

# 基于层叠结构的双波段太赫兹超材料增透膜设计

乔楠, 延凤平\*, 王伟, 谭思宇, 李广森

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 设计了一种双波段太赫兹超材料增透膜结构, 该增透膜采用层叠结构, 即由两层金属-聚合物构成。通过数值计算得到了两层金属-聚合物结构金属表面的电场分布, 分析了两波段超低反射产生的机理, 并通过优化聚合物层的厚度与金属单元结构的尺寸, 实现了在 0.471 THz 和 1.560 THz 两个频段处的超低反射, 反射率最低分别为 0.0028 和 0.0025, 反射率在 10% 以内的带宽分别为 0.26 THz 和 0.21 THz。研究结果为实现多波段太赫兹超材料增透膜应用提供了参考。

**关键词** 太赫兹技术; 超材料; 双波段; 增透膜; 耦合

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614031

## Dual-Band Terahertz Metamaterial Antireflection Coating Based on Multilayered Structure

Qiao Nan, Yan Fengping\*, Wang Wei, Tan Siyu, Li Guangsen

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Communication Networks, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** This paper presents the design of a dual-band terahertz metamaterial antireflection coating with a multilayered structure (two layers of metal-polyimide). The formation of the two low-reflectivity bands is analyzed by numerically calculating the electric field distributions on metal surfaces of the two layer of metal-polyimide structure. After adjusting the thickness of the polyimide layer and the size of the metal unit structure, ultra-low reflectivity is achieved with the minimum percentages of 0.0028 and 0.0025 at 0.471 and 1.560 THz, respectively (with  $<10\%$  reflectivity for the bandwidths of 0.26 and 0.21 THz). The results provide a reference for the applications of multi-band terahertz metamaterial antireflection coatings.

**Key words** terahertz technology; metamaterial; dual-band; antireflection coating; coupling

**OCIS codes** 300.6495; 160.3918; 310.1210

## 1 引言

太赫兹波指介于 0.1~10 THz 频率范围的电磁波, 其频谱介于无线电波和红外光之间<sup>[1]</sup>。近年来, 随着太赫兹辐射产生和探测技术的发展, 对太赫兹功能器件的需求逐步增多, 深入研究太赫兹功能器件, 实现对太赫兹波的有效控制, 已成为当今国际太赫兹学术界公认的前沿性基础研究方向。太赫兹功能器件多以硅为基底, 然而硅基的高折射率使得电磁波在入射至空气与硅基界面时, 会产生严重的反射现象, 进而影响耦合效率, 因此需在硅基上敷一

层性能良好的增透膜, 以降低反射。

太赫兹增透膜的工作原理是克服两种介质固有阻抗间的不匹配<sup>[2-3]</sup>。2009 年, Chen 等<sup>[4]</sup>提出可通过制作浮雕结构来降低反射, 他们在硅中刻蚀不同密度的空气柱, 以此来调节空气与硅的比率, 达到了阻抗匹配的要求, 降低了反射。2014 年, Zhou 等<sup>[5]</sup>提出利用石墨烯来制作太赫兹增透膜, 石墨烯的阻抗值会随着堆叠层数而变化, 当堆叠石墨烯的阻抗值与空气和硅的阻抗值相匹配时, 即可达到降低反射的效果。上述两种方法虽然都能有效降低各自结构的反射, 但均对制作精度的要求较为苛刻。超材

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-02-05; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61827818, 61620106014)

\* E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

料具有很高的结构设计灵活性,可为其在增透膜领域的应用提供解决方案。

超材料是一种由亚波长微结构单元通过阵列排布组成的特殊人工材料或人工结构,具有天然材料所不具备的超常物理性质<sup>[6]</sup>。可以通过设计各种各样的结构来获得所需的电磁性能,进而实现不同的功能,如偏振调控<sup>[7]</sup>、电磁诱导透明<sup>[8]</sup>、吸波<sup>[9]</sup>等。2010年,Chen等<sup>[10]</sup>提出的基于金属-聚合物的超材料结构,能于1.2 THz处实现反射率低至0.32%的增透效果。该超材料采用平面结构,制作简单,可通过调节聚合物的厚度来控制反射率。但是,此结构只可以实现单一频率的超低反射。而在实际应用中,往往存在多波段同时要求低反射的情况。

基于此,本文提出了一种基于层叠结构的双波段太赫兹超材料增透膜,并理论分析了该增透膜反射降低的原因。首先利用CST Microwave Studio仿真得到该结构的反射系数与透射系数,并与裸硅的对应系数进行对比分析;而后通过仿真计算得到两层金属-聚合物结构金属表面的电场分布,分析两个反射低谷的形成机理。在此基础上,进一步研究所设计的增透膜结构中聚合物的厚度、金属的几何尺寸对反射率的影响,从而得出最优的结构参数;同时,通过对比两种超材料的性能,分析了层叠结构的优势。与前人设计的结构相比,本文设计的超材料增透膜不仅具有更低的反射率,还能于多波段实现反射。

## 2 多波段增透膜的理论基础与结构设计

### 2.1 理论基础

典型的太赫兹超材料增透膜一般在硅的基础上进行建模,其基本结构由三部分组成:顶层的周期性金属结构、中间的非金属介质材料、底层的硅基。

太赫兹超材料增透膜的主要理论基础为阻抗匹配原理。为提高电磁波的透射,需在折射率较低的自由空间和折射率较高的硅基之间添加折射率介于二者之间的材料,使其能够分别在两个界面上实现阻抗匹配,以保证入射的电磁波保持低反射传输,从而增大太赫兹波的传输效率。

根据参考文献[11-12]的理论分析可知,当太赫兹超材料增透膜的物理厚度小于工作波长时,可以将其等效为一层厚度为 $d$ 的均匀介质。此时,反射系数和透射系数分别为

$$S_{11} = \frac{R_{01}[1 - \exp(j2nk_0d)]}{1 - R_{01}^2 \exp(j2nk_0d)}, \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - R_{01}^2) \exp(j2nk_0d)}{1 - R_{01}^2 \exp(j2nk_0d)}, \quad (2)$$

式中: $n$ 为折射率; $k_0$ 为真空中入射波的波数;电磁波入射到两种不同介质的反射率 $R_{01} = \frac{Z_{\text{eff}} - 1}{Z_{\text{eff}} + 1}$ 。由此可得,等效阻抗为

$$Z_{\text{eff}} = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (3)$$

增透膜的反射率 $R = |S_{11}|^2$ ,分析(3)式可知,当等效阻抗 $Z_{\text{eff}} = 1$ 时,反射率为0。即可以通过优化超材料的结构与尺寸,使其达成阻抗匹配,从而实现太赫兹超材料增透膜减反射的目标。

### 2.2 结构设计

多波段太赫兹超材料增透膜的基本单元结构设计如图1(a)所示,该结构由两层金-聚酰亚胺结构堆叠而成,基本单元结构尺寸为 $p_1 = 65 \mu\text{m}$ , $p_2 = 52 \mu\text{m}$ ,其中金的电导率为 $\sigma_{\text{gold}} = 4.561 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ,厚度 $t = 0.2 \mu\text{m}$ ,聚酰亚胺的介电常数 $\epsilon_{\text{polyimide}} = 3.5 + 9.45 \times 10^{-3}i$ 。第一层金-聚酰亚胺的超材料平面结构如图1(b)所示,金属开口谐振环(SRRs)的边长 $c = 45 \mu\text{m}$ ,间隙 $g = 4 \mu\text{m}$ ,厚度 $w = 6 \mu\text{m}$ ,聚酰亚胺的厚度 $h_1 = 45 \mu\text{m}$ 。第二层金-聚酰亚胺的超材料平面结构如图1(c)所示,其中金属矩形的边长 $a = 16 \mu\text{m}$ , $b = 36 \mu\text{m}$ ,聚酰亚胺的厚度 $h_2 = 15 \mu\text{m}$ 。

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 仿真结果

利用电磁仿真软件CST Microwave Studio对结构进行建模,并进行时域仿真。入射电磁波被设置为沿 $Z$ 轴方向垂直入射,电场和磁场的偏振方向分别沿 $X$ 轴与 $Y$ 轴。在垂直入射电磁波的激励下提取 $S$ 参数,得到 $S_{11}$ (反射系数)与 $S_{21}$ (入射系数),根据公式 $R = |S_{11}|^2$ 和 $T = |S_{21}|^2$ 计算反射率 $R$ 与透射率 $T$ 。将仿真得到的反射率、透射率与裸硅结构的反射率、透射率进行对比,结果如图2所示。仿真结果表明,增透膜在 $0 \sim 2$  THz范围内实现了双波段超低反射,在频率 $f = 0.471$  THz和 $f = 1.560$  THz处存在两个反射低谷,对应的反射率分别为0.0028和0.0025,透射率分别为0.675和0.593,反射率在10%以内的带宽(本研究的带宽定义为某一固定反射率以内的频带宽度)分别可以达到0.26 THz和0.21 THz。这两个波段的反射率与透射率相比于裸硅的反射率(0.30)和透射率(0.50)

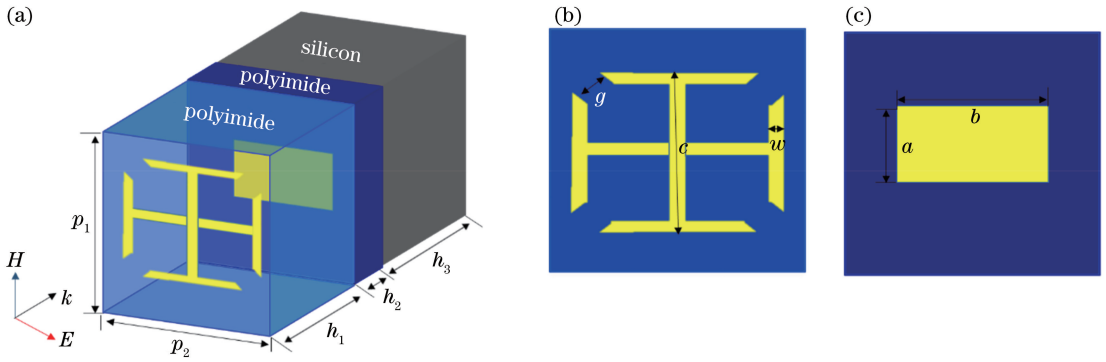


图 1 双波段增透膜的结构示意图。(a)基本单元;(b)第一层金-聚酰亚胺的平面结构;(c)第二层金-聚酰亚胺的平面结构

Fig. 1 Structural diagram of dual-band antireflection coating. (a) Unit cell; (b) planar structure of first layer of gold-polyimide; (c) planar structure of second layer of gold-polyimide

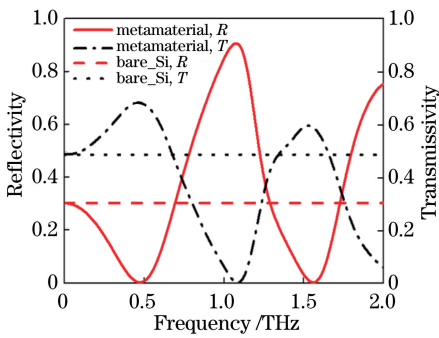


图 2 双波段增透膜与裸硅的反射率和透射率

Fig. 2 Reflectivity and transmissivity for dual-band antireflection coating and bare silicon

都有很大程度的提升。此外,该双波段增透膜的两个反射低谷的反射率,相对于 Chen 等<sup>[10]</sup>提出的单波段增透膜的反射率分别降低了 0.04% 和 0.07%。

### 3.2 多波段增透膜的形成机理

为分析该增透膜两个反射低谷的形成机理,将两层金属-聚合物、单层 SRRs-聚合物以及单层矩形-聚合物这三种超材料结构进行对比分析,结果如图 3 所示。注意到,该双波段增透膜的第一个反射低谷与 SRRs-聚合物超材料结构的一个反射低谷吻

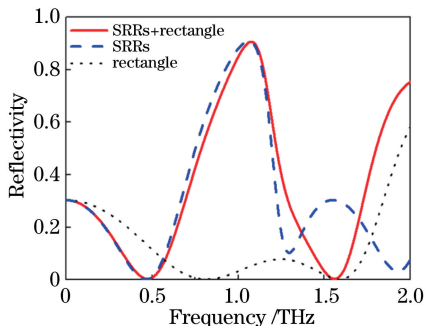


图 3 三种结构的反射率

Fig. 3 Reflectivity for three structures

合,说明在  $f = 0.471$  THz 处的反射低谷与金属 SRRs 的谐振有关。

为证明上述结论,进一步利用 CST Microwave Studio 对所设计的增透膜结构在两个超低反射频率处的电场分布进行数值计算。图 4(a) 是  $f = 0.471$  THz 频点处两层金属-聚合物结构金属表面上的电场分布图,可见,在入射电磁波电场分量的作用下,电荷主要集中于金属 SRRs 左右两侧的金属臂上,产生强烈的类电偶极子谐振,说明双波段增透膜的第一个反射低谷主要是由 SRRs 的电谐振引起的,验证了上述结论。图 4(b) 为在  $f = 1.560$  THz 处两层金属-聚合物结构金属表面的电场分布,图 4(c)~(d) 为单层 SRRs-聚合物和单层矩形-聚合物结构金属表面上的电场分布。由图 4(b)~(d) 可以看出,两层金属-聚合物超材料结构金属表面的电场强度明显高于单层 SRRs-聚合物和单层矩形-聚合物超材料结构金属表面的电场强度。因此,第二个反射低谷是由金属 SRRs 与金属矩形耦合引起的。

## 4 结构参数优化及性能分析

### 4.1 第一层聚酰亚胺厚度对反射率的影响

为研究聚合物厚度对增透膜反射率的影响,对于具有不同厚度聚酰亚胺 ( $h_1 = 36, 39, 42, 45 \mu\text{m}$ ) 的增透膜结构的反射率进行仿真计算,结果如图 5 所示。结果表明,随着聚酰亚胺厚度增加,两个反射低谷的谱线位置向低频方向移动,但反射率幅值的变化很小。引起频率红移的原因如下:当电磁波在介质中传输时,路径相位为

$$\varphi_p = \frac{4t \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\lambda}, \quad (4)$$

式中:  $t$  为介质层的厚度;  $\epsilon_r$  为介质层的电导率;  $\theta$  为

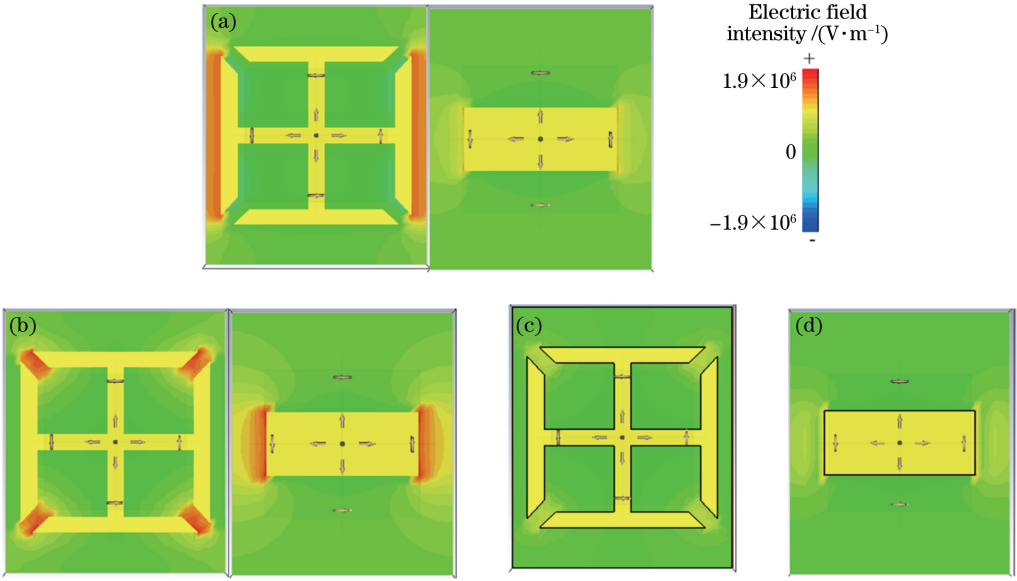


图 4 不同超材料结构金属表面在不同频点下的电场分布。(a)两层金属-聚合物结构,0.471 THz;  
 (b)两层金属-聚合物结构,1.560 THz;(c) SRRs-聚合物结构,1.560 THz;(d)单层矩形-聚合物结构,1.560 THz  
 Fig. 4 Electric field distributions on metal surfaces of different metamaterial structures at different frequencies. (a) Two layer of metal-polyimide structure, 0. 471 THz; (b) two layer of metal-polyimide structure, 1. 560 THz; (c) SRRs-polyimide structure, 1. 560 THz; (d) rectangle-polyimide structure, 1. 560 THz

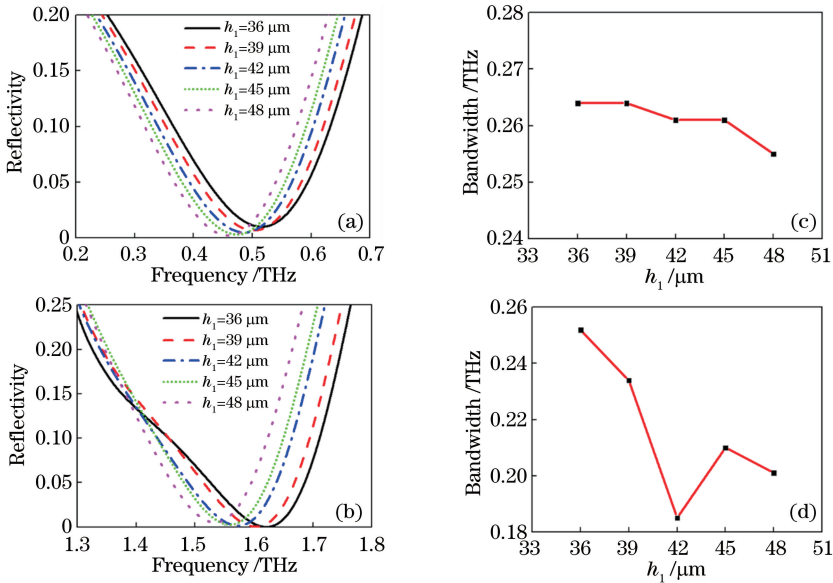


图 5 反射率和带宽随  $h_1$  的变化。(a) 0.471 THz 附近反射率与  $h_1$  的关系;(b) 1.560 THz 附近反射率与  $h_1$  的关系;(c) 0.471 THz 附近带宽与  $h_1$  的关系;(d) 1.560 THz 附近带宽与  $h_1$  的关系  
 Fig. 5 Reflectivity and bandwidth versus  $h_1$ . (a) Reflectivity versus  $h_1$  at frequency near 0. 471 THz; (b) reflectivity versus  $h_1$  at frequency near 1. 560 THz; (c) bandwidth versus  $h_1$  at frequency near 0. 471 THz; (d) bandwidth versus  $h_1$  at frequency near 1. 560 THz

电磁波的入射角度; $\lambda$  为电磁波的入射波长<sup>[13]</sup>。当电磁波与结构满足增透条件时,可以认为  $\varphi_p$  为定值,且  $\epsilon_r=3.5$  及  $\theta=0$ 。因为  $t$  与  $\lambda$  成正比,又由于  $f$  与  $\lambda$  成反比,所以介质层的厚度  $t$  与频率  $f$  成反比。故当聚合物的厚度增加时,两个反射低谷的频

率均向低频方向移动。

观察图 5(a)、(c)可知,随着聚合物厚度增加, $f=0.471$  THz 附近反射低谷的红移过程较为均匀平稳,且反射率在 10% 以内的带宽基本保持不变。观察图 5(b)、(d)可知,对于  $f=1.560$  THz 附近处



由 SRRs 与矩形相互耦合而产生的反射低谷,当第一层聚合物的厚度发生变化时,会对耦合产生影响。因此,随聚合物厚度增加,该处反射低谷的红移幅度较随机且不均匀,其反射率在 10% 以内的带宽变化幅度较大。

#### 4.2 金属矩形边长对反射率的影响

当边长  $b$  分别为 27, 30, 33, 36, 39  $\mu\text{m}$  时,研究金属矩形边长对反射率的影响,结果如图 6 所示。由于  $f=0.471$  THz 附近处的反射低谷与金属矩形无关, $f=1.560$  THz 附近处的低谷是由金属 SRRs

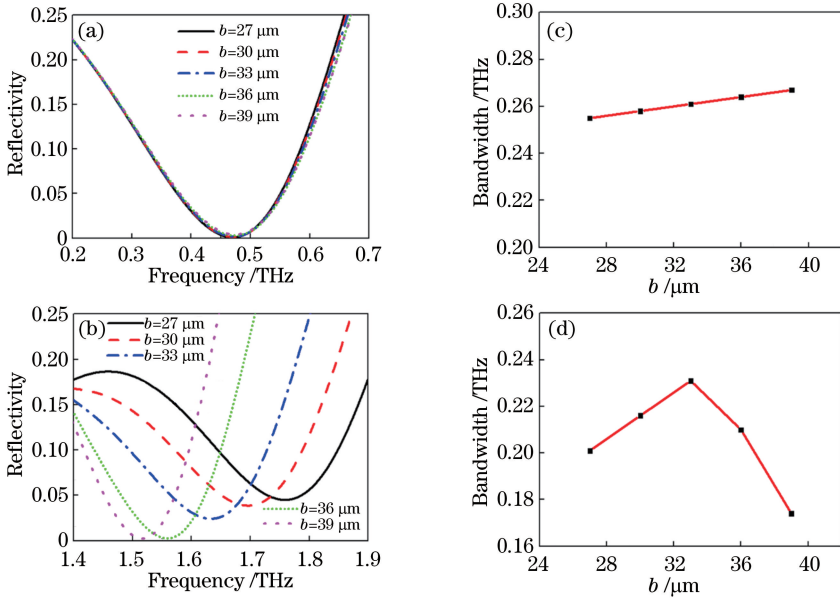


图 6 反射率和带宽随  $b$  的变化。(a) 0.471 THz 附近反射率与  $b$  的关系;(b) 1.560 THz 附近反射率与  $b$  的关系;(c) 0.471 THz 附近带宽与  $b$  的关系;(d) 1.560 THz 附近带宽与  $b$  的关系

Fig. 6 Reflectivity and bandwidth versus  $b$ . (a) Reflectivity versus  $b$  at frequency near 0.471 THz; (b) reflectivity versus  $b$  at frequency near 1.560 THz; (c) bandwidth versus  $b$  at frequency near 0.471 THz; (d) bandwidth versus  $b$  at frequency near 1.560 THz

#### 4.3 金属 SRRs 边长对反射率的影响

利用 CST 对金属 SRRs 边长  $c$  分别为 36, 39, 42, 45, 48  $\mu\text{m}$  的增透膜结构进行仿真,结果如图 7 所示,可见,随着金属 SRRs 边长增大,两个反射低谷都发生红移。上面的分析认为  $f=0.471$  THz 附近的低谷可看作是类电偶极子的电谐振引起的,电偶极子的谐振频率为

$$\omega_e \propto \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}}, \quad (5)$$

式中: $c$  为真空中的光速; $L$  为对应金属环的边长; $\epsilon_{\text{eff}}$  为金属环上下两臂附近的等效介电常数<sup>[14]</sup>。由(5)式可知谐振频率与金属环的边长成反比,因此,随着金属 SRRs 边长增大, $f=0.471$  THz 附近处的反射低谷向低频方向移动。金属环的边长发生改变

和金属矩形耦合作用引起的,因此,当改变金属矩形的边长时, $f=0.471$  THz 附近处低谷的反射率基本没有变化,而  $f=1.560$  THz 附近处低谷的反射率则随着金属矩形边长的增加而发生明显的红移,反射率逐渐减小。当边长  $b$  增加到 36  $\mu\text{m}$  时,反射最低点的幅度基本保持不变。该结构的反射率在 10% 以下的带宽随着金属矩形边长的增加而先增大后减小。

综合考虑低反射率与宽带宽,本结构选取金属矩形的长为 36  $\mu\text{m}$  作为最优值。

后,相当于电感产生变化,同样也会对  $f=1.560$  THz 附近处的反射低谷产生影响。对比图 7 (c)、(d),本结构选择  $c=45$   $\mu\text{m}$  作为最优解。

#### 4.4 超材料增透膜的性能

根据图 3 可知,单层矩形-聚合物结构可在  $f=0.813$  THz 和  $f=1.617$  THz 处实现双波段反射,且更有利于实现宽带反射。然而由图 8 (a)可知,单层矩形-聚合物结构与聚合物结构的第一个反射低谷曲线近似吻合,说明  $f=0.813$  THz 附近处反射低谷的产生与电磁波在聚合物与硅之间的多次反射有关。由图 8(b)~(c)可以看出,随着矩形边长  $b$  增大, $f=0.813$  THz 附近的反射低谷变化很小,而  $f=1.617$  THz 附近的反射低谷红移幅度大。由此证明了上述结论:矩形-聚合物结构第一个反射低谷

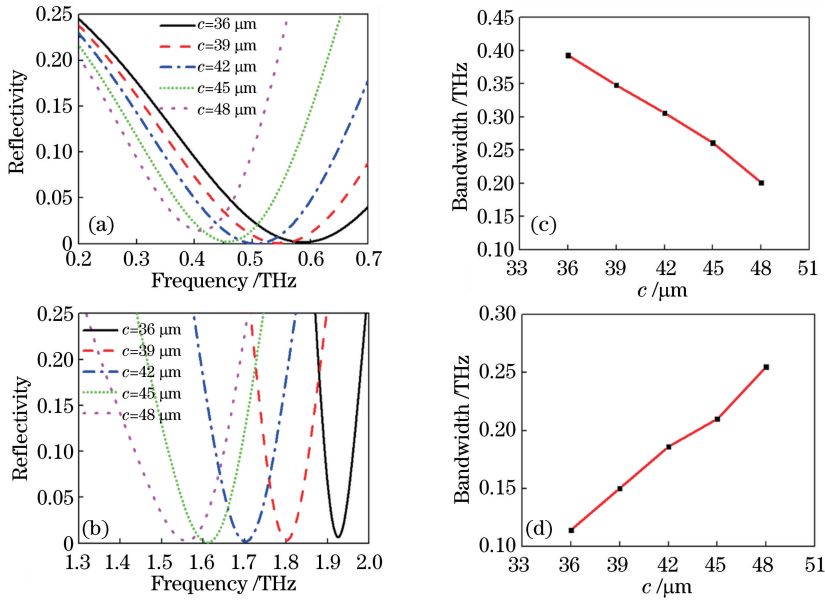


图 7 反射率和带宽随  $c$  的变化。(a) 0.471 THz 附近反射率与  $c$  的关系；(b) 1.560 THz 附近反射率与  $c$  的关系；(c) 0.471 THz 附近带宽与  $c$  的关系；(d) 1.560 THz 附近带宽与  $c$  的关系

Fig. 7 Reflectivity and bandwidth versus  $c$ . (a) Reflectivity versus  $c$  at frequency near 0.471 THz; (b) reflectivity versus  $c$  at frequency near 1.560 THz; (c) bandwidth versus  $c$  at frequency near 0.471 THz; (d) bandwidth versus  $c$  at frequency near 1.560 THz

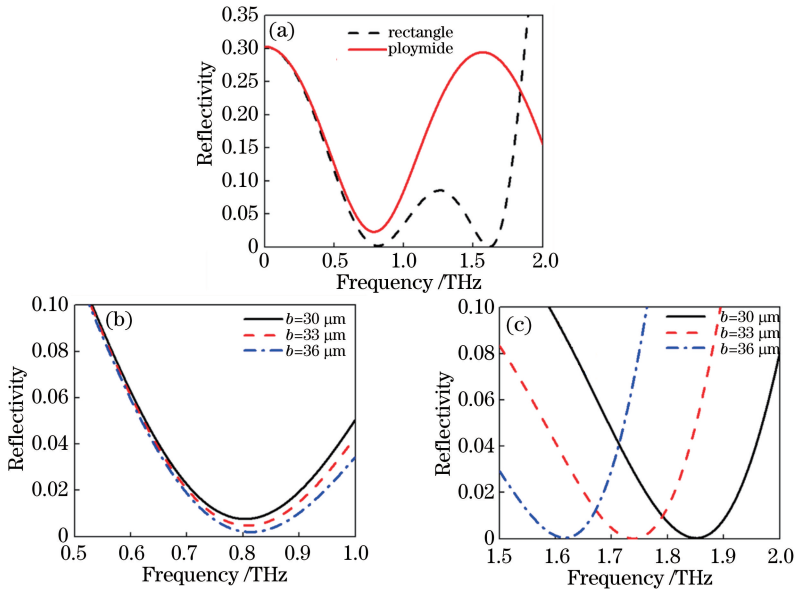


图 8 不同结构的反射率以及不同频点附近反射率与  $b$  的关系。(a) 两种结构的反射率；(b) 0.813 THz 附近反射率与  $b$  的关系；(c) 1.617 THz 附近反射率与  $b$  的关系

Fig. 8 Reflectivity of different structures and relationship between reflectivity near different frequencies and rectangular side length  $b$ . (a) Reflectivity of two structures; (b) relationship between reflectivity versus  $b$  at frequency near 0.813 THz; (c) relationship between reflectivity versus  $b$  at frequency near 1.617 THz

主要是电磁波在聚合物与硅之间多次反射产生的，第二个反射低谷与金属矩形的谐振有关。

单纯的聚合物结构虽然也可以满足低反射、高透射的要求，但产生的反射频段固定且单一。因此，

需要利用金属的谐振以及金属之间的耦合等作用，通过改变金属的形状与大小来满足频段多样、灵活的抗反射需求。故而，本研究选取层叠结构为基本单元结构。

## 5 结 论

所设计的基于层叠结构的太赫兹超材料双波段增透膜,可在 0~2 THz 范围实现两个波段的超低反射。通过将两层金属-聚酰亚胺结构与单层金属-聚酰亚胺结构的金属表面的电场分布进行对比,分析了两个反射低谷的产生机理。结果表明:第一个反射低谷与第一层金属的谐振有关,第二个反射低谷与两层金属之间的耦合有关。进一步研究了改变超材料结构参数对双波段增透膜反射率与带宽的影响,分析了采用层叠结构的优势。太赫兹超材料双波段增透膜相比于以往的单波段增透膜具有更广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Hu Y, Huang P, Guo L T, *et al.* Terahertz spectroscopic investigations of explosives[J]. *Physics Letters A*, 2006, 359(6): 728-732.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [3] Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(20): 203901.
- [4] Chen Y W, Han P Y, Zhang X C. Tunable broadband antireflection structures for silicon at terahertz frequency [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(4): 041106.
- [5] Zhou Y X, Xu X L, Hu F R, *et al.* Graphene as broadband terahertz antireflection coating [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 051106.
- [6] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509-514.

- [7] Yu N F, Genevet P, Aieta F, *et al.* Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(3): 4700423.
- [8] Kim J, Soref R, Buchwald W R. Multi-peak electromagnetically induced transparency (EIT)-like transmission from bull's-eye-shaped metamaterial[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17):17997-18002.
- [9] Tao H, Bingham C M, Pilon D, *et al.* A dual band terahertz metamaterial absorber [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(22): 225102.
- [10] Chen H T, Zhou J F, O' Hara J F, *et al.* A numerical investigation of metamaterial antireflection coatings [J]. *Terahertz Science and Technology*, 2010, 3(2): 66-73.
- [11] Zhang B Y, Hendrickson J, Nader N, *et al.* Metasurface optical antireflection coating[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(24): 241113.
- [12] Smith D R, Schultz S, Markoš P, *et al.* Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J]. *Physical Review B*, 2002, 65(19): 195104.
- [13] Liu P, Jiang J J, Chen Q, *et al.* Study on the electromagnetic properties of frequency selective surface absorber [J]. *Electronic Components & Materials*, 2011, 30(10): 56-59.  
刘鹏, 江建军, 陈谦, 等. 频率选择表面结构吸波体的电磁特性研究 [J]. *电子元件与材料*, 2011, 30(10): 56-59.
- [14] Baena J D, Bonache J, Martin F, *et al.* Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(4): 1451-1461.