

激光与光电子学进展

基于超表面的太赫兹波片研究进展

张卓, 龚岩栋*, 李柯

北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192

摘要 太赫兹 (THz) 技术在无损检测、通信、光谱分析和传感方面的独特应用使其受到了广泛关注, 但传统 THz 波片的体积大、损耗高。超表面是由人工设计的亚波长周期超原子组成的二维平面材料, 可以在亚波长厚度下灵活调控电磁波的振幅、相位和偏振, 为设计超紧凑和高性能的 THz 波片提供了平台。综述了基于自然材料、介质光栅和超表面的 THz 偏振波片, 重点介绍了基于超表面的 THz 波片, 包括不同谐振结构、可开关和连续调谐的波片等, 最后对这些 THz 波片的发展进行了总结和展望。

关键词 光谱学; 太赫兹; 波片; 超表面; 偏振

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1300001

Research Progress of Terahertz Waveplate Based on Metasurface

Zhang Zhuo, Gong Yandong*, Li Ke

School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract Terahertz (THz) technology is gaining lots of attention for its unique applications in nondestructive testing, communications, spectral analysis and sensing. However, the traditional THz waveplate has a large size and high loss. As a two-dimensional planar material composed of artificially designed subwavelength periodic meta-atoms, the metasurface can flexibly adjust the amplitude, phase and polarization of electromagnetic waves within the subwavelength thickness, providing a platform for the design of ultra-compact and high-performance THz waveplate. In this paper, the THz polarization waveplate based on natural materials, dielectric gratings and metasurface are reviewed respectively. In particular, the THz polarization waveplate based on metasurface is mainly focused, including different resonant structures, switchable and continuously tuned, etc. Finally, the development of these terahertz polarization waveplate is summarized.

Key words spectroscopy; terahertz; waveplate; metasurface; polarization

1 引言

太赫兹 (THz) 波具有独特的电磁特性, 频率在 0.1~10 THz 范围内, 在检测、通信、成像技术等领域有着很大的应用潜力^[1-3]。THz 波的光子能量较低, 可应用于对人体的成像和扫描等; THz 波能穿透玻璃、塑料、橡胶、纸张、陶瓷、布料、干木材等, 可以对隐藏或包装内的物品进行检测, 且 THz 波段大多数极性分子都有特征吸收谱, 可用来自动识别未知材料。THz 技术在近年来得到了快速发展, 推动了超宽带通信、无损检测、成像和光谱学的发展, 但目前缺少成熟产生 THz 波以及进行 THz 波探测等功能的器件, 因此, 对

THz 波的偏振控制具有重要意义。

偏振是电磁波的一个基本性质, 携带着电磁场的相位及振幅信息, 而波片是调制入射光束偏振态的重要工具^[4]。偏振波片是控制改变偏振态的常用无源器件, 半波片 (HWP) 一般是将线偏振波转换为与其正交的线偏振波或将圆偏振波从一种旋向性转换为另一种旋向性; 四分之一波片 (QWP) 是在线性偏振波与圆形或椭圆偏振波之间的转换。不同类型偏振态之间的转换一般通过天然双折射材料或亚波长光栅制成的波片 (WP) 实现, 但双折射系数的限制使 WP 需要较大的器件厚度累积相位差, 导致传统太赫兹偏振波片 (THz-WP) 存在体积大、损耗高等问题。此外, 材料色散也

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-09-27; 录用日期: 2021-09-30

基金项目: 北京信息科技大学重点研究培育项目 (2121YJPY209)

通信作者: *eydgong@bistu.edu.cn

会使 WP 的有效工作带宽变窄。超材料 (Metamaterial) 的出现极大减少了 WP 的厚度, 为集成平面器件的小型化提供了新思路。超材料是一种人工微结构材料, 具有亚波长周期性结构, 通过灵活设计可以实现传统材料不具备的特殊功能。具有负磁导率 ($\mu < 0$) 的超材料被提出后, 各种功能性超材料器件的开发及一系列新奇物理现象的展示, 如负折射率、超大折射率、零折射率、人工磁体、超透镜和超吸收体, 使超材料的研究取得了极大的进展。超表面 (Metasurface) 是超材料的二维简化形式, 通过引入突变相位的概念, 凭借比三维超材料在尺寸、制造和成本等方面的明显优势被广泛应用于偏振控制。随着微纳加工技术的发展, 光与物质之间的相互作用在亚波长尺度上受到人们的高度关注。超表面是人工设计的亚波长结构, 为更加灵活地控制光偏振态提供了新思路, 基于超表面的 THz-WP 在无损检测、医学成像和无线通信中也具有重要应用^[5-10]。

本文针对传统 WP 体积大、损耗高的问题, 总结了不同材料 WP 的结构及性能, 分析了超表面 WP 对 THz 器件集成和紧凑化发展的重要意义。首先, 介绍了基于自然材料、介质光栅及超表面偏振 WP 的研究进展。然后, 对比了不同 WP 的结构和性能, 重点介绍了基于超表面的 THz-WP, 包括不同谐振结构、可开关和连续调谐的 WP。最后, 对 THz-WP 的发展进行了总结和展望。

2 基于自然材料的 THz-WP

WP 的工作原理主要依赖于材料的双折射现象 (一条入射光线会产生两条折射光线), 产生这种现象的主要原因是光在各向异性晶体中传播时, 其传播速度和折射率随振动方向的变化而变化, 从而被分解成振动方向

互相垂直、传播速度不同、折射率不同的两种偏振光。

THz 波段常用的晶体材料是石英, 原因是自然界中的石英晶体在 THz 波段具有吸收率低 (约为 0.5 cm^{-1})、双折射大小适中 (0.04) 的特点。但晶体波片在 THz 波段的色散较大, 仅适用于制作窄带偏振 WP, 工作带宽约为几十 GHz。Jones 等^[11]利用多层旋转晶体方法设计的宽带无色散波片不仅在光学波段取得了巨大成功, 也为 THz 波段的波片设计提供了新思路。Masson 等^[12]提出了一种用六块石英片堆叠的宽带无色散 THz-QWP, 其带宽约为 1 THz, 但制造该波片需要厚度精确的石英晶体, 制造过程复杂, 且得到的 WP 尺寸和损耗也非常大。Chen 等^[13]通过多层石英晶体的旋转组合提出了一种带宽为 0.5~1 THz 的 THz-QWP, 但其封装后的总长度超过 10 cm, 且该 WP 的带宽不够宽, 严重影响了其性能和应用, 如图 1(a) 所示。Yang 等^[14]用 DyScO_3 (DSO) 晶体制备 THz-QWP, 由两种不同表面切割 ((110) 切割和 (001) 切割) 的正交 DSO 晶体制成零阶 WP, 通过结合晶体与不同表面切割增加带宽, 设计出了简单的消色差 QWP。液晶的双折射率相对较高且可以通过磁或电控制, 因此, 逐渐发展成一种新型的可调谐相位延迟器。Ji 等^[15]提出了一种具有双层石墨烯光栅和一层液晶的宽带可控 THz-QWP, 其结构如图 1(b) 所示。将液晶加入石墨烯光栅中能形成可调谐 QWP, 该结构在导通或截止状态下具有超过 0.35 THz 的偏振转换能力。为了增加工作带宽, Hsieh 等^[16]提出并验证了一种基于液晶的磁可调 THz-QWP, 这种波片引入了三列液晶相位延迟器, 通过改变液晶的有效折射率抵消每个波片的延迟变化, 从而调谐相位, 但利用磁场调谐会导致该波片的结构和外加装置较为复杂。

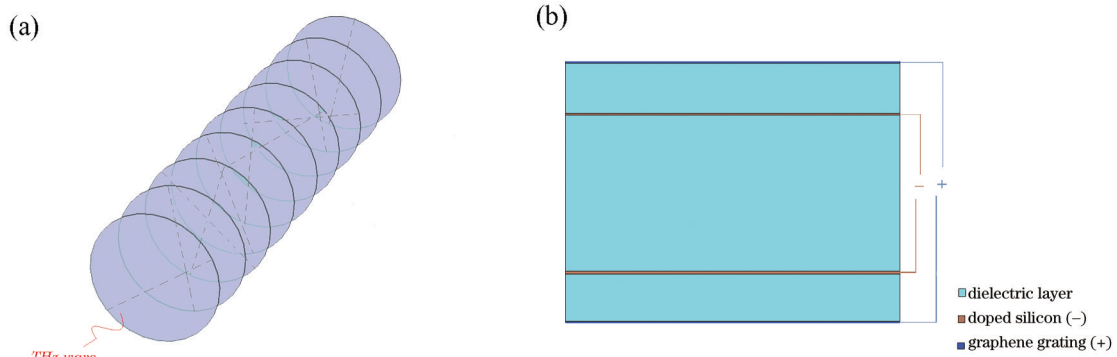


图 1 基于自然材料的 THz-QWP 结构。(a) 基于石英晶体的 THz-QWP^[13]; (b) 基于石墨烯光栅的 THz-QWP^[15]

Fig. 1 THz-QWP structure based on natural materials. (a) THz-QWP based on quartz crystal^[13]; (b) THz-QWP based on graphene grating^[15]

表 1 为基于自然材料的 WP 结构和性能对比。可以发现: 传统的石英 WP 尺寸在 cm 或 mm 量级, 结构厚、体积大且在不同工作频段下具有不同的晶体厚度, 不利于器件的大批量生产; DSO 晶体虽然克服了尺寸问题, 但

其带宽窄、损耗大, 且受限于材料的色散、对光的吸收等。综上所述, 基于自然材料的 WP 在堆叠结构下虽然可以获得较宽的带宽, 但会因材料吸收或法布里-珀罗 (F-P) 效应出现较大的插入损耗, 且结构体积较大。

表 1 基于自然材料的 THz-WP 性能对比

Table 1 Performance comparison of THz-WP based on natural materials

Ref.	Year	Function	Frequency /THz	Material	Size	Bandwidth /%	Insertion loss /%	Structure
[12]	2006	QWP	0.92	quartz	32 mm	163.0	45	six quartz plates
[13]	2013	QWP	1.55	quartz	10 cm	32.3	50	nine pieces of quartz plates
[14]	2021	QWP	0.60	DSO	50 μm	33.3	91	(110)-cut DSO crystals
			0.56		370 μm	19.8	93	(001)-cut DSO crystals

3 基于介质光栅的 THz-WP

针对基于自然材料的 WP 在尺寸或损耗等方面的缺陷,人们开始研究基于介质光栅的 WP。Scheller 等^[17]从理论上研究了一维聚合物晶体中的形状双折射,为基于聚合物晶体设计 THz-WP 提供了思路。Zhang 等^[18]利用人工形状双折射原理在低损耗的高阻硅上刻画光栅微结构制造人工双折射,并通过边缘优化算法将单层无色散波片带宽增加了 6 倍以上,大大减小了波片的体积和损耗,硅光栅的结构如图 2 所示。Chen 等^[19]用梯度栅格光栅结构大幅增加了人工形状双折射系数(约为 0.35),同时增加了带宽。Yuan 等^[20]用低折射率和低损耗聚合物制成的光栅在两个 THz 频率附近实现了独立的偏振控制,该特性由较低频率的单个模式传播和较高频率的两个模式干扰决定,打破了相位延迟与频率的相关性,很大程度上提高了转换效率并减少了损耗。

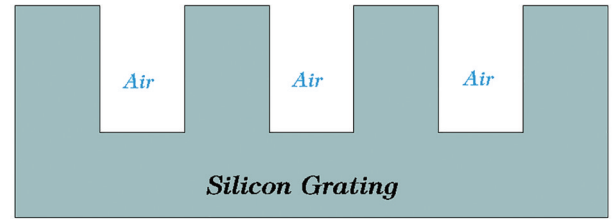
图 2 硅光栅的结构^[18]Fig. 2 Structure of the silicon grating^[18]

表 2 为基于介质光栅的 WP 结构及性能对比。可以发现,基于介质光栅的 WP 在一定程度上克服了自然材料尺寸或损耗等方面的问题。低折射率介质光栅虽然在一定程度上牺牲了紧凑性,但其较低的折射率提供了更平滑的相位梯度(频率函数),进而减小了反射损耗,而高折射率的介质可以将 WP 的厚度控制在 1 mm 以下。但这类 WP 的制造工艺较为复杂,且工作带宽仍不够宽。

表 2 基于介质光栅的 THz-WP 性能对比

Table 2 Performance comparison of THz-WP based on dielectric grating

Ref.	Year	Function	Frequency /THz	Material	Size	Bandwidth /%	Insertion loss /%	Structure
[18]	2015	QWP	0.64	silicon	500 μm	51.6	30	silicon grating
[19]	2016	HWP	1.05	silicon	950 μm	76.2	31	gradient grating
[20]	2021	HWP	0.14	polystyrene	4.8 mm	37.0	<10	low-index polymer grating
			0.30			35.0	<15	

4 基于超表面的 THz-WP

随着微纳加工技术的发展,具有亚波长周期的超原子平面阵列组成的超表面可以灵活、精确地控制光的相位和偏振信息^[21],为超紧凑 WP 的设计提供了一个平台,对 THz 器件的发展具有重要意义,基于超表面的 THz-WP 也成为目前的研究重点。超表面的设计源于推广的惠更斯原理^[22],主要利用纳米谐振结构构建惠更斯点光源,通过调节谐振强度和谐振引入的突变相位实现对波片上任意点光源振幅和相位的调节,从而控制光的传播、偏振、光束形状等。常见的谐振结构有表面等离子体谐振 (SPR)、谐振器 (Resonance)、米 (Mie) 谐振等。

4.1 基于表面等离子体谐振的 THz-WP

利用单层等离激元结构可以得到超薄的器件^[23],且其原理比较简单,因此该结构在超表面波片的设计

中得到了广泛应用。单层金属结构通常由具备电/磁偶极谐振的单元组成,如金属纳米棒/线对可以等效为电/磁偶极子,而电/磁偶极谐振激发的散射光与入射波存在相位差,从而产生强双折射^[24]。Weis 等^[25]利用切割线对的强双折射改变两个正交偏振态的折射率符号,并在设计的 QWP 基础上,通过增加一个切割线对单元结构实现 HWP 功能,如图 3(a)所示。其中, E 为传播方向。但由于波的两个正交偏振分量变化很快,该方法只能实现窄带波片。为进一步减小波片体积, Torres 等^[26]通过非正常透射修改孔阵列激发互补电容和电感响应实现形状双折射,得到工作在两个不同 THz 波段的单层 QWP,但其透射光的色散较大,导致 WP 的工作波段较窄。Zang 等^[27]提出了一种同时实现超薄多通道 THz-HWP 的方法,通过对具有不同方向的金属棒进行图案化,使创建的超表面将入射 THz 线偏振波反射为四束,从而产生多通道 HWP,一定程度

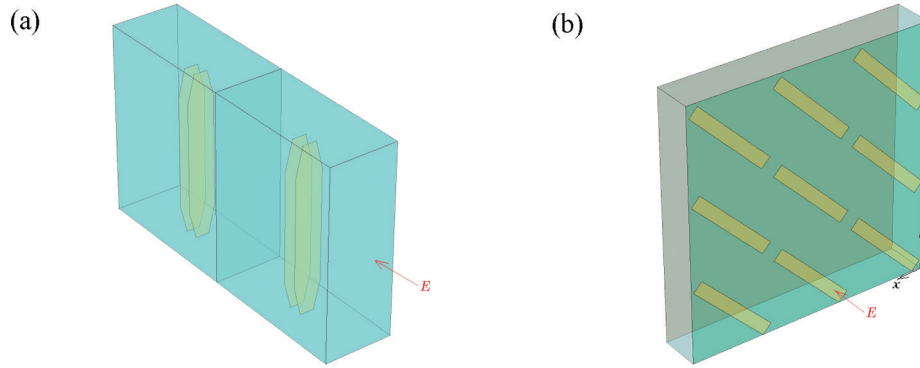


图 3 基于 SPR 的 THz-HWP 结构。(a)两个单元切割线对的结构^[25];(b)基于 MIM 结构的 HWP^[30]

Fig. 3 Structure of THz-HWP based on SPR. (a) Structure of two-unit cutting line pair^[25]; (b) HWP based on MIM structure^[30]

上简化了 THz 功能器件的复杂性。此外,同时控制电偶极子和磁偶极子谐振可以在实现大传输相位调谐范围的同时提高透射率,如 You 等^[28-29]提出了一种具有三个金属层的超表面 THz-QWP,该结构分开控制电响应和磁响应,首先用顶层和底层金属操纵磁响应,然后中间层在不影响磁场的情况下针对电响应进行调整,并结合网络分析和遗传算法对波片进一步优化,从而在宽带上实现高传输效率。之后,该团队结合系统优化方法最大限度地减少了 THz-HWP 的材料损耗,使偏振转换效率(PCR)高于 76.7%。基于单层等离子体结构的超表面波片虽然能实现宽波段的超薄波片,但效率较低,且可能会引入色散。足够厚的金属薄膜可以反射所有入射光,因此金属-介质-金属(MIM)薄膜结构常被用于 WP 设计,使 WP 的效率只受限于金属材料的欧姆损耗。Grady 等^[30]提出了由金属切割线阵列组成的 HWP,如图 3(b)所示。其中,金属薄膜

和切割线阵列形成了一个类 F-P 空腔来激发偶极振荡,从而模拟一种超薄、高效的线偏振器,但基于 MIM 结构的波片工作带宽仍然较窄。为进一步拓宽带宽,Xia 等^[31]提出了反射模式下基于各向异性结构的超表面 THz-HWP。该结构是由一个单元格中的两对贴片组成,工作在 0.67~1.66 THz 的宽带频率范围内,PCR 超过了 88%。

表 3 为基于 SPR 的 WP 结构及性能对比。其中,T 和 R 分别表示透射和反射。透过率指透射场与入射场的比,一般受反射和衍射的影响。插入损耗指输出功率与输入功率的比值,易受材料的影响。可以发现:由于欧姆损耗的限制,工作在反射模式下的 WP 效率通常更高;单层金属超表面一般表现出极大的插入损耗,双层结构能大大减少插入损耗,但其带宽有限,而三层 MIM 结构的超表面 WP 提供了一种以复杂配置为代价协调效率和带宽的解决方案。

表 3 基于 SPR 的 THz-WP 性能对比

Table 3 Performance comparison of THz-WP based on SPR

Ref.	Year	Function	Frequency / THz	Dielectric material	Metal Layer	Size / μm	Bandwidth / %	PCR / %	Mode	Transmission / %	Insertion loss / %	Structure	
[25]	2009	QWP	1.30	bencocycl- obutene	Cu	2	110	2.9	~55	T	74	45	a cut-wire pair
		HWP	1.34		Cu	2	110	2.8	~34				
[26]	2014	QWP	1.07	polypropy- lene	Au	1	40	16.7	~30	T	55	70	a hole array
			2.29					2.9	~5		23	95	
[27]	2018	HWP	1.1	polyimide	Au	1	25.3	54.5	65	R	/	20	metal rods
[28]	2020	QWP	0.28	cyclic olefin copolymer	Au	3	540	53.3	70	T	75	43	three metallic layers
[29]	2021	HWP	0.262	cyclic olefin copolymer	Au	3	125	31.7	~59	T	77	41	three metallic layers
[30]	2013	HWP	1.04	polyimide	Au	3	33	50.0	>50	R	/	20	cut-wire array
[31]	2017	HWP	1.165	polyimide	Au	1	33	84.0	>85	R	/	30	two pairs of patches

4.2 基于谐振器的 THz-WP

低损耗、高谐振频率的谐振器即介质-金属谐振器薄膜-介质结构也可以设计 WP。为了避免欧姆损

耗,Strikwerda 等^[32]提出了用开口谐振环(SRR)和曲折线结构分别制备 THz-QWP,其原理如图 4 所示。其中,沿 x 方向的电场表现出电容响应,沿 y 方向的

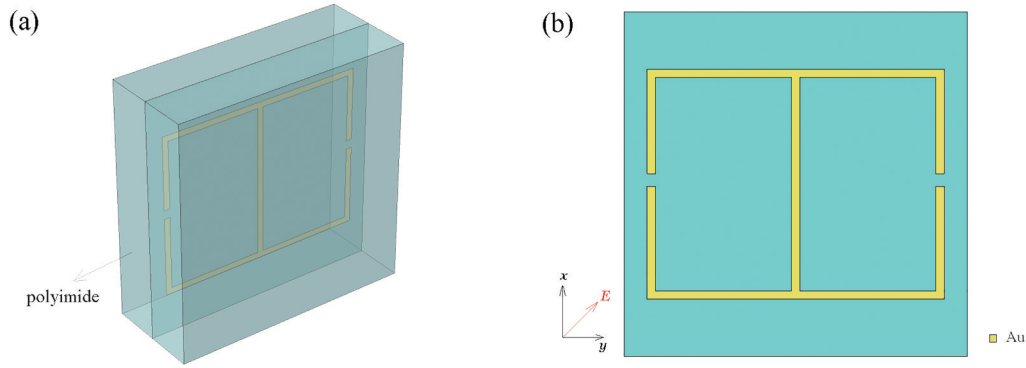


图4 基于SRR的THz-QWP结构。(a) QWP的单元结构;(b)矩形开口谐振环的金属层结构^[32]

Fig. 4 Structure of THz-HWP based on SRR. (a) Unit structure of the QWP; (b) metal layer structure of the rectangular split resonator^[32]

电场产生正弦响应,通过设计沿两个方向相应的相位超前和延迟形成QWP,两种结构下的PCR都达到了99%。为了增加带宽,Nouman等^[33]提出了一种由水平连接的开口谐振环组成的WP,通过沿极化轴的带通谐振传输和沿其正交轴的带阻谐振传输产生90°的相位延迟,并通过改变入射角适当补偿传输幅度的差异,从而在较宽频率范围内实现线性偏振到圆偏振的转换。为了提高转换效率,Han等^[34]提出了一种优化非谐振和谐振内激发的方法,通过双层矩形SRR设计超薄THz-QWP。其中,横电(TE)模式工作在非谐振区域,而横磁(TM)模式工作在谐振区,从而产生双折射,实现了高传输效率的双层

设计,但该方法的制备过程比较复杂。为了拓宽工作频率,Liu等^[35]提出了一种由波浪形谐振器组成的单层THz-QWP,由于非谐振区域中的幅度和相位特性,两个线谐振器的组合布置使超表面发生宽带效应。此外,可以通过控制入射角有效调整偏振态和转换效率。

表4为基于谐振器谐振的WP结构及性能对比。可以发现,用谐振器替换金属组件是减少欧姆损耗的方法之一。基于谐振器谐振的WP一般工作在透射模式下,尺寸小且损耗较低,但对于谐振器而言,几何结构和角度的缺陷会导致其效率和带宽都较小,且其结构稳定性较低,不适合大规模的生产制备。

表4 基于谐振器的THz-WP性能对比

Table 4 Performance comparison of THz-WP based on resonator

Ref.	Year	Function	Frequency / THz	Dielectric material	Metal Layer	Size / μm	Bandwidth / %	PCR / %	Transmission / %	Insertion loss / %	Structure
[32]	2009	QWP	0.64	polyimide	Au 1	20	15	99	/	50	SRR
[33]	2016	QWP	0.73 1.13	zeonor	Ti/ Au 1	23	25 30	10-41	32 ~64	59 ~90	SRR
[34]	2018	QWP	0.98	bisbenzocyclobutene	Al 2	48	12	64	80	36	SRR
[35]	2021	QWP	1.86	polyimide	Al 1	37	43	26	~26	92	wave-shape resonator

4.3 基于干涉耦合的THz-WP

通过增加层数激发结构层之间的近场作用或F-P效应干涉耦合,可以提高PCR并增加带宽,此外,非谐振操作克服了典型谐振超表面的损耗等问题。研究发现,基于散射矩阵分析的多层光栅结构中的多波干涉可以实现偏振转换。Fan等^[36]提出了一种基于多波干涉的三层金属光栅结构,通过复合光栅层的机械旋转可以将线偏振波旋转到任何所需的方向,且效率较高。为了进一步提高转换效率,Chang等^[37]提出了一种非谐振反射超表面THz-QWP,该结构在两个F-P谐振之间的较宽非谐振频率范围内具有较高的反射率,相位

色散接近线性且彼此平行,可提供几乎恒定的相位差,从而实现了高效(转换效率接近1)和超宽带(带宽高达80%)的线圆偏振转换。Moreno-Penarrubia等^[38]提出了一种基于层之间的强电耦合THz双层锯齿形超表面HWP,该结构具有很强的稳定性,厚度仅为 $\lambda/20$ (λ 为入射波长),且其PCR高于90%。为了实现线性偏振波在THz范围内的高性能非对称传输(AT)效应,Lü等^[39]提出了一种由扭曲S形金属图案组成的双层手性超表面,如图5所示。沿光传播方向上其对称性被破坏,两层之间产生了正交线性偏振态的强耦合。该结构的AT效应在60°入射角内的稳定性仍然很高,适用

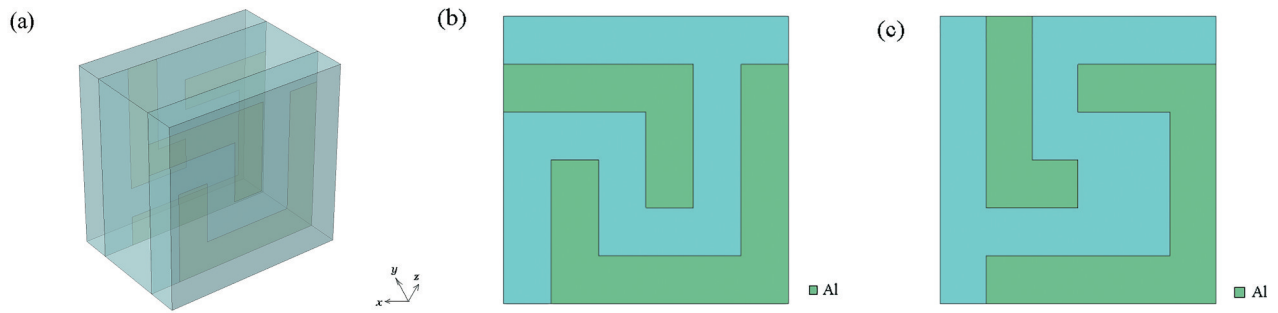


图 5 基于干涉耦合的 THz-QWP 结构。(a)超表面半波片的单元结构;(b)第一层金属薄膜结构;(c)第二层金属薄膜结构^[39]

Fig. 5 Structure of THz-HWP based on interference coupling. (a) Unit structure of the metasurface half-wave plate; (b) structure of the first metal film; (c) structure of the second metal film^[39]

于操纵不同的线偏振波。为了拓宽带宽, Huang 等^[40]提出了基于量子控制技术的多层超表面 WP, 通过解析计算出每层的旋转角度, 证明了随着超材料层数的增加, HWP 的带宽逐渐增大, 最终将带宽从之前的三层提高到了七层。

表 5 为基于干涉耦合的 THz-WP 结构及性能对

比。可以发现, 多层超表面 WP 一般工作在透射模式下, 由金属和介质通过增加层数实现宽频率范围内平坦的偏振相位差, 同时获得较高的转换效率, 但仍存在欧姆损耗。此外, 多层结构也付出了制造工艺较为复杂的代价, 层之间堆叠旋转角度的差异也会极大降低 WP 的性能以及结构的稳定性。

表 5 基于干涉耦合的 THz-WP 性能对比

Table 5 Performance comparison of THz-WP based on interference coupling

Ref.	Year	Function	Frequency / THz	Dielectric material	Metal	Layer	Size	Bandwidth / %	PCR / %	Mode	Transmission / %	Insertion loss / %	Structure
[36]	2015	HWP	0.3	polyimide	stainless steel	3	270 μm	66	~ 100	T	95	10	metallic grating
[37]	2019	QWP	1.02	silicon	Au	3	44 μm	80	> 90	R	/	8	dielectric pillar
[38]	2020	HWP	0.15	polypropylene	Al	2	100 μm	9	90	T	83	30	Zigzag shape
[39]	2020	HWP	0.695	polyimide	Al	2	18 mm	73	~ 80	T	97	20	S-shaped chained

4.4 基于 Mie 谐振的 THz-WP

基于超表面的 WP 大多基于金属微结构, 而金属材料的欧姆损耗很大, 从根本上限制了高效率器件的实现。为了克服欧姆损耗效应和复杂制造工艺的缺点, Zi 等^[41]提出了一种具有椭圆形空气孔的全介质超表面 THz-QWP, 由于亚波长空气孔的周期比 THz 波的波长范围小得多, 且椭圆形空气孔具有空间不对称性, 使 x 和 y 方向的有效折射率不同, 从而导致了双折射, 但其带宽不够宽。通过引入几何相位 (P-B 相位) 将工作带宽覆盖到全部的相位空间, Yang 等^[42]用 Mie 谐振的介质材料代替金属元件并引入相位梯度使正交偏振态空间分离, 获得转换效率为 67.5% 的输出波, 从而得到宽波段无色散的 THz-HWP。此外, 用具有单个亚波长各向异性柱作为晶胞也会导致双折射。Rao 等^[43]提出了由硅衬底和两对硅柱组成的 HWP, 其结构如图 6 所示。通过入射极化 THz 波激发磁 Mie 谐振引起 AT 效应, 使前向和后向传播的线性 THz 波之间存在明显差异。Zi 等^[44]提出了一种具有相位梯度的双柱全硅晶胞 WP, 可

以在相同的工作频率内实现两种不同的偏振转换, 在 1 THz 处对 x 偏振入射光是 QWP, 对 y 偏振入射光则是 HWP。

表 6 为基于 Mie 谐振的 THz-WP 结构及性能对比。可以发现, 全介质 WP 克服了金属材料的欧姆损耗, 具有高透射率优点, 但其工作带宽不够宽, 一般通过 P-B 相位引入相位梯度以拓宽带宽, 同时可以在一定程度上提高 WP 的转换效率。

上述基于超表面的 WP 对 THz 波的电磁响应都是被动的, 这些器件一旦加工完成, 无法对 THz 波进行动态调控, 在实际应用中受到了一定限制, 因此, 人们在超材料发展的早期就已经开始致力于可灵活调控的超表面 WP。

4.5 主动调控的超表面 THz-WP

利用超表面实现 THz 波从频谱到空间特性主动调控^[45]的方法通常有两种, 即在特定范围内实现开关状态主动切换的 THz-WP 和在某波段范围内从线偏振到圆偏振可连续调谐的 THz-WP。动态偏振的控制

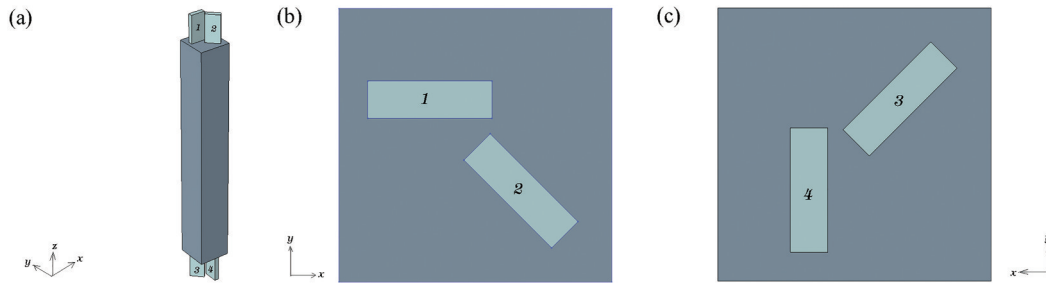


图 6 基于 Mie 谐振的 THz-QWP 结构。(a) 全硅介质超材料单元结构；(b) 单元结构的顶视图；(c) 单元结构底视图^[43]

Fig. 6 Structure of THz-HWP based on Mie resonance. (a) Unit cell structure of the all-dielectric metamaterial; (b) top view of the unit cell; (c) bottom view of unit cell^[43]

表 6 基于米谐振的 THz-WP 性能对比

Table 6 Comparison of THz-WP performance based on meter resonance

Ref.	Year	Function	Frequency / THz	Dielectric material	Size / μm	Bandwidth / %	PCR / %	Transmission / %	Insertion loss / %	Structure
[41]	2018	QWP	1.76	silicon	100	59	57	75	43	elliptical air holes
[42]	2018	HWP	0.73	silicon	200	35	68	82	33	two silicon antennas
[43]	2020	HWP	0.83	silicon	220	36	~60	77	40	two silicon pillars

一般通过可重构超表面实现,主要通过改变几何结构(如拓扑优化)或加入活性材料(如 VO_2 、石墨烯)实现主动调控功能。

4.5.1 可开关 THz-WP

近年来,基于超表面结合石墨烯或 VO_2 ^[46-52] 等可调材料的可控开关式 HWP/QWP 受到人们越来越多的关注,包括热泵、光泵浦、电、磁、微机电系统 (MEMS) 等多种开关控制方式。Wang 等^[50] 提出用温度激励控制 VO_2 的相变,从而改变超表面中金属谐振器的有效长度,并实现了一种超薄可切换的 THz-QWP,其开关范围为 34 GHz,但温度调控方式使其响应时间较慢。为了提高响应速度,一般选择电激励或光泵激励的方式。Luo 等^[51] 提出一种 VO_2 -金属混合超表面,通过将 VO_2 电导率改变三个数量

级,即通过过阻尼到欠阻尼谐振的过渡实现宽带动态可切换的 HWP/QWP,如图 7 所示。该超表面在宽带范围仍具有很高的转换效率。除 VO_2 外,石墨烯也可以作为可调材料应用于超表面 WP。Zhang 等^[52] 提出了一种基于双层石墨烯结构的可开关式 WP,通过控制施加到石墨烯上的电压改变其工作频率,由于顶部石墨烯层对线偏振波较敏感, x 和 y 偏振入射的可调特性是不同的。在 x 偏振入射时,其费米能级被调谐到 0.5 eV,此时 QWP 处于关闭状态,随着工作频率的增加,QWP 从关闭状态切换到开启状态,可调频带范围为 1 THz;在 y 偏振入射时,费米能级在 0.6~0.8 eV 范围内 QWP 处于开启状态,可调频带范围为 0.5 THz,该 WP 虽然能实现多种功能,但结构比较复杂。

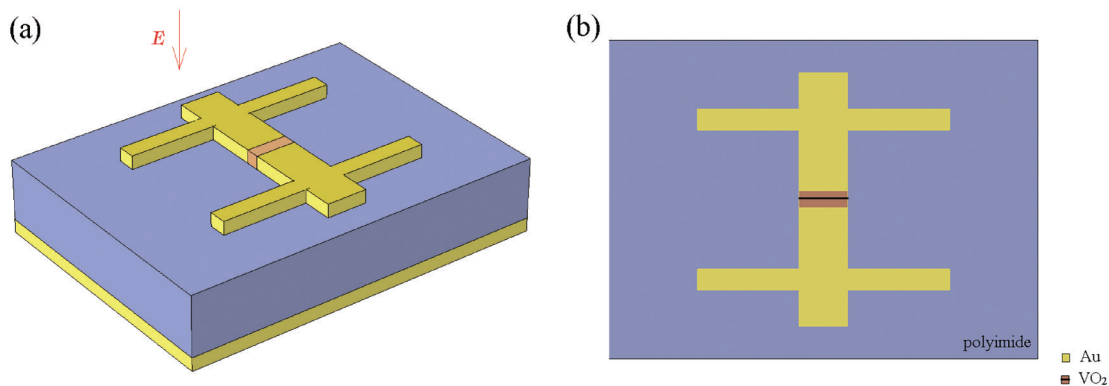


图 7 可开关 THz-WP 的结构。(a) VO_2 -金属混合超表面的示意图；(b) 单元结构的俯视图^[51]

Fig. 7 Structure of switchable THz-WP. (a) Schematic diagram of the VO_2 -metal hybrid metasurface; (b) top view of the cell structure^[51]

表 7 为可开关的 THz-WP 结构及性能对比。可以发现,这类 WP 可动态切换 HWP/QWP,且在尺寸、效

率和带宽等方面具有很大的优势。由于该结构通过外部激励改变 WP,响应速度显得尤为重要。一般来说,

表 7 可开关 THz-WP 的性能对比

Table 7 Performance comparison of switchable THz-WP

Ref.	Year	Function	Frequency / THz	Dielectric material	Metal Layer	Size / μm	Bandwidth / %	PCR / %	External incentives
[47]	2020	HWP QWP	2.20 2.12/2.93	polymer, VO ₂	Au	3 22.2	18 44/2	99 85	temperature
[48]	2020	HWP QWP	0.99 1.13	cyclic olefin copolymer, VO ₂	Au	4 75.6	83 83	98 >90	temperature
[49]	2021	HWP QWP	4.59 5.46	graphene, ZrO ₂	Au	3 27.2	73 37	90 >90	electrostatic gating
[50]	2021	HWP QWP	1.00	polyimide, VO ₂	Au	3 39.2	40	96 ~100	thermal, optical or electrical stimulus

温度响应速度较慢,外加磁场装置较复杂,因此,通常采用电激励和光泵激励。其中,电激励便于操作,易于集成,响应速度在秒量级,而光泵激励的相变响应时间在亚皮秒量级,具有超快调控的优点。此外,实际制备得到的活性材料纯度与模拟仿真的差异也是制造 WP 的一个挑战。

4.5.2 连续调谐的 THz-WP

对于连续可调谐 WP 的研究,大部分都利用了液晶(LC)的折射率调控原理^[53-57]。Yu等^[54]基于双频液晶(DFLC)在 THz 范围内各向异性特性通过方波电压的交变频率和强度连续调制其双折射,从而实现一个可调谐的 QWP/HWP,如图 8 所示。Lee等^[55]提出一种高效的单层超表面 THz-WP,并提供了一个 180°和 90°的可调操作频率,通过机械形变使超表面的每个单元发生紧耦合,进而产生相位延迟。此外,还可以通过

改变入射角的大小实现双折射。Shi等^[56]提出了一种基于拓扑优化设计超表面的双折射,可以并行操作尽可能多的波片,且该结构无需级联多个元件就可以实现角度可调的任意双折射。Xu等^[57]提出了一种由夹在两个正交排列亚波长金属光栅之间的 LC 层组成的超表面,前后光栅构建的类 F-P 腔表现出强烈的局部谐振机制,大大提高了 WP 的 PCR,实现了多波段可调谐线性偏振转换。

表 8 为可调谐 THz-WP 的结构及性能对比。可以发现,相比可开关 THz-WP,连续调谐的 THz-WP 在外部激励作用下的相位调控是可逆、连续和稳定的,可通过外加电场、引入机械形变或改变入射角度进行调谐,且其结构比较简单,能在特定频段实现多种功能,偏振调控也较为灵活,但外部激励的加入会带来额外损耗、响应速度变慢等新问题。

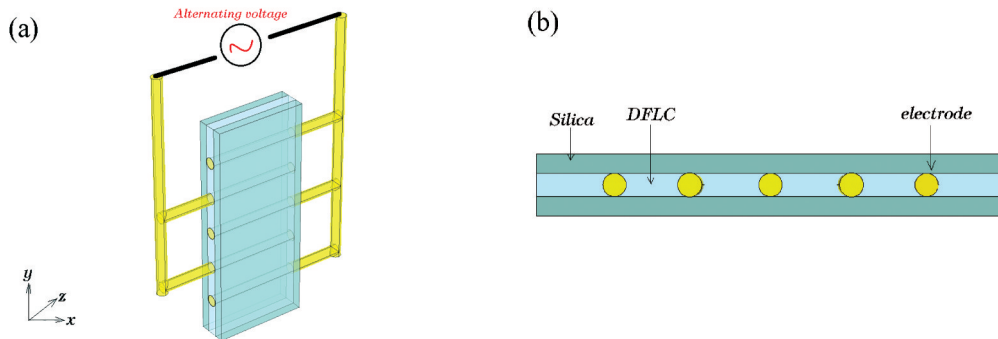
图 8 连续调谐的 THz-WP 结构。(a)DFLC 单元的结构;(b)DFLC 横截面示意图^[54]Fig. 8 Structure of continuously tuned THz-WP. (a) Structure of the DFLC cell; (b) cross-section of DFLC^[54]

表 8 连续调谐 THz-WP 的性能对比

Table 8 Performance comparison of continuously tuned THz-WP

Ref.	Year	Function	Dielectric material	Metal	Size / μm	External incentives	Principle	Structure
[54]	2018	HWP/QWP	silica, DFLC	Cu	1600	square wave voltage	birefringence of DFLC	silica-DFLC-silica
[55]	2019	HWP/QWP	polydimethylsiloxane, SiO ₂	Au, Cr	100	mechanically stretched	tight coupling	elementary resonators
[56]	2020	HWP/QWP	amorphous silicon	/	1500	angle tunable	photonic inverse	freeform metasurface
[57]	2021	HWP/QWP	silica, LC	Au	900	variable E-field	local resonance, LC birefringence	LC integrated metal grating

5 结 论

对比不同材料 WP 的结构和性能发现,其体积、损耗、带宽和效率很难做到兼备。传统基于自然材料双折射晶体的 WP 体积庞大、工作频带窄,阻碍了其被集成到微型和宽带 THz 系统中。介质光栅由低折射率材料制成,一定程度上克服了自然材料尺寸和损耗大的缺点,但仍存在工作带宽不够宽的缺点。超表面 THz-WP 在很大程度上解决了传统 WP 不够紧凑的问题。受欧姆损耗的影响,单层等离子体超表面虽然能实现超薄的 THz-WP,但其效率和带宽却不尽人意。基于多层 MIM 结构的 WP 虽然提高了转换效率,但一般工作在反射模式下且受欧姆损耗的限制,其透射率很低。采用基于谐振器的介质层结构设计 WP 是避免欧姆损耗的方法之一,但其带宽和效率仍然不够高。为了提高效率和工作带宽,通过多层超表面的堆叠设计基于干涉耦合的 WP,但其制造工艺较为复杂。为了克服欧姆损耗效应和复杂制造工艺的缺点,提出了基于 Mie 谐振的 WP,相比金属超材料,全介质超材料具有低损耗、透射率高的优点,但其主要依赖于材料的各向异性,通过改变结构改善其性能的可行性较小。主动调控的超表面 WP 虽然在尺寸、效率和带宽等方面具有很大的优势,但结构复杂,且外部激励还会带来额外损耗、响应速度变慢等新问题。因此,高效率、宽带宽的 THz-WP 是研究人员亟待解决的问题。

相比传统 THz-WP,基于超表面制成的 THz-WP 尺寸较小,且传统 THz-WP 需要特定的表面形貌才能实现所需的功能。这些 WP 的厚度一般在 cm 或 mm 量级,导致系统体积庞大且笨重,而超表面利用了纳米结构谐振过程中引入的突变相位,为设计超薄 THz-WP 提供了灵活的平台。基于超表面的 WP 厚度通常为 μm 量级,因此,用超表面实现的 THz-WP 有利于器件的小型化和集成化。基于超表面的 THz-WP 还可以提供多种功能,而传统 THz-WP 只能提供单一功能。如:一个基于超表面的 THz-WP 在相同的工作频率可以实现两种不同的偏振转换^[16];将 THz 透镜与 THz-QWP 结合就能将入射 THz 波的偏振聚焦旋转到一个焦点,从而产生带有偏振旋转的多焦点超透镜。此外,传统 THz-WP 受限于自然材料各向异性的色散、对光的吸收等,而超表面 WP 的色散可人工设计并利用吸收系数较小的材料制备。尽管超材料基于可调谐的介电常数和磁导率取得了显著的成果,但仍然受到制造技术的挑战和单元损耗高的限制,如:大多数基于超表面的 THz 功能器件仅限于固定功能的无源超表面;目前具有可调谐功能的波片仅限于全局操作,而非对单个单元的独立调制,同时响应时间及活性材料制备的纯度也是需要克服的问题。虽然通过堆叠或多层旋转组合能实现高效率、消色散、宽带宽的 WP,但可能会引入 F-P 干涉和串扰的问题。

通过双曲型超材料拓展无色散带宽是目前的研究热点^[58-59],克服超材料的色散也至关重要。在主动调控超表面 WP 领域,保证器件功能的同时结合热力学、材料学设计负载能力更强的金属结构也是今后研究的关键。同时,人工智能增强的光子技术也在不断的发展^[60],Burgos 等^[61]提出了一个由端到端框架探索自由空间的光学计算卷积神经网络,并提出了一种基于纳米级超表面光学的通用方法,可以处理 RGB (Red, Green, Blue) 输入数据,将该方法扩展到 THz 区域,会使 THz 器件的实际应用更加广泛。He 等^[62]基于粒子群优化算法,证明了通过逆向设计超表面构建 THz 电磁诱导透明效应是可行的,将该方法进一步用于设计 WP 上,有望实现超越传统结构的高性能器件,为 THz 器件及系统的发展提供更多的机会。

参 考 文 献

- [1] Zhong S C. Progress in terahertz nondestructive testing: a review[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019, 14 (3): 273-281.
- [2] Wu X, Lu H, Sengupta K. Programmable terahertz chip-scale sensing interface with direct digital reconfiguration at sub-wavelength scales[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2722.
- [3] 霍红, 延凤平, 王伟, 等. 基于超材料的太赫兹高灵敏度传感器的设计[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0814004. Huo H, Yan F P, Wang W, et al. Terahertz high-sensitivity sensor design based on metamaterial[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0814004.
- [4] Gong Y D, Zhang Z, Li K, et al. Review on polarimetric terahertz spectroscopy[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(6): 1605-1611.
- [5] Zotov A K, Gavdush A A, Katyba G M, et al. In situ terahertz monitoring of an ice ball formation during tissue cryosurgery: a feasibility test[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2021, 26(4): 043003.
- [6] Nüßler D, Jonuscheit J. Terahertz based non-destructive testing (NDT)[J]. *Tm-Technisches Messen*, 2021, 88 (4): 199-210.
- [7] Ibrahim M E, Headland D, Withayachumnankul W, et al. Nondestructive testing of defects in polymer-matrix composite materials for marine applications using terahertz waves[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, 40 (2): 1-11.
- [8] Lemic F, Abadal S, Tavernier W, et al. Survey on terahertz nanocommunication and networking: a top-down perspective[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(6): 1506-1543.
- [9] Shamim S M, Uddin M S, Hasan M R, et al. Design and implementation of miniaturized wideband microstrip patch antenna for high-speed terahertz applications[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2021, 20(1): 604-610.
- [10] Watanabe S. Terahertz polarization imaging and its applications[J]. *Photonics*, 2018, 5(4): 58.

- [11] Jones R C, West C D. On the properties of polarization elements as used in optical instruments II sinusoidal modulators[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1951, 41(12): 982-986.
- [12] Masson J B, Gallot G. Terahertz achromatic quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 265-267.
- [13] Chen Z C, Gong Y D, Dong H, et al. Terahertz achromatic quarter wave plate: design, fabrication, and characterization[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 1-5.
- [14] Yang C J, Li J W, Lehmann J, et al. Birefringence of orthorhombic DyScO₃: toward a terahertz quarter-wave plate[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(22): 223506.
- [15] Ji Y Y, Fan F, Wang X H, et al. Broadband controllable terahertz quarter-wave plate based on graphene gratings with liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12852-12862.
- [16] Hsieh C F, Yang C S, Shih F C, et al. Liquid-crystal-based magnetically tunable terahertz achromatic quarter-wave plate[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9933-9940.
- [17] Scheller M, Jördens C, Koch M. Terahertz form birefringence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10137-10142.
- [18] Zhang B H, Gong Y D. Achromatic terahertz quarter waveplate based on silicon grating[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14897-14902.
- [19] Chen M, Fan F, Xu S T, et al. Artificial high birefringence in all-dielectric gradient grating for broadband terahertz waves[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38562.
- [20] Yuan Y W, Cheng J R, Dong X P, et al. Terahertz dual-band polarization control and wavefront shaping over freestanding dielectric binary gratings with high efficiency [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106636.
- [21] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [22] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [23] Wang D C, Gu Y H, Gong Y D, et al. An ultrathin terahertz quarter-wave plate using planar babinet-inverted metasurface[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11114-11122.
- [24] Ma Z J, Hanham S M, Gong Y D, et al. All-dielectric reflective half-wave plate metasurface based on the anisotropic excitation of electric and magnetic dipole resonances[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 911-914.
- [25] Weis P, Paul O, Imhof C, et al. Strongly birefringent metamaterials as negative index terahertz wave plates[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(17): 171104.
- [26] Torres V, Sánchez N, Etayo D, et al. Compact dual-band terahertz quarter-wave plate metasurface[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(16): 1679-1682.
- [27] Zang X F, Gong H H, Li Z, et al. Metasurface for multi-channel terahertz beam splitters and polarization rotators [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(17): 171111.
- [28] You X L, Ako R T, Lee W S L, et al. Broadband terahertz transmissive quarter-wave metasurface[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(9): 096108.
- [29] You X, Ako R T, Lee W S L, et al. Terahertz transmissive half-wave metasurface with enhanced bandwidth[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4164-4167.
- [30] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [31] Xia R, Jing X F, Gui X C, et al. Broadband terahertz half-wave plate based on anisotropic polarization conversion metamaterials[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(3): 977-988.
- [32] Strikwerda A C, Fan K B, Tao H, et al. Comparison of birefringent electric split-ring resonator and meanderline structures as quarter-wave plates at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2009, 17(1): 136-149.
- [33] Nouman M T, Hwang J H, Jang J H. Ultrathin terahertz quarter-wave plate based on split ring resonator and wire grating hybrid metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39062.
- [34] Han Z L, Ohno S, Tokizane Y, et al. Off-resonance and in-resonance metamaterial design for a high-transmission terahertz-wave quarter-wave plate[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2977-2980.
- [35] Liu D M, Lü T T, Dong G H, et al. Broadband and wide angle quarter-wave plate based on single-layered anisotropic terahertz metasurface[J]. *Optics Communications*, 2021, 483: 126629.
- [36] Fan R H, Zhou Y, Ren X P, et al. Freely tunable broadband polarization rotator for terahertz waves[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(7): 1201-1206.
- [37] Chang C C, Zhao Z X, Li D F, et al. Broadband linear-to-circular polarization conversion enabled by birefringent off-resonance reflective metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(23): 237401.
- [38] Moreno-Peñarrubia A, Kuznetsov S A, Beruete M. Ultrathin subterahertz half-wave plate with high conversion efficiency based on zigzag metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(11): 7700-7704.
- [39] Lü T T, Chen X Y, Dong G H, et al. Dual-band dichroic asymmetric transmission of linearly polarized waves in terahertz chiral metamaterial[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3235-3242.
- [40] Huang W, Hao X Y, Cheng Y, et al. Broadband terahertz half-wave plate with multi-layers metamaterial via quantum engineering[EB/OL]. (2021-01-26)[2021-09-01]. <https://arxiv.org/abs/2101.11076>.
- [41] Zi J C, Xu Q, Wang Q, et al. Terahertz polarization converter based on all-dielectric high birefringence metamaterial with elliptical air holes[J]. *Optics Communications*, 2018, 416: 130-136.
- [42] Yang Q L, Chen X Y, Xu Q, et al. Broadband terahertz

- rotator with an all-dielectric metasurface[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(11): 1056-1061.
- [43] Rao Y F, Pan L, Ouyang C M, et al. Asymmetric transmission of linearly polarized waves based on Mie resonance in all-dielectric terahertz metamaterials[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29855-29864.
- [44] Zi J C, Li Y F, Feng X, et al. Dual-functional terahertz waveplate based on all-dielectric metamaterial[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(3): 034042.
- [45] 汪国崔, 胡滨, 张岩. 动态超构表面设计及功能器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0900001.
Wang G C, Hu B, Zhang Y. Dynamic metasurface design and functional devices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0900001.
- [46] Li Y R, Luo J, Li X, et al. Switchable quarter-wave plate and half-wave plate based on phase-change metasurface [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 4600410.
- [47] Zhao J X, Song J L, Zhou Y, et al. Switching between the functions of half-wave plate and quarter-wave plate simply by using a vanadium dioxide film in a terahertz metamaterial[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(6): 064204.
- [48] Luo J, Shi X Z, Luo X Q, et al. Broadband switchable terahertz half-/quarter-wave plate based on metal-VO₂ metamaterials[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30861-30870.
- [49] Zhang R, You B, Wang S C, et al. Broadband and switchable terahertz polarization converter based on graphene metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 24804-24815.
- [50] Wang D, Zhang L, Gu Y, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15020.
- [51] Luo X Q, Hu F R, Li G Y. Broadband switchable terahertz half-/quarter-wave plate based on VO₂/metal hybrid metasurface with over/underdamped transition[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(50): 505111.
- [52] Zhang K, Liu Y, Li S X, et al. Actively tunable bi-functional metamirror in a terahertz band[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 464-467.
- [53] Li T Y, Huang L L, Liu J, et al. Tunable wave plate based on active plasmonic metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4216-4226.
- [54] Yu J P, Chen S, Fan F, et al. Tunable terahertz wave-plate based on dual-frequency liquid crystal controlled by alternating electric field[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 663-673.
- [55] Lee S, Kim W T, Kang J H, et al. Single-layer metasurfaces as spectrally tunable terahertz half- and quarter-waveplates[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(8): 7655-7660.
- [56] Shi Z J, Zhu A Y, Li Z Y, et al. Continuous angle-tunable birefringence with freeform metasurfaces for arbitrary polarization conversion[J]. *Science Advances*, 2020, 6(23): eaba3367.
- [57] Xu S T, Fan F, Cao H Z, et al. Liquid crystal integrated metamaterial for multi-band terahertz linear polarization conversion[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 093701.
- [58] Jung J, Park H, Park J, et al. Broadband metamaterials and metasurfaces: a review from the perspectives of materials and devices[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3165-3196.
- [59] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(8): 604-620.
- [60] 刘彻, 马骞, 李廉林, 等. 人工智能超材料[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823004.
Liu C, Ma Q, Li L L, et al. Artificial intelligence metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823004.
- [61] Burgos C M V, Yang T Q, Zhu Y H, et al. Design framework for metasurface optics-based convolutional neural networks[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(15): 4356-4365.
- [62] He W B, Tong M Y, Xu Z J, et al. Ultrafast all-optical terahertz modulation based on an inverse-designed metasurface[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 1099-1108.