

文章编号: 1673—9620 (2008) 03—0062—03

Bragg 反射镜的 Goos—Hänchen 效应^{*}

徐 雷, 马 骥, 黄正逸, 陈宪锋

(江苏工业学院 数理学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 研究了 Bragg 反射镜的全反射特性和全反射时的 Goos—Hänchen 效应。在入射角不大时 Goos—Hänchen 效应不明显, 且 TE、TM 模的特性差异很小, 但在大角度入射时现象奇特, TE 模的 Goos—Hänchen 效应为正, 且随入射角的增大越加明显; 而对 TM 模则会出现负的 Goos—Hänchen 效应。

关键词: 侧向位移; 延迟时间; Bragg 反射镜; 全向反射

中图分类号: O 431.2

文献标识码: A

Study of the Goos—Hänchen Effect of a Bragg Reflector

XU Lei, MA Ji, HUANG Zheng-yi, CHEN Xian-feng

(School of Physics and Mathematics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The total reflection characteristics and the Goos—Hänchen effects of the Bragg reflector are studied. It is demonstrated that the Goos—Hänchen effect is not obvious while the light propagates in a small incident angle, and the properties of TE and TM modes show a little difference. When the incident angle is large, the Goos—Hänchen effect of TE mode is positive and becomes more obvious, but that of the TM mode becomes negative.

Key words: lateral shift; delay time; Bragg reflector; omnidirectional reflection

在发生全反射时, 反射光束并不是在入射点产生, 而是沿着界面偏离一段距离, 这一现象称为 Goos—Hänchen 效应, 产生的侧向偏离距离称为 Goos—Hänchen 位移^[1]。这一效应在研究介质光波导的传播特性时有着重要应用^[2~4]。

光子晶体是近年来的研究热点, 其特征之一是存在光子禁带, 频率落在禁带中的电磁波被禁止传播^[5,6]。利用这一特性可制成全介质反射镜^[7], 其特性优于传统的金属反射镜。若组成一维光子晶体的两种介质层的光学厚度均为 $\lambda/4$, 则这种反射镜亦称为 Bragg 反射镜。

当位于频率禁带中的光入射到 Bragg 反射镜上时, 近乎全反射的光束亦会产生相类似的侧向位移

现象。本文将讨论这一效应, 研究斜入射时的 Goos—Hänchen 位移和延迟时间。

1 Goos—Hänchen 位移和延迟时间

一维光子晶体是由折射率分布为 n_1 、 n_2 的两种介质 A、B 交替排列而成, 其厚度 d_1 、 d_2 满足 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, λ_0 为中心波长, 周期数为 N 。设该晶体 $(AB)^N$ 置于折射率为 n_0 的空气中。

利用传输矩阵法^[8], 易得该光子晶体 $(AB)^N$ 的反射系数 r 。在禁带区反射率 $R = |r|^2$ 接近于 1, 近乎全反射。若令 $r = |r| e^{i\phi}$, $\phi = \phi(\omega, \theta)$ 称为

^{*} 收稿日期: 2008—01—16

作者简介: 徐雷 (1979—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生; 联系人: 陈宪锋。

Bragg 反射镜的反射相移, 与入射光频率及入射角有关。

根据 Goos-Hänchen 位移的定义^[9], 可得侧向位移

$$z_s = -\frac{c}{n_0 \omega \cos \theta} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \quad (1)$$

考虑到 Goos-Hänchen 效应, 则光束反射时的总相移为^[4,9]

$$\phi_{\text{total}} = \phi + \frac{n_0 \omega}{c} \sin \theta \cdot z_s \quad (2)$$

故在 Bragg 反射镜表面反射时的总延迟时间为

$$\tau = \frac{\partial \phi_{\text{total}}}{\partial \omega} = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} + \frac{n_0}{c} \sin \theta \cdot z_s \quad (3)$$

式中第一项是由相移色散引起的群延迟时间 τ_g , 而第二项则是由侧向位移引起的 Goos-Hänchen 时间 τ_{GH} 。

2 分析与讨论

2.1 反射相移

利用传输矩阵理论^[8] 计算了 Bragg 反射镜的反射系数 r , 得到了在频率禁带中的反射相移 ϕ (ω , θ), 如图 1 所示。数值模拟计算中, 取 $n_0 = 1$, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 3$, $N = 10$, $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0$ 。

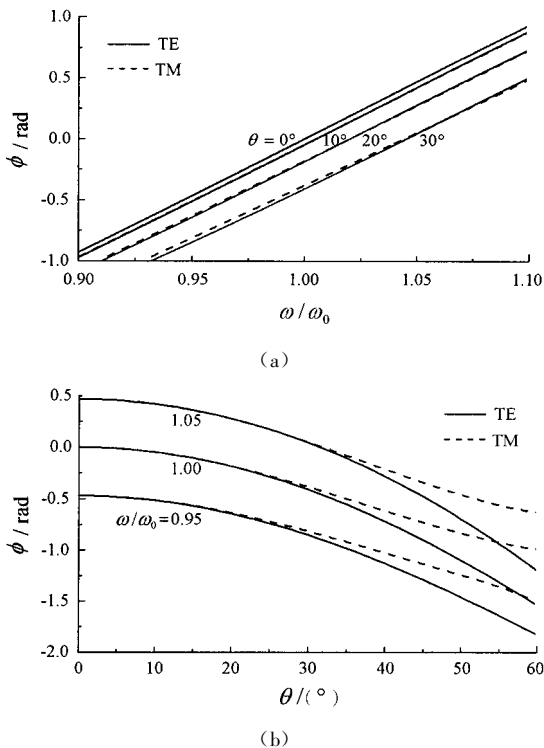


图 1 Bragg 反射镜的反射相移

Fig 1 Reflective phase of the Bragg reflector

由图 1 (a) 可知, 不论入射角 θ 多大, 在中心

频率附近的反射相移与频率成线性特性, 这一现象已被大量的实验所证实^[10,11]。参阅文献 [12] 的计算方法, 可得垂直入射时中心频率附近的反射相移变化规律为

$$\phi = \begin{cases} \frac{\pi n_1 n_2}{n_0 (n_2 - n_1)} \frac{\omega - \omega_0}{\omega} & (n_2 > n_1) \\ \pi + \frac{\pi n_0}{n_1 - n_2} \frac{\omega - \omega_0}{\omega} & (n_1 > n_2) \end{cases} \quad (4)$$

在入射角不大 ($\theta < 20^\circ$) 时, TE、TM 模的反射相移重合, 它们与频率的线性特性依然可用式 (4) 描述。随着入射角的逐渐增大, TE、TM 模反射相移的差异才开始呈现出来。图 1 (b) 给出了入射角对相移的影响, 更加清晰地显示了上述特性。

2.2 Goos-Hänchen 效应

一维光子晶体 $(AB)^N$ 的全向反射频带为 $\omega_1 < \omega < \omega_2$, 其中 ω_1 是接近 90° 入射时 TM 模禁带的下限频率, ω_2 是垂直入射时 TE 或 TM 模禁带的上限频率。根据文献 [7] 给出

$$\omega_1 = \frac{2c}{d_2 \sqrt{n_2^2 - n_0^2} + d_1 \sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{\frac{n_1^2}{n_1^2} \frac{\sqrt{n_2^2 - n_0^2} - n_2}{\sqrt{n_2^2 - n_0^2} + n_2} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}}{\frac{n_1^2}{n_1^2} \frac{\sqrt{n_2^2 - n_0^2} + n_2}{\sqrt{n_2^2 - n_0^2} + n_2} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}}} \right)$$

$$\omega_2 = \frac{2c}{n_1 d_1 + n_2 d_2} \cos^{-1} \left(- \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)$$

在本文中, 利用上述结构参数可得全向反射的频带为 $1.0134\omega_0 < \omega < 1.2163\omega_0$ 。

以 $\omega = 1.05\omega_0$ 入射到 Bragg 反射镜上, 可得 Goos-Hänchen 位移 z_s 的变化规律如图 2 所示。可以发现垂直入射时侧向位移为零, 斜入射时 TE 模的侧向位移随入射角的增大而增大, 但 TM 模的侧向位移则有一个极大值。在入射角不大时, TE、TM 模的侧向位移相等, 这是源于小角度时反射相移 ϕ 与 TE、TM 模的偏振态不明显之故。而在大角度时, 图 1 (b) 显示 TE 模的相移随 θ 变化越来越大导致侧向位移 z_s 亦越来越大; 相反对于 TM 模, 反射相移随 θ 的变化越来越小, 致使 z_s (正比于图 1 (b) 中的曲线斜率) 在到达一个极大值后逐渐减小, 甚至还会导致负的 Goos-Hänchen 位移。

大角度时出现巨大的正或负侧向位移, 这些特性均有异于传统单层介质全反射时的 Goos-Hänchen 效应^[2,13]。其原因在于光子晶体的禁带特

性,是由于多层介质表面的 Bragg 散射所致,不同界面的散射光的相互干涉导致出现奇异的 Goos—Hänchen 效应。

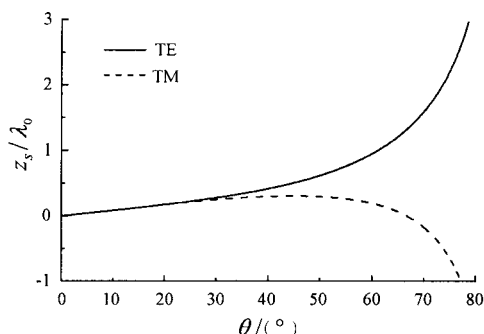


图2 Bragg 反射镜的 Goos—Hänchen 位移

Fig 2 Goos—Hänchen shift of the Bragg reflector

全反射时入射光线的总延迟时间 τ 随入射角的变化规律如图 3 所示, 其中 $\tau_0 = \lambda_0/c$ 。由式 (3) 可知, 在入射角较小时由于侧向位移较小, τ_g 大于 τ_{GH} , 总延迟时间主要由 τ_g 决定, 故图 3 中小角度时的曲线近似为一条水平线。但在大入射角时, 图 2 显示出侧向位移的变化非常明显, 即 τ_{GH} 的作用逐渐增大, 总延迟时间则将由 τ_{GH} 决定, 于是就出现明显的 TE、TM 模不同的延迟特性。对比图 2 和图 3, 易看出入射角对 Bragg 反射镜的 Goos—Hänchen 效应的影响很大, 入射角超过 60° 时 TM 模的负延迟时间是由于负的侧向位移所致。

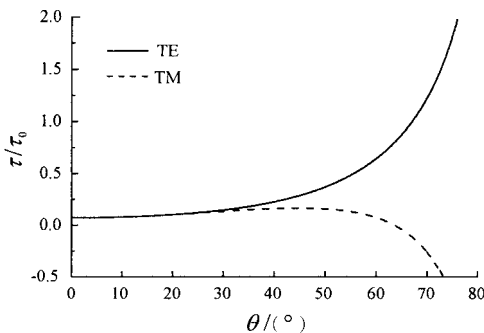


图3 Bragg 反射镜的总延迟时间

Fig 3 Total delay time of the Bragg reflector

3 结 论

研究了 Bragg 反射镜的全反射特性, 以及全反射时的 Goos—Hänchen 效应。研究发现这类光子

晶体具有较为奇特的 Goos—Hänchen 效应。在入射角不大时效应不明显, 且 TE、TM 模的特性差异很小。在大角度入射时现象奇特, TE 模的 Goos—Hänchen 效应为正, 随入射角的增大逐渐明显; 而对 TM 模则有一个正效应极值, 还会出现负的 Goos—Hänchen 效应。

参考文献:

- [1] Goos F, Hänchen H. Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion [J]. Ann Phys, 1947, 1: 333—346.
- [2] Liu X M, Cao Z Q, Zhu P F, et al. Solution to causality paradox upon total reflection in optical planar waveguide [J]. Phys Rev E, 2006, 73: 016615.
- [3] Shadrivov I V, Zharov A A, Kivshar Y S. Giant Goos—Hänchen effect at the reflection from left-handed metamaterials [J]. Appl Phys Lett, 2003, 83 (13): 2 713—2 715.
- [4] Resch K J, Lundeen J S, Steinberg A M. Total reflection cannot occur with a negative delay time [J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37: 794—799.
- [5] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2 059—2 062.
- [6] John S. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (23): 2 486—2 489.
- [7] Fink Y, Winn J N, Fan S, et al. A dielectric omnidirectional reflector [J]. Science, 1998, 282: 1 679—1 682.
- [8] 蒋美萍, 江兴方, 沈小明, 等. 一维光子晶体的偏振特性研究 [J]. 量子电子学报, 2005, 22 (4): 612—616.
- [9] 曹庄琪. 导波光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 235—345.
- [10] Ozbay E, Temelkuran B. Reflection properties and defect formation in photonic crystals [J]. Appl Phys Lett, 1996, 69 (6): 743—745.
- [11] Aoki T, Takeda M W, Haus J W, et al. Terahertz time-domain study of a pseudo-simple-cubic photonic lattice [J]. Phys Rev B, 2001, 64 (4): 045106.
- [12] 陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 光子晶体 Bragg 镜的相移特性及腔模研究 [J]. 量子电子学报, 2007, 24 (2): 183—188.
- [13] 姜永远, 张永强, 时红艳, 等. 单轴各向异性左手介质表面的 Goos—Hänchen 位移 [J]. 物理学报, 2007, 56 (2): 798—804.