

圆弓形散射元构建的耦合波导的慢光特性研究

万 勇 韩文娟 贾明辉 云茂金 郭 月 孙 蕾

青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071

摘要 选取高品质因数的圆弓形散射元微腔构建耦合波导,通过改变散射元参数和耦合腔散射元平移等方法,得出光子晶体耦合腔波导结构的慢光变化规律,并实现很好平带下的极高群折射率。模拟结果显示,不同微腔个数的耦合波导,通过调整短轴/长轴之比和散射元平移等方式,不仅可以获得各种平带慢光曲线,还可以获得群折射率从 4.10×10^4 到 1.35×10^5 的超低慢光结构。

关键词 集成光学;圆弓形;散射元;慢光;耦合波导;光子晶体

中图分类号 TN202; TN203

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0313001

Slow Light Effect of Coupled Waveguide with Eye-Shaped Scatterers

Wan Yong Han Wenjuan Jia Minghui Yun Maojin Guo Yue Sun Lei

College of Physics Science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract Based on coupled waveguide with eye-shaped scatterer cavities with high-quality Q values, operations such as changing the parameters of the scatterers and changing those of the coupling cavities reveal the patterns about the variation of slow light effect on photonic crystal coupled waveguide and can achieve very high group index within the flat band. Simulations prove that regardless of the number of coupling cavities, slow light with decent flat band and structures with ultra-slow light and group index between 4.10×10^4 and 1.35×10^5 can be achieved by adjusting the ratio of the major axis to the minor axis and by shifting the scatterers.

Key words integrated optics; eye-shaped; scatterer; slow light; coupled waveguide; photonic crystal

OCIS codes 130.5296; 160.5298

1 引 言

慢光由于具有较低的群速度,可以广泛应用于光学延时线和缓冲器等领域。光子晶体慢光,由于其结构微小紧凑、传输损耗少和室温运行等特点,在全光通信系统和全光信息处理的应用中具有无可比拟的优势^[1-4]。光子晶体慢光波导主要有两种形式:线缺陷波导和点缺陷耦合波导。研究指出,虽然线缺陷波导^[5-9]中色散相对较小,容易获得较好的慢光平带,但群折射率相对较小,因此群速度相对较大;耦合波导可以实现较高的群折射率,但很难获得很好的慢光平带。所以,如何能获得较小的群速度,又具有很好的慢光平带,成为研究慢光效应新的课题。

对于点缺陷耦合波导,要获得较好的慢光效果,可通过只调整微腔半径或者在调整微腔半径同时调整其周围空气孔的半径^[10-12],改变相邻微腔的距离或改变缺陷柱半径及其周围介质柱的位置^[13-14],在线缺陷波导中引入高品质因数 Q 微腔或者量子点微腔^[15-16]等。这些方法在获得较高群折射率或者慢光平带方面都取得了很好的效果,也被广泛应用于光子晶体光纤结构的研究^[17-18]。但是上述研究主要集中在结构的周期性排列方面,只有少量研究改变了散射元的形状^[19-21],而且往往只考虑达到较高群折射率或者是有很好的慢光平带的效果,没有考虑在同一模式下同时实现二者的可能性。

本课题组提出一种新型散射元——圆弓形散射元,它容易形成禁带、具有多个自由度可以调控和两个

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(11144007)

作者简介: 万 勇(1965—),男,博士,教授,主要从事光子晶体和电磁场方面的研究。E-mail: wanyong@qdu.edu.cn

侧面的曲率不变(引起的色散小)等特点,并将其成功应用于线缺陷波导^[22-24]。本文将圆弓形散射元应用到光子晶体耦合腔波导,获得了圆弓形散射元构成高品质因数的微腔参数,主要通过散射元形状变化和周期性排列平移两种方式优化了耦合波导结构参数,获得了较高群折射率,且有很好慢光平带的结构,实现了耦合慢光波导结构的优化。

2 模 拟

图 1 是圆弓形散射元构成的各种微腔示意图。图 1(a)微腔为 1 个圆弓散射元,图 1(b)微腔为(1+2+1)个圆弓散射元,图 1(c)微腔为(2+3+2)个圆弓散射元,这些微腔是构建耦合波导基本元素。为了研究方便,几种结构都为三角晶格结构,假设材料为硅片(折射率 $n_{\text{Si}} = 3.5$),设结构的晶格常数为 a ,参数 b 和 c 分别代表圆弓形散射元长轴和短轴的半径,并定义参数 $e=1-c/b$,它可以从 0 到 1 变化。

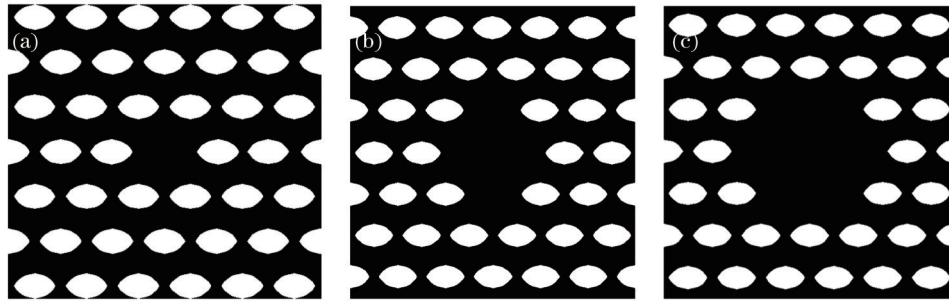


图 1 圆形散射元构成的微腔耦合波导示意图。(a)微腔为 1 个散射元;(b)微腔为(1+2+1)个散射元;(c)微腔为(2+3+2)个散射元

Fig.1 Schematic diagrams of cavity coupled waveguide with eye-shaped scatterers. (a) 1-scatterer cavity; (b) (1+2+1)-scatterer cavity; (c) (2+3+2)-scatterer cavity

模拟过程大致分为三个步骤: 1) 选取高品质因数的微腔,根据晶格常数 a ,调整参数 b 和 e (从而决定 c),根据 Q 值的变化,选取高品质因数的微腔; 2) 设计多个微腔构建的耦合波导,除了图 1 中的几种微腔通过谐振形成耦合波导结构,还可以采用微腔和线波导耦合、线波导和线波导耦合等方式,构建的新的耦合波导结构; 3) 在横电模式 (TE) 下,分析和优化各种波导结构,根据品质因数较好时参数 b 的值,寻找散射元平移 d_s 一定时,不同 e 值耦合波导禁带结构中的慢光导模及参数 e 一定时,不同平移值 d_s 耦合波导禁带结构中的慢光导模。

Q 值是根据微腔中能量(由信号发生器发出)的实时分布得出的。微腔孤立模式的衰减公式为

$$U(t) = U_0 \exp(-\alpha t), \quad (1)$$

式中 U_0 为腔内初始能量, $U(t)$ 表示以衰减因子 α 衰减后 t 时刻微腔所对应的能量。以一个共振频率 f 为中心的模式,微腔对应的品质因数 Q 可表示为

$$Q = 2\pi f / \alpha. \quad (2)$$

幸运的是,模拟计算结果表明:对于图 1 中的三种微腔,参数 b 为 $0.2a \sim 0.5a$, e 为 $0.2 \sim 0.5$ 时,微腔的品质因数都超过 8.0×10^3 ,属于较理想的范围。

慢光结构计算采用的是平面波展开法 (PWE),按轴向选取 32×32 个平面波,离散网格采用 $a/64$,本征值的计算精度为 10^{-8} 。

众所周知,群折射率 n_g 可以表示为

$$n_g = \frac{c}{v_g} = c \frac{dk_0}{d\omega}, \quad (3)$$

式中 c 为光速, v_g 为群速度, ω 是入射波(脉冲)的中心角频率, $k_0 = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda$, n_{eff} 是有效折射率, λ 是工作频率的波长。将 k_0 代入(3)式进一步展开得到

$$n_g = n_{\text{eff}} + \omega \frac{dn_{\text{eff}}}{d\omega}. \quad (4)$$

对慢光而言,通常 $n_g \gg n_{\text{eff}}$, 则(4)式近似为

$$n_g \approx \omega \frac{\Delta n}{\Delta \omega}. \quad (5)$$

简化得

$$n_g \frac{\Delta \omega}{\omega} \approx \Delta n, \quad (6)$$

式中 $n_g \Delta \omega / \omega$ 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

$$\Delta n_{\text{max}} = \frac{k_{\text{max}}}{f_1} - \frac{k_{\text{min}}}{f_2} \approx \frac{k_{\text{max}} - k_{\text{min}}}{f_1}. \quad (7)$$

为了计算和图示方便,慢光色散曲线用归一化波矢($k = k_0 a / 2\pi$)和归一化频率($f = a / \lambda = \omega a / 2\pi c$)表示, k_{max} 与 k_{min} 分别为最大和最小归一化波矢, f_1 和 f_2 分别是其所对应的归一化频率。通常慢光色散曲线较平缓, f_1 和 f_2 变化很小,可近似相等。在布里渊区中,归一化波矢 k 有特定的最大值与最小值,具体每一条慢光色散曲线也对应特定的归一化频率 f , Δn_{max} 会有上限,相应的延迟带宽积也必须小于某一特定值。在实际操作中,不得不在高群折射率和带宽之间做出取舍。

根据 k 和 f 的定义,(3)式可变为

$$n_g = \frac{dk}{df}. \quad (8)$$

2.1 微腔为 1 个圆弓散射元构建的耦合波导结构

图 2(a)是微腔为 1 个圆弓散射元构建的耦合波导结构示意图。图 2(b)是在不同参数 ds 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 ds 表示图 2(a)中方框内结构发生的水平平移,参数 $b=0.4a$ 和 $e=0.4$ 保持不变。可见,在 $k > 0.42$ 时, $ds=0.18a$ 和 $ds=0.20a$ 两条曲线有很好的平带。图 2(c)是在不同参数 e 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 $b=0.4a$ 和 $ds=0.18a$ 保持不变。同样,在 $k > 0.42$ 时, $e=0.35$ 和 $e=0.40$ 两条曲线有很好的平带。图 2(d)是结构中群折射率 n_g 随归一化频率 f 变化的规律,它是结合图 2(b)和图 2(c)选出的最优化结果,根据(8)式计算而得(下同),此时参数 $b=0.4a$ 、 $e=0.40$ 和 $ds=0.18a$ 都保持不变,在 $f=0.2188$ 时,

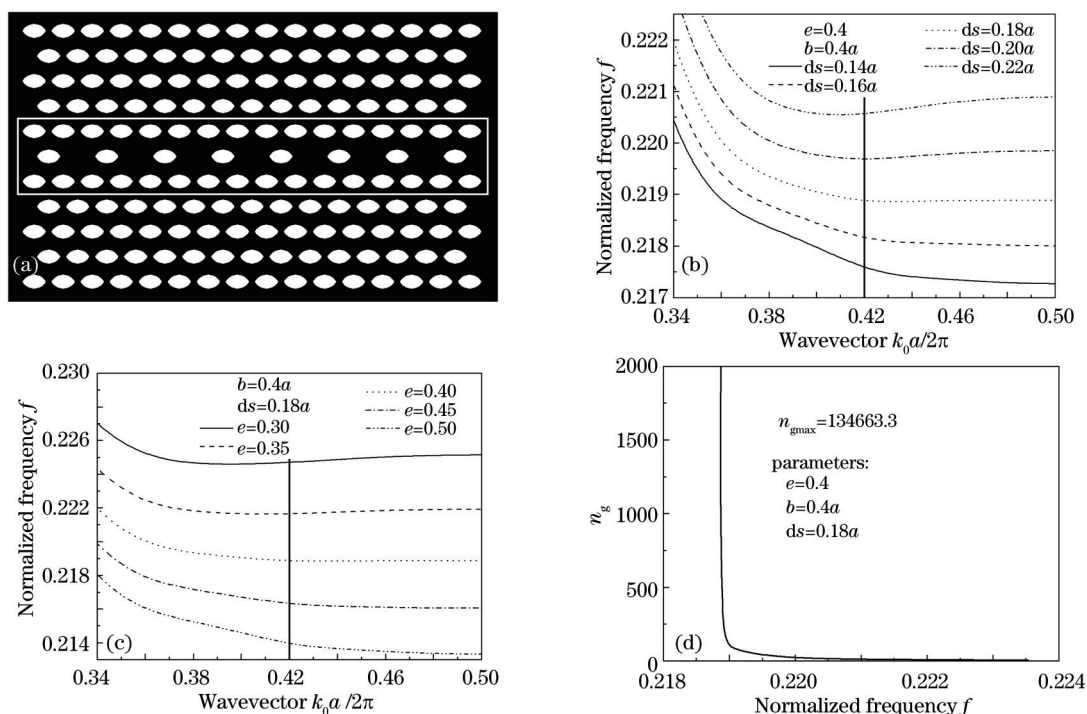


图 2(a)微腔为 1 个散射元的耦合波导结构示意图;(b) f 随参数 ds 和 k 的变化规律;(c) f 随参数 e 和 k 的变化规律;
(d) n_g 和 f 之间的变化规律

Fig.2 (a) Schematic diagram of 1-scatterer cavity coupled waveguide; (b) relationship between f with different values of ds and k ; (c) relationship between f with different values of e and k ; (d) relationship between n_g and f

n_g 取最大值,约为 1.35×10^5 ,并随 k 增加而迅速衰减。

2.2 微腔为(1+2+1)个圆弓散射元构建的耦合波导结构

图 3(a)是微腔为(1+2+1)个圆弓散射元构建的耦合波导结构示意图。图 3(b)是在不同参数 ds 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律。同样,参数 ds 表示图 3(a)中方框内结构发生的水平平移,参数 $b=0.4a$ 和 $e=0.4$ 保持不变。可见, k 在 0.36~0.40 范围内, $ds=0.12a$ 这条曲线有相对好的平带。图 3(c)是在不同参数 e 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 $b=0.4a$ 和 $ds=0.12a$ 保持不变。同样, k 在 0.36~0.40 范围内, $e=0.40$ 和 $e=0.45$ 两条曲线有很好的平带。图 3(d)是结构中群折射率 n_g 和归一化频率 f 之间的变化规律,此时参数 $b=0.4a$ 、 $e=0.40$ 和 $ds=0.116a$ 都保持不变,在 $f=0.2419$ 时, n_g 随 f 变化的函数出现峰值,接近 2.5×10^4 。

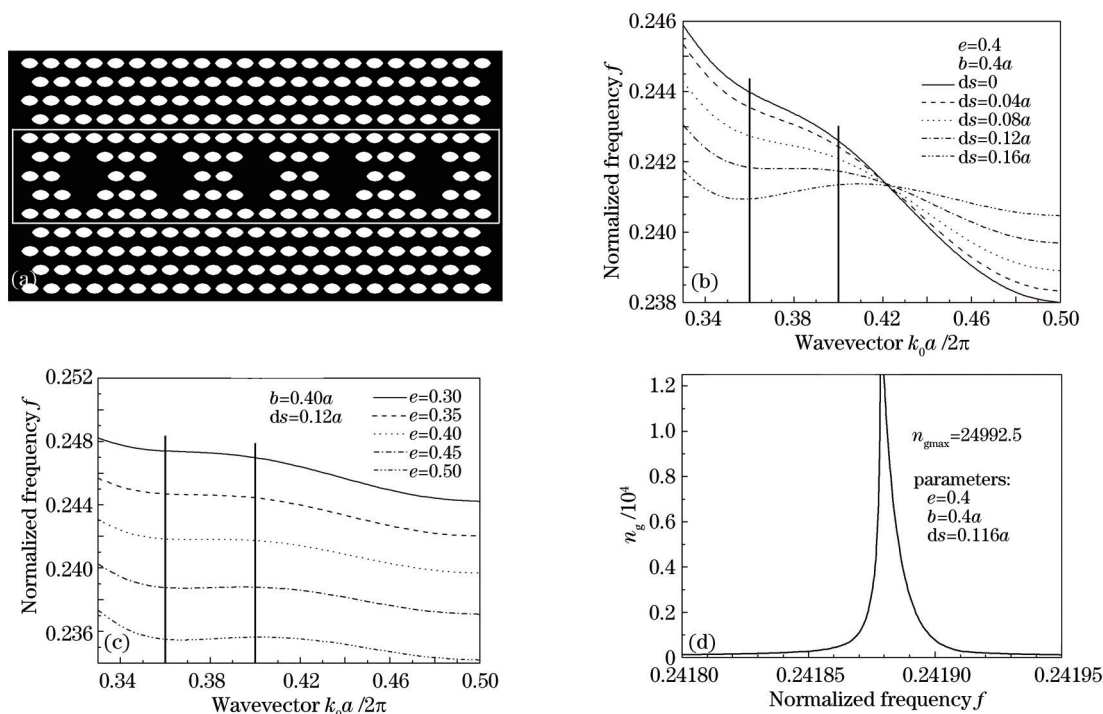


图 3 (a)微腔为(1+2+1)个散射元的耦合波导结构示意图;(b) f 随参数 ds 和 k 的变化规律;(c) f 随参数 e 和 k 的变化规律;(d) n_g 和 f 之间的变化规律

Fig.3 (a) Schematic diagram of (1+2+1)-scatterer cavity coupled waveguide; (b) relationship between f with different values of ds and k ; (c) relationship between f with different values of e and k ; (d) relationship between n_g and f

取图 3(d)中峰值的一半,记为 $n_{g0}=n_{gmax}/2=1.25 \times 10^4$,其对应横坐标的宽度记为 $\Delta f=4.2 \times 10^{-6}$,此宽度范围内归一化频率 f 所对应的群折射率均在 n_{g0} 之上,这一宽度越大对应着越大的带宽。 n_g 越大,象征着更小的群速度;带宽越大,代表着更好的数据传递能力。两者的综合效果可用延迟带宽积 $n_g \Delta \omega / \omega$ 表示,对应图 3 模型,其值为 0.217,其中 $n_g=n_{g0}$, $\Delta \omega$ 由 Δf 转换而来, ω 对应最大 n_g 时的归一化频率 f 。

值得注意的是,本课题组之前的研究^[22-23]中也讨论过延迟带宽积的概念,它与本文中的概念既有联系又存在区别:联系是二者都用来表示慢光模型中群折射率和带宽两者的综合效果;区别在于,前者是在保证低色散慢光的基础上取定的 n_g 和所允许带宽的综合表述,本文是以保证较大群折射率为前提选取的 n_g 和所允许带宽的综合效果。

2.3 微腔为(2+3+2)个圆弓散射元构建的耦合波导结构

图 4 (a)是微腔为(2+3+2)个圆弓散射元构建的耦合波导结构示意图。图 4(b)是在不同参数 ds 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律。同样,参数 ds 表示图 4(a)中方框内结构发生的水平平移,参数 $b=0.4a$ 和 $e=0.35$ 的保持不变。可见, $k > 0.44$ 时, $ds=0$ 、 $ds=0.05a$ 和 $ds=0.10a$ 三条曲线都有相对好的平带。图 4(c)是在不同参数 e 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 $b=0.4a$ 和 $ds=0$ (没有平移) 保持不变。同样, $k > 0.44$ 时, $e=0.30$ 、 $e=0.35$ 和 $e=0.40$ 三条曲线有很好的平带。图 4(d)是结构中群折射率 n_g 和归一化频率 f 之

间的变化规律,此时参数 $b=0.4a$ 、 $e=0.35$ 和 $ds=0$ 都保持不变,在 $f=0.2418$ 时, n_g 取最大值 4.1×10^4 ,并随 k 的增加而迅速衰减。

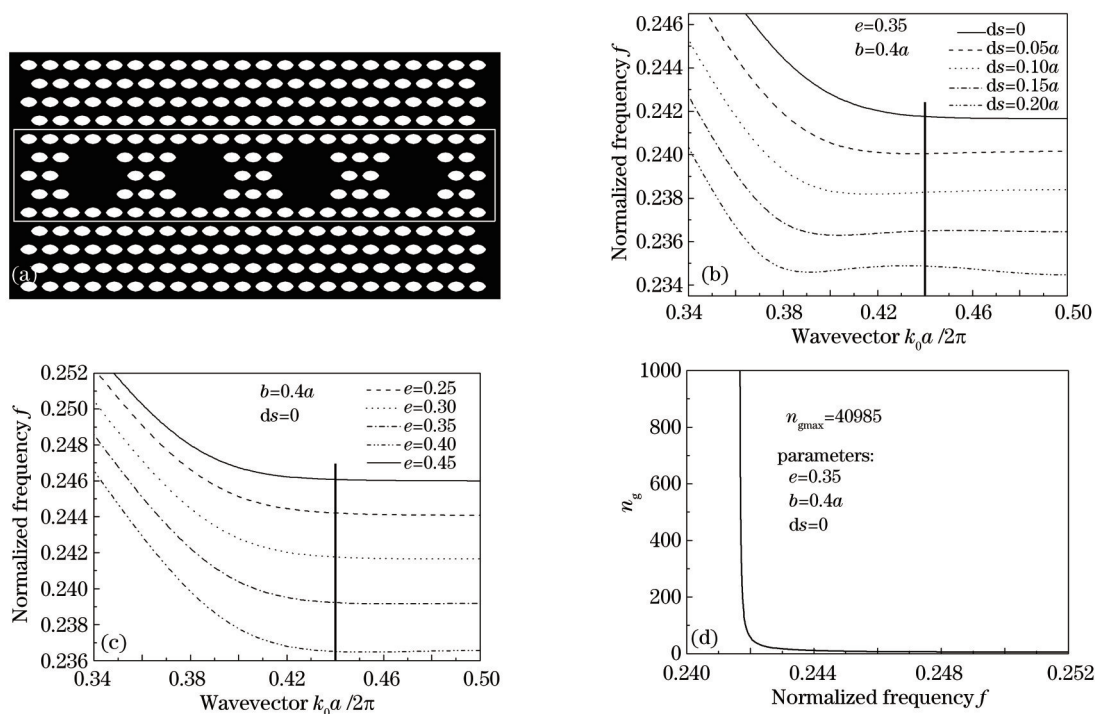


图4 (a)微腔为(2+3+2)个散射元的耦合波导结构示意图;(b) f 随参数 ds 和 k 的变化规律;(c) f 随参数 e 和 k 的变化规律;(d) n_g 和 f 之间的变化规律

Fig.4 (a) Schematic diagram of (2+3+2)-scatterer cavity coupled waveguide; (b) relationship between f with different values of ds and k ; (c) relationship between f with different values of e and k ; (d) relationship between n_g and f

2.4 两个微腔为1个圆弓散射的波导与线缺陷波导耦合

图5(a)是两个微腔为1个圆弓散射的波导与线缺陷波导耦合示意图。图5(b)是在不同参数 ds 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律。同样,参数 ds 表示图5(a)中方框内结构发生的水平平移,参数 $b=0.4a$ 和 $e=0.24$ 保持不变。可见, $k>0.40$ 时, $ds=0$ 和 $ds=0.05a$ 两条曲线都有相对好的平带。图5(c)是在不同参数 e 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 $b=0.4a$ 和 $ds=0$ (没有平移)保持不变。同样, $k>0.40$ 时, $e=0.20$ 、 $e=0.24$ 和 $e=0.28$ 三条曲线有很好的平带。图5(d)是结构中群折射率 n_g 和归一化频率 f 之间的变化规律,此时参数 $b=0.4a$ 、 $e=0.24$ 和 $ds=0$ 都保持不变,在 $f=0.2238$ 时, n_g 取最大值,接近 3×10^4 ,并随 k 的增加而迅速衰减。

2.5 两个线缺陷波导耦合

图6(a)是两个线缺陷波导耦合示意图,其构成是两个缺失一行散射元的线波导,并将其中间一行散射元绕各自中心旋转 90° 。图6(b)是在不同参数 ds 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 ds 表示图6(a)中间一行散射元发生的水平平移,参数 $b=0.42a$ 和 $e=0.3$ 保持不变。可见, k 在 $0.36\sim 0.40$ 范围, $ds=0.17a$ 和 $ds=0.18a$ 两条曲线都有相对好的平带。图6(c)是在不同参数 e 下,归一化频率 f 随归一化波矢 k 的变化规律,参数 $b=0.42a$ 和 $ds=0.175a$ 保持不变。同样, k 在 $0.36\sim 0.42$ 范围, $e=0.25$ 、 $e=0.30$ 和 $e=0.35$ 三条曲线有很好的平带。图6(d)是结构中群折射率 n_g 和归一化频率 f 之间的变化规律,参数 $b=0.42a$ 、 $e=0.3$ 和 $ds=0.175a$ 都保持不变,在 $f=0.2254$ 时, n_g 随 f 变化的函数出现峰值,接近 8.2×10^4 。

与图3中模型类似,取图6(d)中峰值的一半 $n_{g0} = 4 \times 10^4$,同样对应横坐标有一定的宽度 $\Delta f = 5.6 \times 10^{-6}$,此模型下对应的 $n_g \Delta \omega / \omega = 0.99$,这是一个趋向于1的值。说明与图3中模型相比,该模型下的参数结果更为理想。

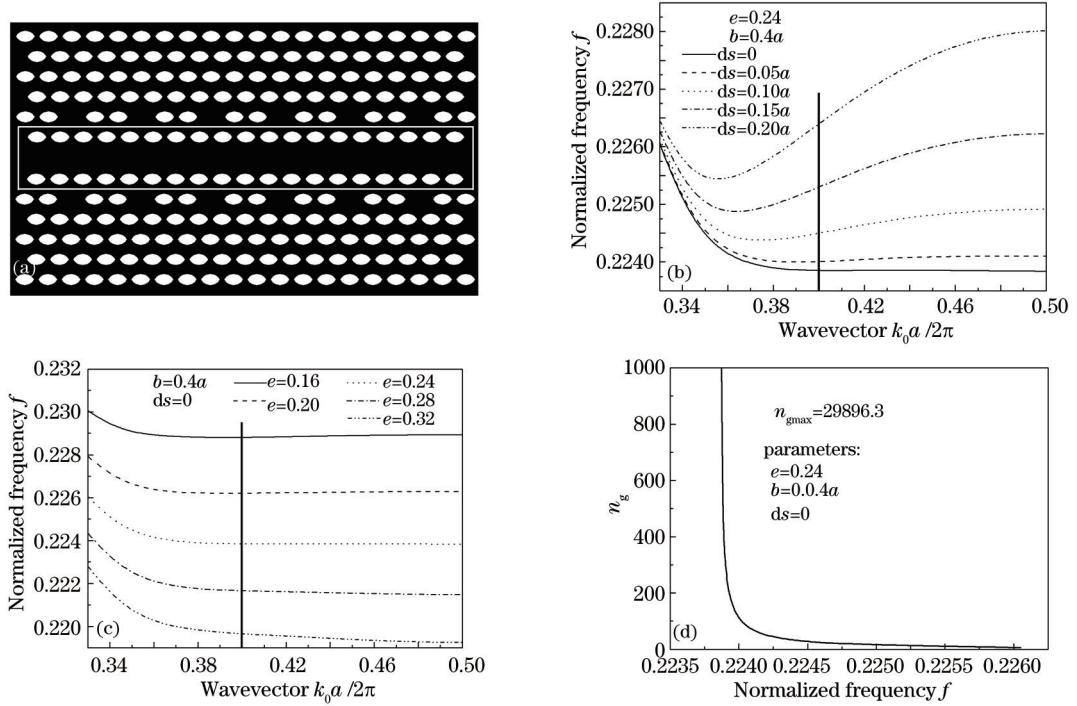


图 5 (a) 两个微腔为 1 个散射元的波导与线缺陷波导耦合; (b) f 随参数 ds 和 k 的变化规律; (c) f 随参数 e 和 k 的变化规律; (d) n_g 和 f 之间的变化规律

Fig.5 (a) Schematic diagram of two 1-scatterer cavity waveguides coupled with line defect waveguide; (b) relationship between f with different values of ds and k ; (c) relationship between f with different values of e and k ; (d) relationship between n_g and f

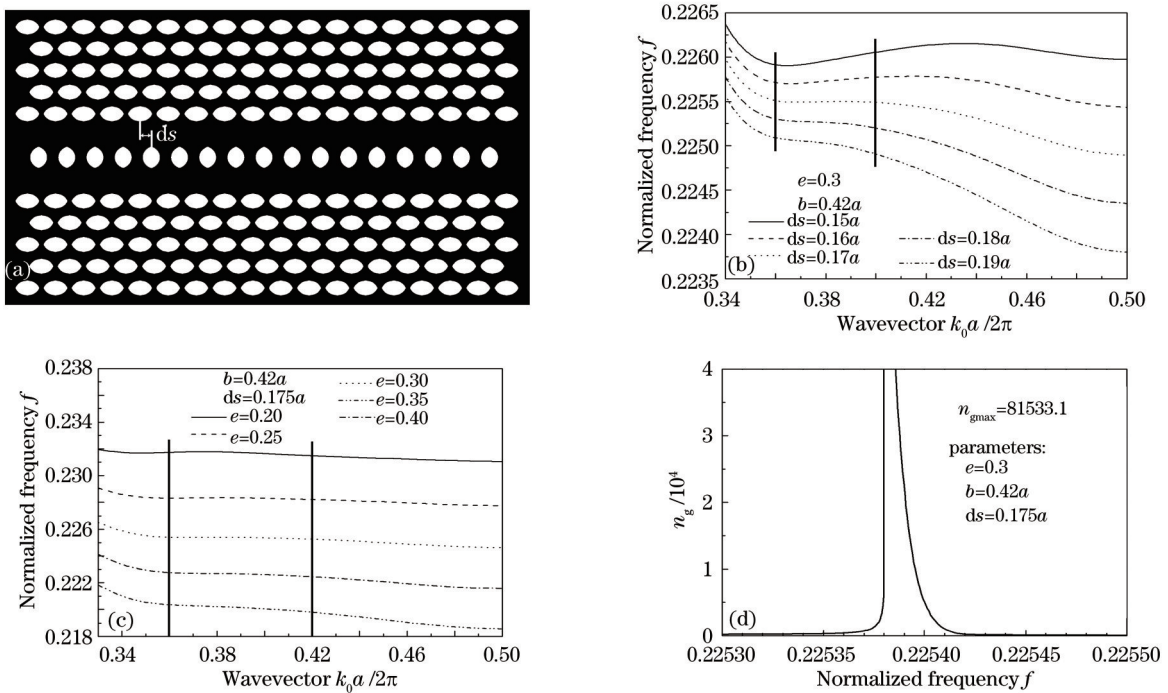


图 6 (a) 两个线缺陷波导耦合; (b) f 随参数 ds 和 k 的变化规律; (c) f 随参数 e 和 k 的变化规律; (d) n_g 和 f 之间的变化规律

Fig.6 (a) Schematic diagram of two line defect waveguides coupling; (b) relationship between f with different values of ds and k ; (c) relationship between f with different values of e and k ; (d) relationship between n_g and f

3 结果和讨论

第2节的各种模拟结果表明:虽然慢光平带的宽度与群折射率有关,但不同微腔个数的点缺陷耦合波导或者线缺陷耦合波导,可以通过调整散射元本身或者平移周期性排列,在一定范围内实现较好的慢光平带曲线,找到较大的群折射率,实现超低慢光效应。表1和表2分别呈现了各个模型中平移量 ds 和参量 e 在一定范围内变动时,较好平带情况下,对应的最大群折射率。说明如果参数在较大范围内变动时,也能得到很高的群折射率。这对实际应用有很重要的意义,因为对参数精度要求的适当放宽,相应的加工难度就会大大降低。本文中的部分模型已经达到了这一效果。

表1 各模型中较好平带对应的平移量 ds 及其最大群折射率 n_{gmax}

Table 1 Parameter ds with good flat band and maximum group index n_{gmax} for different models

| Model | Fig.2(b) | | Fig.3(b) | | Fig.4(b) | |
|-----------------|----------|------|----------|------|----------|------|
| ds/a | 0.18 | 0.20 | 0.12 | 0 | 0.05 | 0.10 |
| $n_{gmax}/10^3$ | 135 | 5.58 | 3.78 | 41.0 | 9.75 | 5.95 |
| Model | Fig.5(b) | | Fig.6(b) | | | |
| ds/a | 0 | 0.05 | 0.17 | 0.18 | | |
| $n_{gmax}/10^3$ | 29.9 | 1.21 | 5.62 | 2.01 | | |

表2 各模型中较好平带对应的参量 e 及其最大群折射率 n_{gmax}

Table 2 Parameter e with good flat band and maximum group index n_{gmax} for different models

| Model | Fig.2(c) | | Fig.3(c) | | Fig.4(c) | |
|-----------------|----------|------|----------|------|----------|------|
| e | 0.35 | 0.40 | 0.40 | 0.45 | 0.30 | 0.35 |
| $n_{gmax}/10^3$ | 8.57 | 135 | 3.78 | 2.70 | 5.86 | 41.0 |
| Model | Fig.4(c) | | Fig.5(c) | | Fig.6(c) | |
| e | 0.40 | 0.20 | 0.24 | 0.28 | 0.25 | 0.30 |
| $n_{gmax}/10^3$ | 6.33 | 18.7 | 29.9 | 3.65 | 7.62 | 8.15 |

慢光波导由于具有较高的群折射率,可以实现较低的群速度,所以在全光通信处理信号及其他领域有着广泛的应用。慢光的一个重要标志就是较大的群折射率,如表3中所示,本文通过建立不同的光子晶体波导模型,优化模型中的各个参量,实现了一系列较高的群折射率。

表3 各模型中的优化参数及最大群折射率

Table 3 Optimized parameters and maximum group index for different models

| Model | b/a | e | ds/a | f | n_{gmax} |
|-------|-------|------|--------|--------|--------------------|
| Fig.2 | 0.4 | 0.4 | 0.18 | 0.2188 | 1.35×10^5 |
| Fig.3 | 0.4 | 0.4 | 0.116 | 0.2419 | 2.5×10^4 |
| Fig.4 | 0.4 | 0.35 | 0 | 0.2418 | 4.1×10^4 |
| Fig.5 | 0.4 | 0.24 | 0 | 0.2238 | 3.0×10^4 |
| Fig.6 | 0.42 | 0.3 | 0.175 | 0.2254 | 8.2×10^4 |

可见,只要选择适当的参数,结构会有极高的群折射率,从而具有很好的应用价值。为了获得近乎零散射的效果或者更高群折射率,可能还可以对上述参数做更精准的微调,如图4(d)所示,如果优化 ds, n_g 可以获得更大的值。还可以采取散射元偏转、变形或改变散射元介电常数,以及改变相邻微腔的距离或相邻两行散射元的距离等方式,实现既有较高群折射率,又有较好的平带的结构。

另外,图3和图6中模型与其他模型不同,实现了较理想的“座椅”状色散曲线。该形状的色散曲线中,同时存在正色散、负色散和平带慢光等因素,主要利用色散补偿原理,如图7(a)所示,实现较低色散慢光。前一部分的正(或负)群速度色散能被后一部分的负(或正)群速度色散所补偿恢复,对于整个波导,总体的色散在补偿后会变小很多,从而降低信号传递过程中的失真程度,实现较理想的慢光效果。

而对于图2、图4和图5中模型,在布里渊区边界处易形成较大的群折射率,主要是利用后向散射原理,如图7(b)所示。由于光子晶体介质的介电常数呈周期性结构分布,则光信号在散射元的边界上会发生散射

现象,一部分光波被散射后产生后向传输光波。当入射光波满足第一布里渊区边界条件,即波矢 $k=0.5(2\pi/a)$ 时,前向传输的光波与向后散射的光波在振幅和相位上是相同的,这样就会形成驻波,也就是零群速度慢光,这是理想情况。若入射光波远离第一布里渊区边界条件时,前向传输光波与后向散射光波逐渐不满足干涉条件,则光波就以正常速度传播。若入射光波在一定范围内偏离布里渊区边界条件,前向和后向传输光波的分量虽然在相位上不会一致,但是它们通过相互作用,也会形成慢速移动的干涉模式,从而形成慢光模式^[21]。

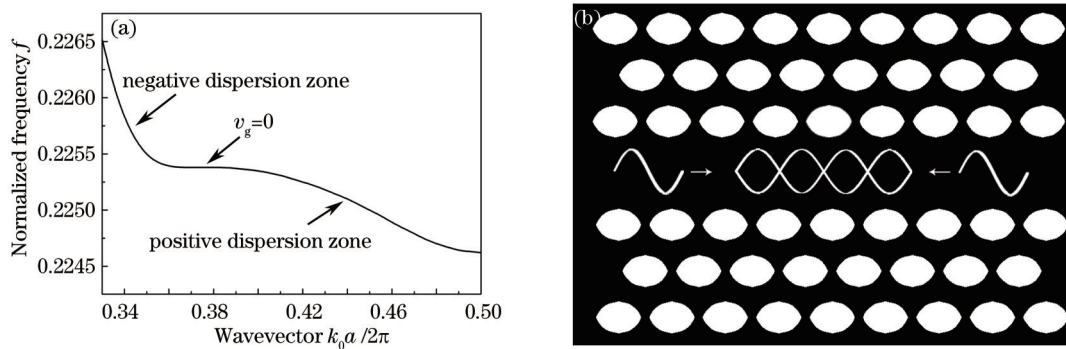


图 7 (a) 色散补偿原理;(b) 后向散射原理

Fig.7 (a) Mechanism of dispersion compensation; (b) back-scattering theory

4 结 论

采用圆弓形构建光子晶体耦合波导,可以通过调整散射元本身或者平移周期性排列,从而在一定条件下获得较高群折射率,在一定范围内实现较好的慢光平带曲线,实现慢光波导结构的优化。研究结果不仅改变了人们对光子晶体耦合波导的认识,也提出了改善耦合波导慢光的一些有效方法,为耦合波导结构在光缓存、非线性光学、相位调制等具体领域提供了更好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Z Shi, R W Boyd, D J Gauthier, *et al.*. Enhancing the spectral sensitivity of interferometers using slow-light media [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(8): 915-917.
- 2 T Baba. Slow light in photonic crystals [J]. *Nat Photon*, 2008, 2: 465-473.
- 3 T F Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides [J]. *J Phys D*, 2007, 40(9): 2666-2670.
- 4 S Assefa, S J McNab, Y A Vlasov. Transmission of slow light through photonic crystal waveguide bends [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(6): 745-747.
- 5 R J P Engelen, Y Sugimoto, Y Watanabe, *et al.*. The effect of higher-order dispersion on slow light propagation in photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2006, 14(4): 1658-1672.
- 6 A Y Petrov, M Eich. Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(21): 4866-4868.
- 7 M D Settle, R J P Engelen, M Salib, *et al.*. Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth [J]. *Opt Express*, 2007, 15(1): 219-226.
- 8 B Wang, M A Dündar, R Nötzel, *et al.*. Photonic crystal slot nanobeam slow light waveguides for refractive index sensing [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(15): 151105.
- 9 Wu Jun, Li Yanping, Peng Chao, *et al.*. Numerical demonstration of slow light tuning in slotted photonic crystal waveguide using microfluidic infiltration [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(8): 2149-2152.
- 10 T Baba, T Kawasaki, H Sasaki, *et al.*. Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide [J]. *Opt Express*, 2008, 16(12): 9245-9253.
- 11 S C Huang, M Kato, E Kuramochi, *et al.*. Time-domain and spectral-domain investigation of inflection-point slow-light modes in photonic crystal coupled waveguide [J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 3543-3549.
- 12 Tian Huiping, Long Fang, Liu Weijia, *et al.*. Tunable slow light and buffer capability in photonic crystal coupled-cavity waveguides

- based on electro-optic effect [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(10–11): 2760–2764.
- 13 K Tian, W Arora, S Takahashi, *et al.*. Dynamic group velocity control in a mechanically tunable photonic-crystal coupled-resonator optical waveguide [J]. *Phy Rev B*, 2009, 80(13): 134305.
- 14 G Manzacca, H Habibian, K Hinger, *et al.*. Coupled cavity polaritons for switching and slow light applications [J]. *Photonics and Nanostructures–Fundamentals and Applications*, 2009, 7(1): 39 – 46.
- 15 Zhang Dong, Zhao Jianlin, Lü Shuyuan. Slow light waveguide with low group-velocity dispersion and low loss in 2D photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0113001.
张 栋, 赵建林, 吕淑媛. 低群速度色散和低损耗的二维光子晶体慢光波导[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0113001.
- 16 Qu Lianjie, Yang Yuede, Huang Yongzhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0113002.
曲连杰, 杨跃得, 黄永箴. 光子晶体波导慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0113002.
- 17 Yun Maojin, Liang Jian, Ren Liyong, *et al.*. Design and optimization of slow light photonic bandgap fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0406005.
云茂金, 梁 健, 任立勇, 等. 带隙型光子晶体光纤慢光特性的优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0406005.
- 18 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.*. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fibers with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0505003.
李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0505003.
- 19 Chen Xiyao, Shum Ping, Hu Juanjuan. Special control of the cutoff frequencies in a 2D photonic crystal coupled-cavity waveguide [J]. *Opt Commun*, 2007, 276(1): 93–96.
- 20 V S C Manga Rao, S Hughes. Single quantum dots for slow and fast light in a planar photonic crystal [J]. *Opt Lett*, 2007, 32: 304–306.
- 21 Hou Jin, Wu Huaming, Mo Wenqin, *et al.*. Wideband slow light in chirped slot photonic crystal coupled waveguides [J]. *Opt Express*, 2010, 18(10): 10567–10580.
- 22 Wan Yong, Yun Maojin, Pan Shudi, *et al.*. Fabrication and characterization of THz waveguides with silicon wafer by using cylinder segments as scatterers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222004.
万 勇, 云茂金, 潘淑娣, 等. 圆弓形散射元构建的二维硅基太赫兹波导研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222004.
- 23 Yong Wan, Kai Fu, Changhong Li, *et al.*. Improving slow light effect in photonic crystal line defect waveguide by using eye-shaped scatterers [J]. *Opt Commun*, 2013, 286: 192–196.
- 24 Wan Yong, Fu Kai, Yun Maojin, *et al.*. Slow light effect with low group velocity and low dispersion by adjusting parameters of cylinder-segment scatters [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0106002.
万 勇, 付 凯, 云茂金, 等. 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(1): 0106002.

栏目编辑: 史 敏