

文章编号: 0258-7025(2007)06-0777-04

杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响

刘启能

(重庆工商大学理学院, 重庆 400067)

摘要 为了研究杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响,采用复折射率和法布里-珀罗(F-P)干涉法,计算出掺有吸收杂质的一维光子晶体的缺陷模透射率和反射率随消光系数的变化特征。得出消光系数对一维掺杂光子晶体的缺陷模的透射率和反射率会产生显著的影响。当消光系数由 0 增加到 0.03 时缺陷模的透射率由 1 减少为 0。当消光系数由 0 增加到 0.03 时缺陷模的反射率由 0 增加到 0.86。消光系数增加时反射波中的缺陷模宽度会增大,而消光系数的变化对透射波中的缺陷模宽度影响很小。

关键词 光电子学;光子晶体;法布里-珀罗干涉法;吸收

中图分类号 O 436 **文献标识码** A

Effect of Impurity Absorption on One-Dimensional Photonic Crystal Defect Mode

LIU Qi-neng

(School of Science, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract For studying the influence of impurity absorption on one-dimensional (1D) photonic crystal defect mode, the complex refractive index and Fabry-Perot interferometry are adopted, and variety feature of extinction coefficient with the transmissivity and reflectivity of defect mode in the impurity-doped 1D photonic crystal is calculated. The extinction coefficient has obvious influence on the transmissivity and reflectivity of defect mode. When the extinction coefficient increases from 0 to 0.03, the transmissivity and reflectivity of defect mode change from 1 to 0 and from 0 to 0.86 respectively. The width of defect mode in reflected wave will enlarge when the extinction coefficient increases, while the width of defect mode in transmitted wave turns constant when the extinction coefficient changes.

Key words optoelectronics; photonic crystal; Fabry-Perot interferometry; absorption

1 引言

自 1987 年分别由 E. Yablonovitch 和 S. John 提出光子晶体的概念后^[1,2],其在能带和带隙方面的特殊性质,使它很快成为光学前沿领域中一个十分活跃的研究课题。通过在一维光子晶体中掺杂质可以使得原来的禁带上出现缺陷模^[3~6],利用缺陷模的特性可以研制滤波器^{7~10]}、微谐振腔等光学器件^{11,12]}。这些研究都把掺杂材料作为完全透明的材料来处理,而实际的掺杂材料是具有吸收性的。因此,研究掺杂材料的吸收性对缺陷模透射率和反射率的影响,对利用光子晶体来研制微型光学器件有

着十分重要的意义。

本文利用复折射率和法布里-珀罗(F-P)干涉法,研究在两块一维光子晶体中掺入有吸收的杂质层后,杂质的消光系数 κ (衰减指数)对缺陷模透射率和反射率的影响。

2 掺杂一维光子晶体的结构

设计一种一维光子晶体掺杂结构,由两层介质 A, B 周期性叠置组成,介质层 A 的折射率 $n_1 = 1.38$ (氟化镁),厚度为 d_1 ; 介质层 B 的折射率 $n_2 = 2.38$ (硫化锌),厚度为 d_2 。两层介质的光学厚度相

收稿日期:2006-10-16; 收到修改稿日期:2006-12-19

作者简介:刘启能(1957—),男,四川人,教授,从事光学与原子分子物理研究。

E-mail: ybxyjwc@sina.com; liuqineng@yahoo.com.cn

等 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, λ_0 为中心波长, 取 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 。两个光子晶体的中间夹着一具有吸收的杂质层 C 层, 其厚度为 $d_3 = \lambda_0/2$, 其复折射率 $\hat{n}_3 = n_3(1 + i\kappa_3)$, κ_3 为杂质的消光系数, n_3 为杂质的折射率, 后面的计算中 $n_3 = 2.97$ 。该掺杂光子晶体置于折射率 $n_0 = 1$ 的空气中。此一维掺杂光子晶体的结构为: $(AB)^5 C(BA)^5$, 两边的一维光子晶体是透明的, 而中间的杂质对光有吸收作用。

3 缺陷模透射率和反射率的理论计算

一维掺杂光子晶体类似一个法布里-珀罗干涉仪, 两边的光子晶体是法布里-珀罗干涉仪反射膜, 中间的杂质是腔内介质。在杂质没有吸收(透明)的情况下, 当光垂直入射到一维掺杂光子晶体上时, 其透射系数 t 和反射系数 r 为^[13]

$$t = \frac{T'}{(1 - R'e^{i\delta})}, \quad r = \frac{(1 - e^{i\delta})\sqrt{R'}}{(1 - R'e^{i\delta})}, \quad (1)$$

其透射率 T 和反射率 R 为

$$T = tt^*, \quad R = rr^*, \quad (2)$$

(1) 式中

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_3 d_3, \quad (3a)$$

T' 和 R' 为两边的光子晶体中任一边的透射率和反射率, T' 和 R' 可用特征矩阵法计算。

对于有吸收的介质, 为了同时描述其对光波的折射和吸收, 引入复折射率 $\hat{n} = n(1 + i\kappa)$ 的概念^[14]。其中 n 为介质的折射率, 描述其对光波的折射; κ 为介质的消光系数, 描述其对光波的吸收。为了研究杂质吸收对一维掺杂光子晶体缺陷模的影响, 将(3a) 式中的 n_3 换为 $\hat{n}_3 = n_3(1 + i\kappa_3)$ 得

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_3(1 + i\kappa_3)d_3, \quad (3b)$$

将(3b)式代入(1)式和(2)式, 就能计算出杂质有吸收时一维掺杂光子晶体缺陷模的透射率 T 和反射率 R 。

3.1 缺陷模的透射率和反射率随消光系数变化的立体图

为了研究缺陷模随杂质消光系数 κ_3 的变化规律, 由(1)和(2)式计算出缺陷模的透射率 T 和反射率 R 随杂质消光系数和入射波长变化的立体图, 如图 1 和图 2 所示。在图 1 和图 2 中 x 轴为杂质的消光系数 κ_3 , y 轴为入射波长 λ , z 轴分别为透射率 T 和反射率 R 。

由图 1 可知, 在透射波的禁带中间, 波长 $\lambda =$

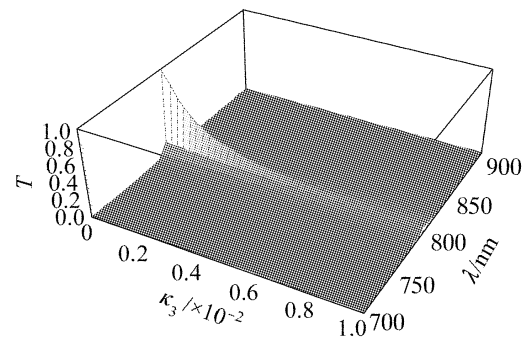


图 1 缺陷模透射率随消光系数变化的立体图

Fig. 1 3D diagram of the transmissivity T of defect mode versus the extinction coefficient κ_3

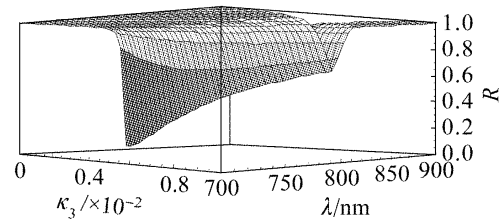


图 2 缺陷模反射率随消光系数变化的立体图

Fig. 2 3D diagram of the reflectivity R of defect mode versus the extinction coefficient κ_3

792 nm 处出现了一条缺陷模透射峰, 其缺陷模透射峰随杂质的消光系数 κ_3 的变化发生明显的变化。当 $\kappa_3 = 0$ (无吸收) 时, 其缺陷模透射峰峰值为 1; 当 κ_3 增加为 0.01 时, 其缺陷模透射峰峰值减少到 0.06, 即在透射波中的缺陷模已经消失。

由图 2 可知, 在反射波的禁带中间, 波长 $\lambda = 792 \text{ nm}$ 处也出现了一个缺陷模, 其缺陷模的反射率也随杂质的消光系数 κ_3 的变化发生明显的变化。当 $\kappa_3 = 0$ (无吸收) 时, 其缺陷模的反射率为 0; 当 κ_3 增加为 0.01 时, 其缺陷模反射率增加到 0.6, 比缺陷模的透射率变化要慢一些; 当 κ_3 增加为 0.08 时(图 2 中 κ_3 的变化范围是 $0 \sim 0.01$), 其缺陷模的反射率接近于 1, 即反射波中缺陷模消失了。由于吸收的原因, $T + R$ 不再等于 1, 而是小于 1。

3.2 缺陷模的透射率和反射率随消光系数变化的响应曲线

为了更清楚地反映出缺陷模随消光系数的变化特征, 在缺陷模的中心波长处 ($\lambda = 792 \text{ nm}$) 作图 1 和图 2 的切面图, 得到缺陷模的透射率和反射率随消光系数的响应曲线, 如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可知, 缺陷模透射率随消光系数的增加而急剧下降, 当消光系数为 0.001 时缺陷模的透射率已经降为 0.5, 当消光系数为 0.03 时缺陷模的透射率已接近为 0。

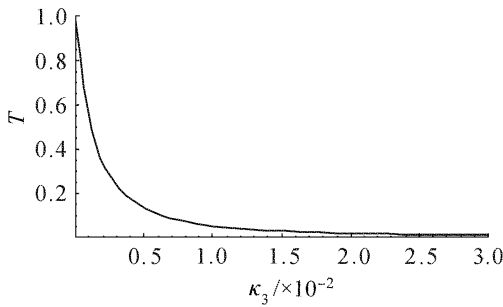


图3 缺陷模透射率随消光系数变化的响应曲线
Fig. 3 Response curve of the transmissivity of defect mode versus the extinction coefficient κ_3

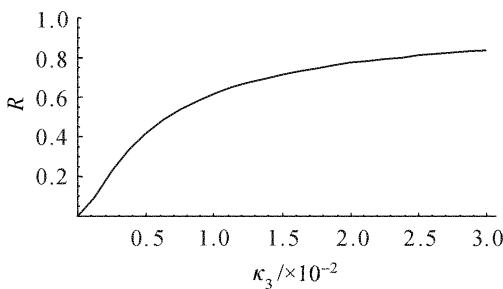


图4 缺陷模反射率随消光系数变化的响应曲线
Fig. 4 Response curve of the reflectivity of defect mode versus the extinction coefficient κ_3

由图4可知,缺陷模反射率随消光系数的增加而迅速增加,但不如缺陷模的透射率变化得那样剧烈。当消光系数为0.007时缺陷模的反射率已经升为0.5,当消光系数为0.03时缺陷模的反射率已经升为0.86。

3.3 缺陷模的透射率和反射率随入射波长变化的响应曲线

为了清楚地反映在不同消光系数下缺陷模的透射率和反射率随入射波长的变化特征, κ_3 分别取0(无吸收), 0.001, 0.003作图1和图2的切面图,得到缺陷模透射率和反射率随入射波长变化的响应曲线,如图5和图6所示。在图5和图6中细线、中粗线和粗线分别对应 κ_3 为0, 0.001, 0.003缺陷模的透射

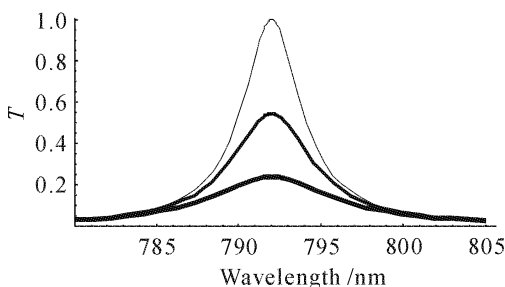


图5 缺陷模透射率随入射波长变化的响应曲线
Fig. 5 Response curves of the transmissivity of defect mode versus incident light wavelength

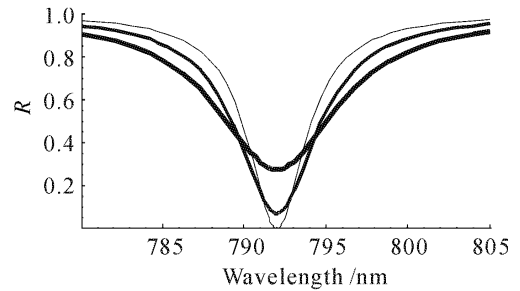


图6 缺陷模反射率随入射波长变化的响应曲线
Fig. 6 Response curves of the reflectivity of defect mode versus incident light wavelength

率和反射率随入射波长变化的响应曲线。

由图5可知,1) κ_3 的增加会明显影响缺陷模透射率的减少,但不会引起缺陷模中心波长的变化($\lambda = 792$ nm);2) 缺陷模透射峰的宽度几乎不随 κ_3 的增加而变化。

由图6可知,1) κ_3 的增加会明显影响缺陷模反射率的增加,但也不会引起缺陷模反射率凹陷的中心波长的变化($\lambda = 792$ nm);2) 缺陷模反射率的凹陷的宽度随 κ_3 的增加而增大。

4 结 论

通过对掺有吸收杂质的一维光子晶体的数值计算和理论分析,得出了杂质的消光系数对一维掺杂光子晶体的缺陷模的透射率和反射率的影响特征为:1) 杂质的消光系数对一维掺杂光子晶体的缺陷模的透射率和反射率会产生明显的影响,其中对透射率的影响更为明显。当消光系数增加为0.008时透射波中的缺陷模消失,当消光系数增加为0.03时反射波中的缺陷模消失。2) 杂质的消光系数对缺陷模的中心波长位置没有影响。3) 当消光系数增加时反射波中的缺陷模宽度增大,而消光系数的变化对透射波中的缺陷模宽度影响很小。

由于吸收对缺陷模的透射率和反射率有着显著的影响,因此在利用一维掺杂光子晶体来设计滤波器和微谐振腔等光学器件时,必须考虑杂质吸收这一重要因素。

参 考 文 献

- 1 Ei Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeew John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Xu Guiwen, Ouyang Zhengbiao, An Henan *et al.*. Investigation

- on the bandwidth and quality factor of the defect mode in a photonic crystal with a defect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1079~1082
 许桂雯, 欧阳征标, 安鹤男 等. 光子晶体缺陷模的带宽与品质因子研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(9):1079~1082
- 4 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1557~1560
 方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(11):1557~1560
- 5 Zhou Bing, Ling Guangquan, Wang Hezhou. Narrow frequency and sharp angular defect mode of one-dimensional photonic crystals in visible and near-infrared [J]. *Laser Journal*, 2006, **26**(1):16~18
 周 冰, 梁冠全, 汪河洲. 可见光波段一维光子晶体窄频带锐角度缺陷模[J]. 激光杂志, 2006, **26**(1):16~18
- 6 Wang Hao, Liao Changjun, Fan Guanghan *et al.*. The fabrication of narrow spectrum LED by employing asymmetry one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3):408~411
 王 浩, 廖长俊, 范广涵 等. 应用不对称一维光子晶体结构制备窄光谱 LED[J]. 光学学报, 2005, **25**(3):408~411
- 7 Zhou Jingou, Du Guiqiang, Zhang Yawen *et al.*. Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8):3703~3707
 周金苟, 杜桂强, 张亚文 等. 双周期厚度调制的一维光子晶体的电磁模[J]. 物理学报, 2005, **54**(8):3703~3707
- 8 Huang Hanjuan, Ouyang Zhengbiao, Xu Guiwen *et al.*. Investigation of perfect multi-channel filtering properties of complex-period photonic crystals [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(1):50~53
 黄韩娟, 欧阳征标, 许桂雯 等. 复周期光子晶体的理想多通道滤波特性[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(1):50~53
- 9 Mao Huibing, Yang Changli, Lai Zongsheng. Theoretical study of the tunable optical filter properties based on photonic crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7):2201~2205
 茅惠兵, 杨昌利, 赖宗声. 光子晶体可调谐滤波特性的理论研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(7):2201~2205
- 10 Tian Guoxun, Wu Yonggang, Wang Zhanshan *et al.*. Design and modification of double channel of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):661~664
 田国勋, 吴永刚, 王占山 等. 一维光子晶体的双通道位置设计及调整[J]. 光学学报, 2005, **25**(5):661~664
- 11 Ouyang Zhengbiao, Xu Guiwen, Sun Yiling *et al.*. Tuning characteristics of photonic crystal micro-resonators [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4):399~401
 欧阳征标, 许桂雯, 孙一翎 等. 光子晶体微谐振腔的调谐特性[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(4):399~401
- 12 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin. Study on photonic crystal fibers by effective index model [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):723~727
 任国斌, 王 智, 娄淑琴 等. 应用等效折射率模型研究光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2004, **31**(6):723~727
- 13 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 299~301
 马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 第七版, 上册. 北京: 电子工业出版社, 2005. 299~301
- 14 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 615~617
 马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 第七版, 下册. 北京: 电子工业出版社, 2005. 615~617