

引用格式:张晶晶,林捷,冯志芳. 2D-3D 异质结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 JingJing, LIN Jie, FENG ZhiFang. 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.

2D-3D 异质结结构中的紧凑集成电路

张晶晶 林捷 冯志芳*

(北京化工大学 数理学院, 北京 100029)

摘 要:通过时域有限差分方法,详细地分析了 2D-3D 异质结结构中密度集成光学器件的传输特性。在三层 2D 结构中,分别引入了不同设计结构的波分复用器,通过调整结构参数实现了集成光路中每个器件、每个端口的波长选择特性,如 B_1 端口的输出频率为 $0.404[c/a]$, B_2 端口为 $0.408[c/a]$, B_3 端口为 $0.386[c/a]$, B_4 端口为 $0.388[c/a]$, B_5 端口为 $0.390[c/a]$, B_6 端口为 $0.394[c/a]$, B_8 端口为 $0.392[c/a]$, B_9 端口为 $0.409[c/a]$ 。更重要的是,此结构实现了多个器件沿堆叠方向的密度集成,集成器件的总尺寸为 $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.14\text{ mm}$ 。这些研究结果可为紧凑集成电路的设计提供重要的理论指导。

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.2020.03.016

引 言

由于 woodpile 结构具有许多新的和重要的物理特性,目前已经有许多相关的理论和实验报道,例如,Özbay 等^[1]和 Ho 等^[2]证明了 woodpile 结构存在完全带隙;Chang 等^[3]报道了简单螺旋结构中具有拓扑电荷 1 和 2 的 Weyl 点;Liu 等^[4]研究了 woodpile 结构中两个平行耦合波导的功率传输特性;Feng 等^[5-6]研究了平面和非平面的四端口通道下载滤波器,并设计了非平面定向耦合器,获得了超短的耦合长度^[7-8]。

近几年,2D-3D 异质结结构由于可以作为超紧凑集成电路的良好平台同样受到了广泛的关注^[9-13]。该异质结结构既可以充分利用二维结构中器件设计简单、传输效果良好的特点,又可以借助 woodpile 结构实现沿堆叠方向器件的集成化。如 Chutinan 等^[9-10]报道了位于不同堆叠层波导的集

成;Kawashima 等^[11]设计了 L 型集成波导,观察到了特定偏振的近红外光的传播;Lin 等^[12-13]研究了垂直耦合波导的传输特性。目前,太赫兹技术正在经历一个快速发展和多样化应用的时期^[14-17]。太赫兹波段的波分复用器(wavelength division demultiplexing, WDDM)在集成电路领域具有重要的应用潜力,通过环形谐振腔或引入微腔来实现波长选择特性的 WDDM 已经有很多报道^[18-24],如 Liao 等^[21]研究了基于波导和环形谐振腔的 WDDM, Jin 等^[24]通过输出波导和点缺陷之间的共振耦合设计了可实现频率选择特性的多路 WDDM。

然而,现有报道多为平面内单一器件的设计与研究,有关沿堆叠方向多个器件集成的报道相对较少,因此本文采用时域有限差分(FDTD)方法详细设计并模拟计算了 2D-3D 结构中 3 个 WDDM 器件沿堆叠方向的密度集成及其频率选择特性。研究结果表明:2D-3D 结构可以实现不同输出端口的频率选择特性,同时也实现了在 $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.14\text{ mm}$ 的样品中沿堆叠方向多个器件的密度集成。这一模拟结果为全光集成电路的研究提供了坚实的理论支持。

1 2D-3D 异质结结构

首先,设计工作在太赫兹波的、大小为

收稿日期:2019-07-29

基金项目:国家自然科学基金(61775244/11974415);北京化工大学学科建设基金(XK1702)

第一作者:女,1994 年生,硕士生

*通信联系人

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

0.3 mm × 0.3 mm × 0.14 mm 的 2D-3D 异质结结构,如图 1(a)所示,可以看出,该结构包括 3 个 2D 光子晶体和 4 个 woodpile 结构。对于 woodpile 结构,介质柱的参数为 $0.25a \times 0.3a$,其中 a 代表同一层中相邻介质柱之间的距离。对于具有正方晶格的 2D 光子晶体,方形截面介质柱的参数为 $0.25a \times 0.25a \times 0.6a$ 。模拟计算中 a 的取值为 $10 \mu\text{m}$,所有柱子和背景介质的介电常数分别为 11.9(Si 材料)和 1.0(空气)。用时域有限差分法计算得到 2D 光子晶体和 woodpile 结构的重叠带隙为 $0.362[c/a] \sim$

$0.453[c/a]$ ($10.86 \text{ T} \sim 13.6 \text{ THz}$),其中 c 为真空中的光速。

为了清楚地显示各个器件的结构,在图 1(b) ~ (d)中分别给出不同器件的分解设计图,可以发现,在每个 2D 光子晶体中分别引入一个光学器件,其中位于最下层的标记为 WDDM-1,中间层的为 WDDM-2,上层的为 WDDM-3。为了实现相邻器件之间的连接,在 woodpile 结构中引入垂直耦合波导(10 个蓝色介质柱),连接位置分别为 A_1 、 A_2 和 A_3 。

2 集成器件传输特性

2.1 WDDM-1

本节设计了基于环形谐振腔的 WDDM(WDDM-1),并详细研究了其传输特性,该结构如图 1(b)和图 2(a)所示。可以发现,该器件包含 1 个输入波导,两个 $4a \times 4a$ 环形谐振腔和两个输出波导,输出端口分别标记为 B_1 和 B_2 。对于环形谐振系统,输出频率选择特性受环的大小、折射率比等参数的影响^[19-20,22]。从图 2(a)可以看出,在环形谐振腔和输入、输出波导之间存在一些介质柱(D_1 和 D_2),为了获得理想的波长选择特性,可以连续调节 D_1 和 D_2 区域中介质柱的宽度 W 。同时,为了保证高的传输效率,在每个拐角位置加入参数相同的介质柱,为了与其他介质柱区分,用绿色介质柱表示。

在模拟中,入射波沿 x 正方向传播,方向如图 2(a)中箭头所示,光源距离样品左表面 $1.0a$ 。在 B_1 和 B_2 两端口分别设置了一个记录点,两者距离样品表面均为 $1.0a$ 。为了获得理想的波长选择特性,将 D_1 和 D_2 区域中介质柱的宽度从 0 至 $0.30a$ 连续调节。通过 FDTD 方法,详细模拟了 B_1 和 B_2 端口的透射谱。通过对所有透射谱进行分析及比较,给出了 $W_{D_1} = 0.15a$, $W_{D_2} = 0.30a$ 时的透射谱,结果如图 2(b)所示。可以发现,此器件在一些频率范围内实现了频率选择特性,例如,频率为 $0.404[c/a]$ 的信号将沿 B_1 端口传输,而频率为 $0.408[c/a]$ 的信号将沿 B_2 端口传输。显然, B_1 和 B_2 端口的输出信号受到了环形谐振腔的调制。为了进一步验证透射谱的可靠性,模拟了频率分别为 $0.404[c/a]$ 和 $0.408[c/a]$ 的场分布,结果如图 3 所示。可以发现,场分布与透射谱的结果一致。这一结果充分证明了在 WDDM-1 中通过调节谐振腔的宽度可以实现输出频率的选择特性。

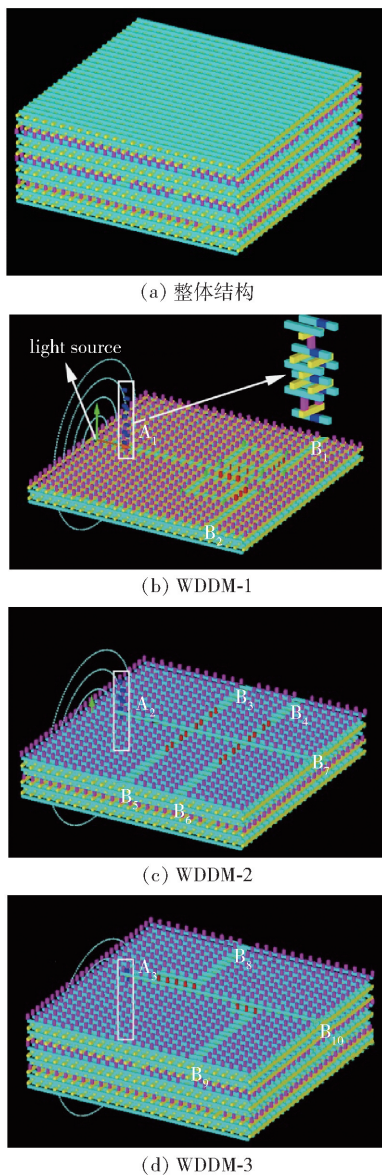


图1 2D-3D 异质结整体结构与 3 个 WDDM 的设计示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the 2D-3D hetero-structure and the three WDDMs

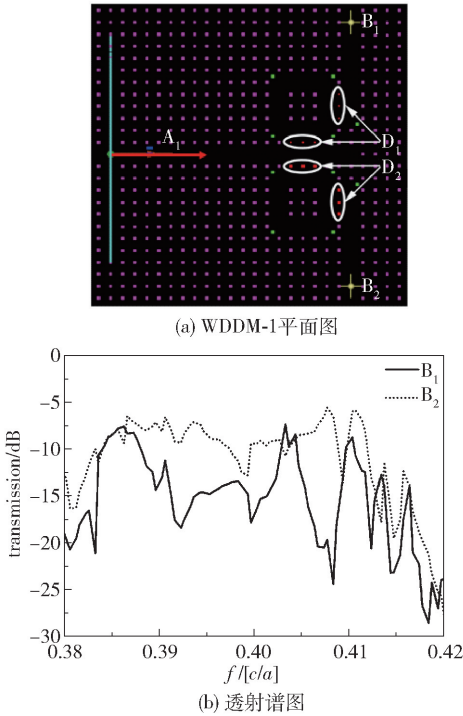


图2 WDDM-1 的示意图及 B_1 和 B_2 端口的透射谱图

Fig.2 Schematic diagram of WDDM-1 and the transmission spectra for ports B_1 and B_2

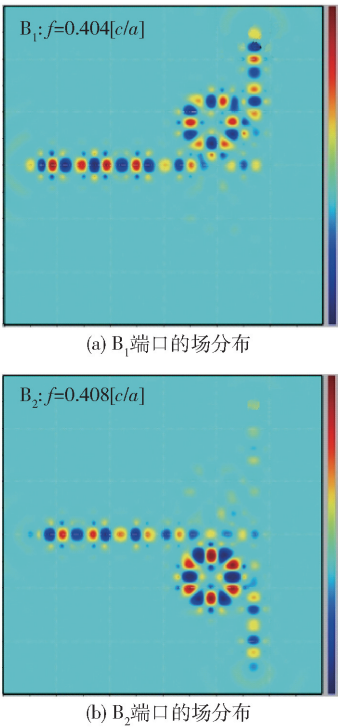


图3 WDDM-1 中 B_1 和 B_2 端口输出的场分布图

Fig.3 Field distribution of ports B_1 and B_2 in WDDM-1

2.2 WDDM-2

在中间层的 2D 结构中引入另一个四通道的 WDDM,并将其标记为 WDDM-2,结构如图 1(c) 和图 4(a) 所示。可以看出,这一器件的每个通道均与一个空气微腔相连,这些微腔被标记为 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 。在每个空气微腔的附近有两组介质柱,用 1~8 进行区分。为了进一步提升各端口选频特性,将这 8 组介质柱的介电常数设置为与其他介质柱的不同,为 9.0(SiO_2)。

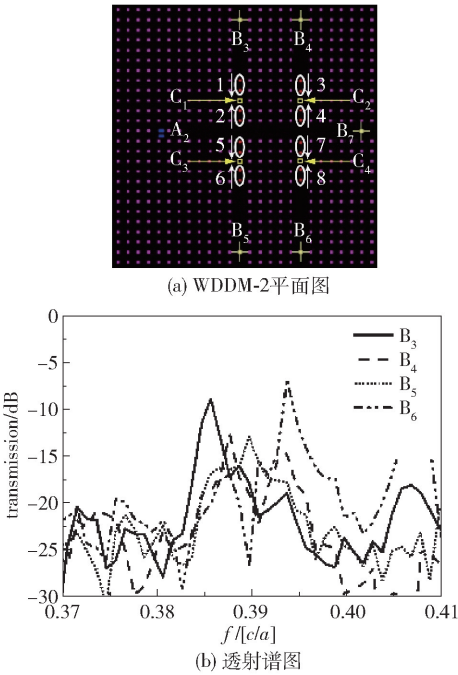


图4 WDDM-2 的示意图及 B_3 、 B_4 、 B_5 和 B_6 端口的透射谱

Fig.4 Schematic diagram of WDDM-2 and transmission spectra for ports B_3 , B_4 , B_5 and B_6

Chutinan 等^[10] 的报道指出,通过垂直耦合波导,可以实现位于不同堆叠层的两个器件之间的连接。本课题组前期也详细研究过垂直耦合波导的传输特性^[12],即当垂直耦合波导位于某一特定位置时具有良好的导带范围($0.382[c/a] \sim 0.418[c/a]$)和透过率(-5 dB)。在 WDDM-2 的结构中,引入了同样的垂直耦合波导,通过垂直耦合波导连接可以实现不同堆叠层器件之间光信号的传输。如图 1(b) 中 10 个蓝色介质柱所示,其参数为 $0.5a \times 0.25a \times 0.3a$,介电常数为 1.0。从图 1、图 2(a) 和图 4(a) 可以发现,两个 WDDM 之间的连接是通过垂直耦合波导从 A_1 位置连接到 A_2 位置实现的。为了确保每个器件都具有较宽的导

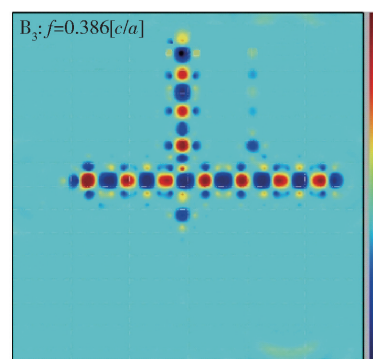
带范围,波导设置于环形谐振腔的左侧,如图2(a)所示。

为了调节每个端口的输出频率,沿图4(a)中竖直箭头的方向分别移动8组介质柱,移动的数值可以从0连续变化到 $1.0a$ 。通过FDTD方法,详细模拟了 B_3 、 B_4 、 B_5 和 B_6 的传输特性。分别给出了移动距离为 $0.05a$ (介质柱1和2)、 $0.10a$ (介质柱3和4)、 $0.15a$ (介质柱5和6)和 $0.20a$ (介质柱7和8)的透射谱,结果如图4(b)所示。通过比较可以发现, B_3 端口的输出信号为 $0.386[c/a]$, B_4 端口为 $0.388[c/a]$, B_5 端口为 $0.390[c/a]$, B_6 端口为 $0.394[c/a]$ 。为了验证理论模拟结果的可靠性,同时模拟了4个端口各自的场分布,如图5所示,显然,它们与透射谱的结果完全一致。这些模拟结果充分证明,不仅可以通过参数调节实现输出端频率选择特性,同时还可实现沿堆叠方向两个器件的集成。

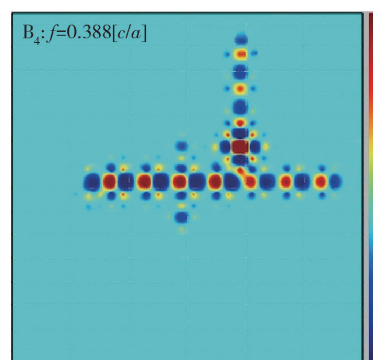
2.3 WDDM-3

沿堆叠方向在最上层的2D结构中引入另一个器件,器件结构如图1(d)和图6(a)所示,标记为WDDM-3。从图6(a)可观察到,该器件包括两个输出通道 B_8 和 B_9 。在此设计中, B_8 和 B_9 端口的波长选择可以通过调节耦合长度 L_1 和 L_2 来获得,设计的耦合长度分别为 $5a$ 和 $3a$ 。该器件也没有引入光源,信号同样通过垂直耦合波导由 A_2 传输到 A_3 ,如图2(a)、图4(a)和图6(a)所示。通过FDTD方法模拟计算了 B_8 和 B_9 端口的透射谱,结果如图6(b)所示。可以发现从 B_8 端口输出的信号为 $0.392[c/a]$ 、 $0.412[c/a]$ 和 $0.415[c/a]$,而频率为 $0.409[c/a]$ 的信号将沿 B_9 端口传播。为了进一步验证透射谱的准确性,计算了频率为 $0.392[c/a]$ 和 $0.409[c/a]$ 的信号在场分布,结果如图7(a)和(b)所示,可以发现,场分布与透射谱的结果一致。

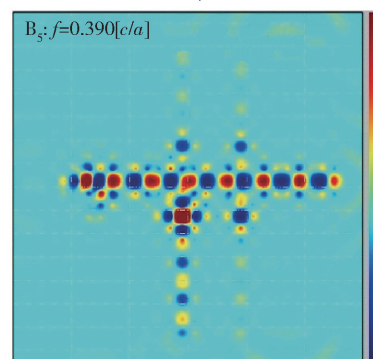
根据以上模拟结果,可发现每个端口都实现了波长选择,且沿堆叠方向的密度集成也同时得到了证明,如 B_1 端口的输出频率为 $0.404[c/a]$, B_2 端口为 $0.408[c/a]$, B_3 端口为 $0.386[c/a]$, B_4 端口为 $0.388[c/a]$, B_5 端口为 $0.390[c/a]$, B_6 端口为 $0.394[c/a]$, B_8 端口为 $0.392[c/a]$, B_9 端口为 $0.409[c/a]$ 。这充分证明,密度集成光路可以沿堆叠方向在 $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.14\text{ mm}$ 大小的样品中实现。



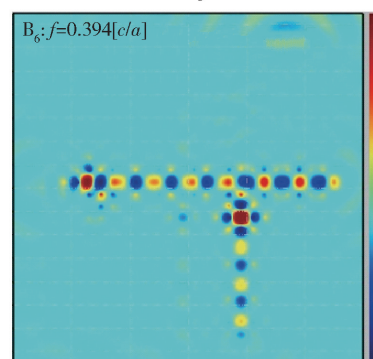
(a) B_3 端口



(b) B_4 端口



(c) B_5 端口



(d) B_6 端口

图5 WDDM-2中 B_3 、 B_4 、 B_5 和 B_6 端口输出的场分布图

Fig.5 Field distribution of ports B_3 , B_4 , B_5 and B_6 in WDDM-2

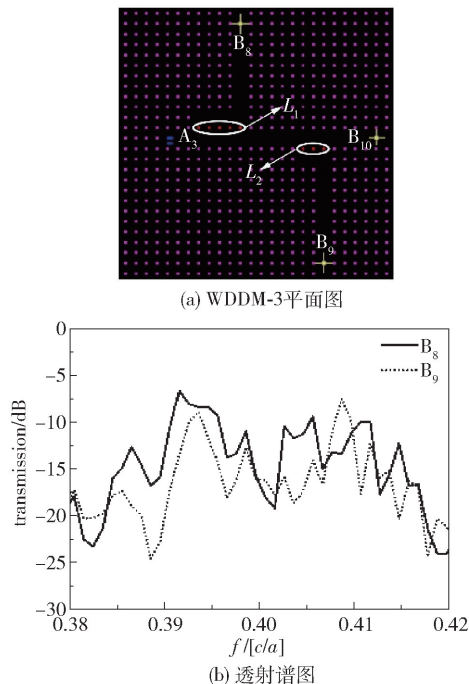


图6 WDDM-3 示意图以及 B_8 和 B_9 端口的透射谱图

Fig. 6 Schematic diagram of WDDM-3 and transmission spectra for ports B_8 and B_9

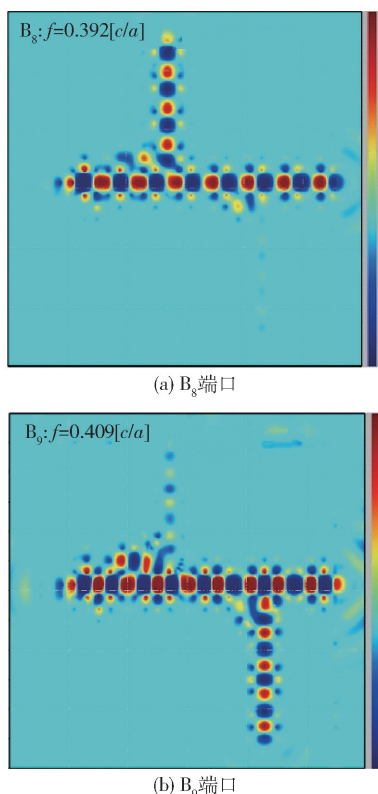


图7 WDDM-3 中 B_8 和 B_9 端口输出的场分布图

Fig. 7 Field distributions of ports B_8 and B_9 in WDDM-3

3 结论

本文通过 FDTD 方法对 2D-3D 异质结结构中沿堆叠方向密度集成器件的传输特性进行了详细的分析。在三层 2D 结构中分别设置了不同功能的 WDDM, 此设计不仅实现了所有输出端口的频率选择特性, 还实现了沿堆叠方向多个光学器件在 $0.3 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm} \times 0.14 \text{ mm}$ 大小样品中的密度集成。此结果可以为全光集成电路研究提供一定的理论指导。

参考文献:

- [1] ÖZBAY E, ABEYTA A, TUTTLE G, et al. Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods [J]. Physical Review B, 1994, 50(3): 1945-1948.
- [2] HO K M, CHAN C T, SOUKOULIS C M, et al. Photonic band gaps in three dimensions: new layer-by-layer periodic structures [J]. Solid State Communications, 1994, 89(5): 413-416.
- [3] CHANG M L, XIAO M, CHEN W J, et al. Multi Weyl points and the sign change of their topological charges in woodpile photonic crystals [J]. Physical Review B, 2017, 95(12): 125136.
- [4] LIU R J, LI Z Y, ZHOU F, et al. Waveguide coupler in three-dimensional photonic crystal [J]. Optics Express, 2008, 16(8): 5681-5688.
- [5] ZHANG D D, FENG Z F, RAJA M Y A. A channel drop filter in hetero-woodpile-structure [J]. Optik, 2014, 125(10): 2422-2425.
- [6] FENG Z F, ZHANG D D, RAJA M Y A. Channel drop filters in woodpile-heterostructures [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(8): 083102.
- [7] FENG Z F, SHAO C P, ZHANG D D. Off-plane directional coupler in woodpile structure [J]. Optik, 2015, 126(24): 5213-5217.
- [8] 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.
- [9] CHUTINAN A, JOHN S. Light localization for broadband integrated optics in three dimensions [J]. Physical Review B, 2005, 72(16): 161316.
- [10] 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.

- [11] KAWASHIMA S, ISHIZAKI K, NODA S. Light propagation in three-dimensional photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2010, 18(1): 386–392.
- [12] LIN J, FENG Z F. Investigation for connecting waveguide in off-planar integrated circuits [J]. *Applied Optics*, 2017, 52(25): 7041–7045.
- [13] 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.
- [14] AHI K. Mathematical modeling of THz point spread function and simulation of THz imaging systems [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, 7(6): 747–754.
- [15] ZHANG H, SFARRA S, SALUJA K, et al. Non-destructive investigation of paintings on canvas by continuous wave terahertz imaging and flash thermography [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36(2): 34.
- [16] AHI K, SHAHBAZMOHAMADI S, ASADIZANJANI N. Quality control and authentication of packaged integrated circuits using enhanced-spatial-resolution terahertz time-domain spectroscopy and imaging [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 104: 274–284.
- [17] AHI K. Review of GaN-based devices for terahertz operation [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(9): 090901.
- [18] LI J S, LIU H, ZHANG L. Compact four-channel terahertz demultiplexer based on directional coupling photonic crystal [J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 248–251.
- [19] TAVOUSHI A, MANSOURI-BIRJANDI M A. Study on the similarity of photonic crystal ring resonator cavity modes and whispering-gallery-like modes in order to design more efficient optical power dividers [J]. *Photonic Network Communication*, 2016, 32(1): 160–170.
- [20] GHAFARI A, MONIFI F, DJAVID M, et al. Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators [J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 5929–5934.
- [21] LIAO Q H, FAN H M, CHEN S W, et al. The design of large separating angle ultracompact wavelength division demultiplexer based on photonic crystal ring resonators [J]. *Optics Communications*, 2014, 331: 160–164.
- [22] RAKHSHANI M R, MANSOURI-BIRJANDI M A. Design and simulation of wavelength demultiplexer based on heterostructure photonic crystals ring resonators [J]. *Physica E*, 2013, 50: 97–101.
- [23] ROBINSON S, NAKKEERAN R. Investigation on two dimensional photonic crystal resonant cavity based bandpass filter [J]. *Optik*, 2012, 123(5): 451–457.
- [24] JIN C J, HAN S Z, MENG X D, et al. Demultiplexer using directly resonant tunneling between point defects and waveguides in a photonic crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(7): 4771–4773.

A compact integrated circuit in a 2D – 3D hetero-structure

ZHANG JingJing LIN Jie FENG ZhiFang*

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

Abstract: By using the finite-difference time-domain method, a compact integrated circuit including three optical devices in a 2D – 3D hetero-structure has been designed, simulated, and analyzed in detail. The results show that the wavelength selection for each port can be realized by adjusting the parameters. An especially surprising result is that compact integration along the stacking direction is also observed. The device is very compact with size of only 0.3 mm × 0.3 mm × 0.14 mm.

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