

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0687-04

利用亚微米光栅制作导光棒方法研究

汪玲玲, 叶 燕, 浦东林, 陈林森
(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘 要:研究了周期为 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 结构的光栅的光导特性, 用严格耦合波理论分析计算衍射效率与光栅槽深的关系, 提出利用衍射效率与槽深的线性段进行导光棒设计, 导光棒表面导光单元由三套出射光主波长分别是红光 700nm , 绿光 546.1nm , 蓝光 435.8nm 的亚微米光栅组成, 用红、绿、蓝三色 LED 作为光源, 通过光栅空频控制出射光方向、槽深调节衍射效率, 达到导光棒出射光源的均匀性。

关键词:亚微米光栅; 导光棒; 空频; 槽深

中图分类号: O436.1; TH74 **文献标识码:** A

The Study of Fabricating Light Guide Stick with Sub-micron Gratings

WANG Ling-ling, YE Yan, PU Dong-lin, CHEN Lin-sen
(Institute of Information Optical Engineering Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A novel method of fabricating light guide stick with sub-micron Gratings is proposed. By using rigorous coupled-wave theory, the relationship between transmission efficiency and depths of grooves is analyzed. The light-guiding properties of sub-micron gratings have been studied based on the linear part of the relationship curves. The light guiding unit on the surface is composed of sub-micron gratings whose transmission wavelengths are red, green and blue in order. The light sources are red, blue and green LED. The transmission angle is controlled by grating frequency and the diffraction efficiency is controlled by groove depth of sub-micro gratings to get uniformity of transmission field.

Key words: sub-micron grating; light guide stick; spatial frequency; groove depth

1 引 言

目前, 液晶显示器由于其厚度薄、质量轻、携带方便、无辐射等优势, 需求快速增加, 已在笔记本电脑、手机、液晶电视等领域中有着广泛的应用。由于 LCD 面板本身不具发光特性, 因此, 必须在 LCD 面板上加上一个发光源, 方能清楚地达到显示效果, 背光模块即是提供 LCD 显示器产品中一个背面光源的光学组件, 这个光学组件主要部件是导光板, 设计

出高亮度、高均匀度、高光效的导光板是关键^[1]。

现有导光板的光源是冷阴极荧光管 (CFL) 或发光二极管 (LED)^[2], 但是这两种光源的尺寸是有一定规格的, 不能按照导光板的需要进行调整, 用亚微米光栅型导光棒作为光源可以按照需要设计导光

基金资助: 国家自然科学基金 (No 10474070)。

作者简介: 汪玲玲 (1982 -), 女, 硕士研究生, 主要从事亚微米光栅型导光板的研究。E-mail: wanglingling8201@163.com
收稿日期: 2006-01-25

单元大小,从而更具灵活性;利用亚微米光栅制作导光棒,容易控制其出射光垂直出射,从而可以获得好的出光均匀性;亚微米光栅槽深的深度控制比其他光栅的槽形控制要容易;并且亚微米光栅易于复制。

本文用亚微米光栅的方法制作导光棒,导光棒上表面每个导光单元由出射光主波长分别是红、绿、蓝光的亚微米光栅制成,按照给定入射角和垂直出射的要求,根据光栅方程确定光栅周期;用严格耦合波理论^[3-6]分析计算光栅槽深与衍射效率的关系,利用衍射效率与槽深的线性段,控制槽深调节衍射效率,最终达到光源均匀出射的效果。

2 亚微米光栅导光原理

光栅型导光棒的结构侧视图如图 1 所示,导光棒上表面的导光单元由出射光主波长分别是红、绿、蓝光的光栅制成,光栅周期由光栅方程决定:

$$nt(\sin \theta - \sin i) = \pm m \quad (m = 0, 1, 2, 3) \quad (1)$$

其中, n 是材料的折射率; t 是光栅周期;入射角 i 大于全反射角;衍射角 $\theta = 0$;衍射级次 $m = 1$; 对应相应的红、绿、蓝光波长。图 1 中 1, 2, 3 - 导光单元分别为出射光主波长是红、绿、蓝光的亚波长光栅; 4 - 导光棒; 5 - 光源。对应相应的光栅,三束红、绿、蓝平行光线以一定的入射角(大于全反射角)入射到导光棒内部,一级透射衍射光垂直出射,其它级次的光在导光棒内部传播。

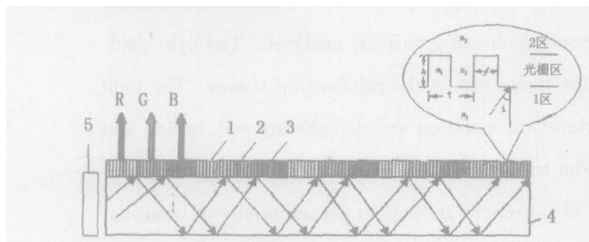


图 1 光栅型导光棒的结构侧视图

亚微米光栅型导光棒利用了亚微米光栅的衍射特性,根据严格耦合波理论^[3-6],透射区光栅的衍射效率是:

$$DE_{tm} = T_m T_m^* \operatorname{Re} \left(\frac{k_{2,m}}{k_0 n_1 \cos i} \right) \quad (2)$$

这里, k_0 为入射光在真空中的波矢; T_m 是透射区向前传输的第 m 级衍射波电场幅度,

$$T_m = \sum_{m-1}^M \sum_{m,n} \left[C_m^+ \exp(-k_0 q_m h) + C_m^- \right] \quad (3)$$

$$k_{2,m} = \begin{cases} +k_0 \left[n_2^2 - (k_{ym}/k_0)^2 \right]^{1/2}, & k_0 n_2 > k_{ym} \\ -ik_0 \left[(k_{ym}/k_0)^2 - n_2^2 \right]^{1/2}, & k_0 n_1 < k_{ym} \end{cases} \quad (4)$$

$$k_{y,m} = k_0 \left[n_1 \sin i - m \lambda_0 \right] \quad (5)$$

通过将槽深 h 设为变量编程计算,其 1 级透射衍射效率与光栅槽深的关系如图 2 所示。

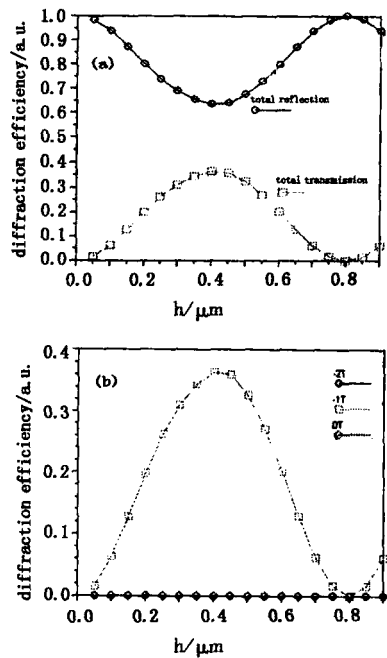


图 2 不同槽深下反射与透射衍射效率的关系曲线

图 2(a)是用严格耦合波理论计算出的周期为 $0.66 \mu\text{m}$ 亚微米光栅在入射光波长为 700nm ,在介质内入射角 45° 的条件下,不同槽深下反射与透射衍射效率的关系曲线;图 2(b)示出在不同槽深下各衍射级次的透射衍射效率,可以看出只有一级衍射光垂直透射出来。

3 亚微米光栅型导光棒的设计

每个导光单元的大小由导光棒的厚度及光线的入射角决定,具体关系是:

$$d = \frac{2H \tan i}{3} \quad (6)$$

式中, d 是导光单元的宽度; H 是导光棒的厚度; i 是光线的入射角。光栅周期由式 (1) 决定,入射角大于全反射角, +1 级透射衍射光垂直出射;在远离光源的地方光强变弱,要使导光棒出射光源均匀,必须逐步提高光栅衍射效率,如何改变光栅槽深,提高光栅衍射效率,达到导光棒出射光均匀分布是亚微米光栅型导光棒设计的重点。其设计步骤:

(i) 确定导光单元的大小,导光棒的制作材料是 PMMA,在导光棒内部的全反射角是 42° ,入射角须大于全反射角,取 $i = 45^\circ$;根据式 (6) 可算出每个导

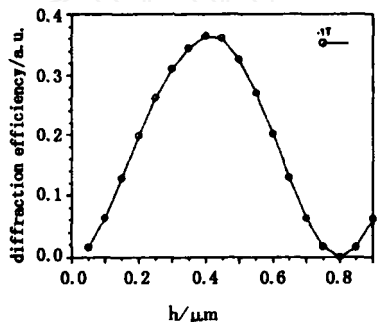
光单元的大小。

(ii)确定光栅周期,根据光栅方程(1),按照入射角 $i = 45^\circ$;一级衍射透射光垂直于导光板的要求,算出光栅周期 $t = 0.6644\mu\text{m}$ ($\lambda = 700\text{nm}$); $t = 0.5182\mu\text{m}$ ($\lambda = 546\text{nm}$); $t = 0.4136\mu\text{m}$ ($\lambda = 435.8\text{nm}$)。

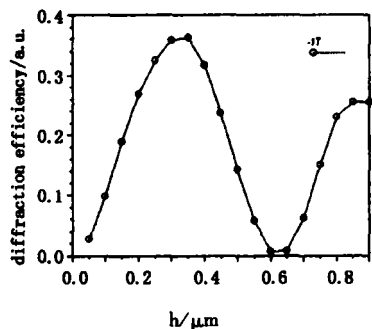
(iii)确定各导光单元之间衍射效率的关系,根据导光棒的尺寸及导光单元的大小,求出导光棒上分别有 n 个出射光是红、绿、蓝光的导光单元,为了使出射光源光强均匀,在理想情况下各个导光单元光栅衍射效率的关系满足以下条件^[7]:

$$\frac{1}{\eta_1} = \frac{1}{\eta_2} = \dots = \frac{1}{\eta_{(n-1)}}$$

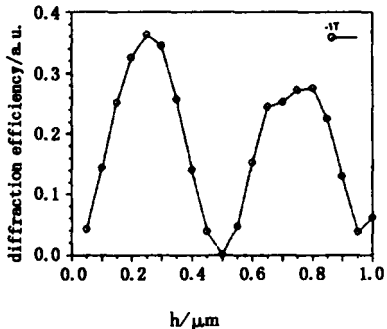
(η_1 是靠近光源处的光栅的衍射效率)



(a) $t = 0.664\mu\text{m}$



(b) $t = 0.5182\mu\text{m}$



(c) $t = 0.4136\mu\text{m}$

图3 光栅一级衍射效率与槽深的关系

(iv)在 PMMA 制成的导光棒内部光传播时,由于物质的吸收,光强发生衰减。衰减后的光强与初始进入导光棒的光强的关系,服从朗伯吸收定律: $\phi_T = \phi_0 e^{-s/\delta}$, 其中 ϕ_T 是传播一定距离后的光通量; ϕ_0 是入射光的光通量; s 是光的传播距离; δ 是吸收系数^[8], ($\lambda = 700\text{nm}$) = 250db/km, ($\lambda = 546\text{nm}$) = 150db/km, ($\lambda = 435.8\text{nm}$) = 150db/km, 可以看出, PMMA 的吸收对光强衰减的影响很小, 可以不考虑。

(v)模拟出(ii)中各周期的光栅正一级衍射效率与槽深之间的关系,如图3(a)、(b)和(c)所示。

从图3(a)可以看出:槽深在 $0.05 \sim 0.45\mu\text{m}$ 之间变化时衍射效率在 $0.03 \sim 0.38$ 之间呈线性关系变化;图3(b)可以看出:槽深在 $0.05 \sim 0.35$ 之间变化时衍射效率在 $0.04 \sim 0.38$ 之间呈线性关系变化;图3(c)可以看出:槽深在 $0.05 \sim 0.25$ 之间变化时衍射效率在 $0.03 \sim 0.38$ 之间呈线性关系变化。利用这一段衍射效率与光栅槽深的线性关系,通过槽深控制改变光栅衍射效率,达到出光均匀的效果。

(vi)按照衍射效率的要求及衍射效率与光栅槽深的关系,确定每套光栅的槽深。

4 制作方法

为了验证衍射效率与光栅槽深之间的关系,在现有实验条件下,在不同胶厚的光刻胶干板上记录满足以下条件的的光栅:入射光波长 441.6nm ,入射角是 45° ;1级衍射光垂直出射,这样,光栅周期为 $0.416\mu\text{m}$ 。在入射角 45° 的条件下,不同胶厚的亚微米光栅其正一级衍射效率如图4所示,图5所示是光刻胶槽深分别为 $0.22\mu\text{m}$ 、 $0.15\mu\text{m}$ 、 $0.12\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.08\mu\text{m}$ 的电镜扫描图。

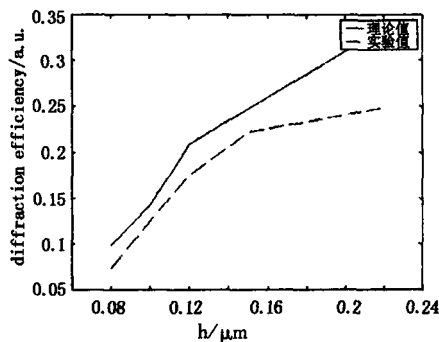


图4 衍射效率与槽深关系

从图4和5中可看出,在槽深小于 $0.15\mu\text{m}$ 时,实验测得衍射效率与计算所得理论值变化趋向

一致,当槽深高于 $0.2\mu\text{m}$ 时,实验值与理论值存在偏差,由于亚微米光栅记录对稳定性要求非常严格,记录过程中的稳定性、显影时光刻胶没有完全露底均会带来槽形误差,光栅表面 2cm 处,1 级透射衍射光偏离垂直方向 1mm ,即出射角偏离垂直方向 2.86° ;该偏差是由于拍摄带来的空间频率误差引起的。通过以上实验可知,只要严格控制光栅条纹的空间频率及槽深,就能获得需要的衍射效率,从而达到输出光均匀的目的。利用图 6 所示光路图可以在光刻胶干板上记录上述不同槽深的光栅组。

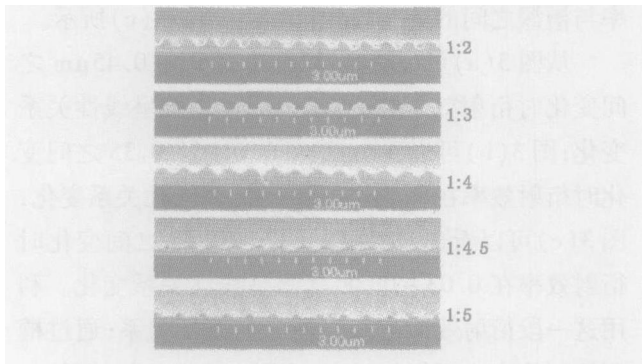


图 5 扫描电镜图

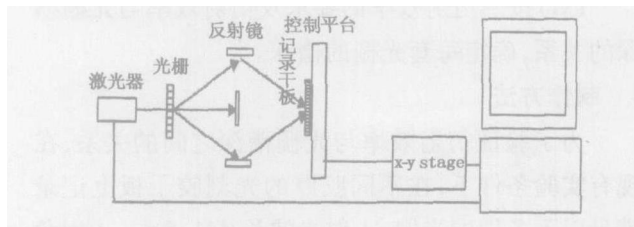


图 6 实验装置图

在 He - Cd 激光器前方放置光栅 (R: $1.3\mu\text{m}$, G: $1.0\mu\text{m}$, B: $0.85\mu\text{m}$),用激光照射位相光栅 R,产生 +1, 0, -1 级衍射光,挡掉 0 级光,衍射光通过相互平行的两块反射镜,将衍射光会聚在记录材料(光刻胶干版)上,形成干涉,干涉条纹是位相光栅 R 空间频率的倍频,通过计算机控制光刻胶的位置,记录对应于红光衍射的干涉条纹点阵,然后,更换对应于绿光衍射的位相光栅 G,计算机控制平移光刻胶干板,记录下一套干涉条纹点,再记录对应于蓝光的位相光栅 B 形成的干涉条纹。

上述方法的优点是,只要放置位相光栅的位置不变,记录干版上的干涉光点的位置也不会变化,这样,三组光栅点阵便可整齐排列。最后,根据不同槽深控制曝光时间,对光刻胶干版进行显影、电铸,制成金属镍版,通过微纳米亚印设备将上述光栅点阵

复制到 PMMA 上,压印压力: 2MPa ,面积 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$,温度 130°C ,压印保压时间 0.1s ,这样,可以将亚微米槽形结构复制到 PMMA 上^[9]。为了提高光的利用率,导光棒除入光面和出光面外其余面均镀上金属膜^[10]。

5 小结

本文设计了亚微米光栅型导光棒,并通过理论分析和实验研究对用亚微米光栅制作导光棒的可行性进行了验证,提出制作该棒的实验装置,这对于改进现有导光棒制作方法有着重要的意义。今后进一步完善导光棒的制作工艺,主要包括光栅空频和槽深的严格控制。

参考文献:

- [1] K Kanantar Modified functional light-guide plate for backlighting transmissive LCDs[J]. Journal of the SD, 2003, 11 (4): 641 - 645.
- [2] DI Feng Novel integrated light-guide plates for liquid crystal display backlight[J]. Journal of optics, 2005, 7 (3): 111 - 117.
- [3] M GMoharam, T K Gaybrd Rigorous coupled-wave analysis of planar grating diffraction [J]. J. Opt Soc Am., 1983, 73: 1105 - 1112
- [4] M GMoharam, T K Gaybrd Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings[J]. J. Opt Soc Am., 1982, 72 (10): 1385 - 1392
- [5] 袁惠,周进,王晓伟,等. 一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究 [J]. 中国激光, 2002, 29 (9): 795 - 800
- [6] 柴立群,杨李茗,许乔. 用于 CF 驱动器的取样光栅的矢量分析与计算 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14 (2): 270 - 274.
- [7] Serge Habraken, Denis Vandoma New micropism geometry in light guide plate for illumination devices[A]. Proceedings of SPIE, 2000, 3594: 28 - 33.
- [8] Di Feng High quality light guide plates that can control the illumination angle based on micropism structures [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85 (24): 6016 - 6018.
- [9] 沈雁,陈林森. 光变图像光栅条纹高效率转移主版系统的研制 [J]. 中国激光, 2004, 31 (10): 1212 - 1216
- [10] 陈林森,等. 一种新型数字化衍射光变图像的存储系统 [J]. 光学技术, 2005, 31 (1): 11 - 13.