

高對比前光模組導光板微特徵設計最佳化

楊立威、余志成*

國立高雄科技大學機械與自動化工程系

*Email: jcyu@nkust.edu.tw

摘要

本文研究前光顯示輔助照明導光板的微特徵設計配置與參數最佳化，以提升設計可製造性與照明對比度。前光顯示器具有良好的環境光可閱讀性，但當環境光線不足時，則須結合側光LED導光板作為輔助照明。儘管導光板在液晶顯示器的背光模組中已被廣泛使用，但是用於前光與背光模組導光板的光學設計要求不同。前光模組導光板要求將光源導引至照明閱讀面再反射出光稱為有效照明，而對於未經由媒體反射的直接出光則會造成閱讀者的眩光。如何定義一個客觀的照明對比度，進而找出最佳的特徵設計，對於前光顯示應用是非常重要的課題。考量個人顯示裝置的主要視角多在面板法線的 $\pm 30^\circ$ ，本文定義有效對比度(Effective Contrast, ECR)為 $\pm 30^\circ$ 內有效照明佔視角內總光通量的百分比，做為微特徵設計配置與參數最佳化的目標函數。本文比較不同微結構的特徵參數設計及配置，並以TracePro光追跡軟體模擬不同設計的光學特性，分析凹或凸微結構配置在LGP上側或底表面上的有效對比度表現，並與文獻設計進行比較。雖然下凸圓柱特徵有較佳的單面出光特性，為避免採用外凸特徵可能造成FLU組裝時的損壞，本文採用具有相近有效對比度的內凹圓柱分佈於接近閱讀面的設計，做為替代方案的可行性，並以田口實驗計畫法找出最佳特徵參數。為驗證設計的可行性，本文將所提出的FLU設計使用SU8光阻微影來製作微特徵母模，並以PDMS快速製程翻製原型導光板，初步測試結果顯示所提出的導光板設計具優異的透明度與均齊性，驗證本設計作為前光顯示裝置輔助照明的可行性。

關鍵字：側光式閱讀平板、前光模組、導光板、有效照明指標、PDMS製程

1. 前言

前光顯示器具有良好的環境光可閱讀性，用於黑暗環境可結合側光LED導光板作為輔助照明，而前光模組的輔助導光板也可獨立作為夜間個人閱讀的照明使用，在黑夜環境光線不足或在有限的空間如車上、飛機艙中，可直接置於閱讀書面上，柔和的前光設計只會照明閱讀面，可在不影響他人的情況下進行閱讀。

導光板在液晶顯示器中已被廣泛作為背光源，但是用於前光與背光模組導光板的光學設計要求不同。在傳統在液晶平面顯示器上的導光板，主要目的

在提供足夠的背光量，穿過液晶螢幕顯示畫面。而前光模組的導光板則首重在導引光源向下照明閱讀媒體面，再反射至閱讀者眼中如圖 1所示，經導光板折射的LED光源，一是光直接在平板中折射後直接出光的雜散光(A)，另一則是經由平板折射後向下照明於圖像上，再透過平板折射出光的反射照明光(B)，雜散光不僅無助於閱讀照明，且易造成閱讀者的眩光，降低圖像的對比，但探討前光模組的導光板設計卻相當有限，如何提供一個高照明對比的導光板設計，將會是前光顯示應用的重要課題。

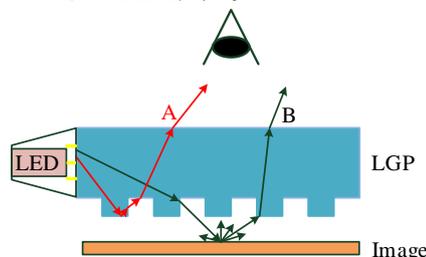


圖 1 前光模組導光板輔助照明的出光方式

前光模組導光板希望具有良好的單側出光特性，以降低雜散光的比例。Bita等[1]提出以不透明半圓球的微特徵分佈在出光面具有較佳的有效照明，但文章中並未分析特徵參數設計。Tengler等[2]建議以直徑 $50\mu\text{m}$ 、側邊角 90° 的下凸圓柱結構，其分佈節距大於3:1、深寬比不小於1:1。但經由初步分析，文獻所提出的設計與分布，其照度分佈相當的不均勻且集中於光源處(圖 2(a))，與將來照度均齊化後的光學特性可能會有影響的差異，造成參數選擇的誤判。本文先以有效光通量佔觀察面的總光通量的比值作為總對比率(Total Contrast Ratio, TCR)，初步變動節距3:1等間距的特徵高寬比(H/D)，發現特徵高寬比對TCR有明顯的影響，而在高寬比為1:1具有較佳的TCR，高寬比1.5時TCR反而下降，與文獻中關於深寬比的建議並不相符。另一方面，我們以佈點特徵分布將照度初步均齊化之後，再分析不同高寬比特徵設計的TCR發現，特徵高寬比對TCR並沒有明顯的影響如圖 3。因最終出光均齊化為設計的需求之一，為避免參數選擇的誤判，應藉由初步照度均齊化後的特徵分佈來進行導光特徵參數的設計。另外，高H/D容易造成製造上的困難，是否可藉由其他參數設計來提高TCR，也是特徵設計的重點。

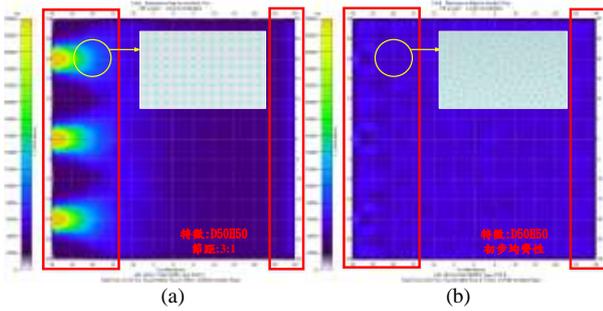


圖 2 輻照圖比較(a)特徵分布節距 3:1 (b)初步均齊化後的特徵分布

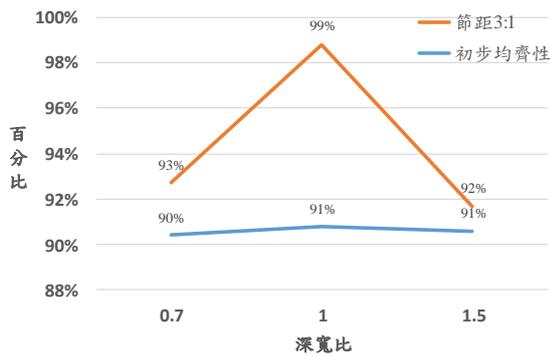


圖 3 深寬比分析圖

2. 前光導光板結構設計

本文分析四種微特徵包括圓柱、金字塔、正方形、圓點，在不同導光板設計配置的光學表現：凸特徵在出光面(XF)、凸特徵在圖像面(XB)、凹特徵在出光面(VF)、凹特徵在圖像面(VB)如圖 4所示。初步特徵尺寸將分別為(1)高度 $49\mu\text{m}$ 、直徑 $70\mu\text{m}$ 的圓柱特徵，(2)經由非等向化學蝕刻 $<100>$ 矽晶圓所產出的金字塔角錐特徵 $70\times 70\times 49(\mu\text{m})$ ，(3)正方形結構 $70\times 70\times 49(\mu\text{m})$ ，(4)以UV滾壓的方式的製作直徑 $70\mu\text{m}$ 、高度 $35\mu\text{m}$ 的圓點特徵。並以Tracepro在特徵以初步均齊性化分佈後，分析不同的配置的光強度分佈，以選擇最佳特徵與凹凸特徵設計配置。

2.1 系統配置

在系統建模方面，導光板材料設定為PMMA，折射係數1.49，尺寸為 $60\text{mm}\times 60\text{mm}\times 1\text{mm}$ ，導光板四周設定為白反射，於導光板上方 0.1mm 處設置觀察面，並在導光板下方，設定漫反射面以模擬閱讀紙張。LED使用3顆8(lm)白光LED作為光源[3]。

以圓柱特徵為例，其不同特徵配置的光強分佈如圖 5。凸特徵在圖像面的配置(XB)，具有較佳的軸向光強度。而其他的配置方式，主光強都有明顯偏離觀察面垂直方向的現象，可能造成照明效率不佳的問題，這項觀察與文獻[4]所採用的設計配置相同，而在方柱特徵設計上也有類似的現象。然而在金字塔特徵[5]的分析中如圖 6，可看出XB及VB皆具有軸向集光之效果，其他的特徵配置，也會有主光強偏角的問題。而圓點特徵的光強分佈特性與金字塔特徵的相仿。

表 1比較此四種特徵及配置的光學特性分析，在分析中如中會發現不管哪一個特徵，在下凸(XB)都會明顯較高的對比度，次之是下凹(VB)，後續將探討如何客觀的量化指標。

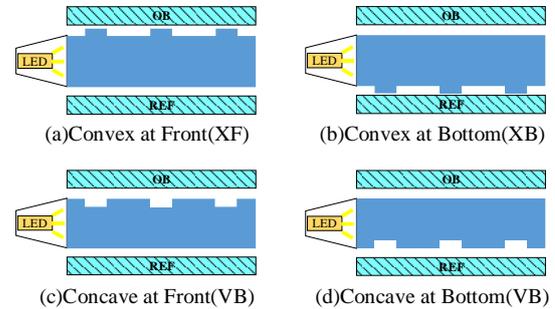


圖 4 導光板上微特徵的配置設計

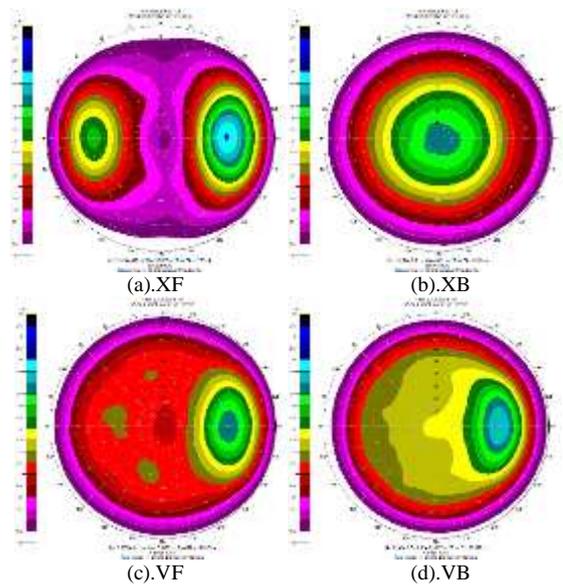


圖 5 圓柱特徵在不同配置下之光強分佈

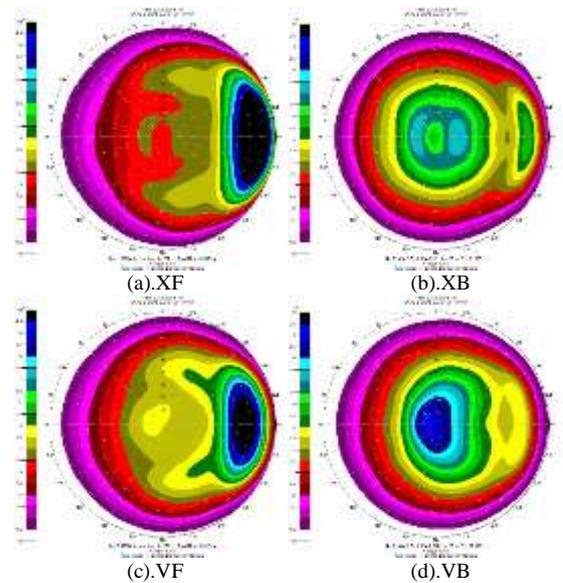


圖 6 金字塔特徵在不同配置下之光強分佈

表 1 不同特徵在各種配置下的總對比率

圓柱				金字塔			
L*	Total emittance flux**	Image flux**	TCR	L*	Total emittance flux**	Image flux**	TCR
XF	15.73	1.76	11%	XF	21.86	7.54	34%
XB	20.08	17.35	86%	XB	21.87	14.17	65%
VF	18.25	7.37	40%	VF	21.94	10.97	50%
VB	20.83	12.23	59%	VB	22.09	10.90	49%
方柱				圓點			
XF	20.34	1.74	9%	XF	18.76	2.02	11%
XB	20.61	18.82	91%	XB	19.13	17.16	90%
VF	20.24	7.63	38%	VF	21.16	10.46	49%
VB	20.53	12.87	63%	VB	21.39	10.73	50%

*Layout notation, X: Convex, V: Concave, F: Front, B: Bottom
**Unit: lumen

3. 有效照明對比指標

因此在前光導光板的目的是照明其下的媒體圖像(Media)只有經由平板折射後向下照明於圖像上，再透過平板折射出的光才是有效圖像照明光(Image flux)，而直接在平板中折射後直接出光的光線則為雜散光(Noise flux)，本文為了瞭解前光導光板的照明效率，將觀察者的出光解析出兩者的分量。

以下凹圓柱微特徵配置在向下的圖像面為例，由當圖像面設定為漫反射時，其觀察面將同時接收到圖像光與雜散光如圖 7(a)。而圖 7(b)為雜散光的光強分布，雜散光並無助於前光模組的照明。由導光板向下折射出光，未接觸到底部的圖像面前的光強分布呈現如圖 7(c)，而經圖像面反射後的光強分布，因圖像面設定為漫反射的關係，變成朗伯型如圖 7(d)。雖然雜散光無助於照明，但由圖 7 (b)的雜散光強分析可以了解到主要光強峰值偏離法線方向於55°，而遠離視角的雜散光並不見得會造成眩光問題。因此本文將提出一較客觀的對比率指標，作為設計選擇的基準。

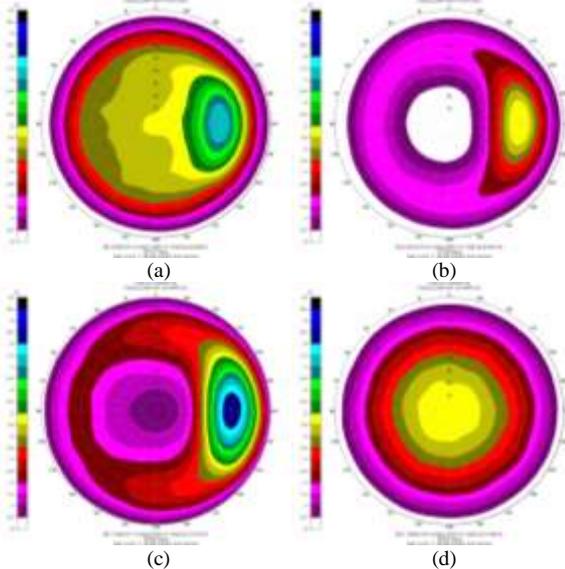


圖 7 圓柱下凹(VB)微特徵配置在向下面(a)有效光及雜散光的綜合強光分(b)雜散光強分佈(c)反射前的圖像面(d)反射後的圖像面強度分佈

大部分文獻直接比較有效圖像照明光通量與雜散光的光通量，然而考量個人顯示裝置使用者的視角多為軸向±30°內如圖 8[6]，若是雜散光不在視角內，並不會直接影響閱讀的對比，視角內的有效照明(Effective Ray)才是考量重點。因此本計畫定義有效照明對比指標(Effective Contrast Ratio, ECR)為±30°視角內的圖像光(Image flux)占有有效光包括圖像光(Image flux)與雜散光(Noise flux)之比值如(1)，ECR比例越高代表雜散光的影響越低，導光照明的效果也越好，藉此找出最佳的特徵設計與配置，進行後續參數設計與最佳化分佈。

$$Effective\ Contrast\ Ratio(ECR) = \frac{Image\ flux}{Image\ flux + Noise\ flux} \quad (1)$$

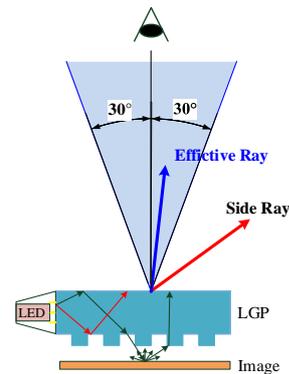


圖 8 視角內的有效光與側雜光

經過分析圓柱、金字塔、方柱、圓點四種特徵在不同配置下的照明表現如表 2。圓柱型中以XB系統設計之有效對比度約98%表現最佳，且其有效照明光通量也是最高。但在製作導光板時會因結構為下凸導致組裝時，特徵容易被壓扁及磨損，下凹的VB結構面 ECR=93%表現次之，有效照明光通量也比XB的設計低了30%，但具有製造上的優點。但方柱特徵XB為96%，具有相當高的有效對比度，且有效照明光通量也比圓柱XB高了4%。

表 2 微特徵與系統設置之有效照明對比分析

L*	Effective flux**	Image flux*	ECR	L*	Effective flux**	Image flux*	ECR
圓柱				金字塔			
XF	1.48	0.50	34%	XF	2.92	2.34	80%
XB	5.25	5.13	98%	XB	5.69	3.77	66%
VF	2.69	2.09	78%	VF	3.64	3.29	90%
VB	3.79	3.54	93%	VB	6.45	2.92	45%
方柱				圓點			
XF	1.34	0.52	38%	XF	0.90	0.63	71%
XB	5.64	5.39	96%	XB	4.95	4.80	97%
VF	2.71	2.15	79%	VF	3.48	2.96	85%
VB	4.11	3.64	89%	VB	5.46	2.99	55%

*Layout, X: Convex, V: Concave, F: Front, B: Bottom.

**Luminous flux within±30°view angle, Unit: lumen.

3.1 田口方法進行方柱(XB)特徵參數最佳化

結構分析中方柱(XB)型系統設計於導光平板為選擇，以特徵參數設計來進行ECR的最佳化，本文採用田口實驗設計法(Taguchi design of experiment) [7]進行特徵參數的最佳化，此篇我將採用L9(3³)直交表，

三個控制因子分別為寬度W、深寬比H/W、側邊角 θ° (圖 9)，而寬度三水準分別為 $50\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ ，考量高深寬比可能造成脫膜的困難，因此深寬比H/W三水準分別設為0.3、0.5、0.7，側邊角分別為 70° 、 80° 、 90° ，並ECR進行實驗分析結果如表 3。接下來L9直交表作為參數設計的結果製作因子效果圖如圖 10。發現影響ECR最大因子是H/W比，且較大的深寬比的確會提升對比，其次是側壁角度 θ° ，次之是寬度W，最佳參數設計分別為 $W=70\mu\text{m}$ 、 $H/W=0.7$ 及 $\theta=80^\circ$ ，其ECR為97.1%，如表 3，但從直交比實驗樣本看來，第六組設計 $W=60\mu\text{m}$ 、 $H/W=0.7$ 及 $\theta=80^\circ$ ，具稍高的ECR為97.5%，但差異尚在誤差範圍內。

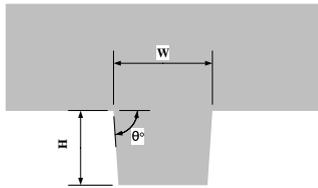


圖 9 方柱(XB)下凸特徵參數示意圖

表 3 方柱(XB)L9 實驗計畫

L9	W	H/W	θ°	Effective flux* (lumen)	Image flux* (lumen)	ECR(%)
1	50	0.3	70	4.72	3.94	83.6
2	50	0.5	80	4.91	4.75	96.7
3	50	0.7	90	5.37	5.06	94.3
4	60	0.3	90	4.93	4.43	89.9
5	60	0.5	70	4.88	4.55	93.2
6	60	0.7	80	5.15	5.02	97.5
7	70	0.3	80	4.85	4.57	94.3
8	70	0.5	90	5.66	5.28	93.2
9	70	0.7	70	4.60	4.44	96.6
OPT	70	0.7	80	5.09	4.94	97.1

*Luminous flux within view angle $\pm 30^\circ$

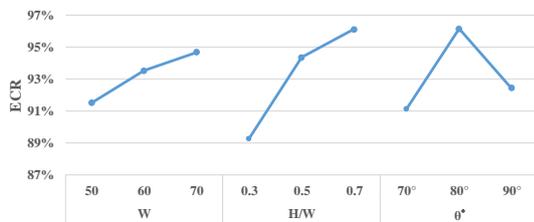


圖 10 方柱 XB 樣本 ECR 因子效果圖

3.2 田口方法進行圓柱(XB、VB)特徵參數最佳化

我們以類似方柱的實驗計畫分析圓柱(XB、VB)型特徵參數設計來進行ECR的最佳化，直交表仍選用L9(3³)、三個控制因子分別為直徑D、深寬比H/D、側邊角 θ° ，如圖 11(a、b)，相同的水準 $50\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ ，深寬比H/D分別為0.3、0.5、0.7，側邊角分別為 70° 、 80° 、 90° ，並ECR來做目標函數進行實驗分析如(表 4、表 5)。接下來以圓柱(XB)L9直交表的結果製作因子效果圖如圖 12，發現影響ECR最大因子是側邊角 θ° ，其次是H/D比，次之是直徑D，最佳參數設計分別為 $D=70\mu\text{m}$ 、 $H/D=0.7$ 及 $\theta=80^\circ$ 。其ECR為97.7%如表 4。同理將製作因子效果圖應用於圓柱(VB)、其因子效果影響ECR的排序仍是側邊角 θ° ，其次是H/D

比，次之是直徑D，最佳參數設計分別為 $D=70\mu\text{m}$ 、 $H/D=0.3$ 、 $\theta=80^\circ$ 、 $ECR=94.0\%$ ，如表 5，下一步在進行特徵最佳化的比較。

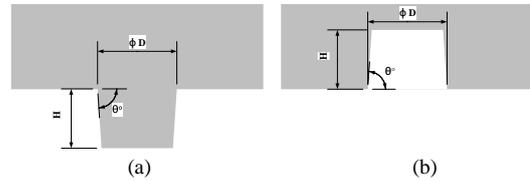


圖 11 圓柱特徵參數示意圖(a)XB 下凸(b)VB 下凹

表 4 圓柱(XB)L9 實驗計畫

L9	D	H/D	θ°	Effective flux* (lumen)	Image flux* (lumen)	ECR(%)
1	50	0.3	70	4.53	3.91	86.1
2	50	0.5	80	4.84	4.63	95.8
3	50	0.7	90	4.91	4.56	92.9
4	60	0.3	90	4.67	4.14	88.6
5	60	0.5	70	5.22	4.62	88.8
6	60	0.7	80	5.19	5.06	97.5
7	70	0.3	80	4.76	4.51	94.7
8	70	0.5	90	5.43	5.01	92.3
9	70	0.7	70	5.18	4.76	91.8
OPT	70	0.7	80	5.26	5.13	97.7

*Luminous flux within view angle $\pm 30^\circ$

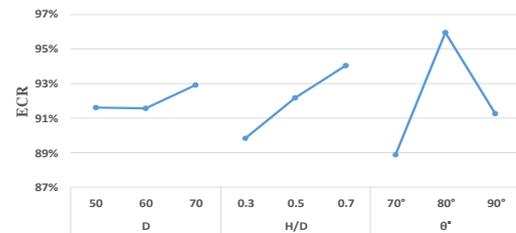


圖 12 圓柱XB設計ECR因子效果圖

表 5 圓柱(VB)L9 實驗計畫

L9	D	H/D	θ°	Effective flux* (lumen)	Image flux* (lumen)	ECR(%)
1	50	0.3	70	3.93	3.09	78.6
2	50	0.5	80	3.63	3.37	92.8
3	50	0.7	90	3.84	3.32	86.5
4	60	0.3	90	3.93	3.47	88.2
5	60	0.5	70	4.12	3.21	78.0
6	60	0.7	80	3.75	3.49	93.1
7	70	0.3	80	3.77	3.54	94.0
8	70	0.5	90	4.06	3.59	88.6
9	70	0.7	70	4.21	3.21	75.0
OPT	70	0.3	80	3.77	3.54	94.0

*Luminous flux within view angle $\pm 30^\circ$

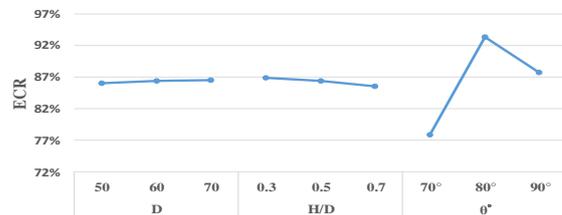


圖 13 圓柱 VB 設計 ECR 因子效果圖

3.3 特徵參數最佳化比較

在特徵參數最佳化的分析比較中，分析三個比較中會發現圓柱(XB)的有效對比度ECR是最高，其次是方柱(XB)結果與圓柱(XB)相近，而圓柱(VB)的ECR則與文獻中的參數設計結果相仿。在 $D70$ 、 $H49$ 、 $\theta 80^\circ$

的圓柱(XB)與文獻中所使用D50、H50、 $\theta=90^\circ$ 相比ECR提高3.7%，而在 $\pm 30^\circ$ 視角內的圖像光通量提高了約12%，若是考慮D70、H21、 $\theta=80^\circ$ 的圓柱(VB)在ECR也會有94%的表現，但在圖像光通量跟最佳圓柱XB設計相比會有30%的下降。如對比度要高，圓柱(XB)設計是最佳的選擇，但考慮組裝、特徵的磨損，則替代方案為圓柱(VB)的設計，其對比度也是不錯(表 6)，因此在下一段中將利用圓柱(VB)進行均齊化的最佳化與原型製作來驗證設計的可行性。

表 6 各特徵參數最佳設計

最佳參數設計	D	H/D	θ°	Effective flux*	Image flux*	ECR(%)
文獻(XB)	50	1	90	4.87	4.58	94.0
方柱(XB)	70	0.7	80	5.09	4.94	97.1
圓柱(XB)	70	0.7	80	5.26	5.13	97.7
圓柱(VB)	70	0.3	80	3.77	3.54	94.0

*Luminous flux within View Angle $\pm 30^\circ$, Unit: lumen.

4. 照度輝度均齊性最佳化

4.1 輝度均齊化

我們將以圓柱下凹(VB)經過參數最佳化的特徵設計，尺寸為D=70 μ m、H/D=0.3及 $\theta=80^\circ$ ，利用Tracepro內建的輝度均齊性優化模組Photorealistic Rendering Texture Optimizer[8]，來進行特徵分佈，而輝度是以目視手持顯示器所看到的亮度表現，因此在LGP前方400mm設為視點，並且提出輝度均齊性的標準，以除以整體導光板平均輝度，稱為變異係數作為系統的優化的目標函數條件如式(2)。

$$\text{Coefficient of Variation}(C.V) = \frac{\text{Stdev}}{\text{Average}} \quad (2)$$

分析過程首先在初始網點分佈為均勻棋盤分佈，將整面導光平板區分為15 \times 15區塊，程式將自動迭代調整區塊內的網點疏密分佈，來達到輝度均齊性最佳。優化後得C.V為0.01、平均輝度272(nit)。

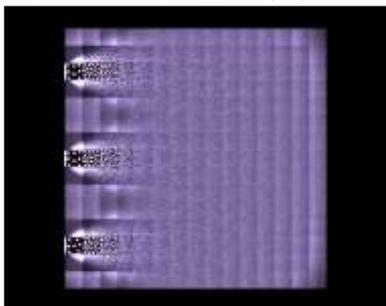


圖 14 圓柱(VB)特徵分佈輝度均齊性優化結果

5. 閱讀板的原型

為了證明該設計的可行性，我們以圓柱最佳參數設計D=70 μ m、H=21 μ m及 $\theta=80^\circ$ 製作SU8模仁，並以翻製PDMS來製作微結構，其流程製作如圖 15。製作方式在4吋Si晶圓上以SU8-GM1070以微影方式製程來製作微結構，調整旋塗參數以得到21 μ m的SU8膜厚，並使用共軛焦形狀量測雷射顯微鏡(KEYENCE-V K-X100)進行直徑與高度的量測，其直徑為71 μ m、

高度20 μ m如圖 16(a)。

完成SU8模仁製作後，再灌入由184A、B劑10:1混合的PDMS溶液[9]，再以150 $^\circ$ 硬烤1小時置於室溫下冷卻，即可剝離取出PDMS導光板，經由共軛焦顯微鏡量測(圖 16(b))PDMS初步原型D=70.9 μ m、H19.8 μ m、 $\theta=83.5^\circ$ ，特徵直徑與高度圓柱設計非常接近，而側壁角度80 $^\circ$ 差異稍大，未來可藉由微影製程的參數調整來進行修正。

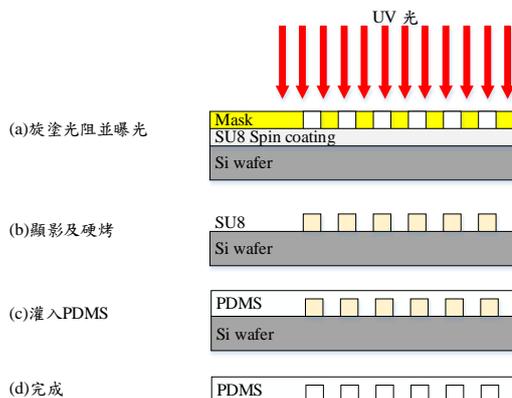


圖 15 圓柱(VB)微結構製作流程圖

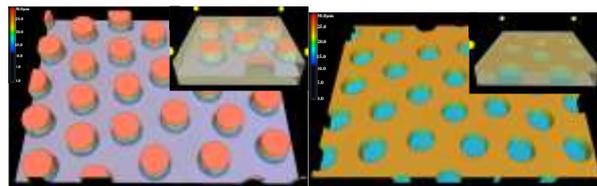


圖 16 共軛焦掃描式顯微鏡(a)SU8 圓柱特徵(b)翻模PDMS

我們使用3D列印機列印出一長方形中空的形狀將光源與電路板裝進長方形構造內，如圖 17。將放入有字面的照片，圖 18(b)為文字面上方置入LGP的觀察結果。對比結果顯示，並無太大差異，且證明導光板內良好的透明度，圖 18(c)是在黑暗環境中打開LED經過導光板照明文字樣本的照片。



圖 17 導光板的框架設計



圖 18 前光模組原型測試(a)未加入導光板(b)加入導光板(c)加入導光板並開啟 LEDs

6. 結論

本文探討了LED側光式照明平板微特徵和系統設置，在探討文獻所使用了圓柱下凸(XB)以固定間距分佈，建議高深寬比，而此分析光源會集中於光源一側，會造成參數選擇上的誤判。因此我們提出以初步照度均齊化分佈的方式，來進行特徵尺寸的分析，經由分析結果側邊角度為影響最大，雖然高深寬比有助於光型出光，但在製造上會帶來困難，並提出以圓柱下凹(VB)作為替代，不易製造的高深寬比圓柱下凸(XB)。

7. 參考文獻

1. Bitá, I., Mienko, M., Narayanan, K., Wang, L., Li, K., Li, Z., Rao, R., Patel, S., Chan, C., Gruhlke, R., Ganti, S., Gusev, E., "High Contrast Edgelit Frontlight Solution for Reflective Displays." SID Symposium Digest of Technical Papers. Vol.43. No.1, pp. 905-907, 2012.
2. Tengler, F.-C., Jakubowsky, M., and Neyer, A., "High transparent light guiding plate for single-sided light emission," Microelectronic Engineering, Vol. 119, pp. 174-177, 2014.
3. Everlight-LED Catalog, 2016, http://ultran.ru/sites/default/files/2016_component_catalogue_s.pdf
4. Lee, J.-H., Yeon, J., Kim, K.-D., Yoon, J.-B., "Mass-Producibile Polydimethylsiloxane (PDMS) Frontlight Unit (FLU) for Reflective Displays," Journal of display technology, Vol.7.No.9, pp. 526-531, 2011.
5. 余志成、張簡少棠，具軸向集光效果之整合式導光板，中華民國專利I 429971 (2014)，美國專利US 8,262,273 B2, (2013)。
6. 人體工學視角範圍，2015, <https://shop.healthdesign.com/Posture-and-your-eyes.aspx>
7. 蘇朝墩，品質工程:線外方法與應用，前程文化，台灣，2013。
8. Tracepro Texture Optimizer II Webinar, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=H5aztVlhhx4>
9. PDMS混合說明，2015, http://www.silmore.com.tw/products_detail.php?CID=13&PID=96&sn=567&lang=tw

Optimization of the Microfeatures Design for High Contrast Light Guide Plate of Front Light Unit

Li-Wei Yang, Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and Automation Engineering

National Kaohsiung University of Science and Technology

*Email: jcyu@nkust.edu.tw

Abstract

This study addresses the feature design configuration and parameter optimization of the LED edge-lit light guide plate (LGP) of front light unit panel for high manufacturability and illuminating contrast. Front light displays have good readability in bright ambient environment. A LED light guide is often applied as auxiliary lighting in dark environment such as bedroom and aircraft cabin. Front light unit (FLU) only illuminates the reading surface softly without disturbing neighboring persons. Although the light guide plate has been widely used in the backlight module (BLM) of a liquid crystal display (LCD), the optical design for FLU is different from the design requirements for BLM light guides. The function of light guide plate is to distribute the edge-light source into a uniform surface light. Part of the light source directed by the FLU will illuminate the reading surface before refracting out of LGP, which is called the image flux. The light refracted out of LGP directly without reflecting from the media will cause the glare of the reader. This study defines the effective contrast ratio (ECR) as the percentage of image illuminating flux in the total luminous flux within the $\pm 30^\circ$ viewing angle. ECR is used as an objective function for optimal design of the microfeatures configuration in FLU. The literature about the design of the LGP of FLU is very limited. A good LGP design with a high illuminating contrast ratio is an important issue in front light displays. This study compares the feature configuration and parameter design of different microstructures which could be concave or convex deployed on the emitting or the bottom surface of LGP for a better ECR. TracePro is used to simulate the optical performance of various designs. Most literatures adopted convex features arranged on the bottom surface to provide single-sided light emission, which is consistent with our analysis result. However, convex features are liable to assembly damage. The study suggests the design of concave cylinder distributed on the bottom surface as an alternative which also provides a comparable ECR. Taguchi method is applied to obtain the parameter design with optimal ECR. To verify the feasibility of the design, this study applies PDMS molding process from a SU8 master to fabricate a prototype FLU for the proposed design. The preliminary tests demonstrates excellent transparency and uniform illumination of the light guide plate, which verifies the feasibility as an auxiliary lighting of front light displays.

Keywords: Edge-lit reading panel, Front light unit, LGP, Effective contrast ratio, luminance uniformity