中国光学（中英文）
Chinese Optics
核心期刊

分光比可调的光功率分束器的设计

谢锋 朱硕隆 张振荣

Design of an optical power splitter with adjustable split ratio

XIE Feng, ZHU Shuo-long, ZHANG Zhen-rong

引用本文:
谢锋, 朱硕隆, 张振荣. 分光比可调的光功率分束器的设计[J]. 中国光学, 2023, 16(5): 1121-1128. doi: 10.37188/CO.2023-0038
XIE Feng, ZHU Shuo-long, ZHANG Zhen-rong. Design of an optical power splitter with adjustable split ratio[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1121-1128. doi: 10.37188/CO.2023-0038

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023-0038

文章编号　2097-1842(2023)05-1121-08

分光比可调的光功率分束器的设计

谢　锋，朱硕隆，张振荣*
（广西大学 计算机与电子信息学院，广西 南宁 530004）

摘要: 传统的解析理论设计方案存在计算复杂度高、有限解析解、耗时长等问题。为了解决以上问题，在传统的光器件设计基础上，提出一种依据逆向设计方法的分光比可调的光功率分束器方案。在 1.92 μm×1.92 μm 的紧凑区域内，引入 $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$(GSST) 相变材料改变器件的折射率分布。利用直接二进制搜索算法搜索 GSST 晶态和非晶态的最优状态分布。设计实现同一种器件结构，分光比可调的 T 型光功率分束器。仿真分析了器件的初始结构、分光比、相变材料区域状态分布、制造容差以及光场分布。结果表明：分光比分别为 1∶1、1.5∶1、2∶1 的 3 种光功率分束器在波长 1 530 nm−1 560 nm 之间的最小相对误差分别为 0.004%、0.14% 和 0.22%，在制造容差范围内传输曲线最大波动分别是 0.95 dB、1.21 dB、1.18 dB。该分光器结构紧凑，在光通信和信息处理领域有着较大的应用潜力。

关　键　词: 纳米光子系统；光功率分束器；逆向设计；直接二进制搜索
中图分类号: TN256　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2023-0038

Design of an optical power splitter with adjustable split ratio

XIE Feng, ZHU Shuo-long, ZHANG Zhen-rong*
(*School of Computer and Electronic Information*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zzr76@gxu.edu.cn*

Abstract: Traditional analytical theory design scheme faces problems, such as high computational complexity, limited analytical solution, and high time-consumption. To cambat these issues, based on the design of traditional optical devices, a scheme for designing an optical power splitter with adjustable split ratio according to the reverse design method is proposed. In a compact region of 1.92 μm×1.92 μm, $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$(GSST) is introduced to change the refractive index distribution of the device. The direct binary search algorithm is utilized to search the optimal state distribution of GSST in crystalline and amorphous states. A T-shaped optical power splitter with adjustable split ratio is designed and implemented for the same device structure. The initial structure, split ratio, phase change material region state distribution, manufacturing tolerance, and light field distribution of the device are simulated and analyzed. The results show the minimum relative errors of the designed optical power splitters with three splitting ratios of 1∶1, 1.5∶1 and 2∶1 between wavelengths

收稿日期: 2023-03-02；**修订日期:** 2023-03-27
基金项目: 国家自然科学基金(No. 12272407, No. 62275269, No. 62275271)；国家重点研发计划(No. 2022YFF0706005)；粤桂联合科学重点基金(No. 2021GXNSFDA076001)；广西重点研发计划(No. AB22080048)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12272407, No. 62275269, No. 62275271); National Key R & D Program of China (No. 2022YFF0706005); China Guangdong Guangxi Joint Science Key Foundation (No. 2021GXNSFDA076001); KR & DP of Guangxi (No. AB22080048)

1 530 nm and 1 560 nm are 0.004%, 0.14% and 0.22%, respectively. The maximum fluctuations of the transmission curve in the manufacturing tolerance range are 0.95 dB, 1.21 dB and 1.18 dB, respectively. The splitter has a compact structure and great potential for applications in optical communication and information processing.

Key words: nanophotonic system; optical power splitter; reverse design; direct binary search

1　引　言

光功率分束器是纳米光子系统中常见且重要的一种器件，其主要作用是对功率进行合理配置，与其他光器件进行集成以满足多样化的功能需求，广泛应用在光网络、光通信等领域。传统的设计方案是采用理论解析的方式，即根据光学相关理论以及丰富的实践经验，推理出器件的结构组成，但该方式存在一定的局限性。随着纳米光子系统需求的不断扩大，这种传统方式由于计算复杂度高、耗时长，而且设计出的器件尺寸比较大，不利于进一步进行集成扩展，无法满足目前集成化、小型化的业界需求。

计算机的飞速发展大幅度提升了运算能力，纳米光子系统的很多新思路被提出并得以实现。其中，逆向设计是一种从结果逆推过程的新思路，其从结果目标逆向得到结构，可以提升设计效率，有效避免对解析理论的高度依赖，降低器件设计理论门槛。Tahersima, M H 等人[1] 训练了一个深度学习神经网络，其在 ResNet 网络模型中有效地学习宽带集成光功率分束器的设计结果，实现对纳米光子器件正向和反向建模。改变设计区域孔位置处的折射率会改变光功率分束器内部的局部折射率，影响光最终的传播路径，根据用户指定的分光比，生成对应的集成光功率分束器，但是需要收集约 20 000 个光功率分束器的数据，数据量过大，耗时长，不利于快速实现。Yuan H 等人[2] 基于硅和 $Ge_2Sb_2Se_4Te_1$（GSST）的混合结构，通过切换相变材料状态获得不同分光比，在 2.4 μm×2.4 μm 和 2.4 μm×3.6 μm 的区域内，设计实现了 1:1、1.5:1、2:1 和 2.5:1 的 Y 型可调光功率分束器，但尺寸不够紧凑且无法满足输出光路和输入光路垂直的场景需求。Xie H CH 等人[3] 利用逆向设计思想在 3.6 μm×3.6 μm 的区域内设计了 1:1:1:1、2:2:1:1、2:2:2:1 和 4:3:2:1 的 1×4 的光功率分束器，利用逆向设计算法对 4 个输出端进行联合优化，所设计的光功率分束器的传输效率均在 70% 以上，但收敛时间较长，需要 48 小时才得到收敛结果。

利用逆向设计的思路可以有效解决传统理论解析设计方法存在的缺陷。直接二进制算法作为逆向设计的一种常用方法，与其他算法相比，因实现过程简单，收敛速度快等优点而受到广泛关注[4]。本文在传统光功率分束器的基础上，针对光功率分束器无法调节的问题，采用直接二进制搜索算法调整 GSST 的非晶态 a-GSST(amorphous GSST) 和晶态 c-GSST(crystalline GSST) 在器件上的状态分布[2,5]，设计仿真了分光比可调的 T 型光功率分束器。利用相变材料的状态变化改变器件局部区域折射率，实现同一器件结构，多种分光比，且输出光路与输入光路方向垂直的功能，为难以通过传统途径设计可调光功率分束器提供新的解决方案。

2　算法原理

直接二进制搜索算法是一种收敛速度快、实现机制简单的算法，在光功率分束器的设计上有较好的设计效果[6]，算法流程如图 1 所示[7-8]。其基本原理是将器件的待设计空间作为算法操作对象，划分成如图 2(彩图见期刊电子版) 所示的一个个独立可操作的像素区域。整个像素区域分为初始结构区域和相变区域。其中：初始结构区域的每一个像素有硅和空气两种状态，初始结构区域的起始状态可以采用随机生成，也可以人工设定；相变区域是嵌入 GSST 组成的硅光子波导耦合区域，耦合区域的每一个像素区域有 a-GSST 和 c-GSST 两种状态，分别对应专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) 中逻辑电路的“0”和“1”，GSST 状态的切换可以通过 ASIC 编写计算机程序控制 GSST 所在的像素区域的电加热，实现电脉冲数字化控制。本文针

对相变区域使用直接二进制搜索算法搜索最优结构,按照设定好的遍历顺序,逐一对每一个像素区域进行操作,改变像素区域的状态。如果操作后的结果能有利于逼近预期目标,则保留操作结果,否则回滚至操作前的状态,当所有的像素区域均被操作,则表示一轮完整操作结束。经过多轮迭代,当达到器件的指标需求或者达到最大迭代次数,算法结束。

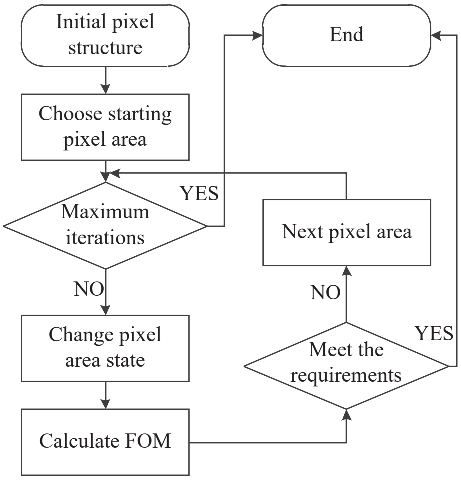


图 1　算法流程图

Fig. 1　Algorithm flow chart

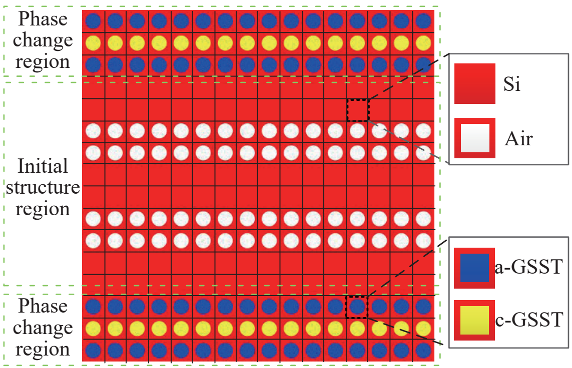


图 2　像素区域的划分及状态图

Fig. 2　Division and state map of pixel regions

为了避免直接二进制搜索算法过早局部收敛,本文预先设定待搜索像素区域的起始状态,然后针对像素区域状态进行遍历搜索和操作,本文具体的像素区域搜索规则如下。

(1) 确定算法的收敛规则。本文以品质因数 FOM(Figure of Merit) 作为算法收敛的评价指标[9-10],通过该指标动态调整算法的运行方向,据此设计 FOM 的计算公式为:

$$\mathrm{FOM} = T_{\mathrm{out}}(n) \quad , \tag{1}$$

式中$T_{\mathrm{out}}(n)$表示光功率分束器输出端的归一化传输效率,n表示输出端口的序号,据此设计收敛条件f:

$$\mathrm{f} = \begin{cases} T_{\mathrm{out}}(1)_{\mathrm{new}} > T_{\mathrm{out}}(1)_{\mathrm{old}} \\ T_{\mathrm{out}}(2)_{\mathrm{new}} > T_{\mathrm{out}}(2)_{\mathrm{old}} \\ \left|T_{\mathrm{out}}(1)_{\mathrm{new}} - R \times T_{\mathrm{out}}(2)_{\mathrm{new}}\right| < \varepsilon \end{cases} \quad , \tag{2}$$

式中: $T_{\mathrm{out}}(1)_{\mathrm{new}}$和$T_{\mathrm{out}}(2)_{\mathrm{new}}$分别表示两个输出端在改变像素区域状态后的品质因数, $T_{\mathrm{out}}(1)_{\mathrm{old}}$和$T_{\mathrm{out}}(2)_{\mathrm{old}}$分别表示两个输出端在像素区域状态未改变前的品质因数, R表示期望的分光比, ε表示允许误差。当两个输出端口的品质因数得到提升,同时满足器件分光比的比例关系时,则认为满足收敛条件,保留结果。

上述收敛条件针对 1×2 光功率分束器有较好的适应性,而对于 1×3 光功率分束器则会存在局限性。为此,引入均方根误差来描述 3 个端口的离散程度,方便直接二进制搜索算法调节输出端的传输效率波动幅度,使之趋向目标结果。对此,定义传输效率波动幅度:

$$M = \sqrt{\frac{\sum (T_{\mathrm{out}}(1) - T_{\mathrm{out}}(2))^2}{k}} + \sqrt{\frac{\sum (T_{\mathrm{out}}(1) - T_{\mathrm{out}}(3))^2}{k}} + \sqrt{\frac{\sum (T_{\mathrm{out}}(3) - T_{\mathrm{out}}(2))^2}{k}} \quad , \tag{3}$$

式中: $T_{\mathrm{out}}(1)$、$T_{\mathrm{out}}(2)$、$T_{\mathrm{out}}(3)$表示 3 个输出端口的传输效率情况, k表示进行仿真运算时所设置的波长的数量。

(2) 按照像素区域的初始分布,从设计区域的左上角开始,沿着纵向逐一改变像素区域的状态,使得当前像素区域的折射率发生变化,局部的变化最终将对器件性能产生影响。如果在改变像素区域状态后,仿真计算结果没能满足收敛条件,则表示本次操作无效,回滚至像素区域改变前的状态,继续改变下一个像素区域。

(3) 重复上述过程,遍历完所有像素区域后,进行重复迭代,直至仿真计算结果能够达到期望性能或者达到预设的最大迭代次数,此时的像素区域状态分布是设计区域内算法找到的最优分布。

相变材料在外界条件刺激下能够快速切换状态,在诸多领域有着广泛应用[11-12]。本文在传统

光功率分束器的基础上引入 GSST 相变材料，在 1.92 μm×1.92 μm 的紧凑区域内设计 T 型光功率分束器。相变材料状态的变化会改变相变区域的折射率分布，引导光在相变区域的传播路径，重新分配器件整体的传输功率，实现一种器件结构多种分光比的光功率分束器。本文采用直接二进制搜索算法可以对器件结构不断地进行优化调整，原则上可以设计多种分光比的光功率分束器。

3 实验分析

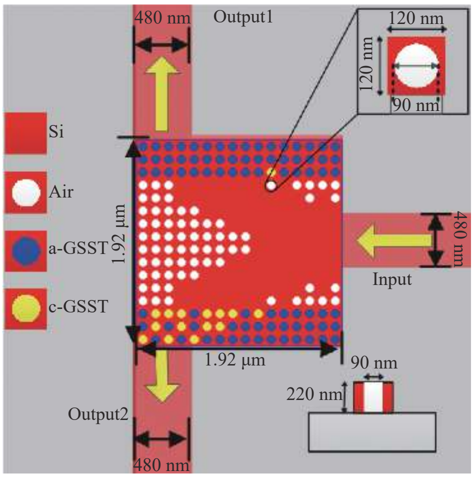
3.1 初始结构区域对器件的影响

本文设计 1×2 分光比可调的 T 型光功率分束器，器件所在的 1.92 μm×1.92 μm 的设计区域被离散化，像素尺寸为 16×16，共 256 个像素区域，分为相变区域和初始结构区域。每一个像素区域可以嵌入直径为 90 nm，深度为 220 nm 的 GSST 相变材料，也可以不嵌入物质，保留空气状态。器件结构如图 3(彩图见期刊电子版) 所示，包括一个 480 nm 宽的输入波导，两个与输入波导垂直的 480 nm 宽的输出波导，衬底上覆盖了 220 nm 厚的硅。仿真实验采用 FDTD Solution 工具，结合 Matlab 脚本实现算法自动化处理[13]。

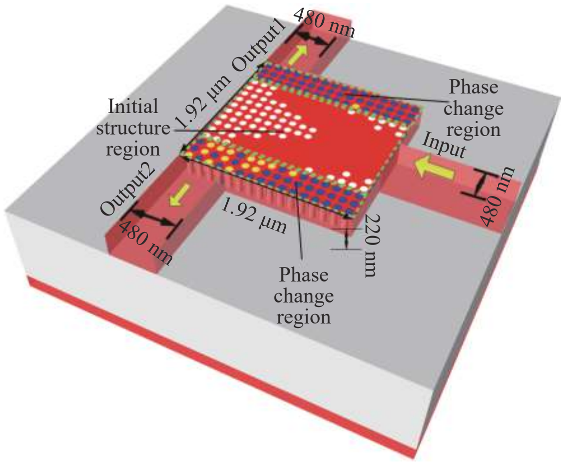
在 FDTD Solution 中创建器件的基础结构，设置好光源以及监视区。 在 Matlab 中设置圆柱尺寸以及材料类型，定义 FOM 以及输入和输出端口的透过率。利用 Matlab 里 FDTD Solution 的程序接口，将 Matlab 的参数传递到 FDTD Solution，利用直接二进制搜索算法实现 Matlab 与 FDTD 的联合仿真。

仿真运行在 16 核 CPU，128 G 内存的工作站环境，相比于其他算法，直接二进制搜索算法实现难度低，收敛速度快，运算时间短，能够广泛应用在纳米光子系统中。

器件的初始结构区域可采用随机生成的方式，也可以采用人工预设的方式。初始结构区域的每一个像素区域均存在硅和圆形空洞两种状态。随机生成的方式比较简单，但随机性过大会导致过早局部收敛，无法得到预期结果。为了更好更快地得到预期的实验结果，本文采用人工预设的方式来初始化器件的平面结构分布。图 4(彩图见期刊电子版) 为不同初始结构的光功率分束器的光场分布以及初始平面结构。图 4(a) 是未经



(a) 平面结构示意图
(a) Planar structure diagram



(b) 3D 结构示意图
(b) 3D structural diagram

图 3 器件结构

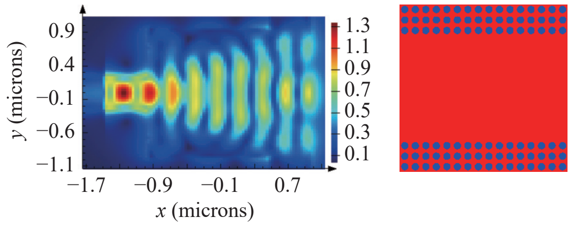
Fig. 3 The device structure

过刻蚀的初始结构得到的光功率分束器，其光场分布只能直接往前传播，既不能改变光路，也无法实现光功率的再分配；图 4(b) 是全填充圆形空洞的初始结构得到的光功率分束器，其光场分布均匀发散，无法实现功率分配以及垂直方向的输出；图 4(c) 的初始状态是随机生成的，存在较大的不确定性，算法搜索时容易过早局部收敛；4(d) 是人工预设的初始结构，从光场分布图中可以看出，射入光束被成功分成两路光路，同时输出方向与输入光束相垂直。

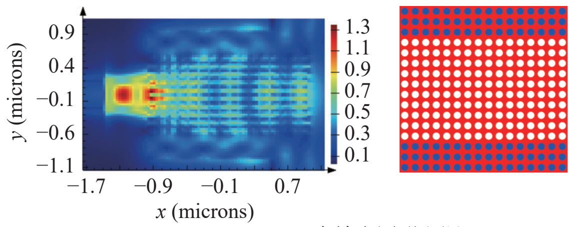
为了对比不同初始结构的衰减情况，使用附加损耗 EL(Excess Loss) 进行衡量，其定义为:

$$\mathrm{EL} = -10 \times \log(t_n/T) \quad , \tag{4}$$

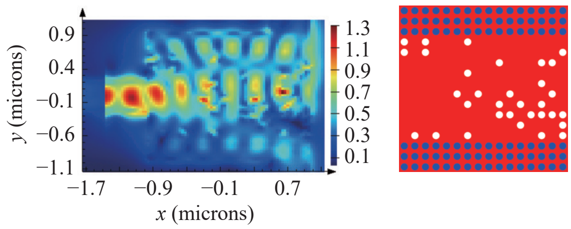
其中，t_n表示第n个输出端口的透过率，T表示输入端口的透过率[14-15]。不同初始结构的光功率分束



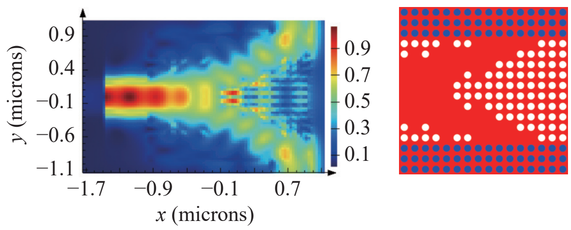
(a) 全填充硅
(a) Filled with Si



(b) 全填充圆形空洞
(b) Filled with circular voids



(c) 随机分布
(c) Random distribution



(d) 人工预设
(d) Manual preset

图 4　不同初始结构光功率分束器的光场分布以及初始平面结构

Fig. 4　Light field distribution and the initial plane structure of optical power splitter with different initial structures

器附加损耗曲线如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。从图 5 的附加损耗曲线可以看出, 与全硅的初始结构、全填充圆形空洞的初始结构、随机分布的初始结构相比较, 人工预设的初始结构(绿色线条)具有更低的附加损耗, 输出端口 1 的最低附加损耗值为 3.98 dB, 输出端口 2 的最低附加损耗值为 3.97 dB。由于全硅的初始结构、全填充圆形空洞的初始结构是对称结构, 所以输出端口 1 和输出端口 2 的附加损耗值基本一样, 曲线几乎重叠在一起。

对于尺寸小于 1 μm 的端口, 其耦合损耗比大

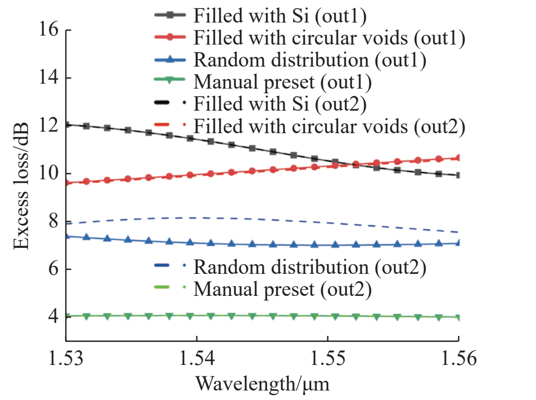


图 5　不同初始结构的光功率分束器附加损耗曲线

Fig. 5　Excess loss curves of optical power splitters with different initial structures

尺寸的端口大, 其原因有:

(1)由于其表面积相对较小, 因此其耦合面积也会相应减小, 导致光束更难以准确进入另一个传输介质中。

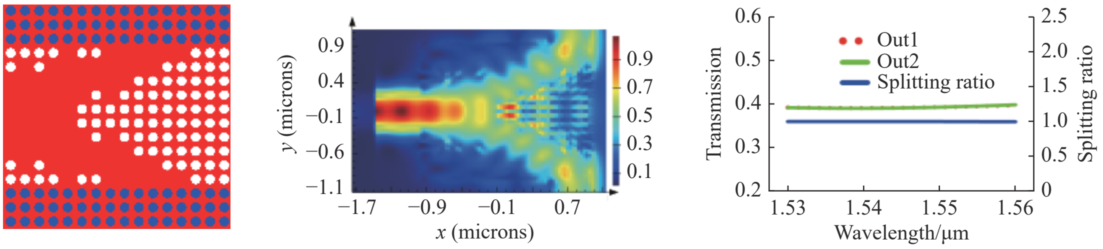
(2)光束的横向分布具有多个波峰和波谷, 导致光束在进入小尺寸传输介质时发生光束重构。

(3)小尺寸端口更容易受到光的散射和折射的影响, 从而引起更大的耦合损耗。

由此可知, 人工预设的初始结构具有更好的性能, 故本文设计的光功率分束器在引入直接二进制搜索算法进行结构优化之前, 采用人工预设方式设计器件的初始结构。

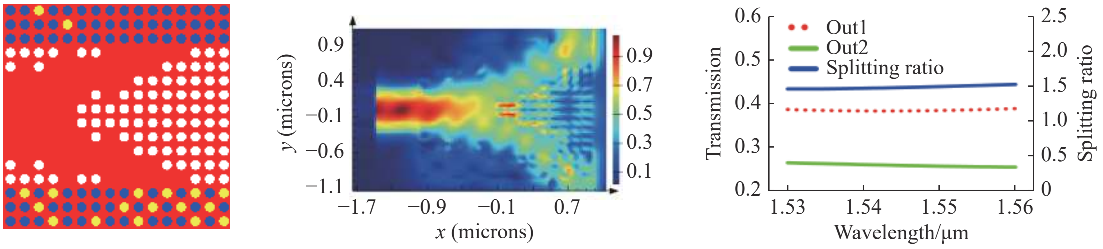
3.2　GSST 状态分布对器件的影响

实现分光比可调的功能是在图 4(d) 初始结构器件的基础上, 通过电脉冲改变 GSST 的光学属性, 进而改变光路, 最终影响器件的光场分布来实现的。仿真通过直接二进制搜索算法调整每一个像素区域的 GSST 状态 (a-GSST 或 c-GSST), 优化得到同样的结构, 不同分光比的光功率分束器。图 6(彩图见期刊电子版) 为不同分光比的 GSST 状态、光场分布、透射光谱以及分光比曲线图。图 6(a) 上下端分光比为 1∶1, 结构对称, GSST 的状态均保持在非晶态, 其余两种分光比器件的相变区域有部分像素区域的状态由 a-GSST 转变为 c-GSST。图 6(a)~6(c) 的上下端分光比在 1 530~1 560 nm 波长内的平均分光比分别为 1.000 1、1.487、1.989, 基本接近理想分光比; 最大相对误差分别为 0.2%、2.53%和 10.04%; 最小相对误差分别为 0.004%、0.14%和 0.22%, 平均相对误差分别为 0.08%、1.45%、4.2%。图 6(c) 的曲线波动最



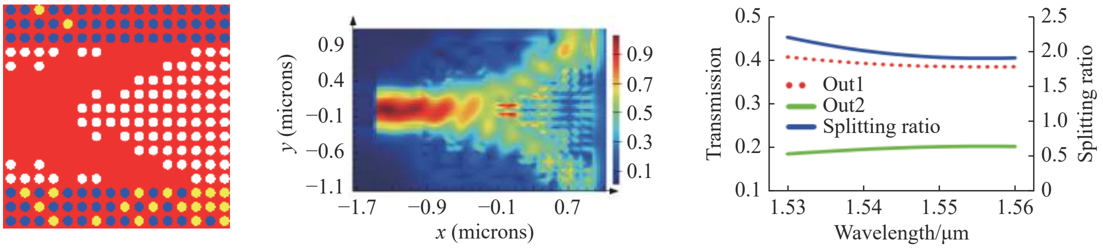
(a) 分光比为 1:1

(a) Splitting ratio of 1:1



(b) 分光比为 1.5:1

(b) Splitting ratio of 1.5:1



(c) 分光比为 2:1

(c) Splitting ratio of 2:1

图 6　不同分光比的光功率分束器的 GSST 状态、光场分布、透射光谱以及分光比曲线图

Fig. 6　The GSST state, light field distribution, transmission spectrum and splitting ratio curves of optical power splitter with different splitting ratios

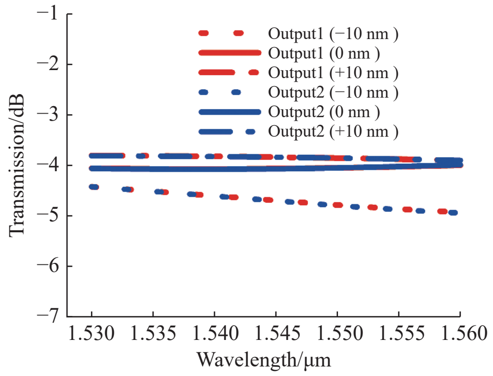
大，平稳性较其他二者差。究其原因在于分光比较大，在波长为 1530~1560 nm 内的误差也较高，但整体上满足设计要求。仿真结果表明：调整相变区域的 GSST 的状态分布可以获得分光比可调的光功率分束器。

3.3　制造容差对器件的影响

在光器件加工制造过程中，对硅材料的几何形状进行刻蚀时，会存在刻蚀不足或者刻蚀过度的现象，为此有必要对器件的制造容差进行仿真分析[16-17]。为了研究制造容差对器件结构的影响，仿真分析刻蚀孔的直径参数对器件性能的影响。图 7 展示了不同分光比的光功率分束器的刻蚀孔直径在−10 nm 至+10 nm 之间变化时制造容差的透射光谱响应。

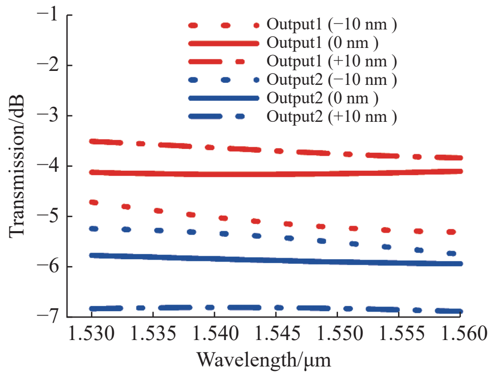
图 7 中实线表示孔直径不变时输出端口的光传输曲线，其他虚线为孔直径因存在制造公差而存在变化时的传输曲线。从图 7 可以看出，对于分光比为 1:1 的光功率分束器，当孔直径增大时，两个输出端口的传输效率都上升；当孔直径减小时，两个输出端口的传输效率都降低。另外两个光功率分束器，当孔直径增大时，上部端口 1 的传输效率均上升，下部端口 2 的传输效率均降低；孔直径减小时，上部端口 1 的传输效率均下降，下部端口 2 的传输效率均上升。在整个带宽范围内，不同分光比的光功率分束器的两个输出端口的制造容差传输曲线，与标准孔直径曲线之间的误差绝对值的最大值见表 1。可以看出 3 种分光比的器件在制造容差范围内，传输曲线最大波动分别是 0.95 dB、1.21 dB、1.18 dB。结果说明 3 种分光比器件的整体波动较小，表明孔直径在−10 nm 至+10 nm 变化时对传输效率的影响在可接受范围。

本文设计的光功率分束器带宽为 1530~1560 nm。在器件上嵌入 GSST 材料后，在 1550 nm 处，a-GSST 和 c-GSST 的复折射率分别为 3.3258+1.8×10^{-4}i 和 5.0830+0.350i，具有比 $Ge_2Sb_2Te_5$(GST）



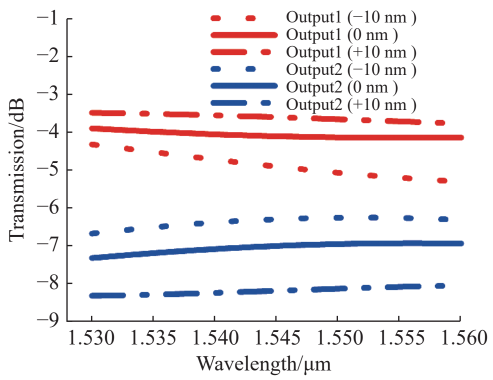
(a) 分光比为 1:1

(a) Splitting ratio of 1:1



(b) 分光比为 1.5:1

(b) Splitting ratio of 1.5:1



(c) 分光比为 2:1

(c) Splitting ratio of 2:1

图 7　孔直径在−10 nm 至+10 nm 变化时的透射光谱响应

Fig. 7　The simulated transmission spectra varying with the hole diameter changing from −10 nm to 10 nm

更低的光学损耗, 相变速度已经可以达到微秒至皮秒量级。通过 ASIC 编写计算机程序给 GSST 所在的像素区域单元适当的热、光或电刺激, 快速且重复地切换非晶态和晶态, 可以实现 GSST 的相变。比如, 在 Miscuglio 等人[18] 的研究

表 1　不同分光比器件的不同端口在不同制造容差下的误差分析表

Tab. 1　The error analysis table of different ports of devices with different split ratios under different manufacturing tolerances

Split ratio	Max absolute error Out1(+10)/dB	Max absolute error Out2(+10)/dB	Max absolute error Out1(−10)/dB	Max absolute error Out2(−10)/dB
1∶1	0.26	0.26	0.93	0.95
1.5∶1	0.61	1.05	1.21	0.53
2∶1	0.50	1.18	1.16	0.71

中, a-GSST 和 c-GSST 的热导率分别为 0.17±0.02 W/m/K 和 0.43±0.04 W/m/K; 比热容分别为 1.45±0.05 MJ/m^3/K 和 1.85±0.05 MJ/m^3/K。通过加热方式, 对 GSST 施加 20 个低压脉冲(1 μs, 5 V)触发结晶, 施加一个高压脉冲(2 μs, 15 V)得到非结晶状态。在 Zhang 等人[19] 的研究中, 使用周期为 1 μs, 占空比为 0.03%, 重复 100 000 次的激光脉冲序列可以得到 c-GSST, 使用宽度为 100 ns 的单脉冲可以得到 a-GSST。此外, 使用电热方式, 对于 c-GSST, 需施加由 50 个脉冲组成的脉冲串, 其周期为 1 ms, 占空比为 50%, 电压为 13 V, 总开关能量为 42.5 mJ, 对于 a-GSST, 则需要施加一个电压为 24 V 的脉冲, 开关能量为 5.5 μJ。

4　结　论

本文基于逆向设计思路, 利用直接二进制搜索算法, 在 SOI 平台上设计了一种在器件结构不变的基础上, 调整 GSST 的晶态和非晶态在器件的分布状态, 实现分光比可调的 T 型光功率分束器。器件尺寸仅有 1.92 μm×1.92 μm, 1∶1、1.5∶1、2∶1 的光功率分束器在波长为 1 530~1 560 nm 之间的最大相对误差分别为 0.2%、2.53% 和 10.04%, 最小相对误差分别为 0.004%、0.14% 和 0.22%。此外, 还仿真分析了制造容差对器件的影响, 刻蚀孔直径的制造公差变化对器件的影响在可接受范围内。本文所采用的设计思想和算法对于光子系统的研究和设计有一定的参考意义, 为紧凑型可调光器件的设计提供了一种有效思路。

参考文献:

[1]　TAHERSIMA M H, KOJIMA K, KOIKE-AKINO T, *et al.*. Deep neural network inverse design of integrated photonic power splitters[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1368.

[2] YUAN H, WU J G, ZHANG J P, *et al*.. Non-volatile programmable ultra-small photonic arbitrary power splitters[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(4): 669.

[3] XIE H C, LIU Y J, SUN W Z, *et al*.. Inversely designed 1× 4 power splitter with arbitrary ratios at 2-μm spectral band[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 2700506.

[4] 杨知虎, 傅佳慧, 张玉萍, 等. 基于深度学习的Fano共振超材料设计[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(4): 816-823.
YANG ZH H, FU J H, ZHANG Y P, *et al*.. Fano resonances design of metamaterials based on deep learning[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 816-823. (in Chinese)

[5] YUAN H, WANG ZH H, ZHANG J P, *et al*.. Ultra-compact programmable arbitrary power splitter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 12062: 1206207.

[6] LIU Y J, WANG Z, LIU Y L, *et al*.. Ultra-compact mode-division multiplexed photonic integrated circuit for dual polarizations[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5925-5932.

[7] MA H S, YANG J B, HUANG J, *et al*.. Inverse-designed single-mode and multi-mode nanophotonic waveguide switches based on hybrid silicon-$Ge_2Sb_2Te_5$ platform[J]. *Results in Physics*, 2021, 26: 104384.

[8] WANG Q, CHUMAK A V, PIRRO P. Inverse-design magnonic devices[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2636.

[9] XIE H CH, LIU Y J, WANG Y H, *et al*.. An ultra-compact 3-dB power splitter for three modes based on pixelated meta-structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(6): 341-344.

[10] LU L L Z, LIU D M, ZHOU F Y, *et al*.. Inverse-designed single-step-etched colorless 3 dB couplers based on RIE-lag-insensitive PhC-like subwavelength structures[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5051-5054.

[11] 严德贤, 陈欣怡, 封覃银, 等. 二氧化钒辅助的可切换多功能超材料结构研究[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(3): 514-522.
YAN D X, CHEN X Y, FENG Q Y, *et al*.. A vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 514-522. (in Chinese)

[12] 张晓斌, 韩伟娜. 角度复用的光学加密超表面的超快激光嵌套加工方法研究[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(4): 889-903.
ZHANG X B, HAN W N. Ultrafast laser nested machining method for angle-multiplexed optically encrypted metasurface[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 889-903. (in Chinese)

[13] PENG ZH, FENG J B, YUAN H, *et al*.. A non-volatile tunable ultra-compact silicon photonic logic gate[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(7): 1121.

[14] MA H S, HUANG J, ZHANG K W, *et al*.. Inverse-designed arbitrary-input and ultra-compact 1× N power splitters based on high symmetric structure[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11757.

[15] ARUNACHALAM M, RAJU S. Power efficient space division multiplexing–wavelength division multiplexing system using multimode EDFA with elevated refractive index profile[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2022, 35(6): e5065.

[16] FERNÁNDEZ DE CABO R, GONZÁLEZ-ANDRADE D, CHEBEN P, *et al*.. High-performance on-chip silicon beamsplitter based on subwavelength metamaterials for enhanced fabrication tolerance[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(5): 1304.

[17] LU M J, DENG CH Y, ZHENG P F, *et al*.. Ultra-compact TE-mode-pass power splitter based on subwavelength gratings and hybrid plasmonic waveguides on SOI platform[J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127250.

[18] MISCUGLIO M, MENG J W, YESILIURT O, *et al*. . Artificial synapse with mnemonic functionality using GSST-based photonic integrated memory[C]. *Proceedings of 2020 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium*. IEEE, 2020: 1-3.

[19] ZHANG Y F, CHOU J B, LI J Y, *et al*.. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4279.

作者简介：

谢　锋(1989—)，男，广西浦北人，硕士研究生，讲师，2015 年于广西大学获得硕士学位，主要从事光器件、人工智能方面的研究。E-mail: 664019140@qq.com

张振荣(1976—)，男，湖南祁阳人，博士，教授，2005 年于新加坡南洋理工大学获得博士学位，主要从事光通信、光器件等方面的研究。E-mail: zzr76@gxu.edu.cn