

文章编号: 1000-5013(2009)05-0509-04

光束在一维光子晶体中的古-汉位移特性

王 涛, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 根据传输矩阵法, 研究光束在一维光子晶体中的古斯-汉森位移. 结果表明, 光子晶体结构的随机误差能够增强光子禁带中的古斯-汉森位移. 该位移与光子晶体材料的折射率、光子晶体的周期数, 以及光束的入射角有关. 研究结果还表明, 在掺杂的一维光子晶体中, 结构的随机误差会降低缺陷态附近的古斯-汉森位移, 同时在禁带的其他地方, 位移得到增强.

关键词: 古斯-汉森位移; 一维光子晶体; 随机误差; 透射光束

中图分类号: O 436.1

文献标识码: A

当一束光在两种介质的分界面发生全反射时, 相对于几何光学预言的位置, 实际光线在界面上有一个很小的侧向位移, 即古斯-汉森 (Goos-Hänchen) 位移^[1-2]. 古斯-汉森位移一直是人们关注的重点^[3-6]. 一维光子晶体中的古斯-汉森效应, 在光子晶体的光子器件设计中有着相当重要的意义, 因此备受人们关注^[7-8]. Felbacq 等^[7]在光子带隙附近发现了明显的古斯-汉森位移, 而 Wang 等^[8]发现在光子晶体中引入缺陷层后, 缺陷态附近古斯-汉森位移被极大的增强. 另一方面, 由于不可能得到严格周期性的光子晶体, 因而在光子晶体的制备过程中, 不可避免地存在着某种程度的随机误差. 众所周知, 光子晶体结构的随机误差会极大地破坏光子禁带^[9-11]. 可以预期, 在考虑到光子晶体结构随机误差的情况下, 禁带的破坏必然导致禁带中古斯-汉森位移的增强. 本文将研究光束在含随机误差的一维光子晶体中的古斯-汉森位移.

1 理论分析

假设一束频率为 ω 的 TE 波, 以角度 θ 从自由空间入射到一维光子晶体中, 如图 1 所示. 图 1 中, 实线表示理想光子晶体, 虚线表示考虑随机误差的光子晶体, 电场位于 x 方向.

为了讨论简单, 设定一维光子晶体具有对称结构 $(AB)^m A$, 其中 m 为一整数, 表示光子晶体的周期. 假设所有的介质层都是非磁性的, 它们的性质主要由材料的折射率 n_A, n_B 决定. 对于理想的光子晶体而言, 膜层 A, B 的厚度 d_A, d_B 满足

$$n_A d_A = n_B d_B = p_c / 4.$$

其中, p_c 为光束垂直入射时的禁带中心波长.

结构的随机误差总是或多或少的存在. 为了研究光束在含随机误差的一维光子晶体中的古斯-汉森位移, 假定单层介质膜的光学厚度^[10]为

$$D_i = D_0 (1 + hP). \quad (1)$$

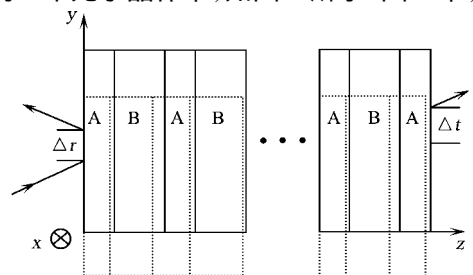


图 1 一维光子晶体示意图

Fig. 1 Schematic of a one-dimensional photonic crystal

收稿日期: 2008-06-13

通信作者: 蒲继雄 (1962-), 男, 教授, 主要从事光束传输与非线性光学研究. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60477041); 福建省科技计划重点项目 (2007 H0027); 华侨大学科研基金资助项目 (07 HZR29)

式(1)中, $D_0 = p_c/4$ 为理想光子晶体中的光学厚度, P 为 $(-1, 1)$ 之间的一个随机数, h 为衡量光子晶体随机误差程度的常数.

根据 Maxwell 方程组, 光在单层介质膜中的特征矩阵^[6,12]可以表示为

$$M_j(z, k_y) = \begin{bmatrix} \cos(k_z^j z) & i \frac{1}{q_j} \sin(k_z^j z) \\ i q_j \sin(k_z^j z) & \cos(k_z^j z) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中, k_z^j 是 j 层介质中波矢的 z 分量. 当 $k^2 > k_y^2/n_j^2$ 时, $k_z^j = (n_j^2 k^2 - k_y^2)^{1/2}$; 当 $k^2 < k_y^2/n_j^2$, $k_z^j = i(k_y^2 - n_j^2 k^2)^{1/2}$. k_y 是入射波矢 k ($k = \frac{\omega}{c}$, c 为真空中的光速)的 y 分量, 并且 $q_j = k_z^j/k$. 根据边界条件, 光束在整个光子晶体中的反射和透射系数^[8,12]可以表示为

$$r(k_y) = \frac{[\varphi_0 X_{2,2}(k_y) - q_0 X_{1,1}(k_y)] - [\varphi_0 q_0 X_{1,2}(k_y) - X_{2,1}(k_y)]}{[\varphi_0 X_{2,2}(k_y) + q_0 X_{1,1}(k_y)] - [\varphi_0 q_0 X_{1,2}(k_y) + X_{2,1}(k_y)]}, \quad (3)$$

$$t(k_y) = \frac{2\varphi_0}{[\varphi_0 X_{2,2}(k_y) + q_0 X_{1,1}(k_y)] - [\varphi_0 q_0 X_{1,2}(k_y) + X_{2,1}(k_y)]}. \quad (4)$$

其中, $\varphi_0 = q_0 = (k^2 - k_y^2)^{1/2}/k$, $X_{i,j}(k_y)$ 是 $X_N(k_y) = \prod_{i=1}^N M_i(k_y, d_i)$ 的矩阵元, $X_N(k_y)$ 代表整个光子晶体的传输矩阵, N 是光子晶体的介质层数.

假设入射光束足够宽, 则经过光子晶体后的反射光束和入射光束的古斯-汉森位移^[7-8]可以表示为

$$r, t = -d \, r, t / dk_y. \quad (5)$$

式(5)中, r, t 为 $r(k_y)$, $t(k_y)$ 的相位.

2 含随机误差的一维光子晶体的古斯-汉森位移

含随机误差的一维光子晶体中, 其透射光束的古斯-汉森位移, 如图 2 所示. 图 2 中, 光束入射角取 20° , 介质膜层厚度由式(1)决定, $n_A = 2.2$, $n_B = 1.4$, $m = 8$, $p_c = 3 \text{ mm}$.

从图 2 中可看出, 对于理想的光子晶体 ($h = 0$), 位移在带隙附近比较明显, 而在禁带内几乎为零. 然而, 在考虑到结构随机误差的情况下, 在禁带中将观察到较强的古斯-汉森位移, 随机误差越大, 禁带中的古斯-汉森位移越明显.

下面考虑构成光子晶体的材料的折射率对光束古斯-汉森 (GH) 位移的影响. 理想光子晶体 ($h = 0$) 的古斯-汉森位移, 以及考虑光子晶体结构 ($h = 0.4$) 随机误差时透射光束的古斯-汉森位移, 如图 3 所示. 在图 3 中, 光束入射角为 20° , $m = 8$, $p_c = 3 \text{ mm}$, $n_A = 1.5$.

从图 3(a) 中可以看出, 两种介质膜的折射率差别越大, 光子带隙处的古斯-汉森位移越大, 而在光子禁带中的古斯-汉森位移越小. 从图 3(b) 可以看出, 光子晶体结构的随机误差导致禁带带隙处出现的古斯-汉森位移并不会随折射率的差别的增大而减小, 反而会随着折射率差别的增大而增大.

光子晶体的两种介质膜的周期数对透射光束古斯-汉森位移的影响, 如图 4 所示. 图 4 中, 光束入射角为 20° , $p_c = 3 \text{ mm}$, $n_A = 2$, $n_B = 1.5$. 从图 4(a) 中可得到, 随着构成光子晶体的周期数的增加, 光子带隙附近的古斯-汉森位移不断增大. 但是, 在禁带中的古斯-汉森位移还是很小时, 并不随着周期的改变而改变. 从图 4(b) 中可看出, 在含有随机误差的一维光子晶体中, 随着周期数的增加, 透射光束的古斯-汉森位移不仅在带隙附近会增大, 在禁带中也会出现古斯-汉森位移, 并随着周期数的增加而增大.

光束入射角对光子晶体古斯-汉森位移的影响, 如图 5 所示. 图 5 中, $m = 8$, $p_c = 3 \text{ mm}$, $n_A = 2$, $n_B = 1.5$. 从图 5 中可以看出, 随着入射角的增大, 光束经过光子晶体后的古斯-汉森位移也增大.

下面考虑在光子晶体中参入杂质层后的情况. 图 6 为一维对称光子晶体 $(AB)^m AD (AB)^m A$. 其中,

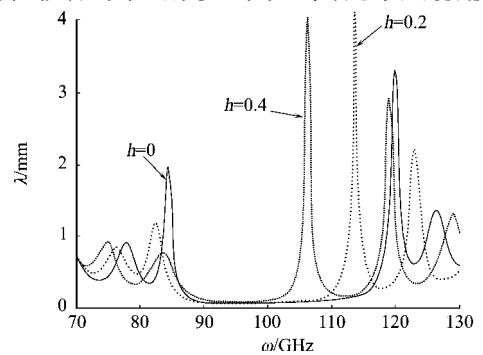


图 2 不同随机误差的光子晶体古斯-汉森位移
Fig. 2 Goos-Hänchen shift for a in photonic crystals with different disorder

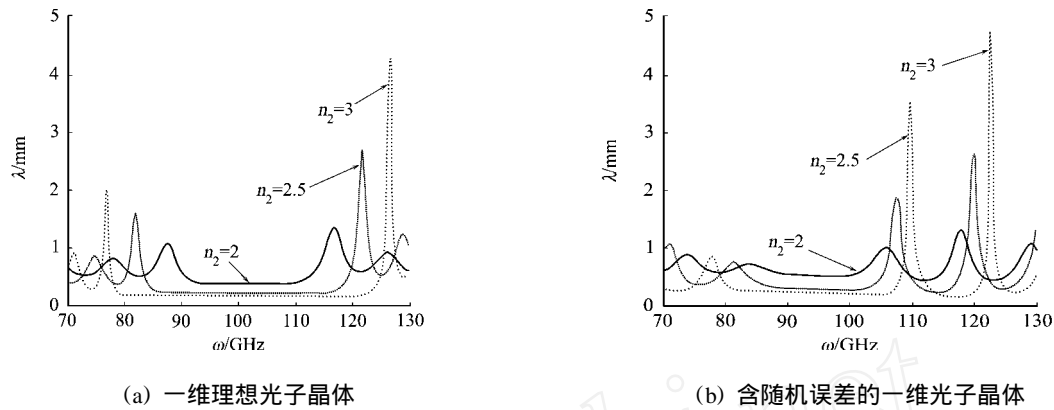


图 3 折射率对古斯-汉森位移的影响

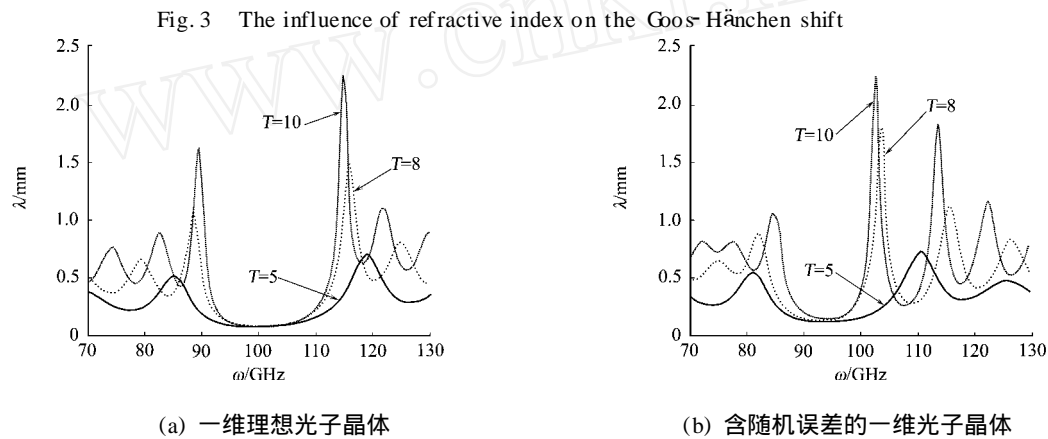


图 4 周期数对古斯-汉森位移的影响

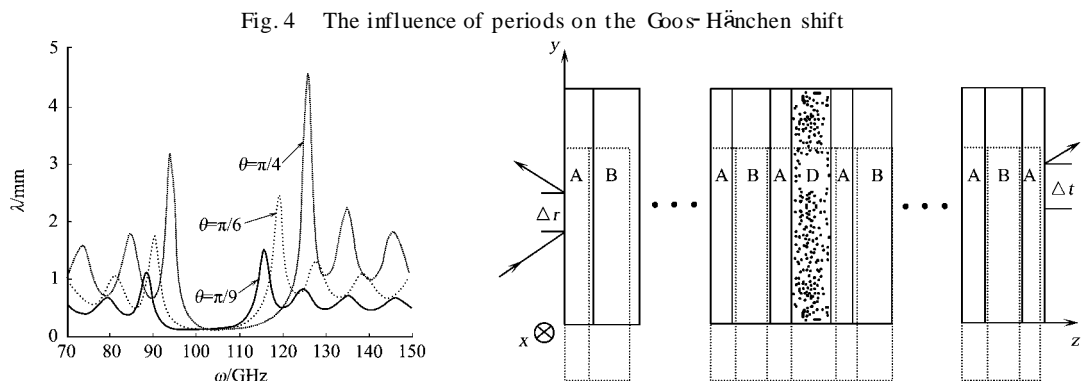


图 5 光束入射角对古斯-汉森位移的影响

Fig. 5 The influence of incident angle of the beam on the Goos-Hänchen shift

杂质层 D 的厚度满足关系 $n_D d_D = p_c/2$, 其他介质膜层的厚度由式 (1) 决定. 不同随机误差情况下, 一维掺杂光子晶体中透射光束的古斯-汉森位移, 如图 7 所示. 图 7 中, 入射角度为 20° , $n_A = 2.2$, $n_B = n_D = 1.4$, $p_c = 3$ mm, $m = 5$.

从图 7 可以看出, 在理想的光子晶体中 ($h = 0$), 掺杂后会在缺陷态附近产生一个很大的古斯-汉森位移, 正如文 [8] 所示. 但是, 在考虑到结构的随机误差后, 在缺陷态附近的位移将受到抑制, 而在禁带其他地方的位移将得到增强; 随机误差越大, 这种现象越明显.

图 6 一维掺杂光子晶体示意图

Fig. 6 Schematic of a one dimensional photonic crystal containing a defect layer

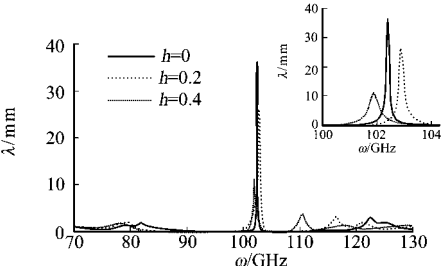


图 7 一维掺杂光子晶体的古斯-汉森位移

Fig. 7 Goos-Hänchen shift for a one-dimensional photonic crystals with defect layer

3 结束语

光子晶体结构的随机误差,会导致光子禁带中产生较大的古斯-汉森位移. 在研究了含杂质层的一维光子晶体后可知,光子晶体结构的随机误差会使透射光束在缺陷态附近的古斯-汉森位移得到抑制,同时在禁带其他地方的位移得到增强. 这一系列结论,对光学研究有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] GOOS F, HANCHEN H. Ein neuer und fundamentaler versuch zur totalreflexion[J]. Ann Phys, 1947, 1(6): 333-346.
- [2] GOOS F, HANCHEN H. Neumessung des strahlversetzungseffekts bei totalreflexion[J]. Ann Phys, 1949, 5(3): 251-252.
- [3] ARTMANN K. Berechnung der seitenversetzung des totalreflektierten strahles[J]. Ann Phys, 1948, 2(1/2): 87-102.
- [4] RENARD R H. Total reflection: A new evaluation of the Goos-Hänchen shift[J]. J Opt Soc Am, 1964, 54(10): 1190-1197.
- [5] COWAN J J, ANICIN B. Longitudinal and transverse displacements of a bounded microwave beam at total internal reflection[J]. J Opt Soc Am, 1977, 67(10): 1307-1314.
- [6] JOST B M, AL-A R, SALEH B E A. Observation of the Goos-Hänchen effect in a phase-conjugate mirror[J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(11): 2233-2235.
- [7] LI C F. Negative lateral shift of a light beam transmitted through a dielectric slab and interaction of boundary effect[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(13): 123903-133903.
- [8] WANG L G, ZHU S Y. Giant lateral shift of a light beam at the defect mode in one-dimensional photonic crystals[J]. Opt Lett, 2006, 31(1): 101-103.
- [9] LI Z Y, ZHANG Z Q. Fragility of photonic band gaps in inverse-opal photonic crystals[J]. Phys Rev (B), 2000, 62(3): 1516-1519.
- [10] KALITEEVSKI M A, BEGGS D M, BRAND S, et al. Stability of the photonic band gap in the presence of disorder[J]. Phys Rev (B), 2006, 73: 033106.
- [11] YU T B, JIANG X Q, YANG J Y, et al. Self-imaging effect of TM modes in photonic crystal multimode waveguides only exhibiting band gaps for TE modes[J]. Phys Lett (A), 2007, 396(1/2): 167-171.
- [12] WANG L G, LIU N H, LIU Q, et al. Propagation of coherent and partially coherent pulses through one-dimensional photonic crystals[J]. Phys Rev (E), 2004, 70(1/2): 016601.

Goos-Hänchen Shift of a Light Beam in One-Dimensional Photonic Crystals

WANG Tao, PU Ji-xiong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on the transfer matrix method, the Goos-Hänchen (GH) shift of a light beam in one-dimensional photonic crystals have been investigated. It is found that the GH shifts in the band gap are enhanced in the presence of random error, and the lateral shifts are related with the refractive index of photonic crystals, the periods of photonic crystals, and the incident angle of the beam. It is also found that the presence of random error can decrease the lateral shifts which were induced by the defect mode in a one-dimensional photonic crystal containing a defect layer, and the lateral shifts of band gap are enhanced.

Keywords: Goos-Hänchen shift; one-dimensional photonic crystals; random error; transmitted beam

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)