

# 基于光子晶体波导的折射率传感器的灵敏度优化设计

柯林佟 陈卫业 张洋 李荣生 沈义峰

中国矿业大学理学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 通过研究波导两侧缺陷处的折射率对二维光子晶体波导透射光谱的影响,提出一种提高折射率传感器灵敏度的方案。计算结果表明光子透射带上边沿的偏移量与传感区折射率的大小存在一定关系,在相同的折射率变化量下通过改变波导两侧缺陷处圆孔的相关几何参数可极大提高光子透射带上边沿的偏移量,即提高折射率传感器的灵敏度。通过优化设计,传感器的灵敏度由折射率变化区间0.0~1.0的55 nm/RIU(RIU表示折射率单元)与1.1~2.0的36 nm/RIU分别提高到对应的405 nm/RIU以及222 nm/RIU。

**关键词** 光学器件;折射率传感器;灵敏度优化;光子晶体波导;光子带隙;时域有限差分法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.052304

## Optimizing Design for Sensitivity Improvement of Refractive Index Sensors Based on Photonic Crystal Waveguide

Ke Lintong Chen Weiye Zhang Yang Li Rongsheng Shen Yifeng

Department of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

**Abstract** The transmission spectrum of a two-dimensional photonic crystal waveguide with edge defects of different refractive indexes (RIs) is analyzed, and accordingly a proposal to improve the sensitivity of RI sensor is put forward. The simulations and calculations show that the offset of the upper band edge of the transmission band is related to the RI of the analyte. For the same RI variation, the shift of the upper band edge of the transmission band can be greatly improved by changing the related geometrical parameters of holes at the defect area near both sides of the waveguide. Namely, the sensitivity of the RI sensor is enhanced. In this paper the sensitivity is respectively improved from 55 nm/RIU (RIU means refractive index unit) to 405 nm/RIU and 36 nm/RIU to 222 nm/RIU corresponding to the range of the variation of RI ( $\Delta n$ ) from 0.0 to 1.0 and 1.1 to 2.0 after the optimizing process.

**Key words** optical devices; refractive index sensor; sensitivity optimization; photonic crystal waveguide; photonic band gap; finite-different time-domain method

**OICS codes** 230.5298; 280.4788; 130.5296; 350.4238

## 1 引言

John等<sup>[1-4]</sup>于20世纪80年代提出了光子晶体这种新型材料的概念。光子晶体是指具有光子带隙(PBG)特性的一维、二维或者三维的人造周期性电介质结构。其中光子带隙是指在某一频率范围的光波不论传播方向如何,均不能在此周期性结构中传播,即这种结构本身存在“禁带”。若将杂质或者缺陷引入该材料中,其原有的周期性或对称性将被打破,在其光子带隙中可能出现相应的频率极窄的透射频带。利用这些性质,可以将光子晶体应用到全光开关<sup>[5]</sup>,偏振光分束器<sup>[6]</sup>,高分辨率传感器<sup>[7]</sup>等方面,也可将这些性质应用到光电调制<sup>[8-9]</sup>,光纤飞秒激光技术<sup>[10]</sup>,量子信息处理<sup>[11]</sup>等方面。其中,在传感器方面,光子晶体就有着广泛的应

收稿日期: 2013-12-26; 收到修改稿日期: 2013-12-28; 网络出版日期: 2014-04-15

基金项目: 中央高校基础研究基金(2013QNA40)

作者简介: 柯林佟(1992—),男,本科生,主要从事光子晶体的器件设计方面的研究。E-mail: 751834845@qq.com

作者导师: 沈义峰(1974—),男,博士,副教授,主要从事基于光子晶体的器件设计及光在亚波长结构中的传输机理等方面的研究。E-mail: shenyf@cumt.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

用,如温度传感器<sup>[12]</sup>,微位移传感器<sup>[13]</sup>等。

## 2 数值模拟与结果

本文所有工作为纯数值模拟,提出了一种基于二维光子晶体波导的传感器模型,该光子晶体以硅为背景介质(折射率 $n=3.42$ ),排布着二维三角阵列的圆形空气孔,并通过去除一排空气孔形成二维光子晶体波导结构,其晶格间距 $a=370\text{ nm}$ ,空气孔半径 $r=120\text{ nm}$ ,如图1所示,称该结构为原始结构。通过对该结构的优化设计来实现传感器灵敏度的大幅提高。

模拟计算使用的软件是基于时域有限差分法的RSoft软件,并只对TE模式(磁场 $H$ 平行于空气孔轴线方向)进行研究。注意:下面所有模拟中,光源采用宽度为 $0.37\text{ }\mu\text{m}$ 的高斯光束,放置在波导入口附近( $-2.8\text{ }\mu\text{m}$ ,  $0$ ),能量探测器宽度为 $0.6\text{ }\mu\text{m}$ ,放置在波导出口附近( $2.4\text{ }\mu\text{m}$ ,  $0$ )。

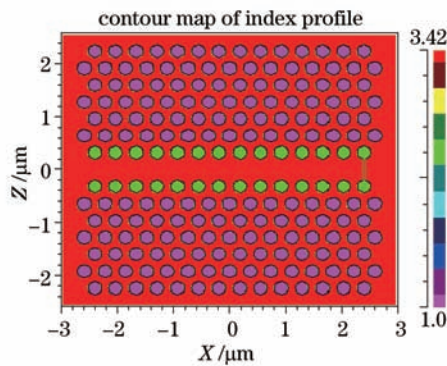


图1 光子晶体波导原始结构

Fig.1 Original structure of photonic crystal waveguide

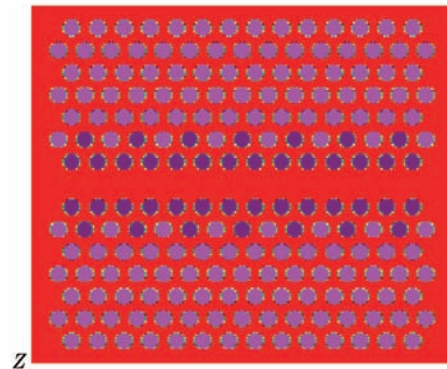


图2 深紫色圆孔区域为折射率传感区

Fig.2 Area of the deep purple circular holes is the refractive index sensing area

传感区折射率(RI)的改变在实际操作中可通过注入不同折射率的溶液实现。另外灵敏度的平均值通过下面过程获得:测出注入不同折射率溶液引起的透射带上边沿的偏移量与折射率改变量之间的关系曲线,

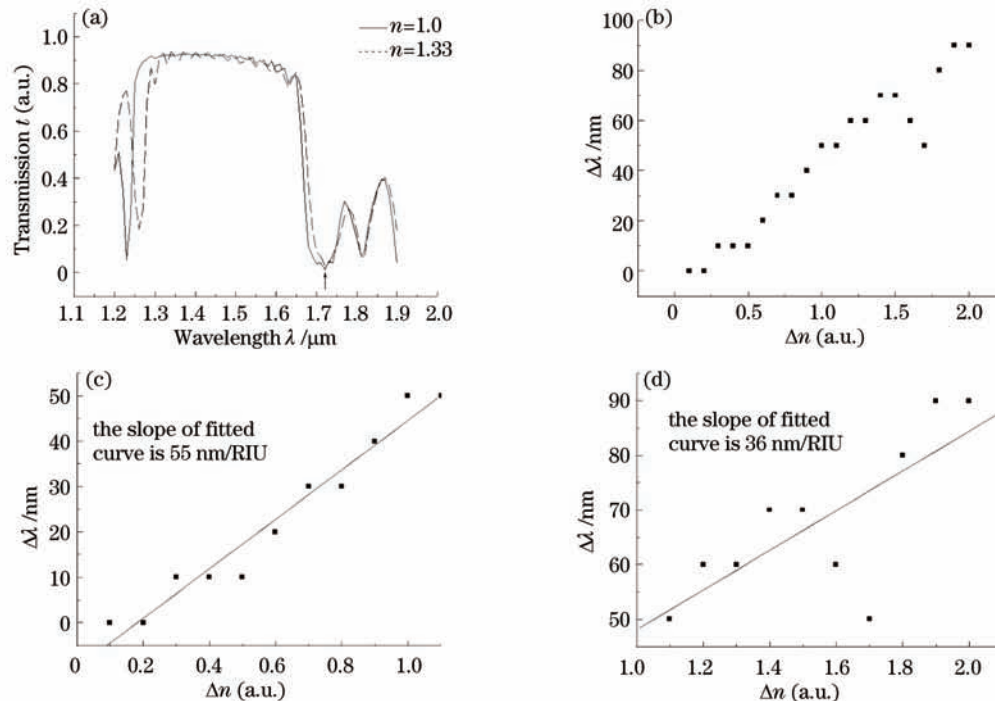


图3 不同折射率下的(a)透射谱线与(b)~(d)透射带上边沿偏移量

Fig.3 (a) Transmission spectra; (b)~(d) offset of upper band edge of the transmission band and for different refractive indexes

进行线性拟合求得拟合直线的斜率即可得到灵敏度  $S$  的平均值。然而为了模拟以及叙述的方便,以注入折射率  $n=1.33$  的溶液前后波导透射光谱中带隙上边沿的偏移量来估计该结构灵敏度的高低,并且只有在最终结构确定时,才会给出其灵敏度的平均值。因一般光场深入晶体的深度最多为两排柱子,故折射率传感区(即注入去溶液的区域)统一设置为如图2中紫色标记的空气孔柱区域。当传感区空气孔柱半径不变时(即为原始结构),注入折射率  $n=1.33$  的溶液前后的波导透射光谱如图3(a)所示,图中箭头所指处的透射带上边沿即为要关注的对象。从图中可以看出,随折射率增加,透射曲线整体向长波方向偏移,对应的光子透射带上边沿偏移量  $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ ,以此可估计该结构的灵敏度不高,通过对图3(b)中  $\Delta n \in [0, 1.0]$  与  $[1.1, 2.0]$  的点进行分段拟合,如图3(c),(d)所示,即可得到对应的灵敏度的平均值分别为  $55 \text{ nm/RIU}$  与  $36 \text{ nm/RIU}$  (RIU 表示折射率单元)。此结果不够理想,并且在  $\Delta n \in [1.6, 1.8]$  范围内,位移量出现减小,不再呈线性关系,下面将对其进行优化。

首先改变图1中绿色部分空气孔柱的半径  $R_1$  的大小,进行初步优化,令  $R_1 = mr$  ( $r = 0.12 \mu\text{m}$  为初始半径,  $m$  为调节参数,变化范围为  $1.0 \sim 1.5$ ),在半径从  $R_1 = 1r$  变化至  $R_1 = 1.5r$  过程中,图3(a)中所指的在折射率  $n=1.0$  环境下的光子带隙上边沿将移动至图4中箭头所指处,而改变相同的折射率 ( $1.0 \sim 1.33$ ) 所对应的透射带上边沿波长偏移量结果如图5所示。

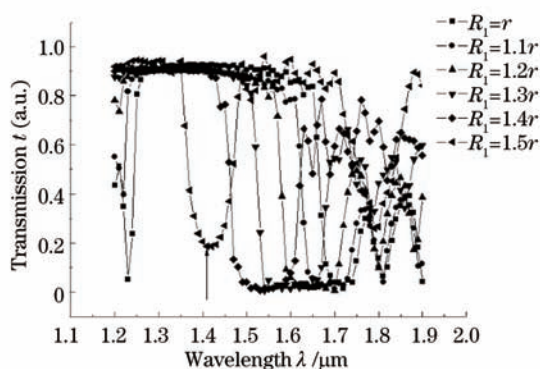


图4 不同半径  $R_1$  对应的透射谱线

Fig.4 Transmission spectra for different radius  $R_1$

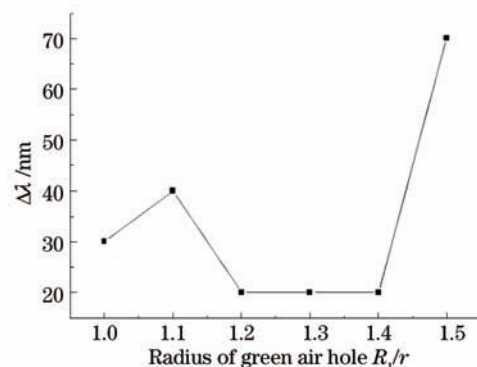


图5 所关注的光子透射带上边沿波长偏移量随  $R_1$  的变化关系

Fig.5 Shift of the concerned upper band edge varying with  $R_1$

由以上结果可知,当  $R_1 = 1.5r$  时,光子透射带上边沿对应波长的偏移量达到  $70 \text{ nm}$ ,而此时光的透射率为  $84\%$ ,这样的结果相对来说比较好。

以此作为初步优化的结果,下面进行进一步优化。要求进一步提高所关注带隙的偏移量,同时保证较高的透射率,因而要求波导有效宽度越大越好。为此将图6中波导上方的绿色空气孔沿  $Z$  轴正方向移动一定量,而波导下方的绿色空气孔沿  $Z$  轴负方向移动相同的量。设位置的改变量  $\Delta = k * 0.01 \mu\text{m}$  ( $k$  为调节参数,范围为  $1 \sim 9$ ),在相同的折射率改变量 ( $\Delta n = 0.33$ ) 下,即  $n$  从  $1.0$  改变为  $1.33$ ,相应的光子带隙上边沿的偏移量随  $\Delta$  变化的结果如图7所示。

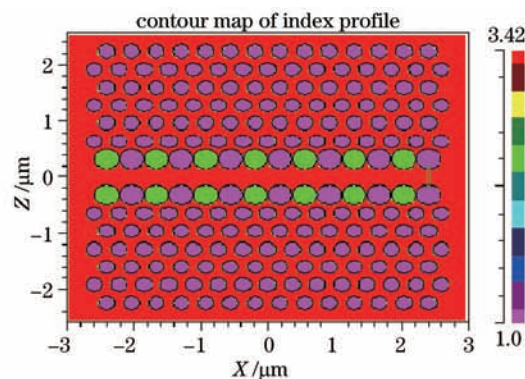


图6 对  $\Delta$  进行优化的结构示意图

Fig.6 Sketch map of the system structure for optimizing the parameter “  $\Delta$  ”

由图7可知,与其他的偏移量相比在 $\Delta=0.08\ \mu\text{m}$ 时,改变折射率后其透射带上边沿的偏移量将剧增至170 nm,透射率能达到85%以上,这是比较理想的。而此时图4中箭头所指处的上边沿将偏移至图8中箭头所指处。

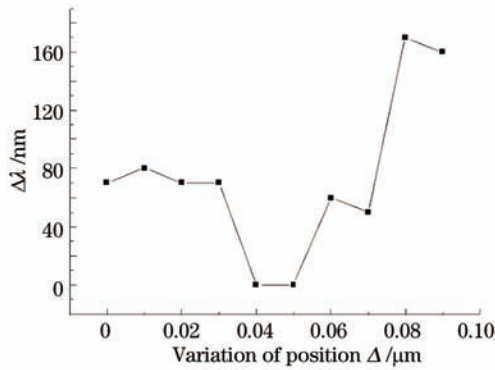


图7 光子透射带上边沿的偏移量与 $\Delta$ 的关系

Fig.7 Shift of the concerned upper band edge varying with  $\Delta$

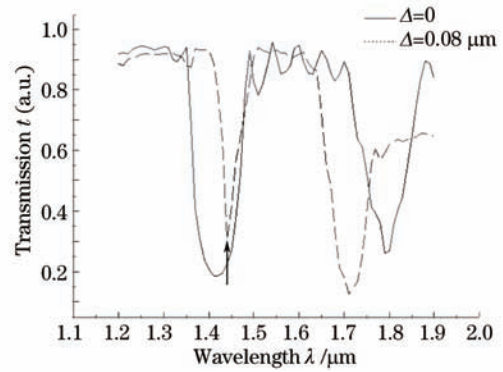


图8 当 $\Delta=0.08$ 时,所关注的透射带上边沿偏移至图中箭头所指处

Fig.8 When  $\Delta=0.08$ ,the concerned upper band edge shifts to the position marked by the arrow

在此基础上,进一步优化,对图9中绿色标记部分空气孔柱的半径 $R_2$ 进行改变。设 $R_2=pr$  ( $r=0.12\ \mu\text{m}$ 为初始半径, $p$ 为调节参数,变化范围为1.0~1.5),对应的透射带上边沿的偏移量与 $R_2$ 的关系,如图10所示。

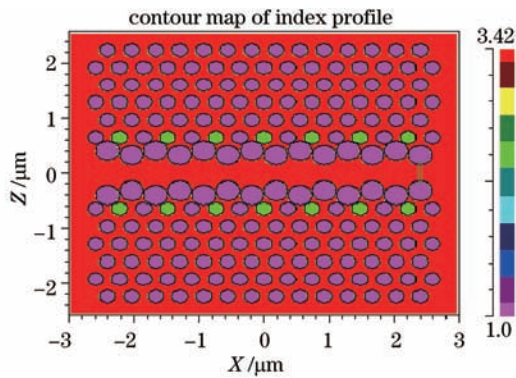


图9 对 $R_2$ 进行优化的结构示意图

Fig.9 Sketch map of the system structure for optimizing the parameter  $R_2$

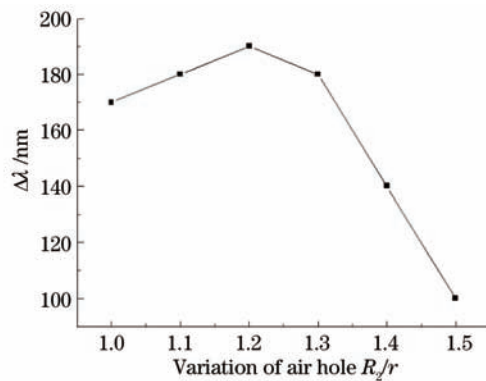


图10 光子透射带上边沿的偏移量与 $R_2$ 的关系

Fig.10 Shift of the concerned upper band edge varying with  $R_2$

从图10中可以看出,在 $R_2=1.2r$ 的情况下,所关注的透射带上边沿的偏移量达到了190 nm,也可以从图11中看出,图11为最终优化结构在传感区注入折射率为1.33溶液前后的光透射谱线图,此时的透射率为93%,对

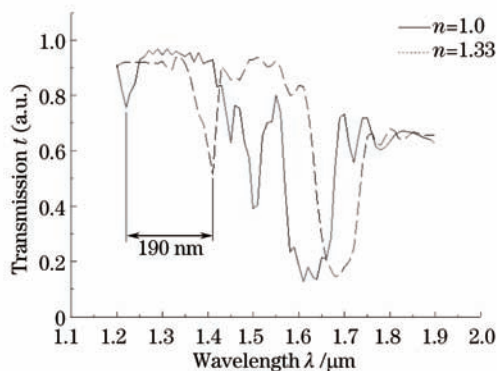


图11 当 $n=1.0$ 和 $n=1.33$ 时最终优化结构的透射谱线

Fig.11 Transmission spectra of the final optimized structure for  $n=1.0$  and  $n=1.33$

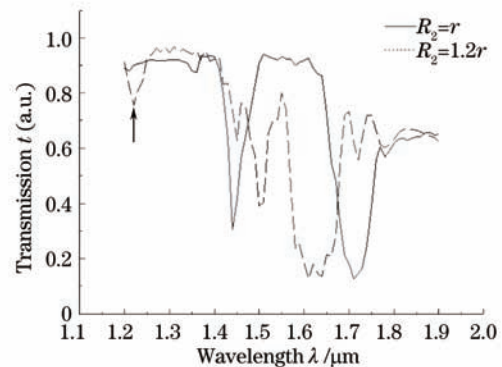


图12 不同 $R_2$ 对应的透射谱线。图中箭头所指处为 $R_2=1.2r$ 感兴趣的透射带上边沿偏移到的位置

Fig.12 When  $R_2=1.2r$  the concerned upper band edge shifts to the position marked by the arrow

应的带隙上边沿将偏移至图 12 中箭头所指处,之后通过调节折射率得到所关注的透射带上边沿的偏移量与折射率的改变量之间的关系,如图 13 所示。通过对其进行分段线性拟合可以算出折射率在 $[0.0,1.0]$ 范围时该结构灵敏度 $S=405 \text{ nm/RIU}$ ,而在 $[1.1,2.0]$ 范围对应的灵敏度 $S=222 \text{ nm/RIU}$ 。这些结果比最初的结构有了很大的提升,因此以此结构作为最终优化结构,如图 14 所示,它是由原始结构通过三个步骤得到的:1)将波导上下最近邻的两排柱子半径大小调为初始值的 1.5 倍,即 $R_1=1.5r$ ;2)将奇数排处的调整后柱子沿 $Z$ 轴方向进行平移 $\Delta=0.08 \mu\text{m}$ ,以使波导上下边界形成“之”字形的折叠结构;3)将波导次近邻排的柱子每隔两个周期位置上的柱子半径大小调为初始值的 1.2 倍,即 $R_2=1.2r$ 。所有经过参数调整的空气柱区域形成最后的传感探测区域,如图 14 中紫色部分所示。这样就得到最终的优化结构。从物理上来说,该结构之所以能够获得比较大的灵敏度,主要是利用了光子晶体波导边界缺陷处局域的模式对折射率异常敏感的特性。

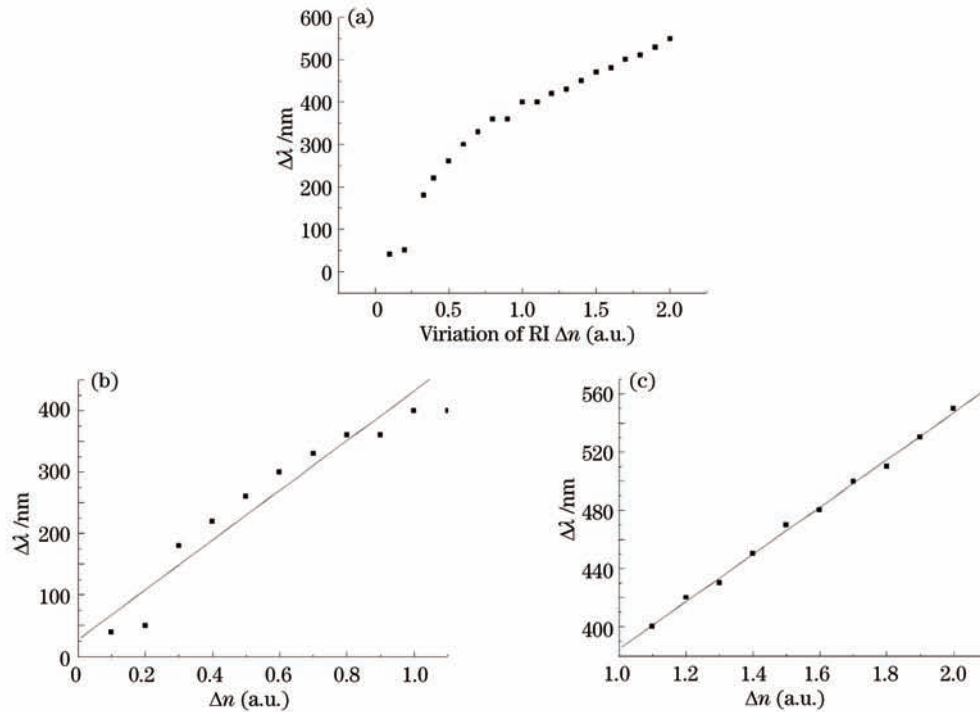


图 13 所关注的透射带上边沿的偏移量与折射率的改变量之间的关系。(a)  $\Delta n \in [0, 2.0]$ ; (b)  $\Delta n \in [0, 1.0]$ ; (c)  $\Delta n \in [1.1, 2.0]$

Fig.13 Shift of the concerned upper band edge varying with the refractive index. (a)  $\Delta n \in [0, 2.0]$ ; (b)  $\Delta n \in [0, 1.0]$ ; (c)  $\Delta n \in [1.1, 2.0]$

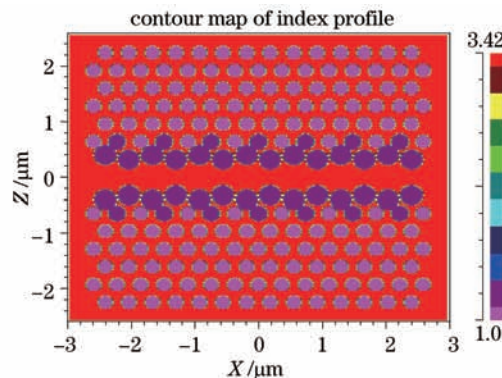


图 14 最终的优化结构,深紫色部分的圆孔区为折射率传感区

Fig.14 Final optimized structure, the area of the deep purple circular holes is refractive index sensing area

### 3 结论

对二维光子晶体波导两侧不同空气圆孔的半径、位置等物理量进行优化,研究了在相同缺陷折射率改变量( $\Delta n=0.33$ )情况下波导两侧缺陷处圆孔的相关几何参数对波导透射带上边沿偏移量的影响。通过逐步对 $R_1$ ,  $\Delta$ ,  $R_2$ 三个参量进行优化调节,所关注的波导透射带上边沿处波长的偏移量从 20 nm 提高至 190 nm,相应的折

射率传感器灵敏度最终由 0.0~1.0 的 55 nm/RIU 与 1.1~2.0 的 36 nm/RIU 分别提升至 405 nm/RIU 与 222 nm/RIU, 高于国内其他文献报道的 198.77 nm/RIU<sup>[14]</sup>和 120 nm/RIU<sup>[15]</sup>。此外文中所涉及的器件加工的尺度在 100 nm 左右,是目前采用离子束刻蚀等纳米加工方法所能够实现的。本文为光子晶体折射率传感器的灵敏度优化设计提出了一种新的方案,给基于光子晶体的折射率传感器的设计提供了新的思路。并且在一些需要对液态物质进行折射率测量分析的领域如化学和生物样品测试方面有潜在的应用价值。

### 参考文献

- 1 S John. Electromagnetic absorption in disordered medium near a photon mobility edge [J]. *Phys Rev Lett*, 1984, 53(22): 2169-2172.
- 2 S Jhon. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2061.
- 4 E Yablonovitch. Photonic band-gap crystals [J]. *J Phys: Condensed Matter*, 1993, 5(16): 2443-2460.
- 5 Yang Hui, Wang Zhiyong, Zhang Wei, *et al.* Properties of all-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1016003.  
杨辉, 王智勇, 张伟, 等. 基于二维非线性光子晶体的全光开关特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1016003.
- 6 Zhou Fei, Fei Hongming, Chen Zhihui, *et al.* A high efficiency photonic crystal polarization beam splitter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062304.  
周飞, 费宏明, 陈晓辉, 等. 一种高效光子晶体偏振光分束器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062304.
- 7 M A Dünder, E C Ryckebosch, R Nötzel, *et al.* Sensitivities of InGaAsP photonic crystal membrane nanocavities to hole refractive index [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4049-4056.
- 8 C Y Lin, X L Wang, S Chakravarty, *et al.* Electro-optic polymer infiltrated silicon photonic crystal slot waveguide modulator with 23 dB slow light enhancement [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(9): 093304.
- 9 X N Chen, A X Wang, S Chakravarty, *et al.* Electrooptically active-slow-light-enhanced silicon slot photonic crystal waveguides [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(5): 1506-1509.
- 10 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.* Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.  
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 11 P Michler, A Kiraz, C Becher, *et al.* A quantum dot single-photon turnstile device [J]. *Science*, 2000, 290(5500): 2282-2285.
- 12 Li Hongbing, Jin Yanyun, Fang Jinghui, *et al.* Temperature sensing of photonic crystal fiber filled with liquid via SBS [J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 120602.  
李红兵, 金艳云, 方靖淮, 等. 基于SBS的填充液体的光子晶体光纤温度传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 120602.
- 13 Z F Xu, L C Cao, C Gu, *et al.* Micro displacement sensor based on line-defect resonant cavity in photonic crystal [J]. *Opt Express*, 2006, 14(1): 298-305.
- 14 Tang Changping, Deng Ming, Zhu Tao, *et al.* Photonic crystal fiber based M-Z interferometer for refractive index measurement [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(9): 1304-1308.  
唐昌平, 邓明, 朱涛, 等. 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的折射率传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(9): 1304-1308.
- 15 Wang Yufei, Qiu Yishen, Chen Xiyao, *et al.* Two-dimensional photonic crystal sensor based on michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 1803-1807.  
王宇飞, 邱怡申, 陈曦曜, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的二维光子晶体传感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 1803-1807.