

文章编号: 0253-2239(2005)05-661-4

一维光子晶体的双通道位置设计及调整*

田国勋^{1,2} 吴永刚^{1,2*} 王占山^{1,2} 林小燕^{1,2} 王 勇^{1,2} 戚同非^{1,2} 陈玲燕^{1,2}

(¹ 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092
² 同济大学光学精密工程技术研究所, 上海 200092)

摘要: 通过对法布里-珀罗滤光片性质的研究, 以及对法布里-珀罗滤光片中缺陷层厚度变化对通道数目、位置影响的分析, 为双通道一维光子晶体的设计提出了一条新的思路。在法布里-珀罗结构的基础上引入一维光子晶体的双对称结构, 并通过改变双对称结构的三个缺陷层厚度来实现对禁带内两个通道系列位置的独立调整。设计过程中采用有效界面法对通道的位置进行初步的计算, 并通过计算机理论模拟对膜层进行修正, 使通道的位置满足设计要求。设计结果表明, 通过调整两个厚度参量可以克服双通道一维光子晶体中的通道干涉现象, 从而实现通道位置的独立调整。

关键词: 光电子学; 光子晶体; 双对称; 光子禁带; 多通道

中图分类号: TN204 文献标识码: A

Design and Modification of Double Channel of One-Dimensional Photonic Crystal

Tian Guoxun^{1,2} Wu Yonggang^{1,2} Wang Zhanshan^{1,2} Lin Xiaoyan^{1,2} Wang Yong^{1,2}
Qi Tongfei^{1,2} Chen Lingyan^{1,2}

(¹ Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092
² Institute of Precise Optical Engineering and Technology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: A new way for designing one-dimensional photonic crystal, which has double-channel, is given by researching the characteristics of Fabry-Perot filter and analyzing the influence of thickness change of defect layers on the number and the position of the channels. A double-symmetrical structure consisted of one-dimensional photonic crystal is introduced based on the Fabry-Perot structure. The position of the two channel series in the photonic forbidden band is separately adjusted by changing the thickness of three defect layers in the double-symmetrical structure. The equivalent surface method is used in the elementary calculation and the computer simulation is used to further modify the thickness of the layer. With this design, the interference of different channels is avoided and the independent change of the channel position is realized in the double-symmetrical one-dimensional photonic crystal.

Key words: optoelectronics; photonic crystal; double-symmetry; photonic forbidden band; multiple channel

1 引 言

光子晶体的概念是 1987 年分别由 Eli. Yablonovitch^[1] 和 Sajeev John^[2] 等提出来的, 空间介电质分布函数的周期性分布可以使通过该结构中的光子具有在晶体中电子一样的禁带与导带, 呈现出能带结构^[3], 在带与带之间存在能隙, 能带的存在使光

子晶体产生了许多新的性质。通过在光子晶体中引入缺陷层能够改变禁带内光子态密度的分布, 形成杂质能级, 在禁带内形成通道^[4~7]。对应这个波长的光波, 光子晶体是透明或半透明的, 在光子晶体的透射谱上表现为一个透射峰。并且通过光子晶体的叠加或者异质结构可以拓宽光子晶体的禁带^[8]。

* 国家自然科学基金(10175049)和中国科学院红外物理国家重点实验室资助课题。

作者简介: 田国勋(1980~), 男, 河南安阳人, 在读硕士研究生, 主要从事低维光子晶体的研究。

E-mail: tgxxxx@physics.tongji.edu.cn

** 通信联系人。E-mail: ygwu@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2004-07-15; 收到修改稿日期: 2004-11-05

由于一维光子晶体在结构上类似于光学多层介质膜,因此可采用处理光学多层介质膜的方法来处理一维光子晶体。我们曾用等效界面法对基于法布里-珀罗结构的一维光子晶体进行了分析,并对此结构中宽禁带范围内的通道位置进行了定量计算,结果发现通过调整法布里-珀罗结构一维光子晶体的缺陷层的厚度可以改变禁带中通道的位置和数目^[9],但此对称结构引入的通道系列的位置是相互干扰的。由于此对称结构的所有通道位置都与缺陷层厚度有关,导致了通道之间的相互干扰,因此设想通过引入新的对称结构,以产生新的通道系列,且新的通道系列与原来的通道系列可能是互不干扰的。因此我们试图引入双对称结构来对两个通道系列的位置进行独立的调整,以克服法布里-珀罗结构一维光子晶体中通道之间的相互干扰现象。

2 基于法布里-珀罗结构的一维光子晶体的禁带与通道系列的理论计算与分析

图 1 是法布里-珀罗结构的示意图。

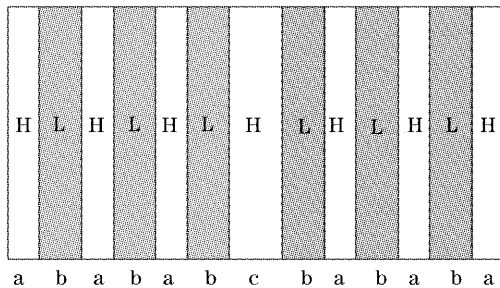


图 1 法布里-珀罗结构示意图

Fig. 1 The schematic of Fabry-Perot structure

以下讨论的情况均为正入射且 $n_L = 1.44$, $n_H = 2.3$, 基板折射率为 1.52。

对该结构的分析方法是有效界面法,对一给定膜系,由有效界面法,选取中间某一膜层,整个膜系可用两个有效界面来表示,只考虑选定层中的多次反射,就可对整个膜系的特性进行分析,应用单层膜振幅透射系数计算方法,可得到选定膜层的合振幅透射系数为

$$t = \frac{t_1^+ t_2^+ \exp(-i\delta)}{1 - r_1^- r_2^+ \exp(-2i\delta)}, \quad (1)$$

其中 t_1^+ 、 t_2^+ 、 r_1^- 、 r_2^+ 分别为选定膜层两侧膜系的透射和反射系数, δ 为选定膜层的有效相位厚度。

如果选定膜层两侧媒质的导纳相同,则透射率

T 为

$$T = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \times \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})} \sin^2 \left[\frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2 - 2\delta) \right]}, \quad (2)$$

其中 T_1 、 T_2 、 R_1 、 R_2 分别为选定膜层两侧的透射率和反射率, ϕ_1 、 ϕ_2 分别为两反射膜层的反射相移。

由(1)式可知,若两反射膜层的 T_1 、 T_2 、 R_1 、 R_2 和反射相移 ϕ_1 、 ϕ_2 不变,这时能改变的量是所选定膜层的有效相位厚度 δ [$\delta = (2\pi/\lambda)nd$, n , d 为所选定膜层的折射率和厚度]。

当满足条件

$$\phi_1 + \phi_2 - 2\delta = 2k\pi, \quad (k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (3)$$

时,整个膜系的透射率 T 达最大值

$$T_{\max} = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}. \quad (4)$$

如果两反射膜系为对称膜系,且不考虑膜系的吸收等因素的影响,两反射膜系的振幅反射率、振幅透射率分别相等,即

$$R_1 = R_2 = 1 - T_1 = 1 - T_2,$$

则整个膜系的透射率达到最大值 $T_{\max} = 1$,与该相位厚度 $\delta = \frac{2\pi nd}{\lambda}$ 相对应的波长处会有一个透过峰,

该峰即为滤光片的一个通道。如果想要得到多通道滤光片,只要每个通道的波长对应的反射相移满足(3)式即可。

由以上计算对法布里-珀罗结构的通道进行的分析可以看出,禁带范围内满足(3)式的缺陷层厚度对应的通道出现后,随着厚度的增加,通道的位置往长波方向移动,新的通道移到禁带窗口中来,并且随着缺陷层厚度的增加,在禁带窗口中满足(3)式的波长会逐渐增加,实现多通道,因此我们可以想象,法布里-珀罗结构本身就存在一个完整的通道系列,此通道系的位置随着缺陷层厚度的增加而向长波方向移动。以 $(HL)^7 H_C (LH)^7$ 为例,设缺陷层厚度为 C ,当 C 分别等于 $4H$ 、 $4.4H$ 、 $4.8H$ 、 $5.2H$ 、 $5.6H$ 时,其变化规律如图 2 所示。

由图 2 可见,缺陷层的引入使得法布里-珀罗结构的光子晶体的禁带内形成了一个很高的透射峰,这主要由于缺陷层的引入导致光子晶体禁带的光子态密度发生了变化,对应于透射峰位置的光波的光子态密度增加,并在带隙中产生定域的电磁波模式。由于与缺陷层共振的模式随着缺陷层厚度的变化而

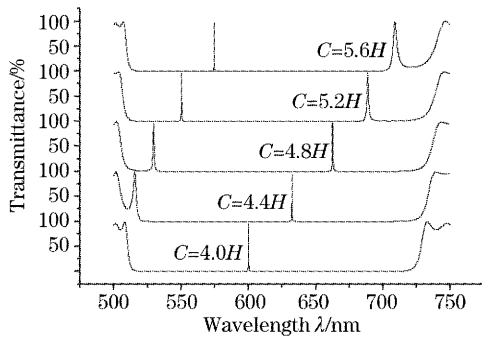


图2 法布里-珀罗结构的通道位置与缺陷层厚度的关系

Fig. 2 Relationship of the defect layers' thickness and channel position in Fabry-Perot structure

变化,禁带内能与缺陷层共振的波长数目也随着缺陷层厚度的增加而增加,因而形成了一个通道系列。

由于此通道系列的所有通道的位置都随着缺陷层厚度的变化而变化,因而它们的位置是相互干扰的,无法进行独立的调整,所以我们引入了基于法布里-珀罗结构的双对称结构,即引入一个新的通道系列,以实现两个通道系列的独立调整。

3 基于法布里-珀罗结构的双对称结构的分析与理论模拟

双对称结构就是在两个相同的法布里-珀罗对称结构中加入一个缺陷层,形成一个新的对称结构。法布里-珀罗对称结构中的缺陷层形成了一个新的光子能级,因而在光子晶体的透射谱上表现为一个很高的透射峰。在双对称结构中,为了避免两个法布里-珀罗结构组成的新的对称结构对法布里-珀罗对称结构形成的光子能级产生影响,我们令两个法布里-珀罗对称结构完全相同,增加光波在此位置的态密度,来增强光波在这个位置的透射,避免此光子能级的漂移,如图3所示。

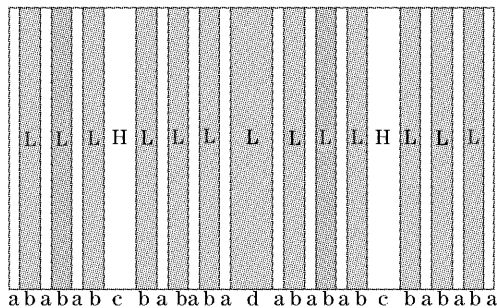


图3 基于法布里-珀罗结构的双对称结构

Fig. 3 Double-symmetry structure based on Fabry-Perot structure

仍然用等效界面法对这个结构进行计算,这个

双对称结构是由两个法布里-珀罗结构叠加而成,因而并不改变法布里-珀罗结构中形成的通道系的位置,我们暂时称之为通道系列1。但是这两个法布里-珀罗结构形成的新的对称结构会形成一个新的法布里-珀罗结构,用等效界面法计算,当满足(3)式的时候膜系同样会产生一个新的通道系列,我们暂时称之为通道系列2。调整对称单元的缺陷层的厚度 c (两个 C 层相等)使得通道系列1中有通道移到禁带窗口中来,即在禁带中有波长满足(3)式。然后改变缺陷层 d 的厚度,调整通道系列2的位置,由理论曲线可以看出,当通道系列2的位置发生改变的时候,通道系列1的位置基本没有发生变化。以 $(HL)^7 H_c (LH)^7 L_d (HL)^7 H_c (LH)^7$ 为例,设计波长为600 nm,当 $C=1.4H$, d 分别等于 $0.3L$ 、 $0.4L$ 、 $0.5L$ 、 $0.6L$ 、 $0.7L$ 、 $0.8L$ 、 $0.9L$ 的时候其变化规律如图4所示。

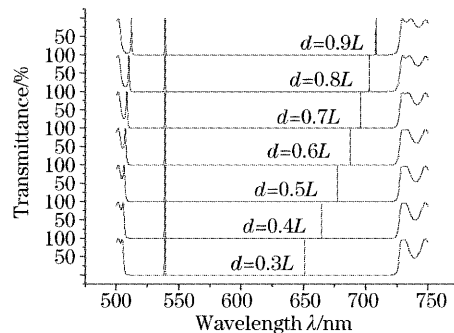


图4 双对称结构 d 发生变化时候的通道变化($C=1.4H$)

Fig. 4 Channel position changes while d changes ($C=1.4H$) in double-symmetry structure

同样,当我们调整 C 层的厚度,同时保持 d 层的厚度不变,那么通道系列1的位置发生改变而通道系列2的位置基本不变化。

以 $(HL)^7 H_c (LH)^7 L_d (HL)^7 H_c (LH)^7$ 为例,令 $d=0.4L$ 保持不变, C 分别等于 $1.4H$ 、 $1.5H$ 、 $1.6H$ 、 $1.7H$ 、 $1.8H$ 、 $1.9H$ 、 $2.0H$,设计波长为600 nm时通道的变化规律如图5所示。

放大理论模拟曲线可以看出,在单独调整一个通道的位置时会使得另外一个通道的位置产生很小的漂移,但由于双对称结构是通过两个厚度参量来控制两个通道的位置,因而可以通过计算机模拟对 d 层和 c 层的厚度进行修正,使两个通道的位置都满足设计要求。

由理论模拟曲线可以看出,双对称结构使得两个通道系的位置可由两个参量控制,其位置可独立变化,因此我们可以用此方法设计出位置比较精确

的多通道膜系,尤其是双通道膜系。

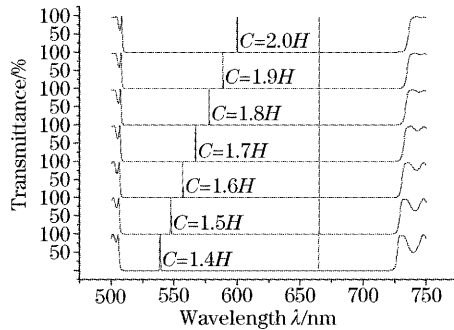


图 5 双对称结构 C 发生变化时候的通道变化($d=0.4L$)

Fig. 5 Channel position changes while C changes ($d=0.4L$) in double-symmetry structure

4 结 论

本文所考虑的结构实际上是在一维周期性结构中插入了两个不同的缺陷。这两个缺陷将在禁带中引入两个缺陷模,缺陷模的频率与缺陷的尺寸有关。当缺陷对称地放置时就会产生共振透射。文章通过对法布里-珀罗结构缺陷层与其形成的通道进行分析,引入了基于法布里-珀罗结构的双对称结构,此双对称结构在原有法布里-珀罗结构的基础上引入一个新的通道,并且可以通过分别改变和修正双对称结构中缺陷层的厚度来独立调整两个通道的位置,从而克服了通道位置变化的相互干扰现象。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovich. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2061
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disorder dielectric super-lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **20**(6): 728~734 (in Chinese)
顾国昌,李宏强,陈洪涛等. 一维光子晶体中的光学传输特性[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 728~734
- 4 A. Mir, A. Akjouj, E. H. El Boudouti *et al.*. Large omnidirectional band gaps and selective transmission in one-dimensional multilayer photonic structures[J]. *Vacuum*, 2001, **63**(1~2): 197~203
- 5 Xin Wang, Xinhua Hu, Yizhou Li *et al.*. Enlargement of omnidirectional total reflection frequency range in one-dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(23): 4291~4293
- 6 Chen Weizong, Zheng Xinliang, Fu Lingli *et al.*. The electromagnetic mode density in one-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2): 239~243 (in Chinese)
陈慰宗,郑新亮,付灵丽等. 一维光子晶体中的电磁膜密度[J]. *光子学报*, 2003, **32**(2): 239~243
- 7 Zhanshan Wang, Li Wang, Yonggang Wu *et al.*. Multiple-channelled phenomena in heterostructures with defect mode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(10): 1629~1631
- 8 Huang Biqu, Gu Peifu. Extension of one-dimensional photonic crystal's band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1497~1501 (in Chinese)
黄弼勤,顾培夫. 一维光子晶体禁带的展宽[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1497~1501
- 9 Li Wang, Zhanshan Wang, Yonggang Wu *et al.*. Enlargement of the non-transmission frequency range of multiple-channelled filters by the use of heterostructures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(2): 424~426