

引用格式:张明明,冯志芳.基于 2D-3D 异质结结构的密集型波分复用器的实验研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(1):116-120.

ZHANG MingMing, FENG ZhiFang. Experimental study of a compact wavelength division demultiplexer in a 2D-3D hetero-structure[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2023,50(1):116-120.

基于 2D-3D 异质结结构的密集型波分复用器的实验研究

张明明 冯志芳*

(北京化工大学 数理学院, 北京 100029)

摘 要: 基于光子晶体波导耦合原理,设计了 2D-3D 异质结结构的密集型波分复用器,从理论和实验上详细地研究了六通道波分复用器的传输特性。发现通过控制耦合波导长度,该密集型波分复用器可以实现每个通道的单频输出,实验测量结果也证明了其频率选择特性。之后对更为密集的八通道波分复用器也做了同样的理论模拟,得到了相同的结论。

关键词: 2D-3D 异质结结构; 密集型波分复用器; 波导

中图分类号: O469 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2023.01.014

引 言

近年来,2D-3D 异质结结构由于具有独特的堆叠特性以及可以抑制二维光子晶体 z 方向的能量损耗而得到广泛研究^[1-7]。2D-3D 异质结结构利用 woodpile 增强 z 方向对光的束缚作用从而降低该方向传输信号的能量损耗,同时利用堆叠方向的结构变化实现对功能器件传输性能的调制。如 Tang 等^[1]在 2D-3D 异质结结构中构建了具有超高 Q 值的光子晶体微腔,证明了该异质结结构可以有效消除二维结构中的垂直传输损耗。Chutinan 等^[2]在 2D-3D 结构中沿堆叠方向引入两个相互垂直的直波导,通过垂直耦合波导的连接,实现了 3 + 1 维光路集成。Lin 等^[3]设计了包含两个 2D-3D 异质结的结构,通过对该结构中集成波导的优化,能够实现在多个方向观察到宽导带。Feng 等^[4]设计了一种包含两个波分复用器的层状 2D-3D 异质结结构,通过调整参数可以实现每个器件、每个端口的选频特性。Zhang 等^[5]通过时域有限差分法模拟

计算了 2D-3D 异质结结构中 45° 和 90° 波导的传输性能,发现波导输出端微扰优化能够有效提高 45° 波导的透射率和带宽,而弯曲圆滑处理和减少波导两侧柱子的排列周期都能提高 90° 波导的输出效率。

波分复用器是集成电路中的一种重要器件^[8-15]。迄今为止,基于光子晶体的波分复用器的研究大多集中于二维结构。例如, Fallahi 等^[8]提出一种使用经过改良的 Y 分支结构和 4 个六边形光子晶体环形谐振器组成的 4 通道波分复用器,该结构通过选取不同的谐振腔内柱子半径来实现波长选择功能。Arnob 等^[9]提出一种基于六方晶格的二维光子晶体波分复用器,可用于 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 两个波长的解复用,同时实现了低串扰和 70% 以上的传输率。Mehdizadeh 等^[10]提出一种基于二维光子晶体的新的缺陷腔的八通道光子晶体解复用器,该结构通过设计谐振腔宽度可以分离所需的波长。Gupta 等^[11]设计了一种四通道波分复用器,此器件通过改变空腔周围的空气孔的半径来改变腔的共振波长。Bouamami 等^[12]设计了一个平面光子晶体七通道波分复用器,其原理是通过改变主波导两侧空气孔的大小来实现在波导的连续部分改变基本光子带形模式的截止频率。

然而,目前关于 2D-3D 异质结结构中密集型波

收稿日期: 2022-01-07

第一作者: 女, 1995 年生, 硕士生

* 通信联系人

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

分复用器的研究较少。本文在 2D-3D 异质结波导结构中设计了密集型波分复用器,采用时域有限差分法(FDTD)详细地模拟计算了不同通道的传输特性,并从实验上制备了相同的密集型波分复用器样品,完成了相应的实验测量。理论和实验结果都表明,所设计密集型波分复用器能够实现每个通道的频率选择特性。

1 2D-3D 结构中具有超宽导带直波导的设计

本文设计了工作于微波波段的 2D-3D 异质结结构,该结构包含 1 个二维光子晶体和 2 个 woodpile 结构,其中 woodpile 结构关于二维光子晶体对称堆叠排列。woodpile 结构中介质柱的参数为 $0.3a \times 0.3a$,其中晶格常数 $a = 10\text{ mm}$ 。对于二维光子晶体,介质柱的参数为 $0.3a \times 0.3a \times 1a$ 。背景材料和介质柱的介电常数分别为 1.0 和 7.5。本文使用的模拟软件为东峻信息有限公司开发的商业软件 East FDTD。

首先,在 2D-3D 异质结结构中引入一个位于二维光子晶体层的直波导,如图 1(a)所示,通过 FDTD 模拟,发现其存在超宽导带,范围为 $11.16\text{ GHz} \sim 13.68\text{ GHz}$ 。这种具有超宽导带的波导在密集型集成光路设计中具有非常重要的作用。

2 六通道波分复用器的理论模拟与实验测量

2.1 理论模拟

基于图 1 中的结构,设计了如图 2(a)所示的六通道密集型波分复用器。该密集型波分复用器包括 1 个具有超宽导带的直波导、6 个输出波导(CH1~CH6)以及主波导与输出波导之间的耦合波导。通过控制耦合波导的长度,可以有效调节各输出端口的波长。样品大小为 $26a \times 16a \times 7.2a$,一高斯光源置于直波导中距离样品左表面 $1.0a$ 处,传播方向沿 x 轴正方向,同时在主波导的输出端口和 6 个通道距离样品表面 $1.0a$ 处分别设置了记录点。

首先考虑 CH1 通道。通过去掉主波导一侧次近临的一个介质柱,形成长度为 $2a$ 的耦合波导,直波导中的入射光与该波导耦合后经由 CH1 输出,通过时域有限差分法模拟得到 CH1 通道的透射谱,如图 2(b)中的红色虚线所示,可以看出在频率为

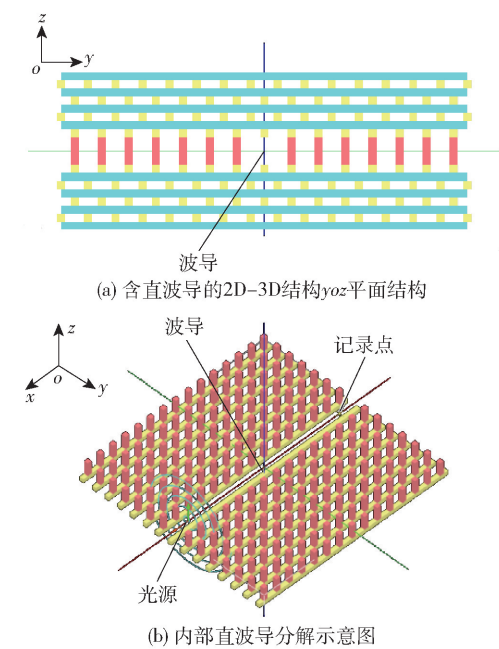


图 1 含直波导的 2D-3D 结构 yoz 平面结构以及内部直波导分解示意图

Fig.1 yoz plane structure diagram of the 2D-3D structure with a straight waveguide and a schematic diagram of the internal direct waveguide decomposition

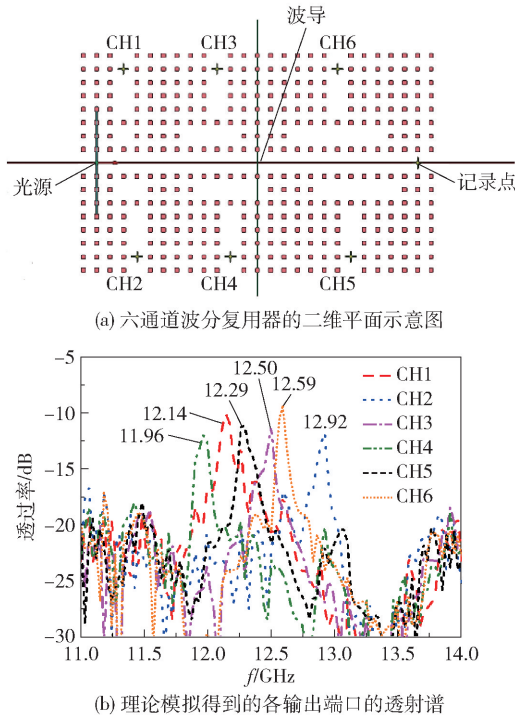


图 2 六通道波分复用器的二维平面示意图以及理论模拟得到的各输出端口的透射谱

Fig.2 Two-dimensional plane diagram of a six-channel WDM and the transmission spectrum of each output port obtained by theoretical simulation

12.14 GHz 处形成一个明显的共振峰,说明 12.14 GHz 频率的光沿着 CH1 输出。然后考虑 CH2。去掉主波导另一侧次近临的 2 个介质柱,形成长度为 $3a$ 的耦合波导,通过时域有限差分方法得到 CH2 的透射光谱,如图 2(b) 中的蓝色点线所示,可以看出频率为 12.92 GHz 光从 CH2 端口输出。对于其他 4 个通道,CH3 的耦合波导长度为 $5a$,CH4 的耦合波导长度为 $6a$,CH5 对应的耦合波导长度为 $7a$,CH6 的耦合波导长度为 $8a$ 。通过时域有限差分法得到后 4 个通道的透射谱,如图 2(b) 所示。

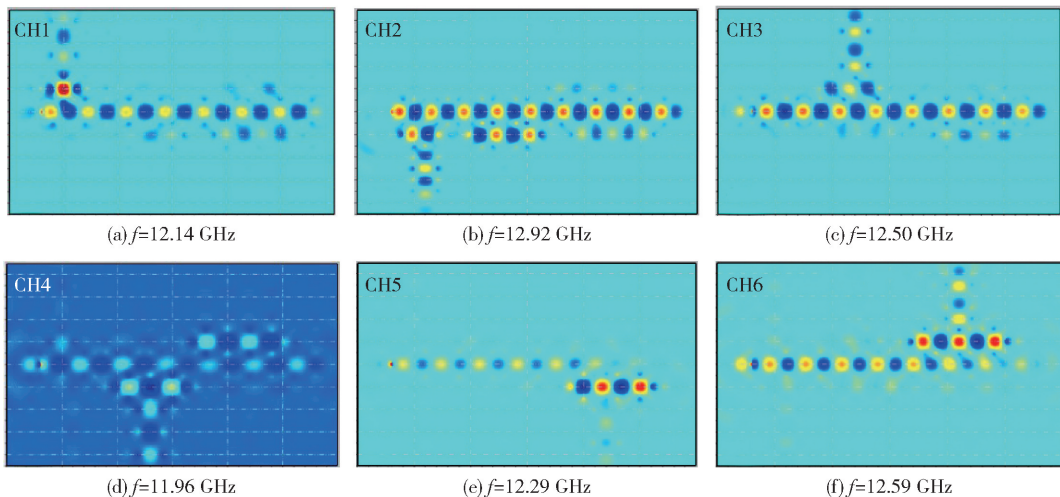


图3 场分布图

Fig. 3 The field distributions

2.2 实验测量与结果分析

本文进行了系统的实验测量来验证上述理论计算结果。在实验中,使用 E5071C 矢量网络分析仪 (Keysight 公司) 和单极天线。单极天线由一对同轴电缆制成并作为点源的发射极和接收器,天线连接网络分析仪和各个端口,并由矢量网络分析仪分析给出数据。首先,搭建与 2.1 节相同的六通道波分复用器,介质柱为三氧化二铝,其介电常数为 7.5,如图 4(a) 所示。二维光子晶体层固定在泡沫板上,泡沫的介电常数约等于空气的介电常数,实验平面图如图 4(b) 所示。单极天线的最佳位置是以波导中心线为中心,置于波导约 1 个晶格常数的位置处。

实验测量时,一个单极天线固定在输入端口 A,另一个放置在 CH1 处,输入的微波信号通过直波导与长度为 $2a$ 的波导耦合后,特定频率的光将由 CH1 端口输出,所得测量光谱如图 5 中红色虚线所示。当频率为 12.08 GHz 时,CH1 的透射曲线出现一个

明显的透射峰,说明这一频率的光刚好满足长度为 $2a$ 波导的共振频率,从 CH1 输出。然后,在保持结构不变的情况下,将接收天线放置在 CH2 中,CH2 对应的耦合波导长度为 $3a$,同样测得该端口的透射曲线如图 5 中蓝色点线所示,可以看出频率为 12.95 GHz 的光从 CH2 输出。接下来,使用相同的测量方法分别测量 CH3、CH4、CH5 和 CH6,得到的 4 个端口的透射曲线也分别显示在图 5 中。结果表明,频率为 12.47 GHz 的光从 CH3 输出,频率为 11.84 GHz 的光从 CH4 输出,频率为 12.38 GHz 的光从 CH5 输出,频率为 12.68 GHz 的光从 CH6 输出。以上测量结果表明,通过改变耦合波导的长度可以实现选频的目的。

分析其透射谱可知,频率为 12.50 GHz 的光从 CH3 输出,频率为 11.96 GHz 的光从 CH4 输出,频率为 12.29 GHz 的光从 CH5 输出,频率为 12.59 GHz 的光从 CH6 输出。

为了进一步验证各通道的传输效果,分别模拟了频率为 11.96 GHz、12.14 GHz、12.29 GHz、12.50 GHz、12.59 GHz、12.92 GHz 光的场分布,结果如图 3(a) ~ (f) 所示。由场分布图可知,6 种不同频率的光分别经由特定的通道单频输出,该结果与模拟透射谱图一致。

对模拟计算结果与测量结果进行分析,发现共振频率存在一定的偏差,这主要是由实验中存在的误差引起的,如介质柱不均匀导致的共振频率移动、中间二维结构与上下两侧 woodpile 结构的错位引起的共振频率的移动等。因此,无论是从理论上还是

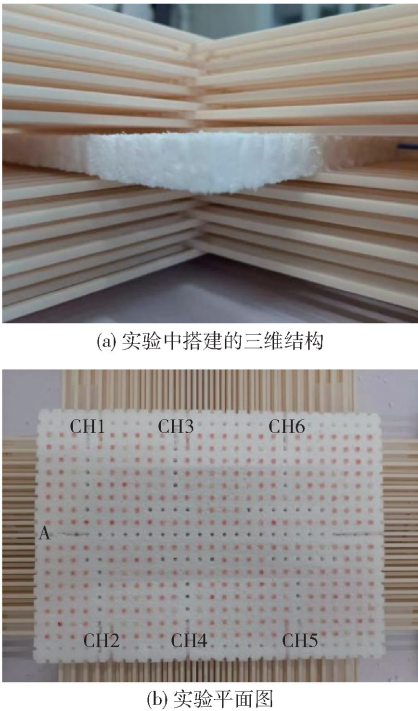


图 4 六通道密集波分复用器实验结构图

Fig. 4 Experimental structure diagram of the six-channel compact wavelength division demultiplexer

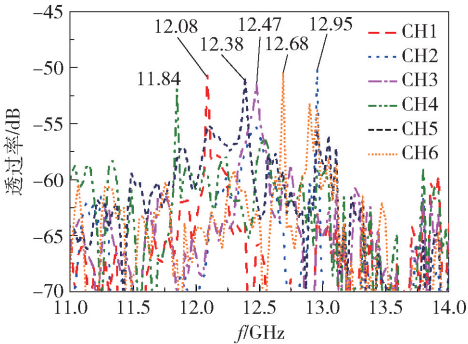


图 5 CH1 ~ CH6 通道的实验测量透射谱

Fig. 5 Experimental transmission spectra of channels CH1-CH6

实验上,本文设计的密集型六通道波分复用器都表明其具有良好的选频特性。

3 八通道波分复用器的理论模拟

我们同样设计了八通道波分复用器,与六通道波分复用器相比,该器件增加了耦合长度分别为 $4a$ 和 $9a$ 的两个通道。通过时域有限差分法得到各通道的输出频率,8个通道分别所对应的耦合长度及输出频率如表 1 所示。表 1 的结果表明,该八通道波分复用器同样具有选频特性。

表 1 八通道密集型波分复用器各通道耦合长度与输出频率

Table 1 Coupling length and output frequency of each channel in the eight-channel compact wavelength division demultiplexer

| 通道编号 | 耦合长度 | 输出频率/GHz |
|------|------|----------|
| CH1 | $2a$ | 12. 14 |
| CH2 | $3a$ | 12. 92 |
| CH3 | $4a$ | 12. 02 |
| CH4 | $5a$ | 12. 50 |
| CH5 | $6a$ | 11. 96 |
| CH6 | $7a$ | 12. 29 |
| CH7 | $8a$ | 12. 59 |
| CH8 | $9a$ | 12. 80 |

4 结论

本文设计了工作于微波波段的 2D-3D 异质结结构,并在其中引入了具有超宽导带的波导结构。在此基础上,设计了基于 2D-3D 异质结结构的密集型波分复用器。理论模拟和实验测量的结果表明,该密集型波分复用器具有良好的选频效果。本文研究结果对于缩小器件尺寸以及制造大型紧凑型集成电路具有指导意义。

参考文献:

[1] TANG L L, YOSHIE T. High-Q hybrid 3D-2D slab-3D photonic crystal microcavity [J]. Optics Letters, 2010, 35(18): 3144 – 3146.

[2] CHUTINAN A, JOHN S. 3 + 1 dimensional integrated optics with localized light in a photonic band gap [J]. Optics Express, 2006, 14(3): 1266 – 1279.

[3] LIN J, FENG Z F. Investigation for connecting waveguide in off-planar integrated circuits [J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7041 – 7045.

[4] FENG Z F, LIN J, FENG S. Optical device terahertz integration in a two-dimensional-three-dimensional hetero-structure [J]. Applied Optics, 2018, 57(2): 185 – 188.

[5] ZHANG D D, FENG Z F. Optimization for waveguide bends in 2D + 3D hetero-structure [J]. Optik, 2013, 124(23): 6298 – 6301.

[6] 梁海瑶, 张晶晶, 冯志芳. 2D-3D 异质结结构中超短耦合长度的研究 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 105 – 110.

- LIANG H Y, ZHANG J J, FENG Z F. Investigation of ultra-short coupling lengths in 2D-3D hetero-structures [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2021, 48(4): 105 – 110. (in Chinese)
- [7] 张晶晶, 林捷, 冯志芳. 2D-3D 异质结构中的紧凑集成电路[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 122 – 127.
- ZHANG J J, LIN J, FENG Z F. A compact integrated circuit in a 2D-3D hetero-structure[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020, 47(3): 122 – 127. (in Chinese)
- [8] FALLAHI V, SEIFOURI M. A new design of a 4-channel optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonator using a modified Y-branch[J]. Optica Applicata, 2018, 48(2): 191 – 200.
- [9] ARNOB M M P, TALUKDER A B M H, FARUK M O, et al. Design and simulation of an optical wavelength division demultiplexer based on the photonic crystal architecture[C]//2012 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV). Piscataway: IEEE, 2012: 441 – 444.
- [10] MEHDIZADEH F, SOROOSH M. A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities[J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(1): 65 – 70.
- [11] GUPTA N D, JANYANI V. Dense wavelength division demultiplexing using photonic crystal waveguides based on cavity resonance [J]. Optik: Zeitschrift fur Licht-und Elektronenoptik: = Journal for Light-and Electronoptic, 2014, 125(19): 5833 – 5836.
- [12] BOUAMAMI S, NAOUM R. Compact WDM demultiplexer for seven channels in photonic crystal [J]. Optik, 2013, 124(16): 2373 – 2375.
- [13] 庄煜阳, 陈鹤鸣. 三波长光子晶体波分复用器的研究[J]. 光通信研究, 2013(6): 49 – 51.
- ZHUANG Y Y, CHEN H M. Study on three-wavelength photonic crystal WDM[J]. Study on Optical Communications, 2013(6): 49 – 51. (in Chinese)
- [14] KANNAIYAN V, SAVARIMUTHU R, DHAMODHARAN S K. Performance analysis of an eight channel demultiplexer using a 2D-photonic crystal quasi square ring resonator[J]. Opto-Electronics Review, 2017, 25(2): 74 – 79.
- [15] 王一飞, 王梦梦, 文丰, 等. 基于光子晶体三通道解波分复用器[J]. 光通信技术, 2019, 43(12): 27 – 29.
- WANG Y F, WANG M M, WEN F, et al. Three-channel wavelength division demultiplexer based on photonic crystal [J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(12): 27 – 29. (in Chinese)

Experimental study of a compact wavelength division demultiplexer in a 2D-3D hetero-structure

ZHANG MingMing FENG ZhiFang*

(College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the principle of waveguide coupling, we have designed a compact wavelength division demultiplexer in a 2D-3D hetero-structure. The transmission characteristics have been studied theoretically and experimentally in detail. It is found that the compact wavelength division demultiplexer can achieve a single frequency output for each channel by controlling the coupled waveguide length. At the same time, the experimental measurements also demonstrate its frequency selection properties. When the same theoretical simulation was carried out for an eight-channel wavelength division demultiplexer, the same results were obtained.

Key words: 2D-3D hetero-structure; compact wavelength division demultiplexer; waveguide

(责任编辑:吴万玲)