(biased), “0”(biased)表示加偏置电路后通断状态) (a) 不同偏压时的反射损耗; (b) 不同偏压时的反射相位

Fig. 2. (color online) Reflection properties (“1”, “0” represent the ON or OFF state without biasing; “1”(biased), “0”(biased) represent the ON or OFF state with biasing): (a) Reflection loss under different biasing; (b) reflection phase under different biasing.

无论 PIN 导通或截止, 单元的反射损耗都非常小(小于 0.5 dB), 而反射相位则相差较大, 在 14.5 GHz 反射相位差为  $180^\circ$  (二进制编码中, 最大相位差即为  $180^\circ$ ).

## 2.2 偏置电路设计

偏置电路是编码式电控周期结构设计的难点. 其设计必须满足两个基本要求: 1) 直流通路不能对微波性能产生影响; 2) 微波信号不能进入直流通路. 为达到这两个条件, 设计了如图 3 所示加载有偏置电路的周期结构. 与图 1 (b) 相比, 设计的偏置电路由偏置线、金属通孔、扇形枝节和直流线构成. 综合“场”与“路”的分析方法, 针对上述第一个要求, 设计时遵循了以下原则: 一是偏置线的位置尽量选在电压零点; 二是偏置线选用线宽较细的高阻线. 针对第二点要求, 设计时在直流线的前端采用了终端开路的扇形枝节. 其中, 扇形枝节的半径及偏置线的长度均近似为四分之一波长, 这样即便有少量微波信号流入偏置线, 经过扇形枝节后也将被短路, 而不会进入直流线; 对于微波性能, 所有的偏置电路结构经过扇形枝节—偏置线的阻抗变换后,

在偏置点处等效为开路, 因此其对微波性能的影响非常小. 此外, 为了将微波与直流信号有效隔离, 在图 1 (b) 所示结构的金属地板下增加了一层 FR-4 介质层(相对介电常数为 4.4, 厚度 0.5 mm) 用于直流偏压, 由金属地板将其与微波结构分开. 总之, 综合上述原则之后的设计, 可最大限度避免偏置电路和周期单元的相互影响.

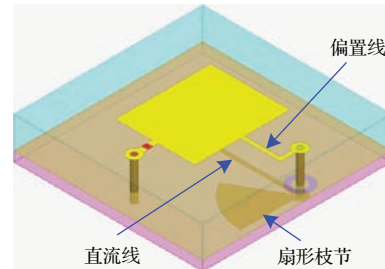


图 3 (网刊彩色) 加载偏置电路的电控周期结构单元  
Fig. 3. (color online) Unit cell of electrically controllable periodic structure with biasing.

图 2 中还对比了加载偏置电路前后(加偏置电路用 biased 表示) 编码式周期单元的反射性能. 可以看出, 设计偏置电路对反射性能的影响几乎可以忽略. 为进一步证实这一点, 图 4 给出了 14.5 GHz

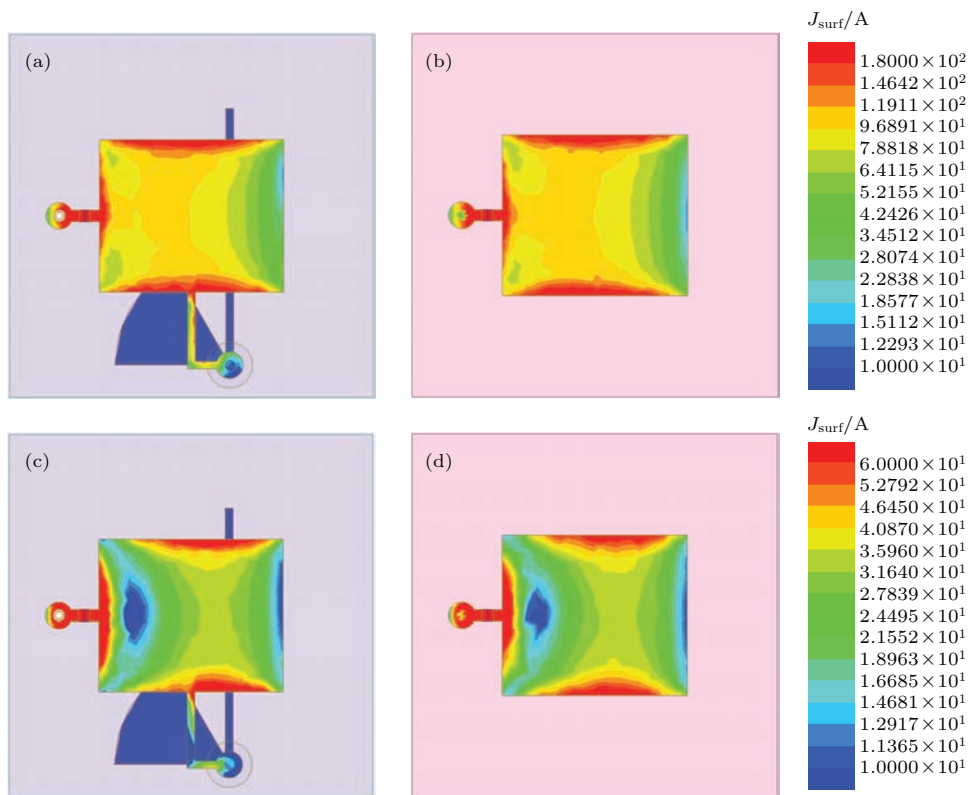


图 4 (网刊彩色) 14.5 GHz 单元表面电流分布 (a) 加偏置“0”; (b) 无偏置“0”; (c) 加偏置“1”; (d) 无偏置“1”  
Fig. 4. (color online) Surface current distributions at 14.5 GHz: (a) “0” with biasing; (b) “0” without biasing; (c) “1” with biasing; (d) “1” without biasing.



的表面电流分布. 从图 4(a) 和图 4(c) 中可以看到, 对于加载偏置的“1”或“0”状态, 直流线上的感应电流非常小, 这表明微波信号确实没有耦合到直流偏置上. 比较图 4(a) 与图 4(b) 或图 4(c) 与图 4(d) 可以看出, 金属贴片和 PIN 二极管上的电流分布并没有因偏置电路的增加而发生明显改变, 这进一步说明了偏置电路设计的有效性.

### 3 实验验证与分析

#### 3.1 实验验证

对周期结构的实验验证基本有两种方法: 一种为空间波法<sup>[22]</sup>, 即实际制作具有足够周期数的结构, 利用一个标准喇叭天线发射电磁波, 另一个标准喇叭天线接收经周期结构反射/透射的电磁波. 这种方法适用于几乎所有的周期结构, 其不足之处在于测试结果易受空间环境干扰, 且周期个数要足够大才尽可能减小边缘散射、绕射等影响, 这对于制作成本相对高些的电控周期结构非常不利. 第二种方法为波导法<sup>[9]</sup>, 即将周期结构的单元置于金属波导的横截面上, 利用电流沿波导壁的镜像模拟无限大周期结构. 这种方法在封闭的空间中, 利用较少的单元数达到了对周期结构测试的目的. 但严格意义上讲, 由于波导壁的电流感像并非像图 1(a) 示的方式周期排列, 而是如图 5 所示, 这种方法非常适用于结构理想对称的单元. 对于图 3 示设计的结构非理想对称单元, 波导法测试将按图 5 示的周期排布方式计入单元间的互耦. 此外, 对于设计的线极化单元, 为满足边界条件, 单元的极化方向需与矩形波导的短边一致, 而为利用波导长边方向的镜像效应, 单元辐射贴片的中心应和整个单元的中心重合.

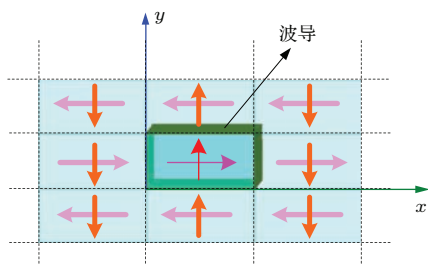


图 5 (网刊彩色) 波导中电流的镜像

Fig. 5. (color online) Mirror image of current in waveguide.

需要指出的是, 除上述非对称镜像之外, 波导法单元测量还存在斜入射的现象, 即受波导

传输模式的限制, 实际照射到单元表面的电磁波主要是 TE<sub>10</sub> 模式的斜入射波, 斜角度  $\theta$  满足  $|\sin \theta| = \lambda_0 (2a)^{-1} (\lambda_0$  为工作频率对应的自由空间波长,  $a$  为波导截面长边)<sup>[23]</sup>, 对应不同的频率, 其斜入射角不同. 综上可知: 波导法测试的结果并不能直接和前述周期单元对垂直入射波的反射结果相比. 这里以波导法测试的目的是以一种快速、简便而又经济的方法来模拟周期结构的特性, 验证基于波导仿真的结果与测试结果的符合度, 确认仿真结果的精确性.

基于此, 首先制作了 8 个单元测试样品, 并焊接好 PIN 二极管及直流线, 如图 6(a) 所示, 随后将待测样品固定到特殊定制的固定件上, 如图 6(b), 并按照图 6(c) 示的系统测试单元的反射性能. 实验中所用标准波导为国标 BJ-120, 矢量网络分析仪为 Agilent E8363B, 可编程直流源 RIGOL DP832 为每个导通单元提供的直流偏压为 1.37 V, 每个样品上的两个单元同时工作在“1”或“0”状态.

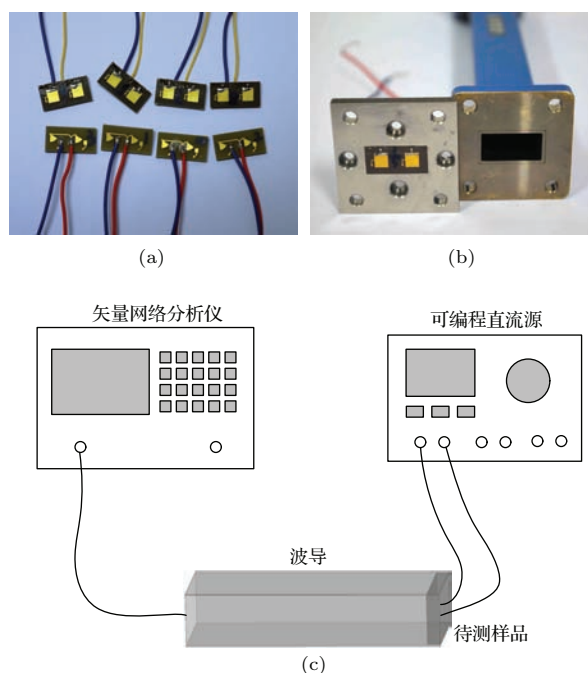


图 6 加工及测试 (a) 焊接有 PIN 二极管的样品; (b) 波导及固定件; (c) 测试系统示意图

Fig. 6. Fabrication and measurements: (a) Fabricated samples with PIN diode welded; (b) waveguide and fixture; (c) schematic of test system.

#### 3.2 结果与分析

为确保测试结果的可靠性, 实验中对 8 个制作样品分别进行加电与不加电测试, 并将所有样品的两组测试结果取平均值作为最终结果, 这样将尽可

能避免因焊接、装配等误差带来的不确定性. 此外, 在测试样品前, 首先对波导进行了校准, 并以短路片验证了校准效果. 图7比较了测试结果和以波导法重新对单元仿真的结果. 总体而言, 无论是损耗还是相位, 测试与仿真结果均符合较好, 这进一步证实了设计单元以一种简单超薄的结构实现了低损耗和相位可控的目标.

从图7(a)同时可以看到, 测试的损耗较仿真结果略高. 分析认为, 其原因包括: 焊接导致的表面不平整(见图6(a))对入射波产生了散射、装配时测试样品与固定件间的缝隙引起了部分能量泄漏.

除此之外, 由于PIN二极管具有非线性效应, 而仿真中仅用固定的等效电路参数在Ku波段建模, 也会导致结果偏差. 图8(a)分析了单元损耗随等效电阻的变化趋势, 可以看出, 随着电阻的增大, 单元的损耗也逐渐增加. 图8(b)中的结果表明, 在“0”状态下, 不同的电容值将会引起较大的反射相位变化, 其变化趋势与图7(b)中的测试结果一致. 些分析说明, 精确的等效电路建模也是减小图7中偏差产生的一项重要因素. 总之, 上述分析也从侧面证实了设计的有效性.

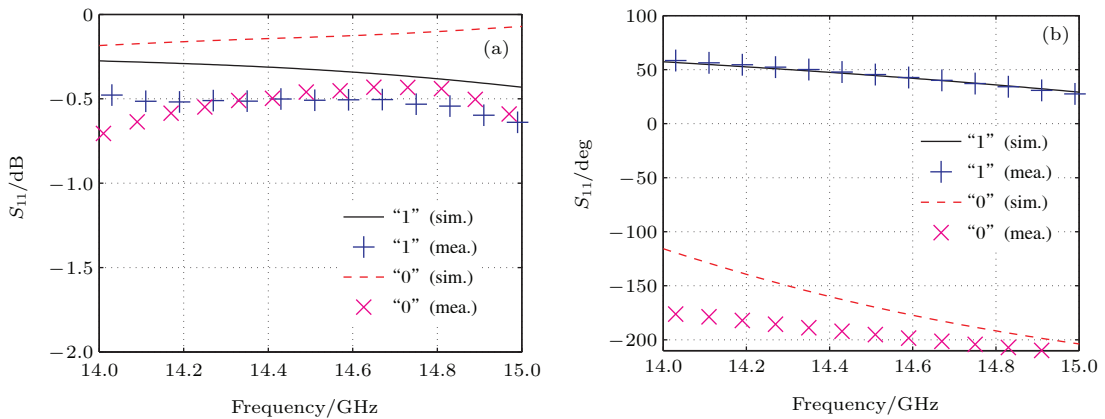


图7 (网刊彩色) 仿真与测试反射性能 (a) 反射损耗; (b) 反射相位

Fig. 7. (color online) Comparison of simulated and measured reflection properties: (a) Reflection loss; (b) reflection phase.

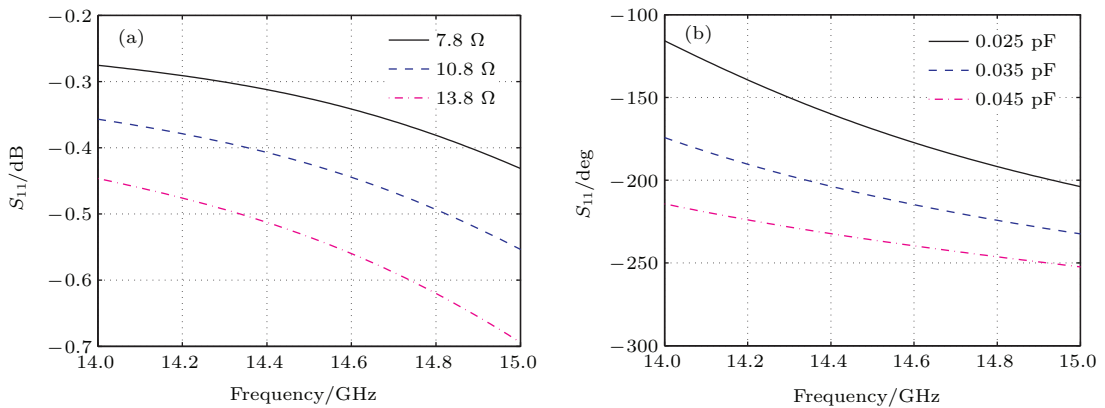


图8 (网刊彩色) (a) 不同阻值下的反射损耗; (b) 不同电容下的反射相位

Fig. 8. (color online) (a) Reflection loss with different resistor values; (b) reflection phase with different capacitance values.

## 4 结 论

本文设计并实验验证了一种工作在Ku波段的超薄平面电控周期结构. 设计的周期单元简易可行, 仅由贴片和一个PIN二极管构成, 通过控制

PIN二极管的偏置电压, 周期单元的反射相位呈现出电控的编码式特性. 为了进行实验验证, 综合“场”与“路”的分析方法, 设计了有效的偏置电路. 利用波导法对实际制作的样品进行了测试, 测试结果与仿真符合较好. 结果表明: 设计单元的反射损耗较小, 而其反射相位在加载偏置电压前后发生明

显变化, 通过参数的优化设计, 可使反射相位差达二进制编码中最大的 $180^\circ$ . 本文设计的单元结构简单、损耗小、相位可控, 为雷达隐身材料及相控阵天线的研究提供了新思路, 具有较好的应用前景.

### 参考文献

- [1] Cui T J, Liu R P, Smith D R 2010 *Metamaterials: Theory, Design, and Applications* (New York: Springer) p2
- [2] Liu R, Ji C, Mock J J, Chin J Y, Cui T J, Smith D R 2009 *Science* **323** 366
- [3] Xiong H, Hong J S, Jin D L, Zhang Z M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094101
- [4] Xu H X, Wang G M, Wang J F, Yang Z M 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124101
- [5] Goussetis G, Feresidis A P, Vardaxoglou J C 2006 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **54** 82
- [6] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, Maagt P D 2007 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **55** 3630
- [7] Dang K Z, Shi J M, Li Z G, Meng X H, Wang Q C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114101 (in Chinese) [党可征, 时家明, 李志刚, 孟祥豪, 王启超 2015 物理学报 **64** 114101]
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [9] Li L, Yang Y, Liang C H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702
- [10] Li L Y, Wang J, Du H L, Wang J F, Qu S B 2015 *Chin. Phys. B* **21** 094101
- [11] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F, Alexopolous N G, Yablonovitch E 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory.* **47** 2059
- [12] Shi Y Y, Tang W C, Liu S, Wang C, Zhuang W 2015 *IEEE Trans. Electromagn. C* **57** 532
- [13] Su Z J, Dang X J, Li L, Liang C H 2015 *Electron. Lett.* **51** 501
- [14] Sivasamy R, Kanagasabai M 2015 *IEEE Microw. Wirel. Co.* **25** 298
- [15] Yu Y M, Chiu C N, Chiou Y P, Wu T L 2015 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **63** 1641
- [16] Zhang J, Gao J S, Xu N X, Yu M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 067302 (in Chinese) [张建, 高劲松, 徐念喜, 于淼 2015 物理学报 **64** 067302]
- [17] Zhu X C, Hong W, Wu K, Tang H J, Hao Z C, Chen J X, Yang Q G 2013 *IEEE Antenn. Wirel. Pr.* **12** 968
- [18] Gao X, Han X, Cao W P, Li H O, Ma H F, Cui T J 2015 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **63** 3522
- [19] Fan Y, Qu S B, Wang J F, Zhang J Q, Feng M D, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 184101 (in Chinese) [范亚, 屈绍波, 王甲富, 张介秋, 冯明德, 张安学 2015 物理学报 **64** 184101]
- [20] Giovampaola C D, Engheta N 2014 *Nat. Mater.* **13** 1115
- [21] Cui T J, Qi M Q, Wang X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** 218
- [22] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **61** 2327
- [23] Hannan P, Balfour M 1965 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **13** 342

# Design and verification of an electronically controllable ultrathin coding periodic element in Ku band\*

Yang Huan-Huan<sup>1)2)†</sup> Yang Fan<sup>1)</sup> Xu Shen-Heng<sup>1)</sup> Li Mao-Kun<sup>1)</sup>  
Cao Xiang-Yu<sup>2)</sup> Gao Jun<sup>2)</sup>

1) (*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

( Received 13 October 2015; revised manuscript received 15 November 2015 )

## Abstract

The coding periodic element is able to achieve coded reconfigurable electromagnetic (EM) responses by loading controllable electronic devices. In this work, an electronically controllable ultrathin planar periodic element structure in Ku band is implemented with one PIN diode. When the PIN diode turns ON or OFF by applying a proper biasing voltage, the resonant property of the element changes correspondingly, and hence a  $180^\circ$  phase difference between the two states is obtained. By optimizing the geometrical parameters, the reflection loss less than 0.5 dB is achieved by the proposed element. Therefore, using a proper biasing voltage control network, the PIN diodes of the proposed elements in a periodic arrangement are set at different states, which may be denoted by a binary string with “1”s or “0”s, and the whole array of elements operates as a binary coding periodic structure and exhibits controllable EM functionalities. In order to verify the coding property of the proposed element, the general principle for the biasing circuit design is given. An optimized biasing circuit is thoroughly studied using both field distribution analysis and equivalent circuit theory. Simulated results show that the specially designed biasing hardly affects the element reflection performance. Finally, a group of element prototypes are fabricated with welded PIN diodes and measured using the standard waveguide test method. The difference in mirror image between the waveguide test and the desired periodic arrangement is also discussed. The experimental results validate that the proposed element successfully achieves good coding EM performance by controlling its biasing voltage. The reflection loss of the element is very low, and well distributed phase difference between the two element states is observed. The simulation and experiment results agree well, and the deviation between them is analyzed in detail. The proposed element possesses distinctive favorable features such as coded controllable EM functionalities, simple structure and ultrathin profile, thus exhibiting the promising prospects in tunable stealth surface, agile antennas, and many other applications.

**Keywords:** periodic structure, coding, electronically controllable

**PACS:** 41.20.Jb, 73.90.+f, 84.90.+a

**DOI:** [10.7498/aps.65.054102](https://doi.org/10.7498/aps.65.054102)

---

\* Project supported by the Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology (TNList), China and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61271100, 61371013, 61471389).

† Corresponding author. E-mail: [jianye8901@126.com](mailto:jianye8901@126.com)