

文章编号:1004-4213(2010)10-1791-5

利用冲击波作用光子晶体产生蓝光的研究*

袁纵横^{1,2}, 邢雅丹^{2,†}, 张文涛², 黄静¹

(1 贵州民族学院 物理与电子信息科技学院, 贵阳 550025)

(2 桂林电子科技大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:研究了一种利用冲击波作用光子晶体产生蓝光的新方法. 通过模拟光子晶体受冲击波作用后折射率的变化, 对 470 nm 蓝光, 设定光子晶体的参量, 研究了冲击波引起光子晶体带隙的变化, 计算了需要冲击波的速度, 分析了影响蓝光线宽和中心波长的因素. 结果表明, 变频后的光波线宽随冲击波和固定反射面的距离而变化, 距离大时, 线宽较小, 距离小时, 线宽较大, 可以利用光子晶体的滤波作用对输出光波线宽进行控制, 获得带宽稳定的或变化的输出光波. 环境温度变化、光子晶体材料吸收特性影响光子晶体的带隙分布, 进而影响蓝光的中心波长. 研究结果对研制新的蓝光光源具有重要参考价值, 同时也为其他相干光源的产生提供了一种新的技术.

关键词:光子晶体; 冲击波; 蓝光; 频率变换

中图分类号: O734

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103910.1791

0 引言

近年来随着光子晶体理论^[1-2]的深入研究, 基于对入射到光子晶体禁带的光产生全反射这一特点, 利用光子晶体实现光学频率变化已成为一个新的研究领域.

冲击波作用光子晶体实现光学频率变换技术是利用冲击波调制光子晶体的介电常量和晶格常量, 实现对入射光频率的变换. 由于光波频率远离于材料的共振频率, 光子被吸收小, 故能量变换效率非常高.

蓝光在蓝绿激光对潜通信、彩色激光显示、高密度光存储、海洋水色和海洋资源探测, 此外还有望在激光和刷术、激光医学、生化技术、材料科学和光通信等许多领域得到广泛的应用. 故研究产生蓝光的技术具有极其重要的意义和实际的应用价值.

利用冲击波作用光子晶体实现光学频率变换的研究最早是由美国麻省理工学院以 Joannopoulos 教授为首的光子晶体研究组于 2003 年 9 月^[3]提出的, 近几年, 国内的研究也进行了相关的研究^[4], 开展了利用高斯脉冲光和冲击波在一维光子晶体中实现了光学频率变换的理论分析和模拟仿真的研究. 但尚未有利用此种技术用于产生具体的光波及分析产生输出光波的线宽和中心波长的因素. 本文将此种频率变换方法用于产生蓝光, 在理论上研究

了利用冲击波作用光子晶体实现由绿光到蓝光的转变, 并分析了影响蓝光线宽和中心波长的因素.

1 光子晶体折射率的变化

设冲击波的速度为 v , t 时刻波前位于 $z_{sw} = vt$ 处, 则光子晶体以冲击波波前为界分成了两个部分, 冲击波未作用部分光子晶体的位移和折射率分别为

$$r(z, t) = 0 \quad (1)$$

$$n(z, t) = n(z) \quad (2)$$

若光子晶体的晶格周期为 a , 则受冲击波作用部分光子晶体的位移和折射率分别为

$$r(z, t) = 2a(z - vt) \quad (3)$$

$$n(z, t) = n(z + 2a(z - vt)) \quad (4)$$

由式(3)和(4)得到两个光子晶体的周期分别为 $a, a/(1+2a)$. 若取压缩比 $\alpha = 0.5$, 即压缩后的光子晶体的晶格周期变为 $a/2$.

当冲击纵波以行波形式在介质中传播时, 会使介质折射率产生正弦或余弦规律变化; 考虑到制作光子晶体材料的常用折射率, 并结合课题组的研究情况, 本文选用未压缩的光子晶体的折射率表达式为

$$n(\hat{x} = z/a) = 2.6 + 1.6 \sin(2\pi\hat{x}) \quad (5)$$

根据式(4)得到压缩后的光子晶体折射率的表达式为

$$n\left[\frac{\hat{x} = \frac{z}{a}, \hat{t} = \frac{ct}{a}}{a, \hat{t} = \frac{ct}{a}}\right] = 2.6 + 1.6 \sin\left(4\pi\hat{x} - 2\pi\nu\frac{\hat{t}}{c}\right) \quad (6)$$

式(6)中 c 表示真空中的光速.

* 贵州省教育厅基金[黔科教(2007050)]资助

† Tel: 0773-2291513

Email: yadanxing@163.com

收稿日期: 2009-10-14

修回日期: 2010-04-16

由式(5)和(6)得到冲击波作用光子晶体前后折射率变化的图形,如图 1.

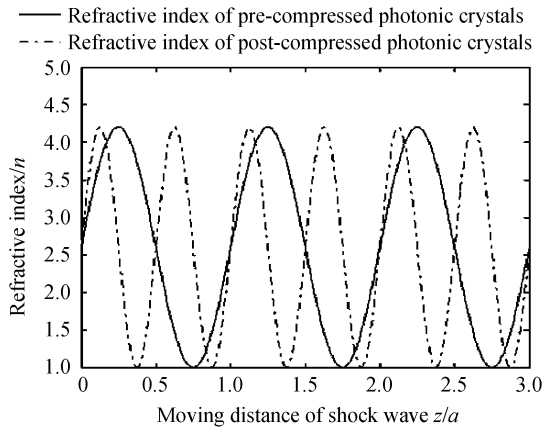


图 1 光子晶体的折射率变化
Fig.1 Variation of refractive index of photonic crystals

从图 1 中可以看到冲击波作用后光子晶体的折射率的周期近似缩小了一倍,压缩前后光子晶体在同一点的折射率发生了改变,如取横坐标的点为: $0.040 2 * a$,则从图 1 中观察到冲击波压缩光子晶体后,光子晶体的高折射率由 3 增大到 3.5.

2 由绿光到蓝光的变换

2.1 变换原理及过程

设光子晶体的具体参量为:

1) 冲击波未作用的部分光子晶体: 中心波长 960 nm, 光学厚度比为 1:7, $D_1 = 60$ nm, $D_2 = 420$ nm, 高低折射率分别为 $n_1 = 3, n_2 = 1.5$;

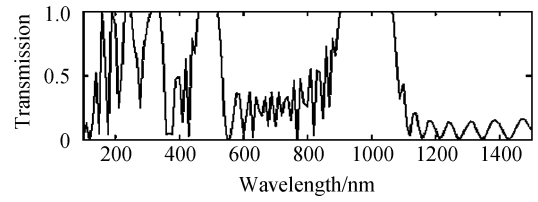
2) 冲击波作用后的部分光子晶体: 中心波长 480 nm, 光学厚度比为 1:7, $D_1 = 30$ nm, $D_2 = 210$ nm, 高低折射率分别为 $n_1 = 3.5, n_2 = 1.5$.

考虑到电磁模密度^[5-6] (Electromagnetic Mode Density, EDOM)在光子禁带很小,在光子透射带是有限振荡起伏的值,在透射带与禁带边缘处有极大增强的现象,其值近似正比于周期数的平方和两种介质折射率差的平方、与光波辐射几率成正比的关系,故本文取光子晶体压缩前的周期数为 23.

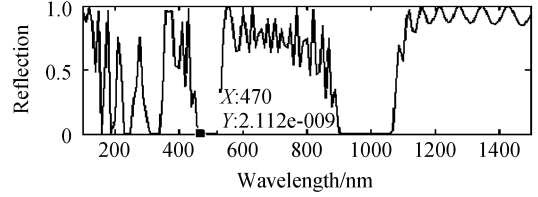
在周期数较多的情况下(加减 10 个以内)光子晶体的带隙结构没有明显的影响,所以压缩后光子晶体的周期数也取为 23.

图 2 是利用传输矩阵法^[7-8]模拟冲击波未作用的部分光子晶体的带隙的分布.

从图 2 和图 3 中可以看到压缩后光子晶体的第一带隙和未压缩的光子晶体的第二带隙发生重叠.冲击波是声波,使晶格产生振动,根据量子理论,可以将其看成是动量为 $\hbar\kappa_s$ 的声子流,光波看成是动量为 $\hbar\kappa_l$,冲击波与光波在光子晶体内相互作用时,



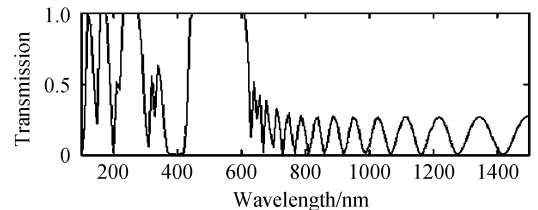
(a) The first band gap



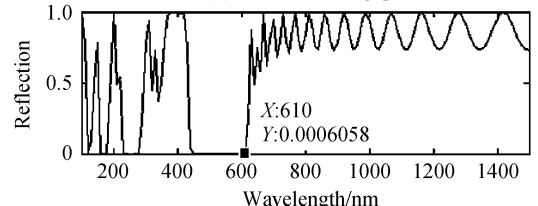
(b) The second band gap

图 2 未压缩光子晶体的带隙的分布情况

Fig.2 Band gap of pre-shock photonic crystals



(a) The first band gap



(b) The second band gap

图 3 压缩后的光子晶体的带隙的分布情况

Fig.3 Band gap of post-shocked photonic crystals

根据动量守恒和能量守恒定律,光子通过不断地吸收声子,其动量和能量发生改变,入射光波的频率会被频移到禁带重叠区域,由于光子晶体本身的禁带特性,光波在局域区域发生多次的来回反射,入射光波的能量不断增加,频率变化到能够逃离局域捕获时输出光波,此时出射光相对于入射光的频率发生了改变.图 2 中未压缩的光子晶体的第二带隙的下边缘大于 525 nm,当入射光的光波以 532 nm 的波长入射到冲击波作用的光子晶体时,入射光波的频率达到未压缩的光子晶体的第二带隙的上边缘 470 nm 时,输出 470 nm 的蓝光,完成了绿光到蓝光的转换.

2.2 冲击波速度的确定

为了简化计算,假设左侧冲击波的发生位置和右侧入射光波的入射位置与光子晶体的距离相等,都为零距离.

若冲击波波前的位置位于

$$z_{sw} = 0.040 2a \tag{7}$$

那么冲击波移动的距离为

$$s_1 = z_{sw} - 0 = 0.040 2a \quad (8)$$

则入射光波在光子晶体中移动的距离为

$$s_2 = 23a - 0.040 2a = 22.959 8a \quad (9)$$

那么入射波到达冲击波波前位置处所需的时间为

$$t = s_2/c = 22.959 8a/c \quad (10)$$

根据光波和声波的碰撞理论,发生多普勒频移,产生频率变换效应,所以冲击波和入射波需同时到达波前所在的位置,才能发生图 2(b)所示的变化,所以得到

$$v = 0.040 2a/(22.959 8a/c) = 0.001 827c \quad (11)$$

所以如果要完成本文中设计绿光到蓝光的转变,冲击波的速度为 0.001 827c.

3 影响蓝光线宽及中心波长的因素

3.1 影响蓝光线宽的因素

由于选取入射光波的入射频率处于压缩后光子晶体的第一禁带内,故可以把波前看作是一个具有空间相关电场的反射系数为 $R(x)$ 的镜面, x 表示其所在的位置,若波前是稳定的,则未压缩的光子晶体的电场表达式为

$$E_1 \exp(ik_1 x) u_{k_1, m}(x) \exp(-i\omega_1 t) = E_0 R(x) \exp(ik_0 x) u_{k_0, m}(x) \exp(-i\omega_0 t) \quad (12)$$

式(12)中 k_0, k_1 分别表示入射波和反射波的波矢量; E_0, E_1 分别表示入射波和反射波的振幅. $R(x)$ 为反射系数,且 $R(x) = \exp(iG(x))$; m 表示禁带指数, $u_{k, m}(x)$ 用来描述光波在移动的冲击波与固定位置反射面之间的来回反射,考虑到光子晶体的周期性 $u_{k, m}(x+a) = u_{k, m}(x)$.

考虑到色散关系表达式,故未压缩光子晶体第二带隙边缘处的反射光波的频率可以表示为

$$\omega = \omega_0 + \beta k^2 \quad (13)$$

式中, β 为常量,入射光波和来回反射的光波比值的表达式

$$\exp(iB(x_0 - vt)) = \frac{u_{k_0, m}(x_0 - vt)}{u_{k_1, m}(x_0 - vt)} \quad (14)$$

由于光子晶体的周期性,得到表达式

$$G(x+a) - G(x) = 2\pi q \quad (15)$$

同时,因为 $u_{k, m}$ 的周期性,得到表达式

$$B(x+a) - B(x) = 2\pi p \quad (16)$$

式中, $p = -1$ 表示未压缩光子晶体的第一带隙的上边缘或下边缘, $p = -2$ 表示未压缩光子晶体的第二带隙的上边缘或下边缘; $q = 1$ 表示压缩后光子晶体的第一带隙, $q = 2$ 表示压缩后光子晶体的第二带隙.

若 D 表示左侧的冲击波波前与右侧的反射面之间的距离,则 k 的净变量的表达式为

$$\Delta k = \frac{1}{2D} \int_{x_0}^{x_0+a} [G'(x) + B'(x)] dx = \frac{\pi(q+p)}{D} \quad (17)$$

式中, $G'(x) B'(x)$ 是对 x 微分,由于本文研究的是压缩后的光子晶体的第一带隙和未压缩光子晶体的第二带隙发生重叠的情况,故取 $q = 1, p = -2$.

式(17)表明波矢量 k 值发生了改变.这主要是因为禁带重叠区的光子与声子的相互作用光的能量得到累积,产生了新频率的光子,即光波的频率发生了改变. $q = 1, p = -2$ 带入式(17),得到 $\Delta k = \pi/D$,表明波前每移动一个晶格常量的距离, k 都绝对地减小 π/D .

随着冲击波不断运动,波前与反射面的距离也在不断的改变,入射光波的波矢量随冲击波波前和反射面的距离的改变而变化,如图 4.

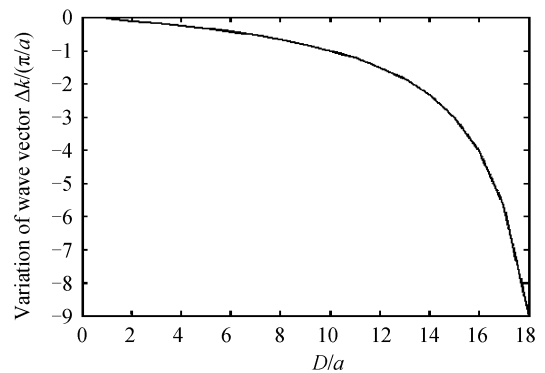


图 4 波矢量的变化情况

Fig. 4 Variation of wave vector

图 4 表明, Δk 随冲击波波前和反射面之间的距离 D 而变化,当 D 较小时, Δk 变化缓慢,当 D 比较大时, Δk 变换很快.

设在带隙边缘的色散关系表达式为

$$\omega = \omega_0 + \beta(k - k_{\text{edge}})^2 \quad (18)$$

式中, k_{edge} 为带隙边缘处的波矢量,对式(18)求导数,得到 $\delta\omega$ 的表达式:

$$\delta\omega = 2\beta(k - k_{\text{edge}}) \delta k \quad (19)$$

结合图 4 和式(19),可以看到,变换后的光波线宽与 Δk 成正比,且随 D 而变化.当 D 较小时, Δk 较大,光波线宽较大,但是线宽随 D 的变化小;而 D 较大时, Δk 较小,因此,光波线宽较小,但光波线宽随 D 的变化大.

由于恰当设计的光子晶体具有极好的滤波作用,因此,可以根据需要,选择光子晶体参量,如晶格常量、周期数等设计出相应线宽的滤波器,将超过需要部分的光滤除,对输出光波的线宽进行控制,从而获得线宽稳定的输出光波.相反,如果需要输出线宽变化的光波,就可以将滤波器的带宽设计宽一些.

3.2 影响蓝光中心波长的因素

在研究压缩后光子晶体的第一带隙和未压缩光

子晶体的第二带隙进行的研究中,入射光波的光子与声子在禁带重叠区域来回碰撞,当光子的频率达到未压缩光子晶体的第二带隙的上边缘时,被反射出来,即蓝光的频率就是未压缩光子晶体的第二带隙上边缘的频率.所以影响蓝光中心波长的因素可以看作是影响未压缩光子晶体的第二带隙的因素.主要从以下几方面加以分析:

1)在光子晶体的制作过程中,由于工艺水平,实验设备等条件的限制,制作出来的光子晶体并不满足严格的空间周期性,与理想光子晶体有一定的随机误差.

2)由于薄膜材料的折射率与温度有关,当外界环境温度变化时,材料的折射率发生变化,会影响到禁带的宽度;同时温度改变时,必然会引起各介质的热形变,由于不同介质的线膨胀系数不一致,将会造成材料占空比变化.从而影响光子晶体的带隙性能改变,进而使蓝光的中心波长发生漂移,可以通过控制温度来消除此影响.

3)由于光子晶体材料很难具有全透明性,所以光子晶体的吸收对光子晶体的能带结构有明显的影响,故光子晶体材料的吸收也会影响蓝光的中心波长,所以在选择光子晶体材料时,应选择消光系数尽可能小的材料.

4 结论

研究了光子晶体实现绿光变蓝光的技术及影响蓝光的线宽和中心波长的因素.变换后的光波线宽与冲击波波前与固定反射面的距离有关,当距离较小时,光波线宽较大;而 D 较大时,光波线宽较小.

利用线宽可调的特点,可以通过设计光子晶体的滤波器带宽,获得带宽稳定的或变化的输出光波.

不但可以研发新的可调谐光源,还可以用作光调制和保密通信中的加密.蓝光具有广泛的应用领域,光子晶体产生变蓝光的技术也将会得到广泛的应用.虽然基于冲击波作用光子晶体的光学频率变换技术处于探索阶段,频率可调的特点具有很大的诱惑力和应用前景.

参考文献

- [1] JONNOPOULOS J D, MEADE R D, WINN J N. Photonic crystals molding the flow of light [M]. Second Edition, Princeton University Press, 2007: 1-283.
- [2] SOKODA K. Optical properties of photonic crystals [M]. Springer, 2001: 1-258.
- [3] REED E J, SOLJACIC M, JOANNOPOULOS J D. The color of shock waves in photonic crystals[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**: 203904.
- [4] ZHANG Xiao-yu, GAO Hong-tao, WANG Chang-tao, et al. Frequency shift effect in photonic crystals modulated by shock wave[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(3): 117-121.
张晓玉,高洪涛,王长涛,等.激波调制光子晶体频率转换效应的研究[J].光电工程,2008,**35**(3):117-121.
- [5] CHEN Wei-zong, ZHENG Xin-liang, FU ling-li, et al. The electromagnetic mode density in one-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 239-242.
陈慰宗,郑新亮,付灵丽,等.一维光子晶体中的电磁模密度[J].光子学报,2003,**32**(2):239-242.
- [6] SAMI S H, KORAY SEVIN. Robustness of one-dimensional photonic band gaps under random variations of geometrical parameters[J]. *Phys Rev B*, 2005, **72**(19): 195101.
- [7] GU Guo-chang, LI Hong-qiang, CHEN Hong-tao, et al. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 728-734.
顾国昌,李宏强,陈洪涛,等.一维光子晶体材料中的光学传输特性[J].光学学报,2000,**20**(6):728-734.
- [8] ZHANG Ling, LIANG Liang, ZHANG Lin-li, et al. Study of Band-structure of 1-D photonic crystals [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.

Blue Light Technology Based Generation by the Interaction Between Shock Wave and Photonic Crystals

YUAN Zong-heng^{1,2}, XING Ya-dan², ZHANG Wen-tao², HUANG Jing¹

(1 *Department of Physics and Electronic Information Science, Guizhou University for Nationalities, Guiyang 550025, China*)

(2 *School of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract: A new method of producing blue light based on the interaction of shockwave and photonic crystal was studied. The change of refractive index of compressed photonic crystals was simulated. At wavelength of 470 nm, parameter of photonic crystals was selected coherently, the variation of band gap was studied, and velocity of shock wave was calculated. The influence factors of linewidth and central wavelength of blue light was analyzed. The results show that the distance between shock wave front and reflecting surface is the dominating factor of blue light's line width. The linewidth of output light varies with the distance between the shock wave and the reflective plane, when the distance is large, the linewidth is small, when the distance is smaller, the linewidth is great. The linewidth of output light can be controlled by the filter of photonic crystal, in order to access stability or change bandwidth of the output light. The change of environmental temperature and absorption characteristics of photonic crystal materials will influence the band gap distribution of photonic crystal, which will further influence the central wavelength of blue light. These results are useful to research and develop new source of blue light, and also provide a new technique to produce other coherent light sources.

Key words: Photonic crystals; Shock wave; Blue light; Frequency change



YUAN Zong-heng was born in 1957 and obtained his Ph. D. degree in optical engineering from University of Electronic Science and Technology of China in 2000. Now he is a professor at Guizhou University for Nationalities, and his research interests focus on optical crystal and relative application.