

·光电器件与材料·

一维复周期全息光子晶体禁带研究

程 阳¹, 崔丽彬²

(1. 徐州医学院数理教研室, 江苏 徐州 221004; 2. 北京工业大学实验学院, 北京 101101)

摘 要: 利用传输矩阵法对折射率渐变的一维复周期全息光子晶体的带隙结构进行了数值计算, 分析了针对记录材料重铬酸盐明胶, 在这种光折变介质中存在光子带隙, 继而讨论了折射率、折射率调制度、以及介质厚度对光子带隙的影响。通过计算发现, 在制作光线正入射时, 折射率和折射率调制的改变不影响禁带位置, 禁带宽度随着所使用的记录介质折射率的增加而减小, 随着介质折射率调制的增加而增加; 能够形成一个较好的禁带, 对记录介质的厚度要求起码要为 $8 \mu\text{m}$ 。

关键词: 全息; 光子晶体; 复周期; 传输矩阵

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)02-0053-03

Research on Band-gap of One-dimensional Complex-periodic Holographic Photonic Crystals

CHENG Yang¹, CUI Li-bin²

(1. Department of Mathematics and Physics, Xuzhou Medical College, Xuzhou 221004, China;

2. The Pilot College of Beijing University of Technology, Beijing 101101, China)

Abstract: The band-gap of one-dimensional complex-periodic holographic photonic crystals is calculated by using transfer matrix method. Aiming at the dichromate gelatin recording medium, band-gaps are found in this refractive medium structure, and the effects of the refractive index, refractive index modulation and thickness of the medium on the photonic gaps are discussed. When the light is shining, using calculating to find that the refractive index and refractive index modulation changes does not affect the position of the band-gap, the width of the band-gap decreases with the increase of the refractive index of the recording medium, and increases with the increase of the refractive index modulation. To get a good band-gap, the thickness of the recording medium is at least $8 \mu\text{m}$.

Key words: holography; photonic crystals; complex-period; transfer matrix method

光子晶体是由折射率被周期性调制的材料组成, 它具有与固体中的电子类似的光子带结构。近年来, 从理论和实验两方面, 对光子晶体材料的特性进行了大量的研究工作^[1,2], 人们对光子的透射带之间存在着光子禁带很感兴趣。

与普通突变周期结构的光子晶体相比, 全息光子晶体的周期性变化是渐变的。在研究了一维全息光子晶体的基础上^[3], 发现对于一维复周期光子

晶体中, 也存在有禁带结构, 当制作波长满足一定条件时, 其中禁带较单周期结构的禁带实现了展宽。文中采用传输矩阵法, 研究了对象为折射率一维余弦变化的复周期全息材料重铬酸盐明胶(DCG)材料, 在光线正入射时禁带的特点。

1 模型介绍

对于重铬酸盐明胶记录介质, 用两束沿 $\pm z$ 相反

收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 徐州医学院科研基金 (2010KJ21)

作者简介: 程阳 (1980-), 女, 硕士, 现主要从事全息光子晶体的研究。

方向传播的光束相干涉照射,干涉条纹的周期为记录光波长的一半。显影定影后,此反射全息介质就成为具有周期性介电常量结构,成为一种光子晶体。

当分别用2种不同波长的光对记录介质曝光时,在一维全息光子晶体中就可以实现复周期结构。折射率分布相应可以写作: $n = n_0 + \Delta n \cos(\frac{2\pi z}{\Lambda_1}) + \Delta n \cos(\frac{2\pi z}{\Lambda_2})$, 其中, $\Lambda_1 = \frac{\lambda_1}{2n}$, $\Lambda_2 = \frac{\lambda_2}{2n}$ 分别是分周期的晶格常数; n_0 是全息介质中的平均折射率; Δn 是折射率的调制度。如图1所示。当2种分周期的制作波长相差很小时,复周期的折射率分布相当于一个等效的拍结构。

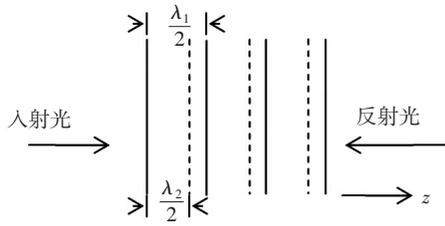


图1 分立周期结构

2 数值计算原理

采用传输矩阵法计算时,将每一个周期分成若干个子层,则每个子层的传输矩阵为^[4,5]

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{N_j} \sin \delta_j \\ iN_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, N_j 由下式表示,脚标 j 代表第 j 个晶格

$$N_j = \begin{cases} n_j / \cos \theta_j, \text{S偏振} \\ n_j \cdot \cos \theta_j, \text{P偏振} \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ_j 为光进入第 j 个晶格时的折射角; $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j$ 为光在第 j 个晶格中产生的相位差; n_j 为第 j 子层的折射率; d_j 为第 j 子层的厚度,且设光正入射到全息光子晶体上。设晶体共有 k 层晶格,整个全息光子晶体的传输特性可用下面矩阵方程描述

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{n_j} \sin \delta_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ N_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

不难求出,全息光子晶体的反射率为

$$R = \left(\frac{N_0 B - C}{N_0 B + C} \right) \left(\frac{N_0 B - C}{N_0 B + C} \right)^* \quad (4)$$

由此,即可得到全息光子晶体的带隙结构。

3 计算结果讨论

假定所用的材料是非磁性介质($\mu=1$),入射波为平面TE波,且垂直于晶体表面入射。考虑到激光器的波长范围以及重铬酸盐明胶的光敏范围,取制作用双波长均为457 nm,制作时可以通过二次曝光在晶体中形成复周期结构,进而研究复周期光子晶体的禁带问题。

(1) 复周期禁带结构

计算了复周期结构的一维全息光子晶体禁带,为了对比,将单次曝光的单周期结构和二次曝光的复周期结构禁带的计算结果在同一幅图中给出,从中可以看出,禁带中心位置不变,带宽变为原来的二倍,如图2所示。

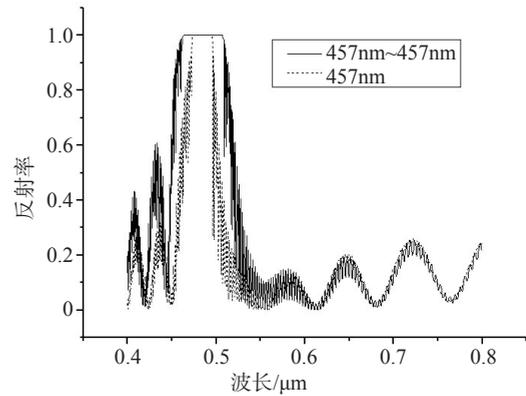


图2 单、复周期结构禁带

(2) 折射率对禁带的影响

改变程序中介质的平均折射率分别为 $n_{01}=1.12$, $n_{02}=1.52$ 和 $n_{03}=2.0$ 。通过计算结果可以看出:光线正入射时,随着介质平均折射率的增大,带的中心位置基本不变,而且带宽变小如图3所示,规律和单周期结构时的禁带特点一致。

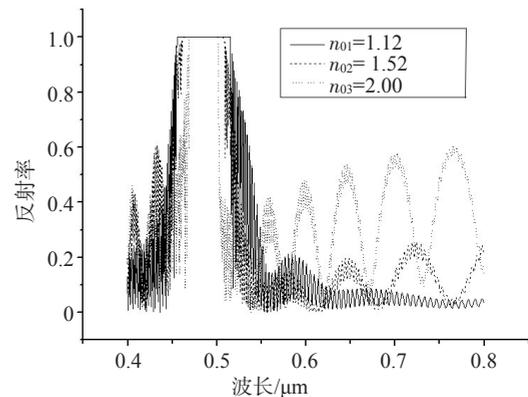


图3 折射率对禁带的影响

(3) 折射率调制对禁带的影响

折射率的调制分别为 $\Delta n_1=0.01$, $\Delta n_2=0.03$ 和 $\Delta n_3=0.07$ 。通过计算可以看出:光线正入射时,随着折射率调制的增大,带的中心位置基本没有发生变化,但是带宽明显增加,如图4所示,规律和单周期结构时的禁带特点一致。

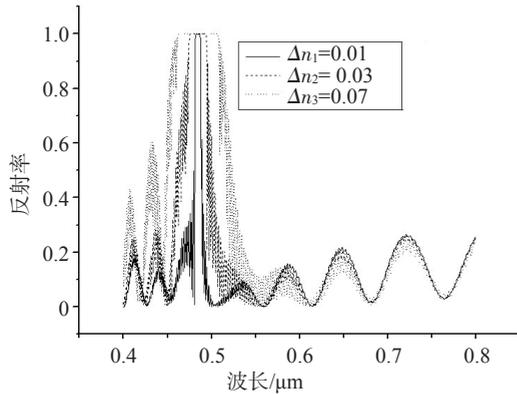


图4 折射率调制对禁带的影响

(4) 介质厚度对禁带的影响

如图5所示,利用程序计算介质厚度为 $2\mu\text{m}$,禁带效果不明显,对于入射光的反射率最大在85%左右。介质厚度为 $4\mu\text{m}$ 时,禁带效果较前面一种情况稍明显,但此时入射光的反射率能达到95%左右,但是禁带出现了分立,如图6所示。

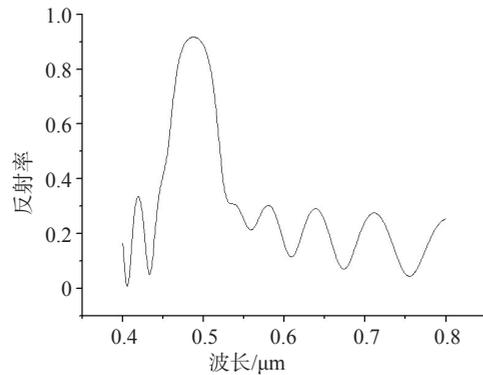


图5 介质厚度为 $2\mu\text{m}$ 的反射情况

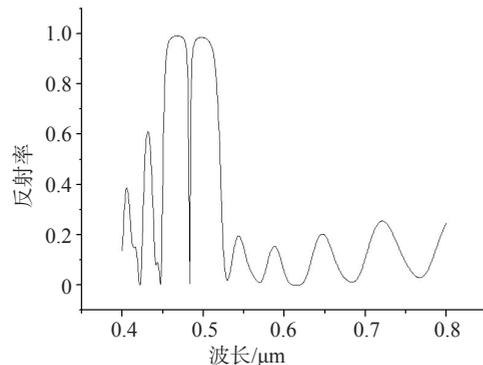


图6 介质厚度为 $4\mu\text{m}$ 的反射情况

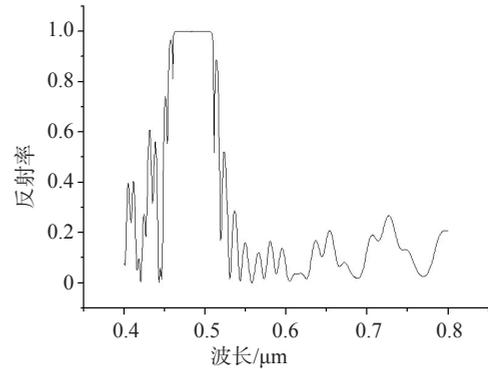


图7 介质厚度为 $8\mu\text{m}$ 的反射情况

通过进一步计算发现,当介质厚度等于 $8\mu\text{m}$ 时,禁带效果已经很明显,如图7所示,而且后续的计算表明再增加介质的厚度进而改变周期的数目,并不会改变带的位置和宽度。

对于单周期结构全息光子晶体禁带也曾经计算过,要想具有光子禁带,这种一维全息光子晶体起码要具有50个周期,对应厚度要大于 $8\mu\text{m}$,在此基础上增加介质厚度,也不会改变同一条件下介质中禁带的性质^[6]。通过计算发现,对于复周期全息光子晶体结构,并没有因为是复周期而对介质厚度改变要求,在所采用的制作参数下,记录材料厚度最小要求仍是 $8\mu\text{m}$ 。

4 结论

对于复周期结构的全息底片通过编程计算,讨论的都是正在入射前提下的情况。结论如下:禁带宽度随着所使用的记录介质折射率的增加而减小,禁带位置基本不受折射率变化或折射率调制变化的影响。介质厚度在一定程度上会影响带的形成,对于双波长均为 457nm 制作而成的复周期全息光子晶体,发现介质的厚度起码要大于 $8\mu\text{m}$ 才能够产生比较好的带隙结构,在此基础上增加介质厚度,基本上不会影响带隙分布。这就对今后开展相关复周期全息光子晶体的实验工作提供了指导。

参考文献

- [1] M Campbell, D N Sharp, et al. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography[J]. Nature, 2000, 404(6773): 53-56.
- [2] Satoru Shoji, Satoshi Kawata. Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser

(下转第79页)

参考文献

- [1] 程云长,王莉莉,陈立力,等.可编程逻辑器件与VHDL语言[M].北京:科学出版社,2005:42-46.
- [2] 谭会生.EDA技术综合应用实例与分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004:43-44.
- [3] U Tietze, Ch Schenk. Electronics Circuits —Design and

Application[M]. Springer-Verlag, 1991.

- [4] 姜立东.VHDL语言程序设计及应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2004:119-123.
- [5] Susan A R Garrod, Robert J Borns. Digital Logic—Analysis, Application & Design[M]. Holt Rinehart and Winston, Inc, 1991.

(上接第55页)

- interference into a photo-polymerizable resin[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(19):2668-2670.
- [3] 程阳.一维全息光子晶体的带隙结构研究[J].量子光学学报,2009,15(3):264-267.
- [4] 段晓峰,牛燕雄.一维光子晶体的光学传输特性分析[J].

光子学报,2003,32(9):1086-1089.

- [5] 王辉,李永平.用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J].物理学报,2001,50(11):2172-2178.
- [6] 程阳,王兆娜.光在一维全息光子晶体中的传播[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(2):136-138.

(上接第63页)

高;误差阈值把特征点分成内点和外点的策略被理论地定量化,为图像的自动拼接融合提供了强有力的保证;算法对数据层层过滤提纯数据的过程非常稳健;最小二乘算法估计图像间点变换的域得到了优化,保证了算法的精确估计和快速收敛。整个算法无论是对输入数据本身还是图像的外部复杂光照条件都有很强的容错能力,是一种稳健有效的实用算法。

参考文献

- [1] 杨占龙.基于特征点的图像配准与拼接技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2008.
- [2] 赵向阳,杜利民.一种全自动稳健的图像拼接融合算法[J].中国图像图形学报,2004,9(4):417-422.
- [3] 崔汉国,陈军,王天宇.鱼眼图像校正及拼接的研究与实现[J].计算机工程,2007,33(10):190-192.

- [4] 黎俊,彭启民,范植华.亚像素级图像配准算法研究[J].中国图象图形学报,2008,13(11):2070-2075.
- [5] 曾庆业,唐娉.使用仿射不变特征的遥感图像自动配准[J].计算机工程,2009,35(1):192-194.
- [6] 刘小军,杨杰,孙坚伟,等.基于SIFT的图像配准方法[J].红外与激光工程,2008,37(1):156-160.
- [7] 冷晓艳,薛模根,韩裕生,等.基于区域特征与灰度交叉相关的序列图像拼接[J].红外与激光工程,2005,34(5):602-605.
- [8] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision, 2000,37(2):151-172.
- [9] LOWE D G. Distinctive image features from scale ! invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [10] Yves Dufournaud, Cordelia Schmid, Radu Horaud. Image matching with scale adjustment [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004,93(2):175-194.

欢迎使用《光电技术应用》期刊网站

为了满足读者对《光电技术应用》期刊文章的快速、方便的查询及阅读浏览需求,《光电技术应用》期刊网站(网址为:<http://www.gdjsyy.com>),为读者提供了《光电技术应用》期刊2009、2010全年和2011年已发表文章的查询及阅读浏览。读者可在过刊及当年期刊目录下,浏览2009、2010全年及2011年已发表期刊目录,点击文章题目,阅读文章摘要或浏览全文。欢迎广大读者登陆期刊网站,利用查询与阅读浏览功能,及时了解《光电技术应用》期刊已发表文章的最新信息。

《光电技术应用》编辑部