Applied Physics 应用物理, 2018, 8(8), 386-397
Published Online August 2018 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/app
https://doi.org/10.12677/app.2018.88049

Hans汉斯

Simulation Study on Slow Light of 2-D Photonic Crystals by Sector Scatterers

Mingjie Xu[1*], Zichuan Xue[2*], Qun Xie[1], Yuhui Fu[1], Le Yu[1], Yong Wan[1#]

[1]College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao Shandong
[2]Southlands Schools China, Qingdao Shandong
Email: #wanyongqd@hotmail.com

Received: Aug. 6th, 2018; accepted: Aug. 20th, 2018; published: Aug. 27th, 2018

Abstract

In this paper, the air hole photonic crystal model is constructed by sector scatterers, and the linear defect waveguide is constructed. The dispersion curves in TM mode are simulated by using plane wave expansion method, and the group refractive index and group velocity are obtained by changing the parameters of scattering elements. The ideal model with large group refractive index and large bandwidth is obtained by normalized delay bandwidth product and dispersion constant. The waveguide structure is changed as a whole, and the scattering elements are divided into three types: face to face type, back to back type and rotation 30°. The calculated results are compared and analyzed.

Keywords

Simulation, Sector Scatterers, Photonic Crystal, Slow Light, Linear Defect Waveguide

扇面形散射元构建的二维光子晶体慢光模拟研究

徐明洁[1*]，薛子川[2*]，谢　群[1]，付毓卉[1]，于　乐[1]，万　勇[1#]

[1]青岛大学，物理科学学院，山东 青岛
[2]青岛索斯兰中学，山东 青岛
Email: #wanyongqd@hotmail.com

收稿日期：2018年8月6日；录用日期：2018年8月20日；发布日期：2018年8月27日

*第一作者。
#通讯作者。

文章引用: 徐明洁, 薛子川, 谢群, 付毓卉, 于乐, 万勇. 扇面形散射元构建的二维光子晶体慢光模拟研究[J]. 应用物理, 2018, 8(8): 386-397. DOI: 10.12677/app.2018.88049

摘　要

本文用扇面形散射元构建空气孔型光子晶体模型，构建线缺陷波导，利用平面波展开法分别模拟其TM模式下的色散曲线，并通过改变散射元参数，求得群折射率、群速度、带宽、归一化延迟带宽积和色散常数，获得群折射率较大且带宽较大的理想模型。针对散射元，整体改变波导结构，分面对面型、背对背型和旋转30°三种，对其计算结果进行比较分析。

关键词

模拟，扇面形散射元，光子晶体，慢光，线缺陷波导

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

光子晶体是一种介质折射率在空间中成周期性排列的人工功能材料[1] [2] [3]，最早由Yablonovitch [4]和John [5]各自独立提出，其周期(即晶格常数)与光波长的数量级大致相同[6]。按照光子晶体的折射率在空间中周期性变化的维度进行分类，它可以分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体[7]。目前，光子晶体的理论研究方法主要有平面波展开法[8]、有限时域差分法[9]和传输矩阵法[10]三种。

与半导体中的电子能带相类似，由于周期性势场的调制，光子晶体同样存在光子禁带(Photonic Band Gap, PBG) [11] [12] [13]，频率处于禁带范围内的光波不能在光子晶体中传播，因此可以实现对光的调制。慢光[14] [15] [16]是指光波的波包群速度明显低于光在真空中传播的速度，可以通过耦合腔波导和线缺陷波导来实现[17] [18]。线缺陷波导中又分为后向散射和全反射两种散射机制[1]。光子晶体波导具有很多优异的性能[19]，可以实现大的时间延迟、增加相位移动的幅度、增强非线性效应[20] [21]等作用，在全光缓存、光学延迟线和全光开关等领域[22] [23]具有重要的应用。

本文利用扇面形散射元构建空气孔型六边形光子晶体结构，通过去掉一排散射元来构建线缺陷波导模型，计算不同散射元结构参数下对应的TM模式色散曲线，进而求其群折射率、群速度、归一化延迟带宽积、带宽和色散常数，比较分析不同波导结构的数据结果，寻找群折射率较大且带宽较宽的模型。

2. 模型结构

扇面形散射元的结构如图1所示，它具有三个结构参数：半径 r、宽度 d、角度 θ。三个自由度比普通的圆形和椭圆形散射元具有更高的可调性，因此更容易获得比较理想的结果。散射元的介电常数 $\varepsilon=11.56$ (硅)，填充介质的介电常数 $\varepsilon=1$ (空气)。本研究采用六边形晶格结构，构建空气孔型光子晶体，图2为用扇面形散射元构建的光子晶体六边形晶格结构。

3. 模拟分析

3.1. 慢光中的基本概念

众所周知，群折射率 n_g 可以由公式(1)表示：

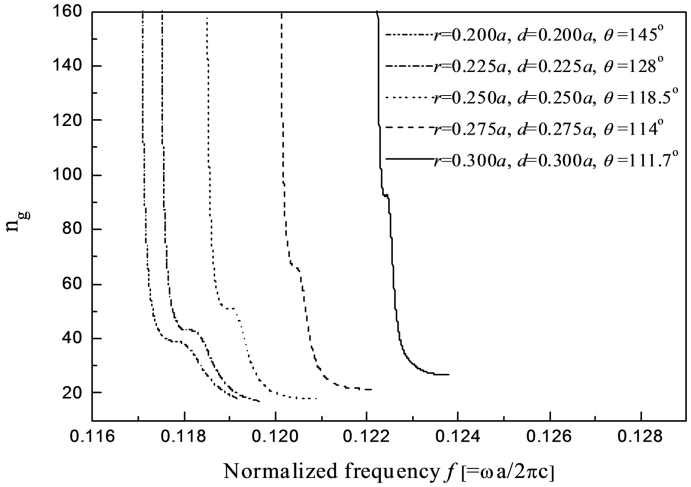

Figure 1. Sector scatterer
图1. 扇面形散射元

Figure 2. Photonic crystal with hexagonal lattice structure
图2. 光子晶体六边形晶格结构

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}\omega} \tag{1}$$

其中ω是入射波(脉冲)的中心角频率，$k = 2\pi n_{eff}/\lambda$，n_{eff}是有效折射率，λ是工作频率的波长。带入k对公式(1)进一步展开得到公式(2)：

$$n_g = n_{eff} + \omega\frac{\mathrm{d}n_{eff}}{\mathrm{d}\omega} \tag{2}$$

对慢光而言，通常$n_g \gg n_{eff}$，则公式(3)近似为：

$$n_g \approx \omega\frac{\Delta n}{\Delta\omega} \tag{3}$$

简化得公式(4)：

$$n_g\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \Delta n \tag{4}$$

公式(4)中，$n_g\Delta\omega/\omega$称为延迟带宽积，是评价慢光的主要参数。有效折射率的最大变化可表示为公式(5)：

$$\Delta n_{\max} = \frac{k_{\max}}{f_1} - \frac{k_{\min}}{f_2} \approx \frac{k_{\max} - k_{\min}}{f_1} \tag{5}$$

公式(5)中，f_1和f_2指的是群折射率n_g取±x%时对应的频率上下限，一般取±10%，a值也是根据工作波长而作相应改变后的数值。色散系数D则有公式(6)表示。

$$D=\frac{1}{c}\frac{\mathrm{d}n_g}{\mathrm{d}\lambda} \tag{6}$$

目前，归一化延迟带宽积已成为评价慢光效应的主要参数，因为它既包含了群折射率的大小，又包含了带宽的宽度。而研究发现，群折射率越大，对应的带宽会越小，具体采用哪种参数的模型，应视具体情况而定。

3.2. 色散曲线的规律分析

在图 2 完整的六边形光子晶体晶格结构中，引入线缺陷，构成面对面型线缺陷波导结构，面对面指的是散射元的相对位置，如图 3 所示。

利用平面波展开法，改变散射元的角度θ，在第一布里渊区范围(位于 0.3~0.5)内，寻找归一化频率$f=\frac{\omega a}{2\pi c}$随$\theta$的变化关系，如图 4 所示。可以发现，随着$\theta$的增大，色散曲线由向下凹逐渐向向上凸转变，在转变的过程中，就会出现一段线性区域，根据公式(3)，具有线性区域的色散曲线容易找到平坦的慢光，因此寻找理想慢光也就是寻找存在线性区域的色散曲线。

3.3. 面对面型线缺陷波导的慢光特性分析

由课题组以前的研究得知[14] [15] [16]，空气孔型晶格结构的 TM 模式比较容易产生较理想的慢光，因此本研究针对这一模型展开研究，目的在于寻找群折射率较大且带宽较宽的模型，增大归一化延迟带宽积($n_g\frac{\Delta\omega}{\omega}$)。

采用控制变量法，通过微调散射元参数进行优化，找到比较平坦的群折射率曲线，如图 5 所示。图 5 中对应的模型分别为：$r=0.2a$，$d=0.2a$，$\theta=145^\circ$，$n_g=39$；$r=0.225$，$d=0.225$，$\theta=128^\circ$，$n_g=43.2$；$r=0.25a$，$d=0.25a$，$\theta=118.5^\circ$，$n_g=51$；$r=0.275a$，$d=0.275a$，$\theta=113.95^\circ$，$n_g=66.1$；$r=0.3a$，$d=0.3a$，$\theta=111.5^\circ$，$n_g=91.9$，这是最大的群折射率值，同时也对应着最小的群速度，$v_{g\min}=0.011c$。归一化延迟带宽积的最大值为 0.213。表 1 中的带宽是在工作波长$\lambda=1550$ nm 下计算出的，变化范围为 2.1~8.5 nm，对应的晶格常数$a=185$ nm。若用 1 Thz 的工作频率，即$\lambda=300$ μm，可获得 398.7~1641.2 nm

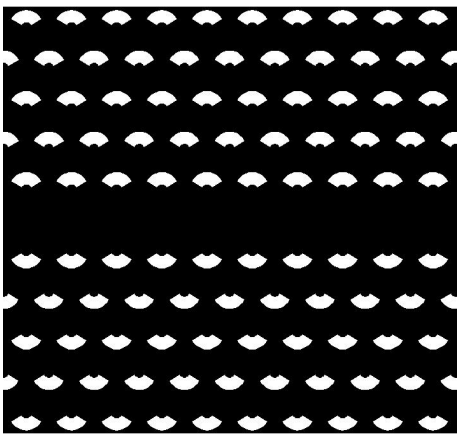

Figure 3. Face-to-face line defect waveguide structure
图3. 面对面型线缺陷波导结构

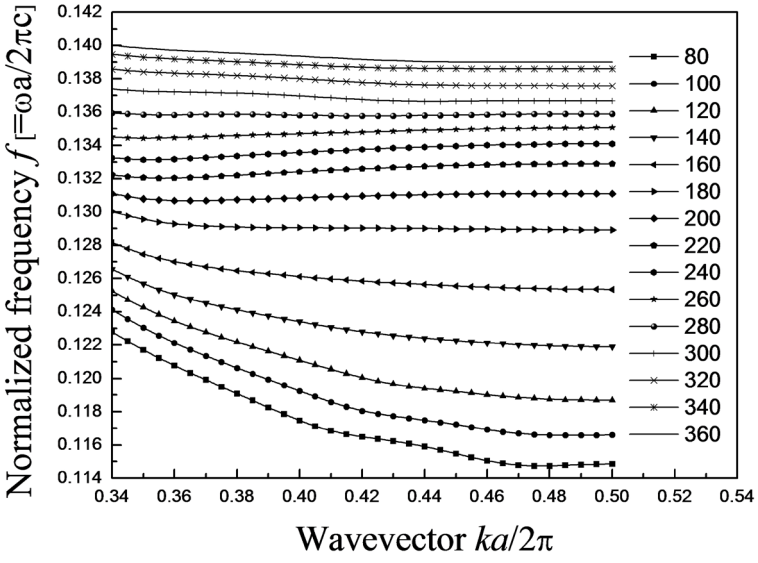

Figure 4. Relationship of dispersion curve with θ
图4. 色散曲线随 θ 的变化关系

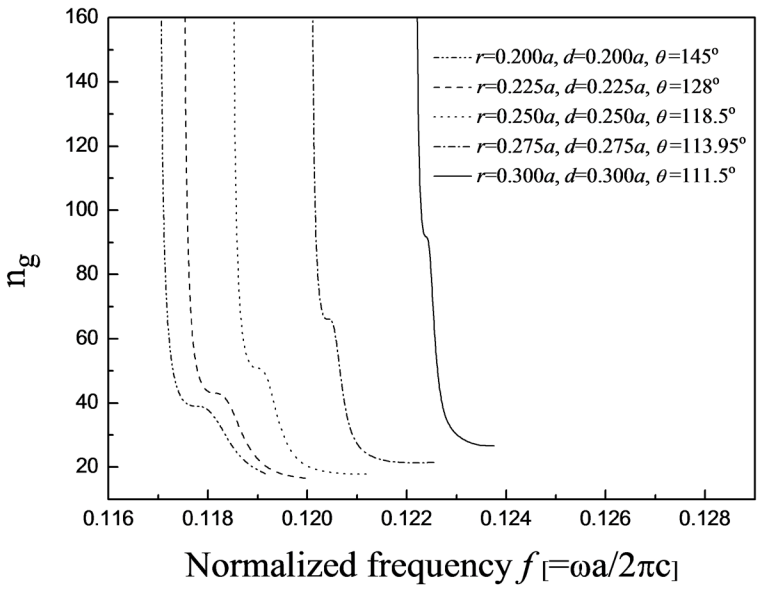

Figure 5. Group refractive index curve of face to face line defect waveguides
图5. 面对面型线缺陷波导的群折射率曲线

Table 1. $n_g, \Delta\lambda, n_g\Delta\omega/\omega, v_g$ in face-to-face line defect waveguide
表1. 面对面型线缺陷波导的 $n_g, \Delta\lambda, n_g\Delta\omega/\omega, v_g$

r	d	θ	n_g	$\Delta\lambda$	$n_g\Delta\omega/\omega$	v_g
0.200a	0.200a	145°	39.0	8.5	0.213	0.026c
0.225a	0.225a	128°	43.2	7.6	0.211	0.023c
0.250a	0.250a	118.5°	51.0	5.1	0.169	0.020c
0.275a	0.275a	113.95°	66.1	3.9	0.166	0.015c
0.300a	0.300a	111.5°	91.9	2.1	0.122	0.011c

范围的平带带宽，对应的晶格常数为 35.86 μm。

根据 3.1 中给出的公式，计算其各自的群速度、归一化延迟带宽积和带宽，见表 1。其中 $\Delta\lambda$ 的误差是±10%，单位是 nm。

根据式(6)，取 $\lambda=1550$ nm，使 n_g 保持在±10%的变化范围内，计算各个模型的色散常数 D，如图 6 所示。

D 的单位是 ps/mm·nm，计算当 $|D|\le 1$ 时，波长的变化范围，即带宽，如表 2 所示，其最大值可达 3.1 nm。若令 $f=1$ Thz，带宽可达 1641.2 nm。

3.4. 背对背型线缺陷波导的慢光特性分析

将图 3 中的散射元全部旋转 180˚，得到背对背型线缺陷波导结构，见图 7。

研究方法同 3.3，计算其群折射率，寻找比较理想的慢光模型，如图 8 所示。各个模型的参数与面对面型的基本一致，只是个别角度有细微的变化。

$r=0.3a, d=0.3a, \theta=111.7^\circ$ 时，$n_g=92.6$，为最大值。群折射率可以实现 39.0~92.6 的可调范围。

表 3 为 $\lambda=1550$ nm 时，各个参数模型所对应的群折射率、带宽、归一化延迟带宽积和群速度，此时晶格常数 $a=185.28$ nm。

Table 2. a and $\Delta\lambda$ for $|D|\le 1$ in face to face line defect waveguides

表2. 面对面型线缺陷波导 $|D|\le 1$ 时的a及 $\Delta\lambda$

n_g	a (nm)	$\|D\|$	$\Delta\lambda$ (nm)
39.0	182.5	≤1.0	3.1
43.2	183.1	≤1.0	2.1
51.0	184.4	≤1.0	0.8
66.1	186.6	≤1.0	0.3

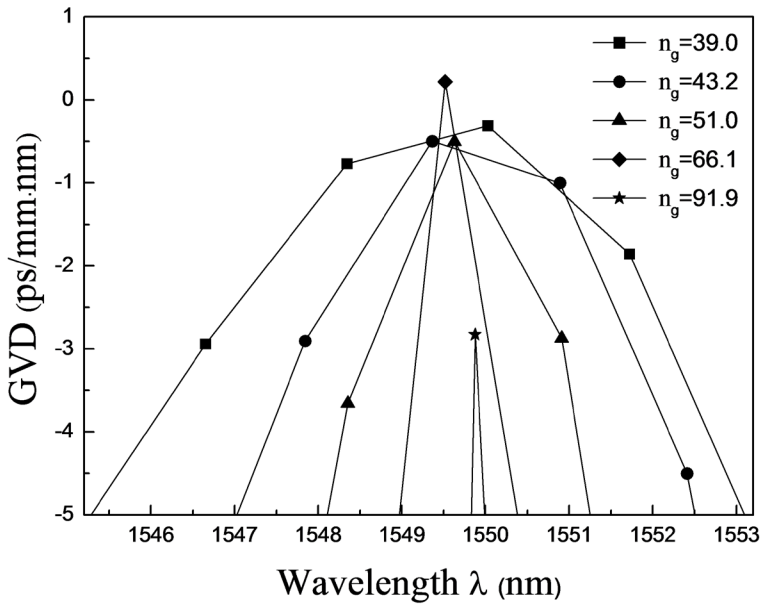

Figure 6. GVD curves of face to face line defect waveguides

图6. 面对面型线缺陷波导的GVD曲线

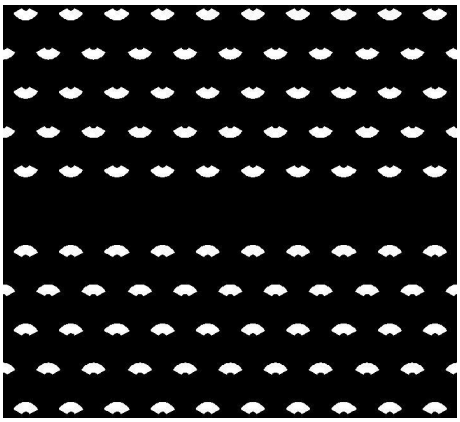

Figure 7. Back-to-back line defect waveguide
图7. 背对背型线缺陷波导

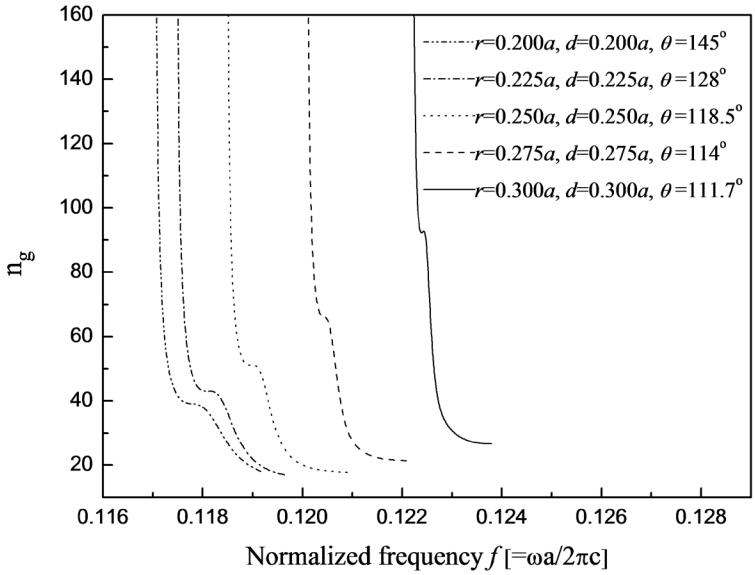

Figure 8. Group refractive index curve of back-to-back linear defect waveguides
图8. 背对背型线缺陷波导的群折射率曲线

Table 3. $n_g, \Delta\lambda, n_g\Delta\omega/\omega, v_g$ in back-to-back face line defect waveguides
表3. 背对背型线缺陷波导的 $n_g, \Delta\lambda, n_g\Delta\omega/\omega, v_g$

r	d	θ	n_g	$\Delta\lambda$	$n_g\Delta\omega/\omega$	v_g
0.200a	0.200a	145°	39.0	8.5	0.215	0.026c
0.225a	0.225a	128°	43.0	7.6	0.211	0.023c
0.250a	0.250a	118.5°	51.0	5.1	0.168	0.020c
0.275a	0.275a	114°	66.1	3.9	0.166	0.015c
0.300a	0.300a	111.7°	92.6	2.1	0.123	0.011c

由表 3 可知，带宽的变化范围为 8.5 nm，最大归一化延迟带宽积为 0.215。若取 $f=1$ Thz，即 $\lambda=300$ μm，平带带宽可实现 397.2~1649.6 nm 的变化范围，晶格常数为 35.862 μm。

取 $\lambda=1550$ nm，$\Delta n_g=\pm 10\%$，计算其色散常数 D，如图 9 所示。由表中数据得，$|D|\le 1$ 时，最大带宽可达 2.73 nm。取 $f=1$ Thz，最大带宽可达 1649.6 nm。

同样的，$|D|\le 1$ 的带宽值可由表 4 表示，D 的单位还是 ps/mm·nm。

3.5. 旋转 30˚后线缺陷波导的慢光特性分析

将图 3 中的扇面形散射元对称旋转 30˚，得到旋转 30˚线缺陷波导，如图 10 所示。

利用控制变量法，寻找比较理想的群折射率曲线，如图 11 所示。对应的参数分别为：$r=0.2a$，$d=0.2a$，$\theta=160^\circ$，$n_g=36.2$；$r=0.225a$，$d=0.225a$，$\theta=140^\circ$，$n_g=41.1$；$r=0.25a$，$d=0.25a$，$\theta=128^\circ$，$n_g=49.8$；$r=0.275a$，$d=0.275a$，$\theta=120.5^\circ$，$n_g=63.7$；$r=0.3a$，$d=0.3a$，$\theta=114.8^\circ$，$n_g=83.3$，为最大值。即通过调控参数，此模型可以实现群折射率从 36.2 到 83.3 的调谐。

表 5 列出了工作波长 $\lambda=1550$ nm 时，各个参数模型的群折射率、带宽、归一化延迟带宽积和群速度，此时晶格常数 $a=187.88$ nm 。

由表 5 可以看出，平带带宽可实现 3.0~10.8 nm 的调谐，最大归一化延迟带宽积为 0.253，最小的群速度为 0.012c。若令工作频率 $f=1$ Thz，平带带宽可实现 583.2~2094.3 nm 的变化。图 12 为 $\lambda=1550$ nm

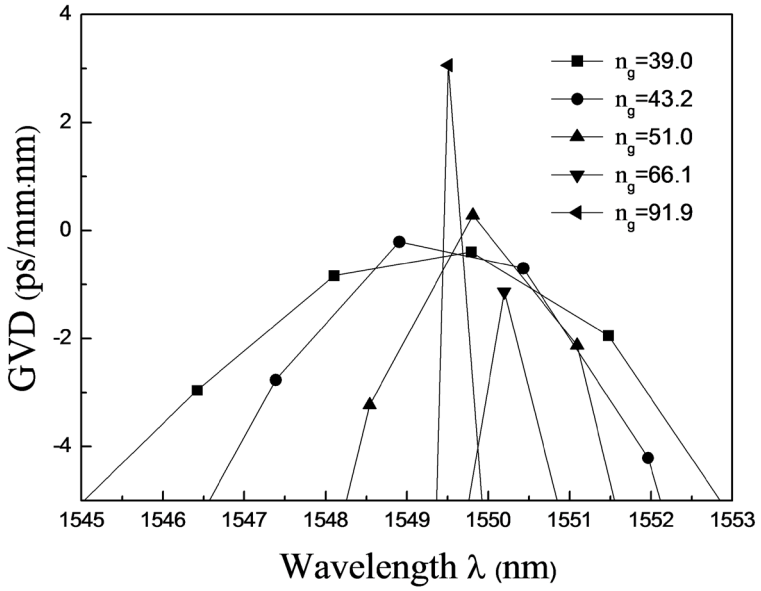

Figure 9. GVD curve of a back-to-back line defect waveguide
图9. 背对背型线缺陷波导的GVD曲线

Table 4. a and $\Delta\lambda$ for $|D|\le 1$ in back-to-back line defect waveguides
表4. 背对背型线缺陷波导 $|D|\le 1$ 时的a及 $\Delta\lambda$

n_g	a (nm)	$\|D\|$	$\Delta\lambda$ (nm)
39.0	182.5	≤1.0	2.73
43.0	183.1	≤1.0	2.26
51.0	184.4	≤1.0	1.26
66.1	186.7	≤1.0	0
92.6	189.7	≤1.0	0.62

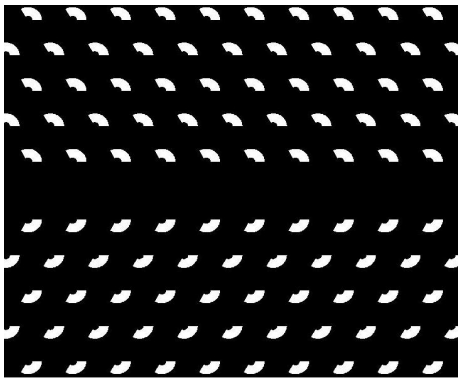

Figure 10. Rotating 30˚ post-line defective waveguide
图10. 旋转30度线缺陷波导

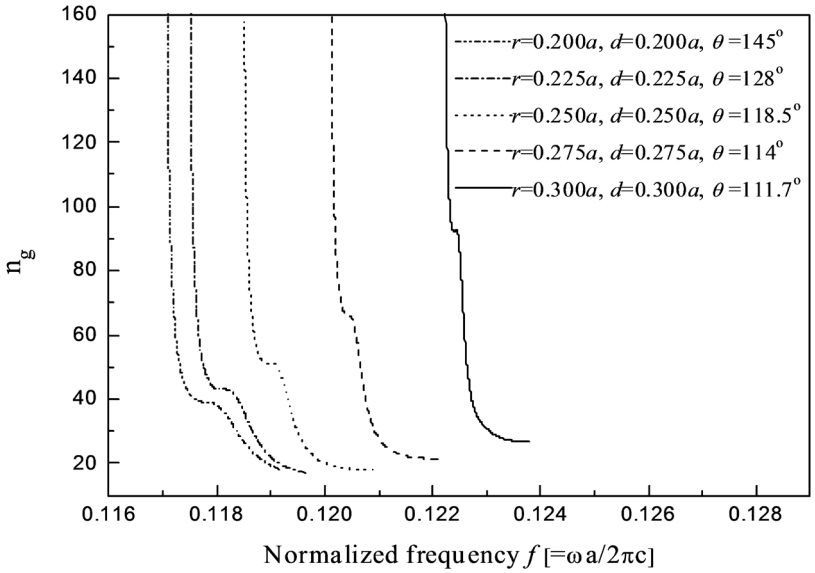

Figure 11. The group refractive index curve of a linear defect waveguide after rotation 30˚
图11. 旋转30˚后线缺陷波导的群折射率曲线

Table 5. $n_g, \Delta\lambda, n_g\Delta\omega/\omega, v_g$ in a linear defect waveguide after rotation 30˚
表5. 旋转30˚后线缺陷波导的 $n_g, \Delta\lambda, n_g\Delta\omega/\omega, v_g$

r	d	θ	n_g	$\Delta\lambda$	$n_g\Delta\omega/\omega$	v_g
0.200a	0.200a	160°	36.2	10.8	0.253	0.028c
0.225a	0.225a	140°	41.1	8.1	0.209	0.024c
0.250a	0.250a	128°	49.8	6.8	0.206	0.020c
0.275a	0.275a	120.5°	63.7	4.0	0.162	0.016c
0.300a	0.300a	114.8°	83.3	3.0	0.162	0.012c

时，散射元旋转 30˚后线缺陷波导的色散常数曲线。

表 6 为 $\lambda = 1550$ nm，$|D| \le 1$ 时的 a 值及带宽值。可见，带宽的最大值可达 4.3 nm。若令 $f = 1$ Thz，

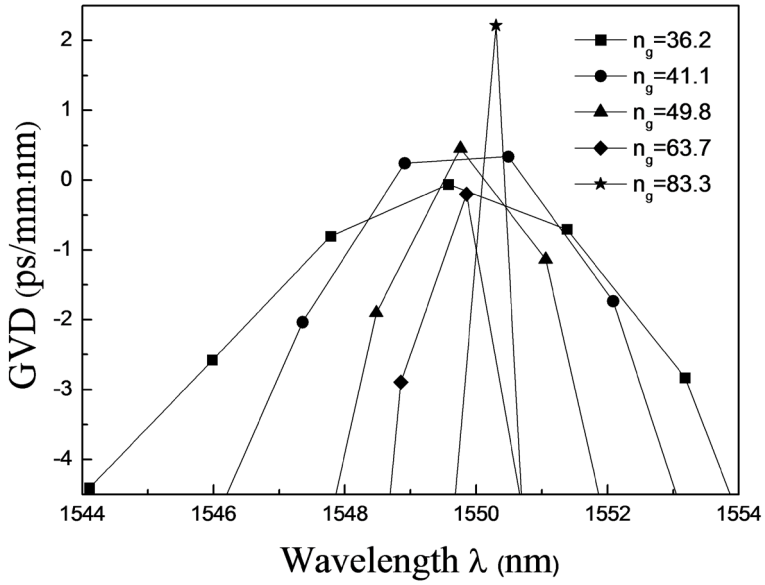

Figure 12. GVD curve of the waveguide with line defects after rotation 30˚
图12. 旋转30˚后线缺陷波导的GVD曲线

Table 6. a and $\Delta\lambda$ in a linear defect waveguide after rotation 30˚ when $|D|\le 1$
表6. 旋转30˚后线缺陷波导$|D|\le 1$时的a及$\Delta\lambda$

n_g	a (nm)	$\|D\|$ (ps/mm·nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
36.2	184.3	≤1.0	4.3
41.1	189.1	≤1.0	3.6
49.8	186.5	≤1.0	2.1
63.7	188.6	≤1.0	0.5
83.3	190.9	≤1.0	0.5

则带宽最大可达 2094.3 nm。

3.6. 三种模型的比较分析

对于面对面型和背对背型线缺陷波导结构，比较表 1 和表 3 可知，无论是群折射率和带宽，还是归一化延迟带宽积和群速度，这两种模型的数据结果几乎完全相同，只有很细微的差别，可以认为无差别。比较表 2 和表 4，可以看出，$|D|\le 1$时，两种模型的带宽值有一定的差别，并且无明显的大小关系。比如，$r=d=0.2a$时，面对面线缺陷型波导结构的带宽值为 3.1 nm，背对背型线缺陷波导结构的带宽值为 2.73 nm，前者大于后者。而当$r=d=0.225$时，面对面型波导的带宽值为 2.1 nm，背对背型波导的带宽值为 2.26 nm，前者小于后者。当$n_g=66.1$时，面对面型波导的带宽值为 0.3 nm，但背对背型波导在$n_g=66.1$时却无带宽。当$n_g=91.9$时，面对面型波导无带宽值，而背对背型在$n_g=92.6$时的带宽值为 0.62 nm。

对于面对面型和旋转 30˚后线缺陷波导结构，比较表 1 和表 5 可知，对于群折射率，旋转 30˚后波导结构的数值均比面对面型的要小，因此群速度值均比面对面型波导结构的大。同时，旋转 30˚后的带宽值均比面对面型的要大。而对于归一化延迟带宽积，却没有明确的大小关系。比如，$r=d=0.2a$时的带宽积，面对面型要小于旋转 30˚后的；但$r=d=0.225a$时的带宽值，面对面型的要大于散射元旋转 30˚后的波导结构。对于$|D|\le 1$时的带宽值，面对面型波导结构明显小于旋转 30˚后的波导结构。

4. 结论

本文用扇面形散射元构建六边形空气孔型光子晶体线缺陷波导结构，利用控制变量法，调节散射元的结构参数，分别计算其 TM 模式下的色散曲线，进而得到其群折射率、群速度、带宽、归一化延迟带宽积和色散常数。分别对面对面型、背对背型和旋转 30˚后的线缺陷波导结构进行计算，经过比较分析可以得到：通过优化，采用面对面型或背对背型模型，都可以实现较好的慢光效果，优化结构的归一化延迟带宽积分别为 0.213，0.215，只是结构参数不同；旋转 30˚后的模型，可以很好实现波导的慢光平带带宽值变大，优化结构的归一化延迟带宽积为 0.253，也有明显提高，但对于较高的群折射率这一优势不明显。在具体的研究中，可以视具体需要选择结构模型、参数等，通过优化设计，获得较理想的慢光效果。

基金项目

本文国家自然科学基金(11144007)和山东省自然科学基金(ZR2016AM27)资助课题。

参考文献

[1] 李正华, 薛燕陵, 沈廷根. 光子晶体内的慢光及其应用[J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 3-6.

[2] 陈培专, 侯国付, 索松, 等. 基于一维光子晶体的新型背反射器及其在非晶硅薄膜太阳电池中的应用[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 077301.

[3] 朱志宏, 叶卫民, 袁晓东, 等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1237-1240.

[4] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059

[5] John, S. (1987) Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486

[6] 刘会, 刘丹, 赵恒, 等. 空气环型二维光子晶体完全带隙特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 194208.

[7] 邓开发, 是度芳, 蒋美萍, 等. 光子晶体研究进展[J]. 量子电子学报, 2004, 21(5): 555-564.

[8] 蔡青, 黄昌清, 梁培, 等. 基于平面波展开法的二维光子晶体表面模式研究[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 430-435.

[9] 陈海燕, 黄小莉, 刘永智. 平面光波导光场分布的有限时域差分法计算[J]. 光子学报, 2001, 30(2): 214-217.

[10] 张小贝, 黄德修, 洪伟, 等. 传输矩阵法分析微环谐振器阵列传输特性[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1585-1592.

[11] Chassagneux, Y., Colombeli, R., Maineult, W., *et al*. (2009) Electrically Pumped Photonic Crystal Terahertz Lasers Controlled by Boundary Condition. *Nature*, **457**, 174-178. https://doi.org/10.1038/nature07636

[12] 刘建静, 郝伟, 刘锴, 等. 光折变材料的带隙结构研究[J]. 量子光学学报, 2007, 13(1): 47-51.

[13] Liang, Q., Li, D. and Yang, G. (2012) Fabrication of Diamond-Structured Multiceramic Coupling Photonic Crystal and Its Ultra-Wide Bandgap Properties. *Microwave and Optical Technology Letters*, **54**, 2569-2572. https://doi.org/10.1002/mop.27134

[14] Wan, Y., Fu, K., Li, C. and Yun, M. (2013) Improving Slow Light Effect in Photonic Crystal Line Defect Waveguide by Using Eye-Shaped Scatterers. *Optics Communications*, **286**, 192-196. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.025

[15] 万勇, 付凯, 云茂金, 郭月, 夏临华. 调整圆弓形散射元参数实现低群速和低色散的慢光效应[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1-7.

[16] 万勇, 韩文娟, 贾明辉, 云茂金, 郭月, 孙蕾. 圆弓形散射元构建的耦合波导的慢光特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0313001.

[17] Wan, Y., Ge, X., Xu, S., Guo, Y. and Yuan, F. (2017) Ultra-Slow Light Effects in Symmetric and Asymmetric Waveguide Structures with Moon-Like Scatters. *Frontier of Physics*, **12**, Article ID: 124204.

[18] Wan, Y., Xu, S., Li, M.-X., Liu, M.-N., Jiang, C.-Y. and Yuan, F. (2018) Slow Light Effect with High Group Index and Wideband by Saddle-Like Mode in PC-CROW. *Frontier of Physics*, **13**, Article ID: 134202.

[19] Wang, D., Zhang, J., Yuan, L., *et al*. (2011) Slow Light Engineering in Polyatomic Photonic Crystal Waveguides Based on Square Lattice. *Optics Communications*, **284**, 5829-5832. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.07.080

[20] 池灏, 蒋铭, 赵焕东, 等. 光子晶体光纤的非线性效应及其应用研究进展[J]. 半导体光电, 2003, 24(5): 297-300.

[21] 吴冰冰, 何晓东, 薛伟, 等. 一位非线性光子晶体全光开关的数值研究[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 293-297.

[22] Wan, Y., Ge, S., Guo, Y., *et al*. (2014) Application of 2D Graded Eye-Shape Scatters for Slow Light Effect in Photonic Crystal Line Defect Waveguide. *Optik*, **125**, 1605-1609. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.10.015

[23] Li, M., Li, L., Zhang, X., *et al*. (2013) The Slow Light in the Closed-Packed Face-Centered Cubic Photonic Crystal: Characteristics and Application Design. *Optical and Quantum Electronics*, **45**, 1107-1113. https://doi.org/10.1007/s11082-013-9727-8

Hans汉斯

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD
   下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 http://cnki.net/
   左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：app@hanspub.org