

基于站立结构的宽带太赫兹超材料增透膜设计

苏思思, 延凤平, 谭思宇, 王伟, 孙慧慧

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 设计了一种基于站立结构的太赫兹超材料增透膜。利用双开口环站立结构实现了对太赫兹波段反射的抑制,使得该增透膜的反射率最低减小至 0.001,反射率在 0.1 以下的带宽可达 0.45 THz。分析了该超材料增透膜的工作机理,研究了两个开口环之间的距离以及聚合物基底的厚度对超材料增透膜性能的影响,并与单开口环结构的增透膜进行了性能对比。仿真及分析结果表明,所设计的超材料增透膜具有优异的宽带反射抑制性能和较大的制作参数容差特性。

关键词 材料; 增透膜; 太赫兹; 站立结构; 双开口环谐振器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0414001

Design of Antireflection Coating Based on Broadband Terahertz Metamaterial with Stand-Up Structure

Su Sisi, Yan Fengping, Tan Siyu, Wang Wei, Sun Huihui

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

Abstract One kind of antireflection (AR) coating based on terahertz metamaterial with a stand-up structure is designed, which utilizing stand-up double split ring resonators (SRRs) to suppress the reflection in the terahertz range. The minimum reflectivity of AR coating is 0.001 and the band width is 0.45 THz when the reflectivity is below 0.1. The operating mechanism of this metamaterial antireflection coating is analyzed, the effects of the distance between the two split rings and the thickness of the polymer substrate on the performances of the metamaterial AR coating are investigated, and the performance comparison with that of the single SRR AR coating is conducted. The numerical simulation and analysis results show that the designed metamaterial AR coating has an excellent broadband reflection inhibition characteristic and a large production-parameter-tolerance characteristic.

Key words materials; antireflection coating; terahertz; stand-up structure; double-split ring resonators

OCIS codes 160.3918; 310.1210; 300.6495

1 引言

太赫兹波频率范围为 0.1~10 THz,在宽带通信、雷达技术和医学图像技术等方面有着广泛的应用^[1-4]。太赫兹技术的发展离不开太赫兹功能器件的广泛应用。高电阻率浮区单晶硅(HRFZ-Si)^[5]是在太赫兹频率范围内广泛应用的一种各向同性结晶电介质材料^[6-8]。然而,由于高折射率($n \approx 3.4175$)

的 HRFZ-Si 无法与空气实现折射率匹配,空气和硅交界面处反射率达到 30%,且传输光谱中存在法布里-珀罗干涉条纹,透射率减小为 50%左右,极大地影响了实际应用性能。因此,需要在空气与硅之间加入性能良好的增透膜以增加透射降低反射。

传统的光学四分之一波长增透膜利用了光的干涉原理,这种技术只能应用于频率小于 1 THz 的情况,无法满足宽带和多波长的要求^[9]。太赫兹波段

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61327006,61620106014)

作者简介: 苏思思(1992—),女,硕士研究生,主要从事超材料设计方面的研究。E-mail: 15120027@bjtu.edu.cn

导师简介: 延凤平(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信方面的研究。

E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn(通信联系人)

常见的增透技术有以下两种。第一种方法是使用超薄金属膜来作为增透膜,如超薄铯^[10-11]和纳米金膜^[12]等,也有人提出使用多层石墨烯堆叠^[13]作为增透膜,其原理都是通过阻抗匹配来对反射进行抑制。这种技术可以得到几乎完美的增透膜,但是对精度要求非常高,增透膜的厚度只有几纳米左右。第二种是通过将硅的表面处理成浮雕结构,使得折射率逐渐变化,从而使空气与硅的折射率匹配^[14]。这种技术需要运用微米或毫米切割技术对高阻硅表面进行切割或腐蚀,加工难度非常大。利用超材料实现对太赫兹波的有效调控引起了研究人员的广泛关注。超材料是一种人工的具有周期性元胞结构的复合材料,通过改变超材料结构单元的尺寸和形状,可以灵活地控制超材料的电磁特性。2010年,Chen等^[15]基于超材料实现了一种具有超低反射率的增透膜,这种超材料由开口环谐振器(SRR)和金网格构成,中间由聚合物支撑,可以在特定单一频率上实现对反射的有效抑制。与上述传统增透膜技术相比,超材料技术能够通过调整结构尺寸满足不同频率上的反射抑制需求,具有设计灵活度高的优势。1999年,Pendry等^[16]利用电场激发SRR产生磁谐振,实现了负磁导率。之后出现了SRR的大量应用,如滤波器、吸波体和谐振器等^[17-19],但是一直局限于平面超材料结构。2011年,Fan等^[20]提出了站立结构超材料,将开口环站立在基底上形成三维(3D)结构,当磁场垂直于开口环表面时会激发谐振作用,通过等效参数反演算法可得出超材料参数,其中折射率表现为负值,这种3D超材料结构为太赫兹范围的众多潜在应用提供了可能。

基于前人对太赫兹增透膜及站立超材料结构的研究工作,本文将站立式超材料结构引入到太赫兹

增透膜中。利用两个开口方向相反的谐振环在聚合物表面分立的结构,实现了较宽带宽范围内的反射抑制,并通过3D电磁场仿真软件CST进行了数值仿真验证。同时与单个开口环站立结构进行了对比分析,并且通过参数反演算法研究了超材料结构的减反射机理。在此基础上,进一步量化分析了两个开口环之间的水平间距以及聚合物厚度对所提的太赫兹增透膜的反射抑制特性的影响,得出了最优的结构参数。与前人的超材料增透膜技术相比,所提站立结构增透膜达到了更小的反射率,更好的反射抑制带宽,以及更优的容差能力。

2 超材料增透膜结构

太赫兹超材料增透膜的结构设计如图1所示。增透膜是由基本单元周期排列组成,周期为 $80\ \mu\text{m}$ 。超材料基本单元又由金和聚酰亚胺组成,金的电导率 $\sigma_{\text{gold}}=4.561\times 10^7\ \text{S}\cdot\text{m}^{-1}$,聚合物作为介质层有支撑作用,厚度 $d=50\ \mu\text{m}$,介电常数 $\epsilon_{\text{polyimide}}=3.5+9.45\times 10^{-3}i$ 。基本结构单元中两个大小相同、开口相反的开口环在聚合物上分立站立,距离 $s=20\ \mu\text{m}$ 。利用金对开口环进行建模,上下两个直臂是长方形金属片,长度 $l=50\ \mu\text{m}$,厚度 $t=0.2\ \mu\text{m}$,宽度 $w=10\ \mu\text{m}$ 。开口环的侧臂为圆柱形结构,高度 $h=56\ \mu\text{m}$,圆柱的直径与长方形金属片的宽度相等,开口侧的开口尺寸 $g=15\ \mu\text{m}$ 。为了更加接近于实际应用,在硅基底上对增透膜进行建模。材料硅选用CST仿真软件材料库中的有损硅,介电常数 $\epsilon_{\text{silicon}}=11.9$,电导率 $\sigma_{\text{silicon}}=2.5\times 10^{-4}\ \text{S}\cdot\text{m}^{-1}$,厚度为 $1500\ \mu\text{m}$ 。外加磁场 \mathbf{H} 方向垂直于开口环表面,电场 \mathbf{E} 方向平行于开口环, \mathbf{k} 为波矢量。

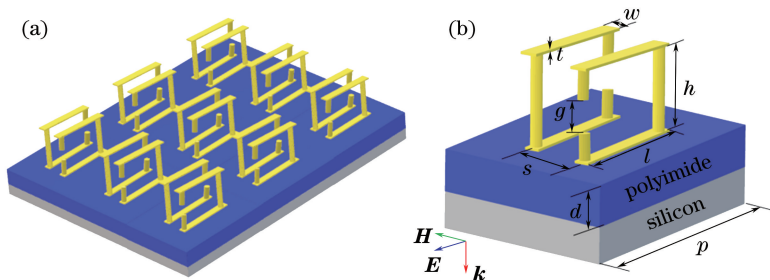


图1 (a)超材料增透膜结构;(b)基本结构单元

Fig. 1 (a) Metamaterial antireflection coating structure; (b) basic structural unit

3 仿真结果及原理讨论

利用三维电磁场仿真软件CST Microwave Studio对以上建模结构进行时域仿真。仿真结果得

到散射(S)矩阵,从中可以得到与频率相关的反射率 $R=|S_{11}|^2$,及透射率 $T=|S_{21}|^2$,其中 S_{11} 和 S_{21} 为S矩阵中的元素, S_{11} 表示反射系数, S_{21} 表示透射系数。通过反射率和透射率对站立结构超材料

增透膜进行分析。在相同条件下对裸硅进行仿真,增透膜与裸硅的反射率、透射率对比结果如图 2(a)所示。可以看出,与反射率约为 30% 的裸硅相比,在 1.35~1.80 THz 之间,增透膜反射率明显减小,在 1.48 THz 和 1.72 THz 两个位置反射率最小,达到 0.001 左右。定义反射率在 0.1 以下的频率范围

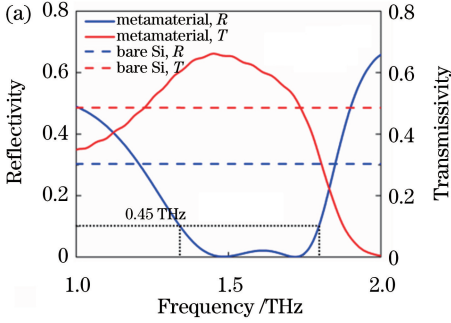


图 2 (a)增透膜与裸硅的透射率和反射率;(b)增透膜干涉模型

Fig. 2 (a) Transmissivity and reflectivity of antireflection coating and bare silicon;
(b) interference model of antireflection coating

为了验证增透膜的反射抑制机理,建立多次反射模型,如图 2(b)所示。中间层为增透膜, d_{eff} 为增透膜等效厚度, n_{eff} 为等效折射率,两列反射波的光程差为

$$\Delta L = 2n_{\text{eff}}d_{\text{eff}}\cos\alpha_s, \quad (1)$$

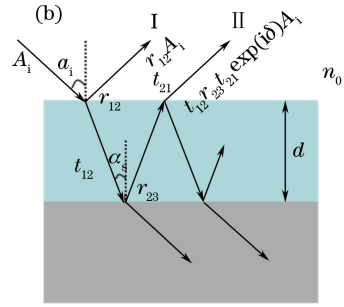
式中 α_s 为太赫兹波在增透膜与硅表面的反射角。由菲涅耳原理可知, $\alpha_s = \arcsin(\sin\alpha_i/\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}})$,其中 α_i 为入射角, ϵ_{eff} 为增透膜等效介电常数。多光束干涉反射波振幅为

$$A_r = \left[r_{12} + t_{12}r_{23}t_{21} \frac{\exp(i\delta)}{1 - r_{21}r_{23} \cdot \exp(i\delta)} \right] A_i, \quad (2)$$

式中 A_i 为入射波振幅,相位差 $\delta = \frac{4\pi}{\lambda}n_{\text{eff}}d\cos\alpha_s$,其中 λ 为增透膜工作波长。增透膜的等效折射率介于空气和硅之间,故在增透膜的上下表面都会产生半波损失。当两个反射波的波程差为半波长的整数倍,即相位差为 π 的整数倍时,两个反射波干涉相消,反射振幅达到最小。因此,在正入射情况下,对于特定波长的反射波,当介质厚度和折射率满足 $n_{\text{eff}} = \lambda/4d$ 时,增透膜将起到抑制反射波的作用。

增透膜两个反射低谷频率位置 1.48 THz 及 1.72 THz 对应的波长值分别为 202.70 μm 和 174.42 μm ,而所提出的超材料增透膜的物理厚度为 106.4 μm 。增透膜的厚度小于这两个工作波长,满足等效介质的条件^[21]。因此,为了研究仿真结果

为反射抑制带宽,由图 2(a)可以看出,带宽可达到 1.45 THz。裸硅的透射率约为 0.5,超材料增透膜的透射率最高可以达到 0.66 左右。超材料增透膜的等效平均损耗为 13%,与损耗为 60% 的金属膜增透膜相比明显减小^[10-12]。



中的两个反射低谷产生的原因,将超材料结构等效为均质薄膜并通过参数反演算法^[22-25]计算超材料结构的等效折射率。根据 $n_{\text{eff}} = \lambda/4d$,计算出 202.70 μm 及 174.42 μm 处的折射率分别为 2.0 及 2.4。由参数反演算法得到,1.48 THz 与 1.72 THz 处的等效折射率分别为 $1.85 + 1.2i$ 和 $2.04 + 1.32i$ 。参数反演的结果与理论计算结果存在一些偏差,但在误差允许范围之内,误差是在超材料等效为均质材料的过程中产生的。超材料增透膜的两个反射低谷是折射率在这两个特定波长位置时满足干涉相消条件引起的。

4 超材料结构参数分析及性能对比

4.1 开口环水平间距对反射抑制的影响分析

为了进一步研究两个开口环中心之间的距离对反射率的影响,通过调整结构参数 s ,对双立 SRRs 结构进行了仿真分析。图 3 所示为仿真得到的反射振幅随参数 s 变化的曲线。由图 3(a)可以看出,随着两个开口环中心之间距离的增加,1.48 THz 处的反射低谷几乎没有变化,但当 s 由 12 μm 增大到 20 μm 时,1.72 THz 处的反射率最小值 R_{min} 由 0.09 减小到 0.001,随 s 的进一步增大, R_{min} 逐渐增大,并且 1.72 THz 处最低点的位置向高频有轻微的漂移。为了阐述两个反射低谷随间距变化具有不同趋势的原因,进一步仿真了两个反射率低谷频率处的电场强度分布,如图 4 所示。可以看出,在

1.72 THz时两个开口环之间有较强的电场,而在1.48 THz时只有较弱的电场。由此得出,1.72 THz处的反射低谷是由两个开口环之间的相互作用引起的,故1.72 THz处的反射抑制作用与开口环之间水平间距有关,但1.48 THz处的反射抑制作用与开口环偏离中心位置的大小基本无关,而与单个开口环结构的谐振作用有关。

由于 R_{\min} 和频率位置的变化,带宽发生变化,图3(b)反映出反射率在0.1以下时带宽与间距 s 之间的关系。可以发现,随着间距 s 的增大,带宽呈现增大的趋势,但在 $s=28\ \mu\text{m}$ 处, R_{\min} 的增大造成带宽减小。当 $s=12\ \mu\text{m}$ 时,反射曲线几乎只有一个低

谷,原因是当两个开口环的距离非常小,甚至可以视为一个闭合方形环时,开口处的电容作用减小,导致反射曲线发生变化。当两个开口环的间距较大时,相互之间的电场作用减小,这也会对振幅产生影响。通过以上分析得出,在同时考虑反射抑制程度及带宽时, $s=20\ \mu\text{m}$ 时具有最优效果。另外,值得关注的是,由图3(b)中的虚线可以看出,当 s 在 $18\sim 22\ \mu\text{m}$ 之间变化时,仍然能够保证带宽在0.43 THz以上,同时图3(a)中的虚线表明,当 s 在 $18\sim 22\ \mu\text{m}$ 之间时,反射率仍然可以保持在0.025以下。由此可以说明,当制备尺寸厚度等存在一定误差时,增透膜仍具有较优的反射抑制效果。

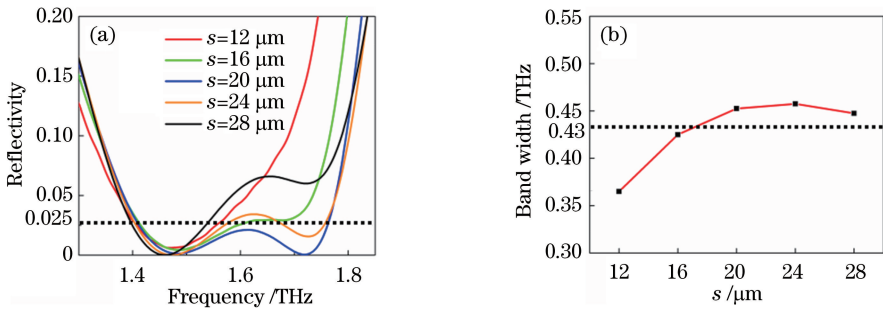


图3 (a)开口环不同间距下的反射率曲线; (b)带宽与开口环间距的关系

Fig. 3 (a) Reflectivity curves under different distances between two SRRs; (b) relationship between band width and SRR distance

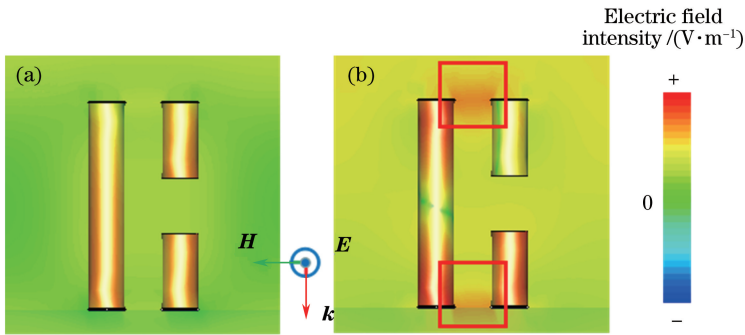


图4 频率为(a) 1.48 THz和(b) 1.72 THz处的电场强度分布

Fig. 4 Electric field distributions at frequency of (a) 1.48 THz and (b) 1.72 THz

4.2 聚合物厚度对反射抑制的影响分析

除了金属结构在抑制反射时产生的作用以外,聚合物基层也会对反射谱线产生影响。为了研究聚酰亚胺厚度对减反射作用的影响,在固定开口环间距为 $20\ \mu\text{m}$ 的情况下,对不同厚度下的超材料进行了仿真分析,分析结果如图5(a)所示。当聚合物厚度由 $44\ \mu\text{m}$ 增大到 $50\ \mu\text{m}$ 时,1.48 THz与1.72 THz两个频率位置的 R_{\min} 均呈现减小的趋势,随着 d 的进一步增大, R_{\min} 逐渐增大。且随着聚合物厚度的增大,两个反射低谷均向低频方向移动,1.48 THz附近低谷的移动更加明显,两反射低谷的中间部分升高,因此两个

反射低谷呈现出分离趋势,使得反射率小于0.1的带宽随着厚度的增大而变化,如图5(b)所示。介质层的影响归根结底是对等效均质材料的影响,不同厚度介质层对应的等效材料厚度不同。由四分之一波长增透膜的作用机理可知,厚度影响增透膜工作波长,对应超材料反射谱线上频率的变化,1.48 THz处的反射低谷受超材料整体谐振作用的影响更大,而由于开口环的间距没有发生改变,1.72 THz处的反射低谷频移并不明显。但由于聚合物的厚度影响了超材料结构的等效折射率,故两个反射低谷的 R_{\min} 都受到了影响。综合考虑反射率最小及反射抑制带宽两个

方面, $d = 50 \mu\text{m}$ 时具有最优增透效果。同时, 由图 5(a)、(b) 虚线可以看出, 当聚合物厚度在 $47 \sim 53 \mu\text{m}$ 之间变化时, 反射率曲线的值均在 0.05 以下,

并且带宽在 0.42 THz 以上, 即在偏离最优参数时仍然能保持较优的反射抑制效果, 因此可以说明, 在超材料增透膜制备过程中允许一定的制备误差。

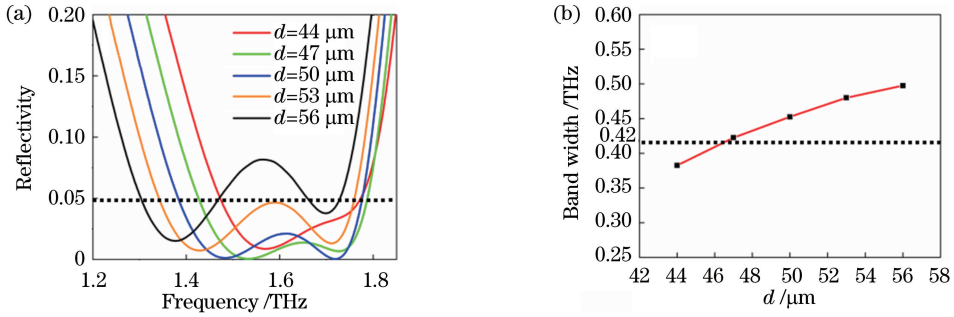


图 5 (a)不同 d 下的反射率; (b)带宽与 d 之间的关系

Fig. 5 (a) Reflectivity under different d ; (b) relationship between band width and d

4.3 超材料增透膜性能的对比分析

双 SRRs 站立结构是由单个 SRR 站立结构改进而来, 为了更好体现双 SRRs 站立结构的优势特点, 在开口环和基底参数相同, 外加电磁场相同的情况下, 将双 SRRs 站立结构的反射及透射谱线分别

与单个 SRR 站立结构的进行对比, 如图 6 所示。可以看出, 双 SRRs 结构的反射率比单 SRR 结构的反射率略有减小, 但是透射率却有了显著增大, 并且透射带宽也有明显增大。

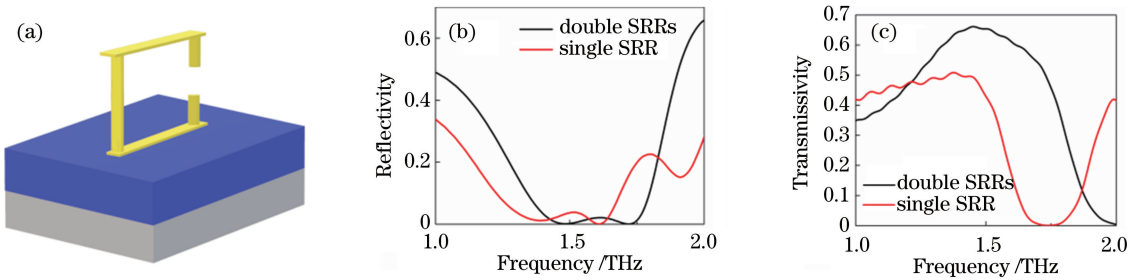


图 6 (a)单 SRR 站立结构示意图; (b)反射率; (c)透射率

Fig. 6 (a) Single SRR with stand-up structure; (b) reflectivity; (c) transmissivity

文献[26]对应用于中红外波段的超材料增透膜进行了研究, 利用十字形金与氟化镁共同构成超材料, 使得反射率最小达到 0.03。文献[15]对太赫兹增透膜进行了研究, 使得 1.2 THz 处的反射率最小达到 0.0032, 反射率在 0.1 以下的带宽为 0.25 THz。所提出的基于站立式结构的超材料增透膜的反射率最小可达 0.001, 反射率在 0.1 以下的带宽可达 0.45 THz, 并且具有一段较为平坦的反射近零区间, 具有更优的反射抑制性能。

了对比分析, 结果表明, 双 SRRs 站立结构具有更良好的增透性能。进一步研究了两个开口环之间的距离以及聚合物基底厚度对该超材料增透膜性能的影响, 并且与前人研究工作进行了对比, 结果表明, 所设计的超材料增透膜具有优异的宽带反射抑制性能和较大的制作参数容差特性。使用站立超材料结构作为太赫兹增透膜为太赫兹波段的功能器件设计提供了一种新的思路。

5 结 论

研究了以双 SRRs 站立结构作为太赫兹增透膜的反射及透射波谱, 实现了较宽带宽上的反射抑制, 反射率接近于 0, 透射率也得到了显著增大。利用多次反射干涉原理及等效参数反演原理, 分析了此结构的反射抑制机理, 并与单个 SRR 站立结构进行

参 考 文 献

[1] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716.
 [2] Shen Y C, Lo T, Taday P F, et al. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(24): 377.

- [3] Tonouchi M. Cutting-edge THz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [4] Siegel P H. Terahertz technology in biology and medicine[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2004, 52(10): 2438-2447.
- [5] Dai J M, Zhang J Q, Zhang W L, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy characterization of the far-infrared absorption and index of refraction of high-resistivity, float-zone silicon[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(7): 1379.
- [6] Brown E R, McIntosh K A, Nichols K B, *et al.* Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs [J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(3): 285-287.
- [7] 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.
- [8] Deng L Y, Teng J H, Zhang L, *et al.* Extremely high extinction ratio terahertz broadband polarizer using bilayer subwavelength metal wire-grid structure [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(1): 011101.
- [9] Ding L, Wu Q Y S, Song J F, *et al.* Perfect broadband terahertz antireflection by deep-subwavelength, thin, lamellar metallic gratings[J]. Advanced Optical Materials, 2013, 1(12): 910-914.
- [10] Kröll J, Darmo J, Unterrainer K. High-performance terahertz electro-optic detector[J]. Electronics Letters, 2004, 40(12): 763-764.
- [11] Kröll J, Darmo J, Unterrainer K. Metallic wave-impedance matching layers for broadband terahertz optical systems[J]. Optics Express, 2007, 15(11): 6552-6560.
- [12] Thoman A, Kern A, Helm H, *et al.* Nanostructured gold films as broadband terahertz antireflection coatings[J]. Physical Review B, 2008, 77(19): 998-1002.
- [13] Zhou Y, Xu X, Hu F, *et al.* Graphene as broadband terahertz antireflection coating[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(5): 051106.
- [14] 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.
- [15] Chen H T, O' Hara J F, Azad A K, *et al.* Manipulation of terahertz radiation using metamaterials[J]. Laser & Photonics Review, 2011, 5(5): 513-533.
- [16] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [17] Han H, Wu D W, Liu J J, *et al.* A terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0423003.
韩昊, 武东伟, 刘建军, 等. 一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0423003.
- [18] Liu Y Z, Zhang Y P, Cao Y Y, *et al.* Modulator of tunable modulation depth based on graphene metamaterial[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1016002.
刘元忠, 张玉萍, 曹妍妍, 等. 基于石墨烯超材料深度可调的调制器[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1016002.
- [19] Xing W, Yan F P, Tan S Y, *et al.* Simulation analysis on the designing of high-Q terahertz metamaterials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0106005.
邢维, 延凤平, 谭思宇, 等. 高品质因数太赫兹超材料设计的仿真分析[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0106005.
- [20] Fan K, Strikwerda A C, Tao H, *et al.* Stand-up magnetic metamaterials at terahertz frequencies[J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12619.
- [21] Yeh P, Yariv A, Chi-Shain H. Electromagnetic propagation in periodic media. I. General theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(4): 423-438.
- [22] 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.
- [23] Chen X, Grzegorzczuk T M, Wu B I, *et al.* Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials[J]. Physical Review E, 2004, 70(1): 016608.
- [24] Smith D R, Vier D C, Koschny Th, *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. Physical Review E, 2005, 71(3): 036617.
- [25] Szabo Z, Park G H, Hedge R, *et al.* A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers-Kronig relationship[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2010, 58(10): 2646-2653.
- [26] Zhang B, Hendrickson J, Nader N, *et al.* Metasurface optical antireflection coating[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(24): 241113.