光电探测与调制技术专栏

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024032701

应用于太赫兹探测器的宽带减反结构设计

孙淑菲[1,2]，靳　琳[2]，孙建东[2]，秦　华[2*]

（1. 上海科技大学 物质科学与技术学院，上海 201200；2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 中国科学院纳米器件与应用重点实验室，江苏 苏州 215123）

摘　要： 在太赫兹波段，高阻硅和蓝宝石具有低吸收率、高电阻率和低光谱色散等优良特性，常被用作器件的衬底材料。然而，它们的折射率与空气存在较大差异，导致从空气入射的太赫兹波在界面发生大量反射，从而降低了波的透过率；同时，还可能会引发法布里-珀罗谐振腔效应，进而限制太赫兹探测器的工作带宽和灵敏度。为降低界面反射，文章提出一种太赫兹波段的三层减反射结构，借助 Matlab 中传输矩阵法和电磁场仿真中有限元法进行仿真，筛选出 Mylar/Al_2O_3/AlN 的材料组合。仿真结果表明，在 340 GHz 的入射波照射下，该结构在 275～405 GHz 范围内反射率均低于－20 dB，将其应用于太赫兹探测器后，－3 dB 带宽提升至 50 GHz 以上，响应度提高了 3.2 倍。该结构制备简单、成本低廉，为太赫兹波段的宽带减反提供了一种经济且有效的解决方案。

关键词： 太赫兹波；太赫兹探测器；干涉相消；减反膜

中图分类号： TN386；O441.4　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0707－06

Broadband Anti-Reflection Structure for Terahertz Detectors

SUN Shufei[1,2], JIN Lin[2], SUN Jiandong[2], QIN Hua[2]

(1. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201200, CHN; 2. Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics (SINANO), Chinese Academy of Science, Suzhou 215123, CHN)

Abstract: In the terahertz band, high-resistivity silicon and sapphire are commonly used as substrates for terahertz devices owing to their low absorption, high resistivity, and low spectral dispersion. However, the high refractive index results in most of the incident terahertz waves being reflected at the interface, leading to a reduced wave transmittance and a potential Fabry-Perot resonant cavity effect, limiting the operating bandwidth and sensitivity of the terahertz device. To reduce the reflection of terahertz waves at the interface, this study proposes a three-layer anti-reflection structure. By using the transfer matrix method (TMM) in MATLAB and the finite-difference method in the time-domain (FDTD) in electromagnetic simulation, Mylar/Al_2O_3/AlN is selected as the anti-reflection structure in the terahertz range. The simulation results show that this structure can maintain a reflectivity ＜－20 dB in the range of 275～405 GHz. Furthermore, the terahertz detector applying this anti-reflection structure exhibits a －3 dB bandwidth enhancement of ＞50 GHz and a 3.2-fold increase in responsivity at 340 GHz. Additionally, the structure has a straightforward and cost-effective fabrication process, providing an economical and effective solution for broadband reflection reduction in the terahertz band.

Key words: terahertz waves; terahertz detectors; interference cancellation; anti-reflection coatings

收稿日期：2024－03－27.

*通信作者：秦　华

0 引言

太赫兹(Terahertz)波通常被定义为0.1～10 THz的电磁波,在电磁波谱中介于微波和远红外之间[1],具有一些独特的性质,包括非电离性、高透射性、指纹谱特性、高宽带性、高分辨率等,被广泛应用在人体安检、医学成像、无线通信等领域[2-5]。近年来,太赫兹科学技术发展迅速,应用前景广阔,但其发展仍受限于太赫兹关键器件的性能[6-8],如太赫兹探测器,它在太赫兹通信系统、太赫兹光谱应用以及成像系统中都是必不可少的核心组件。目前,太赫兹探测器仍然存在一些挑战,如工作带宽窄、灵敏度不够等。太赫兹探测器的衬底材料通常选择高阻硅和蓝宝石[9-11],因为,它们在太赫兹波段的透过率高,并且具有高电阻、低光谱色散等优良特性。然而,高阻硅和蓝宝石在太赫兹频段的折射率分别为3.42和3.06,与空气的折射率相差较大,使得太赫兹波入射时在界面存在大量反射损耗,还可能会诱发法布里-珀罗(Fabry-Perot,F-P)谐振腔效应,从而限制太赫兹探测器的工作带宽。带宽太小会影响通信系统的数据传输能力、影响成像的速度和分辨率、限制光谱分辨率以及影响雷达探测中对信号的分辨能力和探测距离等[12-13]。因此,近年来关于如何提升太赫兹器件工作带宽的研究日益增多[14-15]。

减少界面反射是提升太赫兹探测器工作带宽的重要途径之一,减反膜为常用方法。在微波、红外波段以及可见光范围,减反技术已经发展得比较成熟[16-17],其原理是借助高透过率材料和光的干涉相消来消除反射光,该理论方法也同样适用于太赫兹波段。在太赫兹波段的减反膜研究中,高分子聚合物因其低吸收率而备受关注,如聚乙烯(PE)[18-19]、聚苯乙烯(PS)[20]、聚对二甲苯(Parylene)[21]、聚四氟乙烯(PTFE)、聚甲基戊烯(TPX)等。本文采用多层介质膜组合的方式,设计了一种太赫兹波段的宽带减反射结构,该结构制备简单,减反效果优良,有效提升了太赫兹探测器的工作带宽和灵敏度。

1 减反膜的设计原理

减反膜的设计遵循干涉相消原理,如图1所示,n_0是空气的折射率,n_f是减反层的折射率,n_s是基底的折射率,界面1是减反膜的上表面,界面2是减反膜的下表面,光束1～4是均为反射光。

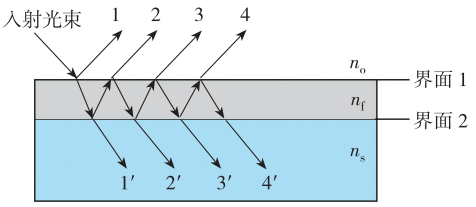


图1 薄膜的多光束干涉

光照射到薄膜上,在其上下两个表面上都会产生反射,本文以两束反射光为例介绍减反膜的工作原理。设入射光的振幅为E_0,经过上表面反射的光束1的振幅为:

$$E_1 = r_1 E_0 \tag{1}$$

经过下表面反射的光束2的振幅为:

$$E_2 = E_1 t_1 r_2 t'_1 \tag{2}$$

当光波垂直入射时,$r_1 = |n_0 - n_f| / (n_0 + n_f)$是界面1的反射系数,$r_2 = |n_f - n_s| / (n_f + n_s)$是界面2的反射系数,$s$分量的反射系数为$r_s = (n_0 - n_f)/(n_0 + n_f)$,$p$分量的反射系数$r_p = -r_s$,界面2同理。$t_1 = 2n_0/(n_0 + n_f)$是界面1由外向内的透射系数,$t'_1 = 2n_f/(n_f + n_0)$是界面1由内到外的透射系数。当光波垂直入射时$s$分量和$p$分量的透射系数相等,即$t_s = t_p = t_1$,$t'_s = t'_p = t'_1$。反射光相互叠加后的反射系数为:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{i\delta}} \tag{3}$$

式中,由光程差引起的相位差$\delta = 4\pi n_f d \cos\theta / \lambda_0$,$\lambda_0$是入射波的波长,$d$是薄膜的厚度,$\theta$是光束的入射角。反射率$R$可表示为反射系数的平方:

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos\delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos\delta} \tag{4}$$

进一步可得到反射率和折射率的关系,即:

$$R = \frac{(n_0 - n_s)^2 \cos^2\frac{\delta}{2} + \left(\frac{n_0 n_s}{n_f} - n_f\right)^2 \sin^2\frac{\delta}{2}}{(n_0 + n_s)^2 \cos^2\frac{\delta}{2} + \left(\frac{n_0 n_s}{n_f} + n_f\right)^2 \sin^2\frac{\delta}{2}} \tag{5}$$

经过薄膜上下表面的反射光若想满足完全干涉相消,首先需要满足振幅相等,因此,单层减反膜的折射率n_f需要符合

$$n_f = \sqrt{n_0 n_s} \tag{6}$$

其次,入射波除了振幅以外,还有相位。反射光的相位需要相差180°才能完全相消,因此,反射波的光程差需满足:

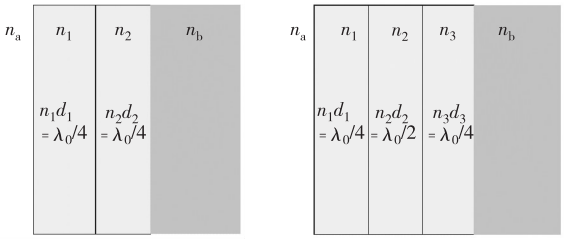
$$2dn_f=(2k+1)\frac{\lambda_0}{2} \tag{7}$$

得到单层减反膜的厚度 d 为：

$$d=(2k+1)\frac{\lambda_0}{4n_f} \tag{8}$$

式中，$2k+1$ 表示奇数。

根据式(8)可知单层减反膜的光学厚度通常是 $\lambda_0/4$，然而，单层膜通常只对特定波长的光有减反效果，其工作带宽有限。为了在更宽的光谱范围实现有效减反，通常采用多层减反膜结构，如双层膜结构($\lambda_0/4$-$\lambda_0/4$)和三层膜($\lambda_0/4$-$\lambda_0/2$-$\lambda_0/4$)，其结构如图 2 所示，其中衬底的厚度 n_b 为半无穷大。



(a) 双层减反膜　　(b) 三层减反膜

图 2　多层减反膜结构示意图

2　结构设计

在 Matlab 中借助传输矩阵法(TMM)构造减反结构的模型[22]，并利用 Multidiel 函数求解反射率。该函数非常适合求解多层结构在电磁波入射时的反射响应，可直接得到反射响应 Gamma，即式(3)中的反射系数 r，平方后得到反射率。仿真中所涉及到的材料和对应折射率如表 1 所示。

表 1　不同材料在太赫兹波段的折射率[23-24]

材料	折射率	材料	折射率
PE	1.51	甲基戊烯(TPX)	1.46
PS	1.59	Si	3.42
PP	1.51	Al_2O_3	3
聚酰亚胺(PI)	1.8	AlN	7.84
PET 聚酯薄膜(Mylar)	1.73	蓝宝石	3.06
PTFE	1.43	SiC	3.13

不同层数的减反膜具有不同的减反效果，在蓝宝石衬底上分别添加单层、双层和三层膜的反射率对比情况，如图 3 所示，纵坐标为反射率，单位是 dB。入射波频率 f_0 为 340 GHz，衬底垂直入射到减反膜。单层减反膜选择 Mylar，双层减反膜选择 Mylar/AlN，三层减反膜选择 Mylar/Al_2O_3/AlN，以−20 dB(1%)来评估减反的频率范围。结果表明，在没有减反膜的情况下，蓝宝石衬底的反射率为−5.88 dB(25.8%)；添加单层膜后，反射率在 303～375 GHz(72 GHz)的范围内小于−20 dB，在 340 GHz 降至最小值−38 dB(0.016%)，曲线非常尖锐，低反射率的效果主要集中在 f_0 附近很窄的频段内；添加双层减反膜后，反射率在 295～380 GHz(85 GHz)的范围内小于−20 dB，在 340 GHz 达到最小值−22 dB(0.63%)，虽然相比于单层膜时反射率最小值变大，但是曲线变得更加平缓，减反的带宽提升了 13 GHz；添加三层膜以后，在 300 和 390 GHz 出现了两个反射率最小值，反射率在 275～405 GHz(130 GHz)范围内均保持在−20 dB(1%)以下，实现了在更宽的频率范围内的有效减反。因此，本文选择三层减反膜结构，并通过优化三层减反膜的材料组合和探测器的整体设计，进一步扩展其工作带宽，从而在太赫兹波段实现更高效的探测。

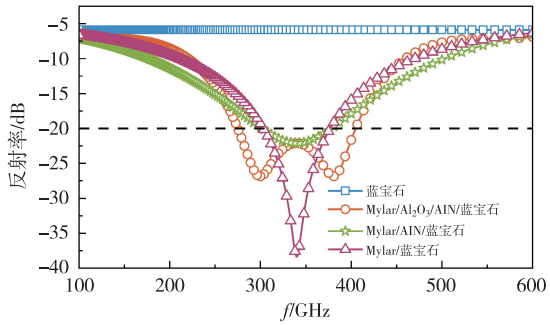


图 3　纯蓝宝石衬底层和在衬底上添加单层、双层、三层减反膜的反射率对比结果

确定使用三层结构后，继续优化材料组合，不同材料组合的反射率情况如图 4 所示。PTFE/HDPE/Al_2O_3 的反射率最低只能达到−15 dB；Mylar/TPX/AlN 的反射率在 330～347 GHz(17 GHz)可达到−20 dB 以下，最低可达到−22 dB；TPX/SiC/AlN 的反射率在 320～360 GHz(40 GHz)反射率可达到−20 dB 以下，最低可达到−21 dB；Mylar/Al_2O_3/AlN 这一组合的减反效果是最好的，在 275～405 GHz(130 GHz)范围内的反射率均保持在−20 dB

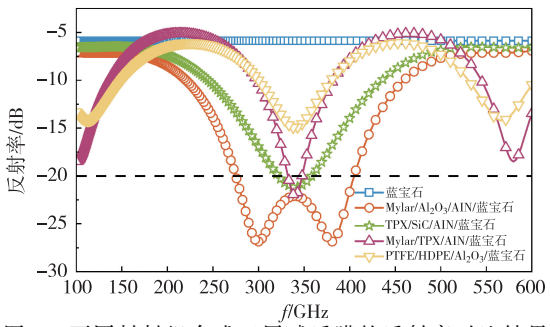
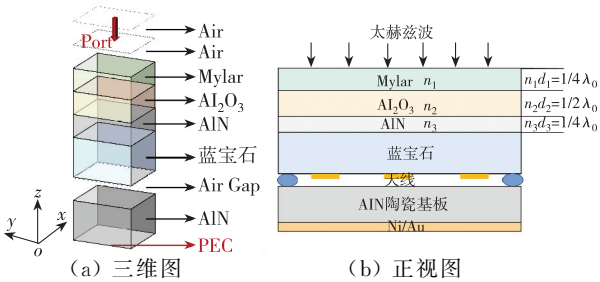


图 4　不同材料组合成三层减反膜的反射率对比结果

以下。因此，选择 Mylar/Al_2O_3/AlN 组合作为太赫兹波段的减反结构。据图 2 的指导，三层减反膜的光学厚度分别设置为 $\lambda_0/4$，$\lambda_0/2$ 和 $\lambda_0/4$，其中 λ_0 为中心频率对应的波长。

3 仿真与分析

将该结构应用到太赫兹探测器中。首先，采用有限元法(FEM)优化探测器蓝宝石衬底和氮化铝陶瓷基板的厚度，使其与三层减反结构结合后可实现对反射波的干涉相消。仿真示意图如图 5 所示，入射波的中心频率为 f_0，偏振方向沿 y 轴方向垂直入射，采用端口入射条件，入射功率为 1 mW。从上到下的结构依次是两层空气层，Mylar，Al_2O_3，AlN，蓝宝石衬底，空气间隙层，天线通过铟柱与氮化铝陶瓷基板互连。为了模拟实际封装后的金属电路，陶瓷基板的底部边界条件设为完美电导体(PEC)边界条件，其余设为散射边界条件。



(a) 三维图 (b) 正视图

图 5 仿真示意图

电磁仿真可以模拟电磁波在不同材料层中的传播和反射情况，从而评估不同厚度组合下的电场情况。为了能够快速确定蓝宝石衬底和陶瓷基板的最优厚度，在不添加天线的情况下进行仿真分析。实际探测器中天线的位置位于 $z=0$ μm 处，因此，优化的依据是使 $z=0$ μm 处达到电场峰值，这样可以使天线达到最佳的探测效率。优化后的蓝宝石衬底厚度和陶瓷基板的最佳厚度分别为 270～290 μm 和 350～370 μm。此时，$z=0$ μm 处电场可以达到峰值，如图 6 所示，纵坐标电场是模值，$E=\sqrt{E_x^2+E_y^2+E_z^2}$，其中 E_x，E_y 和 E_z 分别是 x，y，z 方向的电场分量。扫频结果如图 7 所示，w/表示有三层减反结构，w/o 表示没有三层减反结构，虚线表示−3 dB 带宽，结果表明添加三层减反结构后曲线变得更加平缓，探测器的工作带宽由 331～352 GHz (21 GHz)提升到 295～360 GHz(65 GHz)。

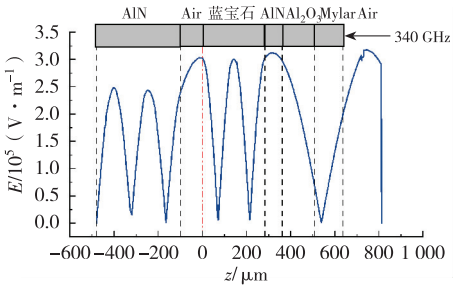


图 6 340 GHz 入射时各个位置的电场模值

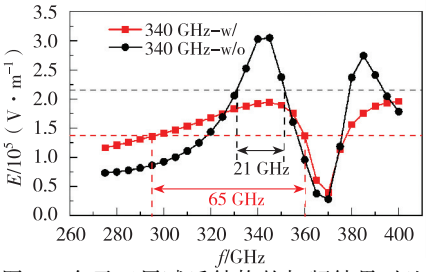
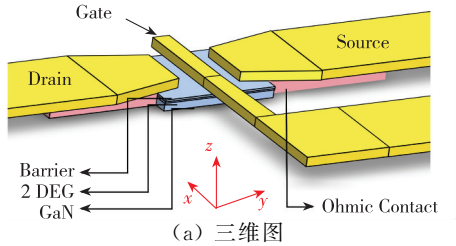
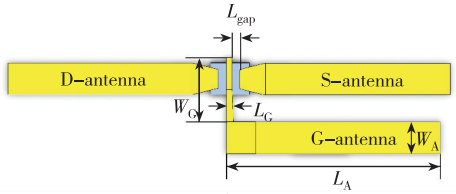


图 7 有无三层减反结构的扫频结果对比

对蓝宝石衬底和陶瓷基板厚度优化完成后，在衬底下方添加天线结构进行完整的探测器仿真，天线的结构参数如图 8 所示。天线由三瓣偶极子天线组成，分别为栅极、源极和漏极，与栅极相连的天线为 G-antenna，与源极和漏极相连的天线分别为 S-antenna 和 D-antenna。栅极下方蓝色区域依次为势垒层、二维电子气沟道层和缓冲层，粉色区域表示欧姆接触。天线的设计频率为 f_0，栅极长度 L_G 为 0.6 μm，栅极宽度 W_G 为 20 μm，每一瓣天线的长 L_A 为 113 μm，宽度 W_A 为 16 μm，源端和漏端到栅极边缘的距离 L_{gap} 为 1.25 μm，势垒层的厚度为 25 nm，二维电子气在栅极下方 25 nm 处左右，厚度约为 10 nm，欧姆接触的厚度为 250 nm。当太赫兹波的偏振方向和天线的极化方向相同时，探测器的响应最强，该天线的极化方向沿 y 轴。



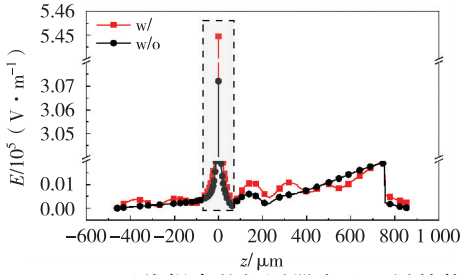
(a) 三维图



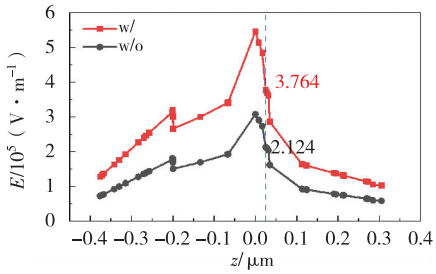
(b) 俯视图

图 8 探测器中天线结构示意图

在天线和三层减反结构的共同作用下，探测器栅极下方二维电子气所在位置（$z=0.025\ \mu m$）的电场强度由 2.12×10^5 V/m 增强为 3.76×10^5 V/m，提高了 1.77 倍，如图 9 所示。电场直接关系到探测器对太赫兹波的响应能力，因此，电场增强对于提高探测器的灵敏度至关重要。探测器的频谱特性曲线如图 10 所示，红色和黑色的虚线分别为对应的 −3 dB 带宽，结果表明添加三层减反结构后，曲线变得平缓，探测器的工作带宽提升至 50 GHz 以上。



(a) 基于 340 GHz 天线耦合的探测器有无三层结构时电场大小对比结果



(b) 栅下 25 nm 二维电子气附近细节图

图 9　在天线和三层减反结构的共同作用下，探测器栅极下方二维电子气所在位置（$z=0.025\ \mu m$）的电场强度

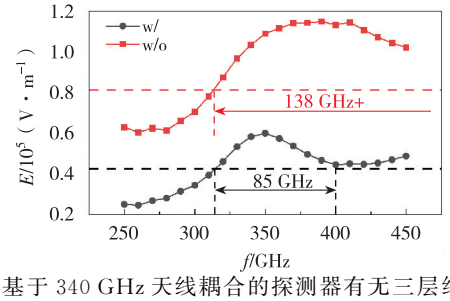


图 10　基于 340 GHz 天线耦合的探测器有无三层结构的扫频结果对比

响应度是评价探测器性能好坏的重要指标之一，探测器的响应度可以表示为[25]：

$$R_i=\frac{\mu eW}{2LP_0}\int_0^L\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}V_{\mathrm{geff}}}E_yV_z\cos\phi\,\mathrm{d}x \tag{9}$$

式中，μ 是迁移率，W 是栅宽，L 是栅长，P_0 是入射功率，n 是电子气浓度，V_{geff} 是有效栅压，$\mathrm{d}n/\mathrm{d}V_{\mathrm{geff}}$ 与晶体管结构有关，E_y 和 V_z 是水平方向的电场和垂直方向的电势，ϕ 是二者的相位差，定义 $E_yV_z\cos\phi$ 为混频因子。图 11 为取栅下 25 nm 平面的混频因子分布图，结果表明添加三层减反结构后，栅极边缘（$y=-0.3\ \mu m$）的混频因子提升了近 3.2 倍，响应度与其成正比，因此响应度也提升了近 3.2 倍。

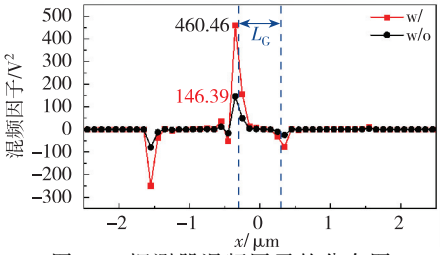


图 11　探测器混频因子的分布图

4　结论

针对太赫兹探测器反射损耗大的问题，本文提出了一种可应用在太赫兹波段的宽带减反结构 Mylar/Al_2O_3/AlN。在 340 GHz 的入射波照射下，该结构有效抑制了衬底的 F-P 谐振腔效应，反射率在 275～405 GHz 范围内均低于 −20 dB。应用在太赫兹探测器后，−3 dB 带宽提升至 50 GHz 以上，响应度提高了 3.2 倍。这种三层减反结构有效提升了太赫兹探测器的工作带宽和灵敏度，且制备简单、成本低廉，可应用在倒装互联的太赫兹探测器芯片上，对依赖于太赫兹宽频带的应用领域具有重要意义。

参考文献：

[1] Nagatsuma T. Terahertz technologies: Present and future[J]. IEICE Electron. Express, 2011, 8(14): 1127-1142.

[2] El-Shenawee M, Vohra N, Bowman T, et al. Cancer detection in excised breast tumors using terahertz imaging and spectroscopy[J]. Biomed. Spectrosc. Imaging, 2019, 8(1/2): 1-9.

[3] Federici J, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. Semicond. Sci. Technol., 2005, 20(7): S266-S280.

[4] Hwu R J, Baker C, Woolard D L, et al. People screening using terahertz technology (Invited Paper)[J]. Proc. of SPIE, 2005, 5790: 1-10.

[5] Wang C-X, Wang J, Hu S, et al. Key Technologies in 6G terahertz wireless communication systems a survey[J]. IEEE Veh. Technol. Mag., 2021, 16(4): 27-37.

[6] 胡小燕. 从光子学角度看太赫兹技术的现状和发展趋势[J]. 激光与红外, 2015, 45(7): 740-748.
Hu Xiaoyan. Research progress and trends of terahertz technology from the view of photonics[J]. Laser & Infrared,

2015, 45(7): 740-748.

[7] 杜艳丽, 刘晓旻, 段智勇, 等. 太赫兹波探测器的研究进展[J]. 半导体光电, 2009, 30(4): 481-491.
Du Yanli, Liu Xiaomin, Duan Zhiyong, et al. Research progress on terahertz detectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(4): 481-491.

[8] Stillman W, Shur M. Closing the gap: Plasma wave electronic terahertz detectors [J]. J. Nanoelectron. Optoelectron., 2007, 2(3): 209-221.

[9] Grischkowsky D, Keiding S, van Exter M, et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. J. Opt. Society of America B, 1990, 7(10): 2006-2015.

[10] 秦 华, 黄永丹, 孙建东, 等. 二维电子气等离激元太赫兹波器件[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 51-67.
Qin Hua, Huang Yongdan, Sun Jiandong, et al. Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas [J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 51-67.

[11] Sun J, Zhang Z, Li X, et al. Two-terminal terahertz detectors based on AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors[J]. Appl. Phys. Lett., 2019, 115(11): 111101.

[12] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications concepts and perspectives [J]. IEEE Antennas Propag. Mag., 2007, 49(6): 24-39.

[13] Damyanov D, Batra A, Friederich B, et al. High-resolution long-range THz imaging for tunable continuous-wave systems [J]. IEEE Access, 2020(8): 151997-152007.

[14] 张 君, 徐公杰, 蔡 斌. 宽频太赫兹减反增透器件研究进展[J]. 光学仪器, 2016, 38(6): 549-554.
Zhang Jun, Xu Gongjie, Cai Bin. A research review of the terahertz broadband anti-reflection photonic device[J]. Optical Instruments, 2016, 38(6): 549-554.

[15] Kohlhaas R B, Breuer S, Mutschall S, et al. Ultrabroadband terahertz time-domain spectroscopy using Ⅲ-Ⅴ photoconductive membranes on silicon[J]. Opt. Express, 2022, 30(13): 23896-23908.

[16] Guo S, Yang L, Dai B, et al. Past achievements and future challenges in the development of infrared antireflective and protective coatings[J]. Phys. Status Solidi A, 2020, 217(16): 2000149.

[17] Bushunov A A, Tarabrin M K, Lazarev V A. Review of surface modification technologies for mid-infrared antireflection microstructures fabrication[J]. Laser Photonics Rev., 2021, 15(5): 2000202.

[18] Christoph R, Englert M B, Hansjorg M. Antireflection coated, wedged, single-crystal silicon aircraft window for the far infrared[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1999, 37(4): 1997-2003.

[19] Shevchik-Shekera A V, Sizov F F, Golenkov O G, et al. Silicon lenses with HDPE anti-reflection coatings for low THz frequency range[J]. Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron., 2023, 26(1): 59-67.

[20] Li Y, Cai B, Zhu Y. Fabrication of anti-reflective micro-structure at terahertz frequency by using Chinese acupuncture needles[J]. Opt. Lett., 2015, 40(12): 2917-2920.

[21] 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 Lett., 2000, 10(7): 264-266.

[22] 马海霞, 武艳军, 王吉明, 等. 基于传输矩阵法的多层介质膜反射特性研究[J]. 大学物理, 2020, 39(8): 25-30.
Ma Haixia, Wu Yanjun, Wang Jiming, et al. Reflection characteristics of multilayer dielectric film based on transfer matrix method[J]. College Physics, 2020, 39(8): 25-30.

[23] 韩建龙, 邱桂花, 张瑞蓉. 材料在太赫兹波段吸收性能的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(2): 130-133.
Han Jianlong, Qiu Guihua, Zhang Ruirong. Research status of material's absorption characteristics in terahertz wave band[J]. Ordnance Material Sci. and Engineering, 2013, 36(2): 130-133.

[24] 王 鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1185-1188.
Wang He, Zhao Guozhong. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(7): 1185-1188.

[25] Tian Z F, Xu P, Yu Y, et al. Responsivity and noise characteristics of AlGaN/GaN-HEMT terahertz detectors at elevated temperatures[J]. Chin. Phys. B, 2019, 28(5): 058501.

作者简介:

秦 华(1972—),男,江苏省人,博士,研究员,主要从事太赫兹器件及其系统应用的研究工作;

孙淑菲(1999—),女,河北省人,硕士研究生,研究方向为太赫兹偏振探测器。