

文章编号: 1005-5630(2015)06-0541-06

## 光波导功分器的短缩优化设计方法研究

方锦辉, 陈抱雪, 汪昌君, 陈子维

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 提出并验证了一种针对光波导功分器短缩化的新的设计方法。在 BPM 软件仿真运行的基础上, 归纳了单位圆心角弯曲损耗与曲率半径之间关系的仿真实验公式, 建立了光波导功分器各级 Y 分支之间的单调弧形连接模型, 确定了光波导分路器的长度、总的弯曲损耗、单口弯曲损耗以及均匀性的计算公式。综合考虑光波导功分器各参数间关系, 采用了遗传算法全局优化技术, 设计了合理可行的评价函数。通过对  $1 \times 8$  石英光波导功分器的验证表明, 与现行同类产品相比, 插入损耗和均匀性指标持平, 有效长度缩短了 3.5 mm 以上。

**关键词:** 光波导技术; 光波导功分器; 短缩化设计; 遗传算法

**中图分类号:** TN 252 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.015

### Research on the optimized design method of shortening the optical waveguide splitter

FANG Jinhui, CHEN Baoxue, WANG Changjun, CHEN Ziwei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai  
for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The paper presents and experimentally verifies a new design method of shortening the optical waveguide splitter. Based on the use of BPM simulation, we summarize the relationship between unit central angle and the curvature radius of the bend loss, establishing the monotone arc connection model about all levels between the Y branch of the optical waveguide splitter. We determine the calculation formula about the optical waveguide splitter length, total bending loss, single bend loss and uniformity. In consideration of the whole length of waveguide, bending loss and uniformity, we introduce the design technique of genetic algorithm for global optimization, designing the reasonable and feasible evaluation function. We choose the initial numerical range of the genetic function, and study the genetic algorithm by using MATLAB. Through the verified design on an  $1 \times 8$  quartz optical waveguide splitter, we find that insertion loss and uniformity index are equivalent, and the effective length is shorten 3.5 mm or more, compared with the existing similar products.

**Keywords:** optical waveguide technology; optical waveguide splitter; shortening design; genetic algorithm

收稿日期: 2015-02-25

作者简介: 方锦辉(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: yuntian4042@163.com

通信作者: 陈抱雪(1955—), 男, 教授, 主要从事超高速大容量光通信器件的研究。E-mail: bxchen@online.sh.cn

## 引 言

平面光波导回路(PLC)构成的功分器具有集成度高、体积小、易于规模生产等优点,近年来在光通信网络建设中得到了迅速应用<sup>[1-2]</sup>。一般情况下,光分路器的功率分路是在 Y 分支之间用 S 波导连接,随着光功分器的分路数的翻倍增加,器件尺寸成指数级增大。有报道提出用弧形波导连接 Y 分支,可以有效缩短光功分器的长度,提高晶圆的器件密度和降低制造成本<sup>[3]</sup>。

弧形波导连接的 Y 分支功分光路类似于树杈结构,与常规的对称式接联分布的 Y 分支功分光路相比,光路十分复杂,功分器插入损耗与弧形波导的曲率半径、弯曲角度等参数呈非线性的复杂关系,因此设计时要全局控制波导的分支损耗、弯曲损耗以及功分均匀性变得十分困难<sup>[4-6]</sup>。为此,本文提出了一种短缩型光波导功分器的优化设计方法,全局优化采用了遗传算法<sup>[7]</sup>,并建立了结构模型。

## 1 波导结构和设计模型

常规的光波导功分器按对称二叉式连接构成,级联的 Y 分支波导之间通过 S 形波导连接,每个 Y 分支波导的输入端和输出端保持平行。本文提出的短缩型光波导功分器的结构,除第一级 Y 分支单元外,任意 Y 分支单元的对称轴均与器件的输入直波导的轴线相交, Y 分支之间通过单段弧形波导连接。用单段弧形波导取代 S 形波导,可有效减小连接波导的长度。传统级联方式中, S 形波导的作用是引入 X 轴方向的位移,以使光信号能垂直进入后续 1×2 功分单元的输入端,结果导致了器件在 Z 轴方向的长度增加。若采用与 S 形波导曲率半径相同的单段弧形波导,在 X 轴方向位移相同的情况下,功分单元的长度比较短。如图 1 所示,设弯曲波导的曲率半径为 R, X 轴方向位移为  $\Delta x$ , S 形波导和单段弧形波导的 Z 向长度分别为  $Z_s$  和  $Z_0$ , 有:

$$\frac{Z_0}{Z_s} = \sqrt{\frac{2R - \Delta x}{4R - \Delta x}} \quad (1)$$

通常  $\Delta x$  远小于 R, 弧形波导的 Z 向长度约为 S 形波导的  $1/\sqrt{2}$ 。

短缩级联的 1×N 光波导功分器的光路结构如图 2 所示,有一个输入端和 N 个输出端,各级的 Y 分支波导之间用弧形波导连接。光信号从输入端输入到输出端输出,器件损耗包括弯曲波导的弯曲损耗、Y 分支波导的分支耦合损耗、散射损耗和材料吸收损耗。设计建立在规则波导的基础上,不考虑缺陷引起的光散射和材料的本征吸收。各级的 Y 分支波导采用 BPM 软件仿真设计,剔除 3 dB 原理损耗后,剩余损耗为 0.005 5~0.006 0 dB。器件的光损耗主要由弧形波导的弯曲损耗造成,短缩化设计归结为波导光路的总弯曲损耗、各输出端弯曲损耗的均匀性和器件长度之间的优化平衡。短缩化要求的弧形波导通常表现为曲率半径是逐级变化的,弯曲损耗的理论计算十分复杂。本文采用仿真拟合的方法来处理这个问

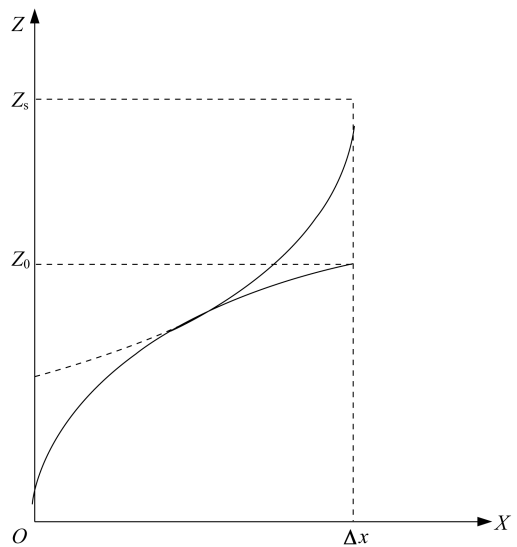


图 1 S 形波导和单段弧形波导

Fig. 1 S waveguide and single arc waveguide

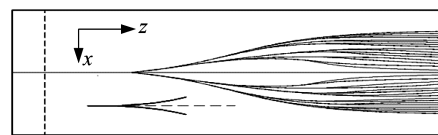


图 2 短缩级联的 1×N 光波导功分器的光路结构

Fig. 2 Optical path structure of shortening the concatenation of the 1×N optical waveguide splitter

题,首先建立如图 3 所示的曲率半径为  $R$  的一段弧形波导与波导弯曲圆心角  $\theta$  之间的几何关系,然后用 BPM 仿真运算获得弧形波导的弯曲损耗,取其 1/2 值得到曲率半径为  $R$  的弧形波导的弯曲圆心角与弯曲损耗的数值关系。

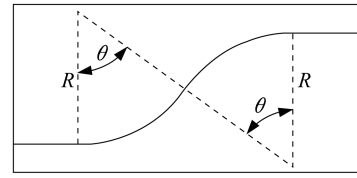


图 3 弧形波导与波导弯曲角

Fig. 3 Curved waveguide and waveguide bending angle

图 4 给出了曲率半径  $R$  在 15~25 mm 范围内的数据结果,工作波长为 1 550 nm,波导采用了石英单模波导的基本参数,波导芯的截面尺寸为  $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ ,波导芯的相对折射率增量  $\Delta$  为 0.045%。在此基础上,得到单位圆心角的波导弯曲损耗与弯曲圆心角的关系,结果如图 5 所示。

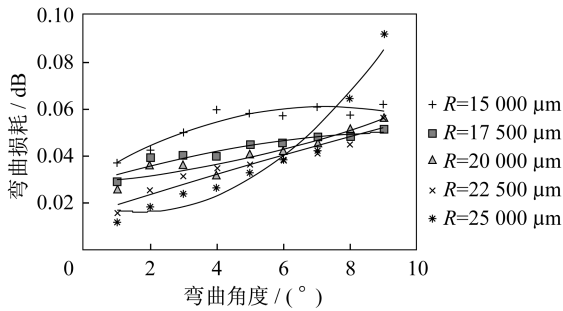


图 4 波导弯曲圆心角与弧形波导弯曲损耗的数值关系

Fig. 4 The numerical relationship between center angle of the arc waveguide and loss of the arc waveguide

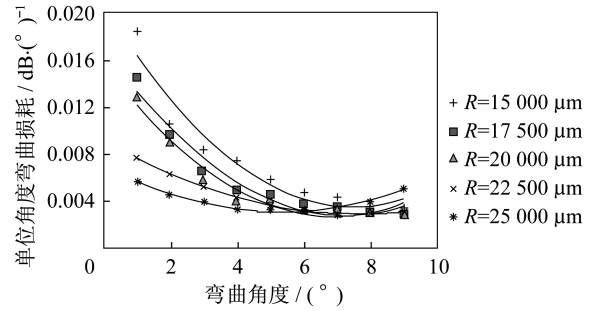


图 5 单位圆心角弯曲损耗与波导弯曲圆心角的关系

Fig. 5 The relationship between loss of unit central angle and center angle of the arc waveguide

图 5 的实线是拟合曲线,拟合得到的波导单位圆心角弯曲损耗  $S$  与弯曲圆心角  $\theta$  的关系为:

$$S = \begin{cases} 0.000 1\theta^2 - 0.002 2\theta + 0.014 1 & (R = 15 000) \\ 0.000 1\theta^2 - 0.001 8\theta + 0.010 9 & (R = 17 500) \\ 0.000 3\theta^2 - 0.003 6\theta + 0.014 7 & (R = 20 000) \\ 0.000 1\theta^2 - 0.001 7\theta + 0.009 3 & (R = 22 500) \\ 0.000 1\theta^2 - 0.001 5\theta + 0.007 1 & (R = 25 000) \end{cases} \quad (2)$$

式中:曲率半径  $R$  的单位是  $\mu\text{m}$ ;弯曲圆心角  $\theta$  的单位是  $(^\circ)$ ;单位圆心角弯曲损耗  $S$  的单位是  $\text{dB}/(^\circ)$ 。式 (2) 的拟合优度在 0.94 以上,对式 (2) 做插值近似,将单位圆心角弯曲损耗  $S$  的表达式覆盖  $15 000 \mu\text{m} \leq R \leq 25 000 \mu\text{m}$  的范围:

$$S(\theta, R) = \begin{cases} (0.000 2\theta^2 - 0.004 0\theta + 0.025 0) \frac{R}{32 500} & (15 000 \leq R \leq 17 500) \\ (0.000 4\theta^2 - 0.005 4\theta + 0.025 6) \frac{R}{37 500} & (17 500 < R \leq 20 000) \\ (0.000 4\theta^2 - 0.005 3\theta + 0.024 0) \frac{R}{42 500} & (20 000 < R \leq 22 500) \\ (0.000 2\theta^2 - 0.003 2\theta + 0.016 4) \frac{R}{47 500} & (22 500 < R \leq 25 000) \end{cases} \quad (3)$$

图 6 给出了一个由  $M$  级 Y 分支构成的  $1 \times N$  光波导功分器的前 3 级 Y 分支波导结构,常规的光波导功分器的波导光路是上下对称分布的,图中显示了对称分布结构的上半部分。Y 分支之间的连接采用单段无拐点弯曲波导,具有各自对应的曲率半径  $R$  和圆心角  $\theta$ 。光波导模由输入端传播到所有  $N$  个输出端的总的弯曲损耗  $L_s$  可以表示为:

$$L_s = 2 \left[ S_{11}\theta_{11} + \sum_{j=1}^2 S_{2j}\theta_{2j} + \sum_{j=1}^4 S_{3j}\theta_{3j} + \dots + \sum_{j=1}^{N/2} S_{Mj}\theta_{Mj} \right] \quad (4)$$

式中:  $S_{ij} = S(\theta_{ij}, R_{ij})$ , 参数双下标中的前标  $i$  代表 Y 分支的级数, 后标  $j$  代表同级 Y 分支中弯曲波导从上到下的序数,  $L_s$  的单位是 dB。光波导模由输入端传播到最上部的第 1 个输出端的弯曲损耗  $L_{s1}$  可以表示为:

$$L_{s1} = S_{11}\theta_{11} + S_{21}\theta_{21} + S_{31}\theta_{31} + \dots + S_{M1}\theta_{M1} \quad (5)$$

其他输出端的计算依此类推。各输出端的弯曲损耗的差异描述了输出损耗的均匀性, 用最大的端口弯曲损耗与最小的端口弯曲损耗的差  $\Delta L_s$  来表征:

$$\Delta L_s = |L_{s_i}(\max) - L_{s_i}(\min)| \quad i \neq i' \quad (6)$$

光波导功分器的总长度是输入端面到输出端面之间的距离, 在输入端面一侧和输出端面一侧都置有一段直波导区域, 用以稳定输入和输出导模的模场分布。由于直波导不涉及弯曲损耗, 这里将功分器总长度中剔除输入端和输出端直波导后的长度定义为设计有效长度  $L$ , 可以用图 7 中最上部波导光路在对称轴上的投影来描述, 对于一个由  $M$  级 Y 分支构成的  $1 \times N$  光波导功分器, 其有效长度  $L$  (单位为  $\mu\text{m}$ ) 可以写成:

$$L = R_{11} \sin\theta_{11} + 500 + R_{21} [\sin(\theta_{11} + \theta_{21}) - \sin\theta_{11}] + 500 + R_{31} [\sin(\theta_{11} + \theta_{21} + \theta_{31}) - \sin(\theta_{11} + \theta_{21})] + \dots + 500 + R_{M-11} [\sin(\sum_{i=1}^{M-1} \theta_{i1}) - \sin(\sum_{i=1}^{M-2} \theta_{i1})] + 500 + R_{M1} \sin(\sum_{i=1}^{M-1} \theta_{i1}) \quad (7)$$

式中各节添加的  $500 \mu\text{m}$  是连接相邻弧段的切线在对称轴上的投影。

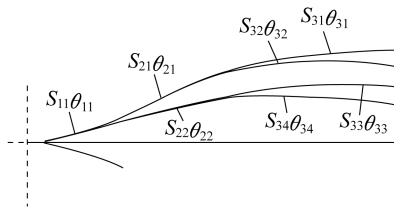


图 6  $1 \times N$  光波导功分器的前 3 级 Y 分支波导结构

Fig. 6 3-level Y-branch waveguide structure of the  $1 \times N$  optical waveguide splitter

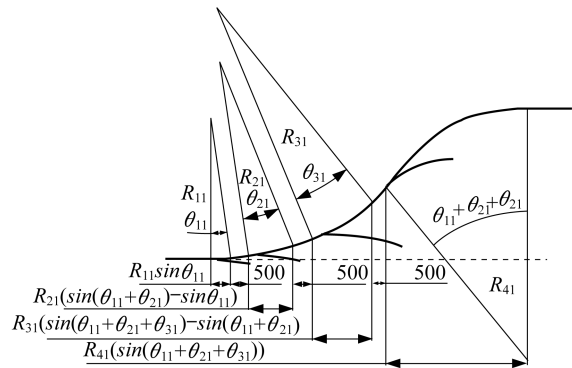


图 7 弯曲波导和有效长度的几何关系

Fig. 7 The geometric relationship between effective length and arc waveguide

光波导功分器的短缩优化设计, 要求在各输出端波导间隔保持  $127 \mu\text{m}$  (与光纤列阵的间隔一致) 的前提下, 器件有效长度尽可能短且波导光路的总弯曲损耗尽可能小。在输出端口间距确定的情况下, 两者的要求是互相抑制的, 加之各输出端波导损耗的均匀性要求, 简单的设计难以实现优化平衡。这里采用了遗传算法的全局优化方法<sup>[7-8]</sup>。

设计结果的评价使用遗传算法中的适应度函数, 适应度函数的设定一般要求满足: (1) 单值连续且非负值, 存在最大(或最小)值; (2) 计算量小; (3) 具有合理性和一致性, 能反映解的优劣程度<sup>[9-10]</sup>。本文的评价要素有三个, 分别是有效长度  $L$ 、总弯曲损耗  $L_s$  和均匀性指标  $\Delta L_s$ 。适应度函数设定为:

$$F = 2 \frac{L}{L_r} + \frac{L_p + L_s}{L_p} + \frac{\Delta L_s}{\Delta L_{s_r}} \quad (8)$$

式中: $L_r$ 和 $\Delta L_s$ 为常数,分别是参照长度和均匀性参照指标,根据器件类型和期望目标来设定; $L_p$ 也为常数,是仅考虑器件各级Y分支3dB功分的原理损耗,不计Y分支过剩损耗和弧形波导弯曲损耗。为了突出有效长度 $L$ 的权重,适应度函数的等号右边第一项的权重因子设计为后两项权重因子之和。显然, $L$ 、 $L_s$ 和 $\Delta L_s$ 愈小则适应度函数 $F$ 愈小。

变量个体包括各级Y分支涉及的弯曲波导的曲率半径 $R$ 及其相应的圆心角 $\theta$ ,根据前期大量的试验计算,曲率半径 $R$ 的取值范围是 $15\,000\sim 25\,000\ \mu\text{m}$ ,圆心角 $\theta$ 的取值范围是 $1^\circ\sim 10^\circ$ 。于是,通过建立众多个体的集合形成种群,每个种群对应产生相应的 $L$ 、 $L_s$ 和 $\Delta L_s$ ,代入式(8)做适应度评价,即可按适者生存的遗传法则,通过一代一代的选择再生、交叉、变异等基因操作不断进化,直至收敛于全局最优状态。

## 2 设计和结果

根据上述设计方法和模型,优化设计了 $1\times 8$ 石英单模波导功分器。工作波长为 $1\,550\ \text{nm}$ ,波导芯的截面尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}\times 6.5\ \mu\text{m}$ ,波导芯的相对折射率增量 $\Delta$ 为 $0.045\%$ ,输出端口间隔为 $127\ \mu\text{m}$ 。功分器由3级Y分支构成,考虑到波导光路轴对称,变量个体包括曲率半径 $R_{11}$ 、 $R_{21}$ 、 $R_{22}$ 、 $R_{31}$ 、 $R_{32}$ 、 $R_{33}$ 、 $R_{34}$ 和对应的圆心角 $\theta_{11}$ 、 $\theta_{21}$ 、 $\theta_{22}$ 、 $\theta_{31}$ 、 $\theta_{32}$ 、 $\theta_{33}$ 、 $\theta_{34}$ 。曲率半径 $R$ 的取值范围为 $15\,000\sim 25\,000\ \mu\text{m}$ ,圆心角 $\theta$ 的取值范围为 $1^\circ\sim 10^\circ$ 。适应度函数中参照长度 $L_r$ 取目标值 $9\,000\ \mu\text{m}$ ,均匀性参照指标 $\Delta L_s$ 取目标值 $0.06\ \text{dB}$ ,3级Y分支功分的原理损耗 $L_p$ 为 $9\ \text{dB}$ 。优化设计的收敛过程如图8所示,经过十几代遗传迭代,设计开始收敛于全局优化,适应度函数的最小值收敛在 $F=4.6$ 左右。优化设计得到的结构参数见表1。

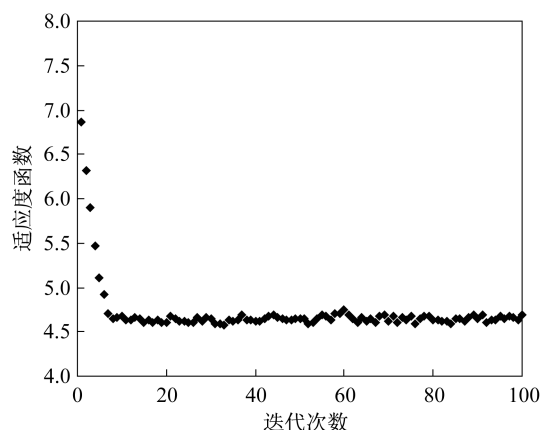


图8 优化设计的收敛过程

Fig. 8 The convergence process of optimization design

表1 优化设计得到的结构参数

Tab. 1 The structure parameters of the optimized design

半径	半径值/mm	圆心角	角值/( $^\circ$ )
$R_{11}$	16 590	$\theta_{11}$	4.308 6
$R_{21}$	20 833	$\theta_{21}$	2.911 8
$R_{22}$	20 796	$\theta_{22}$	4.331 6
$R_{31}$	23 994	$\theta_{31}$	7.220 6
$R_{32}$	15 146	$\theta_{32}$	5.388 1
$R_{33}$	25 000	$\theta_{33}$	2.922 1
$R_{34}$	25 000	$\theta_{34}$	2.922 1

由表1的结构参数构成的 $1\times 8$ 光波导功分器的有效设计长度 $L$ 为 $6\,320\ \mu\text{m}$ ,到达8个输出端口的总的弯曲损耗的收敛值 $L_s$ 为 $1.209\ \text{dB}$ ,均匀性指标的收敛值 $\Delta L_s$ 为 $0.081\ \text{dB}$ 。

采用BPM软件对上述优化设计得到的 $1\times 8$ 光波导功分器结构做了仿真验证, $1\,550\ \text{nm}$ 光信号的传输状况如图9所示,各输出端的插入损耗(含分支损耗和单口弯曲损耗)为 $9.10\sim 9.19\ \text{dB}$ ,均匀性数据为 $0.09\ \text{dB}$ 。该结果与现行同类商业产品 $10\ \text{mm}$ 的有效长度相比,缩短了 $3.5\ \text{mm}$ 以上,插入损耗和均匀性指标持平。

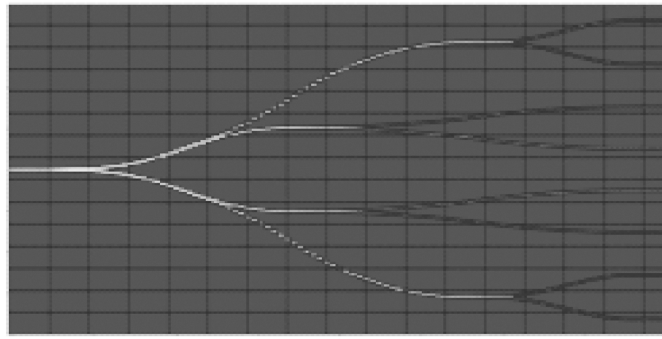


图 9 光信号的传输状况

Fig. 9 The propagation of optical signal

### 3 结 论

针对光波导功分器的短缩化,提出并试验验证了一种新的优化设计方法。该方法采用 BPM 软件进行模拟运行,建立了弧形波导的单位圆心角弯曲损耗与曲率半径之间关系的仿真实验公式,构造了光波导功分器各级 Y 分支之间的单调弧形连接模型,进而确定了总的弯曲损耗、单口弯曲损耗以及均匀性数据的计算公式,建立了合理可行的设计评价函数。在此基础上,导入了遗传算法全局优化的设计技术。对  $1 \times 8$  石英光波导功分器做了验证,验证结果表明,当波导弯曲半径不小于 15 mm,输出波导间距为  $127 \mu\text{m}$  时,与现行同类商业产品 10 mm 的有效长度相比,缩短了 3.5 mm 以上。同时可采用现有技术制作该方法所设计的器件,而不增加制造难度和不均匀性。

### 参考文献:

- [ 1 ] 马春生,刘式慵. 光波导模式理论[M]. 长春:吉林大学出版社,2006:274-298.
- [ 2 ] SNYDER A W, LOVE J D. Optical waveguide theory[M]. New York:Chapman and Hall,1983:90-110.
- [ 3 ] 卢山鹰,李霞,李锡华,等.  $\text{K}^+-\text{Na}^+$  离子交换  $1 \times 32$  光功分器的设计[J]. 光电子·激光,2005,16(11):1297-1300.
- [ 4 ] MARCUSE D. Theory of dielectric optical waveguides[M]. New York:Academic Press,1977:134-150.
- [ 5 ] 陈抱雪,袁一方,矾守. 新型低损耗氧化硅 Y 分支光波导[J]. 光学学报,2001,21(5):552-555.
- [ 6 ] 吴艳艳,李锡华,江晓清,等. 级联 Y 分支光波导的优化设计[J]. 光学仪器,2005,27(5):72-76.
- [ 7 ] BINELO M O, DE ALMEIDA A L F, CAVALCANTI F R P. MIMO array capacity optimization using a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6):2471-2481.
- [ 8 ] 孙瑞祥,屈梁生. 遗传算法优化效率的定量评价[J]. 自动化学报,2000,26(4):552-556.
- [ 9 ] SHIU Y Y, CHI K C. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2):454-472.
- [ 10 ] FOGARTY T C. Varying the probability of mutation in the genetic algorithms[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms, San Francisco, CA: Morgan Kaufman Publishers Inc. , 1989:104-109.

(编辑:刘铁英)