

# 基于各向异性超材料的宽带高性能太赫兹透射式线性偏振转换器\*

康永强<sup>1)</sup> 孟田华<sup>1)</sup> 郝纪轩<sup>2)</sup> 田江锟<sup>2)</sup> 赵国忠<sup>2)†</sup>  
林巧文<sup>1)‡</sup> 胡慧杰<sup>3)</sup>

1) (山西大同大学, 山西省微结构电磁功能材料重点实验室, 大同 037009)

2) (首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

3) (北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

(2025年9月19日收到; 2025年10月28日收到修改稿)

基于各向异性超材料, 设计并制备了一种工作于太赫兹波段的宽带高效率的透射式线性偏振转换器. 通过对其感应的表面电流分析, 阐明了实现高效宽带转换的物理机制主要归因于3种不同谐振模式之间的协同作用. 结合偏振态分析(包括偏振旋转角和椭圆偏角的计算)进一步验证了其宽带高效率的线性偏振转换能力. 利用太赫兹时域光谱系统对所设计的偏振器件性能进行测试, 实验结果表明, 在0.53—1.77 THz范围内, 该偏振转换器可将入射太赫兹波的线偏振方向旋转90°, 偏振转换效率高于92%. 另外, 该透射式偏振转换器采用简单的双层金属结构, 易于加工并集成到太赫兹通信系统的偏振器件中, 该研究为发展高性能太赫兹透射式偏振转换器提供了有效方案, 对推进太赫兹通讯器件的实用化具有重要意义.

**关键词:** 太赫兹, 超材料, 偏振转换, 宽带

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251297

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251297

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波在生物医学成像<sup>[1,2]</sup>、无线通信<sup>[3]</sup>等领域展现出重要应用潜力. 然而, 太赫兹偏振转换器件的研发仍面临挑战<sup>[4-7]</sup>, 尤其是在实现宽带与高效率协同工作方面<sup>[8-10]</sup>. 超材料因其人工设计的亚波长结构特性<sup>[11-16]</sup>, 为实现电磁波偏振态的灵活调控提供了新途径.

近年来, 基于超材料的太赫兹偏振转换研究取得了显著进展<sup>[17-22]</sup>. Grady等<sup>[19]</sup>首次利用金属切割线超材料设计了太赫兹透射式偏振转换器并进

行了实验验证, 该项工作为后续太赫兹透射式偏振转换器设计奠定了基础. 例如, Liu等<sup>[20]</sup>通过单层超表面结构在0.91—1.45 THz范围内实现了90%的偏振转换效率; Zhou等<sup>[21]</sup>基于法布里-珀罗腔设计, 在0.288—1.6 THz范围内模拟获得99.9%的偏振转换率; Jing等<sup>[22]</sup>提出的双层超材料在0.55—1.37 THz范围内偏振转换率模拟值大于99.8%. 但是如何设计宽带和高效率的太赫兹偏振转换器仍然具有挑战性, 同时后续报道的研究设计工作大多数集中于数值仿真, 缺乏相关实验验证.

本文设计一种太赫兹透射式线偏振转换器结构 (terahertz transmissive polarization converter, TTPC), 并通过太赫兹时域光谱系统进行实验

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFB3200100)、山西大同大学云冈专项 (批准号: 2023YGYB24) 和山西大同大学学生创新项目 (批准号: XDC2024063) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guozhong-zhao@126.com

‡ 通信作者. E-mail: lqw16888@163.com

验证. 测试结果表明, 设计制备的偏振器件在 0.53—1.77 THz 范围内偏振转换率超过 92%, 相对带宽 108%. 太赫兹时域光谱系统的测量结果与仿真数据预测吻合, 验证了设计方法的有效性. 尽管存在插入损耗, 该偏振转换器在工作频段内, 仍保持了较高的偏振纯度和实际应用价值. 所设计的偏振器件通过 3 个耦合谐振间的协同作用实现宽带高效率的偏振转换, 感应的表面电流分布与斯托克斯参数分析证实了这一机理. 另外, 该透射式偏振转换器采用双层金属结构, 结构简单, 易于加工并集成到太赫兹通信系统的偏振器件中.

## 2 结构设计

设计的太赫兹透射式线偏振转换器 (terahertz transmissive polarization converter, TTPC) 晶格结构如图 1 所示, 其顶层为金属方片/开口环谐振器, 底层为金属光栅, 两层之间通过聚酰亚胺衬底隔离. TTPC 的优化后几何参数如下: 周期  $P = 100 \mu\text{m}$ , 线宽  $w = 12 \mu\text{m}$ , 开口环外径  $r = 88 \mu\text{m}$ , 开口间隙  $a = 8 \mu\text{m}$ , 金属方片边长  $s = 60 \mu\text{m}$ . 顶层金属图案层与底层金属光栅厚度均为  $t = 300 \text{ nm}$ , 所用金属材料均为金. 中间聚酰亚胺层厚度  $t_p = 30 \mu\text{m}$ . 采用有限积分法对该器件在 0.2—2 THz 频率范围内进行三维电磁场仿真. 仿真中金的电导率  $\sigma = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 聚酰亚胺材料的相对介电常数  $\epsilon_r = 3.5(1+0.05 i)$ .

## 3 结果与讨论

当 X 偏振方向的太赫兹波垂直入射并通过所设计的透射式偏振转换器 (TTPC) 后, 定义交叉

极化传输系数  $t_{yx} = |E_y^t|/|E_x^i|$  和同极化传输系数  $t_{xx} = |E_x^t|/|E_x^i|$ , 其中,  $E_x^i$  和  $E_y^i$  分别表示入射电磁波在 X 和 Y 方向上的电场振幅分量,  $E_x^t$  和  $E_y^t$  则分别表示透射电磁波在 X 和 Y 方向上电场振幅分量. 交叉极化透射率和同极化透射率可分别表示为

$$T_{yx} = \left| \frac{E_y^t}{E_x^i} \right|^2 = |t_{yx}|^2, \quad T_{xx} = \left| \frac{E_x^t}{E_x^i} \right|^2 = |t_{xx}|^2. \quad (1)$$

为评估 TTPC 的性能, TTPC 的偏振转换率 (polarization conversion ratio, PCR) 定义为<sup>[22-24]</sup>

$$\text{PCR} = \frac{t_{yx}^2}{t_{yx}^2 + t_{xx}^2}. \quad (2)$$

如图 2(a) 所示, 根据 (1) 式数值仿真得到在 0.53—1.77 THz 宽频带范围内, 交叉极化高于 60%, 同极化透射率小于 4%. 如图 2(b) 所示, 根据 (2) 式仿真计算得 0.53—1.77 THz 频段内 PCR 超过 99.5%, 意味着几乎所有透射功率均被转换为交叉极化分量. 值得注意的是, 尽管图 2(a) 中  $T_{yx}$  呈现出 3 个离散的谐振峰, 但图 2(b) 显示在 0.6—1.66 THz 范围内 PCR 值持续接近 100%. 这一现象可以通过 PCR 的定义予以合理解释. 由于  $\text{PCR} = t_{yx}^2/(t_{yx}^2 + t_{xx}^2)$ , 其值趋近于 1 的条件是  $T_{yx} \gg T_{xx}$ . 观察图 2(a) 可见, 在整个工作频带内, 尽管  $T_{yx}$  的幅值有所波动, 但同极化透射率  $T_{xx}$  始终被成功地抑制在极低水平 (<4%). 这种对  $T_{xx}$  的宽带抑制, 与  $T_{yx}$  的谐振平台相结合, 共同保证了器件在宽频范围内均能实现极高的偏振转换纯度. 这一结果充分证明了所设计的结构 TTPC 可作为传输型宽带高性能线偏振转换器. 图 2(a) 中 3 个显著的共振峰分别位于 0.6, 1.09, 1.66 THz 附近,

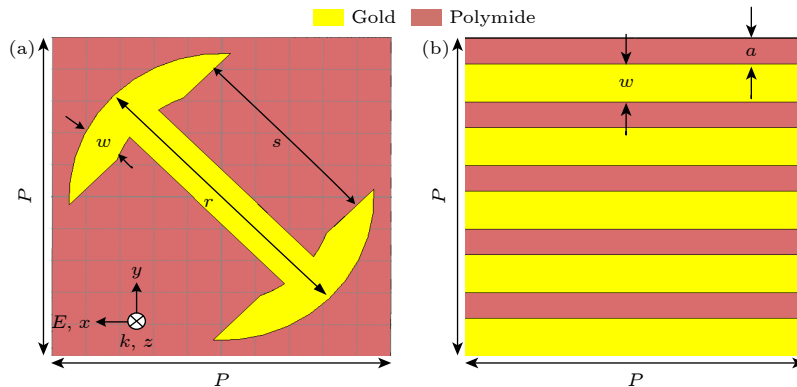


图 1 TTPC 的晶格结构 (a) 顶层; (b) 底层

Fig. 1. Lattice of the TTPC: (a) Top layer; (b) back layer.

后面通过表面电流分析证实宽带特性源于 3 个谐振模式的相长干涉 (图 4). 这些结果证实了该器件在宽频率范围内实现稳定偏振转换的能力.

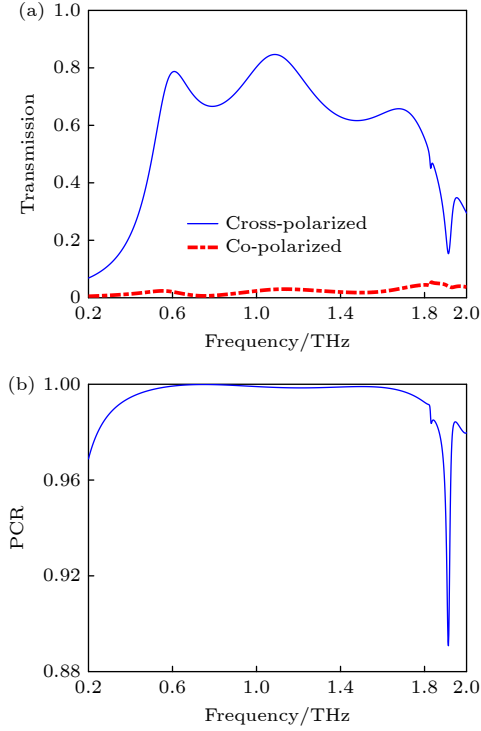


图 2  $X$  偏振激发下的传输特性 (a) 同偏振和交叉偏振透射率; (b) 偏振转换效率  
Fig. 2. Transmission characteristics for  $X$ -polarized excitation: (a) Co- and cross-polarized transmittance; (b) PCR.

为了更精确描述 TTPC 的线偏振转换特性, 采用斯托克斯 4 个参数来描述偏振态 [15,21,22]:

$$S_0 = t_{xx}^2 + t_{yx}^2, \quad S_1 = t_{xx}^2 - t_{yx}^2, \\ S_2 = 2t_{xx}t_{yx} \cos \delta, \quad S_3 = 2t_{xx}t_{yx} \sin \delta. \quad (3)$$

其中,  $\delta$  表示  $t_{yx}$  和  $t_{xx}$  之间的相位差. 偏振旋转角  $\psi$  和椭偏角 [12,19–21]  $\chi$  可通过 4 个斯托克斯参数表示为

$$\tan 2\psi = S_2/S_1, \quad (4)$$

$$\sin 2\chi = S_3/S_0. \quad (5)$$

由 (4) 式和 (5) 式计算, 可以得到偏振旋转角和椭偏角:

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2t_{xx}t_{yx} \cos \delta}{t_{xx}^2 - t_{yx}^2} \right), \quad (6)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{2t_{xx}t_{yx} \sin \delta}{t_{xx}^2 + t_{yx}^2} \right). \quad (7)$$

如图 3(a) 所示, 在 0.53—1.77 THz 范围内, 根据 (6) 式计算的偏振旋转角  $\psi$  收敛于  $90^\circ \pm 0.3^\circ$ ,

表明实现了接近理想的  $90^\circ$  偏振旋转. 由图 3(b) 可知, 在 0.53—1.77 THz 工作波段内, 根据 (7) 式计算的椭圆角  $|\chi| \leq 2.2^\circ$ , 表明输出始终保持准线性偏振波. 这些综合指标证实了该线偏振器件可实现高效的宽带偏振转换: 在工作频带内, 入射的  $X$  偏振波可转换为具有交叉偏振特性的  $Y$  偏振输出.

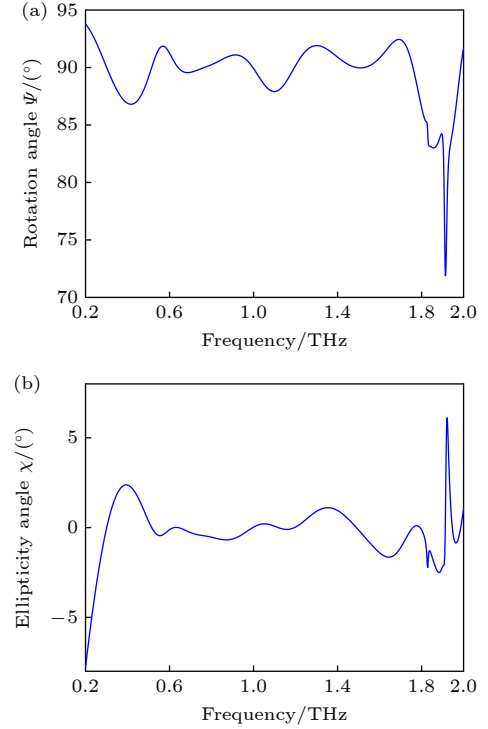


图 3  $X$  偏振照射下的偏振态变换 (a) 偏振旋转角  $\psi$ ; (b) 椭圆角  $\chi$   
Fig. 3. Polarization state transformation under  $X$ -polarized illumination: (a) Polarization rotation angle  $\psi$ ; (b) ellipticity angle  $\chi$ .

为阐明其内在物理机制, 图 4 给出了在 0.6, 1.09, 1.66 THz 三个谐振频率下  $X$  偏振方向入射激发时的表面电流分布. 如图 4(a) 所示, 在 0.6 THz 处顶层超表面层与底部光栅层之间出现对角反平行电流, 这些局域电流涡流形成了强磁偶极谐振. 如图 4 所示, 偏振转换机制源于该谐振磁场  $H$  与入射电场  $E_{\text{inc}}$  之间的相互作用. 将  $H$  场分解为正交分量:  $H_x$  (沿  $x$  轴方向) 和  $H_y$  (沿  $y$  轴方向). 由于  $H_y$  与入射电场  $E_{\text{inc}}$  正交, 且  $H_y$  与  $E_{\text{inc}}$  之间不存在相互作用, 因此该分量对偏振转换无贡献. 相反,  $H_x$  与  $E_{\text{inc}}$  方向一致, 通过产生交叉偏振电场从而实现有效的偏振转换. 如图 4(c) 所示, 在高谐振频率 1.66 THz 时, 出现类似于低频 0.6 THz (图 4(a)) 的磁偶极谐振机制, 反平行表面电流在顶层超表面结构与底层光栅上流动, 再次产

生局域  $H$  场. 谐振  $H$  场的  $x$  分量  $H_x$  与入射电场  $E_{inc}$  之间的相互作用同样实现了高效的偏振转换. 然而, 在中间谐振频率 1.09 THz 处 (如图 4(b) 所示), 顶层超表面和底层光栅上的表面电流呈平行分布, 导致产生电谐振而非磁谐振. 这些在不同频段被有效激发的多重谐振机制共同作用, 在宽光谱范围内实现了高效的线偏振转换.

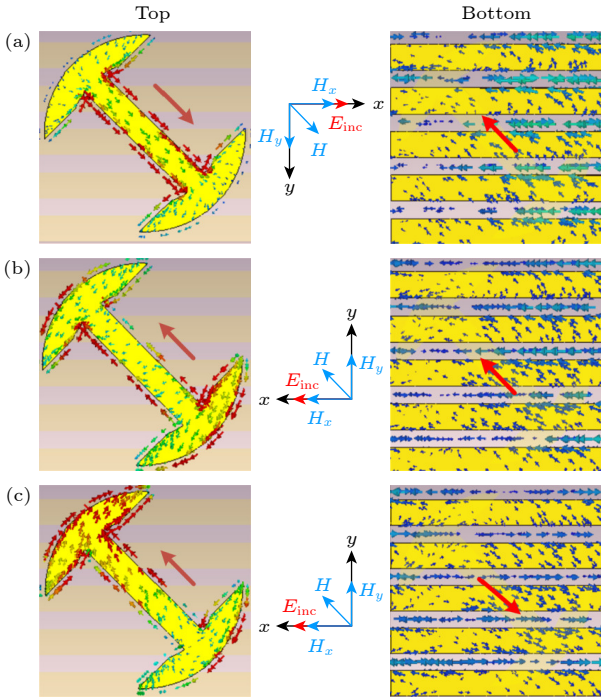


图 4 3 个工作频率处的表面电流分布 (a) 0.6 THz; (b) 1.09 THz; (c) 1.66 THz

Fig. 4. Surface current distribution at three resonant frequency: (a) 0.6 THz; (b) 1.09 THz; (c) 1.66 THz.

#### 4 实验及测量结果

为验证所设计 TTPC 的实用性, 采用光刻与

蚀刻工艺制备了样品. 图 5 所示为制备样品的显微镜观测图像. 利用如图 6 所搭建的太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统对其偏振转换性能进行测量, 光电导天线 (太赫兹发射器) 产生太赫兹波, 经一对焦距为 40 mm、直径为 20 mm 的聚乙烯透镜 (L1 与 L2) 准直并聚焦为直径 2 mm 的光斑照射样品. 置于 L1 和 L2 之间的起偏器 (P1) 确保产生沿  $X$  方向的线偏振光. 透射的太赫兹辐射再经第 2 组相同参数的透镜 (L3 与 L4) 准直和聚焦后, 由光电导偶极天线探测器 (太赫兹探测器) 接收. 通过旋转 L3 和 L4 之间的第 2 片起偏器 (P2), 可测量器件的同极化传输信号与交叉极化传输信号, 最终采用锁相放大器进行信号采集. 实验中使用的线栅偏振片 (P1 和 P2) 在太赫兹波段的消光比为 500:1. 尽管其偏振度并非理想的 1, 但经评估, 由此引入的系统测量误差对偏振转换率结果的影响小于 1%, 不影响本文的核心结论.

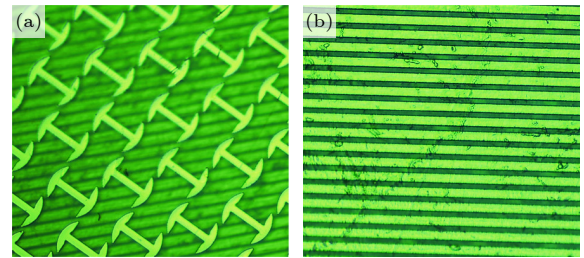


图 5 显微镜下制备的样品图像 (a) 顶层; (b) 底层

Fig. 5. An image of a sample prepared under a microscope: (a) Top; (b) bottom.

图 7 分别给出了在 0.2—2 THz 频率范围内正入射条件下用太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统测得的透射谱与 PCR. 与仿真结果相比, 图 7(a) 中的实验测量的透射率较低, 带宽略窄, 并存在轻微频率偏移, 但透过率仍然大于 45%. 这些偏差可能

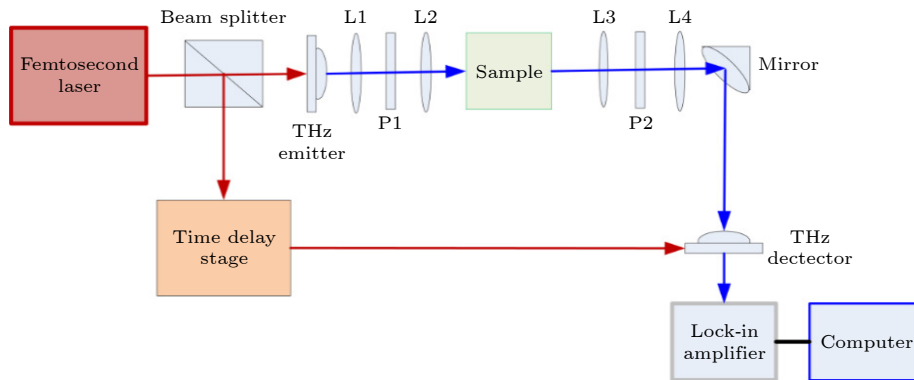


图 6 太赫兹时域光谱测量示意图

Fig. 6. Schematic of the THz-TDS measurement system.

源于太赫兹波段材料的色散和损耗, 导致透过率较低. 同时, 制备误差和样品有限尺寸的影响会导致测量带宽变窄, 频率偏移和抖动. 尽管存在这些误差影响, 图 7(b) 中实验测量得到的 PCR 在 0.53—1.77 THz 的工作频带内保持超过 92% 以上, 证实了该 TTPC 具备宽带高效偏振转换能力. 仔细对比图 7(a), (b) 中的仿真与测量结果可以发现, 在 0.53—1.77 THz 的工作频带内, 两者吻合良好, 验证了设计的正确性. 然而, 在 0.2—0.4 THz 的低频区域, 测量的 PCR 值与仿真结果存在偏差. 这主要归因于在该频段太赫兹信号强度较弱, 测量信噪比降低, 导致提取的传输系数存在较大误差. 此外, 衬底材料在实际中的色散与损耗特性也可能与仿真模型存在差异. 由于该频段远离器件的主要工作带宽, 此差异不影响本文关于器件在 0.53—1.77 THz 范围内具有宽带高效偏振转换能力的主要结论.

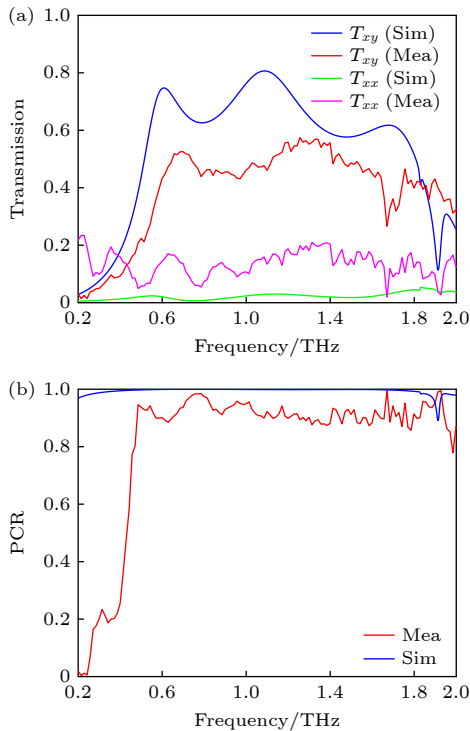


图 7 测量的 X 偏振激发下传输特性 (a) 同偏振和交叉偏振透射率; (b) PCR  
 Fig. 7. Measured transmission characteristics for X-polarized excitation: (a) Co- and cross-polarized transmittance; (b) PCR.

插入损耗是评估透射式器件性能的一个关键参数, 对于线性偏振转换器, 其插入损耗主要由交叉极化透射率决定, 计算公式为  $IL = -10\log_{10}(T_{yx})$ . 图 8 给出了测量的插入损耗与仿真对比. 可以看到

在工作频带 (0.53—1.77 THz) 内, 测量插入损耗的范围约为 5.5—12 dB. 与仿真结果相比, 实验测量的插入损耗偏大并存在轻微频率偏移. 测量插入损耗较大的原因包括: 1) 金属损耗. 金属金在太赫兹频段并非理想导体, 存在欧姆损耗. 2) 介质损耗. 聚酰亚胺衬底在太赫兹波段存在吸收损耗. 3) 谐振损耗. 为了实现宽带高效的偏振转换, 我们设计的结构激发了多个强谐振模式. 这些谐振在有效调制偏振的同时, 也会不可避免地导致一部分能量被损耗掉. 需要指出的是, 尽管存在插入损耗, 但器件核心的偏振转换功能表现卓越, PCR 始终高于 92%, 且交叉极化透射率高于 45%, 这表明转换后的太赫兹波信号强度对于许多实际应用 (如太赫兹成像、传感或通信系统) 而言是足够强且完全可用的. 在超材料偏振转换器设计中, 为实现超宽带和高转换率, 一定的插入损耗是普遍接受的权衡.

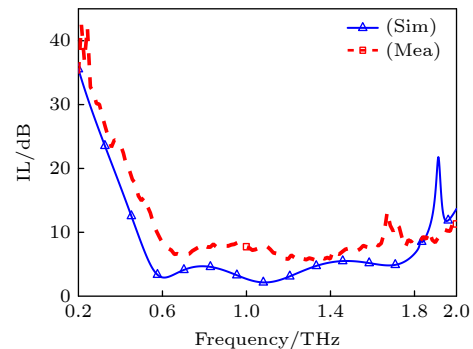


图 8 测量的 X 偏振激发下的插入损耗  
 Fig. 8. Measured insertion loss for X-polarized excitation.

表 1 将所设计的太赫兹透射式偏振转换器 (TTPC) 与文献中所报道的偏振转换器进行了对比. 显然, 与大多数已报道的偏振转换器相比, 本文设计偏振器 TTPC 实现了更宽的工作带宽. 尽管 Grady 等<sup>[19]</sup> 报道了更高的相对带宽 (111%), 但其双层衬底结构显著的增加了结构厚度 ( $0.071\lambda$ ) 和加工复杂性, 而本文设计偏振器 TTPC 厚度为  $0.053\lambda$ . 对比文献<sup>[21]</sup> 报道的偏振转换器, 虽然厚度仅  $0.045\lambda$ , 但是分形带宽只有 85.1%, 并且偏振转换率 99% 只是仿真数值, 没有实验验证. 对比报道的文献<sup>[19–25]</sup> 发现, 本文所设计偏振转换器 TTPC 实测超过 92% 的偏振转换率和 108% 的相对带宽, 优于相关报道的. 因此, 所设计的 TTPC 在宽带操控和转换效率方面均展现出更优越的性能.

表 1 本文与文献中报道的偏振转换器性能比较

Table 1. Comparison of the performance of the polarization converter in this paper with that reported in the literature.

文献	$P$	$h$	OB/THz	FB/%	PCR/%
[19]	0.178 $\lambda$	0.071 $\lambda$	0.52—1.82	111	Not given
[20]	0.576 $\lambda$	Not given	0.91—1.45	45.8	90(仿真)
[21]	0.18 $\lambda$	0.045 $\lambda$	0.54—1.34	85.1	99 (仿真)
[22]	0.183 $\lambda$	0.055 $\lambda$	0.55—1.37	85.4	>99(仿真)
[25]	0.365 $\lambda$	0.058 $\lambda$	2.19—2.47	12	90(仿真)
Our work	0.177 $\lambda$	0.053 $\lambda$	0.53—1.77	108	>92(测量)

注:  $P$ 为偏振转换器晶格长度;  $h$ 为基底厚度; OB为操控带宽; FB为分形带宽;  $\lambda$ 为最大操控波长.

## 5 结 论

本文设计了一种具有卓越宽带性能和高转换效率的太赫兹透射式线性偏振转换器. 仿真与实验结果均表明, 该器件在 0.53—1.77 THz 的工作带宽(相对带宽: 108%) 范围内, 偏振转换效率超过 92%. 通过对其感应的表面电流分析, 阐明了实现高效宽带转换的物理机制主要归因于 3 种不同谐振模式之间的协同作用. 结合偏振态分析(包括偏振旋转角和椭圆偏角的计算)进一步验证了 TTPC 宽带高效率的线性偏振转换能力. 尽管存在插入损耗, 该偏振转换器在工作频段内, 仍保持了较高的偏振纯度和实际应用价值. 此外, 该透射式偏振转换器采用简单的双层金属结构, 易于加工并集成到太赫兹通信系统的偏振器件中, 具备显著的实际应用优势.

## 参考文献

- [1] Seo M, Park H R 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1900662  
 [2] Kang Y Q, Xi H Y, Meng T H, Lin Q W, Dong L J 2022

*Results Phys.* **37** 105514

- [3] Jin J S, Ma C J, Zhang Y, Zhang Y B, Bao S Q, Li M, Li D M, Liu M, Liu Q Z, Zhang Y X, 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 084202 (in Chinese) [金嘉升, 马成举, 张垚, 张跃斌, 鲍士仟, 李咪, 李东明, 刘洛, 刘芊震, 张贻歆 2023 物理学报 **72** 084202]  
 [4] Tonouchi M 2007 *Nat. Photonics* **1** 97  
 [5] Yang X W, Zhao F 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 0806002 (in Chinese) [杨雄伟, 赵峰 2022 光学学报 **42** 0806002]  
 [6] Wang Y Y, Li H B, Wang Z L, Wu L M, Ge M L, Xu D G, Chen T N, Feng H, Yao J Q 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1017001 (in Chinese) [王与焯, 李海滨, 王泽龙, 武丽敏, 葛梅兰, 徐德刚, 陈图南, 冯华, 姚建铨 2022 光学学报 **42** 1017001]  
 [7] Shen Y C, Lo T, Taday P F, Cole B E, Tribe W R, Kemp M C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 241116  
 [8] Herrmann M, Tabata H, Kawai T 2025 *International Quantum Electronics Conference San Jose, CA, USA, July 11, 2005* p1240  
 [9] Xue K, Li Q, Li Y D, Wang Q 2012 *Opt. Lett.* **37** 3228  
 [10] Wang H, Ling F, Zhang B 2020 *Opt. Express* **28** 36316  
 [11] Cai H 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800257  
 [12] Zhu H L, Zhang Y, Ye L F, Li Y K, Xu Y H, Xu R 2020 *Opt. Express* **28** 414039  
 [13] Tao Z, Wan X, Pan B C, Cui T J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 121901  
 [14] Zhang X G, Hu Q C, Li Y, Huang Z X, Xu L, Quan Y, Zhu Q, Wang B Y, Chen X X, Cui T J, Jiang W X 2024 *Photonics Res.* **12** 2660  
 [15] Gao C Y, Kang Y Q, Meng T H, Zhao G Z, Hu H J 2025 *Phys. Scr.* **100** 075563  
 [16] Gu S Y, Wang C, Gao Z Y, Gao L, Drolgar, Gao F, Wang S J, Xu Y D 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 090401  
 [17] Zhang G Z, Zhou M M, Xiang H, Han D Z 2025 *Chin. Phys. B* **34** 084201  
 [18] Chen Y, Cao W H, Li J Q, Zhang M Z, Du X Y, Gao D S, Li P L 2025 *Chin. Phys. B* **34** 044205  
 [19] Grady N K, Heyes J E, Roy D, Yong Z, Reiten M T, Azad A K 2013 *Science* **340** 1304  
 [20] Liu W W, Chen S Q, Li Z C, Cheng H, Yu P, Li J X 2015 *Opt. Lett.* **40** 3185  
 [21] Zhou Q G, Li Y, Zhen Y Z, Yao N J, Huang Z M 2023 *Chin. Phys. B* **32** 024201  
 [22] Jing X F, Gui X C, Zhou P W, Hong Z 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 2322  
 [23] Yang J N, Zhang Y T, Tang M C, Huang Y J, Xie X 2023 *J. Appl. Phys.* **133** 083101  
 [24] Al-Naib I A I, Jansen C, Born N, Koch M 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 091107  
 [25] Cheng Z Z, Cheng Y Z 2019 *Opt. Commun.* **435** 178

# A broadband high-performance terahertz transmissive linear polarization converter using anisotropic metamaterials\*

KANG Yongqiang<sup>1)</sup> MENG Tianhua<sup>1)</sup> HAO Jixuan<sup>2)</sup> TIAN Jiangkun<sup>2)</sup>  
 ZHAO Guozhong<sup>2)†</sup> LIN Qiaowen<sup>1)‡</sup> HU Huijie<sup>3)</sup>

1) (*Shanxi Province Key laboratory of Microstructure Electromagnetic Functional Materials, Shanxi Datong University, Datong 037009, China*)

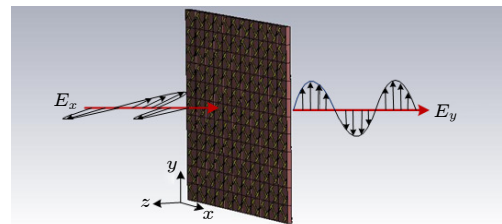
2) (*Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

3) (*Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China*)

( Received 19 September 2025; revised manuscript received 28 October 2025 )

## Abstract

Terahertz (THz) polarization converters are essential components for advancing THz applications in imaging, sensing, and high-speed communications. However, achieving both broad bandwidth and high conversion efficiency remains a significant challenge. In this work, we propose, fabricate, and experimentally validate a transmissive linear polarization converter (TTPC) operating in the terahertz band by utilizing a bilayer metallic metamaterial structure. The device consists of a top-layer metasurface with a square patch and split-ring resonator and a bottom-layer metallic grating, separated by a polyimide substrate. Through full-wave electromagnetic simulations and surface current analysis, we reveal that the high-performance broadband polarization conversion arises from the synergistic interaction among three distinct resonance modes. Stokes parameter analysis further confirms that the polarization rotation angle remains stable at approximately  $90^\circ$ , with near-linear output across the operational band. Experimental characterization using a terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system demonstrates that the device achieves a polarization conversion ratio (PCR) exceeding 92% over a broad frequency range of 0.53–1.77 THz, corresponding to a relative bandwidth of 108%. The measured insertion loss varies between 5.5 dB and 12 dB within the operating band, which is attributed to Ohmic loss, dielectric absorption, and resonant energy dissipation. Despite these losses, the converter maintains high polarization purity and practical utility. With a compact and fabrication-friendly architecture, the proposed TTPC provides a viable route to high-performance, broadband polarization control in terahertz systems, thereby paving the way for its integration into next-generation THz communication and imaging devices.



**Keywords:** terahertz, metamaterial, polarization converter, wideband

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251297

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251297

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2021YFB3200100), the Yungang Special Project of Shanxi Datong University, China (Grant No. 2023YGYB24), and the Student Innovation Project of Shanxi Datong University, China (Grant No. XDC2024063).

† Corresponding author. E-mail: [guozhong-zhao@126.com](mailto:guozhong-zhao@126.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [lqw16888@163.com](mailto:lqw16888@163.com)



## 基于各向异性超材料的宽带高性能太赫兹透射式线性偏振转换器

康永强 孟田华 郝纪轩 田江锴 赵国忠 林巧文 胡慧杰

### A broadband high-performance terahertz transmissive linear polarization converter using anisotropic metamaterials

KANG Yongqiang MENG Tianhua HAO Jixuan TIAN Jiangkun ZHAO Guozhong LIN Qiaowen HU Huijie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 030403 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251297

CSTR: 32037.14.aps.75.20251297

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251297>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

超材料赋能先进太赫兹生物化学传感检测技术的研究进展

Research progress of metamaterials powered advanced terahertz biochemical sensing detection techniques

物理学报. 2021, 70(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211752>

基于V形超表面的透射式太赫兹线偏振转换器

Transmission polarization converter based on V-shaped metasurface in terahertz region

物理学报. 2022, 71(23): 230701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221259>

宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面

Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion terahertz metasurface

物理学报. 2024, 73(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240525>

基于超材料复合结构的太赫兹液晶移相器

Terahertz liquid crystal phase shifter based on metamaterial composite structure

物理学报. 2022, 71(17): 178701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212400>

基于相变材料的慢光和吸收可切换多功能太赫兹超材料

Switchable multifunctional terahertz metamaterial with slow-light and absorption functions based on phase change materials

物理学报. 2023, 72(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222336>

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2022, 71(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>