

波状膜层全角度偏振分束特性的分析^{*}

厉以宇[†] 顾培夫 李明宇 刘旭 杨慧

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2005 年 5 月 10 日收到 2005 年 6 月 27 日收到修改稿)

从能带结构和等频面两方面完整阐述了利用光子晶体实现全角度偏振分束的条件, 分析等频面目的在于确保波矢的切向分量保持连续, 采用时域有限差分(FDTD)方法模拟了高斯光束在波状膜层中的传播过程, 通过对比 TE 模与 TM 模在 0°—89°不同入射角情况下的振幅透射系数, 理论上验证了波状膜层的全角度偏振分束效应.

关键词: 光子晶体, 偏振分束, 等频面

PACC: 7820P, 0340K

1. 引言

光子晶体是由两种介质材料构成的周期性结构. 对于不同的入射光偏振模, 光子晶体的能带结构存在明显差异, 结果在一些特殊的频率段出现一种偏振模透过光子晶体而另一种偏振模被反射的现象. Solli 等^[1]针对光子晶体偏振分束现象提出了自己的解释: 在光子晶体内部, 不同的偏振模在各种介质界面上遵循不同的边界条件, 因而得到不同的菲涅尔系数. Ohtera 等^[2]最先设计和制造了垂直入射情况下的二维光子晶体偏振分束器件. 随后, Solli 等用实验证明了在微波波段二维光子晶体可以实现全角度偏振分束的功能, 突破了传统的薄膜偏振分束器中布儒斯特角^[3]的限制.

本文将论述波状膜层二维光子晶体红外波段的全角度偏振分束效应, 在对波状膜层的能带结构进行分析的基础上, 利用等频面^[4]进一步论证全角度偏振分束的可行性, 并采用时域有限差分(FDTD)算法对其进行数值模拟.

2. 波状膜层的偏振分束特性

图 1 给出了波状膜层的空间结构. 当结构参数设置为: 基板光栅周期 $L_x = 0.56\mu\text{m}$, 膜层周期 $L_z =$

$0.45\mu\text{m}$, a-Si 单层膜厚 $T = 0.15\mu\text{m}$, SiO_2 单层膜厚 $0.3\mu\text{m}$, 膜层波状倾角 $\theta = 44^\circ$ 时, TE 模(电场方向延 Y 轴)完全禁带位于 $L_z/\lambda = 0.295\text{—}0.305$, 对应波长 $1.48\text{—}1.52\mu\text{m}$. 图 2 中, 在第一布里渊区的边界上(即 X-M-X'), TM 模第二条能带上的值位于 TE 模完全禁带下方, 而中心点 Γ 对应的 TM 模本征频率处于完全禁带的上方, 根据能带的连续性说明在任意的波矢方向上, TM 模的第二条能带将穿越 TE 模完全禁带, 即在所有的波矢方向上 TM 模都存在与 TE 模完全禁带相重叠的通道. 仅此还不能保证实现 TE 模与 TM 模在光子晶体内部的全波矢方向偏振分离, 考虑到光波由空气入射到波状膜层的表面, 只有确保空气中等频面的范围不超过波状膜层二维光子晶体的等频面^[5], 才能保证不论入射光的角度多大, 波矢的切向分量都能保持连续.

图 3 是波状膜层的等频面, 频率(L_z/λ)涉及 0.2 到 0.36, 等频线的外轮廓随频率的不同而变化, 频率为 0.3 的等频线外轮廓类似枕形. 空气中的等频面是以 $|k_i| = \omega/c$ 为半径的圆^[6], 如图 4 所示, k_i 代表空气中的波矢, ω 为工作频率, 取 0.3, 对应波长 $1.5\mu\text{m}$, c 是空气中的光速. 分别以 ΓX 和 $\Gamma X'$ 作为入射界面的法线方向, 得到图 4(a)和(b)的等频面对应关系, 可以看到空气中等频面的最大范围没有超出波状膜层内部的等频线外轮廓, 所以不论外界光线以多大的角度入射到波状膜层的界面上, 依

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60478038)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: liiyiyuu@263.net

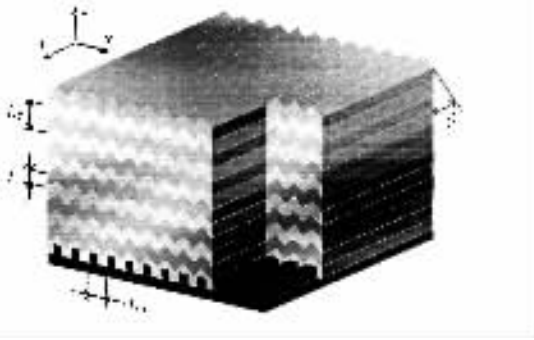


图 1 波状膜层的空间结构示意图

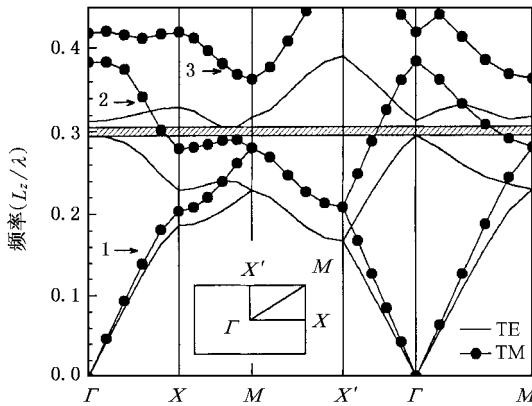


图 2 波状膜层二维光子晶体的能带结构 标记 1 2 3 分别代表 TM 模的第一、二、三条能带

据波矢的切向分量连续条件,都能在波状膜层内部找到对应的可传播的波矢,因而波状膜层二维光子晶体的偏振分束效果能够达到全角度.

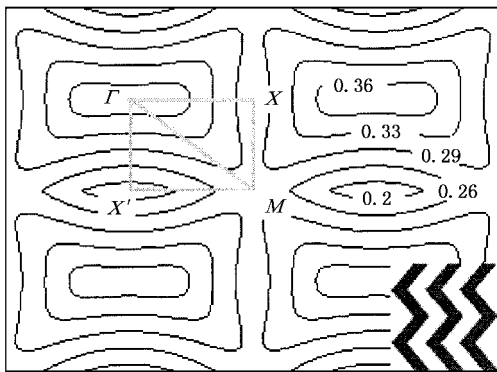


图 3 波状膜层结构二维光子晶体的等频面 频率以 L_z/λ 为单位

3. 高斯光束入射模拟

采用 FDTD 方法模拟 TM 模在波状膜层中的传

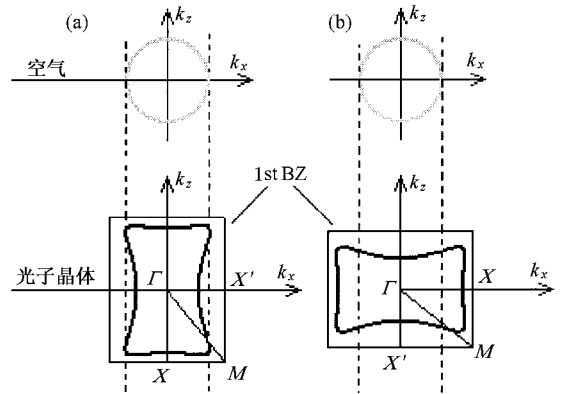


图 4 空气中的等频面与波状膜层等频面的对应关系,频率取 0.3,对应波长为 $1.5\mu\text{m}$. (a)入射界面法线方向取 ΓX (b)入射界面法线方向取 $\Gamma X'$

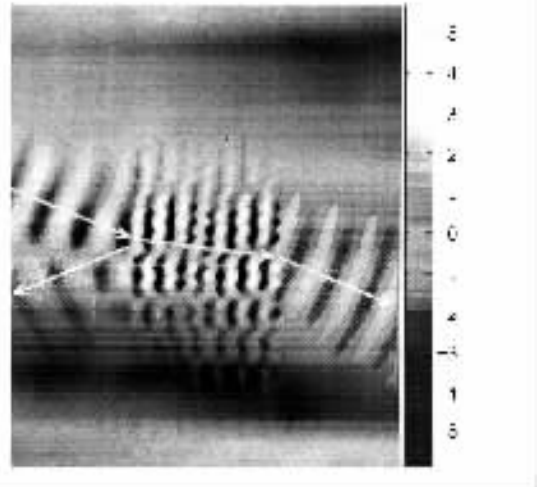


图 5 TM 模式的高斯光束以 22° 入射角透射波状膜层,灰度值对应磁场的振幅

播过程.图 5 中入射界面的法线方向取 ΓX ,入射波长取 $1.5\mu\text{m}$,入射角为 20° ,波状膜层横向周期数为 13 纵向周期数为 30,两侧介质为空气.模拟时,单位空间步长取 20nm ,计算区域四周采用完美匹配层作为吸收边界.入射光采用高斯光束,空间高斯光束的表达形式^[7]如下:

$$H_{iy} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \exp[i(k_x x + k_{iz} z)] \Psi(k_x), \quad (1)$$

其中

$$\Psi(k_x) = \frac{g}{2\sqrt{\pi}} \exp\{-[g^2(k_x - k_{ix})^2/4]\}, \quad (2)$$

g 是高斯光束束腰,入射光的波矢表示成: $k_i = \hat{x}k_{ix} + \hat{z}k_{iz} = \hat{x}k_0 \sin\theta_i + \hat{z}k_0 \cos\theta_i$, θ_i 是光线入射角度.

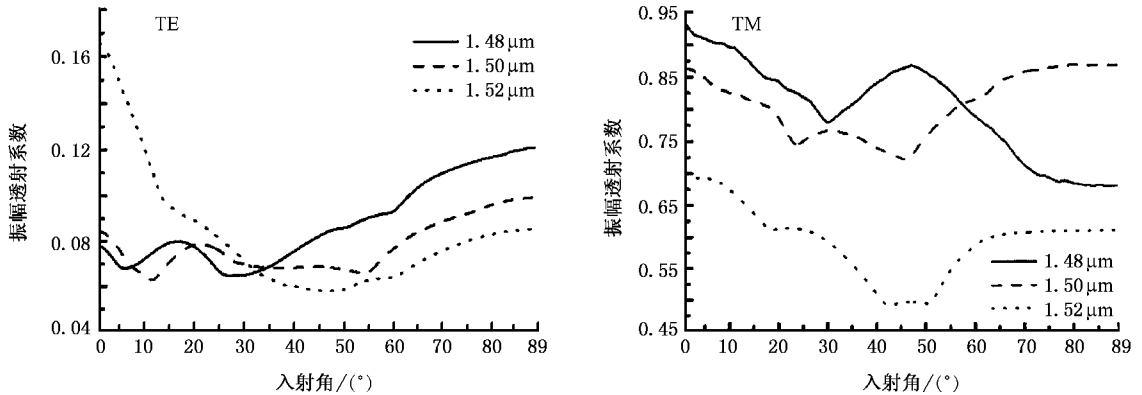


图6 TE模与TM模的振幅透射系数曲线

选用三个分别对应于 TE 模完全禁带的中心位置和两侧边界位置的波长 $1.5\mu\text{m}$ 、 $1.48\mu\text{m}$ 和 $1.52\mu\text{m}$ 进行模拟. 在不同入射角情况下计算得到的透射系数曲线如图 6 所示. 对于 TE 模, 由于入射光波长都处在禁带范围内, 透射系数均不超过 0.17. 假设从波状膜层出射的高斯光束的角度与入射光束完全一致, 透过率将低于 3%. 对于 TM 模, 波长 $1.5\mu\text{m}$ 和 $1.48\mu\text{m}$ 的透射系数比较理想. 波长 $1.5\mu\text{m}$ 的透射系数都在 0.7 以上, 对应的透过率均超过 50%. 由于光在光子晶体中以布拉赫波形式传播, 如果对波状膜层的表面进行适当的截断, 提高平面波和布拉赫波在空气与光子晶体界面的耦合效率, 能够进一步提升 TM 模的透过率. 所以只要将入射光的波长限制在 $1.5\mu\text{m}$ 附近, 就可以较好地实现全角度偏振

分束.

4. 结 论

单是从能带结构分析还不能完美地解释波状膜层二维光子晶体的全角度偏振分束特性, 必须结合光子晶体等频面的概念, 研究入射光在波状膜层内部的传播特性. 利用 FDTD 方法可以很好地模拟高斯光束在波状膜层内部的传播过程, 并在理论上验证波状膜层的全角度偏振分束效应. 图 3 的等频面还显示, 波状膜层等频线的频率朝着布里渊区中心区域递增, 并在 Γ 点达到极值^[8], 为负折射提供了有利条件^[9, 10], 所以适当调整结构参数, 选择合适的频率值, 很有可能实现波状膜层的负折射成像.

- [1] Solli D R, McCormick C F, Chiao R Y 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9429
- [2] Ohtera Y, Sato T, Kawashima T *et al* 1999 *Electron. Lett.* **35** 1271
- [3] Li R, Ren K, Ren X B *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2520 (in Chinese) [李 蓉、任 坤、任晓斌等 2004 物理学报 **53** 2520]
- [4] Notomi M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 10696
- [5] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 207401
- [6] Berrier A, Mulot M, Swillo M *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93**

073902

- [7] Kong J A, Wu B L, Zhang Y 2002 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **33** 136
- [8] Parimi P V, Lu W T, Vodo P *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 127401
- [9] Chiyon L, Steven G J, Joannopoulos J D *et al* 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201104
- [10] Gralak B, Enoch S, Tayeb G 2000 *J. Opt. Soc. Am. A* **17** 1012

Analysis of the all-angle polarization beam splitting effect of the multi-layered wavy films^{*}

Li Yi-Yu[†] Gu Pei-Fu Li Ming-Yu Liu Xu Yang Hui

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 10 May 2005 ; revised manuscript received 27 June 2005)

Abstract

The necessary conditions of all-angle polarization beam splitting effect of photonic crystal is discussed from the aspects of band structure and equal frequency surface. The conservation law of the tangential \mathbf{k} -vector component is illustrated in the equal frequency surface. In order to theoretically verify the all-angle polarization beam splitting effect , finite-difference time-domain (FDTD) method is employed to simulate the propagation of Gauss beam in the multi-layered wavy films , getting the transmission coefficients for the TE and TM modes in the angle range from 8° to 89° respectively.

Keywords : photonic crystal , polarization splitting , equal frequency surface

PACC : 7820P , 0340K

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60478038).

[†] Corresponding author. E-mail : liyiyuu@263.net