doi:10.3788/gzxb20184701.0123002

一维光子晶体纳米梁腔结构参量 对带隙特性的影响

祝欣1,刘克1,2

(1 北京工业大学 信息学部 光电子技术省部共建教育部重点实验室,北京 100124)

(2 Department of Electrical and Computer Engineering, George Washington University, Washington, DC 20052, USA)

摘 要:采用解析表达式的方法对一种一维光子晶体结构模型进行理论分析,通过三维时域有限差分数 值计算仿真孔洞型一维光子晶体各结构参量对其带隙特性的影响.仿真结果表明孔洞周期和半径、 InGaAsP波导宽度、下包层折射率以及填充系数等参量的变化都会对其带隙带宽和中心频率产生较大 影响.设计具有特定谐振波长的一维光子晶体纳米梁腔实例,得到的谐振波长为1561.7 nm、品质因子 达10⁴量级.带隙特性的研究对于由一维光子晶体构成的光子集成器件如激光器、调制器等具有重要的 指导意义.

关键词:集成光学;一维光子晶体;时域有限差分;带隙;谐振腔

中图分类号:TN256 文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0123002-9

Effect of Structural Parameters of One-dimensional Photonic Crystal Nanobeam Cavity on Its Bandgap Characteristics

ZHU Xin¹,LIU Ke^{1,2}

 (1 Key Laboratory of Optoelectronics Technology, Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
 (2 Department of Electrical and Computer Engineering, George Washington University, Washington, DC 20052, USA)

Abstract: One-dimensional (1D) photonic crystal structure model was theoretically analyzed through analytical expressions with various structural parameters. The bandgap characteristics of the 1D photonic crystal resulting from the structural parameters were further simulated by a three-dimensional time domain finite difference numerical method. The results show that the bandwidth and center frequency of the 1D photonic crystal bandgap are significantly influenced by hole period and radius, InGaAsP waveguide width, refractive index of bottom cladding, and filling factor. A 1D photonic crystal nanobeam cavity is successfully designed for a Q-factor up to 10^4 with a designated resonant wavelength of 1 561.7 nm, showing the validation and practicability of the aforementioned results. The study of bandgap characteristics of 1D photonic crystal structure produces an important effect on the integrated photonic components such as formed lasers and modulators.

Key words: Integrated photonic; One-dimensional photonic crystal; Time domain finite difference; Photonic bandgap; Resonant cavity

OCIS Codes: 230.3120; 230.5298; 160.5293; 140.3948

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61377059、61775007),北京市自然科学基金(No.4142004),2017年科技创新服务能力建设-科研基地 建设-重点实验室-光电子技术教育部重点实验室(市级)项目(No. PXM2017_014204_500034)资助

第一作者:祝欣(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为基于一维光子晶体纳米梁腔光器件. Email: zhuxin@emails.bjut.edu.cn 导师(通讯作者):刘克(1973-),男,教授,博士,主要研究方向为新型光子集成器件与材料. Email: liuke@bjut.edu.cn 收稿日期:2017-07-09;录用日期:2017-09-25

0 引言

一维光子晶体是由具有不同折射率和介电常数的电介质在一个方向上周期性排列,而在另外两个方向 上均匀分布的光学结构.由于存在和半导体材料类似的"光子禁带"效应,可以有效地控制光子,使其在光探 测、滤波器、调制器以及光源等方面有着广泛的应用^[1].例如,T.Y. Li等使用一维光子晶体的带隙特性设计 了一种具有高灵敏度的气体浓度探测器^[2].D. Q. Yang等将一维光子晶体带隙滤波器和传感器结合,设计了 一种具有高精度的介质折射率探测器^[3],并在硅芯片上设计了多重紧凑一维光子晶体纳米梁腔传感器阵 列^[4].刘广平等将光子晶体应用于热光伏技术的光谱选择控制^[5].P.B. Deotare 等利用热光、机电等集成技 术,研究了基于一维光子晶体的滤波器的调谐特性^[6].J. Hendrickson 等通过一维光子晶体波导将纳米线波 导和谐振腔集成,设计了一种具有很低转换能量的电光调制器^[7].在有源器件方面,K.Y. Jeong 等人制备了 室温激射的一维光子晶体纳米梁腔单模激光器^[8],其最小物理体积达到~0.8 μm³.

在一维光子晶体纳米梁腔的设计方面,冯琛等研究波导宽度和中心两孔距离对基于宽度抛物线型纳米 梁腔的 Q 值和模式体积 V 的影响^[9].J. Husna 等数值计算了晶格常数、孔洞大小等参数对一维光子晶体纳 米梁腔性能的影响,并得到了谐振波长在 L 波段 1 617.9 nm 的一维光子晶体纳米梁腔结构^[10].L. Huang 等 研究了纳米梁腔背景折射率对其谐振波长的影响,以及光波能量在其内的分布情况^[11].P. Yu 等设计了一种 侧面耦合波导的基于硅基一维光子晶体纳米梁腔,并研究了耦合间距对 Q 值和谐振波长的影响^[12].可见一维光子晶体纳米梁腔新型结构的设计研究仍然是当前的热门课题.

光子晶体的带隙特性一直是人们研究的重点.刘靖等利用时域有限差分法研究了磁导率对光子晶体带 隙个数及深度的影响^[13],计算了磁介质材料光子晶体的能带结构,结果表明磁性散射也能形成光子禁带.王 骥等利用 MPB 和 MEEP 软件讨论了不同介质填充比和介质介电常数对光子晶体带隙中心频率和宽度的影 响^[14].张志新以及张玲等利用传输矩阵法分析了一维布喇格反射型光子晶体的介质层厚度、周期数、介质层 折射率对其带隙宽度、带隙图边缘陡峭度等特性的影响,并将影响作用应用到滤波器的设计之中^[15-16].A. Gharaati 等研究了介质层反射率和厚度对光子带隙宽度的影响^[17].然而上述研究基于的光子晶体结构均为 周期性布喇格反射型,与本文研究的含有空气孔洞的一维光子晶体结构不同.传统的光子晶体结构设计方法 是基于反复地参数修改实验,此法的弊端是需要大量地模拟仿真时间.但是 Q.M. Quan 等提出了利用一维 孔洞型光子晶体带隙设计其结构的方法^[18],唐军等利用传输矩阵法分析了一维光子晶体的传输特性^[19],极 大地节省了设计时间和计算机资源如内存等.但上述研究也未涉及一维孔洞型光子晶体结构参量对其带隙 特性的影响.近年来此类型的一维光子晶体结构受到了广泛关注,其带隙特性对构成的光器件具有重要的 作用.

本文采用解析表达式的方式对一种一维光子晶体结构模型进行理论分析,利用三维时域有限差分数值 仿真法分析了圆孔型光子晶体的结构参量对其带隙特性的影响,如孔洞半径和周期、InGaAsP 波导宽度、下 包层折射率以及填充系数等对带隙带宽和中心频率的改变.并应用这些结论设计了目标谐振波长在 1560 nm左右、品质因子达到10⁴的一种一维光子晶体纳米梁腔结构,并分析了传输谱和腔内模式等光学特 性.本文研究对构成相应光集成器件有重要的指导意义.

1 一维光子晶体结构模型和理论分析

本文设计的一维光子晶体的结构模型如图 1,包含的物理参量有:1)空气圆孔半径 R,2)相邻空气孔的圆心距离即周期 a,3)InGaAsP 光波导宽度 w 和厚度 h,4)下包层材料折射率 n.如果中心两个孔洞的圆心距离不是缺省的 a 值,即可形成谐振腔,对应的腔长为 S=L-2R,其中 L 为中心两个孔洞之间的圆心距离.



图 1 一维光子晶体结构仿真模型及参量和波导光模式强度分布

Fig.1 Modeling of one-dimensional (1D) photonic crystal structure and its optical waveguide mode intensity distribution profile 对于上述一维光子晶体结构,利用平面波展开法, InGaAsP 介质材料的介电常数表示为^[18]

$$\frac{1}{\varepsilon(x)} = K_0 + K_1 e^{iGx} + K_{-1} e^{-iGx} + \dots$$
(1)

式中, $G = 2\pi/a$,a为光子晶体周期, K_0 , K_1 , K_{-1} 均为傅里叶系数,数值计算中为提高计算精度,常采用傅里 叶-贝塞尔级数,因此 K_0 , K_1 表示为^[18]

$$K_{0} = \frac{f}{\varepsilon_{\text{air}}} + \frac{1 - f}{\varepsilon_{\text{InGaAsP}}}$$
(2)

$$K_{1} = 2f \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{air}}} - \frac{1}{\varepsilon_{\text{InGaAsP}}} \right) \frac{J_{1}(GR)}{GR}$$
(3)

式中, J_1 为一阶 Bessel 函数,R为孔洞半径, $\epsilon_{air}=1.f=\frac{\pi R^2}{aw}$,定义为填充系数,用于表示孔洞面积在一个晶格单元中所占的比例.同时给出的色散方程为^[20]

$$\frac{c^2}{\varepsilon(x)} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$
(4)

在一维光子晶体的带隙中,特定光频率ω所对应的波矢量 k 是一个复数^[21].在带沿附近有

$$p = (1 - \delta)\sqrt{K_0} \pi c/a \tag{5}$$

 $k = (1+i\gamma)\pi/a$ (6) 式中,δ为带隙中心频率的扰动,γ为一维光子晶体中的反射强度,c为真空中的光速.等式变化后可以得

$$\delta^2 + \gamma^2 = K_1^2 / 4K_0^2 \tag{7}$$

再次经过等式变换可得

$$\delta^{2} + \gamma^{2} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\epsilon_{\ln GaAsP}}\right)^{2} \left[\frac{J_{1}(GR)}{GR}\right]^{2}}{\left(1 + \frac{1}{\epsilon_{\ln GaAsP}f} - \frac{1}{\epsilon_{\ln GaAsP}}\right)^{2}}$$
(8)

在此一维光子晶体结构的中心圆孔处,反射强度γ趋向于0^[18],因此在中心圆孔的带沿附近得出

$$\delta = K_1 / 2K_0 \tag{9}$$

即

$$\delta = \frac{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{\text{InGaAsP}}}\right) \left[\frac{J_1(\text{GR})}{\text{GR}}\right]}{\left(1 + \frac{1}{\varepsilon_{\text{InGaAsP}}f} - \frac{1}{\varepsilon_{\text{InGaAsP}}}\right)}$$
(10)

0123002-3

在一维光子晶体纳米梁腔中,光波的谐振频率ω_{res}趋近于中心圆孔的带沿频率^[21],有

$$\omega_{\rm res} \rightarrow (1 - K_1 / 2K_0) \sqrt{K_0} \pi c / a \tag{11}$$

根据式(4)、(5)、(7)、(10)得出,当 *f* 发生变化时,一维光子晶体的色散特性、反射强度以及带沿频率都将发生改变,从而说明其带隙特性发生变化.从 *f* 的定义(即填充系数)可以看到,一维光子晶体周期 *a*, InGaAsP 波导宽度 *w*,孔洞半径 *R* 都是影响其带隙变化的重要因素.

2 结构参量对带隙特性的影响

光子晶体带隙特性主要包括带隙的宽度以及中心频率,这两种特性和许多结构参量有关.本文使用加拿 大商业化软件 Lumerical FDTD solutions 对此特性进行数值计算,除上述指出的孔洞半径和周期、光波导宽 度、填充系数这些参量以外,还将研究下包层材料折射率对带隙特性的影响.需要指出的是,对于仿真软件, 由于此一维光子晶体结构中的空气孔洞在一个方向上周期性排列,因此在计算光子晶体带隙的数值分析中, 只需采用 Bloch 边界条件模拟其中的一个晶格单元即可.

本文设计的一维光子晶体结构参数确定过程可按以下步骤进行^[21-22]:首先确定周期 a,由式 $a = \lambda/2n_{eff}$ 可知,a和有效折射率 n_{eff} (介于 n_{InGASP} 和 n_{air} 之间)有关, λ 为谐振波长.通过选择谐振波长和有效折射率便可初步确定 a值.其次确定 InGaASP 波导宽度 w 和厚度 h,由于二者的数值大小和波导横纵向的光波模式数量有关^[23].在纵向为单模时,波导的厚度 h 取固定值为 220 nm (图 1 插图,此时波导宽度 w 为 0.55 μ m).最后调整空气孔洞的大小,产生光子带隙.本文通过初始仿真,首先确定一维光子晶体各结构参量的变化范围,并对其微调,使带隙特性落在特定的光通信波段范围内.在此基础上逐一改变孔洞半径、周期等参量,研究其对带隙特性的影响.

2.1 孔洞半径对带隙特性的影响

本文所研究的一维光子晶体带隙宽度和中心频率随孔洞半径的变化曲线如图 2,此时仿真条件为 光波导宽度 $w=0.55 \ \mu m$,周期 $a=0.39 \ \mu m$ 和下包 层材料为聚合物时的折射率取值为 n=1.5.当孔洞 半径增大时,带隙明显变宽,且带隙的中心频率发生 蓝移.此外,随着孔洞半径的减小,带隙的宽度也逐 渐减小,当孔洞半径小于 0.06 μm 时,最终带隙消 失.当孔洞半径大于 0.12 μm 时,最终带隙消 失.当孔洞半径大于 0.12 μm 时,最终带隙消 医示结果.同时从式(5)和(8)中得到,当 R 变大时, 反射强度γ随之增强,带隙展宽,带隙中心频率发生 蓝移.这一理论结果同数值分析所得结论一致.



图 2 一维光子晶体带隙宽度和中心频率随孔洞半径的变化 Fig.2 Bandgap width and center frequency of 1D photonic crystal dependency on hole radius

2.2 周期对带隙特性的影响

一维光子晶体带隙宽度和中心频率随孔洞周期的变化曲线如图 3.此时仿真条件为光波导宽度为 0.55 μm,孔洞半径为 0.09 μm 和下包层材料的折射率为 n = 1.5.在其他参量不变时,逐渐增大光子晶体周期,带隙的中心频率发生明显红移,带隙宽度变小.当周期小于 0.33 μm 时,在一定范围内,带隙宽度继续变大,但带隙中心频率较高.当周期大于 0.51 μm 时,带隙宽度逐渐减小并最终消失.根据式(5)和(8)可得,当周期增大时,f 值减小,相应的反射强度减弱,带隙变窄,带沿频率红移,即带隙中心频率发生红移.此外,由于周期的改变对带隙的中心位置影响较大,当周期较大时,带隙中心位置频率很小,同时在模拟的频率范围内,出现第三条能带,产生"第二带隙",如图 4.图中横轴 k 代表模拟仿真时取样点在 X 方向的波矢量,是归一化数值.纵轴为光波的频率,右侧灰度比例尺代表光强的大小.







2.3 InGaAsP 波导宽度对带隙特性的影响

一维光子晶体带隙宽度和中心频率随 InGaAsP 波导宽度的变化曲线如图 5,仿真条件为周期 $a = 0.42 \ \mu m$,孔洞半径 $R = 0.09 \ \mu m$ 和下包层材料折射率 $n = 1.5.当其他结构参量不变时,增大 InGaAsP 波导宽度,带隙的中心位置发生红移,且带隙的宽度也逐渐减小.当 InGaAsP 波导的宽度为 1.3 <math>\mu m$ 时,已经没有带隙.由式(5)和(8)得到,当 InGaAsP 波导宽度增大时,f 值变小,相应的反射强度减弱,带隙变窄,带沿频率 红移,带隙中心频率也发生红移.并且,当 InGaAsP 波导宽度较大时,能带数量变多,能带图发生交叠,即在 模拟的光波频率范围内,出现较多的光波模式,如图 6.当 InGaAsP 波导宽度小于 0.4 μm ,在一定范围内,带隙宽度继续变大,但带隙中心频率值也较高.



图 5 一维光子晶体带隙宽度和中心频率随 InGaAsP 波导宽度的变化曲线



2.4 下包层材料折射率对带隙特性的影响



图 6 一维光子晶体带隙图 (InGaAsP 波导宽度 w=1.0 μm) Fig.6 The bandgap diagram of 1D photonic crystal with 1.0 μm InGaAsP width





Fig.7 Bandgap width and center frequency of 1D photonic crystal as a function of polymer substrate index

一维光子晶体带隙宽度和中心频率随下包层材料折射率的变化曲线如图 7,仿真条件为周期 a = 0.42 μm,孔洞半径 R=0.09 μm 和 InGaAsP 波导宽度为 0.55 μm.当下包层材料折射率增加较小时,其对带隙宽度和带隙中心频率的影响也较小.但是当下包层材料的折射率增加到一定程度时,其对带隙的宽度和带隙的中心频率的影响显著增强.下包层材料的折射率越大,带隙宽度越小,带隙中心频率发生红移.当下包层材料的折射率支 2.25 时,带隙宽度减小至 0,带隙消失.在此条件下继续增大下包层材料的折射率,带隙宽度也不再发生变化.

2.5 填充系数对带隙特性的影响

在上述分析过程中,当孔洞半径 R,周期 a,InGaAsP 波导宽度 w 发生变化时,实际上是改变了晶格单元的填充系数.一维光子晶体带隙宽度和中心频率随填充系数的变化曲线如图 8(a)和(b).从填充系数的定义可以看出当分别增大孔洞半径、减小周期、减小 InGaAsP 波导宽度时,晶格单元的填充系数都将增大.可以得出的结论是,增大晶格单元的填充系数,可以使带隙展宽.此外,改变周期所对应的曲线斜率大于改变半径所对应的曲线,这说明通过改变周期而使填充系数发生变化对带宽的影响更大.改变 InGaAsP 波导宽度对应的曲线斜率逐渐减小,说明通过改变 InGaAsP 波导宽度而使填充系数发生变化对带宽的影响逐渐减小.即 InGaAsP 波导宽度越小,填充系数越大,其对带隙宽度的影响作用越弱.在图 8(b)中,可以看到填充系数的增大均使带隙中心频率发生蓝移.相应地改变周期所对应的曲线斜率最大,改变孔洞半径所对应的曲线斜率最小,说明通过改变周期而使填充系数发生变化对带隙中心频率的影响小.





3 一维光子晶体纳米梁腔设计实例

为应用以上研究结果,本文设计具有特定谐振频率的一维光子晶体纳米梁腔结构.当中心空气孔洞的圆 心距离不是缺省的 a 值时,即可形成谐振腔,对应腔长为 S.在研究各结构参量对带隙特性的影响时,由于仿 真区域只需包含一个晶格单元,因此不需要考虑具体的腔长值.

首先设计谐振频率在 192.175 THz(对应谐振波长为 1 560 nm)的一维光子晶体结构.需要指出的是一 维光子晶体纳米梁腔的谐振频率一般接近于中心圆孔的下带沿所对应的频率^[21],对于本文所设计的结构, 通过若干次仿真研究,发现此种一维光子晶体纳米梁腔的谐振频率应略高于其下带沿频率.本文从若干次仿 真结果中挑选出一个带隙频率范围包括 192.00 THz 的例子作为初始结构.例如当 InGaAsP 波导宽度 w 为 0.55 μ m、周期 a 为 0.42 μ m、孔洞半径 R 为 0.09 μ m,下包层折射率 n 为 1.5 时对应的带隙范围是 175.84 THz 到 203.65 THz (图 9(a)).本文从这一结构出发,应用已知结论,先改变上述结构的周期,随着光子晶体周期 的增大,光子晶体带隙中心发生红移.为使光子晶体的下带沿频率略低于 192.2 THz,本文将光子晶体的周 期减小至 $a = 0.39 \mu$ m,得到带隙的范围是 183.1 THz 到 215.4 THz(图 9(b)).此时下带沿频率依然低于目 标值.为了使带隙范围继续蓝移,在此基础上改变光子晶体的宽度至 0.45 μ m,此时得到的带隙频率范围是 193.5 THz 至 230.3 THz (图 9(c)).此时,光子晶体的下带沿频率已经高于 192.2 THz,因此本文采用改变

Bandstructure, linearscale Bandstructure, linearscale ×10³ $\times 10^{3}$ 2.6 2.6 6 7 215.4 THz 5 203.65 THz 4 $f/(\times 10^{14} \text{Hz})$ $f/(\times 10^{14} \text{Hz})$ Bandgap Bandgap 1.8 1.8 183.1 THz 3 175.84 THz 2 1.0 1.00 0.2 0.4 0 0.2 0.4 k k (a) Bandgap diagrams at R=0.09 μm, (b) Bandgap diagrams at R=0.09 μm, a=0.42 µm, w=0.55 µm a=0.39 μm, w=0.55 μm Bandstructure, linearscale Bandstructure, linearscale $\times 10^3$ $\times 10^3$ 5 2.6 2.6 42 230.3 THz 214.0 THz 3.0 Bandgap $f/(\times 10^{14} \text{Hz})$ 3 $f/(\times 10^{14} \text{Hz})$ Bandgap 193.5 THz 1.8 1.8 190.9 THz 1.8 0.6 1.0 1.0 0 0.2 0.4 0.4 k k (c) Bandgap diagrams at R=0.09 µm, (d) Bandgap diagrams at R=0.07 μm, a=0.39 µm, w=0.45 µm a=0.39 µm, w=0.45 µm

孔洞半径的方法来使其降低.当孔洞半径逐渐增大时,带隙范围发生蓝移,因此本文将孔洞半径减小至 R = 0.07 μm,得到的带隙范围是 190.9 THz 到 214.0 THz (图 9(d)).此时的下带沿频率符合预期.

图 9 各种不同参数下的一维光子晶体带隙图

Fig.9 Bandgap diagrams of 1D photonic crystal with various parameters

需要指出的是一维光子晶体纳米梁腔的腔长值影响其品质因子,而品质因子的大小与谐振频率相关.为 了在谐振频率为192.175 THz 时获得较高的品质因子,本文改变上述所得结构中的中心圆孔间距,以形成有 效谐振腔.经过若干次仿真,当中心圆孔间距为 *L*=0.7 μm(即腔长 *S*=0.56 μm)时,品质因子 *Q* 获得较大 数值.

为验证设计结果,模拟了此一维光子晶体纳米梁腔传输频谱图,见图 10.在 192.0 THz(即波长 1 561.7 nm) 处有最大的谐振强度(圆圈标记),此波长接近预期设计的 1 560 nm.此频率值处于带隙范围内,且略高于下 带沿频率,FDTD 数值分析结果与之前采用带隙方法设计的相一致.另外,本文还模拟了谐振频率为 192.0 THz时的腔内 TE 基模模式场分布(图 11).光波能量大部分集中在谐振腔内,对应的品质因子 Q 达到 10^4 量级.因此得出孔洞半径 $R = 0.07 \ \mu m$ 、周期 $a = 0.39 \ \mu m$ 、InGaAsP 波导宽度 $w = 0.45 \ \mu m$ 、腔内谐振频率 在 192.175 THz 左右的一维光子晶体纳米梁腔结构完全符合设计预期.







图 11 谐振频率为 192.0 THz 时的一维光子晶体纳米梁腔腔内 TE 基模模式场分布

Fig.11 TE mode intensity profile of 1D photonic crystal nanobeam cavity at a resonant frequency of 192.0 THz 该结构在制备工艺上可以通过以下步骤进行:首先在未图形化的硅衬底上涂敷一层厚度约为1μm的BCB聚合物,然后再对聚合物进行热处理使其凝固,以形成下包层.之后采用化学气相淀积在 BCB聚合物上 淀积一层厚度为 220 nm 的 InGaAsP 层.最后两次分别采用电子束曝光和电感耦合等离子体刻蚀技术相结合^[24],即第一次将 InGaAsP 介质层刻蚀成脊形波导结构,第二次在 InGaAsP 中刻蚀一排深度为 220 nm 的 空气孔洞,从而完成整个器件制备流程^[25].

4 结论

通过解析表达式的方式理论研究了一种一维光子晶体的结构参量对其带隙特性的影响,并采用三维时 域有限差分数值仿真法对一维孔洞型光子晶体的带隙特征进行了验证.得到增大孔洞半径,其带隙宽度变 宽,带隙中心频率发生蓝移.而增大其周期,光子晶体带隙宽度变窄,带隙的中心频率发生红移.增大 InGaAsP 波导宽度,带隙宽度变窄,带隙中心频率发生明显红移.同时宽度加大,带隙数目增多,波导中存在 的模式数量有所增加.下包层折射率越小,即下包层折射率与 InGaAsP 的折射率差值越大,带隙越宽.随着下 包层折射率增大,带隙变窄,且带隙中心频率发生红移.当下包层折射率增加到一定数值时,带隙完全消失. 这些结论与理论分析结果一致.设计了具有特定谐振波长的一维光子晶体纳米梁腔实例,得到的谐振波长为 1 561.7 nm 和品质因子达 10⁴量级,验证了所得结论的有效和实用性.带隙特性的研究对由一维光子晶体构 成的光子集成器件如激光器、调制器等具有重要的指导意义.

参考文献

SONG Ming-li, WANG Xiao-ping, WANG Li-jun, et al. Advances in the fabrication and application of photonic crystals
 [J]. Materials Review, 2016, 30(7): 22-27.

宋明丽, 王小平, 王丽军, 等. 光子晶体制备及其应用研究进展[J].材料导报, 2016, 30(7): 22-27.

- [2] LI T Y, WANG Z G, GAO D S, *et al*. High *Q* one-dimensional photonic crystal slot nanobeam cavity for high-sensitivity refractive index sensing[C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2015: 1-3.
- [3] YANG D Q, WANG C, LI Y F. Silicon on-chip one-dimensional photonic crystal nanobeam bandgap filter integrated with nanobeam cavity for accurate refractive index sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(2): 4500608.
- [4] YANG D Q, WANG C, LI X F. Silicon on-chip 1D photonic crystal nanobeam bandstop filters for the parallel multiplexing of ultra-compact integrated sensor array[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16267-16279.
- [5] LIU Guang-ping, XUAN Yi-min, HAN Yu-ge. Applications of one-dimensional photonic crystal in thermophotovoltaic

[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(1): 115-119.

刘广平, 宣益民, 韩玉阁. 一维光子晶体在热光伏技术中的应用[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 115-119.

- [6] DEOTARE P B, KOGOS L C, BULU I, et al. Photonic crystal nanobeam cavities for tunable filter and router applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 9(12): 3600210.
- [7] HENDRICKSON J, SOREF R, SWEET J, et al. Ultrasensitive silicon photonic-crystal nanobeam electro-optical modulator: design and simulation[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3271-3283.
- [8] JEONG K Y, NO Y S, HWANG Y, et al. Electrically driven nanobeam laser[J]. Nature Communications, 2013, 4 (21): 2822.
- [9] FENG Chen, FENG Guo-ying, CHEN Nian-jiang, et al. Ultrahigh-Q small-V photonic crystal nanobeam cavities based on parabolic-shaped width and taper holes[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(13): 134209. 冯琛,冯国英,陈念江,等. 基于宽度抛物线型和渐变孔径的超高Q低V一维光子晶体纳米梁腔的设计[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 134209.
- [10] JAMILAH H, MOHD A M, JAHARIAH S, et al. Numerical simulation of one dimensional (1D) photonic crystal multiple cavities based on silicon on insulator (SOI) [C]. IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics, 2015: 1-4.
- [11] HUANG L, ZHOU J, FU Z, *et al*. High-Q, high sensitivity and wide bandgap low-index-mode elliptical holes photonic crystal nanobeam cavities biosensors[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016: ATh1N.4.
- [12] YU P, QIU H Y, YU H, et al. High-Q and high-order side-coupled air-mode nanobeam photonic crystal cavities in silicon[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(20): 2121-2124.
- [13] LIU Jing, SUN Jun-qiang, HUANG Chong-qing, et al. Influence on band-gap properties of photonic crystal of permeability[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2007, 18(9): 1085-1088.

刘靖,孙军强,黄重庆,等.磁导率对光子晶体带隙特性的影响[J].光电子.激光,2007,18(9):1085-1088.

- [14] WANG Ji, LIN Qing-yong, GU Chu-hui, *et al.* Simulation of the photonic band gap of one-dimensional photonic crystal and experimental study in microwave region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2313-2316.
 王骥,林青勇,顾春晖,等. 一维微波光子晶体带隙的仿真和实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2313-2316.
- [15] ZHANG Zhi-xin, XIAO Jun. Analysis of energy band structure of 1-D photonic crystal[J]. Laser Technology, 2015, 39 (4): 525-527.

张志新,肖峻.一维光子晶体的能带结构分析[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 525-527.

[16] ZHANG Ling, LIANG Liang, ZHANG Lin-li, et al. Study of band-structure of 1-D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(9): 1815-1818.

张玲,梁良,张琳丽,等.一维光子晶体带隙结构研究[J].光子学报,2008,**37**(9):1815-1818.

- [17] ABDOLRASOUL G, SEYED A S, Investigation of a ternary 1D photonic crystal band gap width[C]. International Conference on Photonics, 2010: 1-5.
- [18] QUAN Qi-min, LONCAR M. Deterministic design of wavelength scale ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities [J].Optics Express, 2011, 19(19): 18529-18542.
- [19] TANG Jun, YANG Hua-jun, XU Quan, et al. Analysis of the transfer characteristics of one-dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 76-80. 唐军,杨华军,徐权,等.传输矩阵法分析一维光子晶体传输特性及其应用[J].红外与激光工程,2010, 39(1): 76-80. 80.
- [20] JOANNOPOULS J D. Photonic crystals: Molding the flow of light[M]. JOHNSON S G, WINN J N, et al. Cambridge London: Cambridge University Press, 2007.
- [21] QUAN Q M, DEOTARE P B, LONCAR M. Photonic crystal nanobeam cavity strongly coupled to the feeding waveguide[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(20): 2059.
- [22] CHEN Wei-zong, BU Tao, FU Ling-li, *et al.* Effective refractive index and dispersive properties of one-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9): 1124-1127.
 陈慰宗,卜涛,付灵利,等.一维光子晶体的有效折射率及色散特性[J].光子学报,2002, **31**(9): 1124-1127.
- [23] QIU M, THYLEN L, SWILLO M, *et al.* Wave propagation through a photonic crystal in a negative phase refractive-

index region[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(1): 106-110.

- [24] CUI K Y, LI Y Z, FENG X, *et al.* Fabrication of high-aspect-ratio double-slot photonic crystal waveguide in InP heterostructure by inductively coupled plasma etching using ultra-low pressure[J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(2): 648.
- [25] CROSNIER G, SANCHEZ D, BAZIN A, et al. High Q factor InP photonic crystal nanobeam cavities on silicon wire waveguides[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 579-582.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61377059, 61775007), the Beijing Natural Science Foundation (No. 4142004), and the Development Foundation for Optoelectronics Technology Lab., Ministry of Education (No. PXM2017_014204_500034)