

· 光电器件与材料 ·

一维全息光子晶体基本周期对光子禁带的影响

程 阳

(徐州医学院数理教研室, 江苏 徐州 221004)

摘 要:利用由传输矩阵法得到的一维光子晶体的反射率计算公式, 针对具体的一维全息光子晶体周期结构, 计算了折射率调制周期的改变以及光学厚度的改变对光子禁带结构的影响. 结果表明: 随着折射率调制周期参数的增大, 禁带宽度减小, 禁带中心的位置移向短波; 随着光学厚度的增大, 禁带宽度增大, 禁带中心的位置移向长波. 在设计光子晶体时, 可以根据需要, 通过改变光子晶体基本周期结构的参数来实现对光子带隙的控制.

关键词:全息; 光子晶体; 禁带; 周期结构; 光子禁带; 光学厚度

中图分类号: O734; TN26

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0038-03

Effects of Basic Period of One-Dimensional Holographic Photonic Crystals on Photonic Band Gap

CHENG Yang

(Department of mathematics and Physics, Xuzhou medical college, Xuzhou 221004, China)

Abstract: The formulas of reflectivity were derived in one-dimensional holographic photonic crystals with the method of the transfer matrix. With this method, the reflectivity of the one-dimensional holographic photonic crystals was calculated when the basic period of the refractive index modulation and the optical thickness of the basic period structure of the photonic crystal changed. The results show that the width of the gap decreases and the gap center position moves to short wave with the increasing of the parameters of the basic period of the refractive index modulation. With the increasing of the optical thickness, the width of the gap increases, the center position of the gap moves to long wave. When the photonic crystals are designed, the control of the photonic band gap can be achieved via changing the basic period structure parameters of the photonic crystals.

Key words: holographic; photonic crystals; period structure; photonic band gap; optical thickness

自从 1987 年 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 分别提出光子晶体和光子能带结构的概念以来, 人们对一维、二维和三维的光子晶体都已经做了较深入的研究. 由于有类似于半导体材料中的“频率禁带”特性, 因此光子晶体有着很广阔的应用前景. 一维光子晶体在微结构上最为简单, 易于制备, 具有制造超低耗波导、全方位反射镜、光学开关等多种用途, 一维光子晶体结构也可以具有全方位的三维能隙结构^[3,4], 用一维光子晶体可能制备出用二、三维光子

晶体结构材料制作的器件. 因此, 对一维光子晶体进行深入研究是很有意义的.

体全息介质可以看成是一种光子晶体, 体全息介质中存在着某种光子的带结构. 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. 用全息方法或多光束干涉法制作可见光谱区的光子晶体的方法已有报导^[5-8]. 为了深入地探讨体全息图作为光子晶体的性质, 以及为了用全息方法制作出可供实际使用的光子晶体, 必须全面

收稿日期: 2009-12-13

基金项目: 徐州医学院公共教育学院科研课题(XYGJ09001)

作者简介: 程阳(1980-), 女, 江苏徐州人, 讲师, 北京师范大学硕士毕业, 主要从事基础物理教学及光子晶体的理论研究.

分析体全息图所展现的光子禁带的特点. 在这里采用了传输矩阵法, 应用参数调节的方法来研究折射率调制周期倍率和光学厚度对一维全息光子晶体禁带的调节作用.

1 模 型

一维全息光子晶体中, 折射率分布与光场强度分布规律相同, 则折射率分布可写为: $n = n_0 + \Delta n \cos(2\pi z/d)$, 其中, n_0 是全息介质中的平均折射率; Δn 是折射率的调制度; d 是一个周期的长度, 如图 1 所示. 在这种介质中, 折射率是一种余弦函数渐变周期结构 (n 是 z 的函数), 光学厚度为 nd .

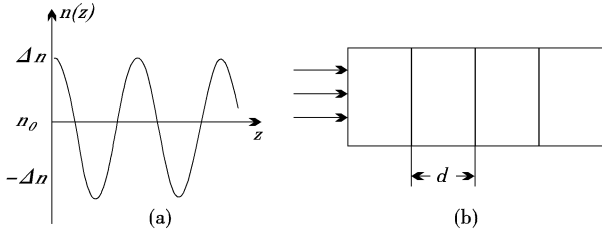


图 1 一维全息光子晶体折射率分布

二元一维阶跃式光子晶体的折射率分布, 如图 2 所示. 这种一维光子晶体的结构是由折射率分别为 n_1 和 n_2 的 2 种材料交替组成的, 厚度分别为 d_1, d_2 , 一个周期的厚度为 $d = d_1 + d_2$, 两层介质的光学厚度分别为 $n_1 d_1, n_2 d_2$.

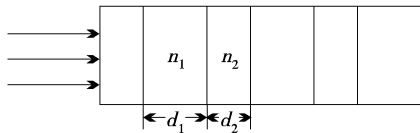


图 2 二元一维阶跃式光子晶体折射率分布

2 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^[9-10]

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

N_j 由下式表示为 (脚标 j 代表第 j 个晶格)

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

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 计算结果及分析

文中计算的都是正入射的情况, S 偏振和 P 偏振情况完全一样, 以下均以 P 偏振计算情况为例.

(1) 折射率调制周期的影响

针对折射率调制的周期性 $n = n_0 + \Delta n \cos(2\pi z/\Lambda)$, 引入一个余弦函数综量的可调倍率 X , 折射率改写为 $n = n_0 + \Delta n \cos(X(2\pi z/\Lambda))$ 的形式, 通过改变 X 的数值, 计算了禁带随其变化的情况, 这里 $n_0 = 1.52, \Delta n = 0.07, \lambda = 457 \text{ nm}$, 禁带的计算结果如图 3 所示.

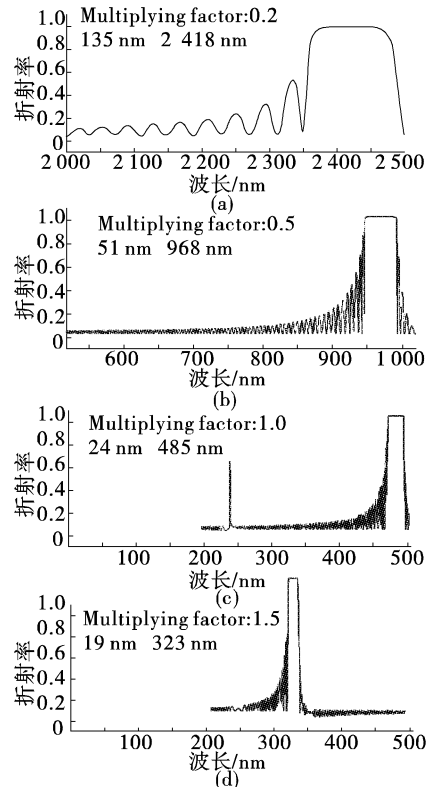


图 3 禁带随折射率调制周期参数的变化

现将禁带宽度和禁带位置的计算结果列出,如表1所示.

表1 折射率调制周期参数对禁带的调制

参量	X	$\Delta\lambda/(\text{nm})$	$\lambda_{\text{中心}}/(\text{nm})$	图号
参量	0.2	135	2 418	a
	0.5	51	968	b
	0.7	35	693	c
	1.0	24	485	
数据	1.3	22	373	d
	1.5	19	323	
	1.8	17	269	

由计算结果可以得出结论:介质膜的折射率调制倍率对禁带宽度和禁带位置有明显的调制作用;随着折射率调制周期倍率的增大:禁带宽度减小,禁带中心的位置移向短波.倍率小于1时对禁带宽度及位置影响较大,倍率大于1时的影响较小,禁带位置相对较集中;在 $X=0.2\sim 1.8$ 的变化范围内,禁带位置在 $2\ 500\sim 2\ 700\ \text{nm}$ 的范围内变化较大,在调节参数较小时,禁带宽度较大.

(2) 光学厚度的影响

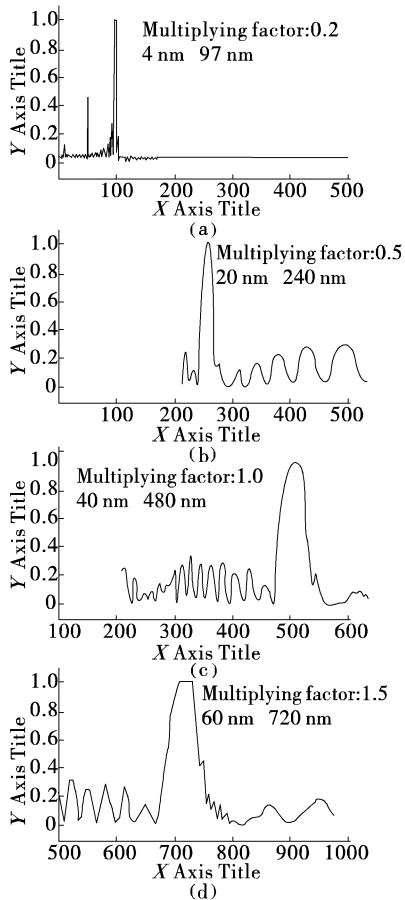


图4 禁带随光学厚度的变化

改变介质的光学厚度: nd ,引入了一个可调参数 X ,令 $nd = Xnd$,计算了随着 X 的改变,禁带位置和宽度的变化情况,通过编程计算,结果如图4所示.

现将禁带宽度和禁带位置的计算结果列出,如表2所示.

表2 光学厚度对禁带的调制

参量	X	$\Delta\lambda/(\text{nm})$	$\lambda_{\text{中心}}/(\text{nm})$	图号
参量	0.2	4	97	a
	0.5	20	240	b
数据	1.0	40	480	c
	1.5	60	720	d
	1.8	70	865	

由计算结果可以得出结论:介质膜的光学厚度对禁带宽度和禁带位置有明显的调制作用;随着光学厚度的增大:禁带宽度增大,禁带中心的位置移向长波.相对折射率调制周期对禁带的影响,光学厚度的改变对禁带的影响较小,在 $X=0.2\sim 1.8$ 的变化范围内,禁带位置在 $90\sim 900\ \text{nm}$ 的范围内变化,在光学厚度较大时,禁带宽度大.

4 结 论

对一维全息光子晶体,用传输矩阵方法,对不同的基本周期结构下的反射率进行了计算.结果表明,光子禁带与光子晶体基本周期结构单元的光学厚度以及折射率调制的周期分布有关.在设计光子晶体时,可以根据对禁带宽度及位置的设计需要,通过改变光子晶体的基本周期结构的参数来实现对光子带隙的控制,这在光子晶体的应用中很有价值.

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (20):2059-2061.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (23):2486-2489.
- [3] Fink Y, Winn JN, Fan S, et al. A Dielectric Omnidirectional Reflector [J]. Science, 1998, 282: 1679-1682.
- [4] Chigrin D N, Lavrinenko A V, Yarotsky D A, et al. Observation of total omnidirectional reflection from a one-dimensional dielectric lattice [J]. Applied Phys. A, 1999, 68 (1): 25-28.

(下转第44页)

111、103.75 nm. 运行后的图形如图 6, 计算其加权平均反射率分别为 7.26% 和 11.63%, 可见 $\text{MgF}_2/\text{SiO}_2/\text{ITO}$ 的组合要优于 $\text{SiO}_2/\text{MgF}_2/\text{ITO}$.

可得如下结论, 如果要设计单层透明导电膜加两层减反射膜的结构, 两种减反射膜的位置关系最好是上面一层的折射率低一些而下面一层的高一些, 这样能取得更好的减反射效果.

3 结 束 语

就如何设计非晶硅太阳能电池减反射膜的最优参数问题进行计算机仿真, 并讨论了几种应用广泛的减反射膜材料的优化设计. 在整个非晶硅的光谱响应范围内, 对于单层透明导电膜, 折射率小的材料如 ITO 的反射效果更好, 对于两层膜的情况, 在可见光谱范围内, 在透明导电膜上加上一层比其折射率低的减反射膜, 这样的组合会比低折射率的透明导电膜上加上一层高折射率的减反射膜的效果好, 并且在

(上接第 21 页)

今后光伏系统在国内的推广使用. 因此作为光伏产业中的一员, 需要加强对实际应用系统的经验积累, 综合考量用户的成本和系统的稳定.

随着产业技术的革新, 新材料、太阳能电池的转化效率、蓄电池的性价、中间控制转换环节的改善, 成本必然会大大降低. 相信太阳能照明系统在很多场合完全可以取代传统照明系统, 逐渐走进寻常百姓家. 同时也会在很大程度上改善能源结构和减轻环保压力, 增强我国的能源安全.

参考文献

[1] S R Wenham. 应用光伏学[M]. 狄大卫. 上海: 上海交

(上接第 40 页)

- [5] 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.
- [6] Satoru Shoji, Satoshi Kawata. Photofabrication of three-dimensional photonic crystals by multibeam laser interference into a photo-polymerizable resin [J]. Applied Phys. Let., 2000, 76(19): 2668 - 2670.
- [7] Toshiaki Kondo, Shigeki Matsuo, Saulius Juodkazis, et al. Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals [J]. Applied Phys. Let., 2001, 79:

一定范围内, 膜层越多效果越好.

参考文献

- [1] 马丁·格林. 太阳能电池工作原理、工艺和系统的应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.
- [2] <http://club.elanw.com/dispbbs.asp?boardID=56&ID=4041>.
- [3] 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [4] 唐晋发, 顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [5] 张亚萍, 殷海荣, 李启甲, 等. 透明导电薄膜的研究进展[J]. 光机电信息, 2006, 49(2): 56 - 67.
- [6] 徐颖, 高劲松, 王彤彤, 等. ITO 材料在减反射膜设计中的应用[J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1187 - 1189.
- [7] 杨文华, 吴鼎祥, 李红波. 空间高效硅太阳能电池减反射膜设计与数值分析[J]. 半导体学报, 2004, 25(9): 1118 - 1122.
- [8] 杨文华, 李红波, 吴鼎祥. 太阳能电池减反射膜设计与分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(1): 39 - 42.
- [9] 通大学出版社, 2008: 78 - 85, 205 - 211.
- [2] 太阳光发电协会[日]. 太阳能光伏发电系统的设计与施工[M]. 刘树民, 宏伟. 北京: 科学出版社, 2004: 1 - 8, 62 - 70, 78 - 79.
- [3] 鞠振河. 太阳能路灯系统的优化设计[J]. 可再生能源, 2007(5): 79 - 84.
- [4] 孙利英, 闫文红. 智能型太阳能灯具控制系统[J]. 阳光能源, 2009(1): 12 - 13.
- [5] 侯现伟, 房建国. 控制器在太阳能路灯中的应用[J]. 阳光能源, 2009(1): 26 - 27.
- [6] RETScreenInternational, www.retscreen.net.
- [8] Shu Yang, Mischa Megens, Joanna Aizenberg, et al. Creating Periodic Three-Dimensional Structures by Multibeam Interference of Visible Laser [J]. Chem. Mater., 2002, 14(7): 2831 - 2833.
- [9] Wandg Hui, LI Yongping. An Eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. Acta physica sinica, 2001, 50(11): 2172 - 2178 (in Chinese).
- [10] He Xiu-jun, XIE Kang, XIANG An-ping, et al. Research of band gap of 1D photonic crystals [J]. Laser technology, 2008, 32(5): 508 - 509, 512 (in Chinese).