

太赫兹功能器件表面增透膜研究进展

史佳琦[†], 曹俊诚^{*†}

中国科学院上海微系统与信息技术研究所太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050

摘要 工作于太赫兹波段的功能器件常以硅、锗等高折射率材料为界面, 这会导致界面与空气的阻抗失配, 从而引起不必要的光能损失。在界面镀制增透膜可以有效减小反射率、增加透射率, 从而大大提高器件性能, 因此增透膜的研制具有重要意义。基于上述的应用需求, 首先介绍太赫兹增透膜的研究意义, 然后着重介绍目前国内外制备太赫兹增透膜的几种常见方法, 并分析各自的优缺点, 最后对太赫兹增透膜的研究进行总结和展望。

关键词 太赫兹波段; 增透膜; 折射率; 透过率

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231565

Research Progress of Antireflection Coating for Terahertz Functional Devices

Shi Jiaqi[†], Cao Juncheng^{*†}

Key Laboratory of Terahertz Solid State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Abstract Functional devices operating in the terahertz band often use high refractive index materials such as silicon and germanium as interfaces, which can cause impedance mismatch between the interface and air, thus leading to unnecessary loss of light energy. Plating an antireflective coating at the interface can effectively reduce reflectivity and increase transmittance, thereby greatly improving the performance of the device. Therefore, the development of antireflective coating is of great significance. Considering the above requirements, the research significance of terahertz antireflective coating is first introduced, and then several common methods for preparing terahertz antireflective coating at home and abroad are presented, and the advantages and disadvantages of each are analyzed. Finally, the research on terahertz antireflective coating is summarized along with future prospects.

Key words terahertz band; antireflection coating; refractive index; transmittance

1 引言

太赫兹波处在微波与红外波段之间, 其频率范围为 0.1~10 THz。在电磁波谱上, 关于太赫兹两侧的红外和微波波段器件的研究已经相当成熟, 并且已经应用到生活的方方面面。由于缺乏合适的辐射源和探测器, 太赫兹波段器件的研究起步相对较晚。近年来, 超快光子学、半导体技术的发展有效地推动了太赫兹光源以及探测器的进步, 关于太赫兹的研究已广泛开展。目前, 太赫兹波技术已被广泛应用在生物医学、通信技术等领域。

当电磁波/光波入射到由两种光学性质不同的介质组成的界面上时, 一部分会被反射回来而一部分会穿过界面并透射出去。反射和透射与我们的日常生活都是息息相关的, 例如自然界中很多物体本身是不能发光的, 我们之所以能够看见这些物体, 是因为人眼能够感知这些物体所反射过来的可见光, 这就是利用了光的反射。但是还有很多情况, 比如对于一些复杂的光学器件(光透镜、激光器、探测器等), 通常需要界面的反射尽可能接近 0 从而使电磁波能够尽可能地透过界面。这是因为反射会引起不必要的能量损失, 导致器件性能下降。而这些器件的基底折射率往往较大

收稿日期: 2023-06-19; 修回日期: 2023-08-10; 录用日期: 2023-08-22; 网络首发日期: 2023-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61927813)

通信作者: jccao@mail.sim.ac.cn

[†]共同第一作者

(通常为硅、锗等),这就造成基底折射率与空气折射率的失配,从而导致界面处的反射较大。例如当基底为硅时,电磁波在空气和硅的交界面上的反射率可达 30% 以上,这与现实的应用需求是相悖的。因此,如何有效地减少反射增加透射是电磁波调控的一个重要课题。在器件表面镀制增透膜可以大大提高器件表面的透射率,从而提高器件的性能,因此增透膜的研制具有重要的现实意义。

目前来说,微波和红外波段的增透膜已经发展得较为成熟,而太赫兹器件的研究起步较晚,这就导致太赫兹增透膜的研究也不够完备。因此,本文主要着眼于太赫兹波段增透膜的发展现状,介绍目前国内外几种常见的太赫兹增透膜的制备方法,旨在为高性能增透膜的制备提供一些参考。

2 层状介质增透膜

传统单层增透膜是根据 1/4 波长反射相消原理来设计的^[1-3],其结构原理如图 1 所示。当波长为 λ 、振幅为 A_1 的光由光疏介质(如空气,折射率为 n_1)向光密介质入射(折射率为 n_3)时,在两层介质中引入一层折射率为 n_2 、厚度为 d 的减反膜。要使介质 2 达到减反增透的效果,须使界面 1 处的反射光 A_2 、界面 2 处的反射光 A_3 叠加后的合振幅 A 等于 0。合振幅 A 的表达式为

$$A^2 = A_2^2 + A_3^2 + 2A_2A_3 \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (2n_2d) + \delta \right], \quad (1)$$

式中: δ 为附加光程差,当 $n_1 < n_2 < n_3$ 且光线垂直入射时, δ 为 0。此时若 $A_2 = A_3$,且 $2n_2d = \lambda/2$,则 $A = 0$ 。所以光学厚度为

$$n_2d = \frac{\lambda}{4}, \quad (2)$$

即 1/4 波长。当 $A_2 = A_3$ 时,上下两个表面的反射光相等,即

$$\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 = \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right)^2, \quad (3)$$

化简式(3),有

$$n_2 = \sqrt{n_1n_3}, \quad (4)$$

式(2)、(4)两式即为单层增透膜的条件。

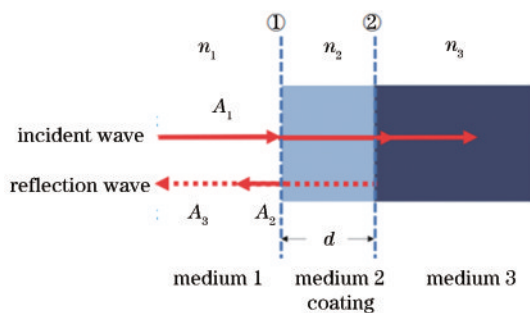


图 1 单层减反膜原理示意图

Fig. 1 The principle of single-layer antireflection film

1999 年,Englert 等^[1]利用上述原理在高阻硅 Si 表面镀制低密度聚乙烯膜(LDPE)。在 2.5 THz 处,膜的折射率大约为 1.52,厚度约为 20 μm ,镀膜后器件的最高透射率可达 90% 左右。除了 LDPE,聚对二甲苯 Parylene^[2]、新型光刻胶材料 SUEX^[3]等材料都可以被用来制作太赫兹增透膜。该方法原理简单,制备工艺也不复杂,但是由于该方法只能针对单一波长进行参数设计使其满足干涉相消的条件,因而只能获得窄带增透效果。

为了进一步提高增透波长范围,可以使用多层不同折射率以及厚度的材料堆叠,即多层增透膜^[4-8]。通过选择合适的材料参数进行优化,可以使基底在更宽的波段范围内与空气更好匹配,从而有效地增加增透带宽。2000 年,Gatesman 等^[4]分别在高阻硅上下表面涂上聚氯代对二甲苯 Parylene C 和聚二氯代对二甲苯 Parylene D 材料,材料折射率为 1.62,这 3 层结构的器件可以在 0.45~2.8 THz 范围内获得 40% 以上的透射率,并且最高透射率可以达到 90% 以上。2005 年,Hosako 等^[5]根据多层增透原理,把 Si 和 SiO₂ 两种折射率材料涂在锗基底上,最后设计的结构在 50~140 cm^{-1} 波数范围内平均透射率可达 95% 以上。多层膜的设计比单层膜要复杂得多,研究多层增透膜的方法很多,如等效法、特征矩阵法等。当膜层层数较多时,计算比较复杂,也可先用 Willey 经验公式来估算。根据上述方法制作的增透膜可以有效减少器件表面的反射,但想要找到折射率与空气和基底完全匹配的材料并不容易。此外由于太赫兹波段波长较长,镀制的膜层通常较厚,容易脱落。

除了上述绝缘材料,一些稳定性较强的金属薄膜也可用来制备增透膜,其原理都是利用阻抗匹配抑制反射波^[9-13]。改变薄膜的厚度,可以改变其阻抗,当其阻抗与空气阻抗以及基片阻抗达到一致时,可以有效抑制反射波,从而增加透射波。该方法最早在 1987 年由 Mcknight 等^[9]提出,该文献采用镍铬合金来制备增透膜。当金属薄膜厚度远小于该金属的趋肤深度时,控制金属膜的厚度可以调节其电阻,此时界面的反射率只由金属膜电阻以及基底的折射率决定,而与频率无关。因此相较于 1/4 透膜,金属薄膜可以获得宽带增透效果。

除此之外,金属铬^[10]、纳米金膜^[11]等材料也可以被用来当作增透膜。一些氧化物半导体如氧化锌^[12]、二氧化钒^[13]、氧化铟锡^[14]等材料在改变温度或者掺杂浓度时也可增强其导电性能,从而作为增透膜的材料。同样地,根据阻抗匹配原理,石墨烯材料也可用来设计增透膜^[15-17],通过增加石墨烯堆叠的层数可以改变其阻抗从而达到阻抗匹配。该方法在 2014 年由 Zhou 等^[15]提出,其结构如图 2(a)所示。由图 2(b)可知,当石墨烯的层数为 7 时可以较好地抑制反射波。此外通过掺杂 HNO₃,可以改变石墨烯的费米能级,从而改变其导电性能。从图 2(c)可以看出,掺杂 HNO₃ 后,5 层

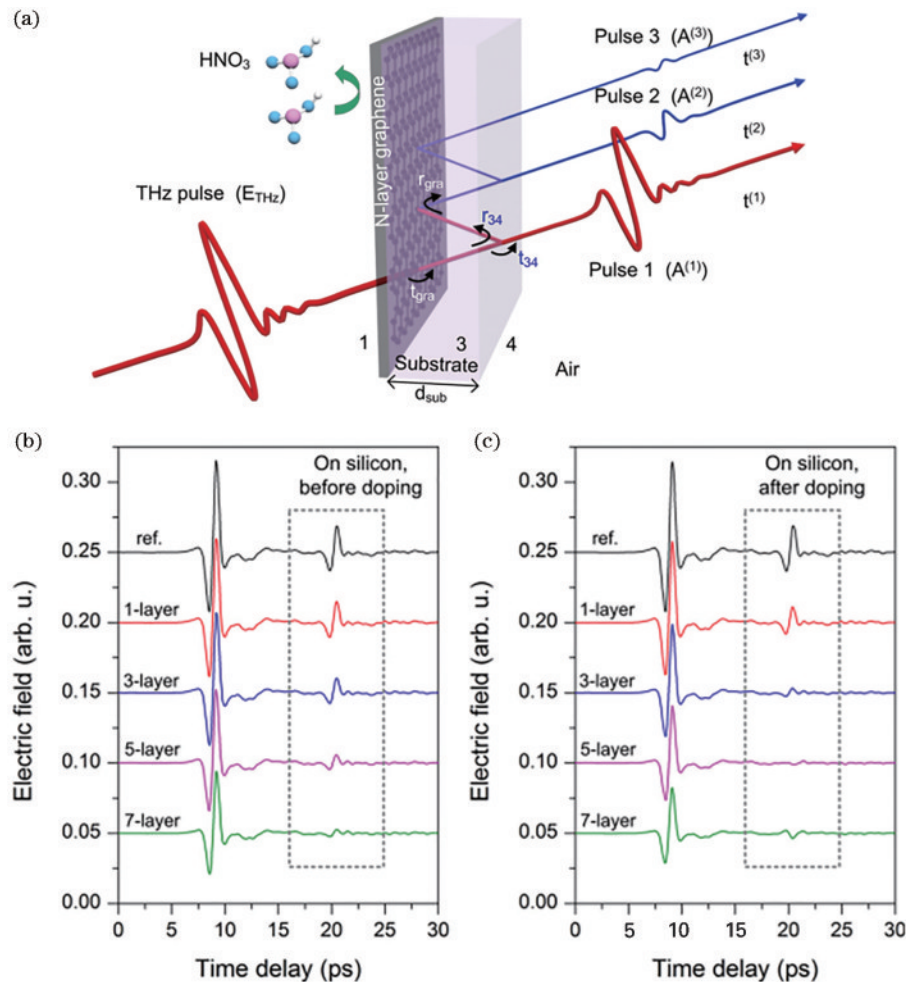


图 2 多层石墨烯结构图及 THz 波传输图^[15]。(a) 多层石墨烯结构图; (b) 未掺杂前传输 THz 波; (c) 掺杂后传输 THz 波
Fig. 2 Structure diagram of multi-layer graphene and THz wave transmission diagrams^[15]. (a) Structure diagram of multilayer graphene; (b) THz wave transmitted before undoped; (c) THz wave transmitted after doped

石墨烯就可以抑制反射波,从而减少堆叠层数。金属膜、石墨烯等材料制备的增透膜虽然具有较大的带宽,但也存在较大的损耗。当应用到太赫兹时域光谱系统中时,镀制增透膜后虽然可以将太赫兹时域波形的反射峰吸收掉,从而提高光谱分辨率,但同时主峰的峰值也会相应地降低。

3 渐变折射率介质增透膜

上述的几种方法属于层状结构,光波在传播的过程中遇到突变界面仍然会引起反射。如果光在传播过程中不再遇到突变界面,而是在一个折射率可以梯度变化的介质中传播,那么反射将会大大降低。基于这个原理,并且随着近年来光刻、腐蚀、切割工艺的发展和进步,研究者提出一些折射率可以梯度变化的宽带抗反射结构^[18-27]。该结构的发现最初来自对飞蛾眼角膜的研究。1967年,以瑞士科学家 Bernhard^[18]为首的一群人发现了一个现象,那就是一种夜行性飞蛾的眼睛格外黑,基本上看不到光的反射。于是他们将这种飞蛾的复眼放在电子显微镜下观察,发现了它不同于其他眼睛的特殊结构。飞蛾角膜外附着一层微型纳米

结构,表面遍布高度为 200 nm、间距为 300 nm 的锥形凸起,呈几近完美六边形阵列分布。这种表面微纳米结构因尺度远低于可见光波段而无法被识别,所以界面处的折射率能够随着蛾眼结构的深度方向连续且平稳地改变。这样一来,由折射率急剧变化而带来的光线反射被大大减少,飞蛾复眼也因此拥有极低的反射系数。模仿这一特性,研究者们提出亚波长增透结构。所谓亚波长是指结构的特征尺寸与光波波长大小相当或者更小。通过改变结构的周期、占空比和刻蚀深度等关键参数,可以得到特定折射率的材料,从而与空气更好匹配。

图 3 是几种典型的亚波长结构。图 3(a)是把高阻硅表面刻蚀成类似于金字塔般的结构^[19],通过调节金字塔的尺寸和周期,可在 0.2~3.15 THz 范围内实现增透,频带内的最高透射率可达 89% 以上。图 3(b)是一种倒置的三维光栅结构^[20],通过在硅的内部刻蚀几层空气柱,调整硅和空气的占比,相当于折射率逐层变化,从而实现硅和空气的匹配。层数越多达到的反射抑制效果也会越好,但同时加工的难度也会大大增大。图 3(c)是一种内嵌的针状结构^[21],利用微纳米加工技

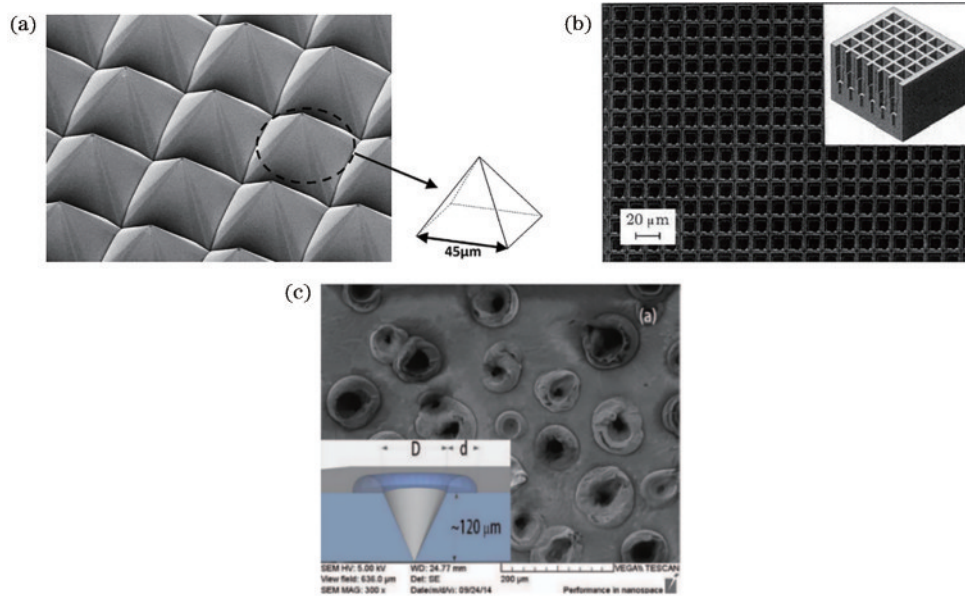


图 3 几种典型的亚波长结构。(a)表面浮雕结构^[19];(b)三维倒置光栅结构^[20];(c)针状结构^[21]

Fig. 3 Several typical sub-wavelength structures. (a) Surface relief structure^[19]; (b) inverted 3D grating structure^[20]; (c) needle-shaped structure^[21]

术,在硅的表面往下刻蚀出 120 μm 高的针状结构,在 0.1~1.5 THz 范围内,平均透射率可达 75%。此种方法虽然在材料选择上具有一定的灵活性,但是都需要微米或毫米切割技术,而且往往需要用到多层结构,加工难度较大。

4 超材料折射率可调控增透膜

除了以上几种方法,可以对电磁波进行有效调控的超材料结构也可以用来制备增透膜^[28-38]。超材料指的是由亚波长人工结构构成的材料,通过调整亚波长结构单元的几何尺寸可以任意调控磁导率和介电常数的值,而这样的效果是传统材料无法实现的。基于超材料的各种器件如天线、吸收体、滤波器相继被研发,包括超材料增透膜。当电磁波入射到超材料增

透膜表面后,将发生多次的反射和折射,最终的反射谱是所有的反射光线叠加的结果。并且最终的反射率以及波段范围是可以通过超材料的结构和尺寸精细控制的。超材料增透膜结构最初在 2010 年由 Chen 等^[28]提出。其结构示意图如图 4(a)所示,该增透膜衬底为硅,硅上面有一层聚酰亚胺,聚酰亚胺的上下层分别是金属开口谐振环和十字网格结构。理论研究表明,顶层金属开口谐振环和底层金属网格可等效为阻抗可调谐且厚度接近 0 的界面,这些等效界面对于反射波和透射波的振幅和相位具有很强的调控能力。通过优化调节开口谐振环以及金属网格的尺寸,可以有效地减小反射波。图 4(b)表明在 1.2 THz 处,该结构的反射率约为 0.32%,透射率大于 90%,但该结构带宽较低。

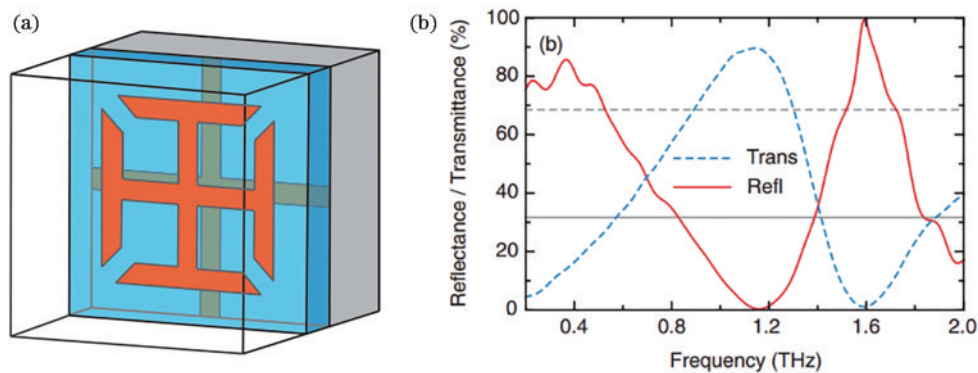


图 4 超材料增透膜^[28]。(a)超材料增透膜结构;(b)反射率与透射率

Fig. 4 Metamaterial antireflection coating^[28]. (a) The structure of metamaterial antireflection coating; (b) reflectivity and transmittance

为了提高带宽,Ding 等^[29]在 2013 年提出一种亚波长尺寸的铬光栅结构,如图 5(a)所示。通过调整光栅

的周期和填充系数,可以在 0.03~6 THz 范围内实现宽带的阻抗匹配,从而达到抗反射的效果,但是该结构只

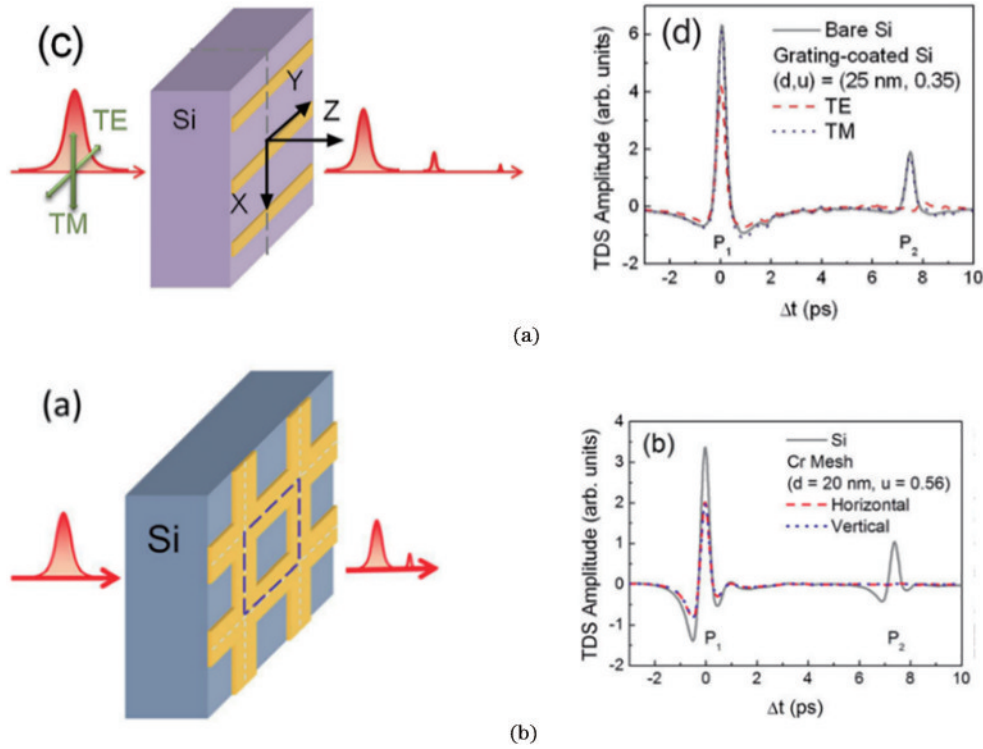


图 5 铬光栅增透膜。(a)条形结构^[29];(b)网格结构^[30]

Fig. 5 Chromium grating antireflection coating. (a) Strip structure^[29]; (b) grid structure^[30]

对 TE 模式的波产生抗反射的效果。为了同时实现 TE 和 TM 偏振模式下的抗反射,该作者进一步设计了类似于金属网格的对称结构^[30],如图 5(b)所示。为了拓展超材料的应用波段,2019 年乔楠等^[31]提出由两层金-聚酰亚胺堆叠而成的双波段增透膜,实现了在 0.471 THz 和 1.560 THz 两个频点处的超低反射,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。除了平面结构,2017 年,苏思思等^[32]设计了一种基于站立结构的超材料增透膜,开口环站立结构实现了对太赫兹波段反射的抑制,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,如图 6 所示。以上基于超材料制作的增透膜具备一定的材料和频率灵活性,且大多为平面结构,只是相较于传统增透膜,制作相对复杂。

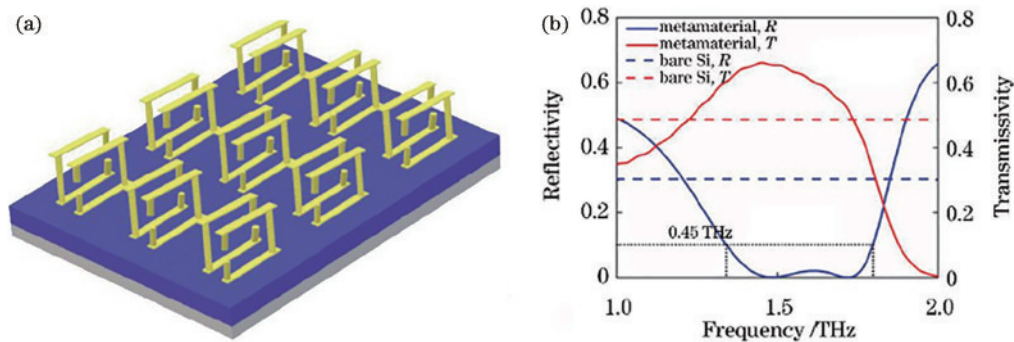


图 6 开口环站立结构增透膜^[32]

Fig. 6 Antireflection coating of open-ring standing structure^[32]

5 结 论

随着太赫兹功能器件的发展,对增透膜的需求也越来越大,因此对太赫兹增透膜的研究和改进亟待进一步开展。传统 1/4 波长增透膜虽然制备最为简单,但是存在材料较难获得以及带宽较窄的问题。后续发展的纳米金属膜、折射率渐变结构、超材料等结构虽然

在一定程度上可以增加材料选择的自由度且获得较宽的带宽,但是结构往往比较复杂,且会引入附加的损耗。因此,这几种方法各有优缺点,实际的应用过程中可按器件的需求选择合适的增透膜制备方法。宽带、多通带、低损耗、结构简单的增透膜也会成为未来的发展趋势。本文主要调研的是太赫兹波段的增透膜,但所涉及的几种制备太赫兹增透膜的原理和方法也可以

扩展到红外波段,并很好地应用到一些红外的光源以及探测器中。

参 考 文 献

- [1] Englert C R, Birk M, Maurer H. Antireflection coated, wedged, single-crystal silicon aircraft window for the far-infrared[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(4): 1997-2003.
- [2] Rungsawang R, Jukam N, Maysonave J, et al. Gain enhancement in a terahertz quantum cascade laser with parylene antireflection coatings[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(10): 456-462.
- [3] Sahin S, Nahar N K, Sertel K. Thin-film SUEX as an antireflection coating for mmW and THz applications[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(4): 417-421.
- [4] Gatesman A J, Waldman J, Ji M, et al. An anti-reflection coating for silicon optics at terahertz frequencies [J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(7): 264-266.
- [5] Hosako I. Multilayer optical thin films for use at terahertz frequencies: method of fabrication[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(18): 3769-3773.
- [6] Wang W L, Rong X H. Nanostructure multilayers as broadband antireflection coating used at terahertz frequencies region[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 110/111/112/113/114/115/116: 3777-3780.
- [7] Ahmed A, Braconnier A, Gibbs J, et al. Low-cost antireflection coatings for terahertz light employing multilayered polymer films and adhesives[C]//2021 Photonics North (PN), May 31-June 2, 2021, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2021.
- [8] Raut H K, Ganesh V A, Nair A S, et al. Anti-reflective coatings: a critical, in-depth review[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(10): 3779-3804.
- [9] Mcknight S W, Stewart K P, Drew H D, et al. Wavelength-independent anti-interference coating for the far-infrared[J]. *Infrared Physics*, 1987, 27(5): 327-333.
- [10] Kröll J, Darmo J, Unterrainer K. High-performance terahertz electro-optic detector[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(12): 763-764.
- [11] Thoman A, Kern A, Helm H, et al. Nanostructured gold films as broadband terahertz antireflection coatings [J]. *Physical Review B*, 2008, 77(19): 195405.
- [12] Ma G H, Li D, Ma H, et al. Carrier concentration dependence of terahertz transmission on conducting ZnO films[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(21): 1106-1110.
- [13] Zhu Y H, Zhao Y, Holtz M, et al. Effect of substrate orientation on terahertz optical transmission through VO₂ thin films and application to functional antireflection coatings[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(9): 2373-2381.
- [14] Kröll J, Darmo J, Unterrainer K. Metallic wave-impedance matching layers for broadband terahertz optical systems[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6552-6560.
- [15] Zhou Y X, Xu X L, Hu F R, et al. Graphene as broadband terahertz antireflection coating[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 97-105.
- [16] Zhou Y X, Yiwen E, Zhu L P, et al. Terahertz wave reflection impedance matching properties of graphene layers at oblique incidence[J]. *Carbon*, 2016, 96: 1129-1137.
- [17] Lai W E, Liu G, Gou H G, et al. Near-IR light-tunable omnidirectional broadband terahertz wave antireflection based on a PEDOT: PSS/graphene hybrid coating[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(38): 43868-43876.
- [18] Bernhard C. Structural and functional adaptation in a visual system system[J]. *Endeavour*, 1967, 26: 79-84.
- [19] 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.
- [20] 陈吴玉婷, 韩鹏昱, Kuo Mei-Ling, 等. 具有缓变折射率的太赫兹宽带增透器件[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 088401.
Chen W Y T, Han P Y, Kuo M L, et al. Terahertz broadband antireflection device with slowly changing refractive index[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 088401.
- [21] Li Y Z, Cai B, Zhu Y M. Antireflective broadband micro structure at terahertz range by a hot deformation[C]//2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), August 23-28, 2015, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [22] Clapham P B, Hutley M C. Reduction of lens reflexion by the "moth eye" principle[J]. *Nature*, 1973, 244(5414): 281-282.
- [23] 陈鹏杰. 亚波长结构宽波段抗反射工艺的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
Chen P J. Study on wide-band anti-reflection technology of sub-wavelength structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [24] 鱼卫星, 卢振武, 王鹏, 等. 锥形轮廓亚波长二维表面浮雕结构的矢量衍射特性[J]. *光子学报*, 2001, 30(3): 331-335.
Yu W X, Lu Z W, Wang P, et al. Vector diffracted characteristic of tapered profile two-dimensional subwavelength surface-relief structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(3): 331-335.
- [25] Li X, Hu X K, Li Y F, et al. A three-step procedure for the design of broadband terahertz antireflection structures based on a subwavelength pyramidal-frustum grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1463-1471.
- [26] Sun H, Liu J X, Zhou C, et al. Enhanced transmission from visible to terahertz in ZnTe crystals with scalable subwavelength structures[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(14): 16997-17005.
- [27] Tzibizov I A, Kropotov G I, Pavelyev V S, et al. 3-level broadband THz antireflective structure on silicon surface [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2276: 020037.
- [28] Chen H T, Zhou J, O' Hara J F, et al. Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism[EB/OL]. (2010-02-11)[2023-02-03]. <https://>

- arxiv.org/abs/1002.2305.
- [29] 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.
- [30] Ding L, Wu Q Y S, Teng J H. Polarization independent broadband terahertz antireflection by deep-subwavelength thin metallic mesh[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 941-945.
- [31] 乔楠, 延凤平, 王伟, 等. 基于层叠结构的双波段太赫兹超材料增透膜设计[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614031.
Qiao N, Yan F P, Wang W, et al. Dual-band terahertz metamaterial antireflection coating based on multilayered structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614031.
- [32] 苏思思, 延凤平, 谭思宇, 等. 基于站立结构的宽带太赫兹超材料增透膜设计[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0414004.
Su S S, Yan F P, Tan S Y, et al. Design of antireflection coating based on broadband terahertz metamaterial with stand-up structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0414001.
- [33] Chen H T, Huang L, Azad A, et al. Terahertz metasurfaces for antireflection coatings[C]//2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), August 23-28, 2015, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [34] Huang L, Zeng B B, Chang C C, et al. Terahertz antireflection coating enabled by a subwavelength metallic mesh capped with a thin dielectric film[J]. *Terahertz Science and Technology*, 2016, 9(1): 1-9.
- [35] Zhang J, Ade P A R, Mauskopf P, et al. New artificial dielectric metamaterial and its application as a terahertz antireflection coating[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(35): 6635-6642.
- [36] Chu H C, Zhang H Y, Zhang Y, et al. Invisible surfaces enabled by the coalescence of anti-reflection and wavefront controllability in ultrathin metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4523.
- [37] Du C, Zhou D, Guo H H, et al. An ultra-broadband terahertz metamaterial coherent absorber using multilayer electric ring resonator structures based on anti-reflection coating[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(17): 9769-9775.
- [38] Ge J H, Zhang Y Q, Dong H X, et al. Nanolayered VO₂-based switchable terahertz metasurfaces as near-perfect absorbers and antireflection coatings[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(4): 5569-5577.