异质结构光子晶体微腔实现多通道可调谐滤波

陈 颖[1,2],王文跃[1],范卉青[1],卢 波[1]

(1. 燕山大学 电气工程学院 自动化仪表系,河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 测试计量技术及仪器河北省重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

摘 要:为解决 WDM 系统中多信道同时滤波问题,设计并研究了缺陷对一种异质结构光子晶体多通道滤波器的调制机制,结果表明:在光子晶体环形滤波通道中引入点缺陷形成复合缺陷,可克服光子晶体环形腔结构的多模特性,实现单通道内的单纵模滤波;对于各个通道,复合缺陷中点缺陷的折射率对输出端透射谐振波长具有调谐作用,且对各通道的可调谐滤波作用彼此独立,随着点缺陷折射率的增大,输出的谐振波长出现红移现象。所设计的异质结构结构光子晶体对 WDM 系统实现多信道滤波功能提供理论和设计参考。

关键词:可调谐滤波; 光子晶体; 复合缺陷; 多通道

中图分类号:TN248.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)10-3399-05

Achievement of multi-channel simultaneous adjustable filtering using hetero-structure photonic crystal cavities

Chen Ying[1,2], Wang Wenyue[1], Fan Huiqing[1], Lu Bo[1]

(1. Department of Automation Equipment, Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. Key Laboratory of Test/Measurment Technology and Instrument of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the problem of simultaneous filtering in the multi-channels of wavelength division multiplexing(WDM) system, the design and research of modulation scheme caused by the defects of a hetero-structure photonic crystal multi-channel filter were proposed. From the numerical simulation results, it was shown that the multi-mode filtering property of ring cavity could be overcome and the single wavelength selection and filtering for one channel could be obtained by introducing the point defect in the photonic crystal ring cavity filtering channel. The output resonant wavelength of this filter could be adjusted by changing the refractive index of the point defect of each channel, and the tunable filtering function of each channel was independent. The output resonant wavelength would shift towards the longer wavelength direction when the refractive index of point defect increased. The hetero-structure photonic crystal designing method could provide some theoretical references to realize filtering function for the multi-channel filtering in WDM system.

Key words: adjustable filtering; photonic crystal; compound defect; multi-channel

收稿日期:2014-02-06; **修订日期**:2014-03-10

基金项目:国家自然科学基金(61201112,61172044);中国博士后基金(2012M510765);
河北省自然科学基金(F2012203169,F2013203250)

作者简介:陈颖(1980-),女,副教授,博士,主要从事光子晶体及其应用技术方面的研究。Email:chenying@ysu.edu.cn

0 引 言

随着光通信及光传感网络技术的不断发展,光滤波器已经成为体现网络功能性和灵活性的关键器件之一。随着波分复用技术的应用,实现多通道滤波已经成为实现波分复用的关键问题[1-3]。对于光滤波器的设计已有不少研究报道, 例如基于多层介质薄膜、基于光纤 Bragg 光栅、基于阵列波导光栅或基于相位调制原理的干涉仪结构等设计方法, 都可实现对特定波长的选频和滤波[4]。

近年来,已有研究学者提出利用光子晶体来实现滤波器的设计。由于光子晶体可以在很小尺寸的空间中控制光的传播,结构紧凑性好,其光子禁带特性和光子局域特性使光子晶体可以在特定位置及方向对特定波长实现滤波[5]。在光子晶体结构中引入缺陷,可以在光子晶体的完全禁带中打开允带[6]。其中,引入点缺陷可使光子晶体禁带中的某个特定频率的光信号实现光子局域[7],而线缺陷可以形成光波导进行光传输,其能带范围内的光波均可较好地传输且可以做到能量损耗很少, 而引入环形腔可形成多个窄带分布,与之相对应的波长可以实现滤波[8],然而环形腔滤波存在明显的多模特性,无法实现对单一波长的滤波。

基于以上分析,在环形腔的负载通道中引入点缺陷,构成复合缺陷光子晶体滤波结构,可以克服环形腔的多模特性,实现对单纵模滤波,并在此基础上提出了多通道异质结构光子晶体滤波器,通过参数的设置和调整,实现了多通道滤波的独立性和可调谐性。

1 滤波器结构设计

1.1 单通道滤波器结构设计

在完整光子晶体的周期性结构中引入点缺陷,构成缺陷腔,则处于缺陷中的光子,其频率位于完整光子晶体的禁带中,且满足谐振腔边界条件,就会被周围的晶体反射,局限在缺陷腔内来回振荡。因此,这个缺陷腔就成为一个局域光的微腔,即光子晶体微腔,该特性即为缺陷态光子晶体的局域特性。环形腔即为多个点缺陷构成的光子晶体微腔结构, 将在禁带中打开多个频率极窄的缺陷能带,也就是说,光子晶体环形腔具有多模滤波特性,可以提供多个窄带频率输出。

基于光子晶体环形腔滤波器结构如图 1 所示。该 21×21 光子晶体结构以空气为背景,折射率为 1,介质柱折射率 n=3.50,介质柱半径 r=0.185a,其中晶格常数 a=0.55 μm。为了减少光散射损耗提高光的传输效率,设置环形腔缺陷处的散射柱半径为 1.05r。光信号由 A 端口输入, 滤波信号由 B 端口输出,AM 构成滤波器结构的主波导,M 为主波导输出端。以高斯连续波为入射光信号,由 A 端口进入主波导,由于环形腔的耦合作用,选择特定频带的光信号而由 B 端口输出实现滤波,其余光信号由 M 端口输出。

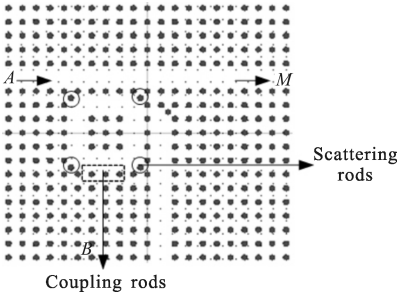

图 1 改进前的环形腔滤波器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of ring cavity filter before improved

应用平面波展开法和FDTD 法, 得出光子晶体环形腔的禁带特性和输出光谱特性,如图 2 和图 3

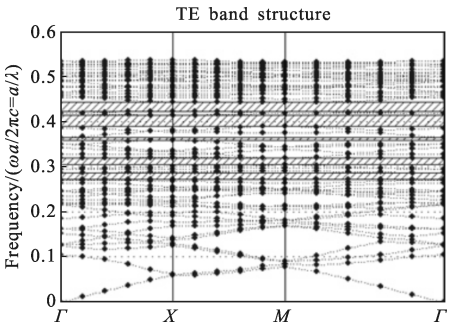

图 2 光子晶体环形腔 TE 模式的能带结构

Fig.2 Band structure of photonic crystal ring cavity of TE mode

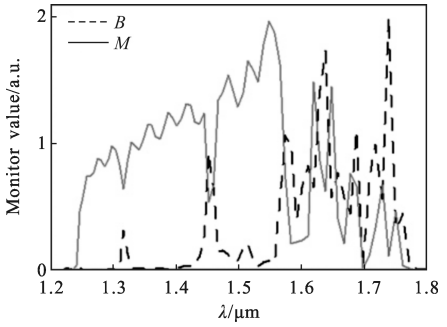

图 3 改进前滤波器的输出光谱

Fig.3 Output spectrum of filter before improved

所示。可以发现,单纯的环形腔结构提供了多个窄带频率的输出,但无法实现单纵模滤波。

基于此,对原环形腔结构进行改进,如图 4 所示,在负载通道中引入点缺陷形成微腔,进入环形腔的光波与点缺陷微腔将发生耦合作用,环形腔与点缺陷微腔产生共振,相应的谐振波长被选频输出,从而克服了原环形腔的多模特性,实现了单纵模滤波。改进后的滤波器输出光谱如图 5 所示,其中虚线即为 B 通道输出波形。

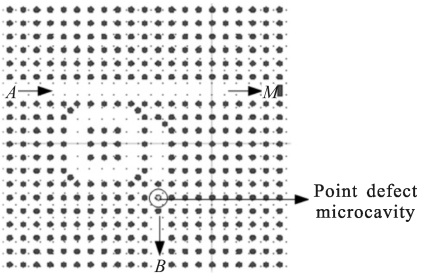

图 4 结合点缺陷和环形腔的光子晶体滤波器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of photonic crystal filter combined point defect and ring cavity

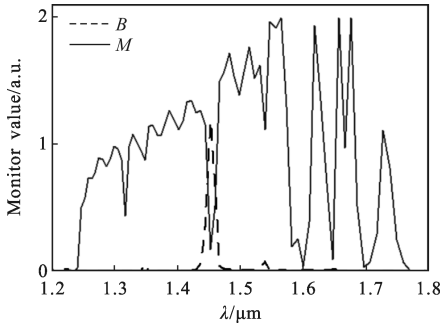

图 5 改进后滤波器的输出光谱

Fig.5 Output spectrum of photonic crystal filter after improved

1.2 多通道滤波器结构设计

在单通道滤波器的基础上,为了实现 WDM 系统中各通道滤波的独立性和可调谐性,结合环形腔的多模特性和点缺陷的单纵模滤波特性,利用多个改进后的环形腔构成集成光子晶体多通道滤波器,其结构如图 6 所示。通过调整参数设置,每个环形腔可实现对原环形腔中不同窄带特征波长的滤波。A 作为高斯脉冲光的输入端,B、C 和 D 分别作为三个负载波导的输出端。为了提高该滤波器的耦合效率,分别设置三个通道中的耦合介质柱折射率为 n_1=3.50,n_2=3.30,n_3=3.10,而三个负载通道中的点缺陷折射率分别用 n_{defect1},n_{defect2} 和 n_{defect3} 来表示。

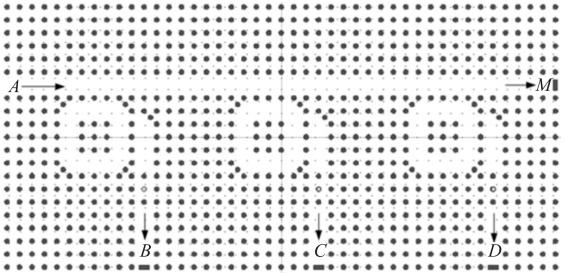

图 6 三通道滤波器结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of 3-channel filter structure

2 滤波特性分析

2.1 单通道可调谐滤波特性分析

时域有限差分(FDTD)法是常用的求解电磁波在介质中传播的数值计算方法,文中将用其分析光经过缺陷态光子晶体环形腔滤波器结构的传输特性。其中用完全匹配边界层作为吸收边界条件。在 x 和 y 轴上的空间步长分别为 Δx 和 Δy,时间步长为 Δt。为了使离散后的差分方程组的解收敛和稳定,时间步长 Δt 需满足 Courant 稳定性条件 $\Delta t \leqslant 1/c\sqrt{1/(\Delta x)^2+1/(\Delta y)^2}$,其中 c 为真空中的光速,计算时取单个原胞,进行 16×16 个分割离散。以高斯连续波作为输入光信号,在 B、C 和 D 三个输出端口分别探测其输出光谱特性。在稳态光输入情况下,在光子晶体多通道滤波结构中的能量场分布输出如图 7 所示。

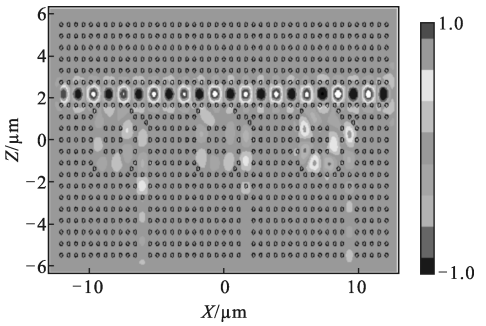

图 7 光子晶体多通道滤波结构稳态能量场输出分布

Fig.7 Stable electric power distribution of multi-channel filter based on hetero-structure photonic crystal

可以看出,光在光子晶体光波导中传播时会被耦合进环形腔,进而与不同折射率值的点缺陷发生共振作用,并分别从 B、C 和 D 端口输出特定的谐振波长,说明该结构可以实现多通道滤波作用。

当 n_{defect2}=2.05,n_{defect3}=1.70 保持不变,只改变 n_{defect1} 值时,观察探测器输出光谱特性的变化。当 n_{defect1}=

1.65 和 $n_{defect1}$=1.75 时光子晶体环形腔滤波器 *B* 端口的传输透射谱如图 8 和图 9 所示。由于 *B*、*C* 和 *D* 通道内耦合介质柱和点缺陷的折射率不同，发生共振的强度不同，因此在三个通道对其滤波波长的耦合效率也不同，因此在输出光谱中，三个通道的滤波波长的透射率存在一定的差异。对比图 8 和图 9，可以发现，当 $n_{defect1}$=1.65 时，*B* 端口输出的谐振波长为 1.521 7 μm，当 $n_{defect1}$=1.75 时，*B* 端口输出的谐振波长为 1.574 2 μm。并且当 $n_{defect1}$ 值在 1.65~2.05 增大时，*B* 端口的输出谐振波长将向长波长方向移动，而 *C* 和 *D* 端口输出的谐振波长将保持不变，分别为 1.563 1 μm 和 1.626 6 μm。

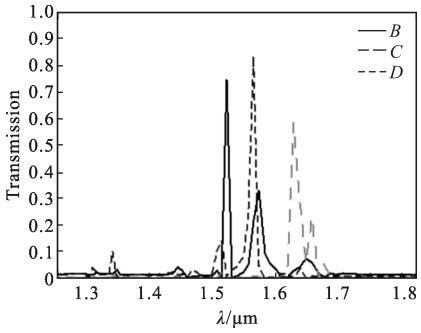

图 8 当 $n_{defect1}$=1.65 时，三通道光子晶体滤波器 *B* 端口随点缺陷折射率变化的输出谱

Fig.8 Output spectrum of port *B* of the 3-channel photonic crystal filter with different point defect index when $n_{defect1}$=1.65

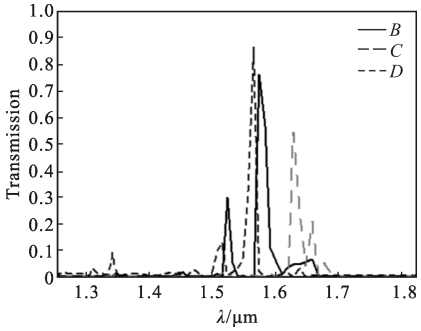

图 9 当 $n_{defect1}$=1.75 时，三通道光子晶体滤波器 *B* 端口随点缺陷折射率变化的输出谱

Fig.9 Output spectrum of port *B* of the 3-channel photonic crystal filter with different point defect index when $n_{defect1}$=1.75

同理，当单独改变 $n_{defect2}$ 或 $n_{defect3}$ 而保持其余两个通道结构参数不变时，也会得出同样的输出光谱特性。由此可以发现，在多通道滤波器结构中，其单通道的滤波特性是可调谐的，且特征谐振波长将随着点缺陷折射率的增大向长波长方向移动。

2.2 多通道可调谐滤波的同时实现

要实现多通道滤波器中各通道的同时滤波，必须保证各通道之间可调谐滤波的独立性。为了验证上述多通道滤波器结构的有效性，分析当 $n_{defect3}$ 不变而 $n_{defect1}$ 和 $n_{defect2}$ 同时变化时的探测器输出光谱特性，如图 10 和图 11 所示。当 $n_{defect3}$ 保持 1.7 不变，$n_{defect1}$ 和 $n_{defect2}$ 变化时，*D* 端口输出的谐振波长为 1.565 8 μm，不发生移动。特别地，当 $n_{defect1}$=1.3，$n_{defect1}$=1.9 时，*B* 和 *C* 端口输出的谐振波长分别为 1.451 3 μm 和 1.628 5 μm。

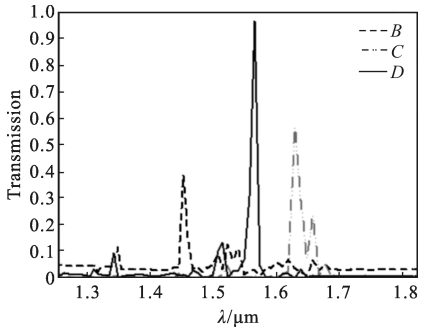

图 10 当 $n_{defect1}$=1.3，$n_{defect2}$=1.9，$n_{defect3}$=1.7 时，三通道光子晶体滤波器的输出光谱

Fig.10 Output spectrum of port *B*, *C* and *D* of the 3-channel photonic crystal filter with different point defect index when $n_{defect1}$=1.3, $n_{defect2}$=1.9, $n_{defect3}$=1.7

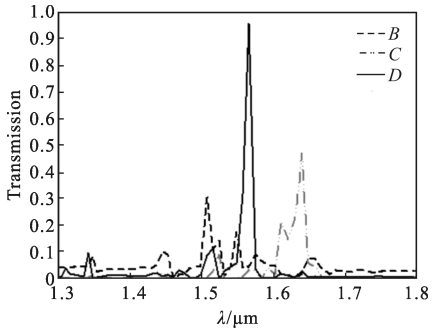

图 11 当 $n_{defect1}$=1.5，$n_{defect2}$=2.05，$n_{defect3}$=1.7 时，三通道光子晶体滤波器的输出光谱

Fig.11 Output spectrum of port *B*, *C* and *D* of the 3-channel photonic crystal filter with different point defect index when $n_{defect1}$=1.5, $n_{defect2}$=2.05, $n_{defect3}$=1.7

而当 $n_{defect1}$=1.5，$n_{defect1}$=2.05 时，B 和 C 端口输出的谐振波长分别为 1.505 8 μm 和 1.637 8 μm。可以发现，*B* 和 *C* 端口的输出特征谐振波长随 $n_{defect1}$ 和 $n_{defect2}$ 的增大向长波长方向移动，*B* 端口和 *C* 端口的波长漂移量是不同的，且输出光谱变化情况与图 7

中的单通道单独变化时其输出光谱的变化情况是一致的。以上分析可以说明,该多通道可调谐滤波器结构是可行的,各通道之间的滤波作用是互不影响的,可调谐滤波功能是彼此独立的。

3 结　论

基于光子晶体环形腔的多模特性和点缺陷的单纵模滤波特性，在环形腔中引入点缺陷形成复合缺陷,并制成集成光子晶体波导结构,实现了多通道光子晶体可调谐滤波器的设计，并对其滤波特性进行了分析。引入点缺陷后,在单通道中克服了原环形腔的多模特性,可以输出窄带频率,实现单纵模滤波。而在多通道滤波器结构中，原环形腔的不同窄带频率由不同的通道选频输出。通过分析单个通道点缺陷折射率变化以及多个通道的点缺陷折射率同时变化时的输出光谱特性,可以发现,不同的点缺陷折射率对应着不同的输出谐振波长,随着折射率增大,输出谐振波长将出现红移，且各通道的波长漂移特性具有独立性。该滤波器结构设计体现了集成光学器件紧凑型好的特点，其设计方法将对 WDM 系统中多信道同时滤波的实现有一定的应用价值。

参考文献:

[1] Rostami A, Nazari F, Bahrami A, et al. A novel proposal for DWDM demultiplexer design sing modified-T photonic crystal structure[J]. ***PNFA***, 2010, 8(1): 14-22.

[2] Yun M J, Wan Y, Liang J. Multi-channel biosensor based on photonic crystal waveguide and microcavities [J]. ***Optik***, 2012, 123(21): 1920-1922.

[3] Su An. Transmission spectrum of one-dimensional photonic crystal for realizing high-performance optical transmission function [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(6): 1101-1105. (in Chinese)
苏安. 实现高效光传输功能的一维光子晶体透射谱[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1101-1105.

[4] Su An. Photonic crystal quantum well with function of multi-channel photonic filtering and amplifying [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(3): 727-732. (in Chinese)
苏安. 实现多通道光滤波与放大功能的光子晶体量子阱[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 727-732.

[5] Pan Wei, Yu Hejun, Zhang Xiaoguang, et al. Numerical simulation and analysis of a high -Q two-dimensional photonic crystal L3 cavity [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2012, 61(3): 034209. (in Chinese)
潘伟, 余和军, 张晓光, 等. 高 Q 值二维光子晶体缺三腔的数值模拟与分析[J]. 物理学报, 2012, 61(3): 034209.

[6] Zhang Jianxin, Liu Lei, Chen Wei, et al. Modulating lateral modes of semiconductor laser by photonic crystal structures [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(3): 727-732. (in Chinese)
张建心, 刘磊, 陈微, 等. 光子晶体调制半导体激光器侧模[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 727-732.

[7] Wang H Z, Zhou W M, Zheng J P. A 2D rods-in-air square-lattice photonic crystal optical switch [J]. ***Optik***, 2010, 121: 1988-1993.

[8] Yang Chunyun, Xu Xuming, Ye Tao, et al. The modulation of a novel photonic crystal ring resonator filter [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2011, 60(1): 720-724. (in Chinese)