

渐变结构微谐振器光子晶体波导的优选设计

吴立恒, 王明红*

(聊城大学 物理科学与信息工程学院 山东 聊城 252059)

摘要:为获取高品质的单通带波长信道,设计了三种类型的渐变结构微谐振器光子晶体波导,用 FDTD 方法研究了这些结构的功率传输谱,并采集功率谱通带参数对比分析了其输出性能。随微谐振器中心柱半径的增大,每支波导输出端单通带传输模式表现为从短波向长波三次规律的周期性变化。波导结构选择及其参数的优化有助于输出性能的改善,在开发更多单通带波长信道上都具有潜在能力。结果表明,优化后的结构拥有高品质的单通带波长传输特性,如:规律性周期变化模式、利于信号增强设计、稳定传输性能、优良宽带适应能力。该类波导可根据所需波长灵活选择最佳类型结构设计,在密集型光通信系统,光路集成,紧凑型光传感接口等设计中具有应用价值。

关键词:光子晶体波导; 渐变结构; 时域有限差分; 微谐振器; 波谱选择; 信号增强; 周期性变化模式

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Optimum designs of micro-resonator photonic crystal waveguides with gradually varied formations

WU Li-Heng, WANG Ming-Hong*

(School of Physics Science & Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: In order to design high quality single pass-band wavelength channels, three types of micro-resonator photonic crystal waveguides with gradually varied formations are designed. Power transmission spectra of these waveguides are studied by using FDTD (Finite-Difference Time-Domain) method. The output performances of these structures are compared and analyzed by collecting the pass-bands parameters of power spectra. As the central rod radius value of the micro-resonator increases, single pass-band transmission patterns of every waveguide output show the law of three times regular periodic variations from the short wavelength to the long wavelength. Optimization of structural choices and structural parameter designs have favourable effects on the output performances, so all of these waveguides have promising potentials to develop more single pass-band wavelength channels. The results show that the optimized structures can possess high quality of single pass-band wavelength transmission characteristics, such as regular periodic variation patterns, favorable signal enhancement designs, stable transmission performances, excellent adaptability of broad bandwidth. The best type of the structural designs can be flexibly selected according to the required wavelength, and these waveguides have application values in the designs of dense optical communication system, integrated optical path, compact optical sensing interface etc.

Key words: photonic crystal waveguide, gradually varied formations, finite-difference time-domain (FDTD), micro-resonator, spectra selection, signal enhancement, periodic variation patterns

引言

光子晶体波导是极具发展潜力且非常有效的光控制传输结构,在微型功能器件设计上有着许多

的应用,如:为加大信息传输容量设计了光子晶体波导波分多路信号传输,基于麦克斯韦鱼眼透镜宽带渐变设计的波导,186 nm 的带宽覆盖整个 S 和 C 波段,及光通信 E 和 L 的部分波段,其 3 dB 带宽为

收稿日期:2022-04-21,修回日期:2022-08-31

基金项目:国家自然科学基金(11375081)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11375081)

作者简介 (Biography): 吴立恒(1980-)男,临沂平邑县人,硕士研究生,主要从事电磁场理论与技术,物理教学理论研究

E-mail: wuliheng@luc.edu.cn

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wangminghong@luc.edu.cn

Received date: 2022-04-21, **Revised date:** 2022-08-31

211 nm^[1];对光子晶体波导通道的行缺陷结构进行调整,抑制典型布拉格镜效应,增大太赫兹光子晶体波导带宽^[2];拓扑沟槽光子晶体波导比迂回类型波导耦合传输率更高^[3];基于六角格子直波导设计的生物传感结构用于 1.55~1.60 μm 波长范围内识别血液中的不同成分^[4];基于光子晶体微谐振器和波导结构设计的超快编码器集成光路^[5]等。为改善波长信号选择,目前研究焦点之一是利用荧光团增强腔自发辐射,通常把荧光载体完全置入一个光学谐振腔内部或附近用以增强荧光团自发辐射率,这是光学谐振腔 Purcell 效应对发光的一种调控,如在多孔硅光子晶体中光与物质的弱耦合双光子激发下的量子点荧光增强^[6]、等离子体激元增强荧光光谱^[7]、自组装等离子金属面 Purcell 效应增强化学发光^[8]、光子晶体局域环境中用 Purcell 效应限制纳米尺度光发射器的光谱弥散^[9]、等离子微纳米腔自发辐射增强^[10]、介电金属材料中增强自发辐射^[11]等,最受关注的增强 Purcell 效应的方法是在传播区域利用非常薄的金属膜等离子特性纳米尺度局域的倏逝波,一般来说,有两种机制控制这种现象:表面等离子体增强性吸收 SPEA (Surface Plasmon Enhanced Absorption)^[12-13]和表面等离子体耦合发射 SPCE (Surface Plasmon-Coupled Emission)^[14-15]。前者 SPEA 是通过等离子体吸收器增强荧光团固有吸收,而后者 SPCE 是指通过利用等离子体结构类谐振腔的谐振特性来改善其发射的可能性。但是,这些方法通常有两个缺点:(1)器件结构制造非常复杂;(2)为了获得最佳效果,荧光团必须置入到仅有几个纳米尺度的最佳位置以提高场发射,这样的空间范围可能与目标生物分子大小不适合,目标分子可能会暴露在表面上。弱耦合下光学谐振腔 Purcell 效应对其器件的工作性能可进行调控,密集波长分割多路设计上克服了以上缺点,在其工作波段上光学处理器可满足更高 CPU 速度的需求,一方面在于存在可利用的充足的高品质波长信道;另一方面在于光学处理器光缓存,存储瞬时光信号和微调 CPU 时间,光子晶体波导的慢光特性为芯片光信号处理提供了有效的信号缓存保证^[16-17]。本文优化设计了三种渐变结构微谐振器光子晶体波导,改变结构设计增强谐振腔定向辐射,可用于提高所需波长信号传输强度、抑制干扰信号的传输。

1 渐变结构微谐振器光子晶体波导设计

本文在正方格介质圆柱 $31a \times 35a$ 光子晶体

中,通过改变微谐振器与波导的耦合结构,设计了图 1 所示三种类型渐变结构波导 (No. 1-No. 3),其渐变结构包括:微谐振器渐变结构、输入波导宽度渐变结构、输入波导和输出波导宽度渐变结构三种情况。其结构的晶格常数为 $a=520$ nm,全体柱相对介电常数都为 12,为便于问题分析各部分柱半径在结构图中已标注 r_1 r_2 r_3 ,除去微谐振器区域内 5×5 的介质柱外,其余柱半径都为 $r_1 = 0.2a$ 。在图下方标注了波导各部分的名称:a 为输入端口,b 为输入波导宽度渐变区域,c 为微腔,d 为微型谐振器,e 为输出波导宽度渐变区域,f 为输出端口。其中图 1 (No. 1) 为谐振器两侧不带有波导渐变耦合增宽区域的波导,图 1 (No. 2) 为谐振器一侧带有一个波导宽度渐变区域的耦合增宽波导,图 1 (No. 3) 谐振器两侧各自带有一个波导宽度渐变区域的耦合增宽波导。微谐振器位于图中圆角方框标注的 5×5 区域,内部红棕色的全体介质柱半径为 r_2 ,介质柱微腔于中心白色方框标注位置,其内黑色介质柱半径为 r_3 。在输入端口处和输出端口处分别设置了 TM 波波导源和接收器,并在结构周围设置了吸收边界完全匹配层^[18],将传入的电磁波吸收掉。每个正方形原胞分成 40×40 等分,在数值计算满足 Courant 稳定性条件^[19]情况下,用 FDTD 法^[20]研究了波导结构 1182~1733 nm 波长段 TM 波功率传输谱。

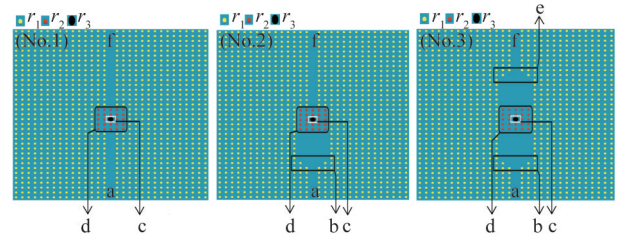


图 1 三种渐变结构微谐振器光子晶体波导

注:a 输入端口,b 输入波导宽度渐变区域,c 微腔,d 微谐振器,e 输出波导宽度渐变区域,f 输出端口

Fig. 1 Three types of micro-resonator photonic crystal waveguides with gradually varied formations

Note: a. input port, b. gradually varied width region of input waveguide, c. micro-cavity, d. micro-resonator, e. gradually varied width region of output waveguide, f. output port

2 渐变结构微谐振器光子晶体波导输出波谱设计

为改善波导输出信道信号品质,获取更多可用波长提高信息传输容量,从波长利用的角度说,密

集型光通信系统是密集波长分割多路设计组建通信网络的产物。文中通过参数 r_2 , r_3 以及其过渡区参数的变化,分析了波导对应结构设计下输出性能的变化,比较了结构设计带来的影响,文中对一般,及特殊情况表现的规律性变化作出了定量和定性描述。在三种大小尺寸相同的结构中,波导源信号输入位置和信号接收位置都不变,由优化结构设计改变谐振腔的定向辐射性能,对输出端处波长信号产生调控。波长信号的品质取决于波导信道的传输特性,解决这一问题关键在于设计高品质的波导耦合输出结构,其指标包括工作带宽范围、信号传输强度等。为便于观察分析其输出特性,并在各自波导结构的功率传输谱上附有结构设计扫描参数 $r_{(1-3)}$ 具体数值大小和对应输出通带参量,包括:波导信道输出的峰波长 λ ,通带带宽 $\Delta\lambda$,输出峰波长信号较源输入信号传输强度衰减分贝 G_{dB} 。文中的通带带宽 $\Delta\lambda$ 为单通带峰信号功率强度一半处的通带带宽,即半高宽,对应数坐标中的带宽即单通带峰信号强度衰减至-3 dB处的通带带宽。由不同波导设计选择的扫描结构参数较多且个数不同,为宜于问题更好的分析避免混乱,波导各自结构输出端的透射谱图,对同一扫描结构参数用带有颜色的线条和对应的结构参数标记。

2.1 参数 $r_3 = 0$ 时微谐振器光子晶体波导输出特性

图1所示三种渐变结构光子晶体波导中若 $r_1=r_2=0$, $2a=104.0\text{ nm}$ 、 $r_3=0$ 时,这些渐变结构光子晶体波导的微谐振器从介质柱腔微谐振器变为空气腔微谐振器。

2.1.1 耦合结构改变对微谐振器光子晶体波导性能的影响

图2给出了空气腔微谐振器设计的三种波导结构功率传输谱。图2中右侧标注了谐振器全体红棕色圆柱半径 r_2 大小和对应输出通带参量 λ 、 $\Delta\lambda$ 、 G_{dB} 。为便于更清晰地分析各结构设计的输出变化特点,当扫描结构参数完全同时,不同波导结构透射谱图可放在一起对比,利于具体地对比分析各结构设计输出变化,图2功率传输谱给出的蓝、绿、红三种颜色的传输特性曲线,分别依次代表图1中No. 1-No. 3三个波导结构工作时对应的信道功率传输谱,图中标注的信道通带峰波长依次为1 379.5 nm、1 380.7 nm、1 381.5 nm,各波长处对应信号较源输入信号的强度衰减分贝依次为-1.819 dB、-0.701 dB、-0.005 dB,对应的带宽

依次为3.7 nm、6.0 nm、12.0 nm,表明同一空气腔微谐振器结构设计的三种不同耦合结构波导,由空气微谐振腔耦合结构的不同,使得微腔Purcell效应产生对结构工作性能的调控,表现为该类结构随耦合区域增大输出信道峰波长向长波移动,且峰波长信号强度衰减分贝变小,通带带宽增大,并保持其单通带波长传输模式特性。由图2右侧提供的参数 λ 、 $\Delta\lambda$ 、 G_{dB} 和品质因子公式 $Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ 得,结构(No. 1-No. 3)单峰的品质因子依次为372.8、230.1、115.1,结构(No. 1-No. 3)优化通带峰波长信号强度衰减分贝降低,对应的透射谱单峰的品质因子也降低。波导传输谱表明,结构优化后透射谱峰信号具有更小的损耗,而透射谱单峰-3 dB带宽增大且对应的通带峰波长移动甚小,计算得透射谱单峰的品质因数降低,说明结构优化后透射谱单峰并不具有高品质因子。

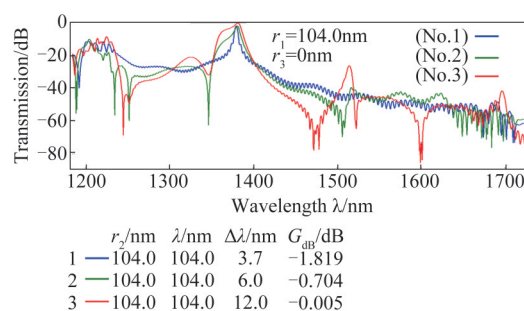


图2 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1-No. 3)

Fig. 2 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguides with gradually varied formations

2.1.2 参数 r_2 调节对空气腔微谐振器光子晶体波导输出性能的影响

渐变结构光子晶体波导中当 $r_1=0$, $2a$,仅调节红棕色介质柱半径 r_2 。当不同波导设计选择的扫描结构参数较多且个数不同时,一方面分开结构独立做图对照,更宜于区分各自结构的透射谱,可避免局部不同分析上带来的混乱;另一方面避免了结构不同所带来的作图混乱,这样可便于分析各结构参数设计对各结构的输出造成的影响。图3给出了结构No. 1中 $r_2=0.16a$, $0.17a$, $0.18a$, $0.19a$, $0.20a$ 时,波导端口f的功率传输谱,并用不同颜色的线条区分 r_2 变化后各自对应的功率传输谱,如 $r_2=0.16a=83.2\text{ nm}$ 时,由功率传输谱的蓝色的线条可知,此时结构No. 1输出端口信道出现了两个波长通带。图4和

图5同上分别给出谐振器柱半 r_2 取值不同时,波导结构No. 2和结构No. 3的端口f处各自的输出功率谱。表明:当 $r_2=83.2$ nm时,由结构No. 2和结构No. 3各自的输出端口处功率传输谱蓝色的曲线得,结构No. 1输出1707.1 nm峰波长通带被抑制掉,保证了设计结构单通带波长输出模式;在图右侧给出波导结构谐振器柱半 r_2 和对应输出通带参量 λ 、 $\Delta\lambda$ 、 G_{dB} 表明:若在适宜的范围调节 r_2 或选择适宜的耦合结构设计,使得结构输出的通带波长信号强度、通带带宽等输出参量得到调控,能满足单通带波长模式,且随谐振器介质柱 r_2 半径增大三种结构的通带峰波长都向长波方向移动。

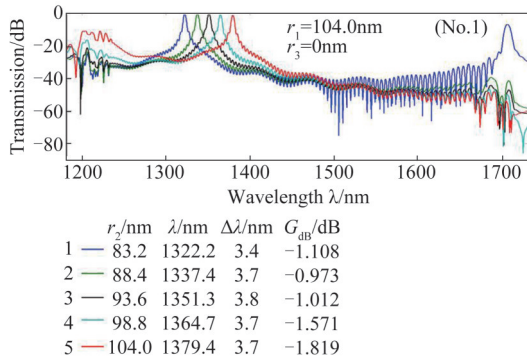


图3 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1)
Fig. 3 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

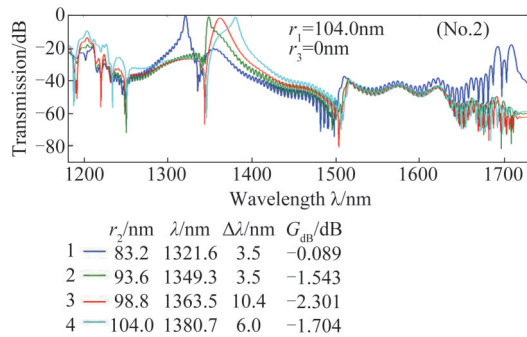


图4 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 2)
Fig. 4 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

为便于对比耦合结构设计不同对其信道通带同一波长信号的影响,在尺寸相同的三种波导结构中输入端口信号源的位置、宽度、输出状态不变,输出端口接收器位置和宽度不变,由波导源定向发射信号强度和传输信号覆盖范围不变,同一谐振器由结构(No. 1-No. 3)耦合区域设计提高谐振腔的定向辐射使能量集中沿波导输出端口传输,表现为同一

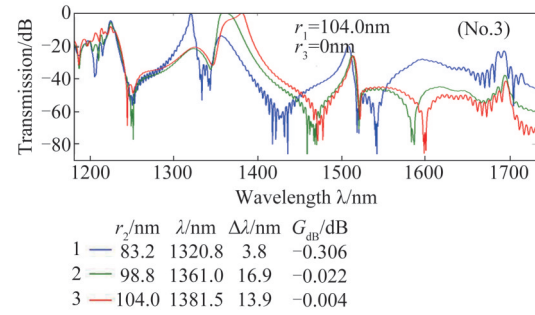


图5 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 3)
Fig. 5 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

波长信号的增强。由波导源定向发射信号功率强度不变,设其基准信号发射强度为 G_0 ,接收器收到信号强度为 G ,输出端信号强度衰减分贝为:

$$G_{dB} = 10 \lg \frac{G}{G_0} \quad (1)$$

由耦合结构设计的不同,腔 Purcell 效应调控波导信道的传输,对信道通带波长信号增强或产生抑制,使其输出端接收到峰信号强度不同,设图1所示三种结构输出端口接收通带同一波长信号功率强度依次为 G_1 、 G_2 、 G_3 。由结构设计改变影响谐振腔定向辐射,结构No. 2相对于结构No. 1接收同一波长信号增强分贝为:

$$G_{dB21} = G_{dB2} - G_{dB1} = 10 \lg \frac{G_2}{G_1} \quad (2)$$

结构No. 3相对于结构No. 1接收同一波长信号增强分贝为:

$$G_{dB31} = G_{dB3} - G_{dB1} = 10 \lg \frac{G_3}{G_1} \quad (3)$$

以图2为例分析渐变结构空气腔微谐振器光子晶体波导(No. 1-No. 3)耦合结构不同对信道输出的影响:输出信道通带峰波长依次为1379.5 nm、1380.7 nm、1381.5 nm,各峰波长处对应的信号 G_{dB} 依次为-1.819 dB、-0.701 dB、-0.005 dB,对应的带宽依次为3.7 nm、6.0 nm、12.0 nm,对比发现由耦合结构不同造成通带同一波长信号强度衰减分贝不同,在1381.5 nm波长处No. 2相对于结构No. 1信号增强 $G_{dB21} = 1.90$ dB, No. 3相对于结构No. 1信号增强 $G_{dB31} = 5.25$ dB。三种耦合结构波导各自功率谱表明:随耦合区域的增大,微腔 Purcell 效应对其工作状态产生调控,使其在工作波段上各自通带峰波长信号损耗降低,且通带带宽增大;三种耦合结构波导中若优选结构设计,借助于微腔 Purcell 效应调控波导工作状态能使不需要的波长

信号得到抑制,所需通带同一波长信号增强,且这是光学设计上获取高品质波长信道的关键。

2.2 参数 $r_3 \geq 0$ 时微谐振器光子晶体波导输出特性

为了更好地分析研究波导结构的工作状况,通过调节微谐振器中心柱半径 r_3 进一步研究其信号传输模式的变化。

2.2.1 耦合结构改变对微谐振器光子晶体波导性能的影响

首先,当 $r_3 \in [0, 0.11a]$, $r_1 = 0.2a$, $r_2 = 0.2a$ 时,仅选取 $r_3=0, 0.065a, 0.085a, 0.1a, 0.105a, 0.11a$ 为例,依次给出了图6~8渐变结构波导(No.1~No.3)功率传输谱,图右侧给出了结构中心柱半径 r_3 数值,及对应通带输出参量 $\lambda, \Delta\lambda, G_{dB}$,表明:随谐振器中心柱半径增大,波导通带峰波长向长波方向移动变化范围为1379.5~1648.7 nm,且具有优良的单通带波长传输模式特性。

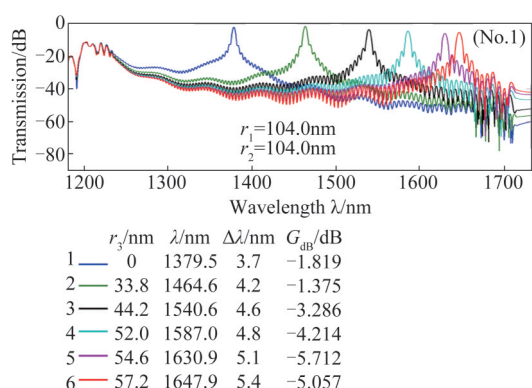


图6 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No.1)

Fig. 6 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

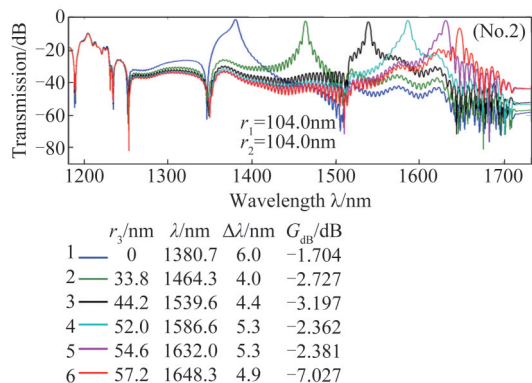


图7 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No.2)

Fig. 7 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

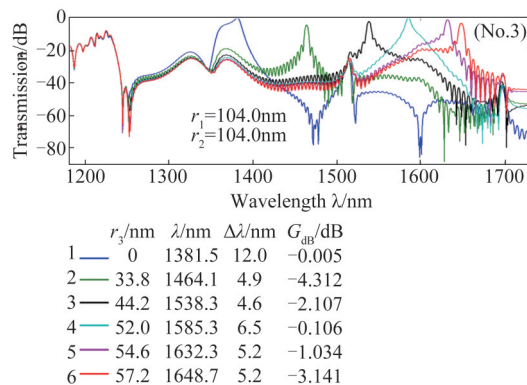


图8 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No.3)

Fig. 8 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

当 $r_3 \in [0.24a, 0.36a]$, $r_1 = 0.2a$, $r_2 = 0.2a$ 时,仅选取 $r_3=0.24a, 0.25a, 0.26a, 0.27a, 0.28a, 0.29a, 0.30a, 0.31a, 0.32a, 0.33a, 0.34a, 0.35a, 0.36a$ 为例,图9~11依次给出了介质柱腔微谐振器设计的渐变结构波导(No.1~No.3)功率传输谱,表明:随谐振器中心柱半径增大,波导通带峰波长向长波方向移动范围为1261.9~1666.4 nm,峰波长可调范围宽度高达404.5 nm,在适宜的设计参数上同样可得到优良的单通带波长传输模式特性。

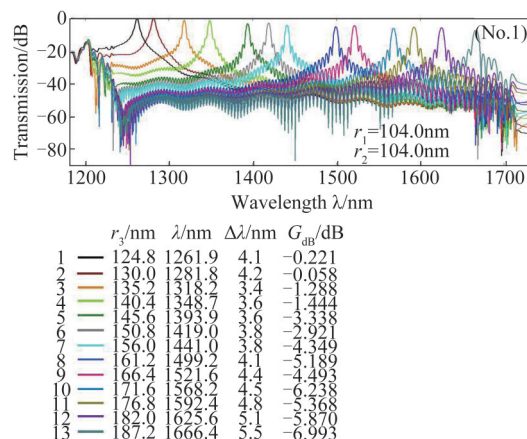


图9 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No.1)

Fig. 9 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

当 $r_3 \in [0.61a, 0.77a]$, $r_1 = 0.2a$, $r_2 = 0.2a$ 时,仅选取 $r_3=0.61a, 0.62a, 0.63a, 0.64a, 0.65a, 0.66a, 0.67a, 0.68a, 0.69a, 0.70a, 0.71a, 0.72a, 0.73a, 0.74a, 0.75a, 0.76a, 0.77a$ 为例。图12~14依次给出了给出了介质柱腔微谐振器设计的渐变结构波导(No.1~No.3)功率传输谱,表明:随谐振器中心柱半径增大,波导通带峰波长向长波方向移动

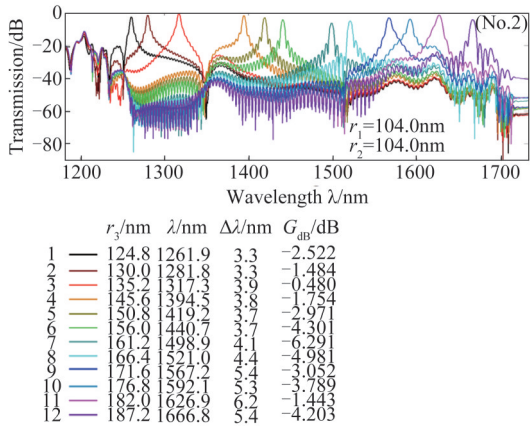


图 10 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 2)
Fig. 10 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

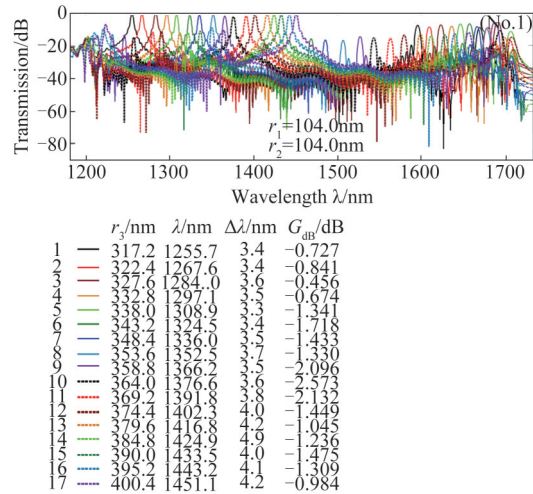


图 12 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1)
Fig. 12 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

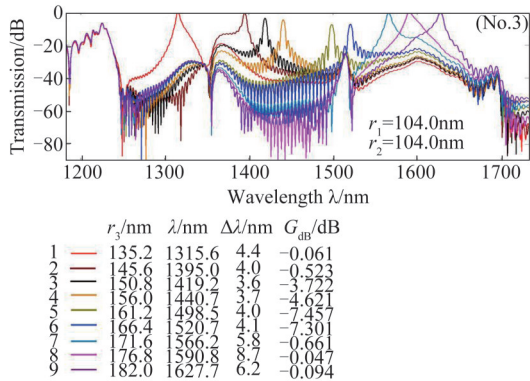


图 11 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 3)
Fig. 11 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

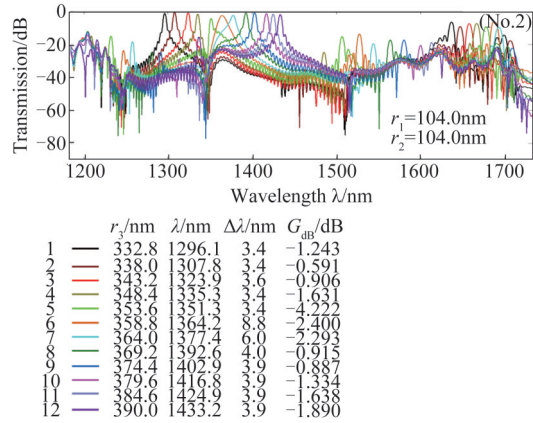


图 13 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 2)
Fig. 13 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

范围在 1 255. 7~1 451. 1 nm, 同样保持优良的单通带波长传输模式特性。

由以上分析得:在渐变结构光子晶体波导中仅调节微谐振器中心柱半径其它结构参数不变的情况下,波导信道输出单通带峰波长可调节范围在:1 255. 7~1 666. 8 nm;三种结构在给定的中心柱半径取值区间上可优选参数设计,能始终保持单通带峰波长低损耗输出; $r_3 \in [0, 0. 11a]$ 呈现出第一个周期性的变化,随着 r_3 增大结构输出峰波长向长波方向移动; $r_3 \in [0. 24a, 0. 36a]$ 呈现出第二个周期性的变化,随着 r_3 增大结构输出峰波长向长波方向移动; $r_3 \in [0. 61a, 0. 77a]$ 呈现出第三个周期性的变化随着 r_3 增大结构输出峰波长向长波方向移动;渐变结构光子晶体波导随微谐振器中心柱半径增大,共同的变化规律为:在 r_3 每一区间内,波导信道输出通带峰波长始终保持着相似的变化规律,且始终保持单通带峰波长可调范围宽的优良特性。

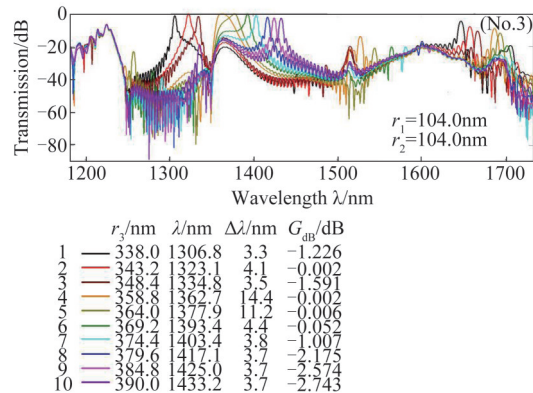


图 14 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 3)
Fig. 14 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

2.2.2 参数 r_3 过渡区设计单通带输出特性的微谐振器光子晶体波导

在 r_3 非过渡区三个区间 $[0, 0.11a]$, $[0.24a, 0.36a]$, $[0.61a, 0.77a]$ 中,波导能保持单通带输出模式,在 r_3 过渡区不能全部保持单通带输出,这不是设计需求的。在利用价值上仅对有意义的 r_3 过渡区优选设计,以获取更多数量的可利用波长,提高波分多路组建设计信息传输容量。过渡区参数设计上优选结构(No. 1~No. 3)各自的功率传输谱,当 $r_3=0.49a, 0.55a, 0.56a$ 时,图 15~17 分别用蓝色、绿色、红色曲线依次标注了波导三种结构(No. 1~No. 3)的功率传输谱,并在图的右侧列出了 r_3 数值依次为 254.8 nm、286.0 nm、291.2 nm 及各自对应的输出通带参数 $\lambda, \Delta\lambda, G_{dB}$ 。如图 15~17 中蓝色曲线为波导结构(No. 1)的功率传输谱,蓝色短划线右侧依次给出了中心柱半径 r_3 的取值及对应的输出通带参数。该情况下图 15~17 中的蓝色曲线表明波导结构(No. 1)始终存在两个通带其峰波长信号衰减率不小于 -7.373 dB,表明谐振器中心柱半径相同的情况下,仅改变耦合结构设计,很好地提高了所需通带波长传输强度,且抑制了不需要的通带波长信号,改善了其单通带波长传输模式的性能。由中心柱半径及耦合结构的改变,腔 Purcell 效应调控结构耦合性能,表现为结构 No. 2 和结构 No. 3 对结构 No. 1 传输的双通带峰波长信号其中一个被抑制,另一个被增强,图 15~17 功率传输谱中已标出对应的两个峰波长。考虑到峰波长移动对传输信号的影响,具体分析如下:

1、当 $r_3=254.8$ nm 时,由结构的改变对峰波长移动影响不显著,由式(2)和式(3)及图 15 得:结构 No. 1 传输的双通带峰信号中 1442.1 nm 波长被抑制,1373.6 nm 波长被增强;在 1373.6 nm 波长处,结构 No. 2 相对于结构 No. 1 信号增强 $G_{dB21}=3.93$ dB,结构 No. 3 相对于结构 No. 1 信号增强 $G_{dB31}=7.86$ dB。

2、当 $r_3=286.0$ nm 时,由波导结构的改变其通带峰波长发生了移动,图 16 中考虑到峰波长移动问题,结构 No. 1 传输的双通带峰信号中 1492.3 nm 波长被抑制,1567.2 nm 波长被增强;在通带峰波长 1567.2 nm 处结构 No. 2 和结构 No. 3 对结构 No. 1 信号增强分贝分别为: $G_{dB21}=2.08$ dB, $G_{dB31}=6.47$ dB; 在 1566.2 nm 波长处, $G_{dB21}=2.63$ dB, $G_{dB31}=7.58$ dB。

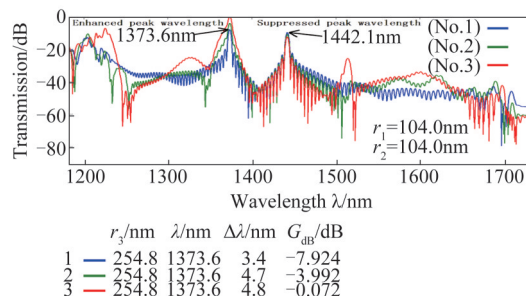


图 15 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1~No. 3)

Fig. 15 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal straight waveguides with gradually varied formations

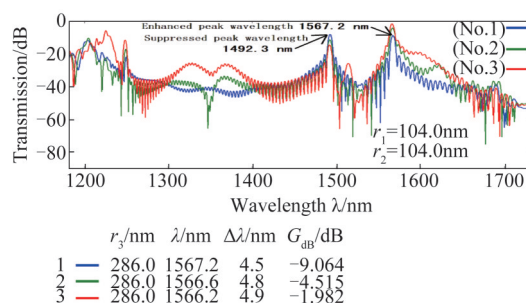


图 16 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1~No. 3)

Fig. 16 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal straight waveguides with gradually varied formations

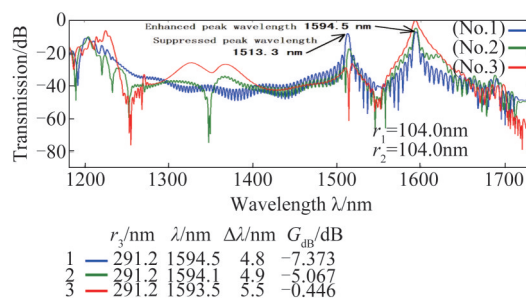


图 17 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1~No. 3)

Fig. 17 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal straight waveguides with gradually varied formations

3、图 17 中当 $r_3=291.2$ nm, 结构 No. 1 传输的双通带峰信号中 1513.3 nm 波长被抑制, 1594.5 nm 波长被增强; 考虑到峰波长移动问题, 在 1594.5 nm 波长处结构 No. 2 和结构 No. 3 对结构 No. 1 信号增强分贝分别为: $G_{dB21}=2.25$ dB, $G_{dB31}=6.64$ dB; 在 1593.5 nm 波长处, $G_{dB21}=4.84$ dB, $G_{dB31}=7.32$ dB。

3 参数 r_2 调节对微谐振器光子晶体波导输出性能的影响

为寻找更多可利用优良品质的波长信道结构设计,调节谐振器非中心柱(即红棕色介质柱)半径 r_2 研究波导输出性能的变化。仅以 r_3 所在的 $[0, 0.11a], [0.24a, 0.36a], [0.61a, 0.77a]$ 三个区间上中心柱半径 $r_3=0.1a, 0.34a, 0.7a$ 为例,进一步研究分析波导信道输出性能的变化。当 $r_3 = 0.1a, r_2=0.16a, 0.17a, 0.18a, 0.19a, 0.20a, 0.21a, r_1 = 0.2a$ 时,图 18~20 依次给出了渐变结构波导(No. 1~No. 3)功率传输谱,表明:在适宜的范围调节柱半径 r_2 , 除过渡区 $r_2 = 0.21a=109.2\text{nm}$ 外,保持优良的单通带波长传输模式,信道通带峰波长调节范围较宽;在谐振器中,中心柱半径 r_3 不变,随非中心柱半径 r_2 增大信道输出通带峰波长向长波方向移动,其范围为:1 522.2~1 604.5 nm。

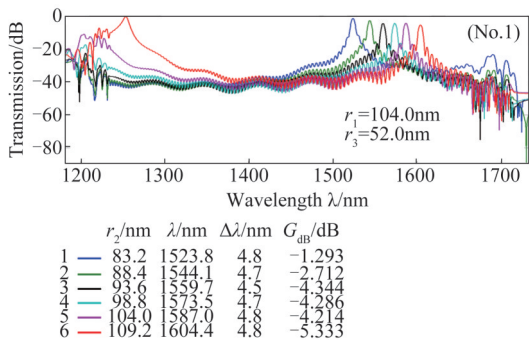


图 18 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1)
Fig. 18 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

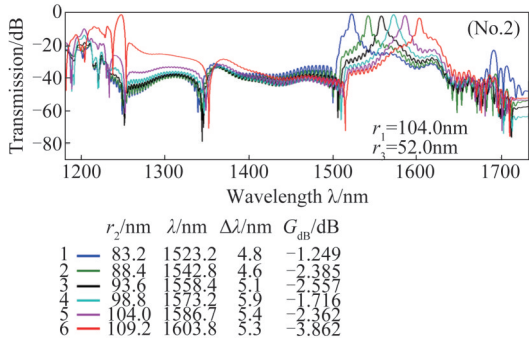


图 19 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 2)
Fig. 19 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

当 $r_3 = 0.34a, r_2=0.16a, 0.17a, 0.18a, 0.19a, 0.20a, r_1 = 0.2a$ 时,图 21~23 依次给出了渐变结构波导(No. 1~No. 3)功率传输谱,表明在结构(No. 1)

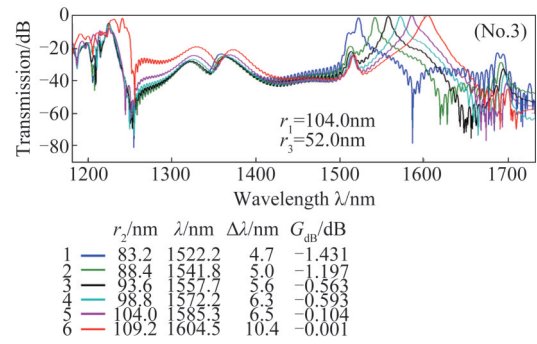


图 20 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 3)
Fig. 20 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

中除过渡区 $r_2 = 0.16a=83.2\text{nm}$ 外,这些波导信道保持优良的单通带峰波长输出,其变化趋势和输出性能分析同上类似。

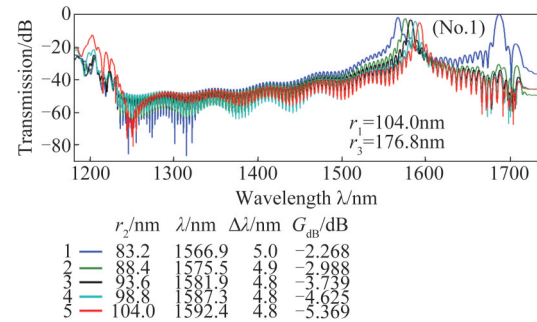


图 21 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1)
Fig. 21 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

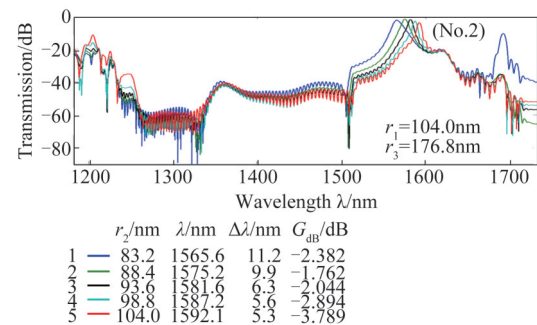


图 22 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 2)
Fig. 22 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

当 $r_3 = 0.7a, r_2=0.18a, 0.19a, 0.20a, 0.21a, r_1 = 0.2a$ 时,图 24~26 依次给出了渐变结构波导(No. 1~No. 3)功率传输谱,其输出性能变化趋势同上。

图 18~26 波导信道功率传输谱表明:在谐振器

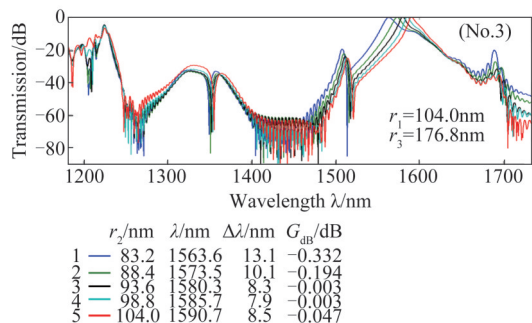


图 23 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 3)
Fig. 23 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

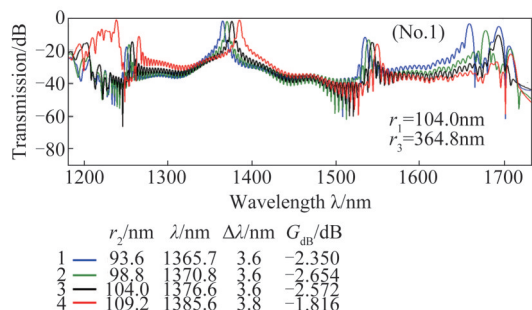


图 24 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 1)
Fig. 24 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

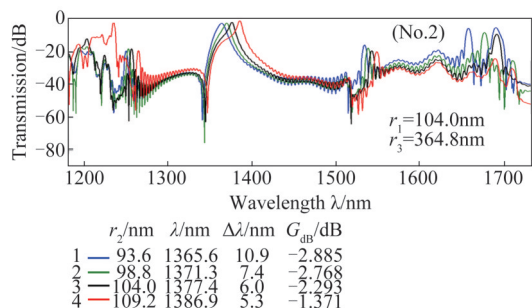


图 25 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 2)
Fig. 25 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

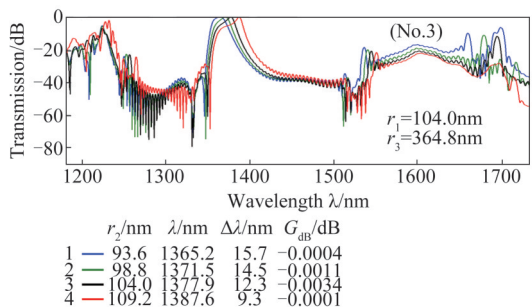


图 26 渐变结构微谐振器光子晶体波导功率传输谱(No. 3)
Fig. 26 Power transmission spectra of micro-resonator photonic crystal waveguide with gradually varied formations

中心柱半径 r_3 不变,其非中心柱半径 r_2 在适宜的范围内调节,随半径增大信道通带峰波长向长波方向移动,且能保持优良的单通带波长传输模式,为获得更多高品质信道提供了一种设计方法。信号传输从频分多路至数字时分多路以提升信号传输容量,为进一步提升信号传输容量,在波长利用上设计了密集波分多路,密集型光通信系统从波长利用角度是密集波长分割多路组建通信网络的产物。此类波导具有开发获取更多波长信道的潜力,可为宽波段的光集成设计和密集型光通信设计等提供更多高品质波长信号传输通带。

4 参数 r_2 、 r_3 及其过渡区变化对微谐振器光子晶体波导性能的影响

针对三种渐变结构光子晶体波导谐振器柱半径参数 r_2 、 r_3 及其过渡区变化情况,文中做出全面的模拟计算,结构设计改变对应输出性能变化的一般规律与过渡区特殊情况相结合,优选有利用价值的部分,对不能保持宽波段单通带波长信道结构设计或不能抑制额外波长干扰信号的结构设计文中均已剔除,保留性能优良的波长传输结构设计,表现为: r_2 、 r_3 参数的变化对其波导输出性能有规律的影响,可对比分析得到优化的结果,对规律性的可用波长部分作出定量、定性方面的详细分析,表明:波导结构 r_2 、 r_3 非过渡区参数变化能获取颇多数量品质优良的单通带波长信道;而 r_2 、 r_3 过渡区参数变化获取品质优良的单通带波长信道数量颇少。

一方面微谐振器中非中心柱半径 r_2 不变,随中心柱半径 r_3 增大,在给定的三个区间 $[0, 0.11a]$, $[0.24a, 0.36a]$, $[0.61a, 0.77a]$ 上,由功率传输谱分析其输出变化趋势和规律,随谐振器中心柱半径的增大在三个区间上依次呈现出单通带波长传输模式从短波向长波三次规律性的周期变化;由结构设计改变增强谐振腔的定向辐射能力,可提高波长信号定向传输强度,既能降低通带峰波长信号损耗,又能抑制不需要的波长信号,保持波导单通带稳定传输的特性。

另一方面中心柱半径 r_3 不变(包括空气腔微谐振器 $r_3=0$),其非中心柱半径 r_2 在适宜的范围内调节,随柱半径增大信道通带峰波长向长波方向移动,且保持优良的单通带波长传输模式特性;此类波导具有开发获取更多波长信道的潜力,也为宽波段密集波分多路组建通信系统设计获取更多可利用波长信道提供了一种方法。

再一方面 r_2 、 r_3 过渡区参数的变化不能或不易于保持单通带输出,如通带峰波长信号传输强度锐减、多通带峰波长这不是设计需求的,通过改变微谐振器及耦合区域结构设计,仍可得到颇少的高品质单通带波长信道,作为可利用波长数量上的增补,如 $r_3=0.49a$ 、 $0.55a$ 、 $0.56a$ 表现为结构 No. 2 和结构 No. 3 对结构 No. 1 传输的双通带波长信号,其中一个传输被抑制,另一个传输被增强。其过渡区在增加可利用波长数量,提高波分多路设计信息传输容量等方面存在利用价值。

在本文设计的扫描结构参数范围内,波导结构 (No. 1~No. 3) 峰波长信号传输强度衰减分贝 G_{dB} 变化范围依次为: $-0.058\sim-9.064$ dB、 $-0.005\sim-7.027$ dB、 $-0.0001\sim-7.457$ dB; 波导结构 (No. 1~No. 3) 输出信道峰波长 λ 变化范围依次为: $1255.7\sim1666.4$ nm、 $1260.5\sim1666.8$ nm、 $1306.8\sim1648.7$ nm; 波导结构 (No. 1~No. 3) 通带宽 $\Delta\lambda$ 变化范围依次为: $3.3\sim5.5$ nm、 $3.3\sim11.2$ nm、 $3.3\sim16.9$ nm; 较文献 [1] 波导设计,本文波导设计具有覆盖波段可调范围更宽的优点,例如 $r_3 \in [0.24a, 0.36a]$, $r_1 = 0.2a$, $r_2 = 0.2a$ 时,波导信道通带峰波长调节宽度高达 404.5 nm。纳米工艺技术是指对材料纳米级 $0.1\sim100$ nm 的设计、加工、测量等,该类波导从加工工艺容差上分析:一方面由波导具有较宽的传输带宽,计算表明对较微小的加工工艺容差造成其输出性能的影响很小;另一方面波导结构设计变化,从输出性能变化趋势表现规律上分析,此类结构对加工工艺容差有很好的适应性,进一步降低了器件加工难度;较文献 [12-15] 设计的光学器件方法的两个缺点,本文设计器件具有结构较为简单,工艺容差适应性好等优点。较文献 [1-16] 设计的光学器件在光波长选择上,本文设计具有更佳的带宽调节适应能力,规律的周期变化模式,充裕的单通带峰波长选择等优点,能用于密集波分多路设计,提高信息传输容量。

利用三种结构各自信道通带波长输出优点,如结构 1 与结构 2 比较、或结构 1 与结构 3 比较,在结构参数适度的变化范围内输出信道峰波长损耗得以降低且保持单通带波长信号传输;若超出结构参数适度的变化范围会造成峰信号波长传输强度锐减或不能保证单通带波长信号传输;优选三种光子晶体波导结构,一方面可降低信道峰波长损耗,另一方面能抑制不需要的通带波长消除信号的干扰,

这为光学设计上获取高品质波长信道提供了一类方法,也为光学处理器高速且稳定 CPU 运行信号的传输提供了基础保证。

优选波导耦合结构设计、参数 r_2 、 r_3 及其过渡区域,利用光学谐振腔 Purcell 效应调控,可保持波导波长信号单通带、低损耗率的输出特征。通过上述规律性变化优选三种光子晶体波导结构,在波导结构设计上为寻找单通带波长传输模式的信道提供了指导,且扩大了结构带隙及其边缘带隙的利用率。这也为光学传感装置设计、5G 通信系统、密集型光通信系统、光路集成设计提供了富足且品质优良的传输信道。

5 结论

设计了三种渐变结构微谐振器光子晶体波导,用 FDTD 方法研究了其结构在 $1182\sim1733$ nm 波长段的功率传输谱。对比波导结构输出性能得:微谐振器参数 r_2 、 r_3 非过渡区的变化使波导输出可利用波长信道数量颇多,微谐振器中心柱半径 r_3 分别在 $[0, 0.11a]$ 、 $[0.24a, 0.36a]$ 、 $[0.61a, 0.77a]$ 三个区间上,随其中心柱半径增大波导信道传输模式表现规律为单通带峰波长从短波向长波三次周期性的变化;在参数 r_2 、 r_3 过渡区,该类波导通过优选耦合结构及参数设计,如 $r_3=0.55a$ 、 $0.56a$, 仍可得到颇少的高品质单通带波长传输信道,作为可利用波长信道数量上的补充;谐振器中心腔结构不变,随谐振器非中心柱半径 r_2 增大,其波导结构输出信道峰波长都具有向长波方向移动的规律。通过优选三种渐变结构光子晶体波导设计,能增强所需波长信号强度且对不需要的波长信号强度产生抑制,这是提高波导信道品质设计上所需要的。这些规律性变化一方面能提高波段利用率,另一方面为单通带峰波长低损耗波导结构设计提供了科学指导。结果表明,该类波导具有优良的宽带适应能力、规律的周期变化模式、充裕的单通带峰波长选择、稳定的传输性能、工艺容差适应性好等特点,在光信号处理元件设计、光传感装置设计、光集成设计、密集型光通信系统设计等领域具有应用价值。

References

- [1] Gilarlue M M, Badri S H. Photonic crystal waveguide crossing based on transformation optics [J]. *Optics Communications*, 2019, **450**(4): 308-315.
- [2] Headland D, Fujita M, Nagatsuma T. Bragg-mirror suppression for enhanced bandwidth in terahertz photonic crys-

- tal waveguides[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **26**(2):1-9.
- [3] Ruan W S, He X T, Zhao F L, *et al.* Analysis of unidirectional coupling in topological valley photonic crystal waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, **39**(4): 889-895.
- [4] Jindal P, Jit Kaur H, Kaur A, *et al.* Photonic crystal based biosensor—design and performance analysis for identification of various blood components[C]//2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO). IEEE, 2021: 1-5.
- [5] Fallahi V, Mohammadi M, Kordrostami Z, *et al.* Design and optimization of an ultra-fast symmetrical 4×2 encoder based on 2D photonic crystal nano-resonators for integrated optical circuits [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, **53**(10):1-18.
- [6] Kriukova I S, Krivenkov V A, Samokhvalov P S, *et al.* Weak coupling between light and matter in photonic crystals based on porous silicon responsible for the enhancement of fluorescence of quantum dots under two-photon excitation[J]. *JETP Letters*, 2020, **112**(9):537-542.
- [7] Li J F, Li C Y, Aroca R F. Plasmon-enhanced fluorescence spectroscopy[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, **46**(13):3962-3979.
- [8] Dadadzhanov D R, Gladskikh I A, Baranov M A, *et al.* Self-organized plasmonic metasurfaces: The role of the Purcell effect in metal-enhanced chemiluminescence (MEC) [J]. *Sensors and Actuators B Chemical*, 2021, **333**(2021): 129453.
- [9] Lyasota A, Jarlov C, Rudra A, *et al.* Limiting the spectral diffusion of nano-scale light emitters using the Purcell effect in a photonic-confined environment [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1):1-10.
- [10] Russell K J, Liu T L, Cui S, *et al.* Large spontaneous emission enhancement in plasmonic nanocavities [J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(7):459-462.
- [11] Iorsh I, Poddubny A, Orlov A, *et al.* Spontaneous emission enhancement in metal-dielectric metamaterials [J]. *Physics Letters A*, 2012, **376**(3):185-187.
- [12] Nikitin A Y, Guinea F, Garcia-Vidal F J, *et al.* Surface plasmon enhanced absorption and suppressed transmission in periodic arrays of graphene ribbons. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* 2012, **85**:081405.
- [13] Jin Y, Feng J, Zhang X L, *et al.* Surface-plasmon enhanced absorption in organic solar cells by employing a periodically corrugated metallic electrode [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2012, **101**:163303-163308.
- [14] Lakowicz J R. Radiative decay engineering 3. surface plasmon-coupled directional emission [J]. *Analytical Biochemistry*, 2004, **324**(2):153-169.
- [15] Gryczynski I, Malicka J, Gryczynski Z, *et al.* Surface plasmon-coupled emission with gold films [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, **108**(33) 12568-12574.
- [16] Yan S, Cheng Z, Hagedorn F L, *et al.* Bandwidth-adaptable silicon photonic differentiator employing a slow light effect [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(8):1596-1599.
- [17] Elshahat S, Abood I, Khan K, *et al.* Five-line photonic crystal waveguide for optical buffering and data interconnection of picosecond pulse [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(3):788-798.
- [18] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *Comput. Phys.* 1994, **114**(2):185-200.
- [19] Goldberg M. stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, **33**(1-4):509-515.
- [20] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(17):853-864.