

太赫兹人工电磁媒质研究进展

鲍迪 沈晓鹏 崔铁军

Progress of terahertz metamaterials

Bao Di Shen Xiao-Peng Cui Tie-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 228701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.228701 在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228701> 当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三维传输子量子比特的退相干参数表征

Decoherence characterization of three-dimensional transmon

物理学报.2014, 63(22): 220305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220305>

基于弱非线性实现非破坏性测量两光子 Bell 态及三光子 Greenberger-Horne-Zeilinger 态

Quantum nondemolition measurement of two-photon Bell-state and three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger-state based on weak nonlinearities

物理学报.2013, 62(10): 100304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.100304>

关于多比特电路量子动力学系统中光子自由度的消除方案研究

On the scheme of cavity photon elimination in multi-qubit circuit-quantum electrodynamics system

物理学报.2012, 61(24): 240305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.240305>

关于电路量子电动力学系统中光子自由度的消除方案

On the schemes of cavity photon elimination in circuit-quantum electrodynamics systems

物理学报.2012, 61(18): 180302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.180302>

Stark 位移对热环境下双 Jaynes-Cummings 模型中原子纠缠的影响

Effect of the Stark shift on entanglement in a double Jaynes-Cummings model in thermal environment

物理学报.2012, 61(16): 160304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.160304>

专题: 太赫兹物理

太赫兹人工电磁媒质研究进展*

鲍迪¹⁾²⁾ 沈晓鹏¹⁾³⁾ 崔铁军^{1)4)†}

1)(东南大学信息科学与工程学院, 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

2)(东南大学无线通信技术协同创新中心, 南京 210096)

3)(中国矿业大学物理系, 徐州 221116)

4)(电子科技大学太赫兹科学协同创新中心, 成都 610054)

(2015年6月8日收到; 2015年7月8日收到修改稿)

近年来, 随着太赫兹科学技术的发展, 越来越多的科学家向太赫兹间隙这一传统空白领域发起挑战. 其中, 人工电磁媒质因为能够设计太赫兹波段中紧缺的功能器件而受到广泛关注. 近年来, 对人工电磁媒质尤其是太赫兹方面的研究进展突飞猛进. 人工电磁媒质的性质不仅仅由其构成材料决定, 更与其结构单元的形状和空间排布密切相关. 本文介绍了人工电磁媒质在太赫兹波段的发展、原理、设计和应用, 并着重介绍完美吸波器和人工表面等离子激元, 为太赫兹波段功能器件的研究提供了参考, 并对可能的发展方向予以展望.

关键词: 太赫兹, 人工电磁媒质, 吸波器, 人工表面等离子激元**PACS:** 87.50.U-, 78.67.Pt, 41.20.Jb, 42.25.Bs**DOI:** 10.7498/aps.64.228701

1 引言

自20世纪末以来, 太赫兹 (THz) 发生源和探测器技术的迅速发展引起了太赫兹研究的热潮, 太赫兹技术在成像、医学诊断、材料分析、环境保护、太空技术和军事安全等各方面有着广泛的应用前景. 太赫兹间隙 (0.1—10 THz) 急需填补, 但是相关的功能器件却非常缺乏, 因而新材料和新技术对太赫兹研究具有重要的意义.

近年来, 可以在亚波长尺寸上调节材料电磁本征参数的人工电磁媒质 (metamaterials) 成为新兴的研究热点^[1-6]. 人工电磁媒质的新颖特性为太赫兹波段的功能器件提供了很多解决方案, 例如对太赫兹波透射率的有源调控^[7]和电磁诱导透明^[8]、滤波器^[9-11]、线性极化转换器和异常折射^[12]、高折射率媒质^[13]、吸波器^[14-17]、调相器^[18]等. 本文首先介绍太赫兹人工电磁媒质的基本理论, 再介绍两

类具体的太赫兹新型人工电磁媒质: 吸波器和人工表面等离子激元器件, 最后给出总结和展望.

2 太赫兹人工电磁媒质的基本原理

新型人工电磁媒质是由周期或非周期的单元结构组成, 其性能既取决于单元结构又取决于化学构成的宏观复合材料^[6]. 人工电磁媒质使科学家获得了更大的自由度, 从而设计出自然界没有的新颖材料和器件, 如零折射率材料、负折射材料和包括隐身衣在内的各种光学器件^[3-6]; 或者把原本只能存在于光波段的现象如表面等离子激元 (plasmon polaritons) 在微波和太赫兹频段模拟重现^[19-25].

人工电磁媒质的这些特性也吸引了很多研究太赫兹的科学家. 在太赫兹波段及以上频段, 天然的磁性材料非常缺乏, 材料的电磁或光学性质往往只有电谐振而没有磁谐振. 在2004年, 英国和美国的科学家共同发现了在0.6—1.8 THz频段, 利用导

* 国家自然科学基金 (批准号: 61171024, 61171026, 61302018, 61401089, 61571117, 61501112, 61501117, 61138001)、全国优秀博士论文专项基金 (批准号: 201444) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: 111-2-05) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tjcu@seu.edu.cn

体开口谐振环结构可以实现可调谐的磁谐振甚至负磁导率^[26]. 之后, 多国科学家将这一发现进一步推进到更高的太赫兹频段^[27,28]. 在此基础上, 开展了太赫兹负折射结构的分析、设计, 并通过了实验验证^[29]. 有源太赫兹人工电磁媒质更提供了有效地控制太赫兹波的透射、反射的方法^[7,8,30-32].

在人工电磁媒质最先兴起的微波段, 当单元结构尺寸远小于波长时, 其宏观电磁响应与普通材料相似, 可以用等效媒质来描述其电磁特性, 并进行参数提取. 在太赫兹波段, 这一分析方法同样适用. 在参数提取中, 先由实验或者仿真得到传输系数 t 和反射系数 r , 再根据传输系数和反射系数计算得到波阻抗 z 和折射率 n ^[33-35]:

$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2t} (1 - r^2 + t^2) \right], \quad (1)$$

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+r)^2 - t^2}{(1-r)^2 - t^2}}, \quad (2)$$

最后由公式 $\varepsilon = n/z$ 和 $\mu = nz$ 计算出等效介电常数和磁导率.

除了等效媒质的参数提取, 人工电磁媒质的迅速发展也使得一些物理概念超出了传统物理学的范畴. 例如, 人工电磁表面 (metasurface) 就在超薄界面上引入了相位突变, 科学家也据此提出了广义散射和折射定律^[36], 从而为微波、太赫兹和光波段器件的设计提供了更大的自由度.

3 太赫兹吸波器

吸波率接近 1 的吸波器又称完美吸波器, 在高性能太阳能电池^[37]、隐形飞机^[38]、医学成像等领域有广泛的应用前景^[39]. 传统的微波吸波器一般需要厚度达到工作波长的 1/4, 而人工电磁媒质则可以实现超薄完美吸波器. 在 2008 年, Landy 等^[40]提出了由两侧开口、背对背连接的开口谐振环和金属线段背板构成的完美微波吸波器设计, 并得到了 88% 的实测吸波率. 之后, 研究人员提出了把底板完全用金属层覆盖的新型吸波器可以直接实现零透射率, 也提供了吸波器更多的设计选择^[41].

太赫兹吸波器主要有宽带吸波器和多波段吸波两大类. 其中, 宽带吸波器通常是把几个谐振峰相近的单元结构并排或前后放置, 从而使几个吸波峰互相连接起来^[42,43]. 多波段吸波器则是由谐振频点能够明显区分的几个单元共同构成^[44], 或者由一个包含多个谐振峰的单元构成^[45]. 太赫兹吸波器相关的理论工作很多, 但具体实验较少. 在这

里, 我们将着重介绍两种比较具有实用前景的太赫兹吸波器的理论、设计和实验工作.

3.1 太赫兹多波段吸波器

大多数已有的太赫兹吸波器对入射波的极化和角度都比较敏感, 因而在成像、检测等具体应用中比较受限制. 这里介绍一种极化不敏感的多角度多波段太赫兹吸波器^[44]. 如图 1 (a) 所示, 这种吸波器是由印制在金属背板上的三种尺寸不同的同心金属方环构成的周期性单元结构, 周期为 88 μm , 样品总面积为 15 mm \times 15 mm. 单元结构制作在 n 型硅基上, 自顶向下分别为方环谐振结构 (0.2 μm 厚的铝)、介质层 (7.5 μm 厚的聚酰亚胺) 和金属背板 (0.2 μm 厚的铝). 通过优化设计, 这三个金属环对应的谐振频率互相几乎没有干扰, 从而形成三个独立的吸波峰. 因为结构底层的金属铝膜足够厚, 因此电磁波基本都被阻挡, 透射率接近于 0, 实验中只测量反射率即可. 反射率可以定义为: $|\tilde{R}| = |\tilde{E}_s(\omega)|/|\tilde{E}_r(\omega)|$, 其中 $|\tilde{E}_s(\omega)|$ 和 $|\tilde{E}_r(\omega)|$ 分别

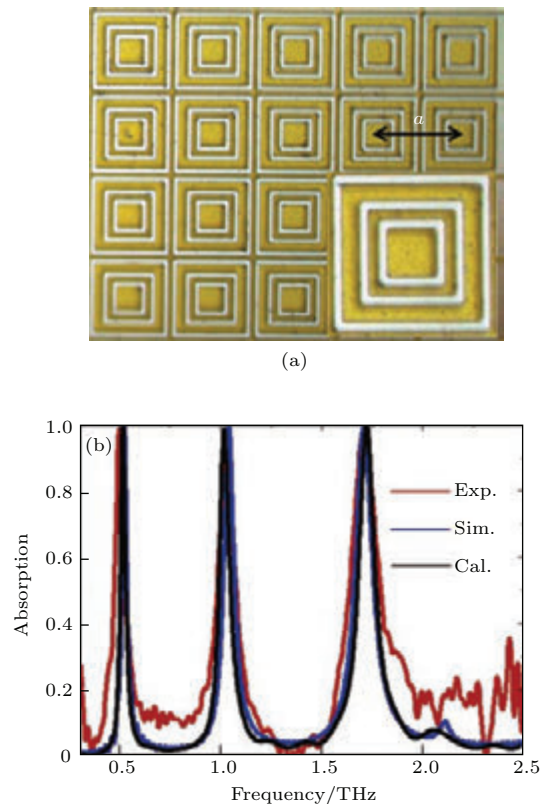


图 1 (a) 三波段太赫兹吸波器的显微镜照片, 右下角内插图为放大的单元结构; (b) 三波段太赫兹吸波器的实验 (红线)、仿真 (蓝线) 和计算 (黑线) 的吸波率曲线^[44]
 Fig. 1. (a) The optical microscopy image of the triple-band THz metamaterials absorber; (b) measured, simulated and calculated absorption^[44].

是吸波器和校准元件的频域傅里叶幅值。测量由太赫兹时域系统完成。仿真、计算和测量结果如图1(b)所示,测量的吸波率在0.5, 1.03和1.71 THz分别有96.4%, 96.3%和96.7%的吸波率,且测量结果和CST仿真结果符合很好。

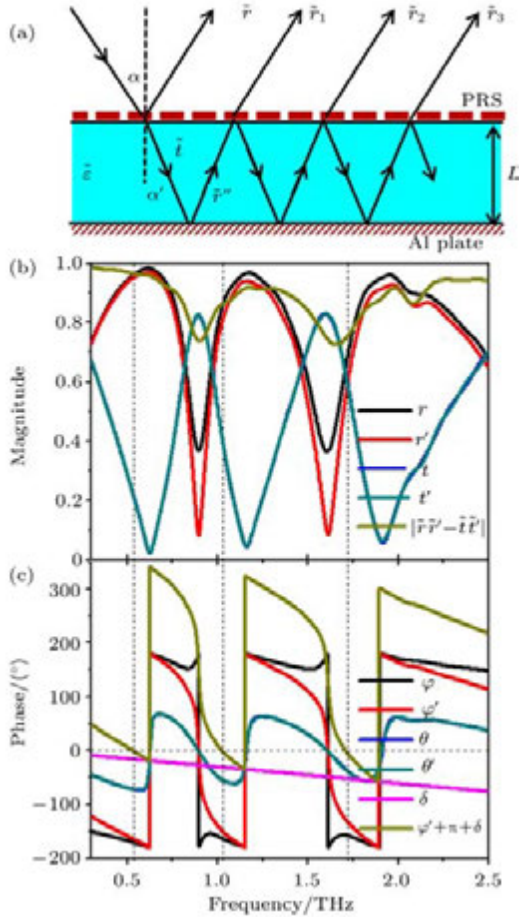


图2 (a) 吸波器界面处的多重折射、反射和透射示意图; (b) 和 (c) 分别为反射、折射和透射的仿真幅度和相位 [44]
Fig. 2. (a) The schematic of the multiple reflections, transmission and interference at the air-spacer interfaces; (b) the magnitudes and (c) phase of the reflection and transmission coefficients at the interface [44].

人工电磁媒质吸波器的吸波机理最初是根据人工表面和自由空间的阻抗匹配理论来分析的 [38]。但是之后的研究发现,顶层和底层结构的磁谐振非常弱,不能实现同等大小的介电常数和磁导率,所以不能用阻抗匹配理论解释。2012年,多次反射引起的相消干涉被用来分析这种新型吸波器的工作原理 [46]。如图2(a)所示,在吸波器界面处入射波将发生多重折射、反射和透射,多次反射波之和可以计算为

$$\tilde{R} = \tilde{r} + \tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \tilde{r}_3 + \dots$$

$$= \frac{\tilde{r} - (\tilde{r}\tilde{r}' - \tilde{t}\tilde{t}') e^{i(\pi+2\beta_r)}}{1 + r'_1 e^{i(2\beta_r + \varphi' + \pi)}}, \quad (3)$$

其中, $\tilde{r}, \tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \tilde{r}_3$ 为入射电磁波在空气-结构界面第一次反射时的反射系数及镜结构内部多次反射、折射后经上表面的折射系数; $\tilde{t}' = t' e^{i\theta'}$ 是电磁波从底层背板反射到上层部分反射表面时透射到自由空间中的透射系数, t' 和 θ' 是透射的幅度和相位差; $\tilde{r}' = r' e^{i\varphi'}$ 是这个过程中的反射系数, r' 和 φ' 为反射的幅度和相位差; β_r 是电磁波在介质层中传播一次的相位差。从(3)式可见,若要实现完美吸波,需要同时满足以下两个公式:

$$|\tilde{r}| - |\tilde{r}\tilde{r}' - \tilde{t}\tilde{t}'| \approx 0, \quad (4)$$

$$2\beta_r + \varphi' + \pi \approx 2\pi, \quad (5)$$

其中, (4) 式的物理含义是吸波器对入射波的初始反射与之后的多次折射形成相消干涉; (5) 式则是指在吸波器内部的多次反射相位相同,形成相长干涉。在图2(b)和图2(c)所示的反射、折射和透射的

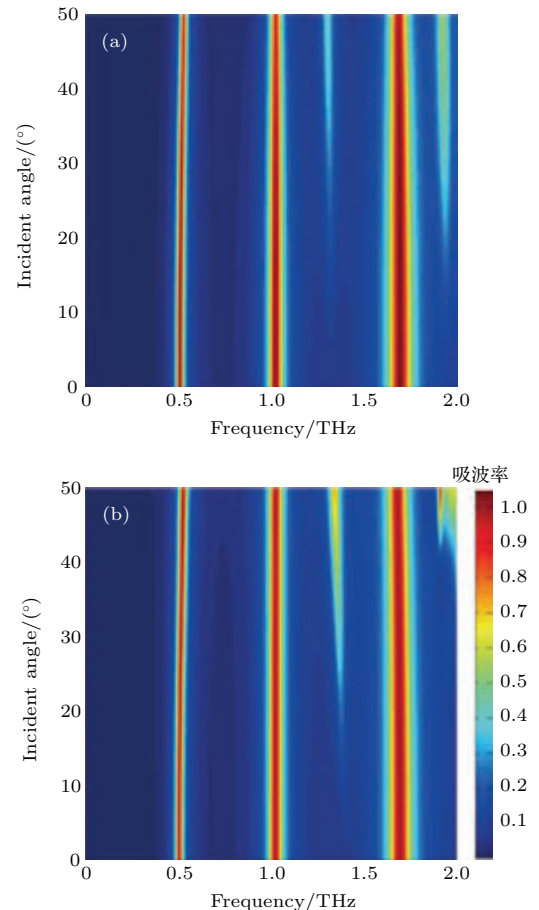


图3 (a) TE 和 (b) TM 极化时不同入射角的仿真吸波频谱 [44]
Fig. 3. The simulated absorption spectra of different incident angle for (a) TE and (b) TM polarizations [44].

幅度和相位分布图中, 在垂直的虚线处(4)和(5)式可以同时满足, 对应的频点分别为0.53, 1.03和1.74 THz, 因此可以实现多波段吸波器. 据此计算的吸波频谱也绘制在图1(b)中, 并与仿真和实验结果有很好的 consistency.

为了验证这种吸波器对入射波极化和角度的不敏感特性, 图3给出了这种多方环吸波器在不同入射角度和不同极化下的吸波情况. 从图3可以看到, 对称的方环结构使得吸波器对TE和TM极化不敏感. 同时, 当入射角在 50° 以内时, 三个主要的吸波频点在TM极化波入射下均可获得高于94%的吸波率; 而入射角在 40° 以内时, 三个主要的吸波频带在TE极化波入射下均可获得高于92%的吸波率.

3.2 宽带太赫兹吸波器

吸波器的单个谐振结构总是窄带的, 因此超薄宽带吸波器的设计难度较大. 在微波段, 可以通过增加金属结构的损耗、加载集总电阻、采用石墨烯等方法来增加吸波器带宽. 但是这些方案难以在太赫兹波段实现. 2011年, Grant等^[42]设计了由三层金属十字形结构组成的太赫兹宽带吸波器结构, 实验测量有60%的吸波率和48%的半高全宽. 2014年, 复旦大学周磊教授课题组^[47]设计并加工了一种五层金属片结构, 可在0.7—2.3 THz之间达到80%以上的吸波率. 这些已有的结构或者吸波率较低, 或者结构层数多、加工难度较大, 实验工作数量很少.

这里我们介绍一种由三层多个金属线构成的太赫兹宽带吸波器^[48]. 如图4(a)所示的 3×3 单元结构中, 长短不一的金属线均匀分布在三层聚酰亚胺层上, 金属线和金属底板均由金构成, 聚酰亚胺的参数为 $\epsilon = 3.0, \delta = 0.03$. 图4(b)是单个的单元结构, 其中单元的周期为 $100 \mu\text{m}$, 单层聚酰亚胺层的厚度通过数值仿真优化后一般在 $5 \mu\text{m}$ 到 $15 \mu\text{m}$ 之间. 在设计中, 金属线的宽度和厚度是固定的, 单元中不同金属线的长度 L 则是不同的, 并按照从底层到上层长度递减的规律分布. 如图6(b)内嵌的超景深显微镜照片所示, 不同层之间的金属线错落排布时吸波效果最佳.

首先, 从单个金属线开始分析宽带吸波器的工作原理. 图5绘制了不同长度单个金属线的吸

波率. 从图5可见, 当金属线的长度从 $65 \mu\text{m}$ 递增至 $95 \mu\text{m}$ 时, 可依次形成最高吸波率高达99%的窄带吸波峰, 并且中心频点从1.38 THz递减到0.91 THz. 其中吸波机理与上一节中提到的干涉原理一致. 这样, 把多个长度不同的金属线放在同一个单元里、调节金属线的长度使得吸波峰足够相邻即可实现宽带吸波器. 但是, 在单层结构里金属线排布过密会引起强烈的电磁耦合, 降低吸波率. 所以设计中采用每层间隔放置几根金属线, 再把三层重叠起来的结构.

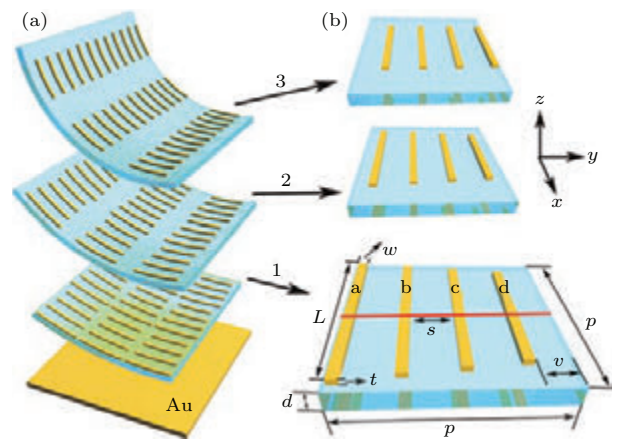


图4 基于人工电磁媒质的太赫兹宽带吸波器结构示意图 (a) 含有 3×3 单元的结构示意图, 每层结构都依次单独显示; (b) 单个单元的结构示意图^[48]

Fig. 4. The structure of the broadband metamaterials absorber: (a) Schematic of the structure with 3×3 unit cells, and each layer is separated; (b) the layers of a single unit cell^[48].

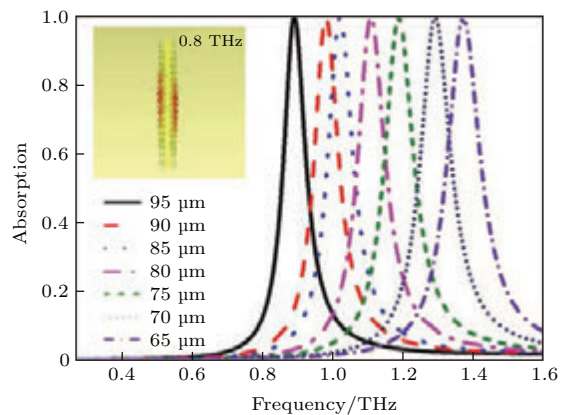


图5 单个金属条吸波率的仿真结果 (聚酰亚胺层厚度都设为 $10 \mu\text{m}$), 内插图是金属条在谐振频点(0.8 THz)的电流分布图^[48]

Fig. 5. Simulated absorptivity for single metallic bar. The thickness of polyimide is set to $10 \mu\text{m}$. The inset figure is the current distribution of the bar at the resonant frequency of 0.8 THz^[48].

样品在TM波入射时的仿真和实物测量结果如图6所示. 仿真结果显示, 在正入射时, 从0.8—1.28 THz可以达到90%以上的吸波率和55%的半高宽(0.75到1.33 THz). 随着入射倾斜角度增大, 吸波率有所降低且波动加大, 但依然可以保持较好的吸波性. 实验测量在太赫兹时域系统(Zomega Z3)中完成, 正入射时从0.81—1.32 THz有95%以上的吸波率和64%的半高宽(0.76—1.48 THz), 与仿真结果符合良好.

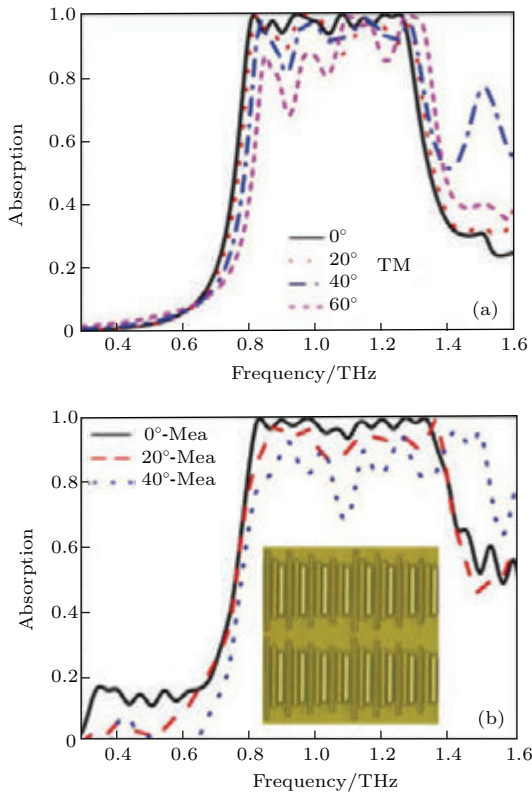


图6 (a) 宽带吸波器仿真结果(TM极化); (b) 宽带吸波器测量结果(内插图为样品在超景深显微镜下的照片)^[48]
 Fig. 6. Simulated (a) and measured (b) absorption spectra for TM polarizations^[48]. The inset of panel (b) shows the image of the corresponding fabricated sample.

4 太赫兹人工表面等离子激元

表面等离子激元(surface plasmon polaritons, SPPs)是指介质或自由空间中的电磁波与金属表面的自由电子相互作用而产生的表面波^[19], 其形成原因是介电常数的实部在界面两侧的正负号不同. 表面等离子激元可以分为两类, 即束缚在金属与介质界面并沿着界面传播的传播模式表面等离子激元和局域在金属纳米颗粒表面振荡的局域表面等离子激元. 表面等离子激元具有独特的电磁特性, 如高

度局域性、可以突破衍射极限、很强的局域场增强等, 因而受到了广泛关注^[49–55]. 表面等离子激元天然存在于光波段, 在微波和太赫兹频段, 金属的物理特性近似为理想导体, 表面波在金属表面的场约束非常弱, 难以形成表面等离子激元.

英国Pendry教授等^[56]在2004年首次提出了人工表面等离子激元的概念, 即通过二维周期性孔状金属表面模拟光波段金属表面等离子激元的色散特性, 从而在微波段也把电磁波束缚在界面附近的亚波长范围内传播. 基于此, 科学家们通过在亚波长厚度的金属表面周期排布槽、孔、栅等结构, 在微波和太赫兹频段实验验证了人工表面等离子激元的存在^[57–60], 我国科学家也有一系列的理论和实验工作^[61–65]. 可是这些工作厚度较大, 加工不便, 也限制了相关研究的实际应用. 2013年, 我国科学家提出的共形表面等离子激元由印制在柔性介质薄膜上、厚度接近零的金属层构成^[66–68], 易于加工且适用于微波到中红外频段, 是通向集成电路等应用的重要一步. 本文介绍这种新型人工等离子激元结构及相关的波导、功分器和环形谐振器等器件.

4.1 共形人工表面等离子激元传输线

如图7中的插图所示, 这种新型太赫兹共形人工表面等离子激元传输线由锯齿结构的金属薄层构成^[67,68]. 如图7所示, 其沿着 x 轴方向TM波激励下的色散曲线与光波段SPP波的色散曲线非常相似. 图7中SPP的传播带宽为0.7—1.2 THz, 在1.3 THz以上的频段, SPP过度局域化以至于无法形成传播模式. 从图7还可以看到, 随着金属层厚度 t 从无限厚降低到0.01 μm , 人工表面等离子激元的

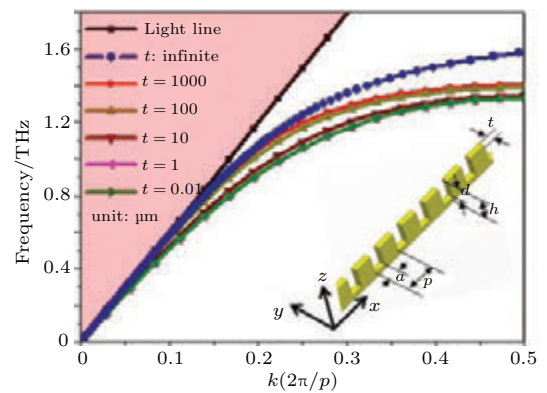


图7 人工表面等离子激元在厚度不同时的色散曲线^[67]
 Fig. 7. The dispersion diagram of the planar SPP waveguide with different thicknesses^[67].

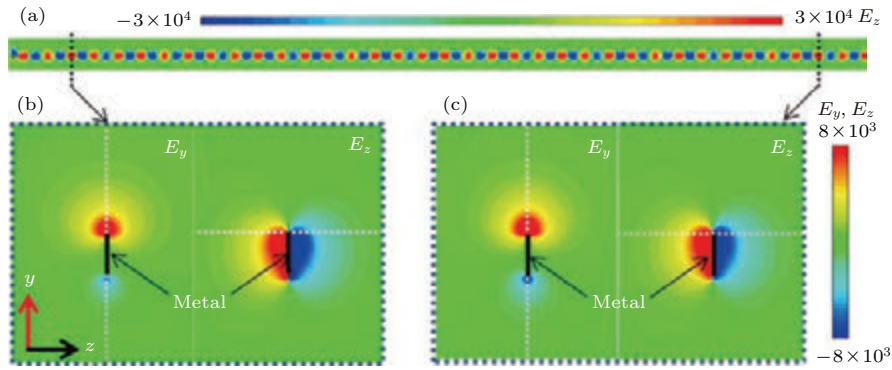


图8 (a) 人工表面等离激元在 1 THz 仿真电场 E_z 分布, $t = 0.01 \mu\text{m}$; (b), (c) 两端虚线处截面的电场强度分布 [68]
 Fig. 8. (a) The simulated E_z distribution of the spoof SPP waves at 1 THz; (b), (c) the electric field distribution on the cross-section (y - z plane) [68].

的色散曲线越来越偏离光线的色散曲线, 表面波也被束缚得更强. 所以, 这种超薄人工表面等离激元波导比三维结构束缚性更好.

仿真的 1 THz 电场强度分布如图 8 所示. 其中图 8(a) 是 xy 平面内的 E_z 分量, 传输线 x 方向总长度为 $8000 \mu\text{m}$, 图 8(b) 和图 8(c) 分别是在传输线两端的虚线所示横截面的电场 E_y, E_z 分量分布图. 可以看到, 这里 SPP 的传播几乎没有损耗, 并且电磁波在垂直于波的传播方向上被约束在金属结构表面并在自由空间和介质中按指数规律衰减.

人工表面等离激元传输线的特性在微波段进行了实验验证 [67]. 微波段的仿真和实验都显示, 当这种超薄结构加工在柔性衬底上时, 可以自由地弯曲、塑形而不影响传播模式, 因此被称为共形表面

等离激元传输线.

4.2 基于共形表面等离激元传输线的太赫兹功能器件

这种平面等离激元传输线可以有效地设计多种等离子体功能器件, 如弯曲器、功分器、环形谐振器等. 如图 9(a) 所示, 用一段半径为 $300 \mu\text{m}$ 的弧形连接两个垂直的 SPP 波导, 即可形成 90° 弯曲器. 图 9(b) 中 1 THz 的电场 (E_z) 仿真结果说明电场在通过弧度转角时几乎没有损耗. Y 型功分器的结构和仿真电场分布 (1 THz) 分别如图 9(c) 和图 9(d) 所示. 可以看到, 输入电场被均匀地分成两部分. 文献 [68] 给出了这两个结构从 $0.7\text{--}1.1 \text{ THz}$ 的仿真结果, 显示了器件的超宽工作带宽.

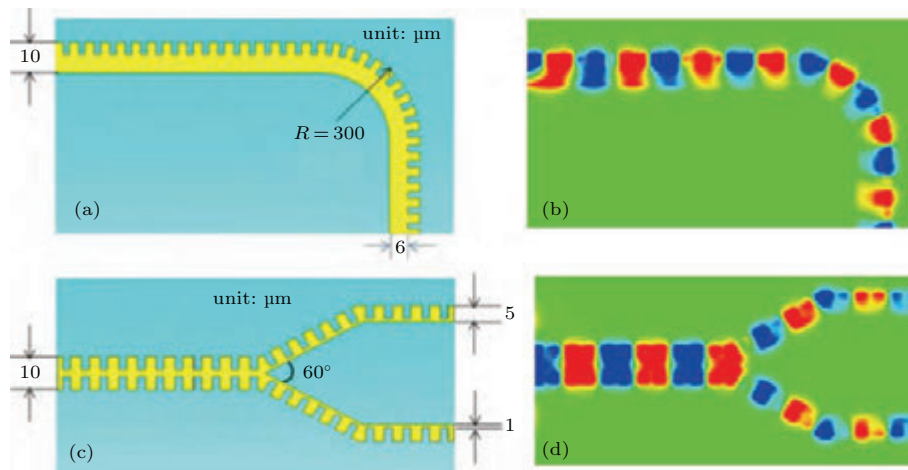


图9 (a) 90° 弯曲器的结构示意图及其 (b) 1 THz 的仿真结果; (c) 功分器的结构示意图及其 (d) 1 THz 的仿真结果 [68]

Fig. 9. (a) Designed model of the SPP bend; (b) the simulation electric fields of the bend at 1 THz; (c) designed model of the beam splitter; (d) the simulation electric fields of the splitter at 1 THz [68].

从以上研究可以发现,这种人工表面等离激元结构可以自由弯折,同时在近场的强度又足够强以实现有效的电磁耦合.据此,可以设计如图10(a)所示的环形谐振器^[65].该谐振器由一段直SPP波导和一个半径约半波长的栅状圆环组成,从而使一部分电磁波通过圆环与波导之间的间隙耦合到圆环里,并在圆环内传播周长的整数倍后再次与波导耦合,实现对输出电磁波的调控.当电磁波在环内的相位 $\Delta\phi$ 为 2π 的整数倍时,会产生相长干涉,圆环处于谐振状态并且波导可以输出信号;当相位 $\Delta\phi = (2m + 1)\pi$ 时,则产生相消干涉,环形谐振器处于阻带,信号无法通过波导.阻带(1.06 THz)和通带(0.98 THz)的电场仿真分布分别如图10(b)和图10(c)所示.这里的弯折器、功分器和环形谐振器都已在微波段进行实验验证^[67,68].

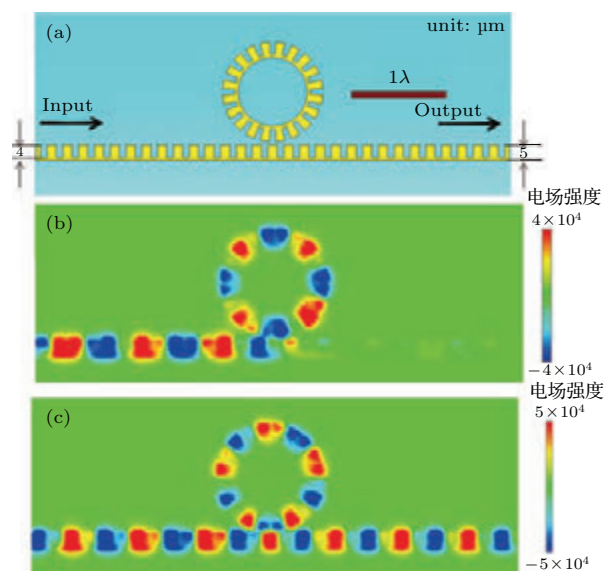


图10 (a) 环形谐振器的结构示意图; (b) 0.98 THz 和 (c) 1.06 THz 时的仿真电场分布图^[68]

Fig. 10. (a) Geometrics of the ring resonator and the simulated electric field distribution at (b) 0.98 THz and (c) 1.06 THz^[68].

5 结论与展望

太赫兹技术和人工电磁媒质都在21世纪受到了广泛的关注,太赫兹人工电磁媒质在过去十年里的发展也为太赫兹间隙的填补做出了实质性的贡献,如太赫兹磁谐振、吸波器、人工表面等离激元等.尽管如此,这依然是一个有着巨大潜力的朝阳领域.比如随机表面,编码、数字和可编程超材料,基于光学变化的人工电磁材料等^[69-72]都是可以在太赫兹波段实现的工作.相信未来太赫兹人工电磁媒质将继续带来令人瞩目的成果.

参考文献

- [1] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Micr. Theory Tech.* **47** 2075
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [5] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [6] Cui T J, Smith D R, Liu R 2009 *Metamaterials: Theory, Design, and Applications* (New York: Springer Science & Business Media)
- [7] Chen H T, Padilla W J, Zide J, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [8] Gu J Q, Singh R, Liu X J, Zhang X Q, Ma Y F, Zhang S, Maier S A, Tian Z, Azad K, Chen H T, Taylor A J, Han J G, Zhang W L 2012 *Nat. Commun.* **3** 1151
- [9] Wu J B, Dai H, Wang H, Jin B B, Jia T, Zhang C H, Cao C H, Chen J, Kang L, Xu W W, Wu P H 2011 *Opt. Express* **19** 1101
- [10] Liang L J, Jin B B, Zhang Q Y, Wu J B, Bao Y J, Jia T, Jia X Q, Cao C H, Kang L, Xu W W, Chen J, Wu P H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 114101
- [11] Zhang X Q, Gu J Q, Cao W, Han J G, Lakhtakia A, Zhang W L 2012 *Opt. Lett.* **37** 906
- [12] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [13] Choi M, Lee S H, Kim Y, Kang S B, Shin J, Kwak M H, Kang K Y, Lee Y H, Park N, Min B 2011 *Nature* **470** 369
- [14] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [15] Alves F, Kearney B, Grbovic D, Lavrik N V, Karunasiri G 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 111104
- [16] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S C, Khalid A, Cumming D R 2011 *Opt. Lett.* **36** 945
- [17] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, Huang W Q, Li X F, Zhai X 2014 *Appl. Phys. A* **115** 1187
- [18] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, Azad A K, Averitt R D, Taylor A J 2009 *Nature Photon.* **3** 148
- [19] Maier S A, Andrews S R, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 176805
- [20] Wang Y, Wang X, He X J, Mei J S, Chen M H, Yin J H, Lei Q Q *Acta Phys. Sin.* 2012 **61** 137301 (in Chinese) [王玥, 王暄, 贺训军, 梅金硕, 陈明华, 殷景华, 雷清泉 2012 物理学报 **61** 137301]
- [21] Garcia-Vidal F J, Martín-Moreno L, Pendry J B 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 97
- [22] Nagpal P, Lindquist N C, Oh S H, Norris D J 2009 *Science* **325** 594
- [23] Brongersma M L, Shalaev V M 2010 *Science* **328** 440
- [24] Tian Z, Singh R, Han J G, Gu J Q, Xing Q R, Wu J, Zhang W L 2010 *Opt. Lett.* **35** 3586
- [25] Wu D M, Fang N, Sun C, Zhang X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 201

- [26] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494
- [27] Linden S, Enkrich C, Wegener M, Zhou J, Koschny T, Soukoulis C M 2004 *Science* **306** 1351
- [28] Zhang S, Fan W, Minhas B K, Frauenglass A, Malloy K J, Brueck S R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 037402
- [29] Shalaev V M, Cai W, Chettiar U K, Yuan H K, Sarychev A K, Drachev V P, Kildishev A V 2005 *Opt. Lett.* **30** 3356
- [30] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Lee M, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
- [31] Paul O, Imhof C, Lagel B, Wolff S, Heinrich J, Hofling S, Forchel A, Zengerle R, Beigang R, Rahm M 2009 *Opt. Express* **17** 819
- [32] Chen H T, Palit S, Tyler T, Bingham C M, Zide J M, O'Hara J F, Smith D R, Gossard A C, Averitt R D, Padilla W J, Jokerst N M, Taylor A J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 091117
- [33] Smith D R, Schultz S, Markoř P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [34] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [35] Tang W X, Cheng Q, Cui T J 2009 *Terahertz Sci. Technol.* **2** 23
- [36] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [37] Wang Y, Sun T, Paudel T, Zhang Y, Ren Z, Kempa K 2011 *Nano Lett.* **12** 440
- [38] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K, Zhang X, Averitt R D, Jepsen P U 2012 *Opt. Express* **20** 635
- [39] Woodward R M, Cole B E, Wallace V P, Pye R J, Arnone D D, Linfield E H, Pepper M 2002 *Phys. Med. Biol.* **47** 3853
- [40] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [41] Hokmabadi M P, Wilbert D S, Kung P, Kim S M 2013 *Terahertz Sci. Technol.* **6** 40
- [42] Grant J, Ma Y, Saha S, Khalid A, Cumming D R 2011 *Opt. Lett.* **36** 3476
- [43] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, Reiten M T, Luo S N, Taylor A J, Chen H T 2012 *Opt. Lett.* **37** 154
- [44] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, Gu J Q, Han J G, Zhang W L, Cui T J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 154102
- [45] Tao H, Bingham C M, Pilon D, Fan K, Strikwerda A C, Shrekenhamer D, Padilla W J, Zhang X, Averitt R D 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 225102
- [46] Chen H T 2012 *Opt. Express* **20** 7165
- [47] Zhu J, Ma Z, Sun W, Ding F, He Q, Zhou L, Ma Y 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 021102
- [48] Liu S, Chen H, Cui T J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 151601
- [49] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [50] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [51] Ozbay E 2006 *Science* **311** 189
- [52] Zia R, Schuller J A, Chandran A, Brongersma M L 2006 *Mater. Today* **9** 20
- [53] Kawata S, Inouye Y, Verma P 2009 *Nat. Photon.* **3** 388
- [54] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I 2010 *Nat. Photon.* **4** 83
- [55] Stern E A, Ferrell R A 1960 *Phys. Rev.* **120** 130
- [56] Pendry J B, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J 2004 *Science* **305** 847
- [57] Hibbins A P, Evans B R, Sambles J R 2005 *Science* **308** 670
- [58] Wang K, Mittleman D M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 157401
- [59] Williams C R, Andrews S R, Maier S A, Fernández-Domínguez A I, Martín-Moreno L, García-Vidal F J 2008 *Nat. Photon.* **2** 175
- [60] Gan Q, Gao Y, Wagner K, Vezenov D, Ding Y J, Bartoli F J 2011 *Proc. Nat. Acad. Sci.* **108** 5169
- [61] Zhou Y J, Jiang Q, Cui T J 2011 *Opt. Express* **19** 5260
- [62] Zhou Y J, Cui T J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 221901
- [63] Zhou Y J, Cui T J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 101906
- [64] Zhou Y J, Jiang Q, Cui T J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 111904
- [65] Zhou Y J, Jiang Q, Cui T J 2012 *Sci. China: Inform. Sci.* **55** 79
- [66] Shen X P, Cui T J, Martin-Cano D, Garcia-Vidal F J 2013 *Proc. Nat. Acad. Sci.* **110** 40
- [67] Shen X P, Cui T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 211909
- [68] Shen X P, Cui T J 2013 *Terahertz Sci. Technol.* **6** 147
- [69] Wang K, Zhao J, Cheng Q, Dong D S, Cui T J 2014 *Sci. Rep.* **4** 5935
- [70] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e218
- [71] Wan X, Jiang W X, Ma H F, Cui T J 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 151601
- [72] Mei Z L, Cui T J 2012 *Int. J. RF Microw. C E* **22** 496

SPECIAL ISSUE—Terahertz physics

Progress of terahertz metamaterials*

Bao Di¹⁾²⁾ Shen Xiao-Peng¹⁾³⁾ Cui Tie-Jun^{1)4)†}

1) (State Key Laboratory of Millimetre Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (Synergetic Innovation Center of Wireless Communication Technology, Southeast University, Nanjing 210096, China)

3) (Department of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

4) (Cooperative Innovation Centre of Terahertz Science, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 8 June 2015; revised manuscript received 8 July 2015)

Abstract

In the past decades, terahertz metamaterials have attracted considerable attention due to the capability of realizing essential terahertz functional devices and potential applications in sensing, imaging, spectroscopy and monitoring. In this review, we first present a brief introduction to the theory and development of terahertz metamaterials, and then focus on some terahertz devices including both triple-band and broadband metamaterial absorbers, the spoof surface plasmon polaritons (SPP) waveguides, the SPP bend, the SPP beam splitter, and the SPP ring resonator. The metamaterial absorbers are fabricated and measured in THz band, while the SPP devices are verified through numerical simulations. All the designs are easy to fabricate and favorable for practical applications.

Keywords: terahertz, metamaterials, absorbers, spoof surface plasmon polaritons

PACS: 87.50.U-, 78.67.Pt, 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.64.228701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61171024, 61171026, 61302018, 61401089, 61571117, 61501112, 61501117, 61138001), the Foundation of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 201444), and the 111 Project (Grant No. 111-2-05).

† Corresponding author. E-mail: tjcu@seu.edu.cn