



基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

黄辉 胡晨岩 田梓聪 缪秋霞 王慧琴

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

Huang Hui Hu Chen-Yan Tian Zi-Cong Miu Qiu-Xia Wang Hui-Qin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 234102 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210117

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210117>

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

基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

黄辉¹⁾ 胡晨岩¹⁾ 田梓聪¹⁾ 缪秋霞¹⁾ 王慧琴^{2)†}

1) (南昌大学物理系, 南昌 330031)

2) (上海工程技术大学数理与统计学院, 上海 201620)

(2021年1月18日收到; 2021年8月11日收到修改稿)

光分束器是片上集成光子芯片的一个重要组成部分, 常规分束多以 T 型、Y 型、树型输出为主, 往往分束角度和分束效率不能兼顾, 难以同时实现高效和大角度的分束. 本文在移动渐近算法基础上, 结合材料插值与有限元法, 形成了一种计算速度更快、容量更小的适应于微纳光子器件设计的新智能算法, 成功地设计出一尺寸为 $1\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的大角度偏转分束器, 实现了光束 180° 直线分离, 分束比近似 1:1, 总效率达 90% 以上. 相比同样尺寸的几种常规分束器, 该分束器的效率高出近 1 倍甚至更高. 本智能算法还适用于光偏振分光、路由器、光隔离器等多种无源光子器件的设计, 为高密度片上集成微纳光子器件的设计提供了一种思路和借鉴.

关键词: 移动渐近线法, 智能算法, 大角度光分束器, 片上集成

PACS: 41.85.Ct, 42.15.Eq, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.70.20210117

1 引言

光子芯片是以光为载体进行信息输运和处理的集成器件, 因其体积小、重量轻、功耗低等优点成为当今最热门的研究课题^[1,2]. 分束器是片上集成的一个重要组成部分. 对于常规的分束元件而言, 多以 Y 型、树型分支输出为主, 常用干涉原理来实现^[3], 但这类分束器光的传播方向不能实现大角度偏折, 因此只能用于简单常规分束. 而在进行光的中继加载、光放大、泵浦、频率上转换等场合, 往往需要不影响主体光路的前提下进行垂直加载. 一般情况下, 要完成大角度偏转分束, 通常需要增加反射镜来实现, 如: 完成双侧垂直偏转输出要用一片平面分束镜和一片平面反射镜来实现, 不仅尺寸大, 而且分束后的光也不在一条直线上; 或者用直角反射镜结构进行几何上的双侧反射分光, 这种方案的分束比非常难以控制, 稍微偏离就可能

无法分光, 而且对光斑也有严格的要求, 同时这种方案光的传输介质一般是空气, 还要面临与后续器件的耦合问题. 所以这些传统的大角度偏转分束方案, 不仅元件多、结构复杂、尺寸大, 还难以精准控制, 无法在较小尺寸内进行集成, 因此将分束器小型化是片上集成必须要解决的问题.

人们对此也做出了一些探索, 2010 年南昌大学郭浩团队^[4]利用光子晶体环形谐振腔设计了大角度的超微多路光分束器, 但其使用光子晶体尺寸相对较大, 且制备工艺复杂, 不利于与后续波导连接, 影响集成; 2012 年, 美国特拉华大学 Zhang 团队^[5]利用粒子群优化算法 (PSO) 设计了用于亚微米硅波导的紧凑型分束结构, 结构尺寸为 $1.2\ \mu\text{m} \times 2.0\ \mu\text{m}$, 但只能在较小角度内分束; 2018 年, 美国三菱机电研究室 Tahersima 团队使用深度神经网络逆设计出了 $2.6\ \mu\text{m} \times 2.6\ \mu\text{m}$ 的光功率分束, 较好的运用了逆设计^[6]; 2019 年, 湘潭大学马汉思团队^[7]采用直接搜索二值算法设计出了 $2.40\ \mu\text{m} \times 4.32\ \mu\text{m}$ 可实现 180° 分离的分束器, 设计中构建了

† 通信作者. E-mail: wanghq@sues.edu.cn

数百个微小结构,使得计算相当复杂、耗时,且需要计算硬件支持;2020年,美国犹他大学 Banerji 等^[8]使用机器学习完成了在 $1.2\ \mu\text{m} \times 1.2\ \mu\text{m}$ 结构范围内达到了 180° 分束效果,不过分离效率在 80% 左右;同年北京邮电大学李静团队^[9]设计的分束器在可见光范围内最大可达 157.5° 分束,分束角度存在一定缺陷.纵观以上工作的研究可以发现,智能算法逆设计在纳米光子器件的设计上更有优势,能达到良好的效果,因此广受欢迎^[10–13].

本文是在利用遗传算法对波长路由器^[14]、宽谱高效聚焦器件^[15]等器件进行逆设计的前期工作基础上,结合多年对无序介质的研究^[16–20],进一步升级前期的智能设计手段,提出以移动渐近线(MMA)算法^[21]为基础,结合 SIMP (solid isotropic material with penalization) 材料插值和有限元(FEM)法,形成了一种适应于微纳光子器件设计、且计算速度更快、计算量更小的新逆设计智能算法,相比于原来的算法,大大缩短了机时,且只需普通个人电脑即可完成.所设计的分束器尺寸为 $1\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$,在近红外短波(800–1100 nm)范围内可使光完成 180° 大角度分离,总体效率可达 90% 以上,尺寸、分束角、效率均达到或优于已有报道的微纳分束器.本文所提出的这种适用于光子器件的智能设计方法目前尚未见报道.

2 设计原理与方法

移动渐近线算法(MMA)是 Svanberg^[21]于 1987 年提出的,该方法基于一阶泰勒展开式的凸近似方法,近似函数用原函数在当前设计点处的一阶导数来表示.在每次的求解中通过引入移动渐近线,将一些难以优化的问题进行显式化,通过迭代的方法来更新设计的变量.在使用该方法时应注意初始迭代点的选择,如果初始点选择不正确,后面的迭代无法得到更好的结果.

以最小损耗适应度函数为目标函数,并为设计变量添加约束方程:

$$\begin{cases} \min f_0(x) = \mu(\varepsilon, \lambda), \\ -1 < x < 1, \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为设计变量, μ 为根据需求定义的最小损耗适应度函数, λ 为光波长, ε 为各点介电常数.

为了将设计中原本不连续的介电常数 ε 作为变量和优化目标,定义 ε 满足表达式

$$\varepsilon(r) = (1 + e^{-px})^{-1} \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_a) + \varepsilon_a,$$

$$x_0 = \tilde{0}, \quad (2)$$

其中, r 为衬底坐标, p 为阶跃系数, ε_s 和 ε_a 分别为介质和衬底的介电常数.对初始值的 x 微扰能使介电常数的初始值随机地成为或接近介质或衬底的规定值.

现在将原目标函数用移动渐近线算法近似为凸规划:

$$f_j^n(x) = r_j^n + \sum_{i=1}^I \left(\frac{p_{ji}^n}{U_i^n - x_i} + \frac{q_{ij}^n}{x_i - L_i^n} \right), \quad (3)$$

$$p_{ji}^n = \begin{cases} (U_i^n - x_i)^2 \frac{\partial f_j(x^n)}{\partial x_i}, & \frac{\partial f_j(x_i^n)}{\partial x_i} > 0, \\ 0, & \frac{\partial f_j(x_i^n)}{\partial x_i} \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$q_{ij}^n = \begin{cases} -(x_i^n - L_i^n)^2 \frac{\partial f_j(x^n)}{\partial x_i}, & \frac{\partial f_j(x_i^n)}{\partial x_i} < 0, \\ 0, & \frac{\partial f_j(x_i^n)}{\partial x_i} \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$r_j^n = f_j(x^n) - \sum_{i=1}^I \left(\frac{p_{ji}^n}{U_i^n - x_i^n} + \frac{q_{ij}^n}{x_i^n - L_i^n} \right), \quad (6)$$

其中, L 和 U 分别为左右移动渐近线, p 和 q 是由对应的 L 和 U 确定的参数, r 为待定参数. f_j^n 为目标函数的近似函数.通过不断迭代近似函数的子问题,就可以得到容差范围内的最优解,并且这种迭代收敛在设置合理的情况下非常快速.

基于以上原理,根据设计需求,先设定好基片尺寸和基础介质,设置好相应的输入、输出口,设置好目标函数,这样便可进行逆向设计,再加以后续的处理即可得到想要的器件结构了.本文设计的基片尺寸为 $1\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$,基础介质为 AMTIR-1 光学玻璃,拟刻蚀掉的部分为空气,AMTIR-1 是一种近红外到中红外范围内可透射的玻璃,其成分为 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$,设定左端输入、上下两端输出,设置好目标函数、材料插值函数以及物理场等条件,使用 MMA 算法进行迭代计算.

由于渐近算法的特点,优化出来的器件界面结构并不是单纯只有空气和玻璃两种介质材料,会出现折射率渐变的虚介质,这个初步优化出的结构被称为非同质化介质结构,这种结构不切合实验制备的实际,因此须对其进行处理.首先进行介质过滤,将现实不存在的虚介质过滤掉;过滤后的介质边界

可能过于细锐且存在一些小岛,这种细锐的边界不利于后续计算,也难于实现实验加工,因此对这种细锐边界需进行平滑化处理,处理后的具有平滑、清晰边界的结构就是所优化出的器件结构雏形;对整个基片进行重新赋值,边界内外区域分别重新赋值 Comsol 软件系统内置的材料 AMTIR-1 和空气,这样保证了整个基片介质只有玻璃和空气而不存在中间介质,且介质参数是随波长温度变化的,这样就确保了模拟结果与实验条件的吻合;介质 AMTIR-1/空气二值化处理后,重新进行性能模拟,若达到设计要求便可确定为最后的器件结构.如果效果欠佳,重复上述过滤、边界调整等过程.本文

的整体结构优化示意图如图 1 所示.

3 大角度分束器的设计

3.1 结构的设计

本文拟实现的分束如图 2 所示,以 AMTIR-1 为基底,左端中间为输入端口,上下两个为输出端口.设计流程如图 3 所示,如图 3(a) 所示是未优化前的全 AMTIR-1 玻璃基底,经过 MMA 优化后得到如图 3(b) 所示的非匀介质结构,图中白色区域代表空气,黑色区域代表为未蚀刻的 AMTIR-1,图中还可见一些灰色区域,这种灰色部分为模拟生成的虚介质,大多分布在玻璃与空气的界面处,这种灰色介质的折射大都在 1.5 以下,不符合设置要求的材料.将灰色介质过滤掉,可得到图 3(c) 所示结构.根据光学基础知识,判断图 3(c) 一些介质小岛可能是没有实际价值,对其进行了人工删除;另外,对于一些细锐的空气/玻璃边界进行模糊控制,进行平滑化处理;得到清晰的连续的边界后,对整个基片进行重新赋值,边界内外区域分别重新赋值为系统内置的材料 AMTIR-1 和空气,平滑化和二值化后的结果如图 3(d).

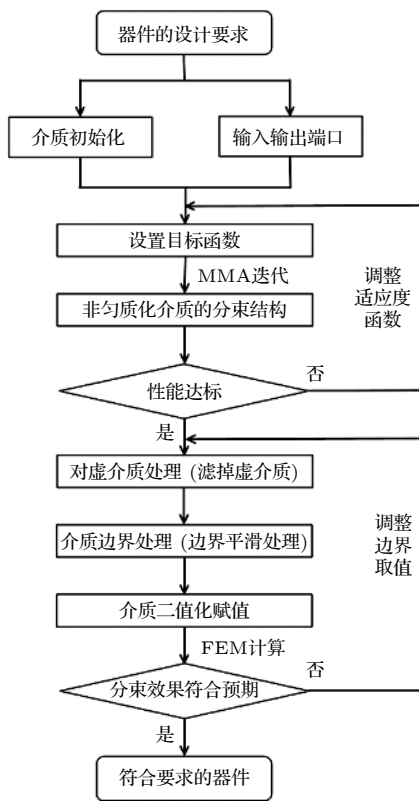


图 1 器件设计流程

Fig. 1. Device design flow.

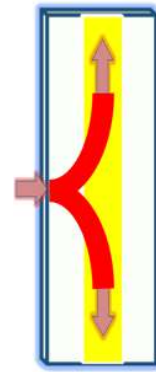


图 2 拟设计的大角度分束示意图

Fig. 2. Diagram of large angle beam splitting.

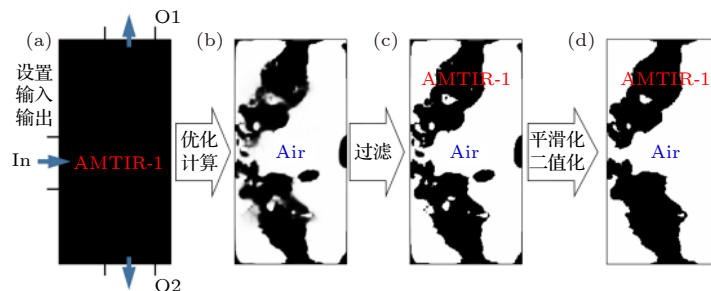


图 3 大角度分束器设计流程示意图

Fig. 3. Schematic diagram of large angle beam splitter manufacturing process.

3.2 分束的效果与效率

先对经 MMA 优化得到的一个初步非匀介质结构图 3(a) 的分束效果进行分析, 选取了 820 nm, 900 nm, 1100 nm 三个波长进行对比说明, 它们的光场分布图如图 4 所示, 从图 4 可见, 3 个波长下分束的效果都非常好, 分束的光路清晰干净、没有任何多余的散射, 符合设计预期。

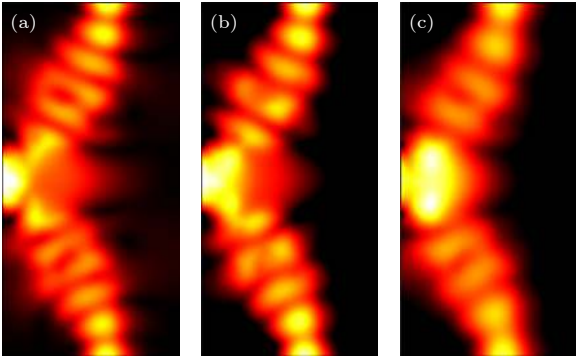


图 4 优化的非匀介质结构的光场分布图 (a) 820 nm; (b) 900 nm; (c) 1100 nm

Fig. 4. Intelligent algorithm optimized distribution light field at different bands: (a) 820 nm; (b) 900 nm; (c) 1100 nm.

因此, 对该初步非匀介质结构进行了如图 3 所示的流程的进一步处理, 然后对处理后的图 3(d) 新结构使用有限元法进行模拟, 两分钟的计算便可得到新结构的光场分布图, 模拟的波长范围为 800—1100 nm, 步长为 10 nm, 部分波长的采样效果如图 5 所示. 可见: 分束光路依然清晰, 因为新结构与原结构有一定的差异, 出现了少量的散射, 但都在允许范围内。

同时, 对两个输出端口的输出能量进行分析, 研究各端口的透过比和分光效率. 将单出口的出射能量与输入端口的能量之比定义为透过率 T ; 两输出端的输出的能量和 W_{out} 与输入端口的能量 W_{in} 之比作为分光效率 η :

$$\begin{cases} T_1 = \frac{W_{out1}}{W_{in}}, T_2 = \frac{W_{out2}}{W_{in}}, \\ \eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = T_1 + T_2, \end{cases} \quad (7)$$

上下两个端口的出射能量效率及其总出射能量效率分别如图 6 所示。

由图 6 可见两个出口的透过率大部分在 40%—50% 之间, 在 800 nm—1100 nm, 共有 4 个交点, 即在在特定波长可达到准确的 1:1 分束; 整个波段

的分光效率稳定, 分光效率保持在 85%—92% 之间, 可见分光效率非常高且稳定。

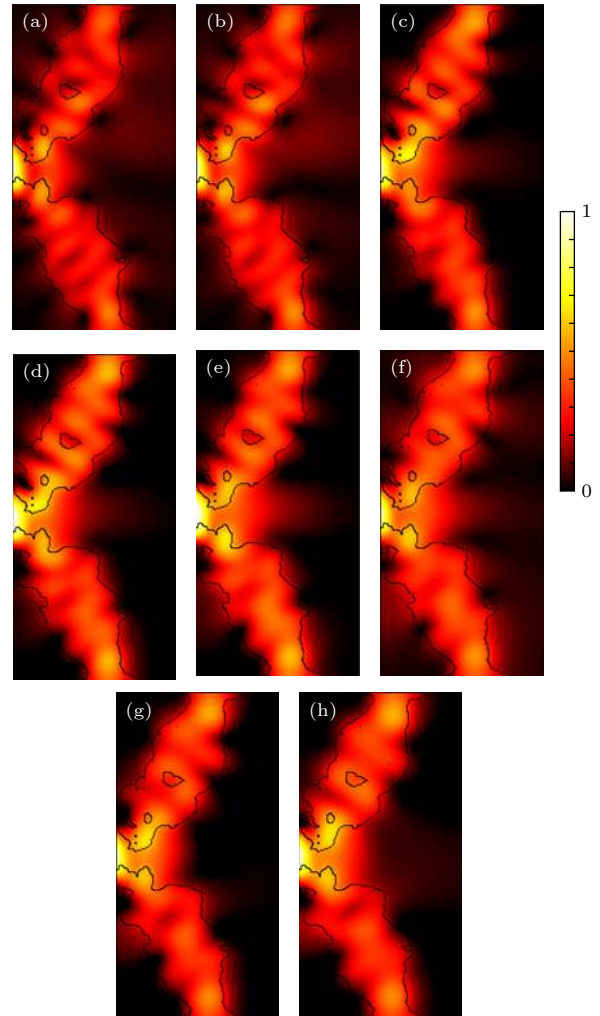


图 5 不同波长下的光场分布图 (a) 800 nm; (b) 820 nm; (c) 880 nm; (d) 900 nm; (e) 940 nm; (f) 980 nm; (g) 1040 nm; (h) 1100 nm

Fig. 5. Distribution of light field at different bands: (a) 800 nm; (b) 820 nm; (c) 880 nm; (d) 900 nm; (e) 940 nm; (f) 980 nm; (g) 1040 nm; (h) 1100 nm.

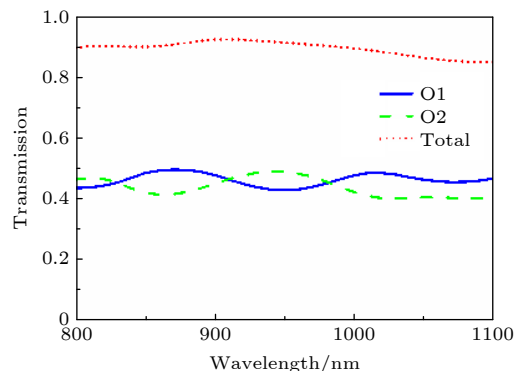


图 6 不同波长的分束效率

Fig. 6. Transmission of different wavelengths.

3.3 与常规规则结构的比较

为证明本智能算法的优势,选择几种常规分束波导结构来做对比分析,同样是以 $1\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的 AMTIR-1 玻璃为衬底、刻蚀部分为空气,设计了 T 型、宽 T 型、Y 型、Y 型链式 4 种规则分束波导结构,其中 Y 型链式中正方格的尺寸边长为 170 nm. 设置相同的输入输出端口、入射与散射的边界条件,同样的模拟分析,得到了图 7 所示的光场分布图和图 8 分束效率图.

由图 8 可见,这 4 种规则结构的分光效率都远低于本智能算法设计出的结构. 对于 T 型以及宽 T 型器单端口的输出效率仅仅在 10% 左右; Y 型链式结构在 800—900 nm 的单端口透射效率不到

10%, 整个近红外短波区域, 最高透射效率也仅为 32%; 效率较好的 Y 型结构分光效率也仅为 30% 左右, 总效率也只有 60%. 由此可见, 常规分束器从效率上看 Y 型结构优于 T 型结构, Y 型连续结构优于链式结构, 但 Y 型结构的分束角度较小; 而智能结构无论是分束角还是分束效率都比常规结构均有明显的优势, 可以肯定, 经过此智能算法设计出的结构其性能是常规结构所达不到的. 这些结果对器件设计和实验制备具有指导意义.

4 结 论

本文在移动渐近算法基础上, 结合材料插值与有限元法, 提出了一种适应于微纳光子器件优化

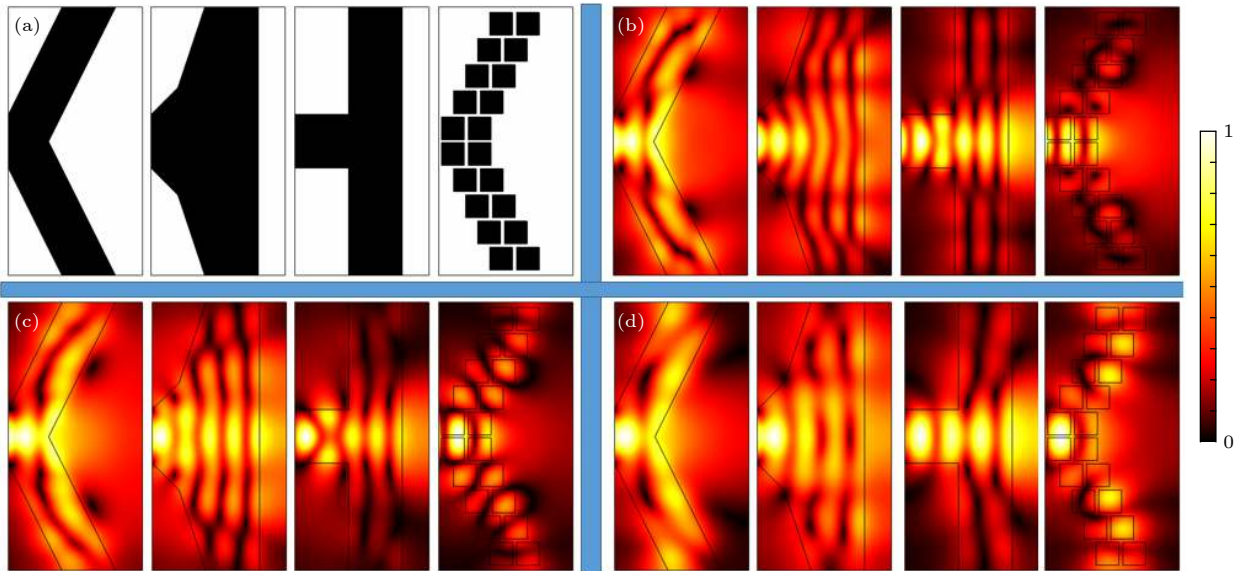


图 7 不同结构的规则分束器在 820 nm, 900 nm, 1100 nm 的光场分布图 (a) T 型结构; (b) 宽 T 型结构; (c) Y 型结构; (d) Y 型链式结构

Fig. 7. Light distribution of regular beam splitters with different structures at 820 nm, 900 nm, 1100 nm: (a) T-structure; (b) broad T-structure; (c) Y-structure; (d) Y-chain structure.

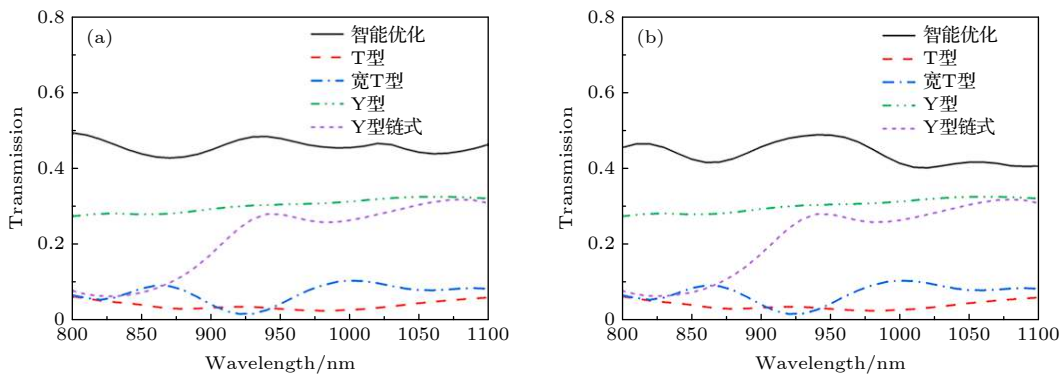


图 8 不同结构两个端口的分束效率 (a) O1; (b) O2

Fig. 8. Transmission of two ports with different structures: (a) O1; (b) O2.

设计的新智能算法,成功设计出一个尺度为 $1\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的两侧大角度偏转的分束器,可实现光束近 180° 直线分离,整个波段分束比近似为1:1,分束总效率在85%—92%之间.对比在同样尺寸下几种常规结构,该算法设计出的分束器的分束效率明显更高,有的高出了几倍,足以证实该智能算法在微纳光子器件智能设计上的优势.且该算法计算速度快、计算量小,不需要工作站等硬件支持,用普通的个人电脑即可完成,相比于前期的算法,速度、效率和设计的效果都有较大的提升.本智能算法还可应用于光偏振分光、路由器、光隔离器等多种无源光子器件的设计,对高密度片上集成微纳光子器件的设计和器件的实验制备具有指导意义.

参考文献

- [1] Zhou Z, Yin B, Michel J 2015 *Light: Sci. Appl.* **4** e358
- [2] Zhou Z P, Gao D S, Wang Y 2007 *Laser Optoelectron. Prog.* **44** 231 (in Chinese) [周治平, 郜定山, 汪毅, 陈金林, 冯俊波 2007 *激光与光电子进展* **44** 231]
- [3] Ma H L, Wang M H, Li X H, Xu Y G, Song N X 2002 *Acta Photon. Sin.* **31** 5580 (in Chinese) [马慧莲, 王明华, 李锡华, 徐义刚, 宋南辛 2002 *光子学报* **31** 5580]
- [4] Guo H, Wu P, Yu T B, Liao Q H, Liu N H, Huang Y Z 2010 *Acta Photon. Sin.* **30** 1501 (in Chinese) [郭浩, 吴评, 于天宝, 廖清华, 刘念华, 黄永箴 2010 *光学学报* **30** 1501]
- [5] Zhang Y, Yang S Y, Andy Eu-Jin Lim 2013 *Opt. Express* **21** 1310
- [6] Tahersima M H, Kojima K, Koike-Akino T 2019 *Sci. Rep.* **9** 1368
- [7] Ma H S, Huang J, Zhang K W, Yang J B 2020 *Opt. Commun.* **462** 125329
- [8] Banerji S, Majumder A, Hamrick A 2020 *Nano Commun. Netw.* **25** 100312
- [9] Li J, Han Y, Wu T S, Liu Y M, Yu Z Y, Wang Y, Sun Y H, Li 2020 *Opt. Express* **28** 21
- [10] Su L, Piggott A Y, Sapra N V, Petykiewicz J, Vuckovic J 2017 *ACS Photon* **5** 301
- [11] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, Petykiewicz J, Babinec T M, and Vucković J 2015 *Nat. Photonics* **9** 374
- [12] Ma L F, Li J, Liu Z H, Zhang Y X, Zhang N E, Zheng S Q, Lu C C 2021 *Chin. Optics Lett.* **19** 1011301
- [13] Lu J, Vucković J 2013 *Optical Society of America* **21** 13351
- [14] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, Lu C C, Wang H Q, Wu Y, Hu X Y, Liu Y C, Zhang H Y, Zhang X D 2019 *Optica* **6** 101367
- [15] Tian Z C, Guo Y M, Hu C Y, Wang H Q, Lu C C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 244201 (in Chinese) [田梓聪, 郭遗敏, 胡晨岩, 王慧琴, 路翠翠 2020 *物理学报* **69** 244201]
- [16] Wang H Q, Gong Q H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214202 (in Chinese) [王慧琴, 龚旗煌 2013 *物理学报* **62** 214202]
- [17] Wang H Q, Liu Z D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2281 (in Chinese) [王慧琴, 刘正东 2006 *物理学报* **55** 2281]
- [18] Wang H Q, Fang L G, Wang Y F, YU A L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 253 (in Chinese) [王慧琴, 方利广, 王一凡, 余奥列 2011 *物理学报* **60** 253]
- [19] Wang H Q, Ou Y H, Han D F, Wang Y F 2011 *Optoelectron. Lett.* **7** 179
- [20] Liu Z D, Wang H Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1648 (in Chinese) [刘正东, 王慧琴 2009 *物理学报* **58** 1648]
- [21] Svanberg K 1987 *Int. J. Num. Method Eng.* **24** 359

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

Huang Hui¹⁾ Hu Chen-Yan¹⁾ Tian Zi-Cong¹⁾
Miu Qiu-Xia¹⁾ Wang Hui-Qin^{2)†}

¹⁾ (*Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

²⁾ (*School of Mathematics, Physics & Statistics, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China*)

(Received 18 January 2021; revised manuscript received 11 August 2021)

Abstract

Photonic chip is a kind of integrated device that uses light as a carrier for information transportation and processing. Owing to its advantages of small size, lightweight, and low power consumption, photonic chip has become the most popular research topic nowadays. The beam splitter is a vital part of on-chip integration. For conventional beam splitting elements, Y-type and tree-branch output are the main elements, which are usually realized by interference principles. However, it is appropriate only for simple conventional beam splitter because the propagation direction of light cannot achieve large angle deflection. In the case of relay loading, optical amplification, pumping, and frequency upconversion, the vertical loading is often required without affecting the main optical path. To complete the large-angle deflection beam splitting, one needs to add a mirror to realize it or use a right-angle mirror structure for geometric double-sided reflection and splitting in traditional ways, but these structures are relatively complicated and difficult to complete on-chip integration. Based on previous work on inversely designed multi-channel wavelength routers and wide spectrum efficient focusing devices by using the intelligent algorithm, and combining the years of research on the coherent superposition theory of multi-scattering of the disordered medium, a large angle beam splitter that can realize from the near-infrared band is designed through using the intelligent algorithm. The beam splitter structure is based on AMTIR-1 glass, the part to be etched is air. The composition of AMTIR-1 is $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$. And the size of the structure is only $1\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$. The beam splitter can achieve 180° linear separation of beams in a range from 800 nm to 1100 nm, the beam splitting ratio of the entire waveband is approximately 1:1, and the gross beam splitting efficiency is stable between 85% and 92%. Compared with several conventional structures with the same size, the efficiency of the beam splitter designed by this algorithm is higher. At the same time, the algorithm has the advantages of fast computation speed and small computation amount, and it can be completed only by ordinary personal computers without the support of hardware such as workstations. This intelligent algorithm can also be applied to the design of various passive photonic devices such as optical polarization splitters, routers, optical isolators, etc., providing an idea and reference for the design of integrated micro-nano photonic devices on high-density sheets.

Keywords: method of moving asymptotes, intelligent algorithm, large-angle beam splitter, on-chip integration

PACS: 41.85.Ct, 42.15.Eq, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.70.20210117

† Corresponding author. E-mail: wanghq@sues.edu.cn