

文章编号:1007-2780(2019)06-0576-06

光子晶体滤色实现五基色显示

孟宪芹*, 王 维, 谭纪风, 孟宪东, 陈小川

(京东方科技集团股份有限公司 显示器件研究院, 北京 100176)

摘要:用反射式光子晶体滤色结构替代传统显示器所用吸收式彩膜, 实现红绿蓝黄青的五基色彩色显示。用时域有限差分法设计和优化光子晶体几何参数, 实现特定波长被特定光子晶体结构的光子禁带局域于禁带中被吸收, 其他波长透过, 只有部分波长的光被反射显色, 达到反射式波长选择的目的。结果显示, 在玻璃基板上沉积 120 nm 的薄膜硅, 通过设计二维圆柱状光子晶体的周期、直径和高度, 得到红绿蓝黄青五基色所在的波长范围内的反射出光, 且半峰宽都在 ± 50 nm 左右。反射式光子晶体结构形成的三基色和五基色可以将美国国家电视系统委员会 (NTSC) 色域分别拓宽到 121% 和 143%, 且使色纯度更高。最后, 本文提供了一种加工二维柱状结构光子晶体的可行性方案。

关键词:光子晶体; 微纳结构; 彩色显示; 滤色; 五基色

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20193406.0576

Application of photonic crystals for colorful display

MENG Xian-qin*, WANG Wei, TAN Ji-feng, MENG Xian-dong, CHEN Xiao-chuan

(Institute for Display Device, BOE Technology Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: A series of photonic crystal structures was proposed to replace traditional absorbing color film, acting as a reflector color filter to realize Red (R), Green (G), Blue (C), Yellow (Y) and Cyan (C). This solution could widen color gamut from 3 primary colors to 5 primary colors, and could improve color purity by reducing the full width at half maxima (FWHM) comparing these traditional absorbing colors. This paper used Finite Different Time Domain methodology to solve Maxwell Function for designing and optimizing different geometrical parameters of photonic crystal structures, to make particular wavelength reflected owing to the photonic band gap. A 120 nm thick layer of silicon was deposited and patterned as two dimensional (2D) pillars, whose pitch, diameter and height are optimized to reflect particular wavelengths for obtaining RGBCY with a ± 50 nm FWHM. The RGB and RGBCY five primary colors can extend the color gamma to 121% and 143% of National Television System Committee (NTSC) respectively. Lastly, a fabrication route was introduced to fabricate different kind of photonic crystal structures by using e-beam lithography and etching processes.

Key words: photonic crystals; nano-structures; five primary colors; color filter; colors display

收稿日期: 2018-11-20; 修订日期: 2019-04-08.

基金项目: 京东方科技集团股份有限公司 MPC 多基色显示项目 (No. 2017TDE02)

Supported by BOE Multi-Primary Color (MPC) Display Project (No. 2017TDE02)

* 通信联系人, E-mail: mengxianqin@boe.com.cn

1 引言

在现有的主流显示中,彩色显示一般采用传统红绿蓝(RGB)彩膜,通过透射背光中显示目标波长的光,吸收其他波长的光,实现 RGB 显色^[1-2]。这种利用吸收背光实现彩色显示的方式通常带宽较宽,使色纯度不高,且 RGB 滤光彩膜一般为化学染料彩膜,污染环境,另外,传统彩膜通过吸收过滤的方式实现彩色,使显示设备的功耗高。为了实现宽色域、高色纯度、低功耗且环境友好的彩色显示,一种新的可替代的吸收彩膜显色的显色方式的研发迫在眉睫。

光子晶体(Photonic Crystal, PC)是在 1987 年由 Yablonovitch^[3] 和 John^[4] 分别独立提出的一个新概念,是指不同折射率的介质周期性排列的人工微结构,也称为具有光子带隙(Photonic Band-Gap, PBG)特性的人造周期性电介质结构。光子带隙材料能够调制具有相应波长的电磁波,使能量处在光子带隙内的光子不能进入光子晶体。在自然界中,也存在拥有光子晶体结构的物质,比如蛋白石、蝴蝶翅膀、昆虫眼睛等,即特定频率范围内的光被禁止在光子晶体中传播,而被反射到人眼里。光子晶体被广泛应用到光通信和滤波器等领域,以及非线性光子晶体器件、光偏振器、光分束器光耦合器等其他领域。在光子晶体彩膜的研究方面,国内外不同的研究组织根据实际应用也做了一些理论方面和实际应用方面的研究,如国外 Utah 大学^[5] 和国内浙江大学^[6] 为代表的研究单位利用金属薄膜和微纳结构,实现透射或反射式的色彩选择。

本文在传统显示行业所用的玻璃基片上沉积超薄硅基材料,在硅薄膜上设计二维光子晶体结构,不用传统彩膜,就能实现 RGB、青色(C)和黄色(Y)颜色反射过滤(Color Filter, CF)。通过调整光子晶体的几何参数,如周期、占空比和高度,就能实现特定波长范围内的光被反射而显色,其他波长的光被硅光子晶体吸收或者透射。通过优化光子晶体的几何参数,使 RGB 和 CY 对应的频谱实现较窄的频谱半峰宽(FWHM),提高了 RGBCY 的色纯度。最后,介绍了如何通过现有的微纳加工方式,实现不同光子晶体结构加工。

2 波长选择及原理分析

2.1 建模计算方法介绍

本文建模和计算都是利用 Lumerical 公司开发的基于时域有限差分法的软件 FDTD Solutions^[7]。FDTD Solutions 采用时域有限差分(Finite Different Time Domain, FDTD)法将空间网格化,在时域和频域精确严格求解三维矢量的麦克斯韦方程,来设计、分析和优化纳米光子器件和材料等。该软件也广泛地用于微纳结构相关的光学和光电子学研究当中^[8]。整个建模和计算的光源为平面光源,光源正入射到设计结构中,波长范围为白光范围(380~720 nm),网格精度(Mesh accuracy)选择为 3 级,光子晶体结构周边的网格选择共形网格(Conformal mesh),细化光子晶体结构附近的网格精度,增大计算精度。边界条件在 X 和 Y 轴方向选择为周期边界条件, Z 轴方向为完美匹配层,尽可能实现接近于真实环境光照射到光子晶体结构上的情况建立模拟计算和优化。

2.2 波长选择实现和原理分析

通过 FDTD Solution 在玻璃基板设计一层厚度为 120 nm 的硅层,硅的光学参数(n, k)如图 1 所示。

设计中光子晶体的结构如图 2 所示,玻璃基板的折射率 $n=1.52$,其上生长了一层厚度为 120 nm 的硅层,再把硅层加工成二维周期性的纳米柱状结构,如图 2 所示。通过改变二维柱状光子

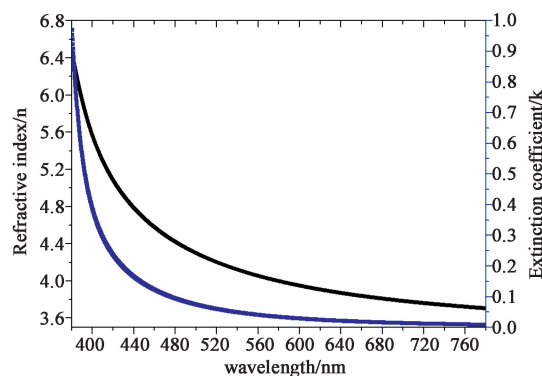


图1 优化计算中应用的硅材料的折射系数(n)和消光系数(k)

Fig.1 Refractive index of n (Black line) and extinction coefficient index of k (Blue line)

晶体结构的周期(p),柱的直径(d)和高度(h)来实现波长选择。同时,与现有彩色显示中所用的吸收彩膜做对比,说明光子晶体结构实现彩色显示的特点。

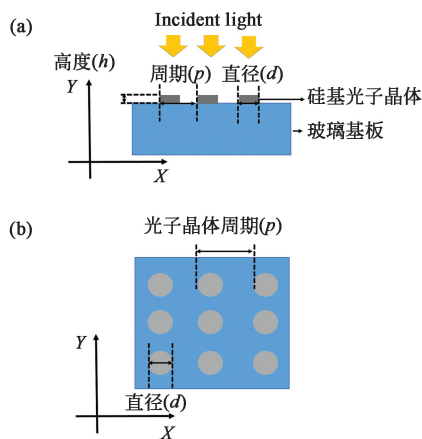


图2 建模设计的二维柱状硅光子晶体的结构的侧视图(a)和俯视图(b)

Fig.2 Profile view(a) and top view (b) of designed 2D pillars of silicon photonic crystals structure

当二维柱状光子晶体的 p 、 d 和 h 满足一定条件时,形成特定的光子带隙,实现特定波长的选择,宏观表象就是实现特定波长的光被反射而显色。

当硅层厚度为 120 nm,二维纳米结构的周期在 330~450 nm 以 20 nm 为步长,圆柱面积占空比在 25%~75%之间变化时,以在 600~720 nm 范围内反射红光且以红色反射最强优化参数。发现当周期为 350 nm,二维圆柱的直径为 198 nm 时,得到 600~700 nm 范围内的红色反射出光。优化得到的红色光子晶体彩膜的反射率接近 85%,半峰宽远远小于传统彩膜的半峰宽,实现了高饱和度的红色显示。本文传统彩膜 RGB 均为有机溶剂和彩色染料的混合物,由欣奕华材料有限公司提供。

同上理,绿色、蓝色都可以通过类似的优化模式实现。实现绿色时的几何参数分别为: $p=240$ nm, $d=135$ nm, $h=120$ nm。实现蓝色波长选择的光子晶体的优化的几何参数分别为: $p=180$ nm, $d=102$ nm, $h=100$ nm。实现波长选择后的结果如图 4 所示。另外,如果选用 $p=180$ nm, $d=102$ nm, $h=120$ nm 实现蓝色时,比优化后的 100 nm 的光子晶体高度具有稍宽的半峰宽,

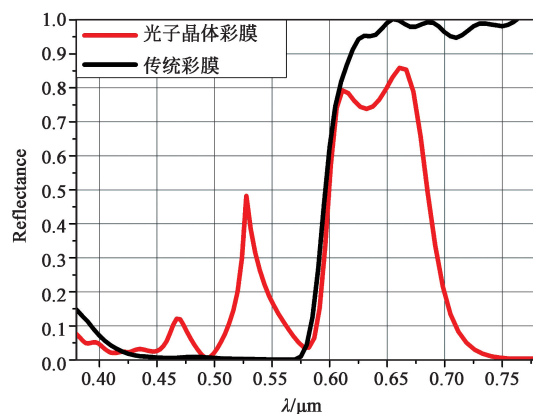


图3 二维反射式光子晶体圆柱实现红色显色的光谱图

Fig.3 Reflection of 2D photonic crystal pillar when $p=350$ nm, $d=198$ nm, $h=120$ nm.

主出光波长红移。

通过图 3 和 4 可以观察到光子晶体彩膜可以实现比传统彩膜更窄的半峰宽,且反射过滤光强

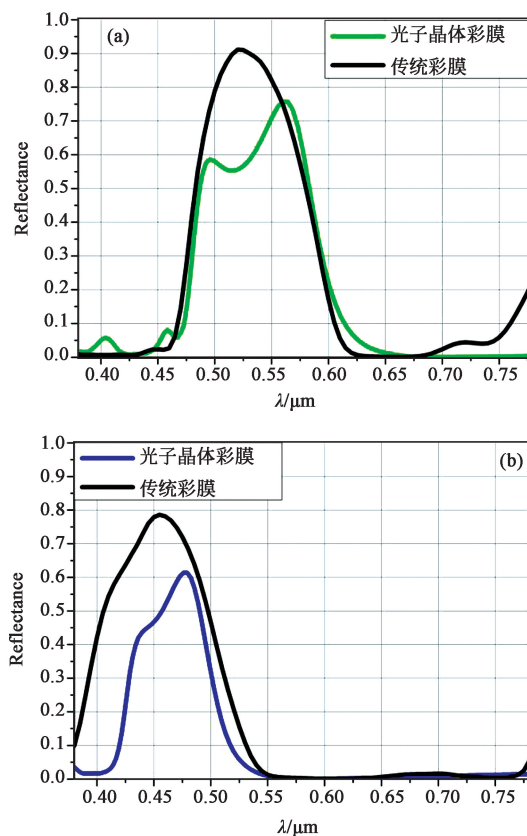


图4 二维反射式光子晶体圆柱实现绿色(a)和蓝色(b)显色的光谱图

Fig.4 Reflection of 2D photonic crystal pillar for getting (a) green and blue (b) color

度与传统彩膜透射过滤相类似,未被反射的光被硅层吸收或者被透射。被透射的光通过设计器件结构,实现二次利用的目的

同理,实现补色青色和黄色也可以通过调整和优化光子晶体结构的几何参数来实现。如当 $p=220\text{ nm}$, $d=124\text{ nm}$, $h=100\text{ nm}$ 和 $p=300\text{ nm}$, $d=170\text{ nm}$, $h=120\text{ nm}$ 时就可以实现青色和黄色显示。青色和黄色波长选择后的光谱图如图 5(a)和(b)所示。

通过图 5 可以看到,青色和黄色的反射率均在 70%左右,且半峰宽在 $505\pm 50\text{ nm}$ 和 $580\pm 50\text{ nm}$ 之间,实现了类似红绿蓝的半峰宽。

另外,考虑到加工的便利性,希望薄膜硅层的厚度是一致的。但是,从以上的计算结果可以看到,实现短波长的蓝色和青色的出光时,硅柱的高度(硅层的厚度)为 100 nm ,这与实现其他三色的 120 nm 有 20 nm 的差别。如果青色和蓝色都选用 120 nm 厚的硅层,实现相应颜色出光时,会引

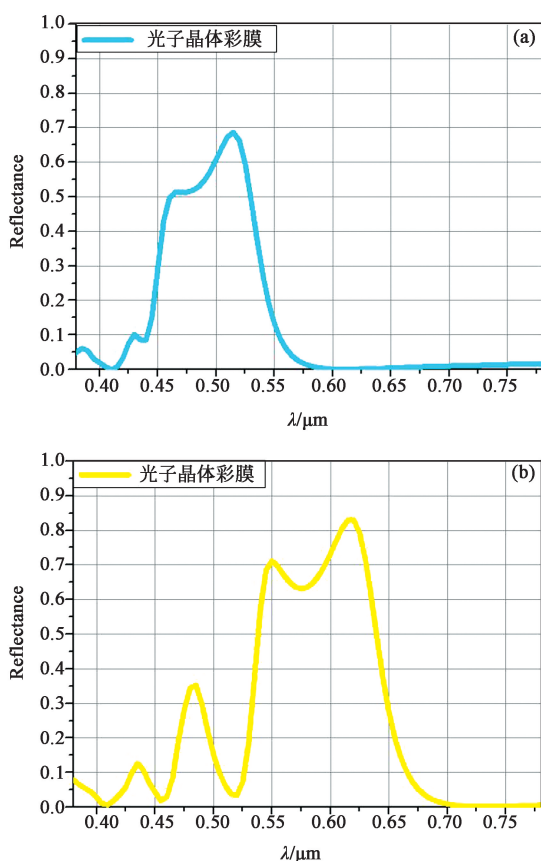


图 5 二维反射式光子晶体圆柱实现青色(a)和黄色(b)显色的光谱图

Fig.5 Reflection of 2D photonic crystal pillar for getting cyan (a) and yellow(b) color

起出射特定波长出光的 FWHM 稍微变宽,且主出光波长红移 20 nm 左右。

光子晶体具有光子带隙,光子带隙能够调制具有相应波长的电磁波,使能量处在光子带隙内的光子不能进入光子晶体被反射,而能量不处于光子带隙中的光子通过光子晶体被透射或者被光子晶体本身的慢布洛赫模式(Slow Bloch Mode)吸收损失。不同光子晶体结构的几何参数不同,使光子带隙发生变化,这种变化导致不同波长的光被光子晶体结构反射,完成了滤色或者筛色的目的。

2.3 光子晶体色谱分析

在国际照明委员会(Commission Internationale de L'Eclairage, CIE) 1976 (L^* , u^* , v^*) 色度空间中,将光子晶体结构得到的 RGB 三基色和 RGBCY 的五基色算出色坐标(u' , v')值,绘入 CIE 1976 中,与 NTSC 的 RGB 形成的三角形进行对比,如图 6 所示。

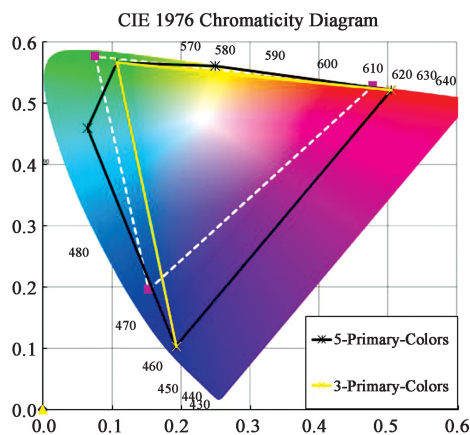


图 6 光子晶体三基色(黄线)与五基色(黑线)和 NTSC 在 CIE1976 系统色度图上的对比(x, y 轴分别为色坐标 u, v)

Fig. 6 Comparison of the photonic crystals generated three-primary-colors and the five-primary-colors to the NTSC on CIE1976 system (x, y axis are color coordinates of u, v respectively)

可以看到反射式光子晶体得到的 RGB 和 RGBCY 可以将 NTSC 的 RGB 色域(白色虚线)分别扩展 121%和 143%,拓宽了色域,使显示屏所见更加接近于现实所见色彩。

综上,通过在硅薄膜上设计不同周期、直径和高度的二维圆柱状光子晶体结构,通过透射的方

式实现了高反射率、窄半峰宽的红绿蓝三基色,同时,通过改变光子晶体参数,也实现了黄色和青色的补色,文章通过光子晶体纳米结构实现彩色显示所需的 RGBCY 五基色,拓宽了色域,同时,由于每个颜色的反射出光的半峰宽较传统彩膜低,提高了色饱和度。

3 二维柱状光子晶体彩膜制备方法

光子晶体结构矩阵的制备可以应用电子束刻蚀(E-beam Litho.),也可以通过纳米压印(Nano-imprint Litho.)的方法制得。本论文集中 E-beam Litho.的方式为主,介绍光子晶体结构的制备方法。如图 7(a)所示,在玻璃基片上沉积一层 120 nm 的硅层,再在硅层上沉积一层 100 nm 的 SiO_2 作为刻蚀过程中的硬母版;再在其上旋涂一层光刻胶(图 7(b));在光刻胶上用 E-beam 直写的方式写上目标周期和占空比的圆柱状结构(图 7(c));通过光刻

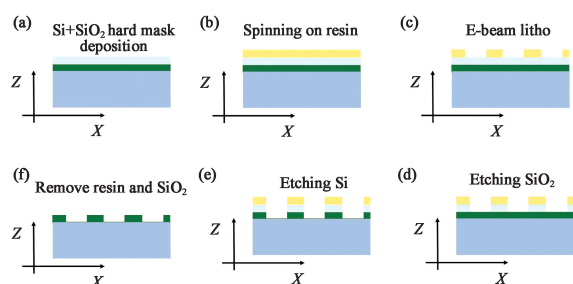


图 7 制备二维圆柱状光子晶体结构的制备步骤

Fig.7 Process for generating a group of 2 dimensional pillar photonic crystals array

胶,用干刻蚀的方法通过光刻胶刻蚀 SiO_2 硬母版(图 7(d));再通过硬母版和光刻胶刻蚀硅层刻蚀 Si(图 7);最后清理掉光刻胶和 SiO_2 硬母版^[9],形成了硅基光子晶体结构(图 7(f))。

通过以上介绍的 E-beam Litho.的方法适合制备微米和几个毫米级面积的光栅。如果是大面积的微纳结构写入时,光刻胶会因为充电效应而不能保证写入的一致性和准确性。因此工业化应用时,将通过制备母版,用纳米压印的方式实现多种像素、大面积制备。

4 结 论

本文应用时域有限差分法设计优化二维柱状光子晶体结构,实现反射式 RGBCY 波长选择。通过在玻璃基片上沉积一层 120 nm 的硅薄膜,通过调整二维柱状光子晶体结构的周期、直径和高度,来达到调整光子带隙的作用。不同的光子禁带反射特定波长的光,让其他波长的光透射或者吸收,从而实现 RGBCY 显色。用纳米柱状光子晶体实现了 $\text{FWHM} \pm 50 \text{ nm}$ 左右的显色,相比于传统彩膜,实现了较窄的 FWHM,提高了色纯度。同时,光子晶体 RGB 三基色和 RGBCY 五基色可以分别将 NTSC 拓宽 121% 和 143%。最后,简单介绍了一种实现文章所述的柱状光子晶体结构的制备方法,为实际制备提供了一种思路。未来的批量化生产中,可以用纳米压印来实现彩色显示所需的大面积大批量生产的需求,这是进一步研发的重点。

参 考 文 献:

- [1] 公猛男,富淑清,吴渊,等.彩色液晶显示用彩色滤光膜的制备及其性能的研究[J].液晶通讯,1993,1(1):36-45.
GONG M N, FU S Q, WU Y, *et al.* Study of color filters preparation and function for liquid crystal display[J]. *Chinese Letter of Liquid Crystal*, 1993, 1(1): 36-45. (in Chinese)
- [2] 于涛,黄锡珉.彩色液晶显示中彩色膜的应用[J].液晶与显示,2004,19(3):182-185.
YU T, HUANG X M. Application of color film in color LCD[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2004, 19(3): 182-185. (in Chinese)
- [3] YABLONOVITCHE. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [4] JOHNS. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [5] LIU C, KAMAEV V, VARDENY Z V. Efficiency enhancement of an organic light-emitting diode with a cathode forming two-dimensional periodic hole array[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(14): 143501.

- [6] 王旭龙琦.基于微纳结构阵列的全色彩颜色调控新方法研究[D].杭州:浙江大学,2013.
WANG X L Q. Research of full-color tuning method based on micro/Nano-structure Array [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [7] TAFLOVE A, HAGNESS S C. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* [M]. 3rd ed. London: Artech House, 2005.
- [8] MENG X Q, DROUARDE E, GOMARD G, *et al.* Combined front and back diffraction gratings for broad band light trapping in thin film solar cell [J]. *Optics Express*, 2012, 20(S5): A560-A571.
- [9] MENG X Q, GOMARD G, EL DAIF O, *et al.* Absorbing photonic crystals for silicon thin-film solar cells: design, fabrication and experimental investigation [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(S1): S32-S38.

作者简介:



孟宪芹(1981—),女,甘肃临夏人,博士,2012年于法国里昂中央理工大学获得博士学位,现任京东方科技集团股份有限公司资深高级研究员,主要从事微纳光学相关方向的研究和开发。E-mail: mengxianqin@boe.con.cn