

文章编号: 1005-5630(2021)06-0013-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2021.06.003

太赫兹波段的 taper 型多模干涉耦合器

张宏祥, 谢静雅

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 随着通信技术的飞速发展, 传统微电子行业出现瓶颈, 人们更多地寄希望于集成光路来实现新的突破。硅基光子学因其自身材料以及制造工艺等方面的优点而备受关注。其中, 硅基耦合器作为重要的硅基无源器件, 是实现光的片上合束和分束的关键。多模干涉 (multimode interference, MMI) 耦合器具有损耗低, 工艺容差性大且带宽较大等优点, 是一种常用的集成光学器件。从 MMI 耦合器的自映像成像原理出发, 利用导模传输分析法 (guide-mode propagation analysis, G-MPA) 对 MMI 中的模场分布情况进行分析, 成功设计出基于 470 μm 高阻硅晶圆的太赫兹波段的 taper 型多模干涉耦合器。通过时域有限差分法 (finite difference time domain method, FDTD) 仿真优化其参数, 实现了 93.8% 的耦合效率。

关键词: 太赫兹; taper; 自映像; 多模干涉 (MMI) 耦合器

中图分类号: TN 256 **文献标志码:** A

Taper multimode interference coupler based on terahertz

ZHANG Hongxiang, XIE Jingya

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

Abstract: With the rapid development of communication technology, the bottleneck appears in the traditional microelectronics industry. More and more people hope that integrated optical circuit can achieve new breakthroughs. Silicon photonics has attracted much attention because of its advantages in materials and manufacturing technology. Among them, the silicon coupler, as an important silicon passive device, is the key to achieve beam coupling and beam splitting on chip. Multimode interference (MMI) couplers are commonly used as integrated optical devices because of their advantages such as low loss, large process tolerance and large bandwidth. In this paper, based on the self-imaging principle of MMI, guided mode propagation analysis (G-MPA) is used to analyze the mode field distribution in MMI, and a taper multimode interference coupler based on 470 μm high resistance silicon wafer in terahertz band is successfully designed. The coupling efficiency of 93.8% is achieved by FDTD simulation and optimization of its parameters.

Keywords: terahertz; taper; self-image imaging; multimode interference coupler

收稿日期: 2021-03-15

作者简介: 张宏祥 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹集成光学方面研究。E-mail: 340557436@qq.com

通信作者: 谢静雅 (1987—), 女, 副教授, 研究方向为太赫兹芯片互连。E-mail: xiejy@usst.edu.cn

引 言

多模干涉耦合器的自映像理论最早可以追溯到 1836 年 Tabolt 提出的自成像现象^[1]。1973 年, Bryngdahl^[2] 首次提出了在平面介质波导中实现自映像的可能性。随后, Ulrich 等^[3] 用模式分析法首次解释了多模干涉的成像原理与规律。Bachmann 等^[4] 给出了基于 $N \times N$ 多模干涉器的自映像理论。Lucas 等^[5] 设计出基于多模干涉自成像原理的理论模型。近年来, 关于低损耗, 小型化的多模干涉耦合器的报道也越来越多^[6-8]。2009 年, Jiao 等^[9] 提出了一种基于级联多模干涉(multimode interference, MMI)波导结构的偏振分束器, 该偏振分束器为条形波导结构, 其下包层为二氧化硅材料, 可以实现 TE/TM 波的偏振分束输出。但该偏振分束不可对偏振态进行动态调控, 并且存在光损耗较大、器件尺寸较大且不易于集成等缺点。

2012 年, 上海微系统所 Sheng 等模拟仿真了不同宽度的低损耗多模干涉器, 并在实验测试中得到在 1530~1570 nm 波段的损耗低于 0.1 dB 的器件, 该器件的大小只有 $3.6 \mu\text{m} \times 11.5 \mu\text{m}$ ^[10]。2013 年, Zhou 等设计出了基于绝缘体上硅的不同宽度的 1×2 的 3 dB 多模干涉耦合器^[11-13]。

矩形 MMI 耦合器已有大量的研究成果, 然而随着多模干涉区宽度的增加, MMI 耦合器的长度会迅速增加, 而集成光学的快速发展对器件的集成性要求也越来越高, Taper 型 MMI 耦合器相对于传统的矩形 MMI 耦合器能有效地解决该问题。目前, 多模干涉耦合器主要应用在通信等频段, 并且是基于成熟的半导体加工工艺平台实现的。本文提出在太赫兹波段利用高阻硅(材料折射率为 3.42)实现多模干涉耦合器, 其中 taper 型在本文中指的是非矩形、逐渐变窄的结构, 如椭圆形、抛物线型、锥型。该器件的实现为以后太赫兹波段的波分复用提供了思路。

1 MMI 的理论分析

对于一个 $N \times N$ 的 MMI 来说, 其成像原理

是基于多模波导的自映像效应。可以简单地表述为: 对于任一输入光场, 在多模波导中沿光场传输方向上将周期性地出现输入光场的一个或者多个像的效应。目前对多模波导的场分布进行分析的方法诸多^[14-17], 对于 MMI 器件, 主要采用模式传输分析法来实现模场分析^[18]。

在平板中存在两种模式, 一种为横电模(TE), 另一种为横磁模(TM)。两种模式的区别在于电场和磁场的偏振方向。本文采用的是 TM 模式, TE 模式推导类似于 TM 模式。图 1 为一多模波导的示意图。其中多模波导的宽度为 W_m , 波导芯层和包层的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 此多模波导的输入波长为 λ_0 时, 支持 m 个波导模式传播, 用 $v = 0, 1, \dots, (m-1)$ 表示多模波导中不同模式的阶数^[19]。设横向的波数为 k_{yv} , 第 v 阶模式的传播常数为 β_v , 通过色散方程^[20] 可以得到

$$k_{yv}^2 + \beta_v^2 = k_0^2 n_1^2 \quad (1)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (2)$$

$$k_{yv} = \frac{(v+1)\pi}{W_{e,v}} \quad (3)$$

式中: n_1 为波导的折射率; $W_{e,v}$ 为第 v 阶模式的有效宽度。大多数情况下, $W_{e,v}$ 可以等效看成其基模(W_e)的有效宽度, 表达式为

$$W_{e,v} \approx W_e = W_m + \left(\frac{\lambda_0}{\pi}\right) \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2\sigma} (n_1^2 - n_2^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 σ 代表极化因子, 对于 TE 模式 $\sigma = 0$, TM 模式 $\sigma = 1$ 。所以, 最低二阶模式的拍长 L_π 可表示为

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{\lambda_0}{2(n_{\text{eff}0} - n_{\text{eff}1})} \quad (5)$$

式中: $n_{\text{eff}0}$ 和 $n_{\text{eff}1}$ 分别为对应的 TE 和 TM 模式的有效折射率。假设输入光场 $\psi(y, 0)$ 从 $z = 0$ 处入射到多模波导, 将其表示成所有模式场 $\psi_v(y)$ 的线性叠加, 便可得到

$$\psi(y, 0) = \sum_v c_v \psi(y) \quad (6)$$

式(6)中的模式包含导模和辐射模, 由于模式场成正交关系, 则模式的模式激励系数 c_v 可表

示为

$$c_v = \frac{\int \psi(y, 0) \psi_v(y) dy}{\int \psi_v^2(y) dy} \quad (7)$$

因为辐射模在实际的所有模式中的比例较小, 可以忽略不计, 只考虑导模, 可以得出

$$\psi(y, 0) = \sum_v^{m-1} c_v \psi_v(y) \quad (8)$$

对于对称型 $1 \times N$ 多模干涉耦合器, 它的单个 N 重自映像位置满足

$$L = p \left(\frac{3L\pi}{4N} \right), p = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

为了实现偶模激发, 而奇模不激发, 可以将输入的偶对称光场的位置(即单模输入波导的位置)选择在多模波导的中心位置, 这样, 自映像将会是多模波导中所有偶数阶模式的线性叠加。在实际的设计中, $1 \times N$ 的 MMI 通常用作 N 路光供分器, 而考虑到器件的大小, 通常将式(9)中的 p 值选择为 1, 即将 MMI 设计在第一个 N 重自映像的位置。

当选定一个合适的波导宽度 W 时, 根据 FDTD 仿真软件可以计算得出对应的 0 阶和 1 阶模式的有效折射率, 然后通过理论数值计算得到相应的 MMI 尺寸。

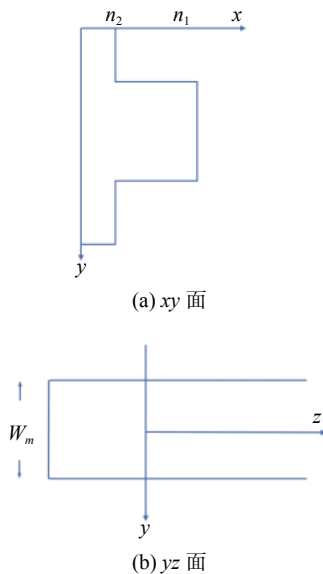


图 1 多模波导的 xy 面与 yz 面示意图

Fig. 1 xy and yz dimensional diagram of a multimode waveguide

2 1×2 MMI 的尺寸设计及优化

MMI 主要是由单模输入输出波导和多模耦合波导三部分组成。硅基 MMI 就是以硅材料为波导介质。本文选取频率为 185 GHz 作为此器件的工作频率, 波导厚度为 $340 \mu\text{m}$, 衬底厚度为 $130 \mu\text{m}$ 。在这些工作条件下, 光场能量能够很好地限制在波导中传输。

根据式(5)可知, 如果想要设计一个 MMI 的具体尺寸, 当确定宽度时, 需要知道在该宽度的波导情况下, 其对应的最低 2 阶模式的有效折射率。通过 FDTD 仿真可以计算出不同波导宽度下的最低 2 阶模式的有效折射率如图 2 所示。

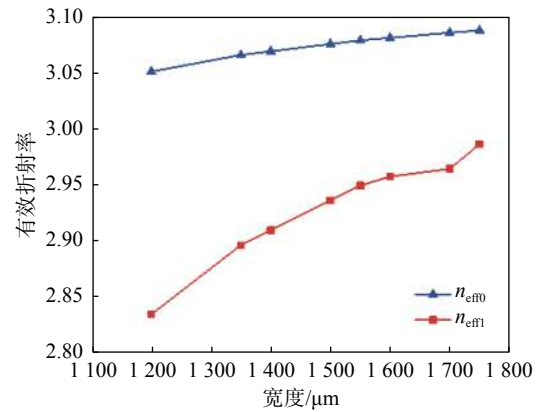


图 2 有效折射率与波导宽度关系

Fig. 2 Relationship between effective refractive index and waveguide width

此处对多模波导进行选择时, 通常是是需要支持 3 个以上模式的, 但是因为需要实现 1×2 的分光, 器件结构如图 3 所示, 所以要尽量避免激发过多的高阶模式即波导宽度不宜选择过大。

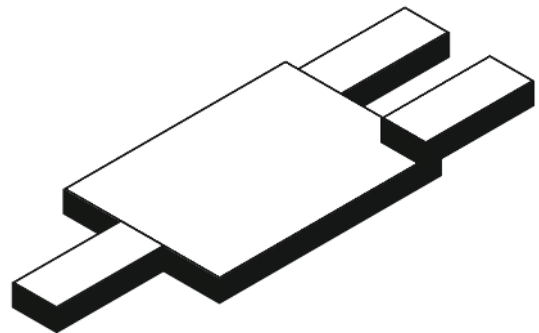


图 3 1×2 MMI 耦合器

Fig. 3 1×2 MMI coupler

通过 Mode Solution 仿真软件可以算出, 当波导宽度小于 $1600\ \mu\text{m}$ 时, 不足以支持 3 个模式, 所以本文选择的 3 个宽度分别为 $1200\ \mu\text{m}$ 、 $1400\ \mu\text{m}$ 和 $1550\ \mu\text{m}$ 。首先, 通过式(9)可以推算出多模波导的理论长度, 然后在这个长度范围内通过 FDTD 软件进行扫参仿真优化。以 $1200\ \mu\text{m}$ 为例, 图 4 是它的光场分布, 从图中可以看出, 输入光场在多模波导区发生干涉叠加后, 在输出位置几乎实现了均匀分光, 上下功率分别为 0.455 和 0.463。通过计算得出它的理论二阶拍长为 $3744.5\ \mu\text{m}$, 所以该多模干涉区的理论首个自映像位置约为 $1404.19\ \mu\text{m}$, 在这个数值范围内, 进行 $200\ \mu\text{m}$ 的扫参优化, 步进为 $10\ \mu\text{m}$, 其结果如图 5 所示。结果发现, 仿真的具体长度和理论计算有些偏差, 因为在理论计算中, 采用的是近似计算。

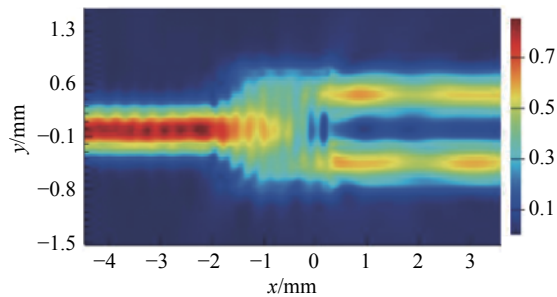


图 4 MMI 光功率分布

Fig. 4 Optical power distribution of MMI

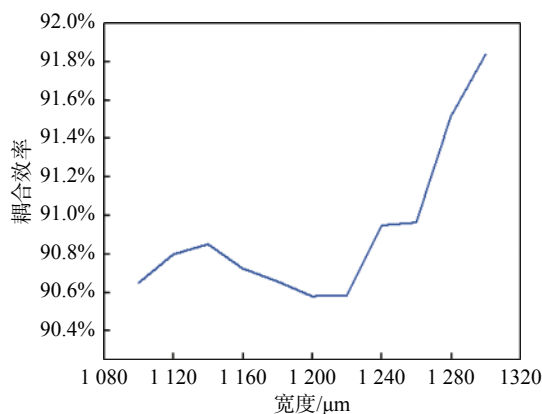


图 5 不同长度的多模波导耦合效率

Fig. 5 Coupling efficiency of multimode waveguide with different lengths

同时, 本文对其余两个宽度也进行了相同的仿真, 结果如图 6 所示, 从图中可以看出, 当波导宽度为 $1200\ \mu\text{m}$ 时, 其耦合效率要高于其他

两种情况, 是因为选择的输入波导尺寸为 $500\ \mu\text{m}$ 的单模波导, 多模波导的宽度增加会导致多模区和输入输出波导间的模式不匹配度增加^[21]。

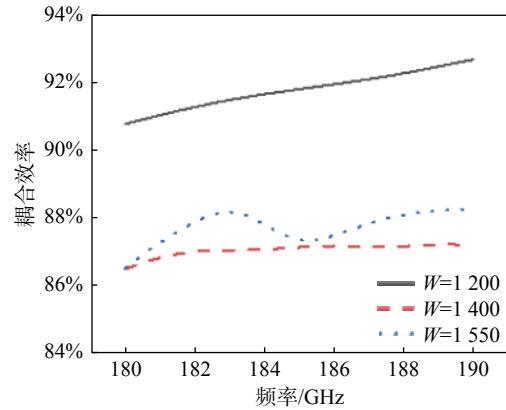


图 6 不同宽度 1×2 MMI 的耦合效率

Fig. 6 Coupling efficiency of 1×2 MMI with different widths

上面对多模干涉区进行了尺寸优化, 但是当输入波导进入多模波导区时, 也会存在一个波导模式不匹配的情况, 因为这里输入输出的单模波导的大小是固定的, 所以需要给单模波导和多模波导之间添加一个渐变结构来缓解尺寸的突然变化, 在此引入 taper 结构, 如图 7 所示。这种线性 taper 的波导, 能够减小单模波导和多模波导之间的模式转换带来的损耗, 同时可以减小自映像的模式相位差, 提高像的质量, 从而减小 MMI 的损耗。当选取的工作频率为 $185\ \text{GHz}$ 时, 保证两个 taper 的宽度不变, 改变 taper 的长度, 可以发现在 taper 长度改变的情况下, MMI 耦合器的耦合效率受到的影响较小, 且宽度较小的 MMI 对 taper 长度更不敏感。同时, 在仿真设计中需要注意, W_t 不能过大, 不然会导致两个输出波导之间的间距 G 过小, 工艺达不到。另外, 还需要考虑 taper 的长度 L_t 对 MMI 的损耗影响。所以, 最终选择 $W_t=550\ \mu\text{m}$, $L_t=500\ \mu\text{m}$ 。

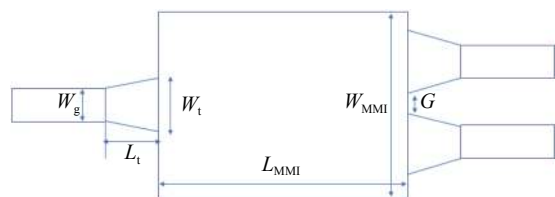


图 7 Taper 结构的 1×2 MMI 示意图

Fig. 7 Schematic diagram of 1×2 taper MMI

通过 taper 结构可以有效地减小单模波导和多模波导之间的模式转换带来的损耗, 提高耦合效率, 从图 8 可以看出, 在相同的宽度下, 引入 taper 结构并不会改变它的耦合效率的趋势, 而是整体上相对于没有 taper 结构的耦合效率数值的提升。

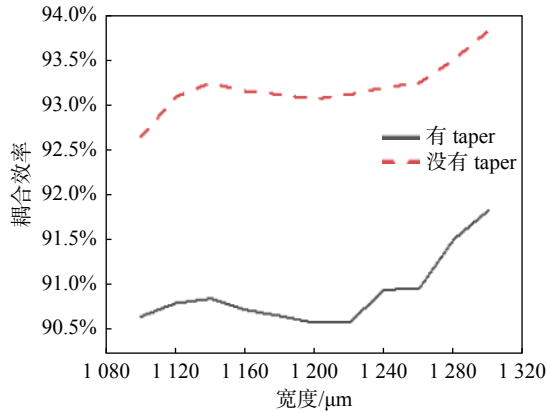


图 8 有 taper 和无 taper 的耦合效率对比
Fig. 8 Comparison of coupling efficiency with and without taper

与此同时, 除了在单模波导和多模干涉区之间嫁接 taper 结构来减缓它的模式转换带来的损耗, 还可以通过直接减小多模干涉区的体积, 直接将多模干涉区做成 taper 型可以缩小整个器件的体积从而实现该多模干涉耦合器在集成光学中的片上集成, 其结构示意图如图 9 所示。在该条件下, 同样的 1200 μm 宽度的多模干涉区, 它的首个自映像的成像点位置为 1109.83 μm, 即该多模干涉区的长度较之前缩小了很多, 更加有利于该器件在集成光学中的应用, 并且它能够获得和在单模波导和多模波导之间直接添加 taper 连接的结构相当的耦合效率, 进一步实现了既减小了尺寸又提高了效率的目的, 其耦合效率结果如图 10 所示。

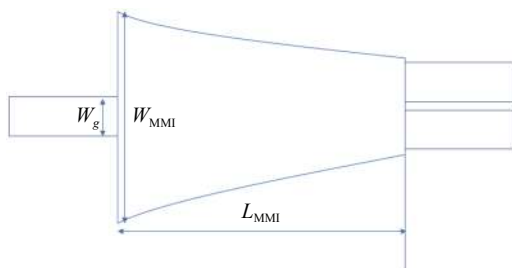


图 9 Taper 型多模干涉区
Fig. 9 Taper MMI area

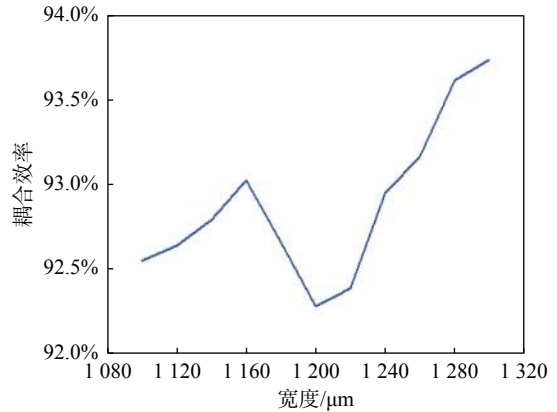


图 10 Taper 型多模干涉区的耦合效率

Fig. 10 The coupling effective of taper MMI area

3 结 论

本文通过多模干涉理论以及 FDTD solution, Mode Solution 仿真软件的结合使用, 设计出太赫兹波段的 1×2 对称型多模干涉耦合器, 并且通过理论推算它的二阶拍长, 随后对它的宽度进行一系列的参数扫描优化得到了在 185 GHz 时, 耦合效率较高的尺寸结构。同时也验证并改善了当多模波导宽度增大时, 会使得多模干涉区和输入波导之间的模式不匹配度增加的问题。所以, 在此基础之上提出添加一个 taper 渐变结构来减缓单模波导和多模干涉区之间因为模式的突然转换带来的模式不匹配从而导致多模干涉耦合器的耦合效率的降低, 优化了基础的 1×2 MMI 的耦合效率, 为之后的级联提供了思路。根据连接处的 taper 原理, 提出是否可以将多模干涉区直接设计成 taper 型结构, 以此达到在提高耦合效率的同时, 做到缩小器件结构尺寸, 为该器件以后的片上集成打下基础。且该器件是基于高阻硅材料设计的, 有效降低了加工成本, 为后面太赫兹波段的波分复用提供了思路。

参考文献:

[1] TALBOT W H F. Facts relating to optical science[J]. Philosophical Magazine, 1836, 9: 401.
[2] BRYNGDAHL O. Image formation using self-imaging techniques[J]. Journal of the Optical Society of America, 1973, 63(4): 416 – 419.

- [3] ULRICH R. Image formation by phase coincidences in optical waveguides[J]. *Optics Communications*, 1975, 13(3): 259 – 264.
- [4] BACHMANN M, BESSE P A, MELCHIOR H. General self-imaging properties in $N \times N$ multimode interference couplers including phase relations[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(18): 3905 – 3911.
- [5] LUCAS L B, PENNINGS E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(4): 615 – 627.
- [6] MA Y J. Multi-mode interference coupler: USA, US 10012795[P]. 2018-07-03.
- [7] HONG J M, RYU H H, PARK S R, et al. Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(1): 72 – 74.
- [8] 展鹏, 蔡斌, 唐军. 基于纳米复合材料的太赫兹滤波器研究 [J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(2): 154 – 158.
- [9] JIAO Y Q, DAI D X, SHI Y C, et al. Shortened polarization beam splitters with two cascaded multimode interference sections[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(20): 1538 – 1540.
- [10] SHENG Z, WANG Z Q, QIU C, et al. A compact and low-loss MMI coupler fabricated with CMOS technology[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(6): 2272 – 2277.
- [11] ZHOU H F, SONG J F, LI C, et al. A library of ultra-compact multimode interference optical couplers on SOI[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(12): 1149 – 1152.
- [12] WEI H Z, YU J Z, ZHANG X F, et al. Compact 3-dB tapered multimode interference coupler in silicon-on-insulator[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(12): 878 – 880.
- [13] GUAN X W, WU H, SHI Y C, et al. Extremely small polarization beam splitter based on a multimode interference coupler with a silicon hybrid plasmonic waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 259 – 262.
- [14] 马春生, 刘式墉. 光波导模式理论 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006.
- [15] YAMAMOTO S, KOYAMADA Y, MAKIMOTO T. Normal-mode analysis of anisotropic and gyrotropic thin-film waveguides for integrated optics[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 43(12): 5090 – 5097.
- [16] 周斌. 微波波导元件的模式匹配分析法 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (电子学研究所), 2003.
- [17] LOHMEYER M. Wave-matching method for mode analysis of dielectric waveguides[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1997, 29(9): 907 – 922.
- [18] 尹锐, 杨建义, 江晓清, 等. MMI 器件模式传输分析法与精确模式分析法比较 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(2): 116 – 119.
- [19] 李炳新, 刘岩, 黄蕾. 基于边界元法的微结构光波导模场分布研究 [J]. *电子技术*, 2010, 47(7): 74 – 76, 59.
- [20] 曹庄琪. 非均匀平板波导的色散方程 [J]. *光学学报*, 1994, 14(11): 1223 – 1226.
- [21] 龚姣丽, 杨盈莹, 李志扬. 基于模式匹配法的平面波导光场分布分析 [J]. *光学与光电技术*, 2006, 4(1): 46 – 48.

(编辑: 张 磊)