

文章编号: 1001-3806(2009)06-0645-03

2 维光子晶体抗反膜的制作及其特性分析

赵凤梅, 张向苏*, 刘 守, 任雪畅
(厦门大学 物理学系, 厦门 361005)

摘要: 为了研究2维亚波长光栅的抗反射特性, 分析了2维光子晶体的2维光栅结构, 通过全息3束光干涉的方法, 在光刻胶上制作了六角结构的2维全息光子晶体结构。把具有2维全息光子晶体结构的光刻胶作为母版采用全息模压的方法, 将结构复制到薄膜材料上。结果表明, 这种抗反膜在红外波段具有增透作用, 与理论分析相吻合。

关键词: 全息; 抗反膜; 等效介质理论; 亚波长光栅

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.024

Fabrication and characteristic analysis of anti-reflective film of 2-D photonic crystal

ZHAO Feng-mei, ZHANG Xiang-su, LIU Shou, REN Xue-chang
(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to study the anti-reflection property of two-dimension sub-wavelength gratings, the structure of two-dimension grating of two-dimension photonic crystal was analyzed in detail. The two-dimension hexagonal structure photonic crystal was fabricated with three coherent beams incident onto the recording medium (photoresist) with holographic recording method. Taking the recording medium with relief structures as the master and using embossing technology, the structures can be replicated to polyvinylchlorid film. The measured result shows that the transmittance of the thin film at infrared wave band is enhanced, in good agreement with the theoretical result.

Key words: holography; antireflective film; effective medium theory; subwavelength periodic grating

引 言

亚波长光栅的一个非常重要的用途就是用来做抗反射表面^[1-2]。可广泛应用在光学表面元件处理、太阳能电池、探测器等。关于它的理论分析^[3-4]、制作和设计^[5-6]已有多篇文献报道。现今仍然存在的问题是制作方法复杂、造价高、产量低, 不利于推广应用。

光子晶体是一种介电常数随空间周期性变化的新型光学微结构材料, 有着广泛的应用潜力。2维光子晶体可以看作是由多组方向不同的2维光栅构成^[7]。作者应用全息衍射光学元件在光刻胶上制作了大面积的2维光子晶体, 把具有2维全息光子晶体结构的光刻胶作为母版采用全息模压的方法, 将结构复制到聚氯乙烯(polyvinylchlorid, PVC)薄膜材料上。测试结果表明, 这种抗反膜在红外波段具有增透作用, 与理论分

析相吻合。这类抗反射材料具有制作简单、成本低、可大批量生产等优点。

1 理论分析

亚波长光栅的显著特点是周期小于波长量级, 仅有0级反射光和0级的透射光存在。原则上, 其理论模型应该基于严格的矢量衍射理论, 但如果光栅周期远小于波长, 也可采用一些近似方法如等效介质理论^[1,5,8], 即当入射光通过小于光波长的浮雕结构时, 光波的性质类似于通过一等效媒质, 波阵面的形状不发生改变, 等效媒质的光学参量由浮雕结构的特征来确定。

对于一种给定的光栅, 某一衍射级能否在入射空间或在透射空间传播由以下的光栅方程决定:

$$n \sin \theta_m - n_i \sin \theta_i = \frac{m\lambda}{\Lambda}$$

式中, n_i 为入射介质的折射率, n 是衍射级传输的介质折射率(对于反射衍射级, $n = n_i$; 对于透射衍射级, $n = n_s$ 即基底折射率), θ_i 和 θ_m 分别代表了入射光线和第 m 级衍射光线的倾斜角, λ 为激光入射波长, Λ 代表了光栅周期。

根据等效介质理论, 光通过亚波长光栅时, 光栅的

基金项目: 福建省科技计划资助项目(2007F3099)

作者简介: 赵凤梅(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事全息与光信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xiangsuzhang@hotmail.com

收稿日期: 2008-09-05; 收到修改稿日期: 2008-10-27

衍射级仅有 0 级存在。可以得到如下的周期与波长的不等式关系^[5]:

$$\frac{\Lambda}{\lambda} < \frac{1}{n + n_i \sin \theta_{\max}} \quad (1)$$

1 维亚波长光栅对 TE 波(即光波电矢量垂直于光栅矢量方向)和 TM 波(即光波电矢量平行于光栅矢量方向)有不同的等效折射率,取决于光栅的填充系数 f (光栅突出部分的宽度与光栅周期的比值),这就是所谓的形式双折射现象^[9]。在许多情况下两个偏振态的减反效果^[10]是不一样的,在实际应用中存在许多不便。为了既能够实现良好的减反效果又能够在两个偏振态达到同样的效果,需要研究 2 维光栅。2 维光子晶体如图 1a 所示,可以看作多组周期不同的 2 维光

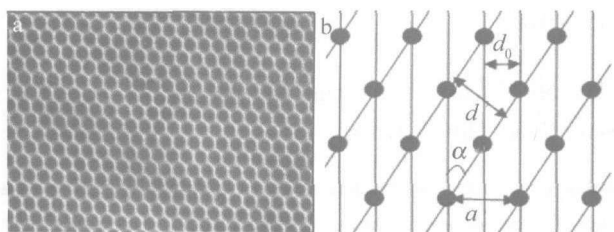


Fig. 1 a—SEM image of fabricated 2-D photonic crystal b—the distribution of Bravais lattice

栅;图 1b 为光子晶体格点分布图。其中 a 为格点间距, d 是光栅的周期, α 为各组光栅与主光栅的夹角。可以选取不同方向、周期的光栅,且光栅的周期与方向密切相关,一般取 $\alpha = 60^\circ$ 的那组光栅为 2 维主光栅。

2 2 维光子晶体的制作

目前制作光子晶体的方法很多,如介质棒堆积、精密机械钻孔、胶体颗粒自组织生长、胶体自组织法、逐层迭加法、激光全息法等。全息术在光学领域中有着广泛的应用,激光全息法制作光子晶体与其它制作方法相比具有设计灵活、造价低、制作便捷等优点。

本文中采用 3 块点元全息图进行组合设计,制成含有 3 块相互对称分布的全息衍射光学元件(holographic optical element, HOE),利用 HOE 和一个空间滤波器构成一套制备大面积光子晶体的系统,称之为 HOE 系统,如图 2a 所示。其中 HOE 是由 3 组相对于

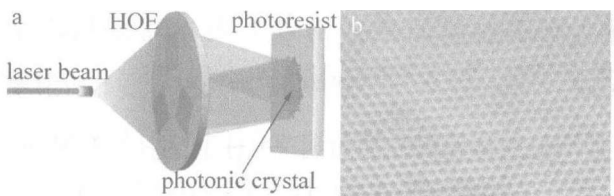


Fig. 2 a—the HOE system of fabricating photonic crystals b—micrographs of 2-D photonic crystals

轴心旋转 120° 的 1 维光栅组成。经扩束滤波并准直的激光束,垂直入射于 HOE 上,光束通过 HOE 后产生

3 束分别由 3 个光栅产生的 1 级衍射光,均以一定的角度 θ 折向光轴。在此系统中,角 θ 是一个重要的参数,因为它决定了晶格的周期 a ,表达式如下:

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3} \sin[\arccos(1 - \frac{3 \sin^2 \theta}{2})/2]} \quad (2)$$

式中, λ 是激光入射波长。当 3 束相干光叠加时,HOE 上的相干区域会形成 2 维六角晶格结构的干涉图案。在干涉图案处放置光刻胶板进行曝光,然后经质量分数为 0.015 的 NaOH 溶液处理,得到 1 块 2 维六角结构光子晶体,综合各种条件做了晶格周期为 $1.25 \mu\text{m}$ 的 2 维光子晶体,图 2b 为所得光子晶体在显微镜下的微观图。

3 2 维光子晶体抗反膜的制作

全息图的模压复制属于微细加工,它所转移的浮雕条纹空间频率通常在 1000 line/mm 以上,通过加热加压将金属模板上的浮雕条纹转印到热塑性材料上,而金属模板的制造可分为 3 步,第 1 步在全息图上形成第 1 层导电层,第 2 步通过电铸在第 1 层导电层上形成一层稍厚的金属支撑层,第 3 步利用第 1 版翻铸工作模板。由于本实验室条件有限,2 维光子晶体全息图的模压复制是在广东东南薄膜科技股份有限公司完成的。制得的光子晶薄膜如图 3 所示。其中图 3a 是模压复制所得的 2 维光子晶体抗反膜,图 3b 是制得的抗反膜在显微镜下的微观图,对比图 2b 图形的转移还是相当成功的。

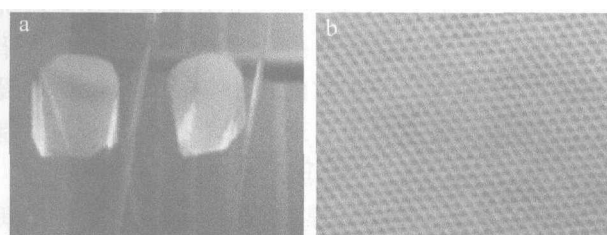


Fig. 3 a—anti-reflective film of 2-D photonic crystals b—micrographs of anti-reflective film

4 测试结果

图 1b 中 2 维光子晶体可以看作多组周期不同的 2 维光栅,其中主光栅的周期最大,其周期 Λ 与晶格常数 a 的关系为 $\Lambda = \frac{\sqrt{3}}{2} a$,本文中所制得的光子晶体晶格常数 $a = 1.25 \mu\text{m}$,那么这组光栅的周期 $\Lambda = 1.08 \mu\text{m}$,而根据(1)式若使光通过亚波长光栅时,光栅的衍射级仅有 0 级存在则需满足入射波长 $\lambda > \Lambda(n + n_i \sin \theta_{\max})$,若取 $n = 1, n_i = 1.5, \theta = 0$,则 λ 至少要大于 $1.08 \mu\text{m}$ 。利用分光光度计测量得到了如图 4 所示的结果,在测量过程中,入射光垂直入射到样品上,从图

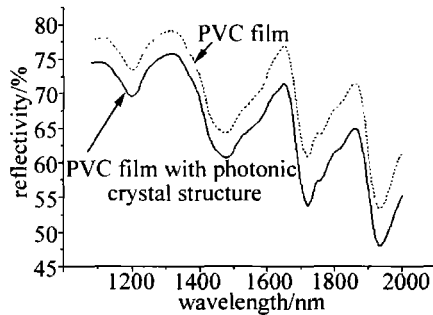


Fig. 4 Measured reflectivity of PVC film and the PVC film with photonic crystal structure

4中可以看出,在入射波长 $1.08\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 之间有光子晶体的薄膜比没有光子晶体的薄膜反射率有了显著的降低,这与理论分析相吻合。

5 结论

运用等效介质理论研究了2维亚波长光栅的抗反射原理。2维光子晶体可以看作是由多组方向不同的2维光栅构成。通过全息法,使用3束光干涉的方法,在光刻胶上制作了六角结构的2维全息光子晶体结构。将具有2维全息光子晶体结构的光刻胶为母版采用模压的方法,将结构复制到薄膜材料上。测试结果表明,这种抗反膜在近红外波段具有增透作用,与理论分析相吻合。这类抗反射材料具有制作简单、成本低、可大批量生产等优点。但全息图的模压复制转移的浮雕条纹空间频率要求通常在 $1000\text{line}/\text{mm}$ 左右,也就是光栅周期要差不多 $1\mu\text{m}$,作者制作了主光栅周期为 $1.08\mu\text{m}$ 的光子晶体,只能在近红外波段有抗反射效

果。根据理论分析可知,如果周期能做到很小,有可能在可见波段有抗反效果,今后可以尝试制作晶格常数更小的光子晶体,以期达到更完美的实验结果。

参考文献

- [1] GRAN E B, MOHARAM M G, POMMET D A. Optical design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength gratings structures [J]. *J O S A*, 1995, A12(2): 333-339.
- [2] RAGUIN D H, MORRIS G M. Subwavelength structured surfaces and their applications [J]. *Proc SPIE*, 1993, CR49: 234-261.
- [3] PETIT R. Electromagnetic theory of gratings [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 258-275.
- [4] WANG Zh H, FU K X, WEN J, *et al.* Research about antireflection characteristics of subwavelength grating [J]. *Laser Technology*, 1999, 23(1): 34-37 (in Chinese).
- [5] RAGUIN D H, MORRIS G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(7): 1154-1167.
- [6] SCHMID J H, CHEBEN P, JANZ S, *et al.* Gradient-index antireflective subwavelength structures for planar waveguide facets [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(13): 1794-1796.
- [7] LIU S, ZHANG X S, CHEN X Y, *et al.* One-to-many laser fanout generated by single large-size two-dimensional holographic photonic crystal [J]. *A P L*, 2005, 87(24): 241111/1-241111/3.
- [8] LALANNE P. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures [J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(10): 2063-2085.
- [9] GRAN E B, MOHARAM M G, POMMET D A. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings [J]. *J O S A*, 1994, A11(10): 2695-2703.
- [10] LU X D, FU K X, WANG Zh H, *et al.* Design of quarter waveplate using sinusoidal dielectric subwavelength gratings [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 368-370 (in Chinese).

(上接第644页)

- [5] THIERRY D K, MARC V K, MAARTEN L. Generating realistic terrains with higher-order Delaunay triangulations [J]. *Computational Geometry*, 2007, 36(1): 52-65.
- [6] TSAI V J D. Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1993, 7(6): 501-524.
- [7] GAO Zh, ZHONG S D, SONG L H. 3D-model reconstruction based on data of laser radar [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 495-499 (in Chinese).
- [8] TSE R, GOLD C, KIDNER D. Using the delaunay triangulation/voronoi diagram to extract building information from raw LIDAR data [C]//International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering. Glamorgan, United Kingdom: IEEE Computer Society, 2007: 222-229.
- [9] LÜ Ch F, DU Zh Ch. Chassis positioning system based on the laser radar survey technology [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 596-601 (in Chinese).