

# 基于直接二进制搜索算法设计的超紧凑 $\text{In}_2\text{Se}_3$ 可调控功率分束器\*

张伊祎<sup>1)2)</sup> 韦雪玲<sup>1)2)</sup> 农洁<sup>1)2)</sup> 马汉斯<sup>2)</sup> 叶子阳<sup>2)3)</sup>  
徐文杰<sup>1)2)</sup> 张振荣<sup>1)†</sup> 杨俊波<sup>2)‡</sup>

1) (广西大学计算机与电子信息学院, 广西多媒体通信与网络技术重点实验室, 南宁 530004)

2) (国防科技大学, 物质与材料科学试验中心, 长沙 410073)

3) (华南理工大学微电子学院, 广州 511442)

(2023年3月26日收到; 2023年5月25日收到修改稿)

多模干涉耦合器结构的功率分束器拥有大带宽、较好制造鲁棒性等优势, 长期以来受到人们的关注. 本文提出的是一种基于相变材料  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的超紧凑可调控功率分束器, 尺寸仅有  $2.4\ \mu\text{m} \times 3.6\ \mu\text{m}$ , 采用  $1 \times 2$  的多模干涉耦合器结构, 在不改变其他结构参数的情况下, 采用直接二进制搜索算法对器件进行优化, 仅通过  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的  $\alpha$  态与  $\beta$  态的可逆相变, 利用两种晶态之间的高折射率对比度实现了不同的功率分束比. 与其他可调控的功率分束器相比, 本文设计的这种功率分束器结构紧凑、调控简单, 并且具有较好的鲁棒性. 利用该器件在  $1540\text{--}1560\ \text{nm}$  的波长范围内实现了  $1:1$ ,  $1:1.5$ ,  $1:2$  三种分束比, 插入损耗分别小于  $0.27$ ,  $0.13$  和  $0.17\ \text{dB}$ . 证明了这种基于相变材料  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的超紧凑可调控功率分束器在光子集成的可能性.

**关键词:** 功率分束器, 相变材料, 逆向设计, 集成光学

**PACS:** 42.82.-m, 42.82.Et, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230459

## 1 引言

光子集成电路 (photonic integrated circuit, PIC) 在通信上凭借着高度集成与多功能的优势, 已成为了光子电路中的强大范式, 功率分束器作为 PIC 的基本元件, 在信号检测、反馈电路和功率均衡的电路中拥有着广泛的应用<sup>[1]</sup>. 常见的功率分束器有定向耦合器、基于绝热锥形波导的分束器、多模干涉耦合器 (multimode interference waveguide, MMI)、Y 型结构等, 通常使用算法或者数值模拟仿实现单一分束比, 如果电路有其他功率需求,

则需要改变器件的结构参数, 重新进行计算. 这不仅让器件制作时间增加, 也使得在 PIC 中占用的面积增加. 为了提高功率分束器在 PIC 中的利用率, 满足不同光路的各种需求, 一种同时拥有多功能、可调控、紧凑、低损耗且有良好鲁棒性优点的功率分束器是很有必要的.

相变材料 (phase change materials, PCM) 一般拥有晶态与非晶态两种状态, 利用两种状态的不同光学性能以及两种状态的可逆转化在同一个器件上实现不同的功能. 目前, 相变材料已经被用于光开关<sup>[2]</sup>、光子存储器<sup>[3]</sup>、超透镜<sup>[4]</sup>等多种器件的设计中. 硫系相变材料, 包括  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST),

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12272407, 62275269, 62275271)、国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706005) 和粤桂联合科学重点基金 (批准号: 2021GXNSFDA076001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zxr76@gxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

表 1 几种相变材料的光学性能比较 ( $A$ , 非晶态;  $C$ , 晶态;  $k$ , 消光系数)

Table 1. Comparison of optical properties of several phase change materials ( $A$ , amorphous;  $C$ , crystalline;  $k$ , extinction coefficients).

	Phase change temperature/ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta n$ (1550 nm)	Reversibility	$k$ (1550 nm)
$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)	$A \rightarrow C$ , $>600$ <sup>[13]</sup> $C \rightarrow A$ , 200 <sup>[14]</sup>	2.85 <sup>[15]</sup>	yes	$k_A = 0.12$ , $k_C = 1.49$ <sup>[15]</sup>
$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST)	$A \rightarrow C$ , $\sim 270$ $C \rightarrow A$ , $>600$ <sup>[16]</sup>	1.625 <sup>[17]</sup>	yes	$k_A \sim 0$ , $k_C = 0.42$ <sup>[17]</sup>
$\text{Sb}_2\text{Se}_3$	$A \rightarrow C$ , $\sim 200$ $C \rightarrow A$ , $\sim 600$ <sup>[18]</sup>	1.22 <sup>[18]</sup>	yes	$k_A \sim 0$ , $k_C \sim 0$ <sup>[19]</sup>
$\text{In}_2\text{Se}_3$	$\alpha \rightarrow \beta$ , 200 $\beta \rightarrow \beta'$ , 200 $\beta' \rightarrow \alpha$ , 60 <sup>[12]</sup>	-0.35 <sup>[12]</sup>	yes	$k_{\alpha} = 0$ , $k_{\beta} = 0$ <sup>[12]</sup>

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$  (GSST),  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  等, 具有晶态与非晶态之间的高折射率对比度、相变响应时间短、相变可逆等优势, 在设计中, 均可通过石墨烯、ITO 等微加热器以激光加热、电加热的方式触发这些相变材料的可逆相变<sup>[5]</sup>, 种种优势使得这些相变材料非常受到设计人员的欢迎. 然而这些相变材料也存在 C 波段的高消光系数、可逆相变所需温度较高等问题, 在使用中会产生过多能量损耗, 因此人们开始逐步探索其他的相变材料.

$\text{In}_2\text{Se}_3$  作为一种新兴的硫系相变材料, 拥有  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  和  $\kappa$  五种晶体态, 可以根据不同需求选择不同晶态进行器件的设计. 常见的制备方式有机械剥离<sup>[6,7]</sup>、化学合成<sup>[8]</sup>、气相沉积<sup>[9,10]</sup>等, 目前已经可以制备几十纳米至几百纳米厚的  $\text{In}_2\text{Se}_3$  材料<sup>[11]</sup>. 表 1 为  $\text{In}_2\text{Se}_3$  与几种常见相变材料的对比 (仅对比本文使用到的  $\alpha$  态与  $\beta$  态),  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的  $\alpha$  态与  $\beta$  态皆为晶态, 拥有着相似的拓扑结构的特点使得两种状态之间的相变所需能量小, 因此与 GST, GSST 和  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  相比,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的相变所需温度相对较低. 此外,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  理论上在 C 波段没有损耗<sup>[12]</sup>, 可以减少器件许多因材料自身所造成的损耗.  $\text{In}_2\text{Se}_3$  也具有其他硫系相变材料拥有的高折射率对比度、相变可逆的优势.

$\text{In}_2\text{Se}_3$  多以激光脉冲的方式触发相变, 比如 Li 等<sup>[20]</sup>设计的基于  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的非易失性光开关, 使用中心波长为 1064 nm 的纳秒激光, 实现  $\alpha$  态与  $\beta$  态之间的可逆转换. 目前, 许多文章已经证明,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的  $\alpha$  态与  $\beta$  态在室温中均可保持其状态<sup>[21,22]</sup>, 这让本文提出的功率分束器可以根据相应需求进行相变而无需持续提供能量维持状态.  $\text{In}_2\text{Se}_3$  相

较于其他几种相变材料的优势使得它在 PIC 的应用中存在非常好的发展前景.

本文设计的是一种基于  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的超紧凑可控功率分束器, 采用  $1 \times 2$  的 MMI 结构, 器件尺寸仅有  $3.6 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ . 利用  $\text{In}_2\text{Se}_3$  材料的  $\alpha$  态与  $\beta$  态之间的可逆相变在不改变器件结构参数的条件下实现了 1:1, 1:1.5 和 1:2 的三种功率分束比, 在 C 波段 (1540—1560 nm) 通过时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 仿真, 所实现的三种功能的插入损耗 (insertion loss, IL) 分别小于 0.27, 0.13 和 0.17 dB. 此外, 该功率分束器具有较好的制造鲁棒性, 器件内所刻蚀圆孔直径误差  $\Delta d = 5 \text{ nm}$  范围内, 不同状态下的插入损耗仍小于 0.29 dB.

## 2 原理和仿真结果

可调控功率分束器的整体结构如图 1 所示, 在高度  $h_1 = 3 \mu\text{m}$  厚的二氧化硅平台上由一个输入波导、一个耦合区域与两个输出波导组成设计区域, 输入波导、输出波导与耦合区域均为  $h_2 = 220 \text{ nm}$  厚的  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . 结构通过  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的相变, 改变折射率以调控两个输出端口的功率不同分束比. 其中输入波导与输出波导的宽度  $w_1 = w_2 = w_3 = 480 \text{ nm}$ , 耦合区域长度为  $L = 3.6 \mu\text{m}$ , 宽度为  $W = 2.4 \mu\text{m}$ . 考虑到制造鲁棒性, 区域被划分为  $30 \times 20$  个  $120 \text{ nm} \times 120 \text{ nm}$  的像素点, 在像素点内刻蚀直径  $d = 90 \text{ nm}$  的空气圆孔并填充上二氧化硅. 为了加速器件的优化, 先估计出光的大致传播路径, 根据大致路径预设好设计区域像素点的初始位置.

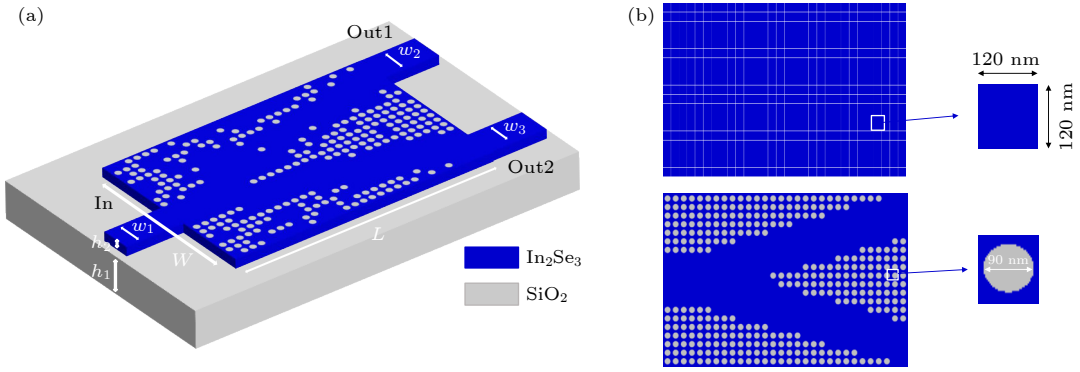


图 1 器件整体结构 (a) 优化后得到的结果和器件的参数, 其中 Out1 与 Out2 为器件的两个输出端口; (b) 初始化时划分好的像素点网格和圆孔的初始位置

Fig. 1. Overall device structure: (a) Optimized results and device parameters, where Out1 and Out2 are the two output ports of the device; (b) the initial position of the divided pixel grid and the air hole during initialization.

直接二进制搜索算法 (direct binary search, DBS) 拥有操作简单、收敛速度快的优点, 主要实现过程如图 2 所示, 通过“0”, “1”编码的方式记录设计区域所有像素点的初始状态, “0”为不刻蚀圆孔, “1”为刻蚀圆孔, 按照顺序依次改变像素点的状态并计算“品质因数”(figure-of-merit, FOM), 如果 FOM 有所增加则保留该像素点状态, 否则不保留, 所有像素点都遍历完成后返回第一个像素点进行下一轮迭代, 直到 FOM 不再变化或达到所设定的阈值结束。

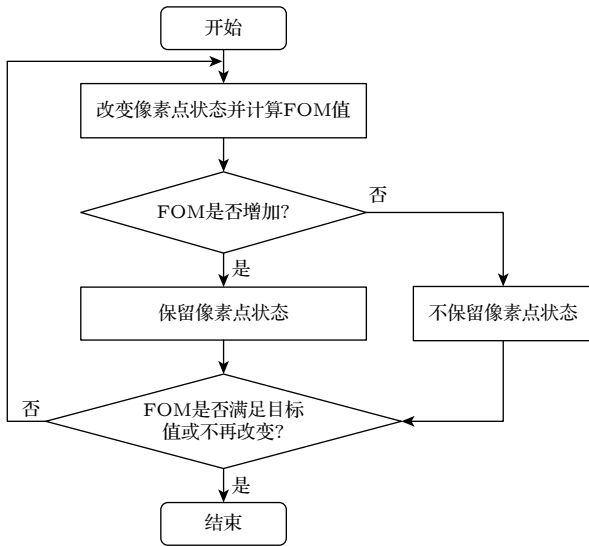


图 2 DBS 流程图

Fig. 2. DBS Flowchart.

设置了两个 FOM 描述性能的变化. 由于目标为仅需通过改变设计区域材料的折射率来实现不同的分束比, 像素点内刻蚀的圆孔数量与位置都是

固定的, 因此每改变一次像素点状态, 都需要进行 (1) 式与 (2) 式的计算:

$$\text{FOM}_i = 1 - |T_{\text{out1}} - T_1| - |T_{\text{out2}} - T_2|, \quad (1)$$

$$\text{FOM} = \frac{1}{n} \sum_n^i \text{FOM}_i, \quad (2)$$

其中 (1) 式的  $\text{FOM}_i$  为改变材料折射率, 实现某单一分束比时的性能函数, (2) 式的 FOM 为改变像素点状态, 实现  $n$  种分束比时的整体性能函数,  $T_{\text{out1}}$  和  $T_{\text{out2}}$  分别为当前折射率下, 实现某单一分束比时输出端口 1 与输出端口 2 的平均透过率,  $T_1$  和  $T_2$  分别为当前折射率下, 实现某单一分束比时输出端口 1 与输出端口 2 的理想平均透过率. 每当 DBS 算法遍历到一个像素点时, 都需要改变  $\text{In}_2\text{Se}_3$  材料的折射率, 进行 (1) 式的计算, 最后通过 (2) 式的计算判断该像素点的改变是否对结构的整体性能有所提升.

本文随机设计了 3 种不同的功率分束比 (1:1, 1:1.5, 1:2), 分别在  $\text{In}_2\text{Se}_3$  处在  $\alpha$  态、中间混合态、 $\beta$  态时实现. 使用 FDTD 仿真软件, 在不改变圆孔的位置和数量的前提下, 计算得到的结果如图 3 所示, 通过算法的优化, 最终得到的可控功率分束器拥有较为良好的性能.

在光传播过程中, 能量会有部分损耗, 并不能完全传输至端口, 为此设置了一个用于描述插入损耗 (insertion loss, IL) 的函数:

$$\text{IL} = -10 \times \lg \left[ \frac{T_{\text{out1}} + T_{\text{out2}}}{T_{\text{in}}} \right]. \quad (3)$$

其中  $T_{\text{in}}$  为实现某一分束比时输入端口的平均透过率.

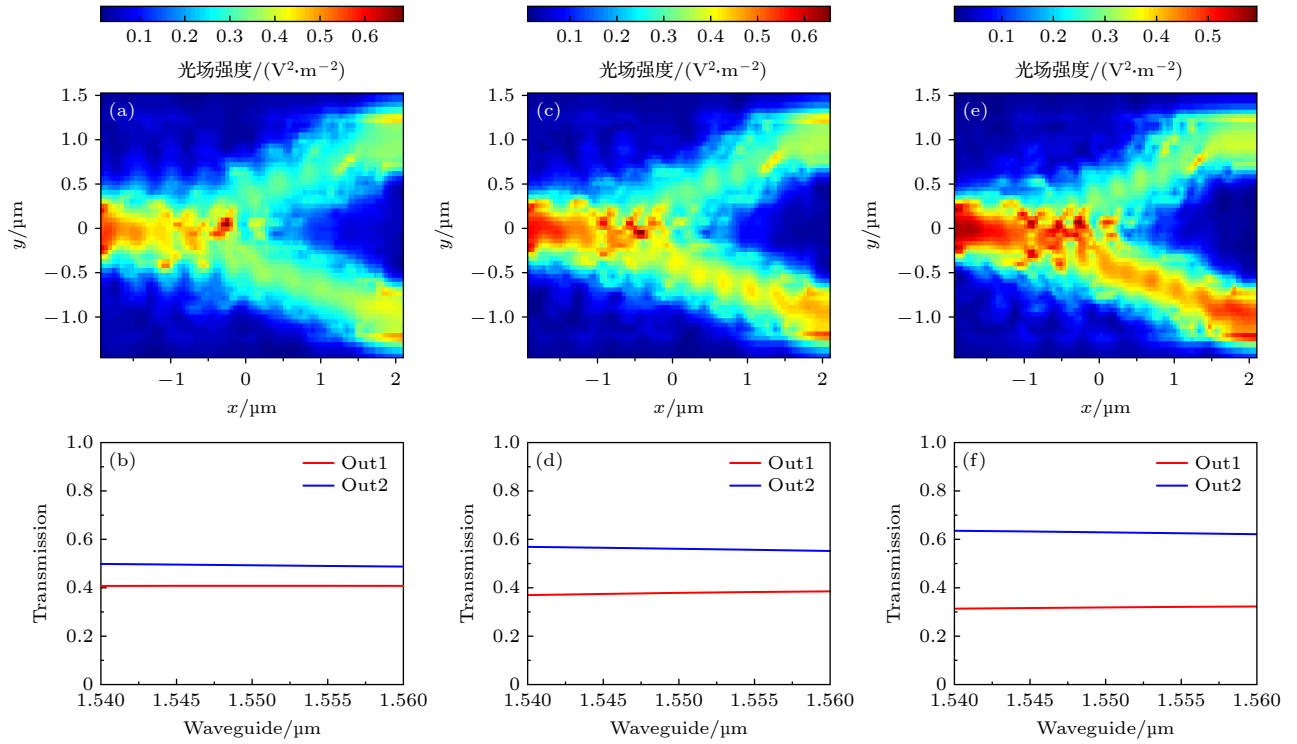


图3 通过模拟仿真得到的3种分束比下的结果 (a)  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在  $\alpha$  态时实现的 1:1 分束比; (b) 1:1 分束比下两个端口的透射率; (c)  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在中间混合态时实现的 1:1.5 分束比; (d) 1:1.5 分束比下两个端口的透射率; (e)  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在  $\beta$  态时实现的 1:2 分束比; (f) 1:2 分束比下两个端口的透射率

Fig. 3. Results obtained by simulation for three beam splitting ratios: (a) 1:1 beam splitting ratio achieved for  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in the  $\alpha$  state; (b) transmittance of two ports at 1:1 beam splitting ratio; (c) 1:1.5 beam splitting ratio achieved by  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in the intermediate mixed state; (d) transmittance of both ports at 1:1.5 beam splitting ratio. (e) 1:2 beam splitting ratio achieved by  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in the beta state; (f) transmittance of two ports at 1:2 beam splitting ratio.

考虑到功率分束器的目的在于实现分束比, 理想状态应该为两个输出端口的输出功率之比满足该器件的目标分束比, 因此, 为了描述器件两个输出端口之间的功率比, 还设置了一个端口平衡误差函数:

$$\text{error} = \left| 1 - \frac{b \cdot T_{\text{out1}}}{T_{\text{out2}}} \right| \quad (b = 1, 1.5, 2). \quad (4)$$

其中,  $b$  为输出端口 1 与输出端口 2 的分束比 (设分束比均为  $1:b$ ). (3) 式和 (4) 式所得的结果如图 4 所示, 器件实现 1:1, 1:1.5, 1:2 的功率分束比时 IL 分别小于 0.27, 0.13, 0.17 dB, 而相应的平衡误差分别小于 0.18, 0.012, 0.039, 具有较好的性能.

尽管在本文设计的可调控功率分束器中只实现了 1:1, 1:1.5 和 1:2 三种功率分束比, 但是在  $\text{In}_2\text{Se}_3$  产生相变的过程中, 会存在  $\alpha$  态  $\text{In}_2\text{Se}_3$  与  $\beta$  态  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的混合态. 这种不同比例的混合态将拥有不同的折射率, 如果通过外界能量人为控制混合态中  $\alpha$  态与  $\beta$  态的比例, 则有可能在同一个器件中实现多种分束比. 通过 Forouzmand 和 Mosallaei<sup>[23]</sup>

在文章中所提到的

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda) - 1}{\varepsilon_{\text{eff}}(\lambda) + 2} = m \frac{\varepsilon_{\text{Crys}}(\lambda) - 1}{\varepsilon_{\text{Crys}}(\lambda) + 2} + (1 - m) \frac{\varepsilon_{\text{Am}}(\lambda) - 1}{\varepsilon_{\text{Am}}(\lambda) + 2} \quad (5)$$

公式, 得到  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的  $\alpha$  态与  $\beta$  态在混合态中所占比例与该混合态介电常数的关系. 这里  $\varepsilon_{\text{eff}}$  为混合态的介电常数,  $\varepsilon_{\text{Crys}}$  与  $\varepsilon_{\text{Am}}$  为晶态与非晶态的介电常数,  $m$  为晶态所占比例.

通过该方式计算, 得到如图 5(a) 所示的  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在相变过程中, 产生的由不同比例  $\alpha$  态与  $\beta$  态组成的混合态折射率变化. 将所得结果应用到本文设计的功率分束器上得到图 5(b) 的分束比变化, 这意味着该功率分束器可以通过调控  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的相变实现连续功率分束比变化. 但是由图 5(b) 所得的结果可以看出  $\text{In}_2\text{Se}_3$  处于  $\alpha$  态时并没有达到目标比例 1:1, 这是因为在优化时考虑的是整体 FOM 值增加达到最优解, 使得某一目标比例没有被完全满足.

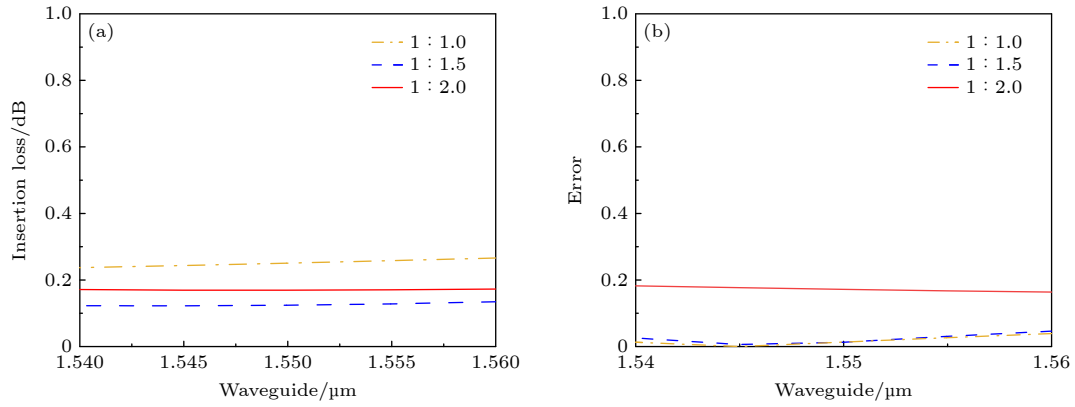


图 4 根据 (3) 式和 (4) 式得到的 IL 与端口平衡误差 (a) 由 (3) 式计算得到的  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在 3 种状态下的 IL; (b) 由 (4) 式计算得到的  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在 3 种状态下的端口平衡误差

Fig. 4. IL and port balance error obtained from Eq. (3) and Eq. (4): (a) IL of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in three states calculated from Eq. (3); (b) port balance error of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in three states calculated from Eq. (4).

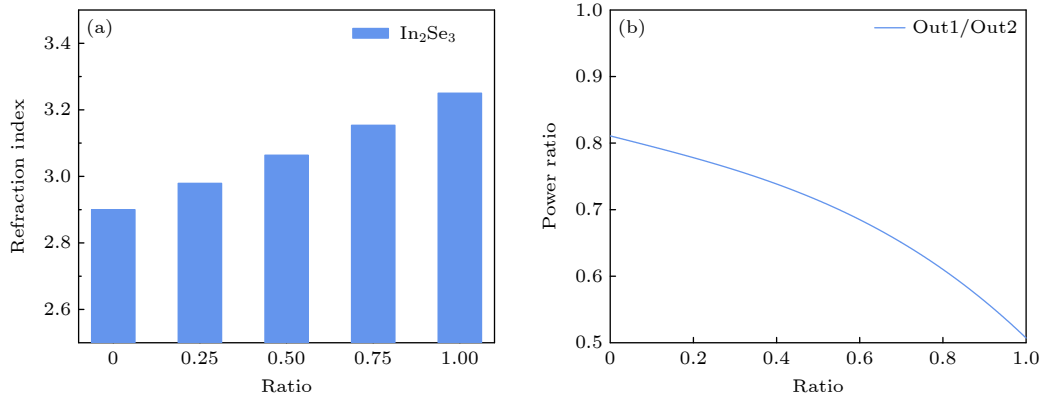


图 5 (a)  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的  $\alpha$  态与  $\beta$  态在混合态中占比对折射率的影响; (b)  $\text{In}_2\text{Se}_3$  在相变过程中实现的分束比变化

Fig. 5. (a) Influence of the proportion of  $\alpha$  and  $\beta$  states of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in the mixed state on the refractive index; (b) variation of the upper and lower port splitting ratio in  $\text{In}_2\text{Se}_3$  phase transition.

大多数 MMI 结构的功率分束器通常在绝缘衬底上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 平台进行设计, 以获得较好结果. 为此在 SOI 平台上用相同的结构与算法实现了 3 种不同分束比 (1:1, 1:1.5, 1:2) 的功率分束器. 为了实现几种不同的分束比, 在 SOI 平台上的功率分束器需要对实现每种分束比进行多次的结构优化, 调节能量传播的路径, 获得最优解. 然而, 如图 6(a) 所示, 具有不同分束比的功率分束器中的空气圆孔数量和位置各不相同, 即在 SOI 平台上设计的功率分束器无法像本文设计的功率分束器一样在同一个器件中实现不同的分束比并进行调控, 并且由图 6(c) 得到的结果可以看出, 通过  $\text{In}_2\text{Se}_3$  设计的可调控分束器与 SOI 平台设计的不可调控分束器相比, 没有产生过多的能量损耗.

表 2 为本文设计的功率分束器与最近几年报

道的功率分束器比较, 以往的可调控功率分束器一般并不具备在同一器件中调控分束比的功能, 实现某种分束比时通常需要改变结构的某些参数, 在实际应用中一个器件仍然只能实现一种功率分束比. 相变材料用于功率分束器的设计目前相对较少, 其可调性与非易失性在实现真正的可调控功率分束器上拥有独特的优势, Yuan 等<sup>[15]</sup> 利用 GSST 与 Si 设计的功率分束器具有调控功能, 实现了在同一器件中对分束比的调控, 但他们提出的调控方式较为复杂, 需要对某些像素点进行逐一相变. 本文设计的功率分束器满足了可调控、调控较为简便的需求, 同时器件也具有可编程性, 通过算法优化即可实现任意可调控的功率分束比.

众所周知, 器件在实际的加工中会存在一些误差. 在本文所设计的器件中, 考虑到可能会存在过度刻蚀或者是刻蚀不到位的问题, 使得所刻蚀的

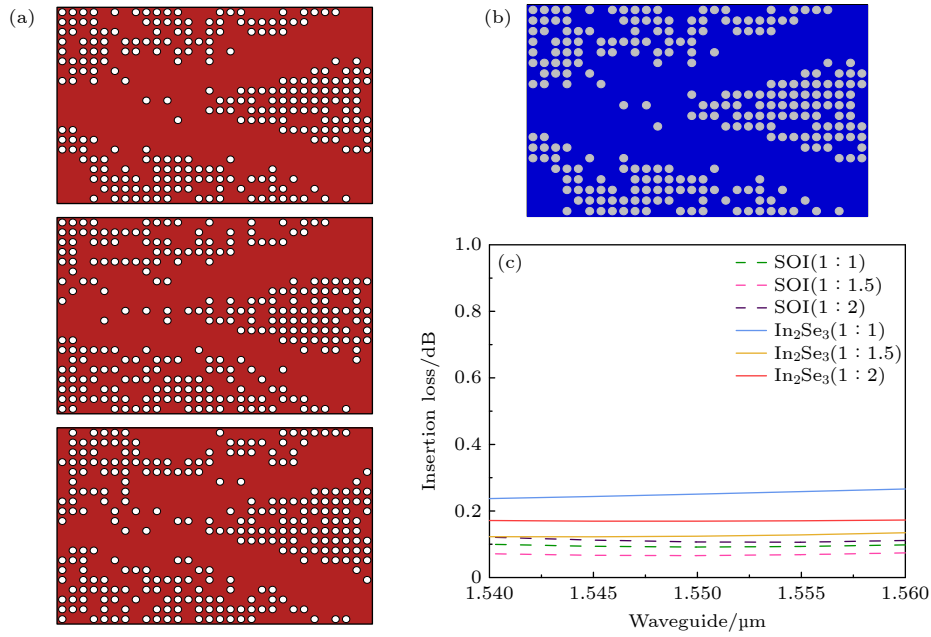


图6 SOI平台与 $\text{In}_2\text{Se}_3$ 设计的功率分束器在实现相同分束比时的打孔情况 (a) SOI平台实现1:1, 1:1.5, 1:2分束比的功率分束器; (b)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 材料实现1:1, 1:1.5, 1:2分束比的功率分束器; (c) SOI平台与 $\text{In}_2\text{Se}_3$ 实现各个分束比时的IL对比

Fig. 6. Perforation of SOI platform and  $\text{In}_2\text{Se}_3$  designed power beam splitters in achieving the same beam splitting ratio: (a) SOI platform realizing power beam splitters with 1:1, 1:1.5, and 1:2 beam splitting ratios; (b)  $\text{In}_2\text{Se}_3$  material realizing power beam splitters with 1:1, 1:1.5, and 1:2 beam splitting ratios; (c) IL comparison between SOI platform and  $\text{In}_2\text{Se}_3$  when realizing each beam splitting ratio.

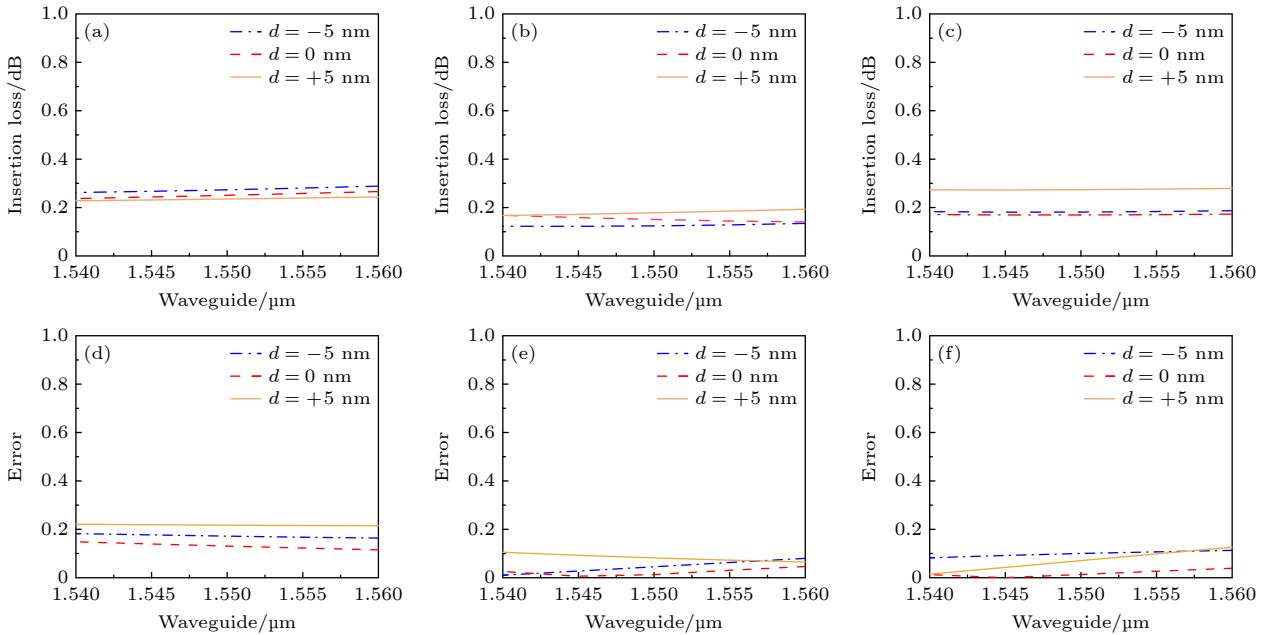
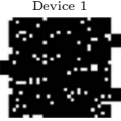
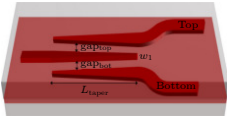
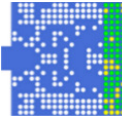



图7 圆孔直径对器件的影响 (a)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 在 $\alpha$ 态时圆孔直径误差在5 nm范围内的IL; (b)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 在中间混合态时圆孔直径误差在5 nm范围内的IL; (c)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 在 $\beta$ 态时圆孔直径误差在5 nm范围内的IL; (d)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 在 $\alpha$ 态时圆孔直径误差在5 nm范围内的平衡误差; (e)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 在中间混合态时圆孔直径误差在5 nm范围内的平衡误差; (f)  $\text{In}_2\text{Se}_3$ 在 $\beta$ 态时圆孔直径误差在5 nm范围内的平衡误差

Fig. 7. Effect of air circular hole diameter on the device: (a) IL of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in  $\alpha$  state with circular hole diameter error in the range of 5 nm; (b) IL of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in intermediate mixed state with circular hole diameter error in the range of 5 nm; (c) IL of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in  $\beta$  state with circular hole diameter error in the range of 5 nm; (d) the equilibrium error of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in  $\alpha$  state with circular hole diameter error in the range of 5 nm; (e) the equilibrium error of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in the intermediate mixed state with a circular hole diameter error in the range of 5 nm; (f) the equilibrium error of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  in the  $\beta$ -state with a circular hole diameter error in the range of 5 nm.

表 2 目前报道的几种功率分束器与本文设计的功率分束器的比较

Table 2. Comparison of several power splitters reported at present with the power splitter designed in this paper.

	文献[24](2017)	文献[1](2021)	文献[15](2022)	This work
Dimension	3.6 $\mu\text{m}$ $\times$ 3.6 $\mu\text{m}$	$L_{\text{taper}} = 80 \mu\text{m}$	2.4 $\mu\text{m}$ $\times$ 2.4 $\mu\text{m}$	3.6 $\mu\text{m}$ $\times$ 2.4 $\mu\text{m}$
Material	Si	$\text{Si}_3\text{N}_4$	GSST	$\text{In}_2\text{Se}_3$
Type	MMI	adiabatic tapers	MMI	MMI
Structure				
Bandwidth/nm	1530—1560	1500—1600	1530—1560	1540—1560
Adjustable	no	no	yes	yes
Excess loss/dB	0.97	0.02	<0.5 (1:1)	<0.27 (1:1)
			<0.83 (1.5:1)	<0.13 (1:1.5)
			<1.2 (2:1)	<0.17 (1:2)
			<1.18 (2.5:1)	
Method	FSM	Numerical simulations	DBS	DBS

圆孔出现膨胀或者收缩, 通过仿真模拟了圆孔大小变化对于器件性能的影响. 设计的圆孔直径误差范围  $\Delta d = 5 \text{ nm}$ , 得到的结果如图 7 所示, 圆孔直径误差对于器件影响较小, 在不同状态下 IL 均小于 0.29 dB, 平衡误差也不大于 0.22, 说明该器件具有较好鲁棒性.

### 3 结 论

综上所述, 本文设计的是一种基于  $\text{In}_2\text{Se}_3$  的超紧凑可调控功率分束器, 器件尺寸仅有  $3.6 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ . 设计区域均由  $\text{In}_2\text{Se}_3$  组成, 利用其  $\alpha$  态与  $\beta$  态的相变, 在不改变器件结构参数的情况下实现功率分束比的转换. 在 1540—1560 nm 波长范围内, 实现了 1:1, 1:1.5 和 1:2 的 3 种分束比. 虽然相对于不可调控功率分束器, 耦合区域损耗的能量会更多一些, 但这种通过改变相变材料晶态实现多功能器件的方式在提高 PIC 电路的集成度方面是一种较为有效的方式, 具有一定的潜在价值.

### 参考文献

[1] Zhu J B, Chao Q, Huang H Y, Zhao Y X, Li Y, Tao L, She X J, Liao H, Huang R, Zhu Z J, Liu X, Sheng Z, Gan F W 2021 *Appl. Opt.* **60** 413  
 [2] Zhang C P, Zhang M, Xie Y W, Shi Y C, Kumar R, Panepucci R R, Dai D X 2020 *Photonics Res.* **8** 1171  
 [3] Fang Z R, Chen R, Zhang J Y, Xu P P, Majumdar A 2022 *Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, California United States, May 15–20, 2022* pp1,2  
 [4] Wang N N, Li T T, Sun B S, Wang Z, Zhou L J, Gu T Y 2021 *Opt. Lett.* **46** 4088

[5] Song C M, Gao Y X, Wang G X, Chen Y M, Xu P P, Gu C J, Shi Y C, Shen X 2022 *Opt. Express* **30** 30430  
 [6] Tao X, Gu Y 2013 *Nano Lett.* **13** 3501  
 [7] Xu K, Jiang W, Gao X S, Zhao Z J, Low T, Zhu W J 2020 *Nanoscale* **12** 23488  
 [8] Lee H, Kang D H, Tran L 2005 *Mater. Sci. Eng., B* **119** 196  
 [9] Botcha V D, Hong Y H, Huang Z H, Li Z W, Liu Q, Wu J, Lu Y M, Liu X K 2019 *J. Alloys Compd.* **773** 698  
 [10] Lee H, Kang D H 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** 4759  
 [11] Huang Y T, Chen N K, Li Z Z, Wang X P, Sun H B, Zhang S B, Li X B 2022 *InfoMat* **4** e12341  
 [12] Li T T, Wang Y, Li W, Mao D, Benmore C J, Evangelista I, Xing H D, Li Q, Wang F F, Sivaraman G, Janotti A, Law S, Gu T Y 2022 *Adv. Mater.* **34** e2108261  
 [13] Taghinejad H, Abdollahramezani S, Eftekhari A A, Fan T R, Hosseinnia A H, Hemmatyar O, Dorche A E, Gallmon A, Adibi A 2021 *Opt. Express* **29** 20449  
 [14] Zheng J J, Khanolkar A, Xu P P, Colburn S, Deshmukh S, Myers J, Frantz J, Pop E, Hendrickson J, Doylend J, Boechler N, Majumdar A 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 1551  
 [15] Yuan H, Wu J G, Zhang J P, Pu X, Zhang Z F, Yu Y, Yang J B 2022 *Nanomaterials* **12** 669  
 [16] Ríos C, Zhang Y F, Shalaginov M Y, Deckoff-Jones S, Wang H Z, An S S, Zhang H L, Kang M, Richardson K A, Roberts C, Chou J B, Liberman V, Vitale S A, Kong J, Gu T, Hu J J 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2000034  
 [17] Liu T Y, Xu Y, Liu S Y, Sun X Q, Zhang D M 2022 *Opt. Mater. Express* **12** 2584  
 [18] Su Y X, Liu D M, Zhang M M 2022 *Opt. Express* **30** 40379  
 [19] Wei J, Rajesh M, Berardi S R 2021 *Opt. Mater. Express* **11** 3007  
 [20] Li T T, Wang Y, Xing H D, Li Q, Wang F F, Soman A, Law S, Gu T Y 2021 *Conference on Lasers and Electro-optics Electr Network, May 9–14, 2021* pSM4B.5  
 [21] Behera B, Sutar B C, Pradhan N R 2021 *Emergent Mater.* **4** 847  
 [22] Li J Y, Li H D, Niu X B, Wang Z M 2021 *ACS Nano* **15** 18683  
 [23] Forouzmand A, Mosallaei H 2018 *Opt. Express* **26** 17948  
 [24] Xu K, Liu L, Wen X, Sun W Z, Zhang N, Yi N B, Sun S, Xiao S M, Song Q H 2017 *Opt. Lett.* **42** 855

# Ultra-compact $\text{In}_2\text{Se}_3$ tunable power splitter based on direct binary search algorithm\*

Zhang Yi-Yi<sup>1)2)</sup> Wei Xue-Ling<sup>1)2)</sup> Nong Jie<sup>1)2)</sup> Ma Han-Si<sup>2)</sup> Ye Zi-Yang<sup>2)3)</sup>  
 Xu Wen-Jie<sup>1)2)</sup> Zhang Zhen-Rong<sup>1)†</sup> Yang Jun-Bo<sup>2)‡</sup>

1) (*Guangxi Key Laboratory of Multimedia Communication and Network Technology, College of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

2) (*Experimental Center of Material Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

3) (*School of Microelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China*)

( Received 26 March 2023; revised manuscript received 25 May 2023 )

## Abstract

Power splitter with multi-mode interference coupler structure has many advantages, such as large bandwidth and better manufacturing robustness, and has received much attention for a long time. Conventional power beam splitters usually use algorithms or numerical simulation to achieve a single beam splitting ratio; if the circuit has the requirement for power, the structural parameters of the device need changing and recalculating. In order to improve the utilization rate of power splitter in photonic integrated circuit and meet various demands for different optical paths, an ultra-compact tunable power splitter based on phase change material  $\text{In}_2\text{Se}_3$  with a  $1 \times 2$  multimode interference coupler structure is proposed in this paper. The device consists of an input waveguide, a coupling region, and two output waveguides with a coupling region of only  $2.4 \mu\text{m} \times 3.6 \mu\text{m}$  in size, which contains several circular holes of the same size and is filled with  $\text{SiO}_2$ . The number and location of circular holes in the coupling region are optimized by direct binary search algorithm, making the device achieve different power splitting ratios by using only the high refractive index contrast variation between the two crystalline states ( $\alpha$  and  $\beta$ ) of  $\text{In}_2\text{Se}_3$  without changing any other structural parameter. In a wavelength range of 1540–1560 nm, three splitting ratios of 1:1, 1:1.5 and 1:2 are achieved by this device, and the insertion losses of these three beam splitting ratios are less than 0.27, 0.13 and 0.17 dB, respectively. In addition, the robustness and balance of the device are analyzed and discussed, and compared with those of the power splitter of the same size designed by SOI platform and several power beam splitters reported in recent years, demonstrating the compact structure and simple regulation of this power splitter based on the phase change material  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , its good robustness, and its possibility of application on photonic integrated circuits.

**Keywords:** power beam splitter, phase change materials, reverse design, integrated optics

**PACS:** 42.82.-m, 42.82.Et, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230459

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12272407, 62275269, 62275271), the National Key R & D Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), and the Guangdong-Guangxi Joint Scientific Key Fund, China (Grant No. 2021GXNSFDA076001).

† Corresponding author. E-mail: [zxr76@gxu.edu.cn](mailto:zxr76@gxu.edu.cn)

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

基于直接二进制搜索算法设计的超紧凑 $\text{In}_2\text{Se}_3$ 可调控功率分束器

张伊祎 韦雪玲 农洁 马汉斯 叶子阳 徐文杰 张振荣 杨俊波

Ultra-compact  $\text{In}_2\text{Se}_3$  tunable power splitter based on direct binary search algorithm

Zhang Yi-Yi Wei Xue-Ling Nong Jie Ma Han-Si Ye Zi-Yang Xu Wen-Jie Zhang Zhen-Rong Yang Jun-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 154207 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230459

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230459>

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

基于下山单纯形算法逆向设计二维光子晶体波导型 $1 \times 5$ 分束器

Two-dimensional photonic crystal waveguide  $1 \times 5$  beam splitter reversely designed by downhill-simplex algorithm

物理学报. 2022, 71(14): 144204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220328>

基于相变材料超表面的光学调控

Tunable metasurfaces based on phase-change materials

物理学报. 2020, 69(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200453>

基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

Intelligent design of large angle deflection beam splitter based on method of moving asymptotes

物理学报. 2021, 70(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210117>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

实现散射场强整形的微散射体阵列逆向设计方法

Inverse design method of microscatterer array for realizing scattering field intensity shaping

物理学报. 2021, 70(1): 010202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200825>

二维铁电 $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{InSe}$ 垂直异质结能带的应力调控

Strain control of two-dimensional ferroelectric  $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{InSe}$  vertical heterojunction energy band

物理学报. 2021, 70(22): 227701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211158>