

侧入式LED背光模组中光耦合模块的设计与实现

黄碧云 林志贤 陈恩果 徐 胜

福州大学平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350002

摘要 现有的液晶显示器(LCD)背光模组大多采用侧入式发光二极管(LED)作为背光源,其要求导光板厚度始终大于LED发光截面宽度。为解决这一问题,提出一种用于侧入式LED背光模组的自由曲面光耦合结构,包括浸入式准直透镜与自由曲面反射器,光源出射光先由浸入式准直透镜收集并准直,再经自由曲面反射器反射并聚集到导光板入光面。利用斯涅尔定律、微分几何法以及等光程原理对该模块进行设计,并通过光学仿真验证设计的可行性。实验结果表明,当采用有效发光面积为 $0.4\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ 的LED芯片作为光源时,导光板厚度减少 0.6 mm ,导光板入光面处光能利用率达到 96.23% ,相对于传统结构,光线利用率提高 11.22% 。该光耦合模块实现了背光模组中导光板的薄型化,同时改善了导光板入光面处光热点现象。

关键词 光学设计; 液晶显示; 背光模组; LED照明; 光耦合结构

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0222003

Design and Implementation of Optical Coupling Module in Side-LED Backlight System

Huang Biyun Lin Zhixian Chen Enguo Xu Sheng

National & Local United Engineer Laboratory of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract Conventional backlight system of liquid crystal display (LCD) always uses side-in light emitting diodes (LEDs). It requires that the thickness of the light guide plate should be larger than LED's light-emitting section width. To solve this problem, a free-form optical coupling module for side-LED backlight is proposed, which includes collimator lens and a free-form reflector. The light is firstly collected and collimated by immersing collimator lens, and then reflected and gathered into the LGP's incident surface. By using Snell's law, differential geometry method and aplanatic principle, the detailed design of the module is presented, and the feasibility is shown by optical simulation. Simulation results show that by choosing $0.4\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ LED chip as the light source, the thickness of the light guide plate is reduced 0.6 mm , and the light utilization can still reach 96.23% . Compared with the conventional structure, the light utilization increases by 11.22% . The optical coupling module can realize a thinner backlight module effectively, and simultaneously help to restrain the hot phenomenon.

Key words optical design; liquid crystal display; backlight; LED lighting; light coupling structure

OCIS codes 220.1250; 220.2740; 220.3630

1 引 言

近年来,液晶显示技术由于其产品体积轻薄、占用空间小、辐射低等优点,逐渐替代了传统的阴极射线管显示技术,占据了平板显示产品的主流^[1]。液晶显示器(LCD)并非主动发光型显示装置,需要背光模组为其提供照明,图像才能得以显示^[2]。背光模组的作用是将点光源或线光源发出的光通过导光板(LGP)形成液晶显示

收稿日期: 2015-07-23; 收到修改稿日期: 2015-09-03

基金项目: 国家科技部 863 重大专项(2013AA030601)、国家自然科学基金(61405037)、高等学校科技发展基金(650074)、福建省资助省属高校专项(JK2014002)、福建省科技重大专项(2014HZ0003-1)、福建省科技厅重点项目(2013H0033)

作者简介: 黄碧云(1991—),女,硕士研究生,主要从事液晶背光模组设计方面的研究。E-mail: biyun_h@163.com

导师简介: 林志贤(1975—),男,博士,教授,主要从事信息显示、平板显示器件驱动和图像处理技术方面的研究。

E-mail: lzx2005000@163.com(通信联系人)

所需要的面光源,它不仅决定了液晶显示器的光效率、均匀性及颜色特性,而且是背光模组薄型化的关键^[1]。

按照背光源的位置可以把背光模组分为侧入式和直下式两种^[3,4]。随着电子元器件的微型化,侧入式背光模组在提升空间利用率为主要的应用背景下成为研究重点。如图1所示,侧入式背光模组是将发光源设置在导光板一侧,其光学部件由发光二极管(LED)光源、导光板、光学膜片(包括反射片、下扩散片、增光片和上扩散片)构成。侧入式背光模组中,发光源紧贴导光板的入光面,由于发光源与导光板入光面很近,光直接进入导光板并在其中全反射传播,当光线被导光板底部的散射网点散射后,将依次经过下扩散片、增光片和上扩散片后照明液晶面板,而部分向导光板下方扩散的光线则由反射片反射后被重新利用。

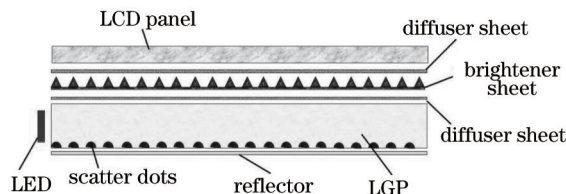


图1 传统侧入式背光模组示意图

Fig.1 Sketch of conventional side-in LED backlight module

为提高光能利用率,同时进一步实现液晶显示器的薄型化,许多研究者对背光模组中导光板结构以及光学膜片做了研究。Feng^[5]开发的双面棱镜集成导光板^[5]和Chien等^[6]提出的双面微结构集成导光板^[6]均可使背光模组厚度大大减小,并且出射光的均匀度达到85%以上。同时,徐平等^[7]研制的1.8 inch (1inch=2.54 cm)新型集成导光板,其上下表面分别直接熔合非球面半柱状微结构阵列和微棱镜结构阵列,实现目前典型背光模组中双层正交棱镜膜、扩散膜和导光板4层复杂膜系的功能。Luo等^[8-9]针对偏振化LED光源对能够保持光线偏振性的导光板微结构进行了研究,使得导光板出射光线为偏振光,同时提高了显示屏近法线方向的亮度。Li等^[10]为提高LED光源光线的利用率,对反射片进行了优化,提高光能回收利用。张尹聪^[11]提出了一种多功能的光学膜片,可以取代扩散片和增光片。顾宝等^[12]提出了直接在导光板上制备量子点微结构的方法,改善量子点薄膜液晶显示背光技术中存在的材料利用率低和光学效率不高的缺点。黄炳乐等^[13]提出了导光板网点平均密度范围的最优化研究,提高了网点优化设计的效率。

为了尽可能多地耦合光能以提高光线利用率,研究中运用的LED光源截面宽度均小于导光板厚度。因为只要LED光源截面宽度大于导光板厚度,光源光能就有一部分不能进入到导光板中,这样不仅造成了能量利用率低下,而且会出现漏光现象,影响对比度。这就意味着,传统侧入式LED背光模组中导光板的厚度不能随着导光板的薄型化要求无限变小。侧入式液晶显示器中导光板的进一步薄型化实际上受到了发光源截面宽度的制约,即在保证光效率和对比度的前提下,导光板的厚度必须比发光源截面宽度大。为了解决这一问题,本文基于斯涅尔定律、微分几何法以及等光程原理设计了用于侧入式背光模组的自由曲面光耦合模块,解决了导光板厚度受制于发光源截面宽度的问题,从根本上实现了液晶显示背光模组的薄型化。

2 设计原理及理论推导

基于自由曲面光耦合模块的侧入式背光模组示意图如图2所示,从图中可以看出自由曲面光耦合模块包

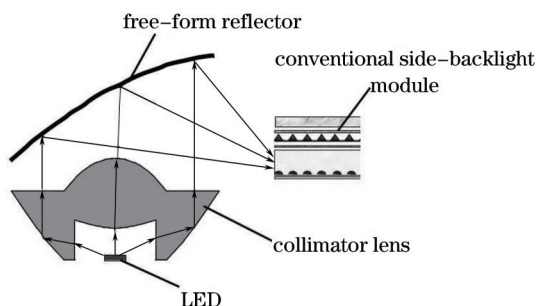


图2 基于自由曲面光耦合结构的背光模组结构示意图

Fig.2 Sketch of backlight module's configuration with optical coupling module

括浸入式准直透镜和自由曲面反射器两部分,LED光源发出的光线先经过浸入式准直透镜进行收集和准直后,再通过自由曲面反射器反射聚集到达导光板的入光面。

2.1 浸入式准直透镜的设计

如图3所示,假定O点为LED光源所在位置,且向y轴正方向辐射光,按照朗伯辐射体空间能量分布将y轴正空间立体角分为 $[0^\circ, \theta_m]$ 和 $[\theta_m, 90^\circ]$ 两部分,分别对应准直透镜的折射部分和反射部分。该准直透镜出射圆形光斑,因此,仅仅考虑二维平面上光轴右侧部分。

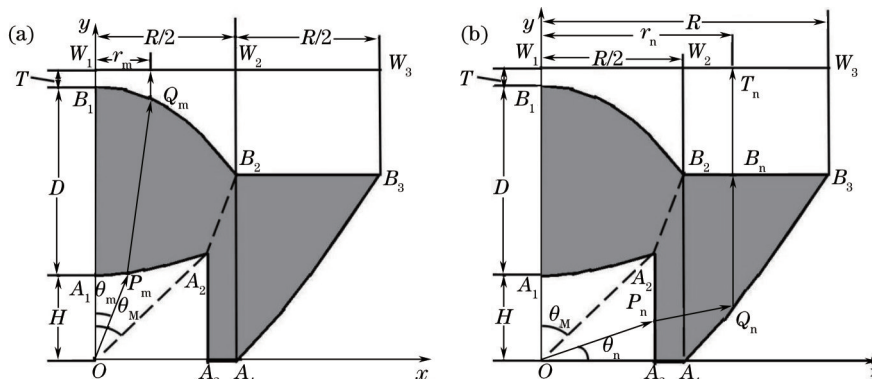


图3 准直透镜示意图。(a) 折射部分; (b) 反射部分

Fig.3 Sketch of collimator lens. (a) Refractive portion; (b) reflecting portion

图3(a)为准直透镜折射部分,自由曲面 A_1A_2 和自由曲面 B_1B_2 对LED点光源发出的 $[0^\circ, \theta_m]$ 内的光束进行准直。其中,光轴上点 A_1 到光源的距离为 H ,透镜的厚度为 D ,目标面距离透镜为 T , T 取大于0的任意值。在目标面上选半径 $R/2$ (其中 $2 \times R$ 为准直透镜口径)的圆作为折射部分对 $[0^\circ, \theta_m]$ 内光通量的接收区域。

将LED光源发光角 $[0^\circ, \theta_m]$ 进行离散,与其对应的自由曲面 A_1A_2 离散成与其相同的 K 份,当离散的份数足够大时,自由曲面 A_1A_2 上相邻的两点 P_i 和 P_{i+1} ($1 \leq i \leq K, i$ 为曲面上的第 i 个点)相当于一小段直线,此时,在已知自由曲面 A_1A_2 上点 P_i 的单位法向矢量 N_i 情况下,存在直线 P_iP_{i+1} 垂直于 N_i 。即

$$P_i P_{i+1} \cdot N_i = 0. \quad (1)$$

在已知自由曲面 A_1A_2 上点 P_i 和自由曲面 B_1B_2 上点 Q_i 情况下,根据折射定律和余弦定理^[9]可以求得 P_i 处单位法向矢量 N_i :

$$N_i = (n_2 \cdot v_i - n_1 \cdot r_i) / \sqrt{(n_2)^2 + (n_1)^2 - 2 \cdot n_1 \cdot n_2 (v_i \cdot r_i)}, \quad (2)$$

式中 n_1 为空气的折射率, n_2 为透镜的折射率, v_i 为自由曲面第 i 点出射光线的单位矢量, r_i 为自由曲面第 i 点入射光线的单位矢量。

由于将LED光源发光角在 $[0^\circ, \theta_m]$ 的光线和自由曲面 A_1A_2 离散成相同的 K 份,因此入射光线 OP_{i+1} 与光轴即y轴正向的夹角等于 θ_{i+1} ,用数学方程表示为[假设 P_{i+1} 的坐标为 (x,y)]

$$x/y - \tan \theta_{i+1} = 0. \quad (3)$$

联合(1)~(3)式可以求得自由曲线 A_1A_2 上点 P_{i+1} 。

将目标面 W_1W_2 、自由曲面 B_1B_2 离散成相同的 K 份,同时,由于经过自由曲面 B_1B_2 后的出射光线为平行于光轴的光线,因此自由曲面 B_1B_2 上 Q_i 的横坐标和目标面上 W_i 的横坐标是一样的,为 $R(i-1)/2K$ 。根据等光程原理^[14-18],光线束在各向同性的均匀介质中传播时,能够保持与波面的正交性,同时,入射波面和出射波面相对应点之间的光程均为定值。在已知准直透镜折射部分光程 L_m 时,由等光程原理可得

$$L_m = n_1 \cdot [(O, P_i) + (Q_i, W_i)] + n_2 \cdot [P_i, Q_i]. \quad (4)$$

(4)式可求得准直透镜折射部分自由曲面 B_1B_2 上各个轮廓点坐标。

图3(b)为反射部分,平面 A_2A_3 平行于光轴过 A_2 点交x轴于 A_3 点,LED点光源发出的 $[\theta_m, 90^\circ]$ 内的光线经过平面 A_2A_3 后由反射面 A_4B_3 对其进行准直再经过平面 B_2B_3 出射至目标面 W_2W_3 。

将光源发光角 $[\theta_m, 90^\circ]$,目标面 W_2W_3 和自由曲面 A_4B_3 离散成相同的 K 份,可知目标面上第 i 个点 W_i 的横坐标

为 $R/2 + R(i-1)/2K$ 。由于入射光线经过自由曲面 A_4B_3 反射后出射光线为平行于光轴的光线,因此自由曲面 A_4B_3 上点 Q_i 的横坐标与目标面 W_2W_3 上点 W_i 的横坐标一样,为 $R/2 + R(i-1)/2K$ 。由等光程原理可得

$$L_n = n_1 \cdot [(O, P_i) + (B_i, W_i)] + n_2 \cdot [(P_i, Q_i) + (Q_i, B_i)]. \quad (5)$$

由于平面 B_2B_3 到目标面 W_2W_3 的距离在光源发光角 $[\theta_m, 90^\circ]$ 内是一样的,因此反射部分的光程 L_n 可以简化为

$$L_n = n_1 \cdot [O, P_i] + n_2 \cdot [(P_i, Q_i) + (Q_i, B_i)]. \quad (6)$$

由(6)式可得准直透镜反射部分自由曲面 A_4B_3 上的各个轮廓点。

2.2 自由曲面反射器的设计

自由曲面反射器的设计采用二维几何构造法^[19]。几何构造法需要满足光源和目标面的对应关系,光线从光源出发,经过反射后到达目标面。已知光源和目标面的信息以及反射面的初始点可以求出反射面上点的全部信息。

如图4所示为自由曲面反射器示意图。LED经过准直透镜准直后的出射光线 S_1S_n 作为光源出射光线, T_1T_n 为目标面, P_1P_n 为自由曲面反射面, P_1 为光源面、目标面和自由曲面反射面的起始点。

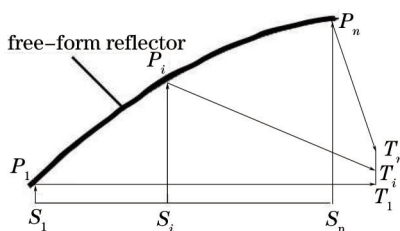


图4 自由曲面反射器示意图

Fig.4 Sketch of free-form reflector

已知 S_1, P_1, T_1 , 根据斯涅尔定律可求得 P_1 处的单位法向矢量 N_1 :

$$N_1 = (v_1 - r_1) / |v_1 - r_1|, \quad (7)$$

式中 v_1 为点 P_1 处出射光线的单位矢量, r_1 为点 P_1 处入射光线的单位矢量。由于光源出射光线为平行于光轴的平行光线,因此,自由曲面反射器上与光源对应的反射点的横坐标是已知的。根据线性拓展原理可得

$$P_1P_2 \cdot N_1 = 0. \quad (8)$$

由(8)式可求得 P_2 点的坐标值,同理,依次可以求出自由曲面反射器 P_1P_n 上的全部点的坐标值。

2.3 浸入式准直透镜的优化

浸入式准直透镜设计好之后,通过光学软件 TracePro 进行仿真,在光源发光角度大于 θ_m 附近处,光线经过平面 A_2A_3 折射后,其出射光线并未到达反射面 A_4B_3 ,而是折射到平面 B_2B_3 ,即,准直透镜反射部分并未对其进行准直,其光线仿真图如图5所示。考虑到光源 LED 为朗伯体光源,随着光线与光轴夹角的逐渐变大,光强逐渐减小,因此,对准直透镜进行优化,进一步准直光源发光角在 θ_m 附近的光线,而发光角在 $[80^\circ, 90^\circ]$ 的光线由于能量较低不作约束。

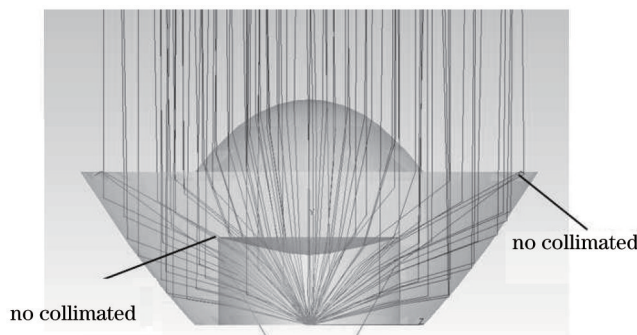


图5 准直透镜光线仿真

Fig.5 Light simulation of collimator lens

由折射定律可知,当准直透镜反射部分平面 A_2A_3 采用与光轴正方向即 y 轴正方向夹角成锐角时,即平面 A_2A_3' ,此时,光源发出的光线通过折射面 A_2A_3' 后,出射光线 $P'_nQ'_n$ 相比于 P_nQ_n 更趋于平缓, Q'_n 的纵坐标比 Q_n 更小,如图6(a)所示。优化后准直透镜二维平面上光轴右侧部分如图6(b)所示。当光源发光角在大于 θ_M 附近处其光线通过折射面 A_2A_3 折射后,到达反射面 A_4A_5 ,反射面 A_4A_5 对其进行准直后出射至目标面。

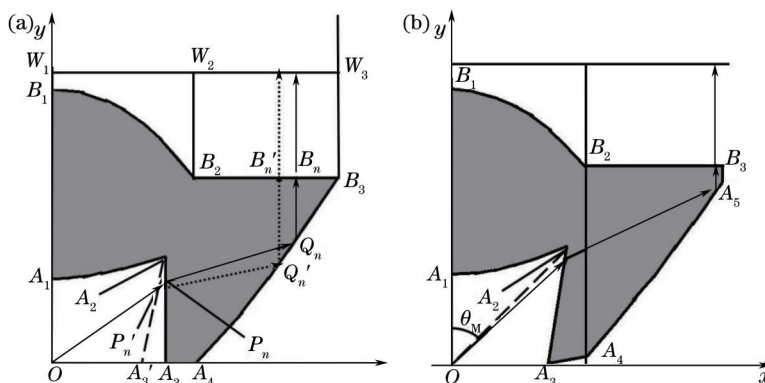


图6 准直透镜。(a) 优化方案;(b) 优化后准直透镜

Fig.6 Collimator lens. (a) Optimization; (b) collimator lens after optimizing

3 设计结果与验证

以对角线为21.5 inch的液晶显示器为例,传统侧入式背光模组背光源使用的LED颗数为36颗,按16:9的宽长比计算得到将LED置于长边,并且在每颗LED对应一个光耦合模块时,光耦合模块中准直透镜的口径不能超过13.22 mm。因此,在所设计的光耦合模块中的口径取为13.22 mm,即, $R=6.610$ mm。令 θ_M 为 45° , $H=2.15$ mm, $D=4.5$ mm, $T=1$ mm(T 必须为大于0的任意值)。在准直透镜计算过程中,将光源发光角 $[0^\circ, 80^\circ]$ 进行离散,离散间隔 K 取为800, K 取值越大,计算所得到的轮廓点越多,得到的样条曲线越接近实际曲线。

将通过MATLAB计算得到的浸入式准直透镜各个表面上的轮廓点导入建模软件SolidWorks中形成样条曲线,绕 y 轴旋转 360° 得到实体模型,如图7(a)所示。同时将MATLAB计算得到的自由曲面反射器的轮廓点也导入到SolidWorks中形成样条曲线,进行拉伸得到自由曲面反射面,如图7(b)所示。将准直透镜和自由曲面反射器进行组合得到光耦合模块整体模型。图7(c)为光耦合模块的实体模型[图7(a)~(c)中单位为mm]。

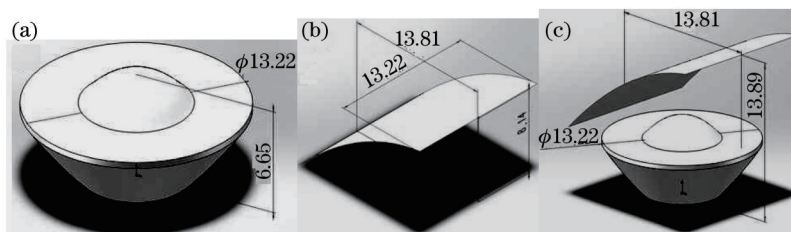


图7 实体模型。(a)准直透镜;(b)自由曲面反射面;(c)光耦合模块

Fig.7 Solid model. (a) Collimator lens; (b) free-form surface reflector; (c) optical coupling module

将光耦合模块实体模型导入到光学模拟软件TracePro中,采用 0.4 mm \times 0.4 mm朗伯体发光的LED芯片作为设计光源,光功率设定为1 W,光源空间立体角遵循朗伯体分布,追迹10万条光线,采用36片LED芯片,总共追迹360万条光线。其中,准直透镜的材料选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率 $n_2 = 1.4935$ 。在TracePro中光耦合模块仿真模型光线追迹如图8所示,单个光耦合模块的体积为 13.22 mm \times 13.61 mm \times 13.89 mm,导光板的厚度为1.4 mm,从图中可以看出,LED光源发出的光线能够较好地被准直透镜收集和准直,并经自由曲面反射器反射后最终会聚到导光板的入光侧。

含有光耦合模块的背光模组整体结构图如图9所示。图中有36片LED芯片,每片LED芯片对应一个准直透镜,因此,图中有36个浸入式准直透镜,并且自由曲面反射器为一长条状。通过光学仿真显示目标面即导光

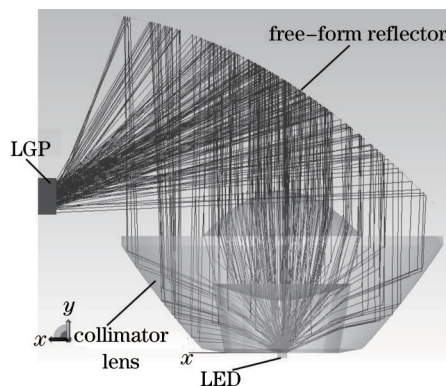


图 8 光耦合模块仿真模型光线追迹结果图

Fig.8 Simulation model and ray tracing of optical coupling module

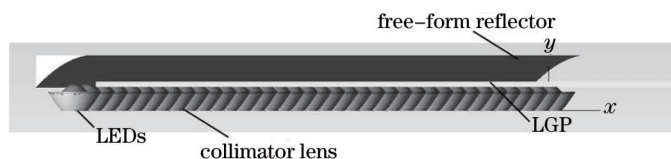


图 9 含光耦合模块背光模组整体结构图

Fig.9 Structure of backlight module with optical coupling module

板入光面上接收到的光功率为 34.641 W, 导光板入光面接收光线的效率达到 96.23%, 目标面上辐照图如图 10 (a)所示。同时, 采用传统侧入式背光模组, 36 颗 LED 光源光线直接入射到导光板入光面时, 对其进行光学仿真, 此时入光面辐照图如图 10(b)所示。其中, LED 光源的型号为 4014, 光功率为 1 W, 光源空间立体角遵循朗伯体分布, 每颗 LED 追迹 10 万条光线, 总共追迹 360 万条光线, 导光板厚度为 2 mm。从图中可以看出, 目标面上接收到的光功率为 30.602 W, 导光板接受光线的效率为 85.01%。

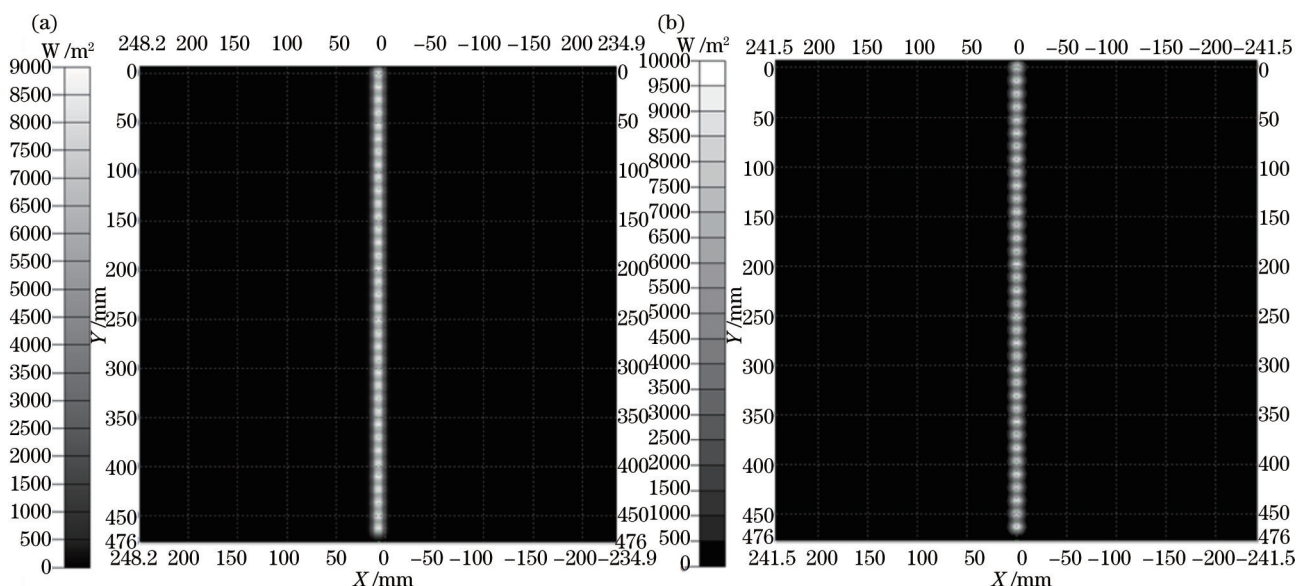


图 10 LGP 入光面辐照度。(a) 含光耦合模块的侧入式背光模组; (b) 传统侧入式背光模组

Fig.10 Irradiance of LGP's incident surface. (a) Side-backlight with optical coupling module; (b) conventional side-backlight

相比于传统侧入式背光模组, 含有光耦合模块的侧入式背光模组导光板的厚度减少了 0.6 mm, 光线利用率提高了 11.22%。同时, 在导光板接收面积减小的情况下, 入光面处辐照度最大值从 9823 W/m²减少到 8717.3 W/m², 平均值从 3168 W/m²增加到 5122 W/m², 说明导光板入光面处暗区减少, 亮区增加, 含有光耦合模块的侧入式背光模组在导光板入光面处光热点现象得到了改善。

4 结 论

基于斯涅尔定律、微分几何法和等光程原理设计并验证了一种用于侧入式液晶显示器背光模組的自由曲面光耦合模块,该模块由浸入式准直透镜与离轴反射器组成,LED光源发光角在 80° 内的光线通过浸入式准直透镜进行准直之后到达离轴反射器的反射面,经其反射最终汇聚到导光板入光面。设计结果表明,光源模型采用 $0.4\text{ mm}\times 0.4\text{ mm}$ 朗伯体发光的LED芯片,并且在导光板厚度为 1.4 mm 时,LED光源的光线利用率达到 96.23% ,相比传统侧入式背光模組结构中导光板厚度为 2 mm 的情况下,光线利用率提高了 11.22% 。该光耦合模块解决了导光板厚度受制于光源发光截面宽度的问题,同时改善了光热点现象,并且加工工艺相比于集成了光学膜片功能的导光板更为简单,易于工业化。

参 考 文 献

- 1 Wang Huan, Shin Moo-keun, Wang Wei. Brightness viewing angle of side-type backlight unit[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(3): 345-349.
王 欢, 辛武根, 王 伟, 等. 侧入式背光源视角特性研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(3): 345-349.
- 2 Sun Zhihui, Chang Jun, Zhao Nan, *et al.*. A novel LED for LCD backlight[J]. Optical Technique, 2007, 33(s1): 282-284.
孙智慧, 常 军, 赵 楠, 等. 一种新的用于直下式LCD背光源的LED[J]. 光学技术, 2007, 33(s1): 282-284.
- 3 He Shengbin. Design of the LED Edge-lit LCD TV backlight module[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(3): 97-100.
何胜斌. 侧光式LED液晶电视背光模組设计原理[J]. 电子科技, 2012, 25(3): 97-100.
- 4 Hua Guangsheng, Bu Zhanchang, Zheng Xiaopan, *et al.*. Design of LED backlight module for low power LCD TV[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Display, 2011, 26(4): 460-463.
华广胜, 布占场, 郑效盼, 等. 低功耗液晶电视LED背光源设计[J]. 液晶与显示, 2011, 26(4): 460-463.
- 5 Di Feng, Guofan Jin, Yingbai Yan, *et al.*. High quality light guide plates that can control the illumination angle based on microprism structures[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(24): 6016-6018.
- 6 Chaocheng Chien, Zhipeng Chen. Fabrication of a novel integrated light guiding plate by micro electro mechanical systems technique for backlight system[C]. SPIE, 2006, 6376: 637600.
- 7 Xu Ping, Huang Yanyan, Zhang Xulin, *et al.*. Study on the integrated light guide plate[J]. Journal of Shenzhen Univesrity Science and Engineering, 2013, 30(4): 428-431.
徐 平, 黄燕燕, 张旭琳, 等. 集成导光板研制[J]. 深圳大学学报(理工版), 2013, 30(4): 428-431.
- 8 Zhenyue Luo, Yuwen Cheng, Shin-Tson Wu. Enhancing LCD optical efficiency with a linearly polarized backlight and polarization-preserving light guide plate[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 45(1): 836-838.
- 9 Zhenyue Luo, Yuwen Cheng, Shin-Tson Wu. Polarization-preserving light guide plate for a linearly polarized backlight[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(3): 208-214.
- 10 Yan Li, Thomas X Wu, Shin-Tson Wu. Design optimization of reflective polarizers for LCD backlight recycling[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(8): 335-340.
- 11 Zhang Yincong. Systematic Design of Novel Multi-Functional Optical Film for the Backlight Module[D]. Taipei: Taipei University of Technology, 2011: 50-82.
张尹聪. 背光模組之新型多功能光学膜片之设计[D]. 台北: 台北科技大学, 2011: 50-82.
- 12 Gu Bao, Sheng Xin, Ye Zhicheng. Research on quantum dot apply to LCD backlight[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 022201.
顾 宝, 盛 欣, 叶志成. 量子点应用于液晶显示背光的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 022201.
- 13 Huang Bingle, Guo Tailiang, Chen Enguo, *et al.*. Study on the optimal scale of the average netted dot density for light guide plate[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0522002.
黄炳乐, 郭太良, 陈恩果, 等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522002.
- 14 Hao Jian, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.*. Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 032302.
郝 剑, 刘 华, 孙 强, 等. LED自由曲面准直透镜的优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 032302.
- 15 Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Feng Rui, *et al.*. Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 0822003.

- 孟祥翔, 刘伟奇, 冯 睿, 等. 双自由曲面LED均匀照明准直透镜设计[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 0822003.
- 16 John Bortz, Narkis Shatz. Relationships between the generalized functional method and other methods of nonimaging optical design[J]. Applied Optics, 2011, 50(10): 1488–1500.
- 17 Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, *et al.*. Research on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting plane[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1008001.
程治明, 曾 平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1008001.
- 18 Bai Ying, Xie Guoqing, Lin Wenshuo, *et al.*. New design of collimating lens based on LED light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 052204.
白 莹, 谢国庆, 林文硕, 等. 基于LED光源的新型准直透镜的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 052204.
- 19 Cheng Ying. Study on Design and Application of Freeform Optics[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 33–34.
程 颖. 光学自由曲面设计方法及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 33–34.

栏目编辑: 张 雁