

基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料

吴良威 张正平

Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures

Wu Liang-Wei Zhang Zheng-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 164101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.164101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单层高效透射型相位梯度超表面的设计及实验验证

[Design and experimental verification of single-layer high-efficiency transmissive phase-gradient metasurface](#)

物理学报.2016, 65(15): 154101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154101>

基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计

[Design of reflective linear-circular polarization converter based on phase gradient metasurface](#)

物理学报.2016, 65(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154102>

典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析

[Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation](#)

物理学报.2016, 65(13): 134101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134101>

太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性试验分析

[Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters](#)

物理学报.2016, 65(13): 134102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134102>

基于单层反射超表面的宽带圆极化高增益天线设计

[Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on single-layer reflecting metasurface](#)

物理学报.2016, 65(10): 104101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104101>

基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料*

吴良威¹⁾²⁾ 张正平^{1)†}

1)(贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

2)(贵州航天计量测试技术研究所, 贵阳 550000)

(2016年2月29日收到; 2016年6月2日收到修改稿)

提出了一种基于多开口田字形单元结构实现材料左手特性的设计方案. 该结构是在介质基板单侧集成电、磁谐振器形成左手单元. 通过理论分析、软件仿真、加工测试、提取有效电磁参数, 结果表明该结构在12.7—21.1 GHz范围内具有双负特性(等效介电常数 $\epsilon < 0$, 等效磁导率 $\mu < 0$), 基本覆盖Ku波段, 绝对带宽可达8.4 GHz, 单元损耗低于0.3 dB. 同传统的左手材料相比, 该结构以更小的单元尺寸, 更低的损耗实现了更宽的左手频带, 为宽频带、低损耗微波左手材料的设计及广泛应用提供了重要参考.

关键词: 左手材料, 多开口田字形, 宽频带, 低损耗

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.65.164101

1 引言

左手材料(left-handed metamaterials, LHM)是一类等效介电常数 ϵ 、等效磁导率 μ 均为负数的人工材料^[1]. 它是由Veselago^[1]率先在理论上提出的, 没有在自然界中发现这一材料. 其后, Smith等^[2]利用SRR(split ring resonator)和金属线(wires)组合首次实现了具有双负特性左手材料的制作, 从而引发国内外研究者的极大兴趣. 由于左手材料所具有的奇异电磁特性, 使得其在微波器件、天线雷达、电磁隐身应用方面备受关注^[3,4].

随着对左手材料结构的研究越来越深入, 涌现出许多的具有双负特性的左手结构. 2012年, 李文强等^[5]提出了基于斜三角开口对环的宽带低耗、结构较为新颖的左手材料, 较之前同类型的左手材料带宽有所增加, 但还有进一步提升的空间, 且其提出的左手材料是一种双面结构, 增大加工复杂度. 2015年, 宋一川等^[6]在介质板两侧刻蚀金属圆盘制作出了具有宽带负磁导率特性的圆盘结构超材

料和具有宽带双负特性的互联圆盘结构左手材料, 其提出的结构具有较宽的负磁导率带宽, 但双负带宽还有待进一步提高.

现阶段而言, 宽带左手材料结构有单侧刻蚀和双侧刻蚀两种类型. 双侧刻蚀增大材料加工复杂度, 同时损耗通常会偏大, 严重影响了左手材料的发展应用. 所以, 单侧刻蚀宽带低耗左手材料结构成为研究的一个热点. 2014年, 董怀景和耿友林^[7]基于双十字架型的左手材料采用介质板单侧刻蚀, 实现了宽带低耗左手特性, 但其左手带宽也有待进一步提高.

本文提出了一种多开口田字形左手单元结构, 在介质板一侧集成电谐振器与磁谐振器. 通过理论分析、Ansoft HFSS软件进行仿真、矩形波导联合矢量网络分析仪测试, 提取有效电磁参数^[8-10]进行本构参数反演, 结果表明该结构在12.7—21.1 GHz范围内具有双负特性, 绝对带宽可达8.4 GHz, 单元损耗低于0.3 dB. 与以往典型的左手材料相比, 笔者设计的结构以更小的单元尺寸, 更低的损耗实现了更宽的左手频带.

* 国家自然科学基金(批准号: 11204046)和国家科技部国际科技合作项目(批准号: 2014DFA00670)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zpzhang@gzu.edu.cn

2 左手材料单元结构设计分析

从左手材料被提出到现在为止, 其结构设计主要有两种: 一是谐振型结构; 二是CRLH TLs (复合左右手传输线) 结构. 谐振型结构是结构单元在一定频率电磁波入射下激发出电谐振和磁谐振, 在结构单元内部形成电磁等离子体^[6], 从而实现等效介电常数 ϵ 、等效磁导率 μ 都是负值的左手特性. CRLH TLs结构是经过调整传输线结构, 改变其分布参数, 从而实现一定频段内的左手通带.

本文设计的结构是基于谐振型结构设计理论, 在介质基板的一侧集成电谐振器和磁谐振器, 使材料在一定频率下产生左手特性. 如图1(a)所示, 该左手结构单元由正方形的开口田字形金属线放置在介电常数为3.48, 厚度为0.254 mm的介质板上构成. 单元外边边长2.5 mm, 外边中心开口间距为0.1 mm, 外边线宽为0.2 mm, 中心十字形条长度均为2 mm, 十字形条金属线线宽为0.1 mm.

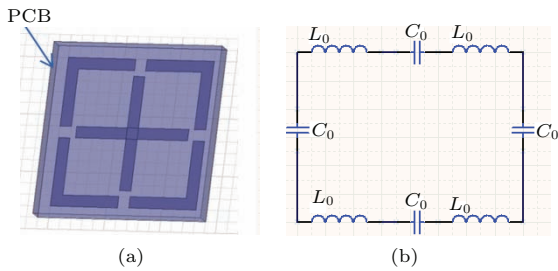


图1 (a) 单元模型; (b) 单元外环等效电路
Fig. 1. (a) Unit model; (b) the equivalent circuit of outer loop.

由Pendry等^[11]提出的理论可知, wires(金属线阵列)可以实现负等效介电常数. 同时, 文献^[12]研究表明多开口结构会破坏环间耦合电容, 减弱环间耦合作用. 文献^[11, 12]表明, 由于单元模型中心十字形条金属短截线结构的存在, 单元结构能够产生电谐振, 进而产生等效负的介电常数. 该单元模型外环形成磁谐振回路, 图1(b)为其外环等效电路, L_0 表示外环单边所对应的等效电感, C_0 表示外环单个开口处所对应的等效电容. 从图1(b)中可以看出, 谐振频率 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}$, 其中, $L = 4L_0, C = \frac{1}{4}C_0$, 最后得到单元外环磁谐振回路谐振频率 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{L_0C_0}$. 基于谐振型设计理论分析, 本文实现了在介质基板的一侧集成电谐振器

和磁谐振器, 使材料在一定频率下产生左手特性的设计.

3 左手材料仿真设计与验证

本文采用Ansoft HFSS 软件分别对单元结构和周期模型进行优化仿真, 周期模型结构如图2所示. 考虑左手材料的周期性, 选取四个田字形对称排列单元结构作为周期模型, 将其放置在矩形波导中进行仿真. 模型中任意相邻两个单元结构间距为0.1 mm. 将垂直于电磁波入射方向(y 轴方向)的两波导壁分别设为输入与输出波端口, 与 x 轴垂直的两波导壁设置为理想电壁(PEC)对, 与 z 轴垂直的两个波导壁设置为理想磁壁(PMC)对. 波导尺寸为5.1 mm × 6.1 mm × 0.854 mm (分别对应 x 轴方向, y 轴方向, z 轴方向). 图3和图4所示分别为仿真单元结构和周期模型所得 S 参数曲线, 以及对应的 S 参数相位变化情况.

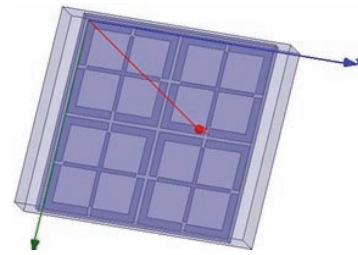


图2 周期仿真模型
Fig. 2. periodic model.

从仿真分析上可以看出, 对于单元结构, 在14.5 GHz附近, S 参数的幅值与相位均发生突变. 而对于周期仿真模型, 在12.7和21.2 GHz两个频点附近处, S 参数的幅值与相位均发生突变, 预示着左手频带的存在^[12], 且通带内结构传输损耗低于1.2 dB, 意味着周期模型中的每个单元结构传输损耗小于0.3 dB. 同时, 周期结构中单元之间强的耦合作用, 单元之间产生电磁谐振, 使得本文所设计的左手材料周期结构相比单个单元结构激发出更宽的左手通带.

若只是通过 S 参数变化情况来判断, 不是特别可靠. 本文采用NRW反演算法^[9]进一步验证该结构左手特性. 将HFSS仿真所得的 S 参数代入反演公式, 提取等效阻抗 Z , 等效折射率 n , 继而得出等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ . NRW反演算法主要公式如(1)—(4)式:

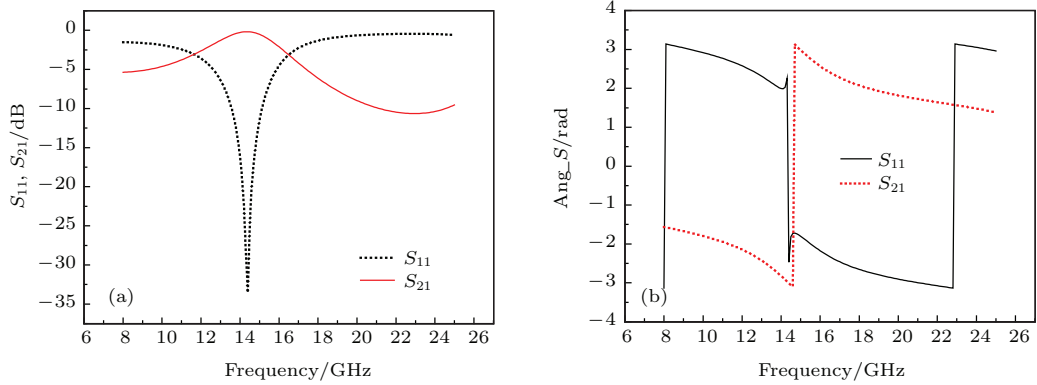


图3 (a) 单元结构 S 参数; (b) 单元结构 S 参数相位

Fig. 3. (a) The S -parameter of unit structure; (b) the phase of S -parameter.

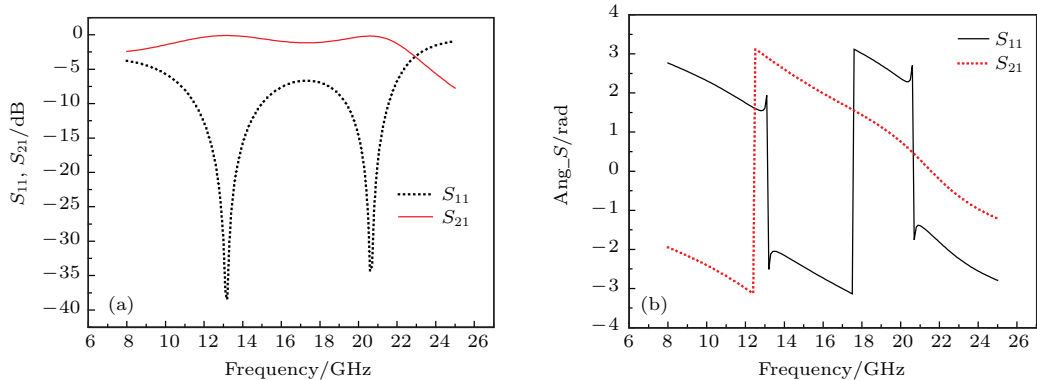


图4 (a) 周期结构 S 参数曲线; (b) 周期结构 S 参数相位

Fig. 4. (a) The S -parameter of periodic structure; (b) the phase of S -parameter.

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (1)$$

$$n = \frac{1}{kd} a \cos\left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2 \times S_{21}}\right), \quad (2)$$

$$\varepsilon = n/Z, \quad (3)$$

$$\mu = n \times Z, \quad (4)$$

式中, k 代表波数, d 代表沿电磁波入射方向的材料厚度. 图5所示为单元结构的相关参数提取结果.

反演结果显示, 单元结构的等效磁导率 μ 、等效介电常数 ε 、等效折射率 n 在 14.5 GHz 之后发生突变, 继而向负数转变, 表明单元结构具有很好的左手特性.

为直观验证其工程性, 考虑到其左手通带在 Ku 波段, 参考结构的周期特性, 选用 BJ140 标准矩形波导联合安立矢量网络分析仪 37369D 进行波导法测试. 测试时, 为将多片样品更好地放入波导内

部进行测试, 样品片与片之间用海绵隔开. 该材料周期结构单片样品加工实物、实验装置如图6(a)和图6(b)所示. 此处有一点需要说明, BJ140的起止截止频率范围虽然是 12—18 GHz, 但仍可以通过我们设计的结构在此频段内的测试结果来佐证该设计的可靠性.

图7为测试所得散射参数, 对比周期模型仿真结果, 实测结果与之有差异. 从实测结果上看, 在标准波导起止频率点附近, 损耗明显变大, 这与 BJ140 在截止频率点处传输特性一致. 另外, 左手频段向高频有所偏移, 能量传输损耗也略有增加. 这是因为测试样品单元尺寸很小, 左手频段处在较高频段(主要在 Ku 频段), 对尺寸具有极高的敏感性, 加工工艺稍有偏差以及样品单元与波导壁接触不理想都会给测试带来很大影响. 同时, 片与片之间放置海绵, 测试所采用的标准波导本身会带有些许误差, 这些也会给实验带来一定的损耗误差.

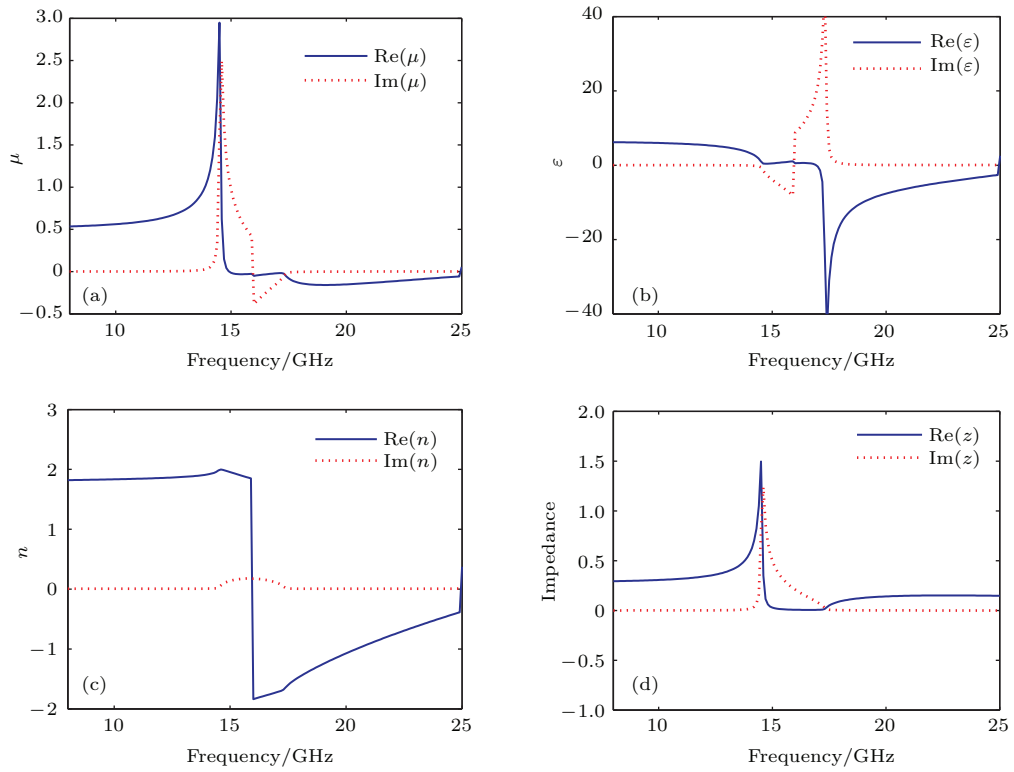


图5 (a) 单元结构等效磁导率 μ ; (b) 单元结构等效介电常数 ϵ ; (c) 单元结构等效折射率 n ; (d) 单元结构等效阻抗 Z
 Fig. 5. (a) The equivalent permeability of unit structure; (b) the equivalent permittivity of unit structure; (c) the equivalent refractive index of unit structure; (d) the equivalent impedance of unit structure.

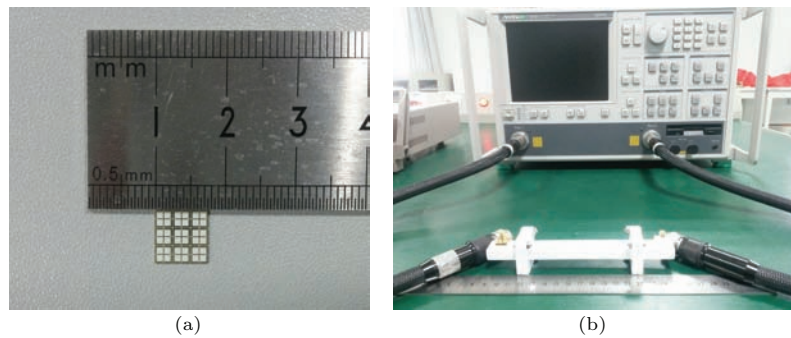


图6 (a) 周期结构单片样品实物; (b) 测试系统
 Fig. 6. (a) Testing sample; (b) testing system.

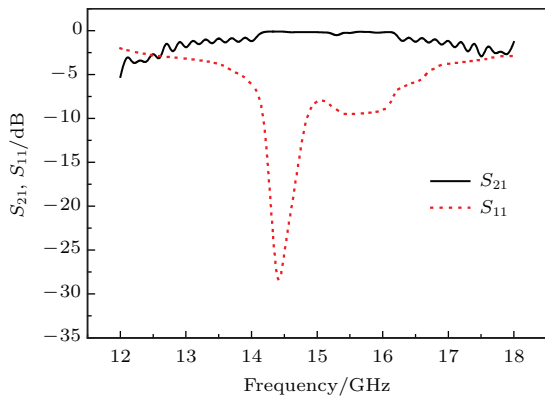


图7 测试结果
 Fig. 7. Testing result.

最后, 本文在表1中列出了几类宽带左手结构的相关参数, 并与笔者所设计的结构进行了对比. 通过列表对比, 可以直观看出, 本文所提出的左手

表1 几类宽带左手结构材料性能比较
 Table 1. Several kinds of broadband LHMs.

相关材料	结构	介质板单侧或双侧刻蚀	绝对带宽 /GHz	单元损耗 /dB
文献 [5]	斜三角开口对环	双侧	3.9	小于 5
文献 [6]	互联圆盘	双侧	1.36	—
文献 [7]	双十字架形	单侧	6.6	小于 0.15
本文	多开口田字形	单侧	8.4	小于 0.3

材料结构无论从带宽或是损耗性能上都有很大的提升.

4 结 论

本文基于谐振型的设计思想, 提出一种新型多开口田字形宽带低耗左手特性材料结构. 通过理论分析、软件仿真、测试、提取有效电磁参数, 结果表明该结构在 12.7—21.1 GHz 范围内具有双负特性, 基本覆盖 Ku 波段, 绝对带宽可达 8.4 GHz, 单元损耗低于 0.3 dB. 对于 Ku 波段微波器件以及微波电路设计具有较大的参考价值.

参考文献

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [3] Marta G, Jordi B, Joan G G, Jesus M, Ferran M 2007 *IEEE Trans. MTT* **55** 1296
- [4] Tang M C, Xiao S Q, Guan J, Bai Y Y, Gao S S, Wang B Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074214
- [5] Li W Q, Cao X Y, Gao J, Liu T, Yao X, Ma J J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 154102 (in Chinese) [李文强, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 姚旭, 马嘉俊 2012 物理学报 **61** 154102]
- [6] Song Y C, Ding J, Guo C J, Liu X L 2015 *J. Microwaves* **31** 28 (in Chinese) [宋一川, 丁君, 郭陈江, 刘旭林 2015 微波学报 **31** 28]
- [7] Dong H J, Geng Y L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024102 (in Chinese) [董怀景, 耿友林 2015 物理学报 **64** 024102]
- [8] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulous C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [9] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Antennas. Propag.* **51** 1516
- [10] Szab'o Z, Park G H, Hedge R, Li E P 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58** 2646
- [11] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [12] Yang H, Wang C H, Guo X R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014103 (in Chinese) [杨怀, 王春华, 郭小蓉 2014 物理学报 **63** 014103]

Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures*

Wu Liang-Wei¹⁾²⁾ Zhang Zheng-Ping^{1)†}

1) (*College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

2) (*Guizhou Aerospace Measurement and Testing Technology Research Institute, Guiyang 550000, China*)

(Received 29 February 2016; revised manuscript received 2 June 2016)

Abstract

The unique electromagnetic properties of left-handed materials have received much attention due to their applications in microwave devices, radar antenna and electromagnetic stealth and so on. However, the double side etching of dielectric substrate for most traditional left-handed materials will lead to the complexity of manufacture, narrow left-handed bandwidth and higher loss. In order to overcome the shortages of traditional left-handed materials, a new broadband and low-loss left-handed material with multi-opening cross shape structure is presented in this paper. The structure is fabricated on a single side of a dielectric substrate by integrating an electric resonator with a magnetic resonator to form a left-handed unit. Through theoretical analysis, software simulation and effective electromagnetic parameters extraction, the results show that the structure has a double negative characteristics ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$) in the 12.7–21.1 GHz range, which is basically in the Ku band. The absolute bandwidth of left-handed character is up to 8.4 GHz and the loss of unit cell is less than 0.3 dB. The structure realizes a wider left-handed bandwidth with smaller cell size and lower loss than the conventional left-handed materials, and it provides an important reference for the application and design of the broadband and low-loss microwave left-handed materials.

Keywords: left-handed materials, multi-opening cross-shape, broadband, low-loss

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: [10.7498/aps.65.164101](https://doi.org/10.7498/aps.65.164101)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11204046) and the Program for International S&T Cooperation Projects of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2014DFA00670).

† Corresponding author. E-mail: zpzhang@gzu.edu.cn