

# 基于近零折射率角度选择结构的 可变量程折射率传感的理论研究

武永

(南京工业职业技术大学航空工程学院, 江苏南京 210023)

**摘要:** 本文研究了InSb材料的近零折射率特性在实现角度选择窗口方面的潜力。角度选择结构由主结构和抗反射结构组成,其中主结构用于产生角度选择特性,而抗反射结构用于抑制电磁波泄漏。结果表明,对于太赫兹TE波入射,在2.65 THz附近产生显著的角度选择窗口,而对于太赫兹TM波入射,在10.5 THz附近产生角度选择窗口。对于不同的极化形式,控制温度都能够显著地调节角度窗口的角度范围。此外,临界角特性对于背景介质的折射率变化非常敏感,可以通过调控温度实现拓展测量范围的目的。当温度分别为300 K、298 K、296 K时,测量范围分别为1.1~1.3 RIU、1.3~1.5 RIU、1.5~1.7 RIU。相比于恒温测量,折射率量程拓展了200%。所提出的结构采用了新颖的临界角原理用于折射率传感,并且通过温控的方式拓宽了检测范围,为可变量程折射率传感器的发展提供了新的思路。

**关键词:** 近零折射率;角度选择结构;温控;太赫兹;可变量程;折射率传感器

中图分类号: TN715

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)01-0105-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240218

## Theoretical Study of Variable Range Refractive Index Sensing Based on Near-Zero Refractive Index Angle Selection Structure

WU Yong

(School of Aeronautic Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** In this paper, the phenomenon of angle selection of InSb materials with near-zero refractive index is studied. The multilayer structure is composed of the main structure and anti-reflection structure. The main structure is used to generate the angle selection phenomenon, while the anti-reflection structure is used to suppress the leakage of electromagnetic wave. The results show that for the THz TE wave, a significant angle selection window is generated near 2.65 THz, while for the THz TM wave, the window is generated near 10.5 THz. For different polarization forms, temperature control can significantly adjust the angle range of the angle window. In addition, the critical angle characteristic is very sensitive to the refractive index change of the background medium, and the measurement range can be extended by temperature control. When the temperature is 300 K, 298 K, 296 K, respectively, the measurement range is 1.1~1.3 RIU, 1.3~1.5 RIU, 1.5~1.7 RIU. Compared with the constant temperature measurement, the refractive index measurement range is expanded by 200%. This structure uses a novel critical angle principle for refractive index sensing, and extends the detection range through temperature control, which provides a new idea for the development of optical sensors.

**Key words:** near-zero refractive index; angle selection structure; temperature control; THz; variable measurement range; refractive index sensor

### 1 引言

在电磁学和光学的研究中,角度系统的能量传输问题一直是一项重要的基础技术<sup>[1,2]</sup>,也是一个科学难题。频率、偏振和传播方向是平面波的基本特性。频率系统和偏振系统的研究已经相当普遍,技术也日趋成

熟,但角度系统的研究相对缓慢。角度选择系统是指系统允许特定角度的能量通过,而其他角度的能量则被完全反射。基于这些特性,角度选择结构在角度滤波<sup>[3]</sup>、雷达抗干扰<sup>[4]</sup>、太阳能采集<sup>[5]</sup>、隐私保护<sup>[6]</sup>、光学成像<sup>[7]</sup>等领域具有很大的应用潜力。前人已经提出了一些技术手段用于探索选角度系统的基本特性,如

Fabry-Perot腔<sup>[8]</sup>, Brewster角<sup>[9]</sup>, 各向异性超材料<sup>[10]</sup>和光子禁带<sup>[11,12]</sup>. Fabry-Perot技术通常只适用于激发极小的角度窗口. Brewster角原理和各向异性材料能够在一定程度上扩大角度窗口,但它们往往过度依赖极化特征. 光子禁带结构能够产生大角度的窗口,并且克服了偏振灵敏度的缺陷,但角度窗口缺乏可调谐性,并且透射率有待提高. 因此,设计结构简单,角度范围可调的角度系统仍然是一项挑战.

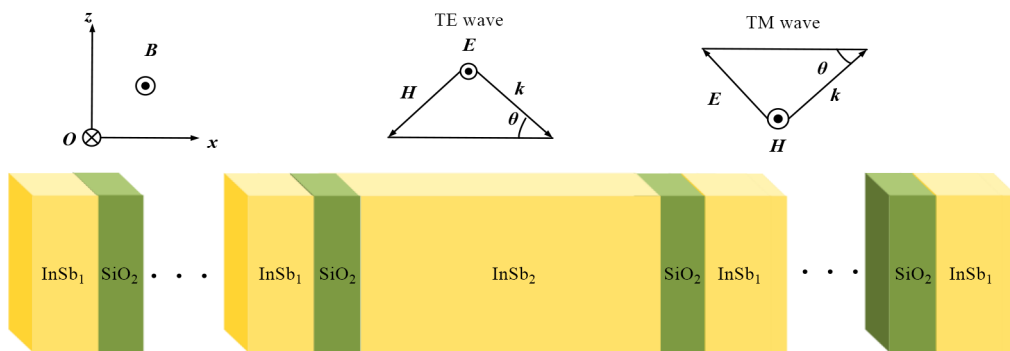
得益于结构简单,易于制造等优点,基于多层结构的传感器研究一直是研究人员关注的问题<sup>[13-15]</sup>. 常见的传感器机制<sup>[16-18]</sup>包括光学塔姆态,缺陷模原理,光子自旋霍尔效应,光学拓扑态,准束缚态等. 并且,基于多层结构的传感器通常具备高灵敏度,大测量范围,强分辨率等独特的优势,因此在物质鉴别、生物检测、工业制造、环境监测等领域都能够发挥积极的作用<sup>[19,20]</sup>. 然而,由于复杂多变的外部环境以及工艺制造的迅速发展,人们对光学传感器提出了新的要求,逐渐衍生出了传感器的几个新的发展趋势,例如多变量检测、可穿戴特性、多场景应用、新机制探索以及性能指标优化等.

本文首先利用InSb材料的近零折射率特性以及抗

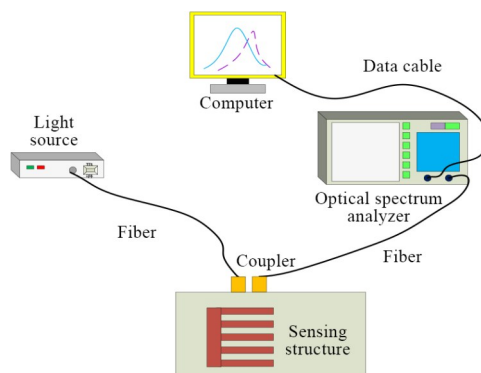
反射结构研究了分别适用于太赫兹TE波和太赫兹TM波的角度选择结构,并且探讨了它们的温控特性以及频率特性. 由于InSb材料是一种各向异性介质,因此在不同的极化形式下,介电函数具有不同的表征方式,这导致了角度窗口出现在不同的频率范围. 其次,太赫兹TE波所激励的角度窗口的临界边缘对于背景介质的折射率变化十分敏感,这为折射率检测提供了新的机制可能. 并且,在温度的调控下,该临界角边缘在不同的折射率范围内能够满足测量需求,从而实现了拓展量程的目的.

## 2 理论模型和数值方法

图1(a)展示了所提出的近零折射率角度选择结构模型图. 整体结构的拓扑排列形式为 $(\text{InSb}_1\text{SiO}_2)^{N_1}\text{InSb}_2(\text{SiO}_2\text{InSb}_1)^{N_2}$ ,其中,InSb<sub>2</sub>层为主体结构,利用介质的近零折射率特性激发角度选择窗口,而 $(\text{InSb}_1\text{SiO}_2)^{N_1}$ 和 $(\text{SiO}_2\text{InSb}_1)^{N_2}$ 为主体结构两侧的抗反射结构,用于抑制角度窗口内的电磁波外泄. SiO<sub>2</sub>层的折射率为1.48,InSb<sub>1</sub>层和InSb<sub>2</sub>层均为InSb介质,只是介质厚度不同. InSb的介电函数可用张量表示为<sup>[21,22]</sup>



(a) 所提出的近零折射率角度选择结构



(b) 传感系统的应用原理图

图1 所提出的近零折射率角度选择结构和传感系统的应用原理图

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & -\varepsilon_{yz} \\ 0 & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

张量的三个不同元素可以被写为

$$\varepsilon_x = \varepsilon_\infty - \varepsilon_\infty \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_\infty - \varepsilon_\infty \frac{\omega_p^2(\omega + j\gamma)}{\omega[(\omega + j\gamma)^2 - \omega_c^2]} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{yz} = \varepsilon_\infty \frac{j\omega_p^2\omega_c}{\omega[(\omega + j\gamma) - \omega_c^2]} \quad (4)$$

其中,  $\omega_p = (\varepsilon^2 N / \varepsilon_0 / m^*)^{1/2}$  是等离子体频率;  $\varepsilon_0$  是真空介电常数;  $e$  是电子电荷量;  $m$  是电子质量, 并且  $m^* = 0.015m$ ;  $\omega = 2\pi f$  为角频率;  $f$  为频率;  $\gamma = 0.000\ 01\omega_p$  是等离子体碰撞频率;  $\omega_c = eB/m^*$  是回旋频率; 磁场  $B = 0.01\ \text{T}$ ;  $N$  是本征载流子密度可以被写成:

$$N = 5.76 \times 10^{20} T_0^{1.5} e^{-0.26/(2 \times 8.625 \times 10^{-5} \times T_0)} \quad (5)$$

其中,  $T_0$  表示温度并且初始取值为 300 K.

对于 TE 波而言, 等效介电常数  $\varepsilon_{\text{TE}}$  与  $x$  方向分量相同, 即

$$\varepsilon_{\text{TE}} = \varepsilon_x = \varepsilon_\infty - \varepsilon_\infty \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)} \quad (6)$$

而对于 TM 波而言, 等效介电常数  $\varepsilon_{\text{TM}}$  可以表示为

$$\varepsilon_{\text{TM}} = \frac{\varepsilon_y^2 - \varepsilon_{yz}^2}{\varepsilon_y} \quad (7)$$

利用传输矩阵法计算了层间的能量转移. 由于 InSb 材料是一种各向异性介质, 与普通介质相比, 需要使用被改进的传输矩阵. 在太赫兹 TE 波的情况下, InSb 介质的传输矩阵与普通介质相同:

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} \cos(\mathbf{k}_{ix} d_i) & -\frac{j}{\eta_i} \sin(\mathbf{k}_{ix} d_i) \\ -j\eta_i \sin(\mathbf{k}_{ix} d_i) & \cos(\mathbf{k}_{ix} d_i) \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{k}_{ix} = n_i \omega / c / \cos\theta_i$  代表  $x$  方向的波矢,  $\eta_i = (\varepsilon_i / \mu_0)^{1/2} n_i \cos\theta_i$  表示导纳. 对于太赫兹 TM 波, 传输矩阵为

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} \cos(\mathbf{k}_{iz} d_i) + \frac{\mathbf{k}_{ix} \varepsilon_{yz}}{\mathbf{k}_{iz} \varepsilon_y} \sin(\mathbf{k}_{iz} d_i) & -\frac{j}{\eta_i} \left[ 1 + \left( \frac{\mathbf{k}_{ix} \varepsilon_{yz}}{\mathbf{k}_{iz} \varepsilon_y} \right)^2 \right] \sin(\mathbf{k}_{iz} d_i) \\ -j\eta_i \sin(\mathbf{k}_{iz} d_i) & \cos(\mathbf{k}_{iz} d_i) - \frac{\mathbf{k}_{ix} \varepsilon_{yz}}{\mathbf{k}_{iz} \varepsilon_y} \sin(\mathbf{k}_{iz} d_i) \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中,  $\eta_i = (\varepsilon_i / \mu_0)^{1/2} n_i / \cos\theta_i$ ,  $\mathbf{k}_{ix} = k_i \sin\theta_i$ ,  $\mathbf{k}_{iz} = k_i \cos\theta_i$ ,  $k_i = n_i \omega / c$ .

反射系数  $r$  和透射系数  $t$  可以被描述为以下形式<sup>[19]</sup>:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 - (M_{21} + M_{22} p_0)}{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 + (M_{21} + M_{22} p_0)} \quad (10)$$

$$t = \frac{2p_0}{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 + (M_{21} + M_{22} p_0)} \quad (11)$$

反射率  $R$  和透射率  $T$  可以被表示为<sup>[19]</sup>

$$R = |r|^2 \quad (12)$$

$$T = |t|^2 \quad (13)$$

图 1(b) 展示了传感系统的应用原理图. 传感系统主要由光源、样品结构、光谱分析仪和计算机组成. 光源与样品结构之间、样品结构与光谱分析仪之间采用光纤连接. 光谱分析仪通过数据线与计算机相连. 具体传输过程如下: 信号从光源输出, 通过光纤传输, 耦合到样品结构中. 经过分析物的电磁响应, 信号通过光纤输入到光谱分析仪. 此时, 在与频谱分析仪相连的计算机上就可以得到相应的频谱. 根据频谱的位置, 就能判断出背景介质折射率.

### 3 理论结果与讨论

在图 2(a) 中, 对于太赫兹 TE 波入射, InSb<sub>1</sub> 和 InSb<sub>2</sub> 层的厚度分别为 6  $\mu\text{m}$  和 300  $\mu\text{m}$ .  $N_1=10, N_2=8$ . 当入射频率从 2 THz 增加到 15 THz, InSb 的介电函数从负数变化为正数, 并且在 2.59 THz 处为 0, 这也意味着在 2.59 THz 之前, InSb 介质的折射率实部为 0, 而在 2.59 THz 之后, 折射率实部大于 0. 在图 2(b) 中, 对于单独的 InSb<sub>2</sub> 层, 当入射角为 0° 时, 电磁波能量在 2.59 THz 附近产生跳变, 从高反射状态跳变为高透射状态, 这与材料本身的介电函数分布一致. 当入射角增大到 70° 时, 跳变角朝着高频方向移动, 并且对于 2.65 THz 来说, 入射角的增加促使电磁波能量从高透射状态跳跃到高反射的状态, 从而在角度域产生特定的角度窗口.

根据图 2 的分析, 将研究从频域转移到角度域. 为了提高透射率, 在主结构 InSb<sub>2</sub> 层的两侧添加了抗反射结构. 在图 3(a) 中, 当入射频率为 2.65 THz 时, 太赫兹 TE 波激励了一个透射范围为 0°~52.6° 的角度窗口, 并且窗口内的透射率均高于 0.9, 而窗口外的区域均为高反射状态. 由于 InSb 的本征载流子密度受温度影响, 因此温度变化会对角度窗口产生调控作用. 在图 3(b) 中, 随着温度的升高, 角度范围整体呈现出缩减的趋势, 并且最终趋向于 0°. 这种缩减的趋势在 299 K 至 302 K 之间变化得最为明显, 这主要是由于在太赫兹频段, InSb 材料受温度的影响十分明显, 仅仅在 3 K 的变化范围内, 折射率经历了从 0.990 1+0.000 3i 变化到 0.003 5+0.087 9i 的巨大差异, 因此角度范围也经历了从 76° 到 0° 的迅速衰减. 在图 3(c) 中, 分析了角度窗口的频率特性. 在常温下, 角度窗口在 2.596 THz 处开始出现, 并且随着频率的升高, 角度范围迅速扩展, 最终在 2.682 THz 处达到峰值 79.5°. 随着频率继续升高, 角

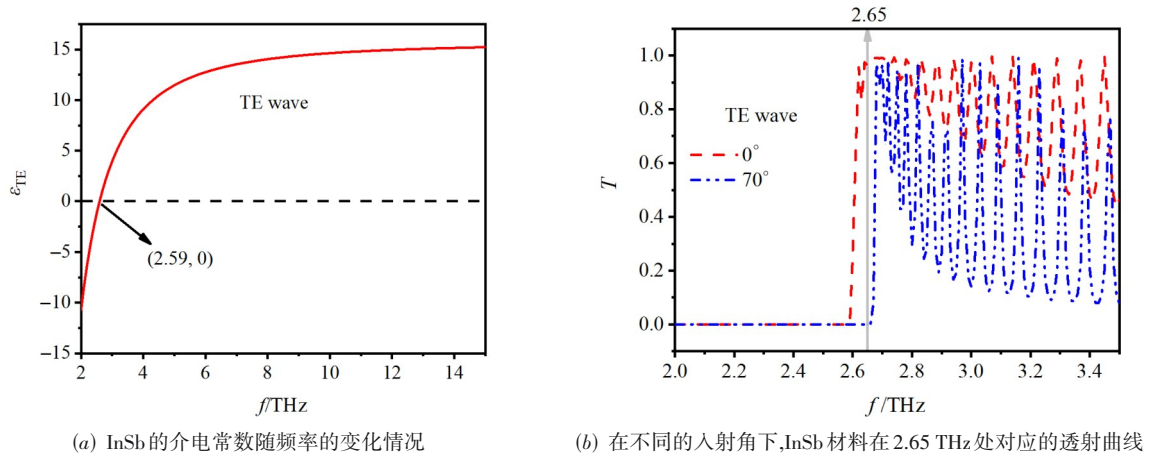


图2 对于TE波入射下InSb的介电常数随频率变化情况以及不同入射角下InSb材料在2.65 THz处对应的透射曲线

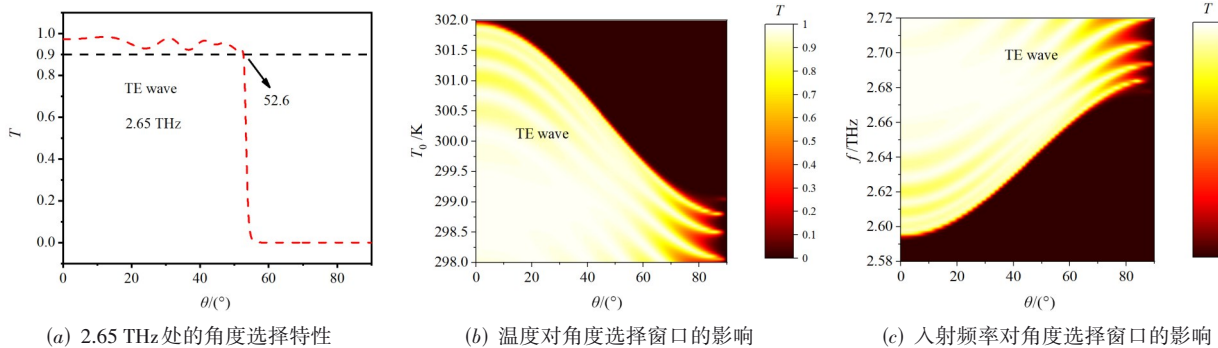


图3 对于TE波入射下2.65 THz处的角度选择性以及湿度、入射频率对角度选择窗口的影响

度窗口将会进入一个稳定的状态,角度范围不会发生明显的变化.

由于InSb材料是一种各向异性介质,因此在不同的极化形式下,介电常数表现出不同的形式,所对应的电磁波传播特性也不相同.在图4(a)中,对于太赫兹TM波而言,InSb<sub>1</sub>和InSb<sub>2</sub>层的厚度分别为5.5 μm和100 μm,  $N_1=4$ ,  $N_2=3$ .介电常数在10.27 THz处为0,因此,在2~10.27 THz的范围内,折射率实部为0,仅存在较大的虚部,电磁波难以在单层的InSb<sub>2</sub>层中传播,而在10.27~15 THz的范围内,折射率实部大于0,虚部极小,因此电磁波能量能够穿透.相对应地,在图4(b)中,当入射角为0°时,幅值曲线在10.27 THz附近发生跳跃现象.随着频率的增加,幅值由高反射转化为高透射.而当入射角增加到70°时,跳跃频点已经蓝移到10.6 THz附近,因此,对于10.5 THz来说,随着入射角的增加,电磁波能量经历了从高透射向高反射状态的改变.与太赫兹TE波类似,如果将研究从频域转移到角度域,那么特定的角度窗口也会被太赫兹TM波激发.

在图5(a)中,当入射频率为10.5 THz时,太赫兹TM波入射能够产生透射范围为0°~54.6°的角度窗口,

在角度选择区域,整体的透射率均高于0.9,而在角度选择区域之外,透射率远低于0.1,并且接近于0.温度的变化同样对角度窗口产生影响.在图5(b)中,随着温度的升高,角度范围呈现出缩减的趋势,并且最终趋向于0°.这种缩减的趋势在299.1 K至301.9 K之间变化得最为明显.数值计算结果表明,在2.8 K的变化幅度内,折射率从 $0.9827+0.0001i$ 剧烈变化到 $0.1687+0.0006i$ ,因此角度范围也经历了从76.7°到0°的迅速衰减.这种现象同样是由InSb介质的载流子密度受温度影响导致的.图5(c)展示了角度窗口的频率依赖特性.对于太赫兹TM波而言,角度窗口在10.288 THz处形成,并且随着频率的升高,角度范围迅速扩展,最终在10.62 THz处达到峰值83.6°.随着频率继续升高,角度窗口将会进入一个稳定的状态,角度范围不会产生显著的移动.

上述结果基于传输矩阵法在MATLAB中编程获得,为了验证结果的准确性,本文在商用仿真软件CST中进行建模复算结果.正如图6所示,不论对于TE波还是TM波,所有的结果均与MATLAB计算一致.

通过分析可知,整体结构的工作性能与背景介质

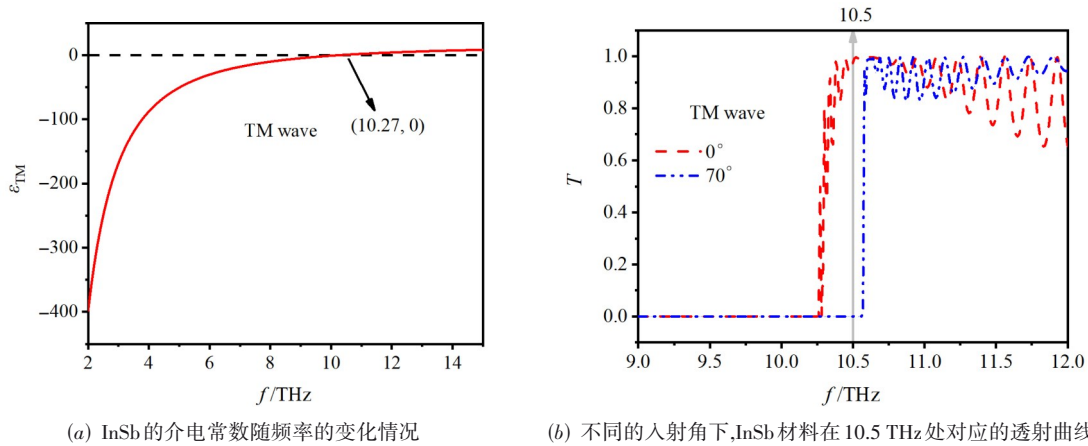


图4 对于TM波入射下InSb的介电常数随频率变化情况以及不同入射角下InSb材料在10.5 THz处对应的透射曲线

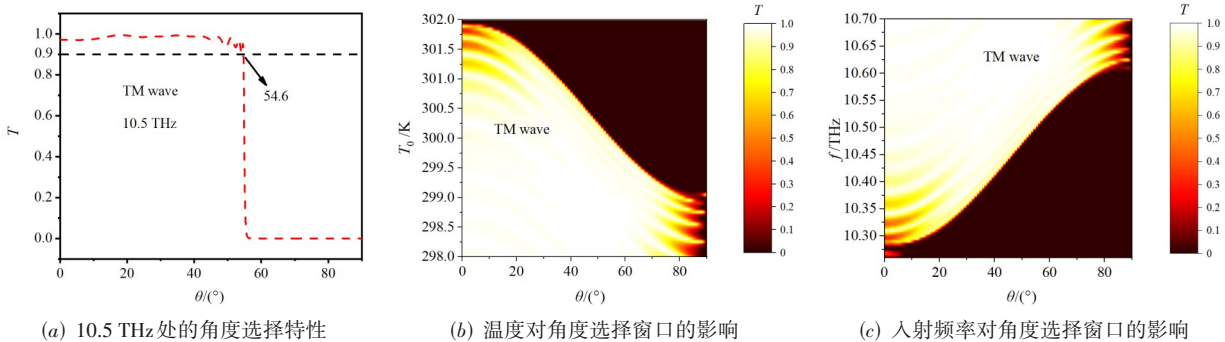


图5 对于TM波入射下10.5 THz处的角度选择性以及温度、入射频率对角度选择窗口的影响

的折射率分布密切相关. 当背景介质发生变化时,角度窗口的临界角边缘的位置也会发生相应的偏移,这为新型的折射率传感器提供了新的设计思路. 为了统一测量,透射率为0.9的频点被作为参考标准. 在图7(a)中,当温度为300 K时,在折射率为1.1~1.3 RIU的范围内满足测量要求. 当 $n$ 分别为1.1、1.15、1.2、1.25、1.3时,临界角位置为 $53.18^\circ$ 、 $49.93^\circ$ 、 $47.14^\circ$ 、 $44.71^\circ$ 、 $42.54^\circ$ . 将折射率和临界角位置进行拟合后可得 $\theta=60.301n^{-1.337}$ ,拟合方差 $R^2=0.999$ .  $R^2$ 的取值范围为0~1,  $R^2$ 越接近1,意味着拟合精度越高,折射率点均分布在拟合曲线上. 当待测物的折射率继续增加时,传感器拟合精度就会大大下降,因此在300 K的温度下,测量范围已经到达极限,折射率的增加促使临界角位置发生改变,从而偏离可测量区域,因此为了测量更高范围的折射率,可以采取降低温度的策略. 在图7(b)中,当温度为298 K时,在折射率为1.3~1.5 RIU的范围内满足测量要求. 当 $n$ 依次取值1.3、1.35、1.4、1.45、1.5时,临界角位置为 $61.35^\circ$ 、 $57.63^\circ$ 、 $54.5^\circ$ 、 $51.79^\circ$ 、 $49.41^\circ$ . 拟合结果为 $\theta=91.077n^{-1.517}$ , $R^2=0.998$ . 为了继续拓宽测量范围,可以继续降低温度. 在图7(c)中,当温度为296 K时,在折射率为1.5~1.7 RIU的范围内满足测量要求. 如果依次赋

予 $n$ 值1.5、1.55、1.6、1.65、1.7,临界角位置为 $67.45^\circ$ 、 $63.3^\circ$ 、 $59.91^\circ$ 、 $57.01^\circ$ 、 $54.48^\circ$ . 在测量范围之内,拟合结果表明 $\theta=134.479n^{-1.712}$ ,拟合方差 $R^2=0.997$ . 根据对图7的分析可知,对于本文的临界角传感原理,调控温度能够持续地将高折射率范围拉回可测量区域,从而实现拓宽量程的目的. 而根据相同的原理,当温度继续下降,测量范围将得到进一步扩大,但是考虑到篇幅问题,本文仅选取前三段测量范围进行分析.

## 4 结论

本文通过结合InSb材料的近零折射率特性以及抗反射结构,激发了具有高透射率的角度选择窗口. 对于太赫兹TE波而言,角度窗口出现在2.65 THz附近,覆盖的角度范围 $0^\circ\sim 52.6^\circ$ . 在频率不变的情况下,温度的上升会促使角度窗口缩小. 在温度不变的情况下,频率的提高则会使角度窗口放大. 对于太赫兹TM波,角度窗口在10.5 THz附近被激发,角度范围 $0^\circ\sim 54.6^\circ$ . 类似地,温度和频率的升高分别会减小和扩大角度窗口. 临界角边缘还可用于测量背景介质的折射率. 通过降低温度,测量量程能够得到有效的提高. 当温度取值分别为300 K、298 K、296 K,测量范围依次为1.1~1.3 RIU、1.3~

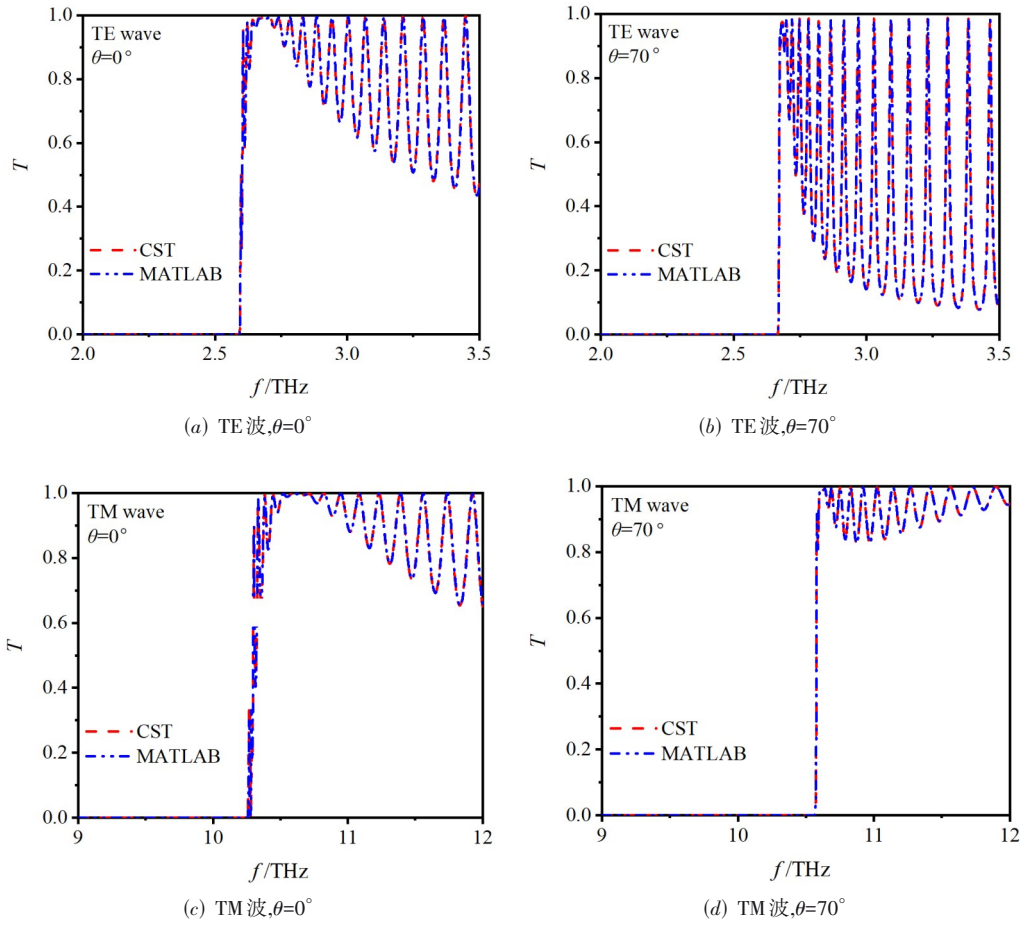


图6 CST仿真软件和MATLAB编程软件仿真结果对比图

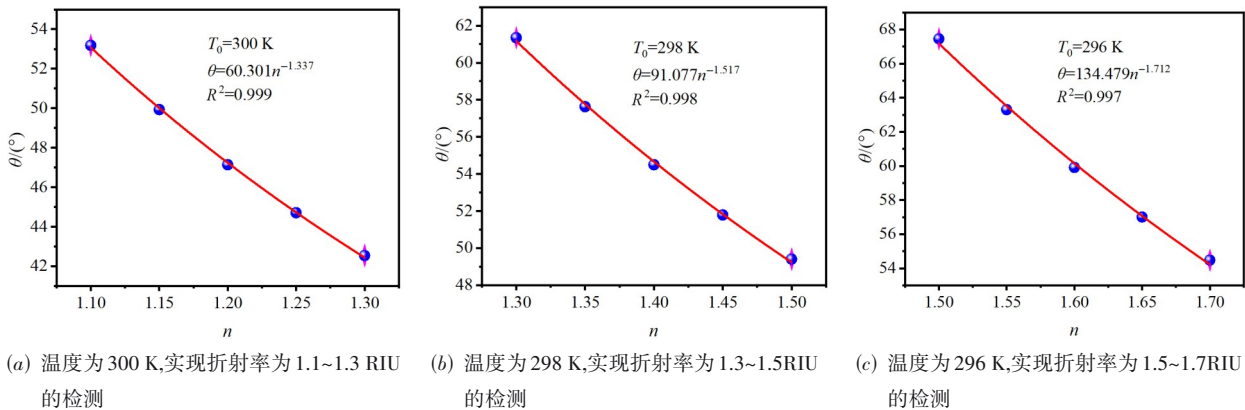


图7 温度分别为300 K、298K、296K下折射率的检测

1.5 RIU、1.5~1.7 RIU. 相比于恒温测量, 量程扩大了200%. 因此, 希望所提出的临界角测量原理以及温控测量技术对于折射率传感器的发展能够提供新的启发.

参考文献

[1] YIN K Z, QU Y R, KOOI S E, et al. Enabling manufactur-

able optical broadband angular-range selective films[J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 19917-19923.

[2] XU J, MANDAL J, RAMAN A P. Broadband directional control of thermal emission[J]. Science, 2021, 372(6540): 393-397.

[3] SHEN Y C, HSU C W, YENG Y X, et al. Broadband angular selectivity of light at the nanoscale: Progress, applica-

- tions, and outlook[J]. *Applied Physics Reviews*, 2016, 3(1): 011103.
- [4] GAO Y, LI B H, WANG R, et al. Polarization-independent broadband angular selectivity based on anisotropic diamagnetic metamaterial[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(8): 7306-7310.
- [5] KOSTEN E D, KAYES B M, ATWATER H A. Experimental demonstration of enhanced photon recycling in angle-restricted GaAs solar cells[J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(6): 1907-1912.
- [6] KOSTEN E D, ATWATER J H, PARSONS J, et al. Highly efficient GaAs solar cells by limiting light emission angle[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(1): e45.
- [7] GREENBAUM A, LUO W, SU T W, et al. Imaging without lenses: Achievements and remaining challenges of wide-field on-chip microscopy[J]. *Nature Methods*, 2012, 9(9): 889-895.
- [8] QIAN Q Y, XU C Q, WANG C. All-dielectric polarization-independent optical angular filter[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16574.
- [9] ALÙ A, D'AGUANNO G, MATTIUCCI N, et al. Plasmonic Brewster angle: Broadband extraordinary transmission through optical gratings[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(12): 123902.
- [10] SHEN Y C, YE D X, WANG L, et al. Metamaterial broadband angular selectivity[J]. *Physical Review B*, 2014, 90(12): 125422.
- [11] IIZUKA H, ENGHETA N, SUGIURA S. Extremely small wavevector regime in a one-dimensional photonic crystal heterostructure for angular transmission filtering[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3829-3832.
- [12] TANAKA H, TAKAI I, FUJIKAWA H, et al. Nearly polarization-independent angular filters consisting of one-dimensional photonic crystals realized in the visible region[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2517-2523.
- [13] IWATA N, KOIKE T, TOKUHIRO K, et al. Colloidal photonic crystals of reusable hydrogel microparticles for sensor and laser applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(48): 57893-57907.
- [14] GHOUMAZI M, HOCINI A. Photonic crystal based biosensor detection in nanophotonic structure using FEM method[J]. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*, 2021, 11(2): 216-224.
- [15] SNAPP P, KANG P, LEEM J, et al. Colloidal photonic crystal strain sensor integrated with deformable graphene phototransducer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(33): 1902216.
- [16] SU H, JIANG T T, ZHOU R H, et al. High-sensitivity terahertz sensor based on Tamm plasmon polaritons of a graphene asymmetric structure[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(6): 1877-1884.
- [17] CHENG J, LIU D P, DONG P, et al. Photonic spin Hall effect in a parity-time symmetric cavity and its sensing application[J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127247.
- [18] SRIVASTAVA Y K, AKO R T, GUPTA M, et al. Terahertz sensing of 7 nm dielectric film with bound states in the continuum metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(15): 151105.
- [19] WAN B F, XU Y, ZHOU Z W, et al. Theoretical investigation of a sensor based on one-dimensional photonic crystals to measure four physical quantities[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2846-2853.
- [20] ABD EL-GHANY S E S, NOUM W M, MATAR Z S, et al. Optimized bio-photonic sensor using 1D-photonic crystals as a blood hemoglobin sensor[J]. *Physica Scripta*, 2020, 96(3): 035501.
- [21] CHEN S, FAN F, WANG X H, et al. Terahertz isolator based on nonreciprocal magneto-metamaterial[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1015-1024.
- [22] HU B, WANG Q J, ZHANG Y. Slowing down terahertz waves with tunable group velocities in a broad frequency range by surface magneto plasmons[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10071-10076.

#### 作者简介



武 永 男,1982年8月出生于江苏省淮安市.工学博士,高级工程师.主要研究方向为微波毫米波太赫兹理论与技术,及其在量子、光学和材料学科中的应用.中国电子学会会员编号:E190131342M.

E-mail: youngwoome@163.com