

文章编号: 0253-2239(2005)11-1554-4

紫外区全角度光子晶体反射镜*

李明宇 顾培夫 厉以宇 严晖

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 根据角域叠加原理,在石英玻璃基板上用全介质膜系实现了紫外区域全角度一维光子晶体反射镜的设计。采用两个不存在全角度反射带的一维光子晶体在角域上叠加,通过传输矩阵方法,从理论上计算合成光子存在全角度禁带,禁带波长范围 328.95~352.11 nm,相对带宽为 6.80%。实验上采用 HfO₂ 和 SiO₂ 两种薄膜材料,用电子束蒸发的方法在石英玻璃基板上制备合成光子晶体。若透射率在 1% 以下为光子晶体禁带,则禁带波长范围从 331.2~350.4 nm,相对带宽 5.63%。从而证明了角域叠加设计的正确性。

关键词: 光电子学; 光子晶体; 全角度反射镜; 角域叠加; 光子禁带

中图分类号: TN204 文献标识码: A

Omnidirectional Photonic Crystal Reflector Used in Ultraviolet Region

Li Mingyu Gu Peifu Li Yiyu Yan Hui

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

Abstract: According to the incident angle domain principle, the design of omnidirectional one-dimensional photonic crystal reflector in ultraviolet region is realized with all-dielectric coating series on quartz glass substrate. Two one-dimensional photonic crystals without omnidirectional reflective band are added in angle domain by using transmission matrix method, it is worked out theoretically that there exists omnidirectional forbidden band for synthesized photon, wavelength range of the forbidden band is 328.95~352.11 nm, relative bandwidth is 6.80%. Synthesized photonic crystal is fabricated on quartz glass substrate with two coating materials HfO₂ and SiO₂ by electron beam vaporization. If transmissivity is below 1%, it is photonic crystal forbidden band, the wavelength range of the forbidden band is 331.2~350.4 nm, the relative bandwidth is 5.63%. The result validates the angle domain addition design.

Key words: optoelectronics; photonic crystal; omnidirectional reflector; angle domain; photonic bandgap

1 引 言

虽然金属膜可作为反射镜被广泛地应用,但由于金属薄膜有较大的吸收,在大功率光学系统中,易于导致薄膜损伤。光子晶体是折射率按一定周期发生变化的人工微结构材料。光子晶体最重要特性是存在光子禁带。光子晶体的这个特性具有广泛的应用前景,尤其在通信领域中可以用来制作反射镜、滤光片和激光器谐振腔等。全介质多层反射膜具有最大的反射率和最小的吸收率,因而在包括多光束干涉仪,激光器等光学器件中得到了广泛的应用。相对于高维光子晶体而言,用薄膜方法制备的一维光

子晶体,制作方法简单^[1~2],工艺成熟,同时又能做到全角度反射。

采用 $\lambda/4$ 膜堆方法的传统高反射膜所能得到的高反射区仅决定于薄膜材料折射率之比值^[3,4]。禁带展宽是光子晶体研究的重要目标之一,因而发展了一些方法以展宽高反射带的宽度^[5~10]。这些方法有些要求薄膜材料有较高的折射率比,以用于合成的膜系有全角度反射带;有些要插入有吸收的金属膜,以增加禁带宽度;更多的是采用频率叠加,即几个不同频率的禁带叠加起来。目前在紫外区域能用到的有实用价值的材料中,高折射率不超过 2.1,

* 国家自然科学基金(60078001)资助课题。

作者简介: 李明宇(1978~),男,长春人,博士研究生,主要从事光子晶体和光学薄膜方面的研究。

E-mail: oefilm1176@zju.edu.cn

收稿日期: 2005-01-07; 收到修改稿日期: 2005-03-21

而材料低折射率不小于 1.4,因此在紫外区域,单个 $\lambda/4$ 膜堆的全角度高反射带是不能实现的。因而仅用频域叠加在紫外区域就难以实现禁带展宽。本文提出了基于角域叠加设计全角度反射镜的方法^[11,12]。这种方法能够得到更大的相对带宽,同时,这个方法与传统基于频域的方法最大区别在于并不需要用于合成的 $\lambda/4$ 膜堆本身具有全角度的反射带,于是可以成功地设计紫外区域的全角度反射镜。

2 原理

一维光子晶体的能带结构可以通过传输矩阵分析所得^[8]:

$$\cos K\Lambda = \cos k_{1x}a \cos k_{2x}b - M \sin k_{1x}a \sin k_{2x}b, \quad (1)$$

$$M = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{k_{2x}}{k_{1x}} + \frac{k_{1x}}{k_{2x}} \right), & \text{TE} \\ \frac{1}{2} \left(\frac{n_1^2 k_{2x}}{n_2^2 k_{1x}} + \frac{n_2^2 k_{1x}}{n_1^2 k_{2x}} \right), & \text{TM} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} k_{1x} = \sqrt{\left(\frac{n_1 \omega}{c} \right)^2 - k_y^2}, \\ k_{2x} = \sqrt{\left(\frac{n_2 \omega}{c} \right)^2 - k_y^2}, \end{cases} \quad (3)$$

式中 K 表示布洛赫波数, k_{1x} 、 k_{2x} 表示折射率为 n_1 、 n_2 的介质中波矢量的法向分量, k_y 为介质中波矢量的切向分量, c 为真空中的光速, ω 为光波频率, a 、 b 分别为两种介质材料薄膜的物理厚度, Λ 表示光子晶体周期, $\Lambda = a + b$ 。在紫外区域,常用的薄膜材料 HfO_2 和 SiO_2 的折射率分别为 2.09 和 1.472,取两种材料的光学厚度相等,即 $a \times n_1 = b \times n_2$ 。入射波切向分量与归一化角频率关系如图 1 所示。

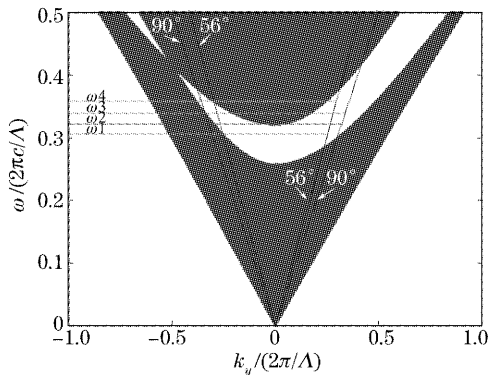


图 1 单一光子晶体角频率与波矢量切向分量的关系
Fig. 1 The relation between angular frequency and the tangential component of wave vector of a photonic crystal

图 1 中 k_y 大于零的部分对应 TE 模式,小于零的对应 TM 模式。由图 1 可知由于 HfO_2 和 SiO_2 折射率比较低,不存在全角度反射带。但是如果入射角从 0° 到 56° ,相应存在部分角度反射带从 $\omega_1 = 0.306 \times 2\pi c/\Lambda$ 到 $\omega_2 = 0.322 \times 2\pi c/\Lambda$;入射角从 56° 到 90° ,相应存在部分角度反射带从 $\omega_3 = 0.339 \times 2\pi c/\Lambda$ 到 $\omega_4 = 0.358 \times 2\pi c/\Lambda$,相对带宽分别为 5.10% 和 5.45%。采用两个光子晶体(PC1,PC2),PC1 入射角从 0° 到 56° 存在部分角度反射带光子晶体,PC2 在入射角从 56° 到 90° 存在部分角度反射带光子晶体。

通过调整两个光子晶体各自的周期,使得两个光子晶体的部分角度反射禁带最大。若取 PC1,PC2 的周期分别为 106.11 nm 和 118.84 nm,折射率高、低两种材料的薄膜光学厚度相等,合成光子晶体的入射波切向分量与角频率的关系如图 2 所示。可以看出合成光子晶体频率从 ω_1 到 ω_2 存在全角度反射禁带,相应波长 $\lambda_1 = 328.9$ nm 到 $\lambda_2 = 352.1$ nm,相对带宽 6.80%。传统的设计方法由于光子晶体不存在全角度反射带,因此不能得到紫外区域的全角度反射镜。按照此方法,再增加合成光子晶体的数目,可以得到更大的全角度反射带宽。

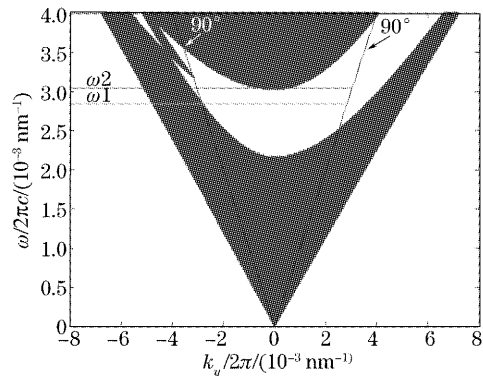


图 2 合成光子晶体 PC1/PC2 的能带结构
Fig. 2 The band structure of the hybrid structures PC1/PC2

3 合成光子晶体的膜系设计

为了从理论上验证这种设计方法,设反射膜系中心波长为 365 nm,膜系结构为 $\text{Sub}/(\text{HL})^{20}$ ($1.12\text{H}1.12\text{L}$)²⁰/Air,基板用石英玻璃。透射光谱曲线采用薄膜传输矩阵法计算^[1],H 和 L 分别表示 HfO_2 和 SiO_2 。由图 2 知 TE 模式全角度禁带中包含 TM 模式全角度禁带,故 TM 模式全角度反射带可被定义为反射镜的全反射带。倾斜入射时,计算 TM 和 TE 模式的平均透射率。

垂直入射时, TE 和 TM 偏振模式的能带结构简并。设透射率在 1% 以下定义为反射带。PC1 反射带波长从 332.0 nm 到 400.0 nm; PC2 反射带波长从 369.6 nm 到 438.4 nm; 合成光子晶体(PC1/PC2)反射带波长从 332.0 nm 到 437.6 nm。

不同入射角下, 计算的透射率和测量的透射率曲线如图 3 所示。

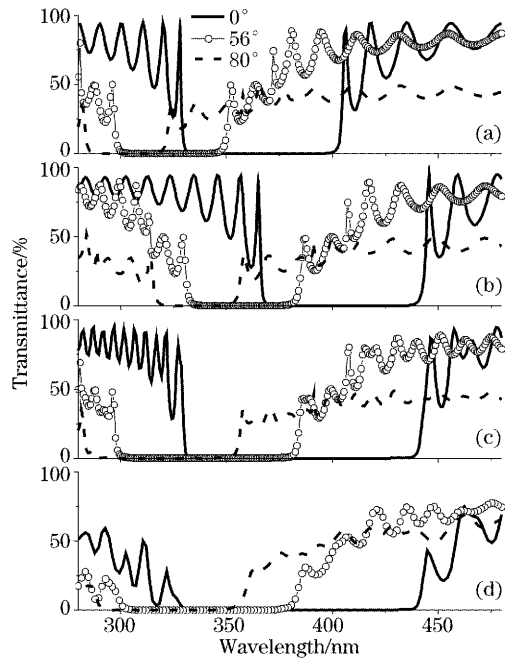


图 3 不同入射角下, 计算的透射率和测量的透射率曲线。(a) PC1 的计算结果, (b) PC2 的计算结果, (c) PC1/PC2 的计算结果, (d) PC1/PC2 的测量结果

Fig. 3 Calculated average transmittance curves of PC1, PC2, PC1/PC2 and measured transmittance curve of PC1/PC2 at different incident angles. (a) Calculated result of PC1, (b) calculated result of PC2, (c) calculated result of PC1/PC2, (d) measured result of PC1/PC2

56°入射时, PC1 反射带波长从 300.8 nm 到 345.6 nm; PC2 反射带波长从 335.2 nm 到 379.2 nm; 合成光子晶体(PC1/PC2)反射带波长从 302.4 nm 到 379.2 nm。

80°入射时, PC1 反射带波长从 287.2 nm 到 317.6 nm; PC2 反射带波长从 320.0 nm 到 351.2 nm; 合成光子晶体(PC1/PC2)反射带波长从 288.8 nm 到 350.4 nm。

从上述计算中可知, PC1 和 PC2 各自不存在全角度反射带, 但是入射角从 0°到 56°, PC1 存在波长从 332.0 nm 到 345.6 nm 的部分角度反射带; 而当入射角从 56°到 80°, PC2 存在波长从 335.2 nm 到 351.2 nm 的部分角度反射带, 因此合成的光子晶体

波长从 332.0 nm 到 350.4 nm 存在全角度反射带, 相对带宽为 5.39%, 从而实现了紫外区域全角度反射镜的设计。很显然按照我们的方法, 采用更多的一维光子晶体合成, 可以获得紫外区域更宽的禁带。

4 实验与结果讨论

采用上述设计膜系, 样品在国投南光有限公司生产的 ZZS700-8/G 型镀膜机上用电子束蒸发方式制备。蒸发时, 基板温度 350 °C, 压强 3.0×10^{-3} Pa, HfO₂ 和 SiO₂ 蒸发束流分别为 300 mA 和 60 mA。两个叠加光子晶体的膜系用极值法监控, 控制波长分别为 375 nm 和 420 nm。图 3(d) 为在入射角 0°, 55°, 80°时的透射率曲线, 样品用日本岛津公司生产的 UV3101(PC)S 分光光度计进行光谱测试。

从图 3(d) 中知, 入射角 0°, 波长从 331.2 nm 到 436.8 nm 存在反射带; 入射角 56°, 波长从 304.0 nm 到 374.4 nm 存在反射带; 入射角 80°, 波长从 288.8 nm 到 350.4 nm 存在反射带; 因此全角度反射带从 331.2 nm 到 350.4 nm, 相对带宽 5.63%。这与本文第三部分的模拟计算结果十分吻合。

实验测量的相对带宽比本文第一部分设计的带宽略小, 主要原因是实际制作的膜系周期数有限, 不能完全等效无限周期的光子晶体。与图 3(c) 中合成光子晶体的透射率曲线相比, 垂直入射时, 通带的透射率较低, 主要是由于膜厚监控误差, 薄膜的吸收和散射等原因所致。

5 结 论

提出了利用角域叠加原理, 设计并成功制作了紫外区域全角度光子晶体反射镜。实验的结果验证了这种新设计方法的正确性。最重要的是这种方法不需要叠加的光子晶体本身具有全角度反射带, 这使得在紫外区域两种薄膜材料高、低折射率比受限的情况下, 仍能设计出全角度反射镜。

参 考 文 献

- 1 Jiang Haitao, Liu Nianhua. Normal coupled modes of photonic crystal with dispersive and nonlinear media [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1400~1403 (in Chinese)
江海涛, 刘念华. 含色散与非线性媒质的光子晶体的简正耦合模 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1400~1403
- 2 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 728~734 (in Chinese)