

空间二次谐波产生对光子晶格结构的影响

王龙飞 杨立森 武一洁 李强 施慧渊

内蒙古师范大学物理与电子信息学院, 内蒙古 呼和浩特 010022

摘要 利用傅里叶变换法在自散焦 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中写入光子晶格的过程中发现, 阵列光束与写入晶格相互作用产生的空间二次谐波对写入晶格的结构具有一定的影响。表现为光子晶格中空间频率的倍频现象, 干涉条纹的分裂现象和布拉格带隙的展宽现象。通过对一维光子晶格中空间二次谐波的数值模拟和理论计算, 证明了空间二次谐波的产生是晶格结构发生改变的主要原因。实验表明, 通过控制空间二次谐波的产生情况可以有效地改变写入光子晶格的内部结构。

关键词 非线性光学; 光子晶格; 傅里叶变换法; 空间二次谐波

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.071901

Influence of Special Second-Harmonic Generation on Photonic Lattice Structure

Wang Longfei Yang Lisen Wu Yijie Li Qiang Shi Huiyuan

*Department of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University,
Huhhot, Inner Mongolia 010022, China*

Abstract Fourier transform is applied to write the lattice structure in self-defocusing $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ crystal. In the process spacial second-harmonic generation is fabricated by array beam interacting with photonic lattice. The spacial second-harmonic generation has an influence on writing the lattice structure. Resulting in spacial frequency-doubling in photonic lattice, cleavage phenomenon of interference fringe in lattice, and Bragg bandgap broadening. The numerical simulations and theoretical calculations of one-dimensional photonic lattice prove that spacial second-harmonic generation is the major cause of affecting lattice structure. Experimental results show that spacial second-harmonic generation can control the internal structure in photonic lattice.

Key words nonlinear optics; photonic lattice; Fourier transform method; spacial second-harmonic

OCIS codes 190.4400; 190.4160; 160.5298; 160.5293

1 引言

自从1987年光子晶体的概念被提出并得到一系列的实验验证以来, 它所具有的独特的光学性质和广阔的应用前景, 吸引了众多研究者投入到这项工作中^[1-5]。光子晶体是介质的折射率在空间呈周期性变化的结构。Yablonovitch等^[6-7]在光子晶体中发现了晶体特殊的周期性结构。某些频率的光波受到抑制, 形成光子禁带; 某些频率的光波能顺利通过, 形成光子的允许带^[8]。从而证实了光子晶体具有光子带隙结构^[9]。这一光学特性在光子晶体的三种结构即一维、二维和三维光子晶体中全部适用^[10]。光子晶体的带隙结构被人们广泛应用于光子晶体器件的研发及改进工作中, 如光子晶体光纤^[11]、光子晶体全光开关^[12]、光子晶体微腔制备无阈值激光器^[13]等。与高维的光子晶体相比较, 一维光子晶体结构简单、易于制造, 同时也具备二维和三维光子晶体的基本性质^[14]。从禁带结构与波长关系、禁带结构与入射角关系、能带结构全貌特征^[8]等多个方

收稿日期: 2013-12-30; 收到修改稿日期: 2014-02-11; 网络出版日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(60467002)、内蒙古自然科学基金(2013MS0926)

作者简介: 王龙飞(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事光折变非线性光学方面的研究。

E-mail: waitforrain2012@163.com

导师简介: 杨立森(1953—), 男, 教授, 主要从事光折变非线性光学方面的研究。E-mail: ylisen@imnu.edu.cn

面对一维光子晶体的能带结构进行了深入的研究,但对于空间二次谐波的产生对一维光子晶体禁带结构的影响并没有相关的报道。本文主要研究运用傅里叶变换法构造一维光子晶格的过程中,阵列光束与写入晶格相互作用所产生的空间二次谐波对写入晶格结构的影响。

2 实验装置与实验方法

2.1 实验装置

实验装置如图1所示,光源是由YAG激光器发出的平行高斯光束,扩束准直系统由半波片P及倒置望远镜系统组成。光束经扩束准直后辐照在振幅掩膜(Mask)上,把光分为同偏振、等光强的 n 束干涉光(n 为振幅掩膜的孔数)。光束通过透镜 L_2 ($f = 300 \text{ mm}$) 聚焦于 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体上,后表面的光强分布由透镜 L_3 ($f = 70 \text{ mm}$) 成像在CCD上。实验用软件可控步进电机作为放置晶体的支座,这样既可以准确地通过步进电机来旋转晶体又可以通过电脑来控制并测量晶体的旋转角度。最后由曝光快门控制晶格写入时间,用小孔光阑控制读出光束的角度及位置。 T_1 、 T_2 作为功率探测器用来探测入射光及读出光的光强。

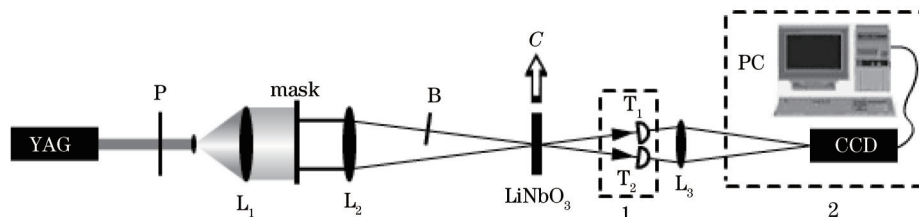


图1 布拉格带隙的实验装置

Fig.1 Experimental device for Bragg bandgap

2.2 实验方法

将由Nd:YAG倍频激光器发出的波长为532 nm、功率为34 mW的高斯光束经半波片P和扩束准直系统后辐照在掩膜上,振幅掩膜分布情况如图2所示,其作用是通过改变振幅掩膜上孔的参数(孔数、孔径、孔距等)有效地控制入射光的光强及晶体中产生布拉格衍射光的分布情况。半波片的作用是调整偏振方向,实验要求偏振方向要与晶体C轴方向平行。此时尽量使振幅掩膜孔径的大小相等,才能保证透射光束达到等光强且同偏振。实验时,相干光束经过透镜 L_2 后照射在晶体的前表面, L_3 的作用是将晶体后表面的光强分布成像在CCD上再由计算机实时呈现在电脑屏幕上,这样就能随时观察到写入晶格的情况。晶格写入后用单孔掩膜和小孔光阑控制光束大小并作为读出光束读出写入晶体的内部结构,观察空间二次谐波的产生情况,当其达到饱和后记下饱和时间。最后由步进电机旋转晶体,用可自动计数的功率探测器测出入射光强、透射光强及衍射光强,并根据透射效率绘出带隙曲线。

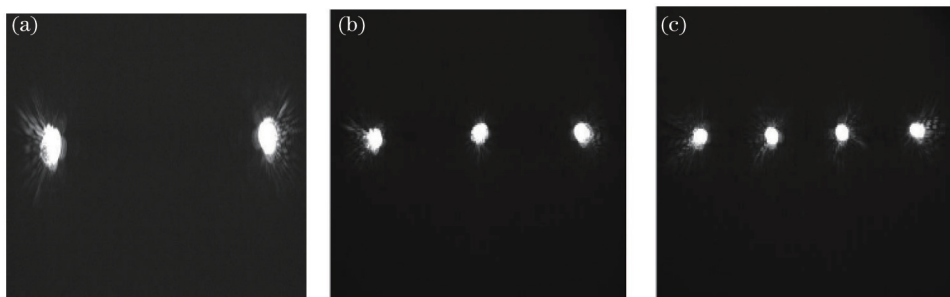


图2 振幅掩膜图样

Fig.2 Amplitude mask pattern

3 实验结果与分析

3.1 光子晶格中空间二次谐波的数值模拟

用傅里叶变换法制作光子晶格时,光束经过振幅掩膜可近似看作形成多束等光强且等偏振的点光源。光束经过傅里叶变换在 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体中构造出光子晶格。在光子晶格的构造过程中,阵列光束与写入晶

格相互作用后产生空间频率的倍频现象。表现为晶格中的干涉图样随时间的延长发生分裂,对于一维光子晶格来说空间二次谐波的产生使干涉条纹一分为二。首先讨论通过掩膜的两束光经透镜聚焦在焦平面上叠加为^[15]

$$u(x,y) = \delta(x-a) \cdot \delta(y) + \delta(x+a) \cdot \delta(y). \quad (1)$$

经傅里叶变换可写为

$$u(\nu_x, \nu_y) = \mathcal{F}[u(x,y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a) \exp(i2\pi\nu_x x) \delta(y) \exp(i2\pi\nu_y y) dx dy + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x+a) \exp(i2\pi\nu_x x) \delta(y) \exp(i2\pi\nu_y y) dx dy, \quad (2)$$

由 $\mathcal{F}[\delta(x-a)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a) \exp(i2\pi\nu_x x) dx = \exp(i2\pi\nu_x a)$ 积分得到其在傅里叶变换频谱面 (ν_x, ν_y) 上的电场强度分布为

$$u(\nu_x, \nu_y) = 2 \cos 2\pi a \nu_x. \quad (3)$$

从而得到在傅氏面上的光强分布功率谱:

$$|\mathcal{F}[u(x,y)]|^2 = u(\nu_x, \nu_y) \cdot u^*(\nu_x, \nu_y) = (2 \cos 2\pi a \nu_x)^2, \quad (4)$$

式中 ν_x, ν_y 分别为傅里叶频谱的频率, $\nu_x = x/\lambda f, \nu_y = y/\lambda f$ 。

同理对于一维的三孔振幅掩膜:

$$u(x,y) = \delta(x) \cdot \delta(y) + \delta(x-2a) \cdot \delta(y) + \delta(x+2a) \cdot \delta(y). \quad (5)$$

经傅里叶变换可写为:

$$u(\nu_x, \nu_y) = \mathcal{F}[u(x,y)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) \exp(i2\pi\nu_x x) \delta(y) \exp(i2\pi\nu_y y) dx dy + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-2a) \exp(i2\pi\nu_x x) \delta(y) \exp(i2\pi\nu_y y) dx dy + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x+2a) \exp(i2\pi\nu_x x) \delta(y) \exp(i2\pi\nu_y y) dx dy, \quad (6)$$

得出:

$$u(\nu_x, \nu_y) = 1 + 2 \cos 4\pi a \nu_x. \quad (7)$$

其在傅氏面上的光强分布功率谱为

$$|\mathcal{F}[u(x,y)]|^2 = u(\nu_x, \nu_y) \cdot u^*(\nu_x, \nu_y) = [1 + 2 \cos 4\pi a \nu_x]^2. \quad (8)$$

通过以上推导,由计算得出的(4)、(8)式,通过使用 Mathematica 模拟软件,得出产生空间二次谐波后光子晶格的理论模拟图,如图3所示。

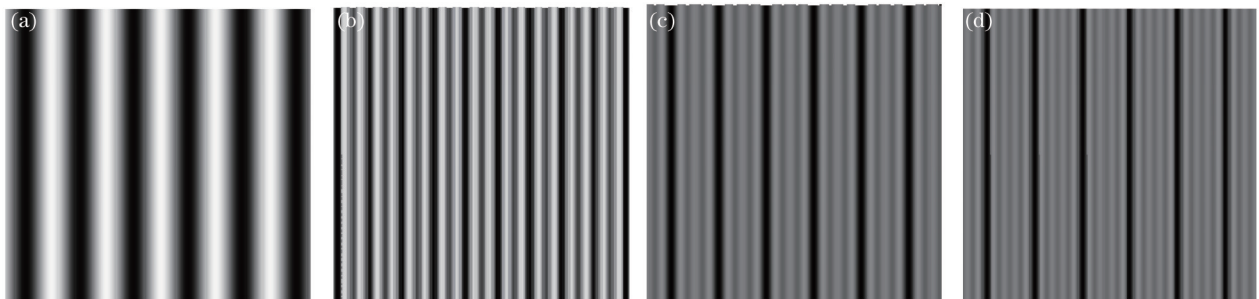


图3 不同孔数的掩膜制作光子晶格产生空间二次谐波的模拟图像。(a)两孔写入;(b)两孔;(c)三孔;(d)四孔

Fig.3 Numerical simulation images of special second-harmonic generating in photonic crystal lattice by different hole number masks. (a) Two holes written in; (b) two holes; (c) three holes; (d) four holes

如图3(a)为两孔振幅掩膜写入光子晶格的模拟图像;图3(b)为两孔振幅掩膜出现空间二次谐波并饱和后光子晶格的模拟图像;图3(c)为三孔振幅掩膜出现空间二次谐波且饱和后光子晶格的模拟图像;图3(d)为四孔振幅掩膜出现空间二次谐波后光子晶格的模拟图像。由图3可知,在构造干涉条纹式一维光子晶格时,波导阵列与原有光子晶格的相互作用会影响写入光子晶格的结构并使其出现不稳定现象。表现为写入光的干涉条纹一分为二并且出现空间频率加倍的现象,称为“空间频率的倍频”,即出现空间二次谐波^[16]。经

过实验研究和理论计算表明模拟图像与实验现象相吻合。

3.2 空间二次谐波的产生对干涉条纹光强分布的影响

在写入光子晶格的过程中,光束经过两孔振幅掩膜后形成两束等光强且同偏振的相干平行光,两束光在晶体中相交后形成干涉条纹。

设写入光场: $E = A_1 \exp(ik_1 \cdot r) + A_2 \exp(ik_2 \cdot r)$, 且 $A_1 = A_2$,

由 $I(x) = I_0(1 + m \cos kx)$ 可得 x 方向的写入光场强度分布为

$$I(x) = I_0(1 + \cos kx) = I_0 \left[1 + \frac{1}{2} \exp(ikx) + c.c. \right], \quad (9)$$

式中 $I_0 = I_1 + I_2$, $k = k_2 - k_1$ 。

由于 $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 晶体属于局域响应介质并且具有很强的光生伏打效应,因此它的漂移机制占主导地位。若将干涉条纹与写入的折射率栅的空间相移取为 0(可取 0 或 π)^[17]。则折射率光栅为

$$\Delta n = \Delta n_0 [1 + \cos kx] = \Delta n_0 \left[1 + \frac{1}{2} \exp(ikx) + c.c. \right]. \quad (10)$$

折射率光栅的透射函数为

$$\tau = \tau_0 \exp(i\phi) \approx \tau_0(1 + i\phi) = \tau_0 [1 + i(1 - \cos kx)]. \quad (11)$$

于是入射光束与写入光栅相互作用后的出射光场为

$$E' = E\tau = A\tau_0 [\exp(ik_1 x) + \exp(ik_2 x)] [1 + i(1 - \cos kx)]. \quad (12)$$

出射光强为

$$I' = E'^* E' = I_0 \tau_0^2 \left[\frac{3}{2} + \frac{3}{4} \cos kx - \frac{1}{2} \cos 2kx + \frac{1}{4} \cos 3kx \right] = I_0' [3(1 + \cos kx) + 2(1 - \cos 2kx) + (1 + \cos 3kx)], \quad (13)$$

式中 $I_0' = \frac{I_0 \tau_0^2}{4}$ 。

由以上各式可知,出射光中除了原有波矢 k 外出现了新的光栅波矢 $k' = 2k$ 及 $k'' = 3k$ 。由干涉条纹的空间频率 $1/\Lambda = k/(2\pi)$, 且 $\Lambda' = \Lambda/2$ 及 $\Lambda'' = \Lambda/3$ 可知,随着辐照时间的延长出射光的光强分布中除空间频率为 $k/(2\pi)$ 的原有干涉条纹外,依次出现了空间频率为 $2k/(2\pi)$ 和 $3k/(2\pi)$ 的 2 倍频和 3 倍频条纹,并且倍频条纹的频率弱于基频呈递减规律。由于倍频现象的出现,使得干涉条纹发生分裂且分裂出来的条纹光强弱于原干涉条纹光强,即出现一组新的干涉条纹并与倍频现象相对应。数值模拟如图 4 所示。

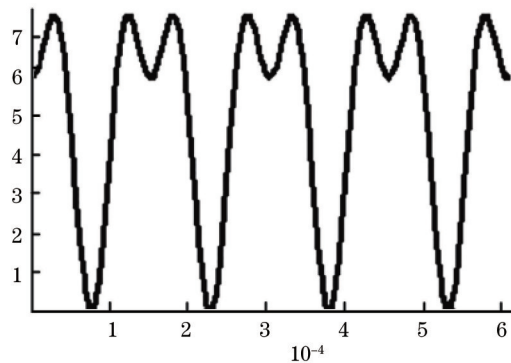


图 4 产生空间二次谐波时的光强分布

Fig.4 Optical intensity distributions in spacial second-harmonic generating

3.3 空间二次谐波的产生对布拉格带隙的影响

由于光子晶体具有带隙结构^[18],当光子的能量处在禁带时晶体中的光子将不能在晶体中继续传播而是被反射回来。而沿布拉格角传播的光子被衍射后会偏离原来的传播轨迹,形成布拉格禁带。在上述实验的基础上,应用带隙展宽的实验装置,对出现空间二次谐波的光子晶格进行布拉格带隙的测量。由公式 $\tan \theta = \alpha/f$ (其中 θ 为布拉格衍射角, α 为振幅掩膜的孔间距, f 为波长),可知当 θ 满足布拉格衍射条件时,入射光线不动转动晶体方向等效于晶体不动转动入射光线角度,此时在法线(光束平行于光子晶格的角平

分线)的两侧,会分别出现满足布拉格衍射条件的 θ 角,即出现两次带隙结构。

当写入晶格中出现空间二次谐波且稳定后,会相应出现一条新的带隙,与空间频率的增多和光强的影响一样,在原有带隙的一侧出现了一层新的带隙结构。由光子晶格中光的透射效率 $\eta = I_t/I_i$ (其中 I_i 为入射光强, I_t 为透射光强)可知,随着辐照时间的延长,光子晶格中的带隙结构除原有的透射效率为 η 的一层带隙结构外,出现了透射效率为 $\eta/2$ 的一组带隙结构,如图5所示。新的带隙结构的出现使得禁带宽度逐渐增大,由 $\Lambda = f\lambda/(2\alpha)$ 可知,新的带隙结构的出现相当于 α 增大,使得晶格周期 Λ 也随之增大。当晶格周期大到一定程度时,光子禁带将被恶化。实验证明,当空间二次谐波达到饱和时,光子禁带的效果最好。

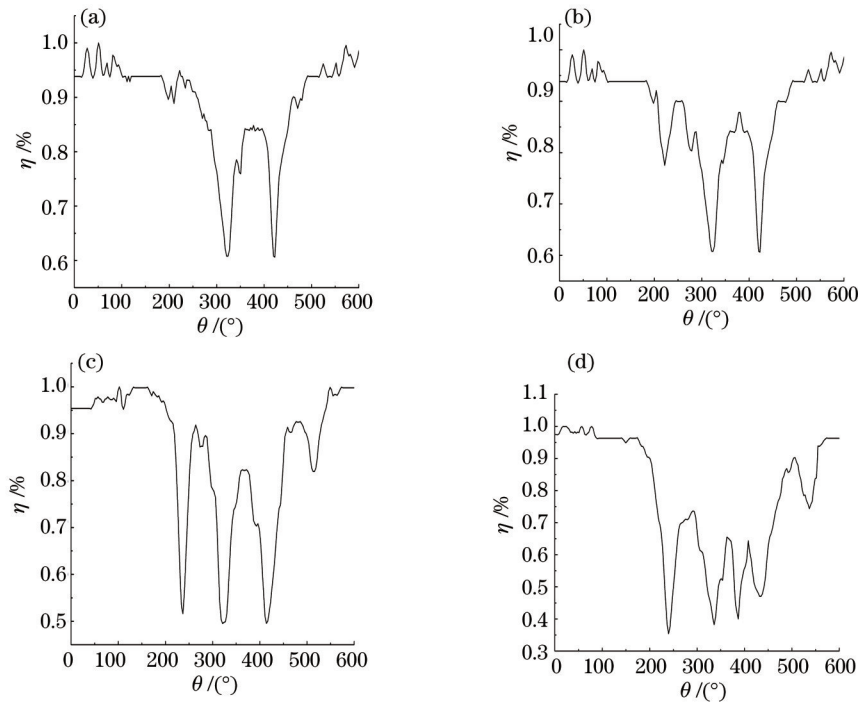


图5 产生空间二次谐波后的带隙分布图。(a)两孔写入;(b)两孔;(c)三孔;(d)四孔

Fig.5 Bandgap distribution diagrams after the creation of spatial second-harmonic generating. (a) Two holes written in ; (b) two holes; (c) three holes; (d) four holes

图5(a)为两孔振幅掩膜写入光子晶格后布拉格带隙的分布情况;图5(b)为30 min后,空间二次谐波产生并达到饱和时,晶格中布拉格带隙的分布情况。由图5(b)可知,在原带隙结构的一侧出现了新的带隙结构。图5(c)为三孔振幅掩膜写入光子晶格后,空间二次谐波产生并达到饱和时,晶格中布拉格带隙的分布情况;图5(d)为四孔振幅掩膜写入光子晶格并产生空间二次谐波且达到饱和时,晶格中布拉格带隙的分布情况。写入三孔和四孔的光子晶格时,三光束出现三个峰、四光束出现四个峰的带隙结构^[13]。由图5(c)和(d)可知每个带隙图都出现了一组新的带隙。于是得出结论,对于一维光子晶格,空间二次谐波的出现会增加布拉格角的数量,每个峰值对应一个布拉格角,多出一个峰就多出一个布拉格角。随着辐照时间的延长,这些布拉格角就会相连,从而增加了布拉格角的宽度,也就是增加了布拉格带隙的宽度。实验表明,这种方法能够有效地控制写入晶格的带隙结构。

4 结 论

通过对一维光子晶格的数值模拟及对空间二次谐波产生后晶格中干涉条纹光强的分布情况的研究和对布拉格带隙分布的测量,可知空间二次谐波的产生会直接影响光子晶格的内部结构,并且会使晶格中出现空间频率的倍频现象,干涉条纹的分裂现象及布拉格带隙的展宽现象。因此,可以通过控制空间二次谐波的产生及饱和情况,来控制写入光子晶格的内部结构。为设计和制造出特定要求的光子晶格提供了有效的途径。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical

- atoms [J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(17): 2295.
- 2 Nan Zhu, Zhaohong Liu, Ru Guo. A method of easy fabrication of 2D light-induced nonlinear photonic lattices in self-defocusing LiNbO₃:Fe crystal [J]. Optical Materials, 2007, 30(4): 527-531.
- 3 Wentao Jin, Yuanmei Gao. Optically induced two-dimensional photonic quasicrystal lattices in iron doped lithium niobate crystal with an amplitude mask [J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(14): 141104.
- 4 Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.*. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123001.
周兴平, 疏静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123001.
- 5 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.
- 6 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2061.
- 7 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 8 Liu Qineng. Complete picture of forbidden band of one-dimensional photonic crystal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(1): 65-68.
刘启能. 一维光子晶体禁带的全貌结构[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 65-68.
- 9 Zheng Zhaowen, Yang Lixia. Bandgap characteristics of two-dimensional magnetoplasma photonic crystal [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 051602.
郑召文, 杨利霞. 各向异性等离子体衬底的二维光子晶体带隙特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 051602.
- 10 Xiong Gangqiang, Wang Jiexian, Zhang Juncheng, *et al.*. The analysis of the influence factors of photonic absolute band gap [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3523-3526.
熊刚强, 王加贤, 张峻诚, 等. 二维光子晶体绝对带隙影响因素的分析[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3523-3526.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with one-dimensional photonic bandgap [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802009.
冯琛, 冯国英, 周昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802009.
- 14 Liu Qineng. Interference theory of the defect mode in one-dimensional doped photonic crystal [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806001.
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的干涉理论[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806001.
- 15 Li Yonghui, Yang Lisen, Lu Wenting, *et al.*. Photonic crystal lattice band gap broadening and its theoretical simulation [J]. Journal of Hebei Normal University, 2013, 37(2): 143-148.
李永辉, 杨立森, 逯文婷, 等. 光子晶格带隙展宽及理论模拟[J]. 河北师范大学学报, 2013, 37(2): 143-148.
- 16 Yang Lisen, Chen Yuhe, Lu Gailing, *et al.*. Generation of spacial second-harmonic in photo refractive photonic lattice [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(7): 3966-3971.
杨立森, 陈玉和, 陆改玲, 等. 光折变光子晶格中空间二次谐波的产生[J]. 物理学报, 2007, 56(7): 3966-3971.
- 17 Chen Yuhe, Yang Lisen, Lu Gailing, *et al.*. Study of interaction of array light beam with photonic lattices fabricated in self-defocus photo refractive crystal [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University, 2007, 36(2): 145-149.
陈玉和, 杨立森, 陆改玲, 等. 在自散焦晶体中阵列光束与写入晶格的相互作用研究[J]. 内蒙古师范大学学报, 2007, 36(2): 145-149.
- 18 Zhang Yin, Yang Lisen, Fang Yanyong, *et al.*. Studies on the band-gap position of one-dimensional photonic lattice and the impact factors of the bandwidth [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University, 2010, 39(6): 580-582.
张印, 杨立森, 房艳永, 等. 一维光子晶格的带隙位置以及影响带隙宽度的因素研究[J]. 内蒙古师范大学学报, 2010, 39(6): 580-582.