

引用格式:林捷,冯志芳,冯帅. 2D-3D 异质结结构中集成波导的优化[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 112-116.

LIN Jie, FENG ZhiFang, FENG Shuai. Optimization of an integrated waveguide in a 2D-3D heterostructure[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019, 46(3): 112-116.

2D-3D 异质结结构中集成波导的优化

林捷¹ 冯志芳^{1*} 冯帅²

(1. 北京化工大学 理学院, 北京 100029; 2. 中央民族大学 理学院, 北京 100081)

摘要: 为了探究光子晶体在多方向上的传输特性, 采用时域有限差分方法系统地设计、模拟和分析了太赫兹波段下 2D-3D 异质结结构中的波导集成器件。通过对垂直波导和输出波导的优化设计发现, 减小垂直波导中邻近微腔之间的旋转角度可以有效提高集成波导的传输效率; 增宽输出波导时, 导带范围和传输效率进一步得到了改善。另外通过设计研究了多方向传输的集成波导器件, 证明其各方向都具有良好的传输效率。

关键词: 波导; 集成器件; 时域有限差分法

中图分类号: TN256 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.03.017

引言

经过几十年的研究和应用, 光子晶体的光学器件小型化已经趋于完善, 光学器件的集成化越来越受到重视, 而高密度光子集成器件是实现光通信的重要组成部分。三维光子晶体具有完全带隙等重要的物理性质, 可以作为超密集新型光学器件的良好平台^[1-3]。三维的 woodpile 结构由于加工工艺简单受到了广泛的关注, 学者们相继报道了很多相关的重要研究成果^[4-9]。近年来, 结合 2D 光子晶体和 woodpile 结构的 2D-3D 异质结结构因其能实现非平面集成电路, 成为了新的研究热点。Zhang 等^[10]通过扰动法、周期性变化法、平滑优化法对 45° 和 90° 波导进行优化, 有效地提升了传输效率和导带宽度; Chutinan 等^[11]设计的 2D-3D 异质结结构全光微型芯片具有高带宽、低损耗等特性。3D 微型芯片能在每个平面层中实现 200 nm 的单模波导, 在非平面层中可实现 100 nm 带宽的传输。Tang 等^[12]将二维平板光子晶体嵌

入 woodpile 结构中, 以达到抑制平板微腔的辐射、减小损耗、增大品质因素的目的, 获得了高达 10^5 的 Q 值; Chutinan 等^[13]搭建了 3 种不同 2D-3D 的异质结构集成电路, 进一步证明了该结构在全光集成电路领域的重要应用价值。

以上研究工作主要集中在二维波导的优化^[14-20]以及三维结构的搭建上, 而关于立体空间集成波导的研究较少。本文在 2D-3D 异质结结构中设计了空间的集成波导器件, 采用时域有限差分方法^[21]模拟了优化设计后的垂直耦合波导和输出波导的透过率及导带范围的变化; 在此基础上, 设计了可以实现多方向传输的集成波导器件, 并研究了该集成波导器件的传输特性。

1 2D-3D 异质结结构集成波导的设计

本文设计的 2D-3D 异质结结构工作于太赫兹波段 (THz), 其结构示意图如图 1(a) 所示。该结构包含了两个二维光子晶体和 3 个 woodpile 结构, 上、中、下 3 个 woodpile 结构被两个二维结构分开。woodpile 结构中中介柱的尺寸为 $0.25a \times 0.3a \times 20a$, 二维光子晶体中介质柱尺寸为 $0.25a \times 0.25a \times 0.6a$, 其中晶格常数 $a = 10 \mu\text{m}$ 。中介柱和背景材料的相对介电常数分别为 11.9 和 1.0 (空气)。通过时域有限差分法模拟计算发现, woodpile 结构与二维光子晶体之间存在重叠带隙, 带隙范围 10.8 ~ 13.6 THz。

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(LXHG2014001); 国家自然科学基金(11374378/61775244); 北京化工大学学科建设基金(XK1702)

第一作者: 男, 1993 年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: fengzf@mail.buct.edu.cn

基于 2D-3D 结构设计了集成波导器件, 去掉下层二维光子晶体中沿 X 方向的部分介质柱构成输入波导(图 1(b)), 去掉上层二维结构中部分介质柱形成输出波导(图 1(c)), 两波导之间垂直距离 $2.1a$, 夹角 45° 。如图 1(d) 所示, 利用 6 个微腔形成腔耦合垂直波导来实现上下两个波导的连接, 微腔尺寸 $0.5a \times 0.25a \times 0.3a$, 介电常数 1.04 (泡沫材料)。以高斯脉冲光源为入射光源, 光源沿 X 正方向传播并被放置在距离样品边缘 $1a$ 的位置, 同时在入射波导与垂直波导连接处设置记录点 B_1 , 在出射波导末端设置记录点 B_2 。

通过模拟计算得到该结构集成波导的导带范围为 $11.30 \text{ THz} \sim 11.69 \text{ THz}$, 如图 2(a) 所示。为了验证模拟结果, 模拟计算了频率 11.59 THz 时该集成波导器件的场分布, 结果如图 2(b)、(c) 所示。可

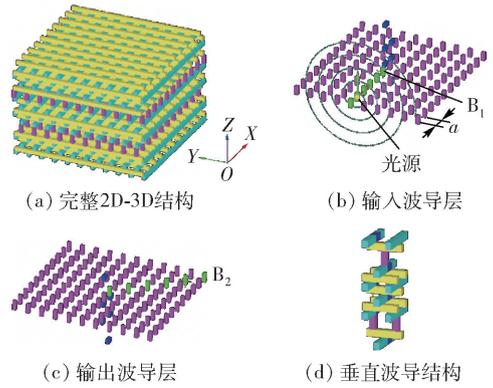


图 1 2D-3D 异质结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 2D-3D heterostructure

以发现, 该集成波导器件能实现立体空间波的定向传输, 但从透射谱观察, 其导带范围的传输率较低, 平均值接近 -10 dB 。

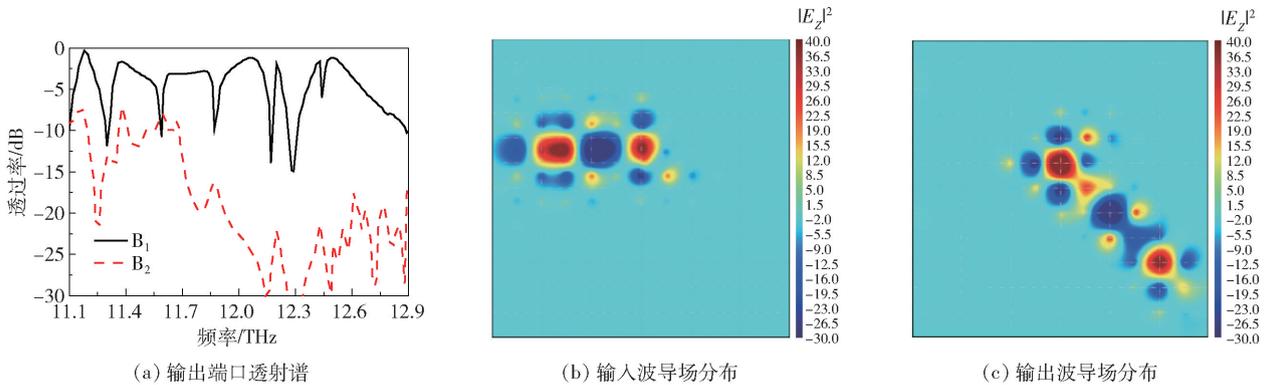


图 2 集成波导器件的透射谱和输入、输出波导在 11.59 THz 时的场分布图

Fig. 2 Transmission spectra of the integrated waveguide and the field distributions of the input and output waveguide at a frequency of 11.59 THz

2 垂直耦合波导的设计

腔耦合垂直耦合波导区别于普通介质柱波导的优势在于, 其每个腔都是独立的且可以旋转, 因此本文考虑垂直波导中微腔旋转对传输特性的影响。为了保证高传输效率, 要求接近输出波导的微腔旋转角度恰好为 45° 。图 3(a) 中, 靠近输出波导的微腔旋转后其振动方向恰好指向输出波导的方向。为了保证与输出波导相邻的介质柱正好旋转 45° , 考虑增加中间 woodpile 结构的层数, 设计了 3 种旋转角度: ① 6 个微腔, 中间 4 个微腔旋转角度分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, 如图 3(b) 所示; ② 8 个微腔, 中间 6 个微腔的旋转角度分别为 $0^\circ, 9^\circ, 18^\circ, 27^\circ, 36^\circ, 45^\circ$, 如图 3(c) 所示; ③ 12 个微腔, 中间 10 个微腔旋转的角度分别为 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$, 如图 3(d) 所示。可以发现, 3 种旋转角度

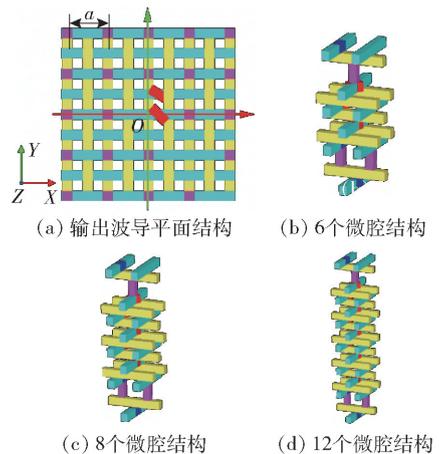


图 3 45° 输出波导及其垂直耦合波导优化示意图

Fig. 3 Schematic diagrams for the 45° output waveguide and the vertical waveguide optimization

下邻近微腔之间的夹角分别为 $15^\circ, 9^\circ, 5^\circ$, 且随着旋

转角度的减小微腔数目增加,输入、输出波导之间的距离由 $2.1a$ 增加到 $5.4a$ 。

采用时域有限差分法分别模拟计算上述3种旋转角时的透射谱,结果如图4所示。可以看出,旋转角度 15° 时,导带范围为 $11.35\text{ THz} \sim 11.60\text{ THz}$, 频率 11.48 THz 处的透过率最高,为 -3.0 dB (图4(a)); 旋转角度 9° 时,导带范围为 $11.35\text{ THz} \sim 11.66\text{ THz}$, 频率 11.39 THz 处的透过率最高,为

-2.89 dB (图4(b)); 旋转角度 5° 时,导带范围为 $11.35\text{ THz} \sim 11.69\text{ THz}$, 频率 11.66 THz 处的透过率达到了 -1.42 dB (图4(c))。结果表明通过旋转微腔、减小相邻微腔之间的夹角,可以一定程度上提高集成波导的透过率并扩大波导的导带范围。原因主要是随着相邻微腔间旋转角度的减小,腔与腔之间耦合增强,垂直波导的传输特性得到了提升,使输入、输出波导之间的耦合增强。

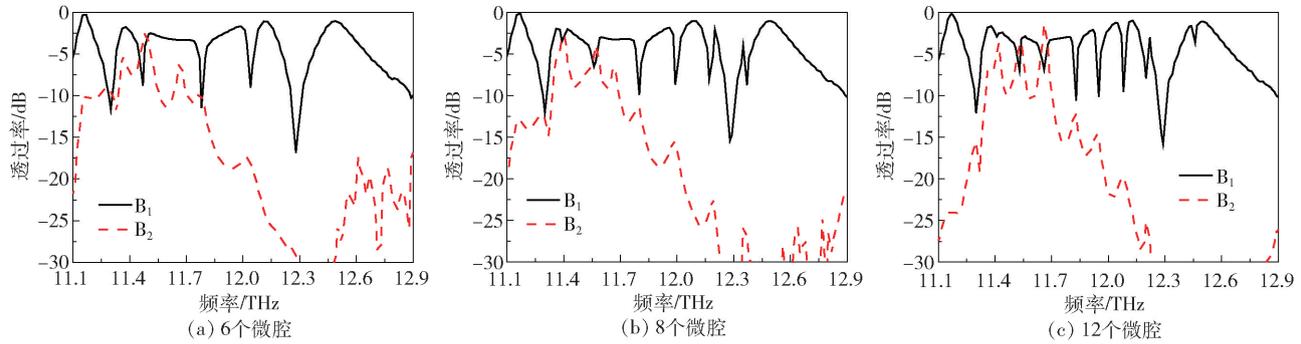


图4 垂直波导在不同微腔数下的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra for the vertical waveguide with different numbers of cavities

3 输出波导的设计

为了进一步改善集成波导的输出效率,对输出波导也进行了一定程度的优化设计。由于输出波导沿着 45° 方向出射,且波导两侧介质柱的排列是由二维光子晶体结构决定的,导致波导两侧介质柱的排列不整齐。文献[10]的理论模拟结果表明,通过对输出波导两侧介质柱的优化设计,可以一定程度上提高波导的传输效率。因此在保证相邻微腔的旋转角度 5° 的条件下,对如图5(a)所示的 45° 输出波导边缘进一步优化。首先通过增加波导两侧介质柱数目来减小相邻介质柱之间距离(图5(b)),此时

相邻介质柱距离为 $0.5a$; 同时将正方形截面介质柱旋转 45° , 使输出波导两侧的散射减弱,此时波导宽度为 $1.41a$ 。在此基础上,进一步将波导宽度增加到 $1.77a$ (图5(c)), 研究波导宽度对透过率的影响。采用时域有限差分方法模拟计算了3种设计的透射谱,结果如图6所示。比较发现,边缘优化对波导传输特性的影响较弱,优化前后透射谱变化不明显; 当波导宽度增加到 $1.77a$ 时,导带宽度明显增加 ($11.41\text{ THz} \sim 12.05\text{ THz}$), 透过率也得到有效的提升。这一结果充分说明同时优化波导边缘和增加输出波导宽度可以显著提高波导的透过率,实现宽频带、低损耗的传输。

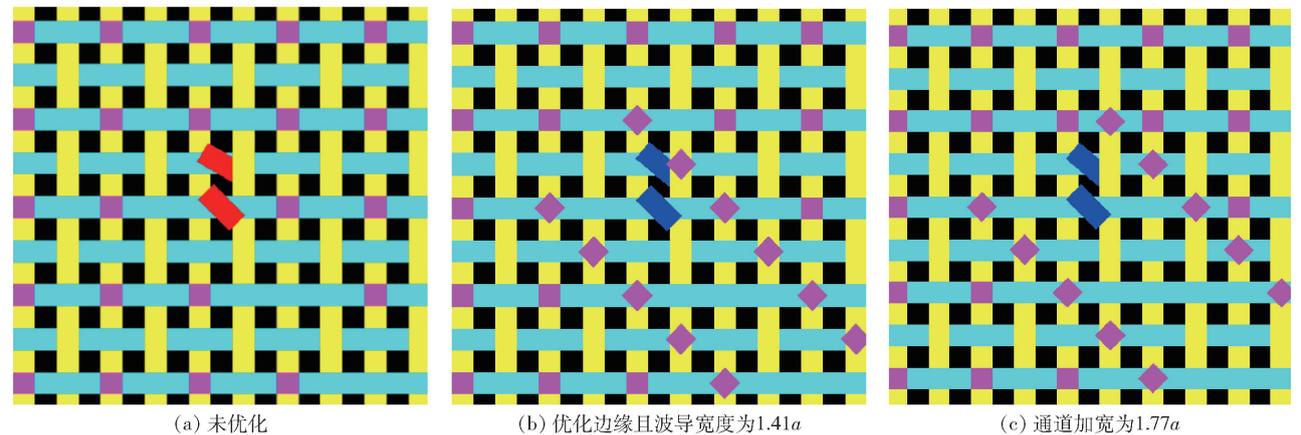


图5 输出波导优化结构图

Fig. 5 The optimized structures for the output waveguide

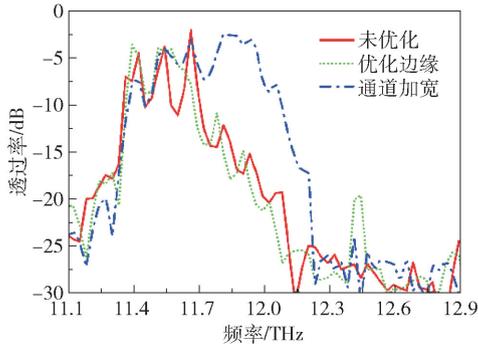
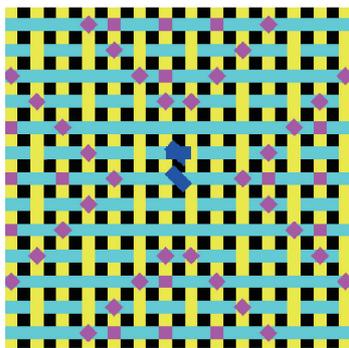
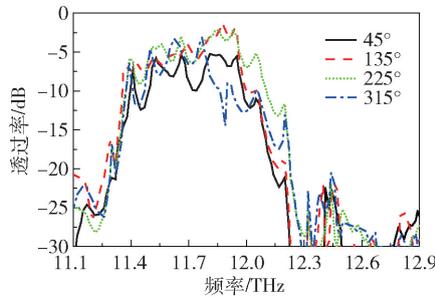


图6 不同优化情况下输出波导透射谱

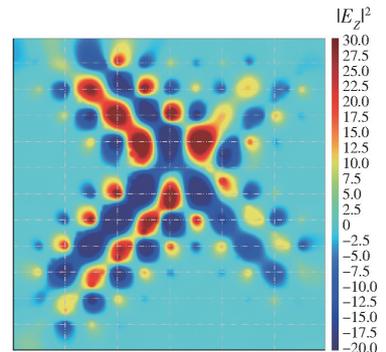
Fig. 6 Transmission spectra for the optimized output waveguides



(a) 结构图



(b) 透射谱



(c) 11.92 THz时的场分布

图7 集成波导输出层结构图、透射谱及其 11.92 THz 时的场分布

Fig. 7 The structure of the integrated waveguide, the transmission spectra and the field distributions at a frequency of 11.92 THz

明,通过优化设计可以有效提高集成波导的透过率,改善其导带范围,实现多方向同时传输。

5 结论

采用时域有限差分法设计、模拟和分析了太赫兹波段下 2D-3D 异质结结构中的集成波导器件。对垂直波导和输出波导的优化设计表明,通过减小垂直耦合波导中邻近微腔之间的旋转角度可以有效提高集成波导的传输效率;同时优化输出波导边缘和增加波导宽度时,波导导带范围和传输效率进一步改善。通过设计模拟多方向传输的集成波导器件,发现其各个方向都具有良好的输出效率。该研究结果可为全光集成电路的研究提供理论指导。

参考文献:

[1] MARICHY C, MULLER N, FROUFE-PEREZ L S, et al. High-quality photonic crystals with a nearly complete band gap obtained by direct inversion of woodpile tem-

4 多方向集成波导

第3节的模拟计算表明,优化垂直波导和增宽输出波导可以有效提高集成波导器件的导带宽度及其透过率。在此基础上设计了包含4个输出通道的集成波导器件(图7(a)),其输出波导的出射方向分别为 45° 、 135° 、 225° 和 315° 。采用时域有限差分法分别模拟了4个通道的透射谱(图7(b)),可以发现4个通道均具有较宽的导带范围和较高的透过率。为了验证理论模拟结果,计算了频率为11.92 THz时集成波导的场分布(图7(c)),可以看出每个通道都具有良好的传输效果。模拟结果表

plates with titanium dioxide [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 21818.

- [2] PARK S G, YANG S M. Multicolor patterning using holographic woodpile photonic crystals at visible wavelengths [J]. Nanoscale, 2013, 5: 4110-4113.
- [3] SAMUSEV K B, RYBIN M V, SAMUSEV A K, et al. Optical properties of woodpile photonic crystals produced by three-dimensional laser lithography [J]. Physics of the Solid State, 2015, 57(12): 2494-2501.
- [4] TAVERNE M P C, HO Y L D, RARITY J G. Investigation of defect cavities formed in three-dimensional woodpile photonic crystals [J]. Journal of the Optical Society America B, 2015, 32: 639-648.
- [5] WOLDERING L A, MOSK A P, VOS W L. Design of a 3D photonic band gap cavity in a diamond-like inverse woodpile photonic crystal [J]. Physical Review B, 2014, 90: 284.
- [6] HAUKE N, TANDAACHANURAT A, ZABEL T, et al. A three-dimensional silicon photonic crystal nanocavity with enhanced emission from embedded germanium

- islands[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14: 083035.
- [7] FENG Z F, FU T T, YAN B, et al. Investigation for ultra-shorten coupling length in woodpile structure [J]. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2017, 23: 7–11.
- [8] FENG Z F, SHAO C P, ZHANG D D. Off-plane directional coupler in woodpile structure [J]. *Optik*, 2015, 126: 5213–5217.
- [9] 严彬, 冯志芳, 付婷婷. Woodpile 结构中 Y 型波导的非平面优化[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(2): 108–113.
YAN B, FENG Z F, FU T T. Off-plane optimization for a Y-type waveguide in a woodpile structure[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2017, 44(2): 108–113. (in Chinese)
- [10] ZHANG D D, FENG Z F. Optimization for waveguide bends in 2D + 3D hetero-structure [J]. *Optik*, 2013, 124: 6298–6301.
- [11] CHUTINAN A, JOHN S. Light localization for broadband integrated optics in three dimensions [J]. *Physical Review B*, 2005, 72: 161316.
- [12] TANG L L, YOSHIE T. High-Q hybrid 3D–2D slab–3D photonic crystal microcavity [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3144–3146.
- [13] CHUTINAN A, JOHN S. 3 + 1 dimensional integrated optics with localized light in a photonic band gap [J]. *Optics Express*, 2006, 14: 1266–1279.
- [14] KAWASHIMA S, OKANO M, IMADA M, et al. Design of compound-defect waveguides in three dimensional photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 6303–6307.
- [15] KAWASHIMA S, LEE L H, OKANO M, et al. Design of donor-type line-defect waveguides in three-dimensional photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2005, 13(24): 9774–9781.
- [16] LIU R J, LI Z Y, ZHOU F, et al. Near-field studies of microwave three-dimensional photonic crystals with waveguides [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15531–15538.
- [17] XING P F, BOREL P I, FRANSEN L H, et al. Optimization of bandwidth in 60° photonic crystal waveguide bends [J]. *Optics Communications*, 2005, 248: 179–184.
- [18] HU Z, LU Y Y. Improved bends for two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. *Optics Communications*, 2011, 284: 2812–2816.
- [19] XIAO S S, QIU M. Study of transmission properties for waveguide bends by use of a circular photonic crystal [J]. *Physics Letter A*, 2005, 340: 474–479.
- [20] DANAIE M, ATTARI A R, MIRSALEHI M M, et al. Design of a high efficiency wide-band 60° bend for TE polarization [J]. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2008, 6: 188–193.
- [21] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
GE D B, YAN Y B. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. (in Chinese)

Optimization of an integrated waveguide in a 2D–3D heterostructure

LIN Jie¹ FENG ZhiFang^{1*} FENG Shuai²

(1. Faculty of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Faculty of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to investigate the omni-directional transmission of a photonic crystal, a waveguide integrated device in a 2D–3D heterostructure working at terahertz wavelengths has been designed, simulated and analyzed. By optimization of the design for the vertical waveguide and the output waveguide, we found that the transmission efficiency can be improved significantly by reducing the rotation angle between the adjacent microcavities. When the output waveguide is widened, the band range and transmission efficiency are improved further. A waveguide integrated device including four input waveguides has also been designed and studied. The results show that all directions have good output efficiency.

Key words: waveguide; integrated device; finite-difference time-domain method

(责任编辑:汪 琴)