

# 光子晶体异质结的位相和应用\*

伍楷舜 龙兴腾 董建文 陈弟虎 汪河洲†

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

(2007 年 10 月 1 日收到, 2008 年 5 月 13 日收到修改稿)

研究了由不同周期结构的光子晶体组成的异质结和含耦合杂质的光子晶体异质结的位相. 发现光子晶体异质结使光子晶体杂质模的反射率接近 1, 但反射相移不随反射率的改变而改变, 反射相移只由前边的光子晶体的禁带、通带或耦合杂质模中的子峰决定. 即异质结的前边的光子晶体的耦合杂质模中的每一子峰、每一通带或禁带对应的反射相移为  $2\pi$ . 对多杂质耦合的结构, 反射相移很灵敏, 可用于制作高灵敏光子器件. 以全光位相与非门为例描述全光位相逻辑门的方案和可行性. 另外, 这些特性对研究位相有关的新物理过程和现象有意义.

关键词: 光子晶体, 位相, 异质结, 耦合杂质

PACC: 4270Q, 7820P

## 1. 引 言

光子晶体是介质或金属材料构成的人工周期结构<sup>[1,2]</sup>. 其结构的制作、带隙和杂质的物理性质及其光子器件等研究一直引起广泛的关注<sup>[3-15]</sup>. 但对其位相特性和器件的研究还极少<sup>[16]</sup>. 光的位相特性是光的典型特性之一, 光物理现象都与位相特性相关. 例如, 超光速现象和光子晶体的慢光效应等<sup>[17-19]</sup>. 所以, 从基础物理角度看, 位相与振幅和频率一样重要是公认的.

然而, 基于位相特性的应用和器件目前尚不多见. 在目前的光技术的重要应用(如光通信)中, 信号处理是通过电子系统完成, 而电子系统中只有振幅信号存在, 所以, 现有的光子器件中只有振幅信号被使用. 人们预言, 全光系统将来一定会实现, 到时将只考虑究竟是位相器件还是振幅器件的灵敏度高, 及哪一者有更多优势, 所以研究光子晶体位相有潜在的意义. 对于光子带隙而言, 异质结常用于扩展光子带隙. 对于位相, 异质结将出现什么新相象和新物理规律, 很多是未知的.

本文研究了不同周期结构光子晶体组成的异质结和含耦合杂质的光子晶体组成的异质结的位相, 发现了许多新物理现象和新物理规律.

## 2. 两种周期结构光子晶体组成的异质结的位相物理特性

本文运用传输矩阵方法<sup>[20]</sup>计算研究了光子晶体异质结结构中的带隙和位相特性. 异质结的结构为  $(L_2 H_2)^8 (L_1 H_1)^8$ , 其中,  $n_{H_1} = n_{H_2} = 2.4$ ,  $n_{L_1} = n_{L_2} = 1.45$ ,  $n_{H_1} d_{H_1} = n_{L_1} d_{L_1} = 0.25a = \lambda/4$ ,  $n_{H_2} d_{H_2} = 3\lambda/4$ ,  $n_{L_2} d_{L_2} = \lambda$ . 计算结果如图 1 所示. 从图可看出, 带隙反射率基本是两子光子晶体的带隙反射率之和. 但光子晶体异质结的位相与带隙反射率完全不一样. 它完全由处于前边的光子晶体决定. 对非异质结的光子晶体带隙, 整个带隙位相共变化  $2\pi$ . 从带隙结构上看, 光子晶体异质结的带隙与单一光子晶体的带隙除增宽外没有任何不同. 但实际上完全不一样, 因光的性质由强度和位相等多参数表征. 在处于前边的光子晶体的通带中, 其相移对应每一小峰为  $2\pi$ , 整个禁带的相移近  $40\pi$ , 见图 1(d). 这种反射光的反射率不变(高反射), 但位相随频率连续地近乎线性地和大斜率地变化对位相相关的新物理规律和现象研究将有重要意义, 并对位相相关的应用有潜在的意义, 特别是近乎线性变化的性质将在实际的光子器件的开发应用中很有意义.

\* 国家自然科学基金(批准号: 30674183), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2004CB719804)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: stswzh@mail.sysu.edu.cn

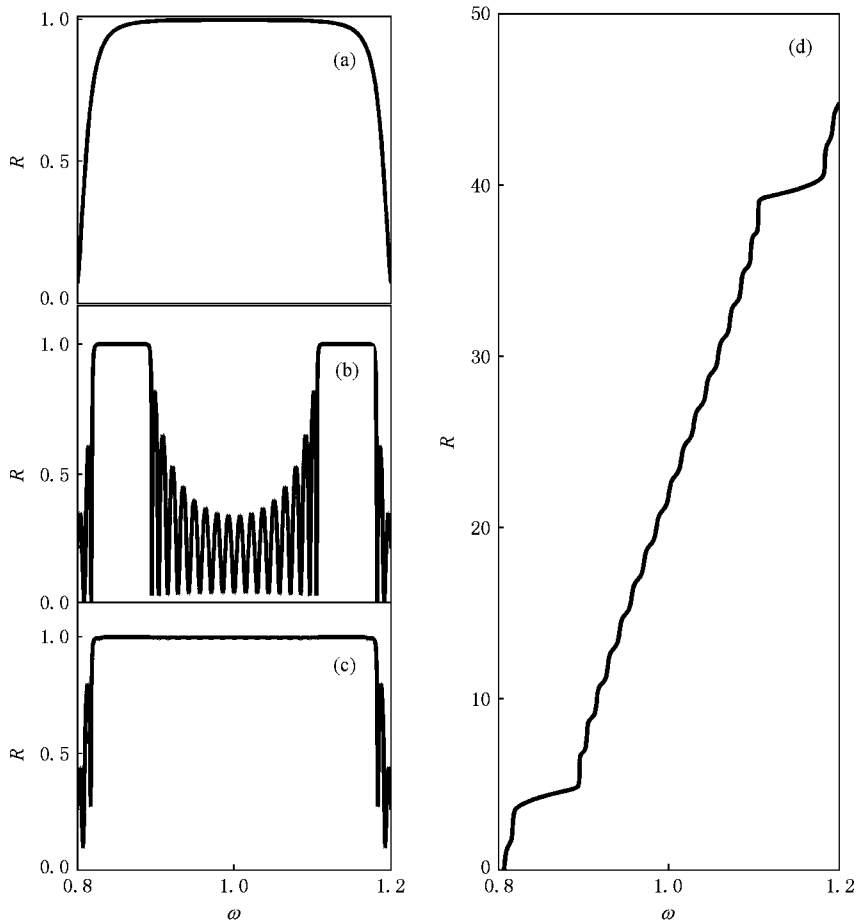


图 1 (a)周期结构的子光子晶体 $(H_1L_1)^8$ 的反射谱带;(b)周期结构的子光子晶体 $(H_2L_2)^8$ 的反射谱带;(c)异质结 $(H_2L_2)^8(H_1L_1)$ 的反射谱带;(d)异质结 $(H_2L_2)^8(H_1L_1)$ 的相位(图中 $R$ 是反射率, $\omega$ 是光的相对频率)

### 3. 含耦合杂质模的光子晶体异质结的位相物理特性

振幅信号的光子晶体器件中常有含杂质的光子晶体,因为很锐的杂质模使得其杂质模的调控很灵敏和方便.另外,在实际应用中,人们常用耦合杂质形成矩形杂质模以保障应用的效果.上述提及的振幅信号的器件基本机理、结构和应用等已为人们所熟悉.但耦合杂质的光子晶体位相很少有器件应用报道,其原因是过去限制光子晶体杂质模的位相应用有两大问题:1)反射光强在杂质模的峰值波长很小,离开峰值波长就剧烈变大,这种剧烈变化的光强使其位相难于应用.2)其位相的变化受衬底等的影响.这些妨碍光子晶体杂质模的位相应用的问题都能通过异质结获得解决<sup>[21]</sup>.

下边,我们以 5 和 10 个耦合杂质的光子晶体

异质结为例(见图 2)进行分析.

图 2 是运用传输矩阵方法计算所得的含 5 和 10 个耦合杂质层的光子晶体异质结的带隙、杂质模和位相特性.结果分析如下:

非异质结的含多个耦合杂质的光子晶体的杂质模是一个矩形的高透射率的透射峰,矩形透射峰中有多个很浅的波纹状的子峰.但构成异质结后就完全变了,整个矩形透射峰几乎消失,原每个很浅的波纹状的子峰变成明显的子峰.如图 2(a)和(c)所示,总体上说这些杂质模的高透射已消失,即峰值的透过率都小于 1%.位相性质则完全相反,不管杂质模的透过率是小还是大,反射光的位相固定不变,即对应每一子峰,相移等于  $2\pi$ ,如图 2(b)和(d)所示.也就是对整个杂质模,5 耦合杂质相移等于  $10\pi$ ,10 耦合杂质相移等于  $20\pi$ .杂质模频率范围是很小的,如此小的频率范围有如此大的相移,且相移中部是线性的.这对位相有关的新物理规律和现象的研究将



明杂质层介质的折射率要改变大于 0.3%。从图 2 (b)和(d)边沿的两子峰看出,杂质层介质的折射率只要改变小于 0.01% 已能使位相改变近  $2\pi$ 。因位相改变  $\pi$  就满足位相光子器件的运行。这就是说在耦合杂质结构的光子晶体中,位相光子器件比振幅光子器件的灵敏度高两个数量级。

如果杂质层是电致折射率改变的敏感材料,例如 PLZT 等,当一个电场作用在光子晶体上的时候,杂质态的频率和位相曲线将随着电场强度变化。这种灵敏的位相变化可以用于设计由电场控制的光学位相器件。如果杂质层是光致折射率改变的敏感材料,例如 GaAs 等,当一束控制激光入射时,杂质态和位相将灵敏地变化。这种光控位相变化将可以用于设计全光位相光学器件。基于上述结果,我们已展示了位相调节器和位相全光开关的工作原理<sup>[21]</sup>。下面讨论位相光逻辑门的可能性。

有很多种光逻辑门,本文只用到位相的高灵敏度,文中例子最终还是变回到振幅信号,这样可从与振幅信号的一一相对应中逐步接受位相光逻辑门的概念。逻辑门有两输入信号光束  $B_1$  和  $B_2$ , 它们是前一级的输出的信号,光束强度是“1”态时为  $I = I_0$ ,“0”态时为  $I = 0$ 。第三束是强度为  $I_0$  的稳态激光,它被等分成  $B_3$  和  $B_4$ (目的是  $B_3$  和  $B_4$  分别为 Michelson 干涉仪的两臂,此光子晶体为一臂的反射镜, $B_3$  和  $B_4$  干涉后把位相信号转换回振幅信号,目的是理解位相光逻辑门的概念,如果是全位相光路就无需  $B_4$ ),  $B_3$  入射到光子晶体,它的反射光为出射信号光束  $B_{\text{ops}}$ 。设图 2 在所用频率附近的子峰间隔为  $\Delta\omega$ 。本文设计  $\Delta\omega$  等于  $I_0$  强度的激光束入射时的子峰频移量。我们设入射激光频率为

$1 + 0.5\Delta\omega$ (即使很弱不产生相移时,入射激光频率的位相在图 2 中对应  $\pi$  或  $-\pi$ );当只有  $B_3(I_0/2)$  入射, $B_1$  和  $B_2$  处于“0”态( $I = 0$ ), $B_{\text{ops}}$  的相移为  $\pi$ ,  $\pi$  的相移使激光频率的位相为图 2 中对应 0 或  $2\pi$  位相。这里  $\pi$  的偶数表示“1”态,奇数表示“0”态,对应振幅信号逻辑门为在 Michelson 干涉仪的两臂中,极弱条件下  $B_3$  和  $B_4$  干涉增强, $B_4$  无相移,当  $B_3$  相移为  $\pi$  的奇数倍,Michelson 干涉结果相消,表示“0”态;当  $B_3$  相移为  $\pi$  的偶数倍,Michelson 干涉结果相增,表示“1”态。当  $B_1$  和  $B_2$  其中一者为“1”态, $B_3$  相移为再加  $2\pi$ ,当  $B_1$  和  $B_2$  两者都为“1”态,则  $B_3$  相移加  $4\pi$ ,最后都是态“1”,这是与非门(NAND)。

通过设计  $\Delta\omega$  和激光对应的频率就可实现各种光逻辑门(包括 AND, NAND, OR, XOR, NXOR 和 NOT),而且只用一稳态激光( $B_3$ )就能开动,正如电子逻辑门用一稳态电压能开动一样。另外,位相光逻辑门是低能耗的。上述内容可扩展到二或三维光子晶体。以上位相器件在光集成的光处理中将有用用途。

## 5. 结 论

光子晶体异质结可使杂质模的反射率接近 1。两种周期结构光子晶体组成的异质结的位相由前边的子光子晶体的位相起主导作用。周期结构子光子晶体和含耦合杂质模的子光子晶体组成的异质结,其反射光的位相不管反射率多大多小都是对应杂质模的每一子峰对应的相移为  $2\pi$ 。此反射相移可用于制作各类高灵敏光子器件(如光逻辑门)及研究位相有关的新物理过程和现象。

[1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059

[2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486

[3] Noda S, Yokoyama M, Imada M, Chutinan A, Mochizuki M 2001 *Science* **293** 1123

[4] Wang Z, Fan S H 2005 *Opt. Lett.* **30** 1989

[5] He Y J, Su H M, Tang F Q, Dong P, Wang H Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 (in Chinese) [何拥军、苏慧敏、唐芳琼、董鹏、汪河洲 2001 物理学报 **50** 892]

[6] Wang X, Xu J F, Su H M, He Y J, Jiang S J, Wang H Z, Zeng Z H, Chen Y L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 527 (in Chinese) [王霞、许剑峰、苏慧敏、何拥军、江绍基、汪河洲、曾兆华、陈用烈 2002 物理学报 **51** 527]

[7] Su H M, Zheng X G, Wang X, Wang H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1044 (in Chinese) [苏慧敏、郑锡光、王霞、汪河洲 2002 物理学报 **51** 1044]

[8] Liang G Q, Han P, Wang H Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2197 (in Chinese) [梁冠全、韩鹏、汪河洲 2004 物理学报 **53** 2197]

[9] Han P, Wang H Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 338 (in Chinese) [韩鹏、汪河洲 2005 物理学报 **54** 338]

[10] Pan J Y, Liang G Q, Mao W D, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 729 (in Chinese) [潘杰勇、梁冠全、毛卫东、汪河洲 2006 物理学报 **55** 729]

[11] Zhong Y C, Zhu S A, Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 688 (in Chinese) [钟永春、朱少安、汪河洲 2006 物理学报 **55** 688]

- [ 12 ] Wei Z C , Dai X F , Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 733 ( in Chinese ) [ 韦中超、戴峭峰、汪河洲 2006 物理学报 **55** 733 ]
- [ 13 ] Zeng J , Pan J Y , Dong J W , Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2785 ( in Chinese ) [ 曾 隽、潘杰勇、董建文、汪河洲 2006 物理学报 **55** 2733 ]
- [ 14 ] Wen X W , Dong J W , Wang H Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2781 ( in Chinese ) [ 温燮文、董建文、汪河洲 2006 物理学报 **55** 2781 ]
- [ 15 ] Dong J W , Chen Y H , Wang H Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 268 ( in Chinese ) [ 董建文、陈溢杭、汪河洲 2007 物理学报 **56** 268 ]
- [ 16 ] Dai X F , Li Y W , Wang H Z 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061121
- [ 17 ] Soljacic M , Johnson S G , Fan S H , Ibanesca m , Ippen E , Joannopoulos J D 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2052
- [ 18 ] Solli D R , McCormick C F , Chiao R Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1036
- [ 19 ] Winful H G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 023901
- [ 20 ] Bell R M , Pendry J B , Moreno L M , Ward A J 1995 *Comput. Phys. Commun.* **85** 306
- [ 21 ] Wu K S , Dong J W , Wang H Z 2008 *Appl. Phys. B* **91** 145

## Phase properties of photonic crystal heterostructure and its applications \*

Wu Kai-Shun Long Xing-Teng Dong Jian-Wen Chen Di-Hu Wang He-Zhou<sup>†</sup>

( State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies , Zhongshan ( Sun Yat-Sen ) University , Guangzhou 510275 , China )

( Received 1 October 2007 ; revised manuscript received 13 May 2008 )

### Abstract

It is revealed that the reflectance in the whole stop band of a heterostructure , including the defect mode , approaches 1 ; while the phase-shift depends on the sub-photonic crystal ( PC ) that faces the incident direction . For every sub-peak in the defect mode or every pass band of the sub-PC facing the incident direction , the phase shift is  $2\pi$  . These properties are useful for designing optical phase devices several orders more sensitive than those using amplitude-signal . In this paper , a sensitive optical phase logic gate ( NAND ) is described as an example of optical phase devices . Moreover , these properties are also useful for the study of related physical phenomena .

**Keywords** : photonic crystal , phase , heterostructure , coupled defect

**PACC** : 4270Q , 7820P

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10674183 ) , the National Basic Research Program of China ( Grant No. 2004CB719804 ) .

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : stswzh@mail.sysu.edu.cn