

基于下山单纯形算法的宽带光子晶体 1×3 分束器研究

许健, 施鹏程, 施伟华, 李培丽*

南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来科技)学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出了一种基于二维光子晶体的波导型宽带光子晶体 1×3 分束器, 通过在波导分支处引入一个调控介质柱并优化其半径和偏移量, 可以调控分束器各输出端口的透过率; 通过在两分支波导内侧引入三组带宽优化介质柱并优化其半径, 可以实现分束器的宽带特性。为了提高优化效率, 获得性能优良的宽带分光比可设计的分束器, 利用下山单纯形算法, 根据特定的分光比目标, 对提出的 1×3 分束器进行逆向设计和研究。结果表明, 不仅提高了光子晶体分束器的优化效率, 而且获得了性能优良的宽带分束器。设计的 1×3 等比分束器在 1525~1565 nm 带宽范围内的附加损耗低于 0.199 dB, 均匀性小于 0.119 dB, 响应时间在 0.5 ps 以内; 设计的 1×3 不等比分束器在 1525~1565 nm 带宽范围内的附加损耗不大于 0.177 dB, 分束方差不大于 6.88×10^{-4} , 响应时间在 0.5 ps 以内。该分束器在未来全光通信网、光子高密度集成等领域具有很好的应用前景。

关键词 光学器件; 光子晶体; 分束器; 宽带; 下山单纯形算法

中图分类号 TN256 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230630

1 引言

光分束器是一种非常重要的光通信设备, 它是一种光学无源器件^[1-2], 用于将光信号分离, 并在整个传输系统中实现分路、合路。根据制造工艺的差异, 光分束器可以分为平面波导型光功率分束器^[3]、熔融拉锥型光纤分束器^[4]、微光学元器件型分束器^[5]和光子晶体型光分束器^[6]。平面波导型功率分束器的分光均匀性优异, 但价格昂贵; 熔融拉锥型光纤分束器的制造技术比较先进, 但对光束的分离效果不佳; 微光学元器件型分束器的插入损耗较小, 但制造过程比较复杂; 光子晶体型分束器的传输损耗较低, 能够实现大角度分束, 而且体积小, 易于集成, 受到研究人员的广泛关注。近年来, 基于光子晶体的光分束器研究主要集中在提升单波长光分束器的分束能力上^[7-9]。宽带光子晶体分束器已成为当前的研究热点。

2013年, Zhang等^[10]提出了一种基于光子晶体定向耦合的 Y 型分束器, 实现了 1645~1717 nm 带宽范围内的 1×4 等比分束, 总透过率在 96% 以上。2015年, Wang等^[11]提出了基于光子晶体波导的 1×4 分束器, 实现了 1493~1574 nm 带宽范围的等比分束, 总透过率在 99% 以上。2017年, Danaie等^[12]提出了一种基于光子晶体波导的 T 型 1×2 分束器, 实现了 51 nm 带宽的等比或非等比分束, 总透过率在 90% 以上。2019年, Arunkumar等^[13]提出了一种基于光子晶体环形腔的光学 Y 型分束器, 实现了 1510~1535 nm 带宽范围

内的 1×2 等比分束、1465~1495 nm 带宽范围内的 1×3 等比分束、1440~1490 nm 带宽范围内的 1×4 等比分束和 1480~1505 nm 带宽范围内的 1×6 等比分束, 总透过率在 90% 以上。2021年, Moumeni等^[14]提出了一种基于光子晶体波导和环形槽腔的 Y 型 1×8 分束器, 通过改变波导连接处的介质柱半径, 有效提升了该结构在 1521~1576 nm 带宽范围内等比分束的总透过率。近几年设计的宽带光子晶体分束器大多只能实现等比分束, 而且功能相对单一, 因此各输出端口分光比可设计的宽带光子晶体分束器更具研究价值。

目前, 研究人员主要采用控制变量法对宽带光子晶体分束器的结构参数进行优化, 这种方法耗时长、效率低, 仅适用于优化少量变量。若要提高宽带光子晶体分束器的性能, 通常需要同时对多个参数进行调整。因此, 利用传统的控制变量法难以实现分光比灵活可设计且分束性能优良的宽带光子晶体分束器。

笔者提出了一种基于二维光子晶体的波导型宽带光子晶体 1×3 分束器, 通过在波导分支处引入一个调控介质柱, 并优化其半径和偏移量, 可以调控光子晶体 1×3 分束器各输出端口的透过率, 从而达到了利用一个介质柱实现分光比灵活可设计的目的; 通过在两分支波导内侧引入三组带宽优化介质柱并优化其半径, 可以实现分束器的宽带特性, 从而达到了利用三组介质柱实现宽带宽传输的目的。为了提高优化效率, 获得性能优良的宽带分光比可设计的分束器, 根据目标分光比, 利用下山单纯形算法^[15-17]对调控介质柱的半

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-05-17; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-07-04

通信作者: *lip1@njupt.edu.cn

径和偏移量以及三组带宽优化介质柱的半径进行优化,逆向设计出了具有不同分光比的宽带光子晶体 1×3 分束器,并对其附加损耗、分束性能、响应时间和容差进行了研究。

2 理论模型与原理分析

2.1 结构设计

所提宽带光子晶体的 1×3 分束器结构如图 1 所示。以空气为背景,按三角晶格排列 12×11 个圆柱形硅介质柱,介质柱的折射率 $n=3.46$,晶格常数为 a ,介质柱的半径 $r=0.2a$ 。光子晶体周围设有完美匹配层

(PML),完美匹配层能吸收所有入射光而不产生反射。

在完整的光子晶体中沿 x 轴方向移除中央一排介质柱,形成主波导 W_1 ;在主波导中心两侧与主波导呈 60° 方向移除部分介质柱,形成上下对称的两个分支波导 W_2 和 W_3 。 W_1 的左端与光输入端相连, W_1 的右端、 W_2 的上端和 W_3 的下端分别与输出端口 Port₁、Port₂、Port₃ 相连。在波导 W_1 、 W_2 和 W_3 交汇处引入半径为 R_1 的调控介质柱,调控介质柱沿 x 轴和 z 轴的偏移量分别为 F_1 和 F_2 ;在两分支波导 W_2 和 W_3 的内侧引入三组带宽优化介质柱,其半径分别为 R_2 、 R_3 和 R_4 。

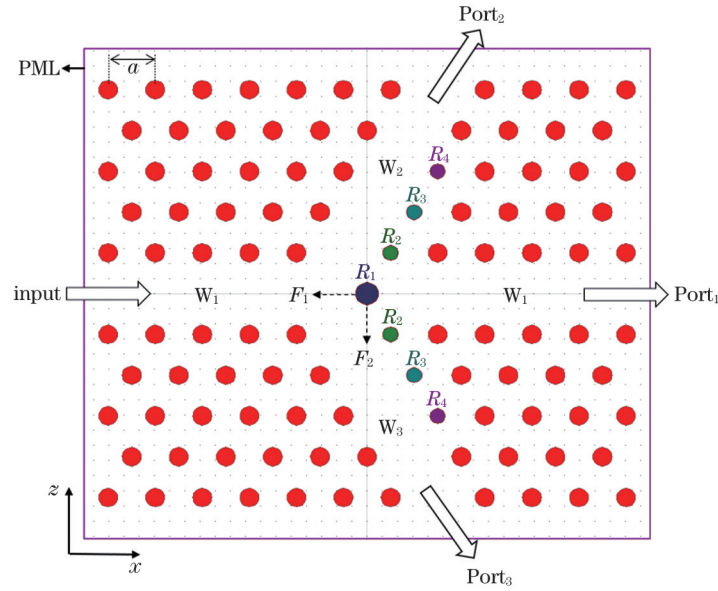


图 1 宽带光子晶体 1×3 分束器结构图

Fig. 1 Schematic of broadband photonic crystal 1×3 beam splitter structure

当入射光从输入端传输到 W_1 ,并沿着 x 轴正向传播到达调控介质柱后,一部分光沿着 W_2 和 W_3 分别从端口 Port₂ 和 Port₃ 输出,其余部分仍沿 x 轴正向传输,从端口 Port₁ 输出,实现光子晶体 1×3 分束功能。通过改变调控介质柱的半径和偏移量可以控制三个输出端口的分光比,从而实现分光比的灵活可设计;通过改变带宽优化介质柱的半径可以实现宽带特性,从而实现宽带宽分束。

2.2 能带计算

平面波展开法(PWM)^[18]是光子晶体理论分析方法中应用相对较早也是较普遍的一种方法,主要用来求解光子晶体的色散关系。它的基本思想是将电磁波以平面波的形式展开,从而将麦克斯韦方程组转化为本征方程,求解该方程的本征值便可得到传播光子的本征频率。二维光子晶体的横电(TE)本征方程为

$$\sum_{G'} \epsilon^{-1}(G - G')(k + G)(k + G') f_1(G') = \frac{\omega^2}{c^2} f_1(G), \quad (1)$$

横磁(TM)本征方程为

$$\sum_{G'} \epsilon^{-1}(G - G') |k + G| |k + G'| f_2(G') = \frac{\omega^2}{c^2} f_2(G), \quad (2)$$

式中: k 为第一布里渊区的波矢量; G 为倒格矢; ω 为光在真空中的角频率; c 为光速。通过求解上述方程,能够得到TE和TM模的本征频率 $\omega(k)$,从而可以推导出光子晶体周期结构的色散关系和归一化能带结构。

利用PWM对宽带光子晶体 1×3 分束器的能带结构进行研究。图 2 为完整二维三角晶格的TE和TM能带结构图。选择其中较宽的TE模带隙,其归一化频率(a/λ)的范围为 $0.275 \sim 0.446$,取晶格常数 $a=0.62 \mu\text{m}$,则对应的波长为 $1.390 \sim 2.255 \mu\text{m}$ 。 1×3 分束器的工作波长便在此范围内选取。

2.3 确定优化参数

时域有限差分(FDTD)法^[19]是研究光子晶体中电磁场空间分布最常用的方法之一。它的基本思路是:把麦克斯韦方程组中的旋度方程分别从空间和时间上进行离散,把微分运算转化为差分运算,求得差分方程组的解,从而得到各网格单元的场值。通过逐步求解

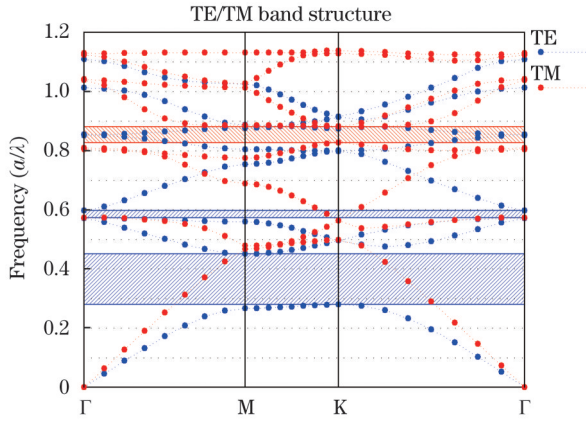


图 2 完整二维三角晶格光子晶体的能带结构图

Fig. 2 Energy band structure diagram of complete two-dimensional triangular lattices photonic crystal

差分方程,可以得出光子晶体在稳态下的电磁场分布。

由于FDTD法的每一步都存在误差,为了保证FDTD计算的收敛性及稳定性,时间步长 Δt 与 x 轴、 y 轴和 z 轴的空间步长 Δx 、 Δy 和 Δz 须满足稳定性条件,即

$$\Delta t \leq \frac{1}{V_{\max} \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}, \quad (3)$$

式中: V_{\max} 为求解空间内电磁波的最大相速度。 Δx 、 Δy 、 Δz 与 Δt 的取值越小,计算结果的精确性越高。

利用FDTD法对TE偏振光在宽带光子晶体 1×3 分束器中的传播情况进行研究。在1525~1565 nm带宽范围内,研究调控介质柱的半径 R_1 和偏移量 F_1 、 F_2 以及带宽优化介质柱的半径 R_2 、 R_3 、 R_4 对三个输出口透过率的影响。令 $R_1=0.15 \mu\text{m}$, $R_2=R_3=R_4=0.2a$, $F_1=F_2=0 \mu\text{m}$ 。

1) 调控介质柱半径的影响

图3为1525~1565 nm带宽范围内等间隔取的5个波长光在各个输出端口的透过率随着 R_1 的变化。在0.08~0.18 μm 范围内,随着 R_1 增大,端口Port₁的透过率先缓慢减小后缓慢增大;当 $R_1=0.15 \mu\text{m}$ 时,透过率急剧增大,之后又急剧减小;当 $R_1=0.17 \mu\text{m}$ 时,端口Port₁的透过率最高。由于波导结构的对称性,上、下两个分支波导输出口Port₂和Port₃的透过率始终相等。随着 R_1 增大,端口Port₂和Port₃的透过率先缓慢增大后缓慢减小,并在 $R_1=0.15 \mu\text{m}$ 时急剧减小,然后急剧增大;当 $R_1=0.17 \mu\text{m}$ 时,端口Port₂和Port₃的透过率最低。由此可见,通过调节 R_1 可以有效地对耦合进 W_2 、 W_3 的光和沿 W_1 继续传输的光进行分配,从而调节端口Port₁和端口Port₂、Port₃的透过率。

2) 调控介质柱沿 x 轴偏移量的影响

图4为1525~1565 nm带宽范围内等间隔取的5个波长光在各个输出端口的透过率随着 F_1 的变化。

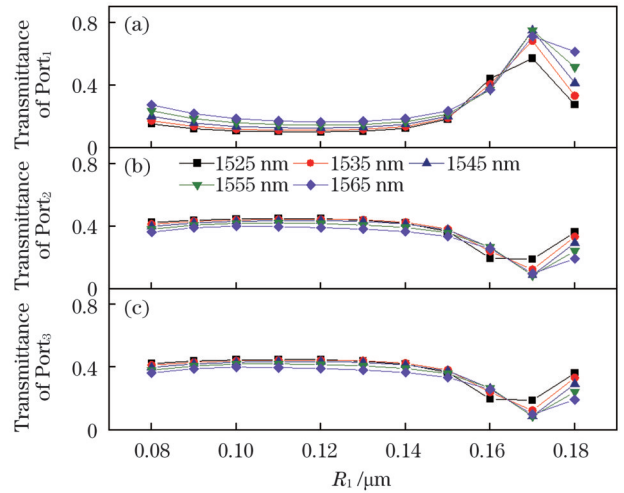


图 3 不同波长的光在各端口的透过率随 R_1 的变化。(a)端口Port₁; (b)端口Port₂; (c)端口Port₃

Fig. 3 Variation of transmittance of different wavelengths of light at each port with R_1 . (a) Port₁; (b) Port₂; (c) Port₃

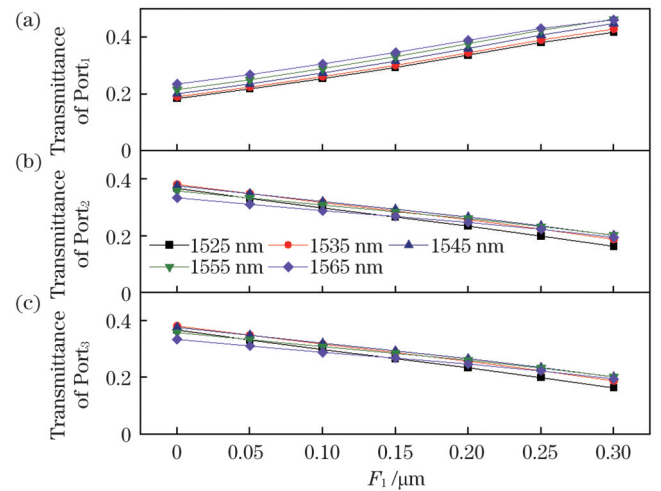


图 4 不同波长的光在各端口的透过率随 F_1 的变化。(a)端口Port₁; (b)端口Port₂; (c)端口Port₃

Fig. 4 Variation of transmittance of different wavelengths of light at each port with F_1 . (a) Port₁; (b) Port₂; (c) Port₃

在0~0.30 μm 范围内,随着 F_1 增大,端口Port₁的透过率逐渐增大,当 $F_1=0.30 \mu\text{m}$ 时,端口Port₁的透过率最高。由于调控介质柱沿 x 轴方向偏移并未改变波导结构的对称性,端口Port₂与Port₃的透过率始终相等。随着 F_1 增大,端口Port₂与Port₃的透过率逐渐减小,当 $F_1=0.30 \mu\text{m}$ 时,端口Port₂与Port₃的透过率最小。由此可见,通过调节 F_1 可以有效地对耦合进 W_2 、 W_3 的光和沿 W_1 继续传输的光进行分配,从而调节端口Port₁和端口Port₂、Port₃的透过率。

3) 调控介质柱沿 z 轴偏移量的影响

图5为1525~1565 nm带宽范围内等间隔取的5个波长光在各个输出端口的透过率随着 F_2 的变化。在-0.35~0.35 μm 范围内,随着 F_2 增大,端口Port₁的透过率先减小后增大,当 $F_2=0 \mu\text{m}$ 时透过率达到最大值;之后,随着 F_2 继续增大,端口Port₁的透过率变化曲

线与前半部分的变化曲线呈轴对称。随着 F_2 增大, 端口 Port₂ 的透率先增大再减小; 随着 F_2 继续增大, 端口 Port₂ 的后半部分透过率曲线与前半部分呈中心对称, 对称中心的横坐标为 $F_2=0 \mu\text{m}$ 。由于调控介质柱沿 z 轴方向偏移改变了波导结构的对称性, 上、下输出端口 Port₂、Port₃ 的透过率不再相同。随着 F_2 增大, 端口 Port₃ 的透率先减小后增大; 随着 F_2 继续增大, 端口 Port₃ 的后半部分透过率曲线与前半部分呈中心对称, 对称中心的横坐标为 $F_2=0 \mu\text{m}$ 。由此可见, 通过调节 F_2 可以有效地对传输到 W_1 、 W_2 、 W_3 的光进行分配, 从而同时调节三个输出端口的透过率。

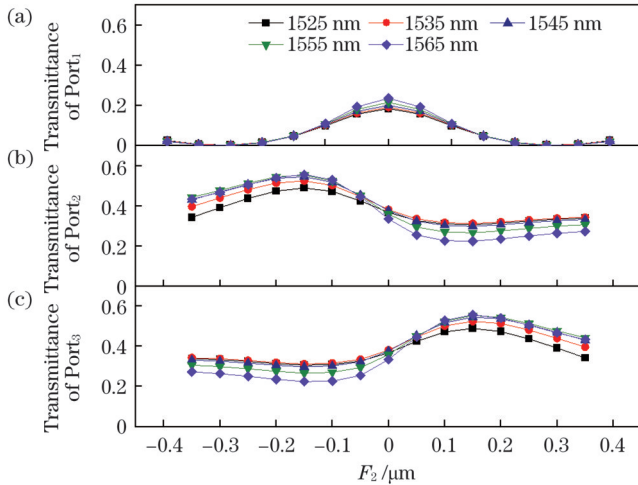


图 5 不同波长光在各端口的透过率随 F_2 的变化。(a) 端口 Port₁; (b) 端口 Port₂; (c) 端口 Port₃
Fig. 5 Variation of transmittance of different wavelengths of light at each port with F_2 . (a) Port₁; (b) Port₂; (c) Port₃

4) 带宽优化介质柱半径的影响

令 $R_2=R_3=R_4$, 同时改变三组带宽优化介质柱的半径。图 6 为 1525~1565 nm 带宽范围内等间隔取的

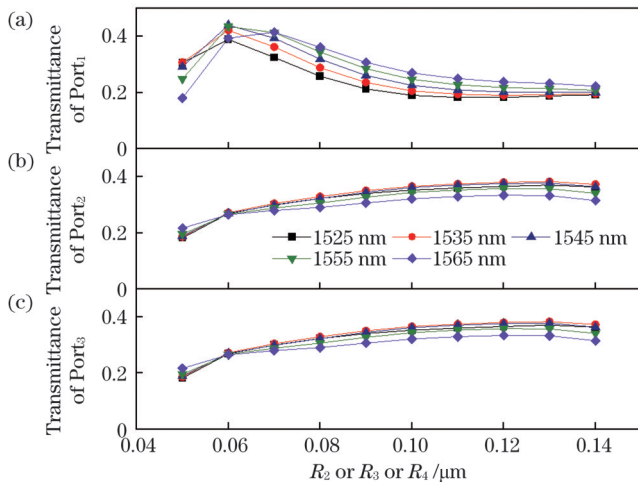


图 6 不同波长光在各端口的透过率随 R_2 、 R_3 、 R_4 的变化。(a) 端口 Port₁; (b) 端口 Port₂; (c) 端口 Port₃
Fig. 6 Variation of transmittance of different wavelengths of light at each port with R_2 or R_3 or R_4 . (a) Port₁; (b) Port₂; (c) Port₃

5 个波长光在各个输出端口的透过率随 R_2 、 R_3 和 R_4 的变化。在 $0.05\sim 0.14 \mu\text{m}$ 范围内, 三个输出端口透过率随着三组带宽优化介质柱半径的改变而改变, 同时 5 个波长光之间的透过率差值也随之发生变化; 当 $R_2=R_3=R_4=0.06 \mu\text{m}$, 5 个波长光在三个输出端口的透过率曲线出现聚拢。因此, 通过改变 R_2 、 R_3 、 R_4 可以提高分束器的宽带特性。

3 优化方法及结果分析

3.1 下山单纯形算法

下山单纯形算法(DSA)是一种用于优化多维无约束问题的数值方法, 能够自动生成递减向量, 从而获得函数的最优值。DSA 具有搜索速度快、精度高等特点, 即使初始单纯形出现多个局部最优解, 它也会收敛, 适用于对优化光子晶体分束器这类无约束非线性规划问题进行求解。基于 DSA, 对 1×3 分束器进行逆向设计, 流程如图 7 所示。

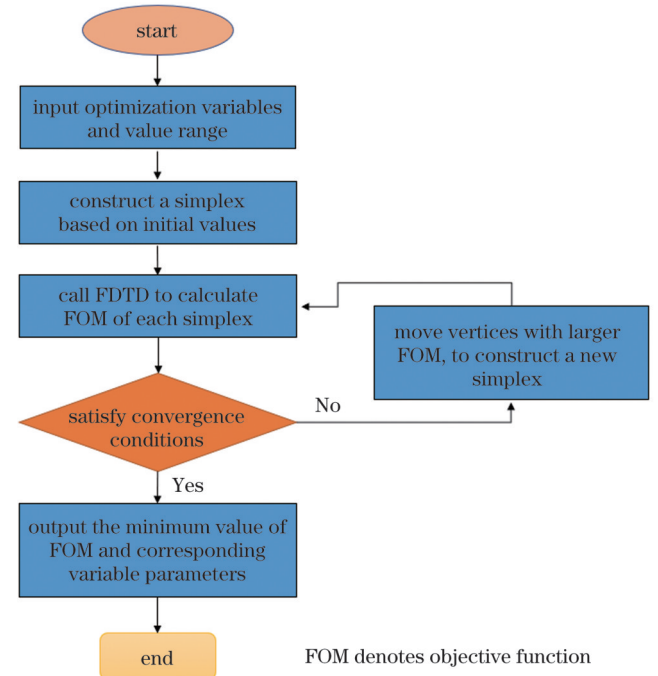


图 7 基于 DSA 逆向设计宽带光子晶体 1×3 分束器的流程图
Fig. 7 Flow chart of reverse design of broadband photonic crystal 1×3 beam splitter based on DSA

基于 DSA 逆向设计宽带光子晶体 1×3 分束器的具体步骤如下:

- 1) 输入优化变量和取值范围。根据 2.3 节对结构参数影响的分析, 设定宽带光子晶体 1×3 分束器的优化变量及其取值范围, 如表 1 所示。
- 2) 根据变量初始值构造单纯形。设变量初始值分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 , 构造的初始单纯形有 7 个顶点。
- 3) 调用 FDTD 法计算各顶点的目标函数值。目标函数定义为

表 1 宽带光子晶体 1×3 分束器的优化变量及其取值范围
Table 1 Optimization parameters and their value range of broadband photonic crystal 1×3 beam splitter

Parameter	Range	
Radius / μm	R_1	0.08–0.18
	R_2 & R_3 & R_4	0.05–0.14
Offset / μm	F_1	0–0.3
	F_2	–0.35–0.35

$$f_{\text{FOM}} = \frac{1}{MN-1} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V_{ij} \cdot (P_{ij} - Q_{ij})^2], \quad (4)$$

式中： M 是宽带光子晶体 1×3 分束器输出端口的数目，本文取 $M=3$ ； N 是在 1525~1565 nm 波长范围内等波长间隔取的波长数目，本文取 $N=34$ ，波长间隔为 1.18 nm； P_{ij} 、 Q_{ij} 和 V_{ij} 分别为第 i 个输出端口在第 j 个波长处的实际透过率、目标透过率和权重。

4) 判断是否满足收敛条件。将算法的目标收敛值 G_1 设置成 10^{-6} ，若目标函数值 f_{FOM} 出现其极大值小于 G_1 或极大值与极小值之差小于 G_1 ，则算法实现收敛，并输出目标函数值的极小值和优化后的变量参数，否则进入步骤 5)。

5) 移动目标函数较大的顶点，构造新单纯形，构造完成后，返回步骤 3)，开始新一轮寻优。在此迭代过程中，单纯形的各个顶点将不断地向目标函数的极小点靠近，直至满足所设置的收敛条件。此时，函数在每个顶点的极小值以及对应的变量参数就是最终的优化结果。至此，优化过程结束。

3.2 优化结果分析

对于光功率分束器，通常用附加损耗 EL (在公式中记为 L_E)、响应时间 τ 、分束均匀性 U 或分束方差 σ^2 衡量其性能。其中，附加损耗 EL 是器件输出光总功

率 P_{out} 相对于输入光总功率 P_{in} 的损失值，单位为 dB，其表达式为

$$L_E = -10 \lg \left(\sum \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right). \quad (5)$$

响应时间 τ 定义为输出光功率从稳态值的 10% 上升到 90% 所用的时间。

分束均匀性 U 定义为工作在某一波长下的分束器所有输出端口输出光功率的最大变化量，用于衡量光子晶体分束器的等比分束性能，单位为 dB。其表达式为

$$U = -10 \lg \left(\frac{P_{\text{min}}}{P_{\text{max}}} \right), \quad (6)$$

式中： P_{min} 、 P_{max} 分别为分束器的最小和最大功率输出端口的输出功率值。

分束方差 σ^2 用于衡量光子晶体分束器的不等比分束性能，定义为工作在某一波长下的分束器各端口实际输出功率与期望输出功率之差的度量值。其表达式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{M-1} \sum_i (P_i - \bar{Q}_i)^2, \quad (7)$$

式中： M 为输出端口的数量； P_i 、 \bar{Q}_i 分别为第 i 个输出端口的实际输出功率和期望输出功率。

基于 DSA，根据不同的分光比目标，设定合适的目标函数，对调控介质柱的半径、偏移量以及带宽优化介质柱的半径进行逆向设计。以分光比为 1:1:1、3:2:1 和 1:2:9 三种不同情况下的宽带 1×3 分束器为例，表 2 给出了这三种分光比下利用 DSA 优化后的宽带光子晶体 1×3 分束器的结构参数以及优化时间。在优化过程中使用的仿真软件是 Rsoft，使用的计算机的 CPU 是 AMD Ryzen 7 5800H，显卡是 RTX 3050 Ti，内存大小为 16 GB。优化时间在 30 min 左右，大大提高了优化效率。

表 2 不同分光比下利用 DSA 优化后的宽带光子晶体 1×3 分束器的结构参数

Table 2 Structural parameters of broadband photonic crystal 1×3 beam splitter optimized by DSA under different splitting ratios

Splitting ratio	Radius / μm		Offset / μm		Time consumption
	R_1	R_2 & R_3 & R_4	F_1	F_2	
1:1:1	0.164	0.138 & 0.056 & 0.053	0.265	0	21 min 14 s
3:2:1	0.161	0.09 & 0.066 & 0.069	0.226	–0.034	32 min 33 s
1:2:9	0.098	0.112 & 0.056 & 0.083	0.033	0.305	31 min 57 s

基于 DSA，将逆向设计的结构参数与 FDTD 相结合，对所设计的分束器在 1525~1565 nm 带宽范围内的附加损耗、分束均匀性、分束方差和响应时间进行分析。

1) 1:1:1 的宽带 1×3 分束器

图 8 为该分束器在 1520~1570 nm 波长范围内各端口的透过率分布、附加损耗和均匀性分布图。可以看出：在 1525~1565 nm 带宽范围内，各端口的透过率基本集中在 0.33 附近；均匀性随着波长增大略有变化，并在 1537 nm 处达到最大值，在 1552 nm 处达到最小值，且均小于 0.119 dB；总透过率随着波长增加先升高

再缓慢降低，并在 1536 nm 处达到最高值，在 1565 nm 处达到最低值，因此附加损耗在 1565 nm 处最大，为 0.199 dB。此外，在带宽范围内，各波长光的响应时间均在 0.5 ps 以内。以上结果表明，基于 DSA，可以逆向设计出性能优良的宽带光子晶体 1×3 等比分束器。

2) 3:2:1 的宽带 1×3 分束器

图 9 为该分束器在 1520~1570 nm 波长范围内各端口的透过率分布以及附加损耗和方差分布。从图中可以看出：在 1525~1565 nm 带宽范围内，端口 Port₁、Port₂、Port₃ 的透过率分别集中在 0.50、0.33 和 0.17 附

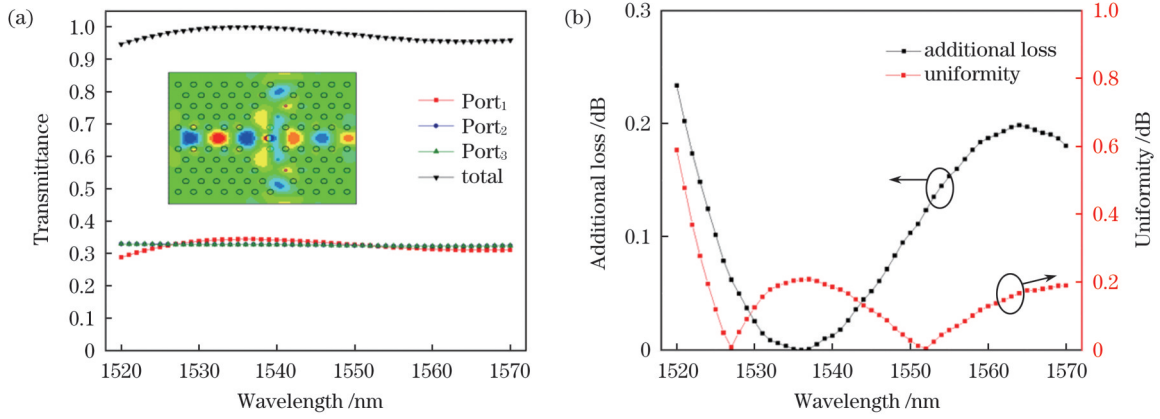


图 8 分光比为 1:1:1 的宽带 1×3 分束器的透过率分布以及附加损耗和均匀性分布。(a) 透过率分布; (b) 附加损耗和均匀性分布
 Fig. 8 Transmittance, additional loss, and uniformity distributions of broadband 1×3 beam splitter with a splitting ratio of 1:1:1.
 (a) Transmittance distribution; (b) additional loss and uniformity distribution

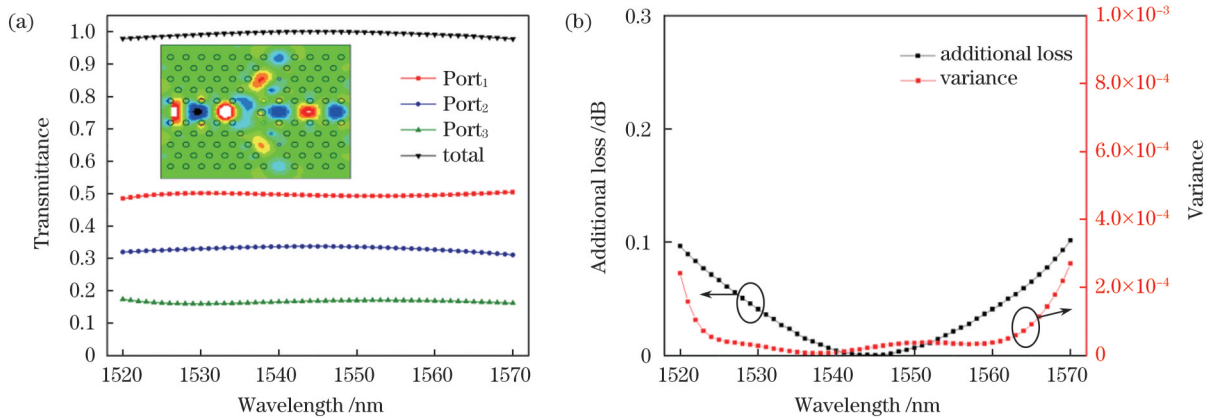


图 9 分光比为 3:2:1 的宽带 1×3 分束器的透过率分布以及附加损耗和方差分布。(a) 透过率分布; (b) 附加损耗和方差分布
 Fig. 9 Transmittance, additional loss, and variance distributions of broadband 1×3 beam splitter with a splitting ratio of 3:2:1.
 (a) Transmittance distribution; (b) additional loss and variance distributions

近; 方差随着波长增大略有变化, 在 1565 nm 处达到最大值, 在 1538 nm 处达到最小值, 且最大值和最小值均小于 9.17×10^{-5} 。总透过率随着波长增大而先缓慢升高再缓慢降低, 并在 1545 nm 处达到最高, 在 1525 nm 处达到最低, 因此附加损耗在 1525 nm 处最大, 为 0.067 dB。此外, 在带宽范围内, 各波长光的响应时间均在 0.4 ps 以内。上述结果表明, 基于 DSA 可以逆向设计出性能

优良的分光比为 3:2:1 的宽带光子晶体分束器。

3) 1:2:9 的宽带 1×3 分束器

图 10 为该分束器在 1520~1570 nm 波长范围内各端口的透过率分布以及附加损耗和方差分布。从图中可以看出: 在 1525~1565 nm 带宽范围内, 端口 Port₁、Port₂ 和 Port₃ 的透过率分别集中在 0.08、0.17 和 0.75 附近; 方差随着波长的增大略有变化, 并在 1565 nm 处达

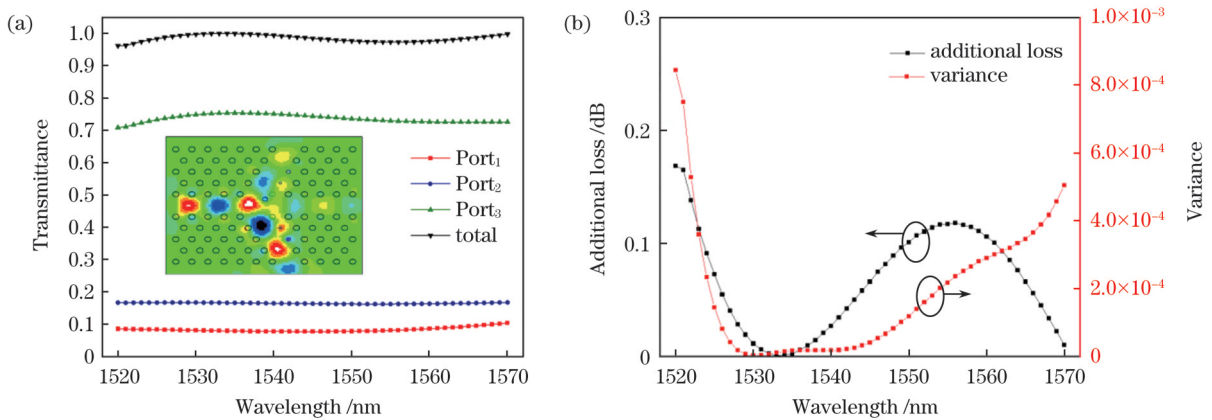


图 10 分光比为 1:2:9 的宽带 1×3 分束器的透过率分布以及附加损耗和方差分布。(a) 透过率分布; (b) 附加损耗和方差分布
 Fig. 10 Transmittance, additional loss, and variance distributions of broadband 1×3 beam splitter with a splitting ratio of 1:2:9.
 (a) Transmittance distribution; (b) additional loss and variance distributions

到最大值,在 1533 nm 处达到最小值,且最大值和最小值均小于 3.45×10^{-4} 。总透过率随着波长增大先缓慢升高再缓慢降低,之后再缓慢升高,在 1533 nm 处达到最高值,在 1556 nm 处达到最低,因此其附加损耗在 1556 nm 处最大,为 0.118 dB。此外,在带宽范围内,各波长光的响应时间均在 0.5 ps 以内。上述结果表明,基于 DSA 可以逆向设计出性能优良的分光比为 1:2:9 的宽带光子晶体分束器。

进一步对逆向设计的三种不同分光比的宽带 1×3 分束器在各个波长下的响应时间进行分析,分析结果如图 11 所示。在 1525~1565 nm 波长范围内,三种 1×3 分束器的响应时间曲线均比较平坦,这表明同一分束器在不同波长下的响应时间基本一致。其中: 1×3 等比分束器的平均响应时间最短,为 0.475 ps;两种非等比 1×3 分束器的平均响应时间接近,在 0.485 ps 左右。

表 3 给出了其他几种不同分光比的宽带 1×3 光子晶体分束器的结构参数及其在 1525~1565 nm 波长范围内附加损耗和分束方差的最大值。表 3 表明,逆向

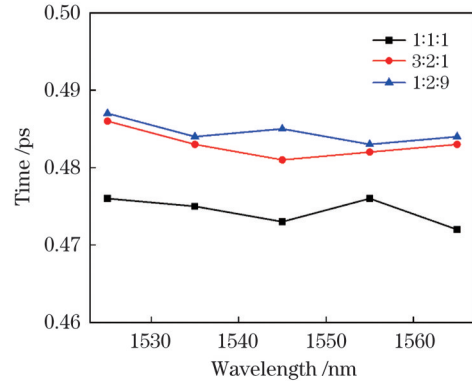


图 11 三种不同分光比的宽带 1×3 分束器的响应时间曲线
Fig. 11 Response time curves of broadband 1×3 beam splitters with three different splitting ratios

设计出的不同分光比宽带光子晶体分束器的最大附加损耗和分束方差分别不大于 0.177 dB 和 6.88×10^{-4} 。可见,所设计的分束器不仅实现了三输出端口分光比的灵活设计,而且各输出端口透过率可设计范围大,满足大分光比分束。

表 3 其他分光比的宽带 1×3 光子晶体分束器的结构参数及性能参数

Table 3 Structure parameters and performance parameters of broadband photonic crystal 1×3 beam splitter with other beam splitting ratios

Splitting ratio	Radius / μm			Offset / μm		EL _{max} / dB	σ_{max}^2
	R_1	R_2 & R_3 & R_4	F_1	F_2			
2:4:3	0.148	0.127 & 0.079 & 0.136	0.080	-0.018	0.128	6.01×10^{-4}	
5:4:6	0.152	0.138 & 0.074 & 0.081	0.182	-0.010	0.084	1.54×10^{-4}	
7:1:4	0.160	0.053 & 0.07 & 0.093	0.117	-0.076	0.081	1.35×10^{-4}	
3:8:1	0.154	0.079 & 0.055 & 0.059	0.060	-0.125	0.177	6.88×10^{-4}	

3.3 容差分析

考虑到实际制造中的偏差,笔者研究了三种宽带功率分束器所有优化结构参量的制造公差。如果宽带功率分束器的最大附加损耗小于 0.45 dB(对应的透过

率约为 90%),最大均匀性小于 1 dB,或者非等比的宽带功率分束器的最大方差小于 1×10^{-3} ,则认为分束性能是可接受的。图 12(a)给出了三个宽带功率分束器的最大附加损耗与所有优化结构参量的偏差之间的关系

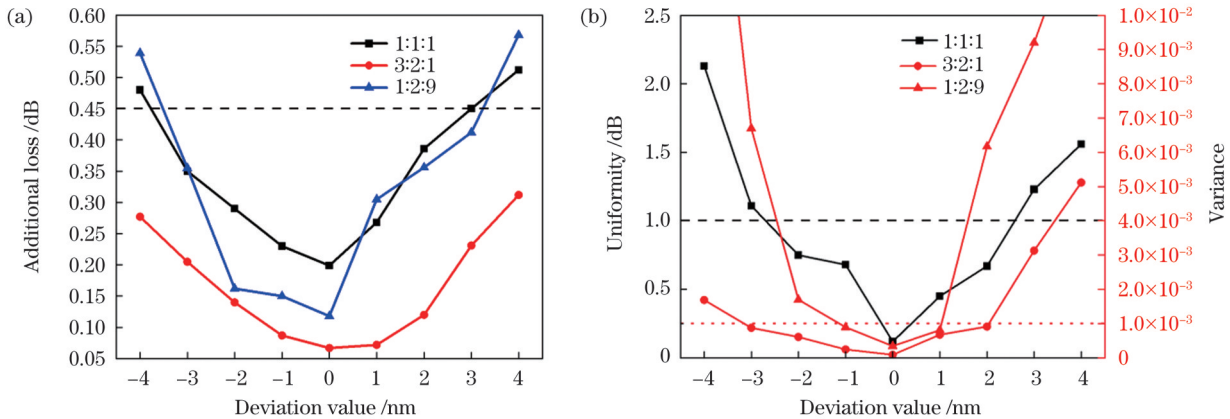


图 12 三个宽带功率分束器的最大附加损耗、最大均匀性、方差与所有优化结构参量的偏差之间的关系。(a)最大附加损耗与所有优化结构参量的偏差之间的关系;(b)最大均匀性、方差与所有优化结构参量的偏差之间的关系

Fig. 12 Relationship between the maximum additional loss/maximum uniformity/variance of the three broadband power splitters and the deviation of all optimized structural parameters. (a) Relationship between the maximum additional loss and the deviation of all optimized structural parameters; (b) relationship between the maximum uniformity/variance and the deviation of all optimized structural parameters

系。如图所示,对于附加损耗,分束比为 1:1:1、3:2:1 和 1:2:9 的宽带功率分束器的可接受偏差分别约为 $-4\sim 4$ nm、 $-3\sim 3$ nm 和 $-3\sim 3$ nm。图 12(b)显示了三个宽带功率分束器的最大均匀性、方差与所有优化结构参量的偏差之间的关系。从图中可以看出,分束比为 1:1:1、3:2:1 和 1:2:9 的宽带功率分束器的可接受偏差分别约为 $-2\sim 2$ nm、 $-3\sim 2$ nm 和 $-1\sim 1$ nm。因此,当同时考虑附加损耗和均匀性/方差时,分束比为 1:1:1、3:2:1 和 1:2:9 的宽带功率分束器的所有优化结构参量的制造公差分别约为 ± 2 nm、 ± 2 nm 和 ± 1 nm。

目前,将硅介质柱排列于空气背景中主要有两种方法,分别是自组装技术和光刻技术。其中的二次显影全息光刻及离轴光学光刻等新型光刻技术的出现不仅可以极大地降低二维光子晶体的制作成本,简化操作过程,还可以制备出更小的结构,并可使结构的尺寸达到 1 nm 甚至 0.1 nm 的精度^[20-21]。本文基于 DSA 逆向设计出的分束器的尺寸精度为 1 nm 量级,实际工艺能够实现。

4 结 论

提出了一种基于二维光子晶体的波导型宽带光子晶体 1×3 分束器,通过优化调控介质柱的半径和偏移量可以调控分束器各输出端口的透过率,通过优化三组带宽优化介质柱的半径可以实现分束器的宽带特性。为了提高优化效率,获得性能优良的宽带分光比可设计的分束器,利用 DSA,根据特定的分光比目标,对提出的 1×3 分束器进行逆向设计和研究。设计的 1×3 等比分束器在 1525~1565 nm 带宽范围内的附加损耗低于 0.199 dB,均匀性小于 0.119 dB,响应时间在 0.5 ps 以内;设计的 1×3 不等比分束器在 1525~1565 nm 带宽范围内的附加损耗不大于 0.177 dB,分束方差不大于 6.88×10^{-4} ,响应时间在 0.5 ps 以内。

基于 DSA 的逆向设计不仅提高了光子晶体分束器的优化效率,大大减少了优化时间,而且获得了性能优良的宽带分束器。该分束器工作带宽宽,分光比灵活可设计,分束性能优良,而且分光比范围大,在全光通信网、光子高密度集成等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 张耀举,肖化层.用三角形闪耀光栅实现分束器[J].光学技术,2003,29(3):368-369,371.
Zhang Y J, Xiao H C. Beam splitters with triangular blazed gratings[J]. Optical Technology, 2003, 29(3): 368-369, 371.
- [2] 刘峭峭,徐旭明,李鸿,等.基于 1×4 光子晶体波导分束器的特性研究[J].应用光学,2009,30(1):56-59.
Liu Q Q, Xu X M, Li H, et al. Characteristics of beam splitter based on 1×4 photonic crystal waveguide[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 56-59.
- [3] 冯克成,吴东生.Y型平面介质波导分束器的理论分析与设计[J].长春光学精密机械学院学报,1993,16(3):22-25.
Feng K C, Wu D S. Theoretical analysis and designing of Y-type planar dielectric waveguide beam splitter[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1993, 16(3): 22-25.
- [4] Takahashi H, Ohmori Y, Kawachi M. Design and fabrication of silica-based integrated-optic 1×128 power splitter[J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2131-2133.
- [5] Cai T, Mizumoto T, Naito Y. A novel 1×8 optical power splitter using tapered waveguide coupling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(2): 162-163.
- [6] Chen C C, Chien H D, Luan P G. Photonic crystal beam splitters[J]. Applied Optics, 2004, 43(33): 6187-6190.
- [7] 柯航,李培丽,施伟华.基于下山单纯形算法逆向设计二维光子晶体波导型 1×5 分束器[J].物理学报,2022,71(14):144204.
Ke H, Li P L, Shi W H. Two-dimensional photonic crystal waveguide 1×5 beam splitter reversely designed by downhill-simplex algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(14): 144204.
- [8] 厉梦瑶,徐光跃,郑加金,等.基于二维光子晶体波导的 1×5 等比分束器[J].光电子·激光,2021,32(8):799-805.
Li M Y, Xu G Y, Zheng J J, et al. 1×5 equal-score beam splitter based on two-dimensional photonic crystal waveguide[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2021, 32(8): 799-805.
- [9] 姜宗丹,李培丽,张元方.基于二维光子晶体的光控分光比可调 Y 型太赫兹波分束器[J].红外与毫米波学报,2020,39(5):561-566.
Jiang Z D, Li P L, Zhang Y F. Light-control splitting ratio tunable Y-type terahertz waves to beam splitter based on two-dimensional photonic crystal[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(5): 561-566.
- [10] Zhang P Y, Guo H, Chen H J, et al. Novel composite beam splitter with directional coupler and Y-junction using photonic crystal[J]. Optik, 2013, 124(18): 3384-3386.
- [11] Wang H, He L J. Proposal for high efficiently 1×4 power splitter based on photonic crystal waveguides[J]. Modern Physics Letters B, 2015, 29(15): 1550073.
- [12] Danaie M, Nasirifar R, Dideban A. Design of adjustable T-shaped and Y-shaped photonic crystal power splitters for TM and TE polarizations[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2017, 25: 4398-4408.
- [13] Arunkumar R, Jayabarathan J K, Robinson S. Design and analysis of optical Y-splitters based on two-dimensional photonic crystal ring resonator[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2019, 21(7/8): 435-442.
- [14] Moumeni I, Labbani A. Very high efficient of 1×2 , 1×4 and 1×8 Y beam splitters based on photonic crystal ring slot cavity[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(2): 129.
- [15] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization [J]. The Computer Journal, 1965, 7(4): 308-313.
- [16] Chelouah R, Siarry P. Genetic and Nelder-Mead algorithms hybridized for a more accurate global optimization of continuous multim minima functions[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 148(2): 335-348.
- [17] Su H L, Lan F, He Y Y, et al. A modified downhill simplex algorithm interpolation response surface method for structural reliability analysis[J]. Engineering Computations, 2019, 37: 1423-1450.
- [18] Sailor W C, Mueller F M, Villeneuve P R. Augmented-plane-wave method for photonic band-gap materials[J]. Physical Review B, 1998, 57(15): 8819-8822.
- [19] Kuzmiak V, Maradudin A A. Symmetry analysis of the localized modes associated with substitutional and interstitial defects in a two-dimensional triangular photonic crystal[J]. Physical Review B, 2000, 61(16): 10750-10761.
- [20] Park H, Lee S. Double gyroids for frequency-isolated weyl points in the visible regime and interference lithographic design[J]. ACS Photonics, 2020, 7(6): 1577-1585.
- [21] Hsieh M L, Chen S Y, Kaiser A, et al. A low cost and large-scale synthesis of 3D photonic crystal with SP2 lattice symmetry[J]. AIP Advances, 2019, 9(8): 085206.

Broadband Photonic Crystal 1×3 Beam Splitter Designed by Downhill-Simplex Algorithm

Xu Jian, Shi Pengcheng, Shi Weihua, Li Peili*

College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract

Objective An optical beam splitter is an important device for optical communication. It is mainly used to split optical signals and realize optical signal splitting and combination in transmission networks. Compared with traditional beam splitters, photonic crystal-based beam splitters have low transmission loss, large-angle beam splitting, small size, and easy integration, making them suitable for large-scale and high-density integration in modern communication. In recent years, research on photonic crystal-based optical beam splitters has mainly focused on enhancing the beam-splitting capacity of single-wavelength optical beam splitters, which has limited their application. Broadband photonic crystal beam splitters have become a current focus of research. In addition, few structures can achieve broadband beam splitting and flexible beam-splitting ratios simultaneously. A photonic crystal beam splitter that can achieve a flexible and designable splitting ratio within a wide bandwidth range is of great significance for the optical communication system. In this article, a broadband 1×3 photonic crystal beam splitter is proposed based on a 2D photonic crystal waveguide. By introducing a regulating dielectric column at the waveguide branch and optimizing its radius and offset, we can adjust the transmittance of each output port of the beam splitter. By introducing three sets of bandwidth-optimized dielectric columns on the inner side of the two branch waveguides and optimizing their radii, the broadband characteristics of the beam splitter can be achieved.

Methods Currently, optimization of the structural parameters of broadband photonic crystal beam splitters mainly uses the control variable method, which is time consuming, inefficient, and only suitable for optimizing a small number of variables. To improve the performance of broadband photonic crystal beam splitters, multiple parameters must be adjusted simultaneously. Therefore, it is difficult to realize a broadband photonic crystal beam splitter with a flexible beam-splitting ratio and excellent beam-splitting performance using the traditional control variable method. In this study, a broadband photonic crystal 1×3 beam splitter was reversely designed based on the downhill-simplex algorithm. First, the effect of the radius and offset of the adjustable dielectric column on the transmittance of each port and the effect of the radius of the bandwidth-optimized dielectric column on the broadband characteristics were analyzed using the finite-difference time-domain method. Subsequently, the radius and offset of the modulating dielectric column and the radius of the bandwidth-optimized dielectric column were optimized using the downhill-simplex algorithm according to a specific target beam-splitting ratio, and a broadband photonic crystal 1×3 beam splitter with different beam splitting ratios was designed in reverse.

Results and Discussion The results show that the inverse design of the 1×3 photonic crystal beam splitter based on the downhill-simplex algorithm not only improves the optimization efficiency of the photonic crystal beam splitter but also can provide a broadband beam splitter with excellent performance. The designed 1×3 isoperimetric beam splitter has an additional loss of less than 0.199 dB, uniformity of less than 0.119 dB, and response time within 0.5 ps in the bandwidth range of 1525–1565 nm (Figs. 8 and 11). The designed 1×3 unequal beam splitter has an additional loss of less than 0.177 dB, beam-splitting variance of less than 6.88×10^{-4} in the bandwidth range of 1525–1565 nm, and response time within 0.5 ps (Figs. 9, 11, and 20, Table 3).

Conclusions (1) This structure can achieve three output ports with different spectral ratios by adjusting only one dielectric column (R_1 in this study). (2) The designed beam splitter has a wide range of variation in beam-splitting ratio, and all three output ports can achieve a transmittance change of approximately 0.08–0.75. (3) By adding three sets of dielectric columns to optimize the bandwidth, this structure can achieve good broadband characteristics throughout the entire C-band. (4) The combination of theoretical models and optimization algorithms improves the optimization efficiency of photonic crystal beam splitters, greatly reduces the optimization time, and makes high-performance broadband beam splitters possible. The beam splitter has a wide operating bandwidth, flexible beam-splitting ratio, excellent beam-splitting performance, wide range of beam-splitting ratios, and good prospects for future applications in all-optical communication networks, photonic high-density integration, etc.

Key words optical devices; photonic crystal; beam splitter; broadband; downhill-simplex algorithm