

# 基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器\*

罗曼<sup>1)2)3)</sup> 徐振<sup>1)2)3)</sup> 李吉宁<sup>1)2)3)†</sup> 陈锴<sup>1)2)3)</sup> 王与焯<sup>1)2)3)</sup>  
钟凯<sup>1)2)3)</sup> 徐德刚<sup>1)2)3)‡</sup> 姚建铨<sup>1)2)3)</sup>

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (天津大学, 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (天津大学, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2025年9月18日收到; 2025年10月28日收到修改稿)

针对反射信号携带有效信息的太赫兹系统, 如太赫兹时域反射系统、全双工通信系统等, 现有非互易太赫兹器件在实现隔离过程中常将反射信号视为干扰信号而进行削减, 无法适配上述系统对于在隔离的同时定向导出并检测反射信号的需求. 针对这一局限, 本研究创新性地提出一种基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器, 该器件通过正交双重光栅将线偏振光转换为特定圆偏振态, 结合 InSb 材料的磁光选择性, 构建非互易传输路径; 并在磁光调控机制中创新融入分支波导多端口特性, 同步实现入射/反射信号隔离与反射信号定向导出. 通过仿真结构尺寸与外界环境对该器件非互易特性的影响得到: 在温度为 250 K, 磁场 0.3 T 条件下, 该器件在 0.73 THz 处实现了 63.12 dB 的高隔离度, 且在 0.78 THz 处双向传输效率达到 36.31%, 3 dB 带宽达到 0.25 THz. 该器件具有高隔离度、低工作磁场强度、集成双重功能等优势, 为太赫兹应用于无损检测、通信等更多领域提供必要支撑.

**关键词:** 非互易传输, 太赫兹, 分支波导, 磁光选择性

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251289

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251289

## 1 引言

非互易太赫兹器件是指仅允许太赫兹波在特定的方向上传输, 对其他传输方向上的电磁波有强衰减作用的器件, 这种特性使其能够打破时间反演对称性, 从而实现传输不可逆的功能<sup>[1]</sup>. 非互易太赫兹器件可以细分为太赫兹隔离器、环行器和多端口的太赫兹单向传输器件. 这些器件是实现太赫兹波有效管理和控制的关键, 在保护敏感脆弱的太赫兹源和探测器、减少信号干扰、阻抗匹配以及提高系统整体性能等方面发挥着至关重要的作用<sup>[2]</sup>.

现有非互易太赫兹器件大多为两端口的隔离

器<sup>[3,4]</sup>或三端口的环行器<sup>[5-7]</sup>, 能够隔离入射信号与反射信号, 保护太赫兹源与探测器. 2021年, Yuan等<sup>[8]</sup>通过优化谐振腔, 在 0.47 THz 处实现 52 dB 的隔离度和 7.5 dB 的插入损耗, 同时可通过热调谐方法和周期谐振改变隔离器的中心工作频率. 同年, Wei等<sup>[7]</sup>设计了一个在太赫兹频段工作且无需施加外部磁场的环行器, 实现了 20.9 dB 的隔离度以及 16.6 dB 的方向性. 2024年 Dong等<sup>[9]</sup>提出基于一维磁化 InSb 层状光子结构的器件, 其可以实现磁控隔离器和开关的功能, 隔离度和插入损耗分别达到 34 dB 和 0.0269 dB, 角度稳定范围在 17°—31° 之间. 2025年, Liu等<sup>[10]</sup>提出一种非对称的凹槽型硅光子晶体圆柱形超表面, 通过产生高  $Q$  准束缚态

\* 国家自然科学基金 (批准号: U22A20123, G2175182, G2275193, U22A20353, G2405214) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiningli@tju.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xudegang@tju.edu.cn

增强非线性, 在太赫兹入射强度达到  $0.28 \text{ MW/cm}^2$  时, 该结构隔离度为  $34.28 \text{ dB}$ . 但这些器件在实现隔离过程中, 通常将反射信号视为扰乱信息而将其散射、削减, 从而无法保证反射信号的定向输出. 对于反射信号中存在有效信息的检测传输系统, 如太赫兹时域反射系统<sup>[11,12]</sup>、全双工太赫兹通信系统<sup>[13,14]</sup>等, 亟须一种能够实现太赫兹反射信号的定向输出的非互易传输器件.

本文提出了一种基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器, 该器件通过相互正交的两层光栅将线偏振光转换为特定圆偏振态, 基于 InSb 磁光材料的磁光选择性, 对不同圆偏振光呈现不同传输特性, 从而构建非互易传输通道; 此外, 创新地融入分支波导的多端口特性, 在隔离入射和反射信号的同时, 将携带信息的反射信号定向导出. 该器件能减少入射信号对反射信号的干扰, 简化后续降噪、定位识别有效反射信号的处理步骤, 提升系统对微弱信号的探测性能.

## 2 结构设计

本研究提出一种基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器, 其结构图如图 1(a) 所示, 该器件由分支波导与 InSb 复合结构构成.

分支波导常作为定向耦合器按照一定功率比例分配或合成太赫兹波, 由主线矩形波导以及分支构成. 其基于多端口架构的特性, 为分离入射信号与反射信号提供物理空间支撑, 并通过奇偶模理论<sup>[15,16]</sup>设计结构尺寸, 调控太赫兹波的传输路径. 整体材料为金属、中心填充为空气, 两个主线矩形波导的截面尺寸相同并遵循国际标准 WR-1.5. 分支长度均为  $h_0$ , 截面宽度与主线矩形波导截面宽度相等, 为降低器件损耗, 设定分支波导耦合比为  $0 \text{ dB}$ , 通过奇偶模理论可得到两端和中心分支的高度比例因子  $a$  和  $b$  均为  $0.618$ , 进而得到分支的截面高度. 虽然分支数目与分支波导的带宽成正比, 但增加分支数目, 不仅会增加插入损耗, 且会导致分支尺寸减小, 提升加工难度, 因此综合考虑后选择五分支, 相邻分支的中心间距依次为  $J_{1a1b}$ ,  $J_{1b2b}$ ,  $J_{2b3b}$ ,  $J_{3b2a}$ .

磁光材料如锑铁氧体<sup>[17]</sup>、HgTe<sup>[18]</sup> 和石墨烯<sup>[1,19]</sup> 等在高性能隔离器、偏振控制器等领域发挥着不可替代的作用, 这些材料具有很大的费尔德常数, 可

以基于法拉第效应旋转偏振平面, 但由于材料常见厚度相对于太赫兹波长来说较薄, 导致法拉第旋转角受到限制, 且需要较强的磁场和较低的温度. 然而, 半导体 InSb<sup>[20,21]</sup> 具有较高的电子迁移率、较低的有效质量和较窄的禁带宽度, 在较弱的外磁场作用下具有显著的磁光效应; 另外, 其回旋频率  $\omega_c = eB/m^*$  处于太赫兹频段, 且太赫兹波在 InSb 中传输损耗小, 因此 InSb 材料是太赫兹波段实现非互易传输的优良磁光材料. 在 InSb 材料内, 逆时针旋转波 (counterclockwise rotation wave, CCW) 和顺时针旋转波 (clockwise wave, CW) 的传播常数不同, 传输特性具有较大差异. 因此在特定温度、磁场、频段和 InSb 层高度的条件下, 存在 InSb 对 CCW 波显示介电特性——允许波的传输, 而对 CW 波展现金属特性——使得波在传输过程中迅速衰减和反射的情况, 即允许 CCW 波传输而阻碍 CW 波的传输, 这是实现非互易的理论基础.

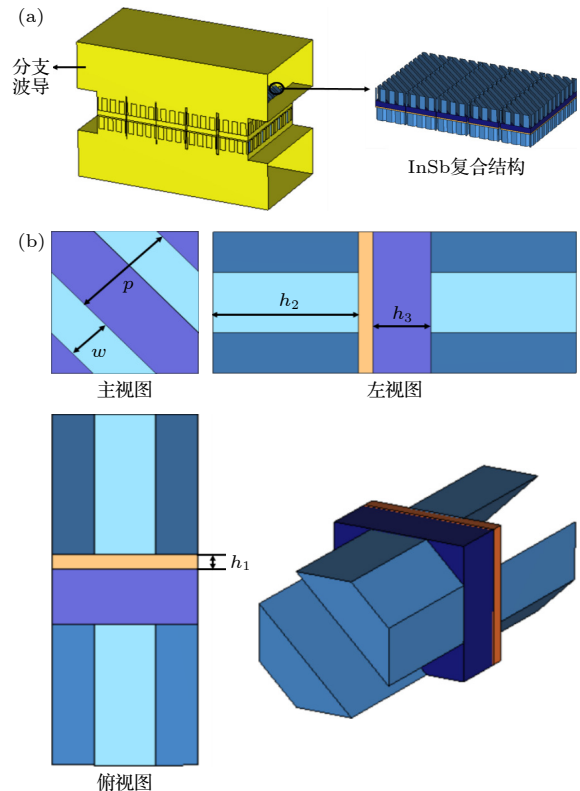


图 1 基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器结构图 (a) 整体结构图; (b) InSb 复合结构重复单元结构图与三视图 Fig. 1. Schematic diagrams of the four-port nonreciprocal terahertz device based on InSb-branch waveguide: (a) Overall structure; (b) schematic diagram and standard three-view drawings of the unit cell in the InSb composite structure.

InSb 复合结构位于分支波导的分支内部中心位置, 在 InSb 对不同圆偏振波的选择性的基础上, 引入双层正交光栅, 将不同方向入射的线偏光转换为 CCW 波与 CW 波, 从而实现非互易的传输. 具体可分为四层结构: 互为正交关系的两层光栅、衬底层、InSb 层, 整体的长宽尺寸与分支的截面尺寸一致. 图 1(b) 展示的是 InSb 复合结构的重复单元的结构图与三视图, 光栅由无损耗太赫兹电介质材料高阻硅作为脊、空气作为槽周期性排列而构成, 硅条宽度为  $w$ , 重复周期为  $p$ , 高度为  $h_2$ , 两层光栅互为正交关系, 从而实现线偏振光从不同方向入射 InSb 复合结构时, 由光栅转换为不同方向的圆偏光, 配合 InSb 材料对不同圆偏振光具有选择性的特性, 可以实现非互易传输. 衬底层的材料选用 GaAs, 高度为  $h_3$  作为阻抗匹配层, 起到机械支撑的作用. InSb 层位于光栅层与衬底层之间, 高度为  $h_1$ .

基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器由端口 1、端口 2、端口 3、端口 4 构成, 为实现分离并隔离入射与反射信号, 提升检测信号的信噪比. 本研究设计器件的理想太赫兹波传输路径图如图 2 所示, 太赫兹波从端口 3 入射, 沿着实线箭头方向从端口 1 出射; 携带有效信息的反射太赫兹波从端口 1 入射, 沿着虚线箭头由端口 2 出射, 实现入射信号与反射信号的非互易性传输. 因此为了评价太赫兹隔离器的性能, 提出双向传输效率和隔离度两个参数.

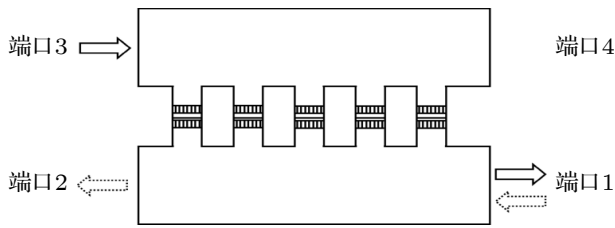


图 2 太赫兹波传输路径图

Fig. 2. Schematic diagram of terahertz wave propagation path.

双向传输效率  $\eta$  指幅值为 1 的太赫兹波从端口 3 入射并传输至端口 1 后, 在与端口 1 连接的器件中经理想的传输过程后, 反射回端口 1, 最终在端口 2 所能接收到的信号幅值. 双向传输效率反映太赫兹波在入射信号正向传输与反射信号反向探测两个过程中总的传输损耗, 双向传输效率越高, 传输损耗越低. 由  $S$  参数表示如下式所示:

$$\eta = S_{13} \times S_{21}. \quad (1)$$

隔离度  $I_{\text{solution}}$  指由端口 3 传输至端口 1 的信号强度与由端口 1 传输至端口 3 的信号强度之间的差值. 隔离度反映器件对入射信号与反射信号的隔离效果, 高隔离度的太赫兹隔离器能更好地保护太赫兹源与探测器, 并避免入射信号对有效反射信号的干扰. 由  $S$  参数表示如下式所示:

$$I_{\text{solution}} = S_{13} - S_{31}(\text{dB}). \quad (2)$$

### 3 仿真分析与结果讨论

为研究器件参数对太赫兹隔离器的传输与隔离特性的影响并优化该器件的结构设计, 利用数值仿真软件分析分支的长度与相邻中心间距、InSb 层高度、光栅层高度、衬底层高度等参数变化时器件性能的变化规律. 采用频域求解器, 仿真频段在 0.5 至 0.9 THz, 宽频的设定可以分析不同频段状态下器件的工作性能. 不同频段对应的磁光材料 InSb 的介电常数不同, 对圆偏振光的选择性也会发生变化, 并且频段变化会影响矩形波导内的传输模式, 在高频段除基模外会激发高阶模, 因此不同频段器件性能的变化规律不尽相同, 下文分析时常分频段进行讨论. 在讨论过程中, 除唯一变量外, 其他参数保持不变, 如表 1 和表 2 所列.

表 1 环境参数设定

Table 1. Environmental parameter configuration.

外界环境设置	
温度 $t/\text{K}$	250
磁场 $B/\text{T}$	0.3

表 2 器件参数设定

Table 2. Device parameter configuration.

结构参数	结构尺寸/ $\mu\text{m}$
InSb 层高度 $h_1$	5
光栅层高度 $h_2$	50
衬底层高度 $h_3$	20
光栅周期 $p$	25
光栅条宽度 $w$	15
中心分支的高度比例因子 $b$	0.618
两端分支的高度比例因子 $a$	0.618
分支的长度 $h_0$	170
相邻分支中心间距 $j_{1a1b}$	125
相邻分支中心间距 $j_{1b2b}$	125
相邻分支中心间距 $j_{2b3b}$	120
相邻分支中心间距 $j_{3b2a}$	120

### 3.1 器件结构参数对器件影响因素分析

为探讨分支的长度  $h_0$  的影响, 将其从  $110\ \mu\text{m}$  增加至  $190\ \mu\text{m}$ , 步长为  $10\ \mu\text{m}$ . 由图 3(a) 可知, 在  $0.55$  至  $0.9\ \text{THz}$  频段内, 双向传输效率随着  $h_0$  的增加而增加, 在  $h_0$  取  $190\ \mu\text{m}$  时, 双向传输效率在  $0.78\ \text{THz}$  处取得最大值  $37.98\%$ . 图 3(b) 显示对于隔离度, 在  $0.5$ — $0.67\ \text{THz}$  的 I 频段内, 隔离度曲线存在一个正峰, 随着  $h_0$  增加, 隔离度先增加后减小, 最大值在  $h_0 = 130\ \mu\text{m}$  时取得, 且正峰对应的频点基本不变; 在  $0.67$ — $0.76\ \text{THz}$  的 II 频段内, 隔离度曲线存在双峰, 对处于相对低频的峰来说, 随着  $h_0$  增加, 隔离度在峰值上呈现先增加后减小的趋势, 最大值在  $h_0 = 170\ \mu\text{m}$  时取得, 在频谱上逐渐右移; 对处于相对高频的峰来说, 峰所对应的频点同样呈现逐渐右移的趋势. 分支长度的增加显著提升了器件的双向传输效率, 这主要归因于波导耦合效应的增强, 为太赫兹波在分支波导中的干涉与能量重分配提供更充分的空间, 从而减小器件的插入损耗, 然而隔离度的响应更为复杂, 当分支

长度改变时, 影响了正向与反向传输路径的相位差, 从而改变了在 InSb 复合结构内发生相长或相消干涉的频率点, 因此综合考虑在  $170\ \mu\text{m}$  时实现高效传输和高隔离度的平衡.

相邻分支中心间距  $j_{1a1b}$ ,  $j_{1b2b}$ ,  $j_{2b3b}$  和  $j_{3b2a}$  对基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器的影响如图 4 所示, 这 4 个几何参数的变化对器件传输性能的影响类似, 具有相似的变化趋势. 对于双向传输效率, 当中心间距从  $120\ \mu\text{m}$  增加至  $140\ \mu\text{m}$  时, 曲线之间差距较小, 即中心间距对双向传输效率影响较小. 对于隔离度, 曲线均在  $0.73\ \text{THz}$  附近存在尖峰,  $j_{1a1b}$  和  $j_{1b2b}$  对应峰值先增大后减小, 在  $125\ \mu\text{m}$  时隔离度取最大,  $j_{2b3b}$  和  $j_{3b2a}$  对应峰值一直减小, 在  $120\ \mu\text{m}$  时隔离度取最大. 仿真结果反映了分支波导中奇偶模场分布的特性, 分支间距直接决定了各分支激发的奇模和偶模之间的相对相位和耦合强度, 当间距偏离最优值时, 会破坏多路信号在输出端口进行理想相干叠加的条件, 导致能量不能完全集中于目标端口, 而是泄漏到其他端口或形成回波损耗, 从而影响传输性能.

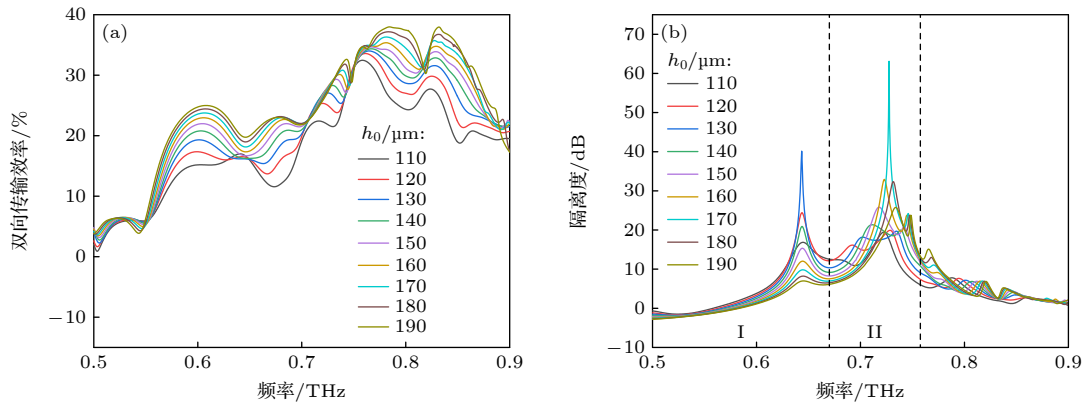
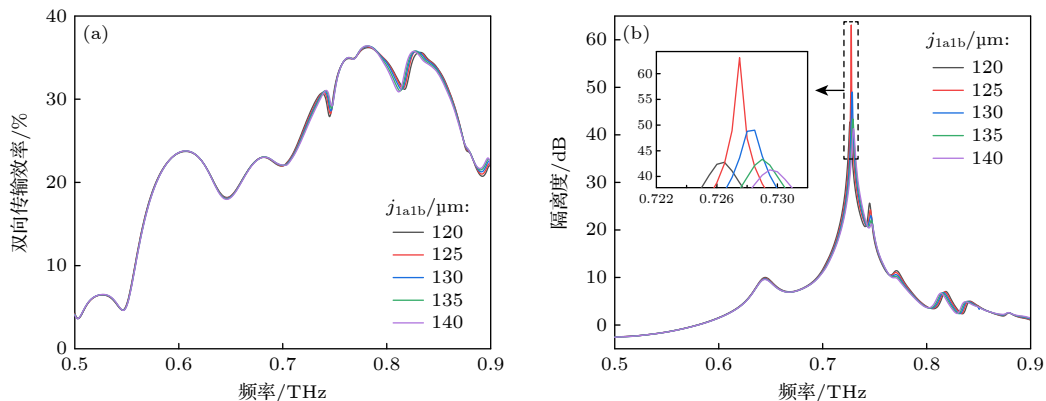


图 3 分支的长度对器件性能的影响 (a) 双向传输效率变化关系; (b) 隔离度变化关系

Fig. 3. Impact of branch length on device performance: (a) Dependence of bidirectional transmission efficiency; (b) dependence of isolation characteristics.



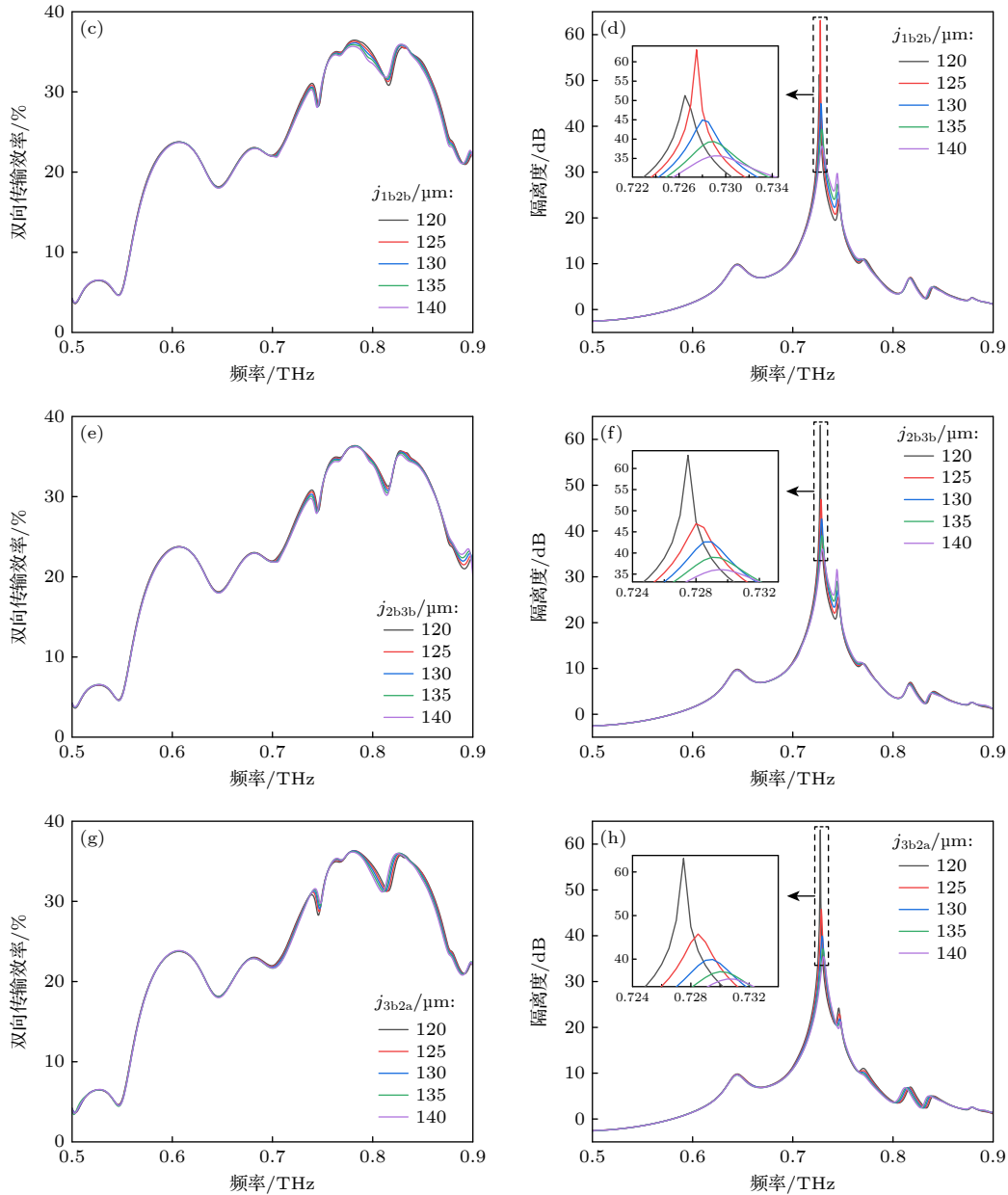


图4 相邻分支中心间距  $j_{1a1b}$ ,  $j_{1b2b}$ ,  $j_{2b3b}$ ,  $j_{3b2a}$  与双向传输效率、隔离度的关系图 (a)  $j_{1a1b}$  与双向传输效率的关系图; (b)  $j_{1a1b}$  与隔离度的关系图; (c)  $j_{1b2b}$  与双向传输效率的关系图; (d)  $j_{1b2b}$  与隔离度的关系图; (e)  $j_{2b3b}$  与双向传输效率的关系图; (f)  $j_{2b3b}$  与隔离度的关系图; (g)  $j_{3b2a}$  与双向传输效率的关系图; (h)  $j_{3b2a}$  与隔离度的关系图

Fig. 4. Correlation between center-to-center spacings of adjacent branches ( $j_{1a1b}$ ,  $j_{1b2b}$ ,  $j_{2b3b}$ ,  $j_{3b2a}$ ) and bidirectional transmission efficiency/isolation characteristics: (a) Relationship between  $j_{1a1b}$  and bidirectional transmission efficiency; (b) relationship between  $j_{1a1b}$  and isolation; (c) relationship between  $j_{1b2b}$  and bidirectional transmission efficiency; (d) relationship between  $j_{1b2b}$  and isolation; (e) relationship between  $j_{2b3b}$  and bidirectional transmission efficiency; (f) relationship between  $j_{2b3b}$  and isolation; (g) relationship between  $j_{3b2a}$  and bidirectional transmission efficiency; (h) relationship between  $j_{3b2a}$  and isolation.

图5展示了InSb层高度  $h_1$  从  $2 \mu\text{m}$  增加至  $15 \mu\text{m}$  过程中, 双向传输效率与隔离度的变化情况。如图5(a)所示, 当  $h_1$  小于等于  $5 \mu\text{m}$  时, 双向传输效率的变化规律与频率相关, 在  $0.5\text{--}0.65 \text{ THz}$  的 I 频段, 随着  $h_1$  的增大, 双向传输效率减小, 在  $0.65\text{--}0.73 \text{ THz}$  的 II 频段与  $0.8\text{--}0.9 \text{ THz}$  的 VI

频段, 随着  $h_1$  增大, 双向传输效率呈单调递增趋势, 在  $0.73\text{--}0.75 \text{ THz}$  的 III 频段、 $0.75\text{--}0.79 \text{ THz}$  的 IV 频段与  $0.79\text{--}0.8 \text{ THz}$  的 V 频段, 双向传输效率均呈现先增加后减小的趋势, 且分别当  $h_1$  取 3, 4 和  $3 \mu\text{m}$  时双向传输效率最优。如图5(b)所示, 当  $h_1$  大于  $5 \mu\text{m}$  时, 随着  $h_1$  增大, 双向传输效

率在 0.5—0.87 THz 呈现单调递减. 对于隔离度, 在 0.57—0.67 THz 的 VII 频段, 随着  $h_1$  增大, 隔离度逐渐降低, 在 0.67—0.78 THz 的 VIII 频段, 隔离度存在一个正峰, 从峰值维度来看, 隔离度先增大后减小, 在  $h_1$  取  $5\ \mu\text{m}$  时取到最大值, 从频域维度来看, 在  $h_1$  低于  $7\ \mu\text{m}$  时正峰对应频点对  $h_1$  变化反应较为灵敏, 随着  $h_1$  的增大而向高频移动, 在  $h_1$  高于  $7\ \mu\text{m}$  时, 频点变化不大; 在 0.78—0.9 THz 的 IX 频段, 隔离度随  $h_1$  的增加而增加. InSb 层的高度决定了磁光材料对 CW 波的衰减强度以及对 CCW 波的传输损耗, 当  $h_1$  过小时, 衰减不充分, 非互易性较弱, 当  $h_1$  过大时, 虽对 CW 波的阻断能力更强但同时增加了对 CCW 波的传输损耗, 导致双向传输效率整体下降. 因此综合来看  $h_1$  取  $5\ \mu\text{m}$  时器件性能最好.

将光栅层的高度  $h_2$  从  $40\ \mu\text{m}$  增长至  $70\ \mu\text{m}$ , 步长为  $5\ \mu\text{m}$ , 对基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器的性能影响如图 6 所示. 如图 6(a) 所示,

在 0.5—0.68 THz 的 I 频段内, 双向传输效率曲线峰谷交替出现, 这是由于受光栅调制产生的高阶衍射波与光栅结构支持的泄露导波模式发生耦合, 在特定波长或频率下产生强烈的共振响应, 起到能量局域化的作用, 显著增强光栅与 InSb 附近的电磁场. 随着  $h_2$  增大, 峰向低频移动, 峰值先增大后减小, 在  $h_2=50\ \mu\text{m}$  时峰值最大. 在 0.68—0.9 THz 的 II 频段, 双向传输效率曲线总体呈现一个峰的形态, 但存在一些波动, 这是由于在矩形波导中当工作频率高于 0.75 THz 时, 传输模式不仅限于基模  $\text{TE}_{10}$ , 更多高阶模将被激活, 光栅高度的影响更加复杂. 但仍然可以发现, 随着  $h_2$  增大, 峰向低频移动, 且峰值逐渐降低. 这是由于光栅是通过引入特定相位差, 通常为  $\pi/2$ , 从而将入射光的线偏振状态转换为圆偏振, 硅光栅高度越高, 发生  $\pi/2$  的相位移的频率越低, 与仿真中峰朝低频移动相吻合. 对隔离度而言, 如图 6(b) 所示, 0.55—0.76 THz 的 III 频段内, 存在 2 个正峰, 在频谱维度上, 峰随  $h_2$

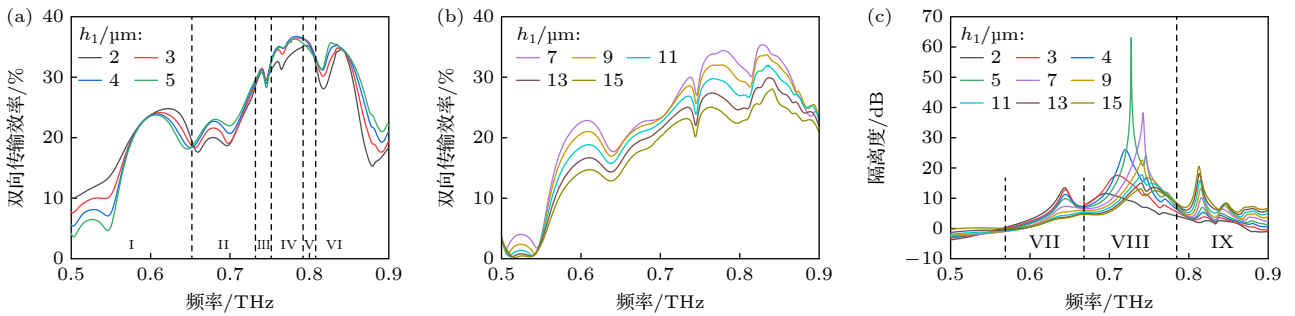


图 5 InSb 层高度  $h_1$  对器件性能的影响 (a)  $h_1$  小于等于  $5\ \mu\text{m}$  时双向传输效率变化关系; (b)  $h_1$  大于  $5\ \mu\text{m}$  时双向传输效率变化关系; (c) 隔离度变化关系

Fig. 5. Influence of InSb layer thickness  $h_1$  on device performance: (a) Variation of bidirectional transmission efficiency at  $h_1 \leq 5\ \mu\text{m}$ ; (b) variation of bidirectional transmission efficiency at  $h_1 > 5\ \mu\text{m}$ ; (c) variation of isolation.

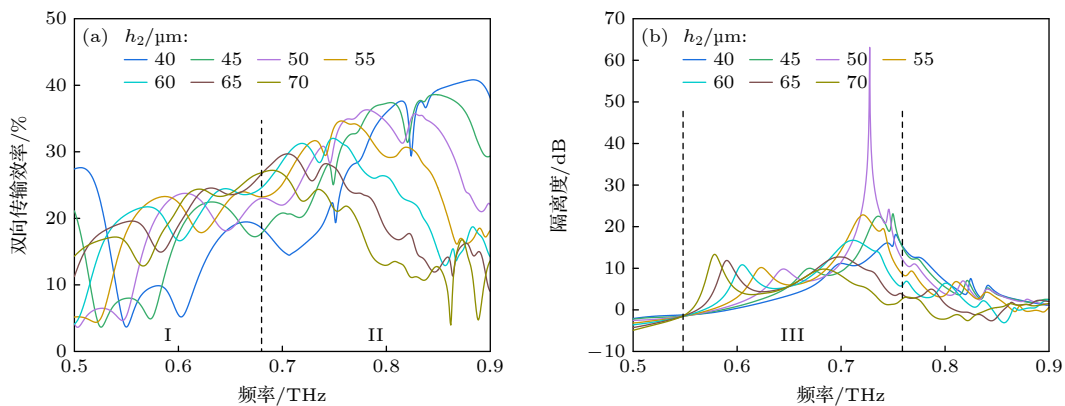


图 6 光栅层高度  $h_2$  对器件性能的影响 (a) 双向传输效率变化关系; (b) 隔离度变化关系

Fig. 6. Influence of grating layer thickness  $h_2$  on device performance: (a) Variation of bidirectional transmission efficiency with thickness; (b) variation of isolation with thickness.

增大而不断左移, 在峰值维度上, 处于低频的峰先降低后升高, 在  $h_2$  取  $50\ \mu\text{m}$  时隔离度最低为  $9.83\ \text{dB}$ ; 处于高频的峰先升高后降低, 在  $h_2$  取  $50\ \mu\text{m}$  时隔离度最高达到  $63.12\ \text{dB}$ .

衬底高度  $h_3$  同样影响着太赫兹波的传输, 如图 7(a) 所示, 在低于  $0.68\ \text{THz}$  的 I 频段, 双向传输效率呈现随着  $h_3$  的增加峰与谷向左向下移动的趋势, 峰值谷值逐渐降低、对应频点趋于低频, 这是由于太赫兹波在衬底中传输时形成了法布里-珀罗共振, 不同的衬底高度对应不同波长的电磁波发生相长干涉或相消干涉. 在高于  $0.68\ \text{THz}$  的 II 频段, 由于矩形波导内传输模式不限于基模, 而是存在多种高阶模同时传输, 衬底高度的变化会影响多个模式的传输, 因而没有较为明晰的变化趋势, 在  $0.68\text{--}0.71\ \text{THz}$ ,  $0.71\text{--}0.76\ \text{THz}$ ,  $0.76\text{--}0.8\ \text{THz}$ ,  $0.8\text{--}0.9\ \text{THz}$  各频段内  $h_3$  分别取  $30, 25, 20$  和  $15\ \mu\text{m}$  时双向传输效果较优. 如图 7(b) 所示, 对隔离度而言, 在低于  $0.65\ \text{THz}$  频段,  $h_3$  增大, 隔

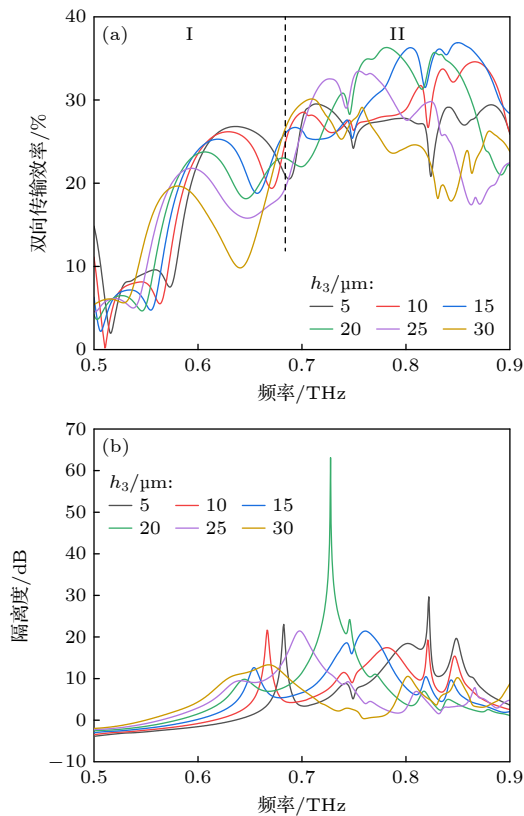


图 7 光栅层高度  $h_3$  对器件性能的影响 (a) 双向传输效率变化关系; (b) 隔离度变化关系

Fig. 7. Influence of grating layer thickness  $h_3$  on device performance: (a) Variation of bidirectional transmission efficiency with thickness; (b) variation of isolation with thickness.

离度单调递增; 在  $0.65\text{--}0.7\ \text{THz}$  频段, 随着  $h_3$  增加, 峰逐渐左移, 峰值先减小后增大; 在  $0.65\text{--}0.75\ \text{THz}$  频段,  $h_3$  增大, 峰值先增大后减小; 在  $0.78\text{--}0.83\ \text{THz}$  频段,  $h_3$  增大, 峰值先降低后增加. 总体看,  $0.71\text{--}0.75\ \text{THz}$  频段,  $h_3$  取  $20\ \mu\text{m}$  时隔离度最高且能达到  $63.12\ \text{dB}$ .

综合考虑结构尺寸变化对双向传输效率与隔离度的影响可以得到, 将结构尺寸按照分支长度  $170\ \mu\text{m}$ , 相邻分支的中心间距依次为  $125, 125, 120, 120\ \mu\text{m}$ , InSb 层高度  $5\ \mu\text{m}$ , 光栅层高度  $50\ \mu\text{m}$ , 衬底高度  $20\ \mu\text{m}$  进行设置, 器件在  $0.73\ \text{THz}$  处可以得到  $63.12\ \text{dB}$  的高隔离度, 相比 Yuan 等<sup>[8]</sup> 太赫兹非互易器件隔离度  $52\ \text{dB}$  提升  $21.4\%$ , 且在  $0.78\ \text{THz}$  处双向传输效率达到  $36.31\%$ ,  $3\ \text{dB}$  带宽达到  $0.252\ \text{THz}$ , 一定程度上兼顾高隔离度与高双向传输效率的优点, 如图 8 所示. 因此在太赫兹时域反射系统、全双工太赫兹通信系统等实际应用场景中, 能够实现非互易传输的同时, 将携带有效信息的反射信号定向导出并检测.

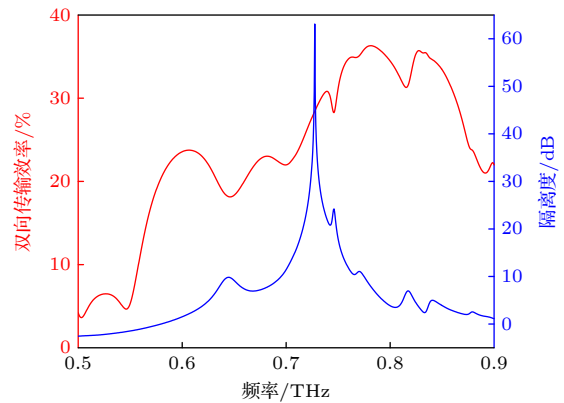


图 8 双向传输效率、隔离度与频率的关系图

Fig. 8. The diagram of bidirectional transmission efficiency and isolation versus frequency.

### 3.2 环境影响因素分析

由于 InSb 材料的回旋频率与磁场强度成正比, 载流子密度与迁移率和温度相关, 因此在优化器件结构尺寸设计后, 需要探讨外界环境因素对该器件传输性能的影响并得到其理想的工作环境. 以  $10\ \text{K}$  和  $0.1\ \text{T}$  为步长改变温度与磁场, 分析磁场不变时, 温度处于  $240\text{--}310\ \text{K}$  范围内的传输特性, 以及温度不变时, 磁场从  $0.1\ \text{T}$  增长至  $0.5\ \text{T}$  所带来的变化. 仿真结果分别如图 9 和图 10 所示.

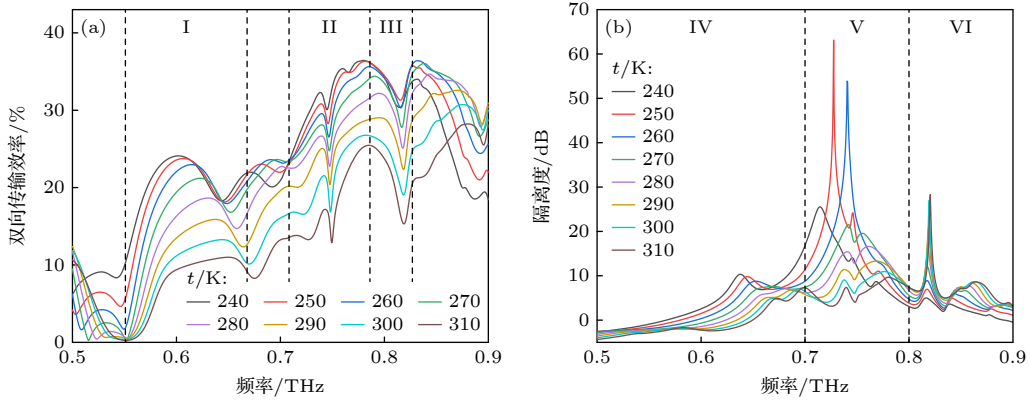


图 9 温度对器件性能的影响 (a) 双向传输效率随温度变化关系; (b) 隔离度随温度变化关系

Fig. 9. Effect of temperature on device performance: (a) Variation of bidirectional transmission efficiency with temperature; (b) variation of isolation with temperature.

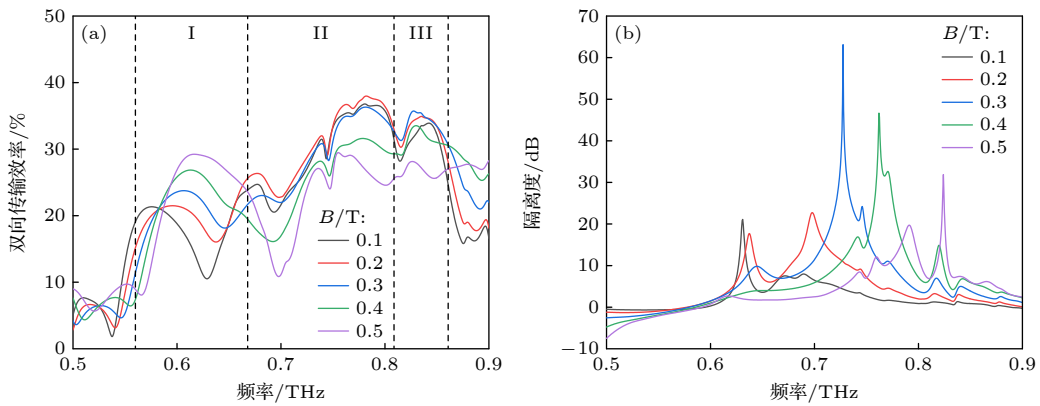


图 10 磁场强度对器件性能的影响 (a) 双向传输效率随磁场强度变化关系; (b) 隔离度随磁场强度变化关系

Fig. 10. Effect of magnetic field intensity on device performance: (a) Variation of bidirectional transmission efficiency with magnetic field intensity; (b) variation of isolation with magnetic field intensity.

如图 9(a) 所示, 温度对双向传输效率的影响与频段相关, 在 0.55—0.67 THz 的 I 频段和 0.71—0.79 THz 的 II 频段, 双向传输效率基本随温度的上升而下降, 在 0.79—0.83 THz 的 III 频段, 温度升高, 双向传输效率先增大后减小, 在  $t = 250$  K 时取得最优. 温度对隔离度的影响如图 9(b) 所示, 在 0.5—0.7 THz 的 IV 频段、0.7—0.8 THz 的 V 频段以及 0.8—0.9 THz 的 VI 频段, 隔离度曲线均存在一个正峰. 在 IV 频段, 随着温度增加, 正峰在峰值上呈单调变小的趋势, 在频域上呈现向高频移动的趋势; 在 V 频段, 隔离度正峰随温度增加在峰值上先增大后降低, 在温度为 250 K 时取到最大值, 此时隔离度达到 63 dB; 在 VI 频段, 温度增加, 隔离度正峰峰值不断增加, 且在频域上变化不大. 仿真结果显示温度的升高导致载流子浓度和迁移率变化, 使得 InSb 对圆偏光的响应频段发生漂移, 并引入了额外的损耗.

图 10(a) 揭示了磁场对双向传输效率的影响, 在 0.56—0.67 THz 的频段 I 内, 双向传输效率曲线存在一个正峰, 随着磁场强度增大, 该正峰在峰值上先降低后增加, 在频域上呈现向高频持续移动的趋势. 在 0.67—0.81 THz 的频段 II 以及 0.81—0.86 THz 的频段 III 内, 双向传输效率均呈现先增大后减小的趋势, 在频段 II 双向传输效率在  $B$  取 0.2 T 时达到最优, 而在频段 III 双向传输效率在  $B$  取 0.3 T 时达到最优. 分析图 10(b) 可知, 不同磁场强度下, 隔离度在不同频点附近存在尖峰, 并随着磁场增大, 尖峰峰值先增加后降低, 尖峰对应频点由低频向高频移动, 这是由于磁场的增大使回旋频率线性增加, 导致隔离度峰值向高频移动. 当磁场取 0.3 T 时, 隔离度达到最大值 63.12 dB.

因此在温度 250 K、磁场 0.3 T 的外界环境下, 本文提出的基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器能实现其最佳的传输特性. 表 3 是本研究提出

的太赫兹隔离器与现有太赫兹隔离器的性能对比,可以看出,本文器件在兼具隔离与定向导出反射信号双重功能的同时,在隔离度方面具有较大突破。

表 3 现有太赫兹隔离器性能对比

Table 3. Performance comparison of existing terahertz isolators.

提出年限	温度 /K	磁场强度 /T	隔离度 /dB	插入损耗 /dB	带宽 /GHz	能否定向导出反射信号
2021 <sup>[8]</sup>	室温	0.68	52	约7.5	0.14	—
2022 <sup>[22]</sup>	—	0.29	15	8	223.5	—
2024 <sup>[9]</sup>	303	0—0.3	34	0.0269	12	—
2024 <sup>[23]</sup>	—	—	36	3.9	4500	—
2025 <sup>[10]</sup>	—	—	34.28	—	—	—
本文	250	0.3	63.12	4.3	250	能

## 4 总 结

随着太赫兹技术在无损检测、高速通信等领域的应用,对系统搭建中的各类核心器件的性能提出了传输损耗更低、集成多种功能、拓展适用频段等严苛的要求. 研究高性能的非互易太赫兹器件隔离前向传输信号与后向反射信号对于保护敏感元件,提升系统探测性能变得尤为重要. 在隔离基础上实现反射信号的定向导出对需要探测反射信号的系统应用领域是同等重要的. 本研究提出一种基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器,利用正交双光栅实现线-圆偏振转换,结合 InSb 对圆偏振态的选择性传输,构建非互易通道;同时利用分支波导的四端口架构,同步实现入射和反射信号的隔离与反射信号的定向导出,基于实际需求集成双重功能. 经过对器件结构的优化与探讨最优工作环境条件得到,在分支长度 170  $\mu\text{m}$ ,相邻分支的中心间距依次为 125, 125, 120, 120  $\mu\text{m}$ , InSb 层高度 5  $\mu\text{m}$ ,光栅层高度 50  $\mu\text{m}$ ,衬底层高度 20  $\mu\text{m}$  的设定下,外界环境温度为 250 K,施加磁场 0.3 T 的情景下,基于磁光选择-多端口架构的太赫兹隔离器可在 0.73 THz 处达到 63.12 dB 的隔离度,在 0.78 THz 处双向传输效率达到 36.31%, 3 dB 带宽达到 0.25 THz. 本研究提出的太赫兹隔离器具有隔离度高、所需磁场强度低、集成双重功能的优点,为太赫兹时域反射系统等提供了首个支持反射信号定

向导出的非互易器件,显著提升有效反射信号的信噪比,为提升太赫兹无损检测系统与通信系统的探测性能做出一定的贡献。

## 参考文献

- [1] Tamagnone M, Moldovan C, Poumirol J M, Kuzmenko A B, Ionescu A M, Mosig J R, Perruisseau-Carrier J 2016 *Nat. Commun.* **7** 11216
- [2] Liu Y L, Li J S 2025 *Opt. Commun.* **575** 131310
- [3] Wang Y, Ai Y Q, Gan L, Zhou J, Wang Y Y, Wang W, Xu B G, He W L, Li S G 2024 *Micromachines* **15** 745
- [4] Zhao D, Fan F, Tan Z Y, Wang H, Chang S J 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2200509
- [5] Xu B G, Zhang D G, Wang Y, Hong B B, Shu G X, He W L 2023 *Photonics* **10** 360
- [6] Heydari M B, Samiei M H V 2021 *Optik* **231** 166457
- [7] Xue W, Zhang J Y, Ma J W, Hou Z L, Zhao Q L, Xie Q, Bi S 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 105103
- [8] Yuan S X, Chen L, Wang Z W, Deng W T, Hou Z B, Zhang C, Yu Y, Wu X J, Zhang X L 2021 *Nat. Commun.* **12** 5570
- [9] Dong R Y, Sui J Y, Li Z J, Zhang H F 2024 *Opt. Laser Technol.* **169** 110004
- [10] Liu Y L, Li J S, Xiong R H, Hu J R 2025 *Opt. Express* **33** 8961
- [11] Xu Z, Ren X, Li J N, Liu L H, Zhang N, Luo M, Jiang C, Zhang J X, Qiao X M, Wang T, Xu D G 2024 *Phys. Lett. A* **524** 129838
- [12] Liu L H, Li K R, Yang Q, Shang Y, Xu Z, Li J N, Xu D G, Yao J Q 2024 *Microelectron. J.* **151** 106310
- [13] Feng Y N 2022 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: School of Electronic Science and Engineering) (in Chinese) [丰益年 2022 博士学位论文(成都:电子科技大学)]
- [14] Syed A, Almalki M H 2023 *J. Comput. Networks Commun.* **2023** 9285354
- [15] Niu Z Q, Zhang B, Yang K, Yang Y L, Ji D F, Liu Y, Feng Y N, Fan Y, Chen X D, Li D T 2019 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **67** 4733
- [16] Li H, Zhang D H, Meng J, Wang L 2024 *Micromachines* **15** 1083
- [17] Shalaby M, Peccianti M, Ozturk Y, Morandotti R 2013 *Nat. Commun.* **4** 1558
- [18] Shuvaev A M, Astakhov G V, Pimenov A, Brüne C, Buhmann H, Molenkamp L W 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 107404
- [19] Xu C R, Fan W R, Tang Y H, Wang D W 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 014201
- [20] Lin S, Silva S, Zhou J F, Talbayev D 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800572
- [21] Fan F, Xiong C Z, Chen J R, Chang S J 2018 *Opt. Lett.* **43** 687
- [22] Dmitriev V, Nobre F, Castro W, Portela G, Assunção L 2022 *Opt. Commun.* **506** 127312
- [23] Ju X W, Hu Z Q, Zhu G F, Huang F, Chen Y Q, Quo C X, Kono J, Belyanin A, Wang X F 2023 *Opt. Express* **31** 38540

# Terahertz isolator based on magneto-optical selection–multi-port architecture\*

LUO Man<sup>1)2)3)</sup> XU Zhen<sup>1)2)3)</sup> LI Jining<sup>1)2)3)†</sup> CHEN Kai<sup>1)2)3)</sup>  
 WANG Yuye<sup>1)2)3)</sup> ZHONG Kai<sup>1)2)3)</sup> XU Degang<sup>1)2)3)‡</sup> YAO Jianquan<sup>1)2)3)</sup>

1) (*School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Key Laboratory of Micro Optical Electronic Mechanical System Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

3) (*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

( Received 18 September 2025; revised manuscript received 28 October 2025 )

## Abstract

For terahertz systems where reflected signals carry effective information, such as terahertz time-domain reflection systems and full-duplex communication systems, existing nonreciprocal terahertz devices often treat reflected signals as interference and suppress them during isolation. This makes them incompatible with the requirements of such systems for isolating incident signals while directionally extracting and detecting reflected signals. To address this limitation, this study innovatively proposes a terahertz isolator based on a magneto-optical selection–multi-port architecture. The device converts linearly polarized light into a specific circular polarization state through orthogonal double gratings, and by combining the magneto-optical selectivity of InSb material, a nonreciprocal transmission path is constructed. Furthermore, the magneto-optical regulation mechanism innovatively combines branch waveguides with multiple ports and the characteristic of regulating terahertz transmission paths, while achieving isolation of incident/reflected signals and directionally extracting the reflected signals. The simulations of the influences of structural dimensions and external environmental conditions on the nonreciprocal characteristics of the device indicate that when the temperature is 250 K, the magnetic field is 0.3 T, and the structural parameters are set as follows: branch length of 170  $\mu\text{m}$ , center-to-center spacings of adjacent branches of 125, 125, 120, and 120  $\mu\text{m}$ , InSb layer thickness of 5  $\mu\text{m}$ , grating layer thickness of 50  $\mu\text{m}$ , and substrate layer thickness of 20  $\mu\text{m}$ , then the device achieves a high isolation of 63.12 dB at 0.73 THz. Additionally, at 0.78 THz, the bidirectional transmission efficiency reaches 36.31%, with a 3 dB bandwidth of 0.25 THz. This device has the advantages such as high isolation, low operating magnetic field strength, and integration of dual functions. It reduces interference from incident signals on reflected signals, simplifies subsequent processing steps such as noise reduction and localization of effective reflected signals, and improves the system's detection performance for weak signals. This provides essential support for expanding terahertz applications to more fields, including non-destructive testing and communication.

**Keywords:** nonreciprocal transmission, terahertz, branch waveguide, magneto-optical selectivity

DOI: [10.7498/aps.75.20251289](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251289)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251289](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251289)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20123, 62175182, 62275193, U22A20353, 62405214).

† Corresponding author. E-mail: [jiningli@tju.edu.cn](mailto:jiningli@tju.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [xudegang@tju.edu.cn](mailto:xudegang@tju.edu.cn)