

## 側光式導光照明平板之系統設計與微特徵光學分析

張喬凱、余志成\*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

\*通訊作者: jcyu@nkfust.edu.tw

### 摘要

本文分析側光式LED照明平板上的微特徵光學設計，利用TracePro光學模擬眼睛觀察面的出光光型，判別出適用於照明平板的系統配置與微特徵之選擇。由光學分析過程中，導光平板大致分為兩種出光方式，分別為光源經LGP直接出光，此型將會造成閱讀者的眩光；另一類型為光源經LGP微特徵折射至紙張面後反射出光，此類具有有效照明於紙張面，即為有效照明光，由兩種類型之間關係定義出可量化的出光效率指標，利用此指標選擇出圓柱型與角錐型微特徵較佳的系統設計，分析結果以凸出的微特徵結構及特徵面朝下的系統配置具有較佳的出光效率。此外，在閱讀平板的相關文獻中，大多並沒有提出判別照明後的明暗對比度，故本研究提出一量化明暗解析的方法，並利用此方法比較出圓柱型微特徵較適用於導光平板，再實驗計畫找出圓柱型特徵參數最佳化分析，最後由最佳化參數的圓柱型參數與文獻進行分析判定。  
關鍵字：側光式照明平板、TracePro、有效照明指標、照明對比度。

### 1. 前言

黑夜時環境光線不足且在有限的空間如車上、飛機艙中，在不影響他人的情況下閱讀書籍，需要具輕巧薄型可攜便的閱讀燈加以輔助。照明書籍用的閱讀燈源可概分為直下式與側光式兩類照明，如圖1(a)。直下式是將LED晶粒配置在燈罩的後方當作發光源，使光源可以經由燈罩改變出光光型以傳達至被照物上；側光式照明是以導光板概念加以呈現，將LED晶粒配置在平板的邊緣，再以平板上的微結構引導光的散射輸送到平板整個區域，進而作為照明使用。由於側光式照明僅需較少的LED以節省成本，以及可提供較輕薄應用的空間設計。

導光板常作為液晶平面顯示器的光源，由導光板、擴散膜與稜鏡片組成如圖2(a)所示，稱為背光模組(Back light module, BLM)。背光模組上方設置液晶模組控制顯示圖形。背光模組的擴散膜與稜鏡片主要在改變光強角度分佈，提升軸向的光強度，以提升個人顯示器的輝度。Yu and Hsu[3]利用微砂蝕刻製作出截頂金字塔的特徵結構作為BLM導光板微結構，並將截頂角錐旋轉 $45^\circ$ ，並在光源入口出增設稜鏡設計如圖2(b)[4]。此方法不需稜鏡膜，使單一導光板即具有

軸向集光的功能，可降低背光模組的厚度與提升出光效率。

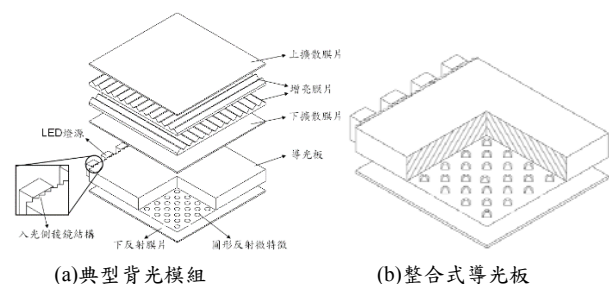
另一種導光板的照明應用稱為前光模組(Front Light Unit, FLU)，液晶圖形控制裝置是置放於導光板之下，或是應用在前述閱讀照明平板如圖1置放在書本上，由環境光或平板的側入光源，透過反射面的圖形後出光。一般市售的導光照明閱讀板多採楔形平板設計如圖1(b)，以降低光源端的平板出光，使光線往後傳遞，平板上並無微特徵設計。但導光平板照明效果多有四周漏光的形況產生，造成四周較亮而中間閱讀區域反而較暗，並無將光源有效投射於閱讀紙上。

導光板依前光模組與背光模組的光學設計，其特徵設計並不相同，但相關文獻討論並不多見。導光平板的出光依其光跡可分為兩種(圖3)：(A)端面入射光在平板中與微特徵反射與折射後，直接出光至觀察者，(B)另一則是光經由平板特徵向下折射後，於底部反射後再出導光板。對於LCD的背光模組而言，因為液晶模組是置於背光模組之上，這兩類的出光都會貢獻在液晶圖形的顯示照明上。但若是應用於前光模組(Front Light Unit, FLU)或閱讀板的照明上，(B)類的出光才有照明閱讀面的作用，反之(A)類的直接出光並未照明紙面，反而造成閱讀者的眩光，降低閱讀面的清晰度。



(a)側光式閱讀照明板[7] (b)楔形平板出光設計[8]

圖1 側光式照明平板



(a)典型背光模組 (b)整合式導光板

圖2 典型背光模組與整合式導光板示意圖[4]

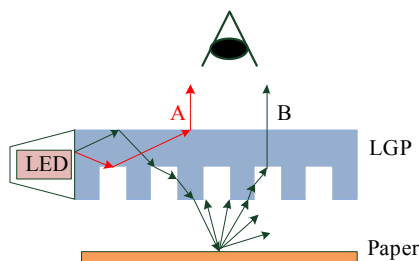


圖 3 導光閱讀平板的出光方式

單純楔形平板的閱讀板設計照明效率不佳，Jakubowsky等[1]在朝觀察者的 $50 \times 50 \times 4$  (mm)閱讀照明平板上設置圓柱特徵特徵，利用PDMS(Polydimethylsiloxane)製作並探討 $50 \mu\text{m}$ 與 $100 \mu\text{m}$ 不同直徑的圓柱微結構的照明效果，模擬結果該導光板觀測角度具有偏光之情形。Lee等[2]提出特定 $55^\circ$ 倒圓錐型微特徵適用於背光模組上，但用於前光照明模組其微結構以 $80^\circ$ 具有較佳的出光射角，再用雙側入光模式進行照明，但特定角度的圓錐型結構製作亦不易控制。有別於圓柱型的微特徵，Yu and Hsu[3]利用截頂角錐特徵結構作為導光板微結構，在可有效提升背光模組的效率，但無應用在閱讀平板上的分析。

在光學設計中，並無過多的文獻探討照明平板的光學模擬與設計，以及缺乏直接出光(A)與照明反射光(B)之間量化的基準。故此，本文將利用光學分析軟體探討圓柱型與旋轉 $45^\circ$ 角錐型的微特徵光型分佈，比較出直接出光(A)與照明反射光(B)之間量化依據，並找出適用於導光照明平板的微特徵與系統配置，並於照明對比上進一步量化出明暗解析的判定並與Jakubowsky [1]相互比較。

## 2. 導光板之微結構幾何形狀設計

在系統建模方面，首先建立一導光板，材料設定為PDMS，折射係數1.43，尺寸為 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。導光板四周設定為白反射。於導光板上 $1 \text{ mm}$ 處設置一觀察面，並在導光板下方 $0.1 \text{ mm}$ 處設定一漫反射面以模擬閱讀紙張。特徵採用圓柱形(C)與截頂角錐(P)兩種。光源採用3顆白光LED，為OSRAM公司所製造出產，型號為OSRAM LED LW T673。並用TracePro模擬各LED光線數設定為最小1000最大400000條光線數進行模擬。

### 2.1. 照明平板系統配置

為確定微特徵結構以及LGP設置方式，利用全因子實驗計畫(表1)配置模擬系統。分析圓柱與角錐特徵，在微特徵凸出(convex)或凹下(concave)，結構設置平面為front或bottom組合下的照明效率，其示意如圖4分別表示。本文亦比較圓柱及角錐微特徵，圓柱結構尺寸為直徑 $90 \mu\text{m}$ 、高度 $50 \mu\text{m}$ ；截頂角錐結構尺寸為 $90 \times 90 \times H50(\mu\text{m})$ ，分析過程首先將初始網點分佈為均勻差排分佈，再以光學分析軟體TracePro

做初步網點優化，將整面導光平板區分為 $10 \times 10$  pixel，優化方式則採用微特徵單位pixel進行網點疏密分布達到最佳化分佈結果，並由優化後的閱讀平板其觀察面上皆有良好的出光均勻性。

表 1 實驗計畫配置模擬設計

$L_4$	Feature	Surface
1	convex	front
2	convex	bottom
3	concave	front
4	concave	bottom

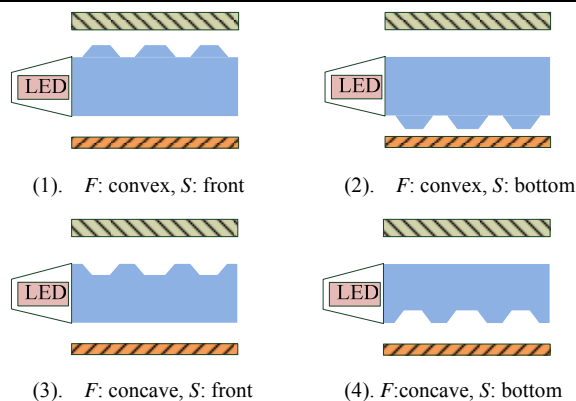
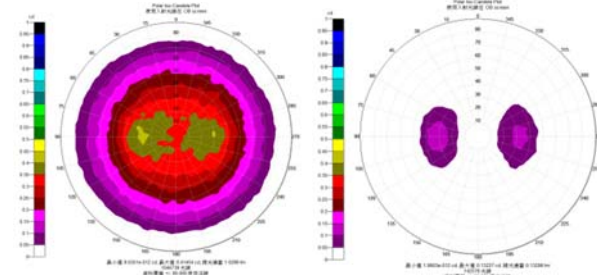


圖 4 LGP 配置設計示意圖

### 2.2. 微特徵系統設計

為了解導光閱讀平板出光方式，本文於底部紙張面分別定義漫反射及吸收面之兩者模擬，以Convex圓柱特徵配置於bottom面(C2)系統配置為例，於底部紙張面兩者設定不同模擬結果如圖五，由圖中看出兩者光型的不同係因紙張面設定為漫反射時，因光線經由底部反射於LGP後再次反射於底部之2次反射或多次反射之結果，反之，若紙張面設定為全吸收，則觀察面所得到的光型僅為透過LGP後直接出光，此類型光並無照明於底部，因此在導光照明平板設計中，此類型的光可稱為無效照明光，亦稱失效光或眩光。



(a) C2 觀察面(紙面漫反射) (b) C2 觀察面(紙面全吸收)

圖 5 出光光型於觀察面之底部紙張面設定相異

圓柱型特徵系統配置之光型分佈圖中(圖 6)，對於表1參數組合C1、C3及C4的光型皆有偏光的光型，相較於C2具有軸向出光之效果，雖然C2光強度較弱，但考慮照明平板的使用環境大多為昏暗環境的閱讀



照明輔助，因此僅需些微的光源便可提供適度的照明，此外若光強不足則可增加LED數以提升照明光強。

截頂角錐特徵(P)系統配置之光型分佈圖中(圖7)，由圖看出如表1參數組合下的P2及P4皆具有光集中之效果，反之其他的系統配置皆有光線偏角的分佈。為進一步提高P2及P4的軸向集光效果，在P2及P4光源入光處增加90°稜鏡之特徵，其出光分佈圖如圖8，其光形顯示增加稜鏡設計可有效提升軸向出光之光強度。

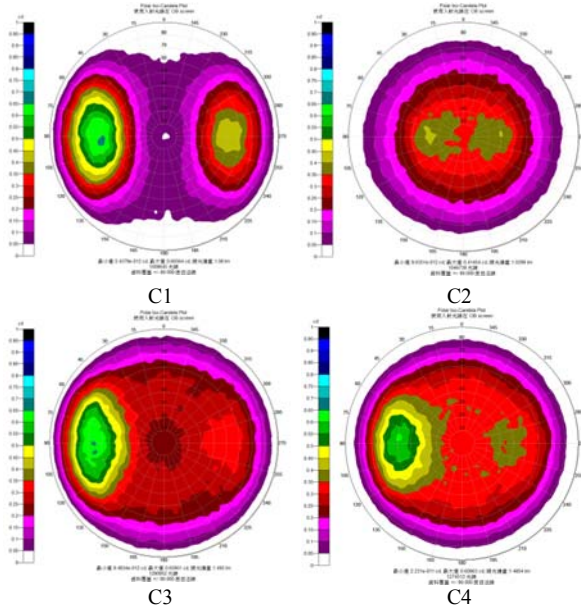


圖 6 圓柱型微結構於觀察面之出光光型

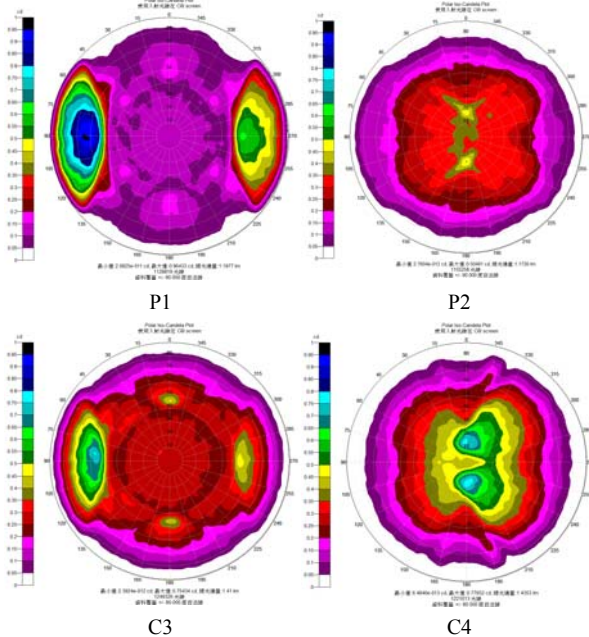


圖 7 45° 截頂角錐微結構於觀察面之出光光型

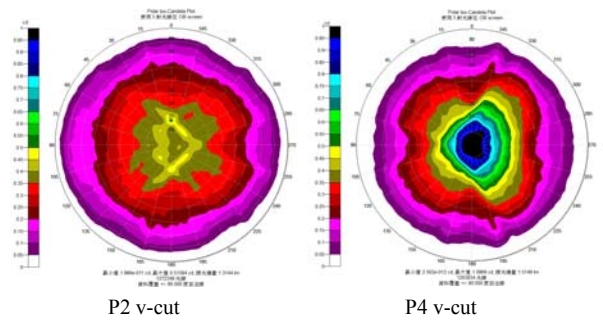


圖 8 複合式微結構觀察面之出光光型

綜觀光型分布結果，圓柱型系統特徵以C2型表現具有光集中效果。另一方面，由P2 v-cut及P4v-cut增加稜鏡特徵確實可增強光型中央集光之效果，尤以P4v-cut型具有良好的光強度，然而對於應用於閱讀平板照明上，平板的出光是否皆為有效照明出光，將須進一步探討有效照明之光學量化分析。

### 2.3. 微特徵與系統配置之選擇

本文利用各系統配置經優化後的網點分佈模擬出底部紙張面不同設定，並比較兩者觀察面的光照圖，以C2設計為例，其結果如圖9。利用兩者出光效率之差視為照明平板的照明有效光(OB-OBAB)，再以照明有效光與整體出光(OB)之比值為照明平板的有效照明指標(Index)，如式(1)。

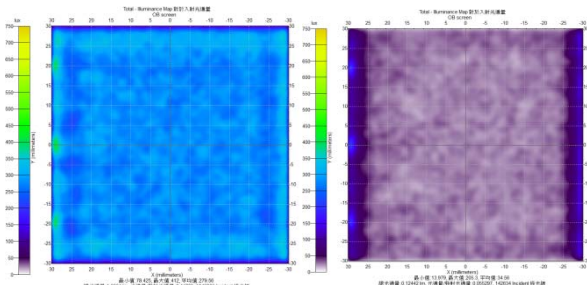
$$\text{Index} = (\text{OB}-\text{OBAB})/\text{OB} \quad (1)$$

利用上述方法並分析各各系統配置，經由照明可靠度分析計算結果如表2。圓柱型中以C2系統設計之有效照明指標約88%表現最佳；而角錐型方面，增加稜鏡設計比未有稜鏡設計而言，增加稜鏡結構可增強整體光強度與照明指標，然而以P2v-cut與P4v-cut兩相比較，P4v-cut雖有較好的光強度，然而其眩光比例將近整體的一半，因此造成整體有效照明遠差於P2v-cut之系統設計。鑒於兩種微特徵系統設計，因此將利用照明對比度判定出C2與P2v-cut的系統設計之選擇。

## 3. 照明對比的判定

### 3.1. 照明對比判定方法

本研究利用條碼式線寬粗細分佈做為照明對比度分析的參考依據，設定三條不同粗細的黑色線段做為白紙上的明暗對比，設計樣本線高為40 mm，線寬分別為5 mm、10 mm及15 mm，線段與線段之間距離為5 mm，模擬設定上白紙上光線反射視為漫反射，而黑體線段視為光線全吸收，其照明系統設計如圖10。



(a) C<sub>2</sub>觀察面(紙張面漫反射) (b) C<sub>2</sub>觀察面(紙張面全吸收)

圖 9 光照圖於觀察面之底部紙張面設定相異

表 2 微特徵與系統設置之有效照明分析

(C <sub>no</sub> )	Cylinder			(P <sub>no</sub> )	45° Pyramidal		
	OB%	OB% (AB)	Index %		OB%	OB% (AB)	Index %
1	47.01	42.28	11.19	1	52.15	40.19	22.93
2	44.73	5.53	87.64	2	51.01	12.88	74.75
3	65.32	39.89	38.39	3	61.55	30.40	50.61
4	64.87	27.46	57.67	4	62.67	34.19	37.67
				P2 <sub>V-cut</sub>	57.21	13.95	75.61
				P4 <sub>V-cut</sub>	66.12	36.27	45.14

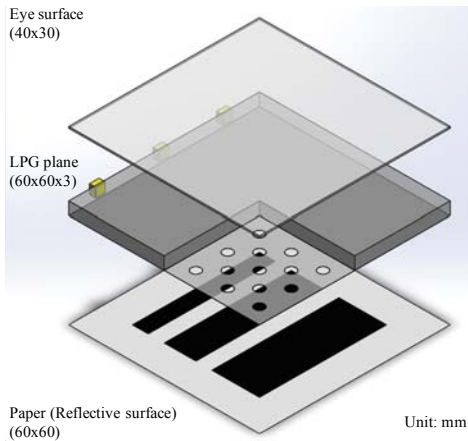
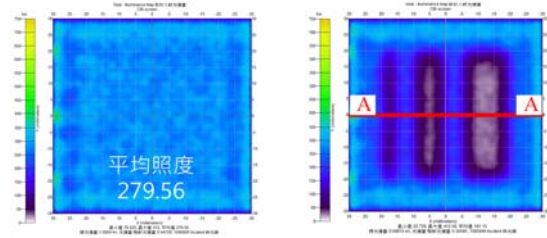


圖 10 照明對比之設計載具

照明對比判定方法利用網點優化後整體平均照度的一半作為明暗之間的基準，如C<sub>2</sub>系統設計為例(圖11(a))，網點優化後整體平均照度約為280 lux，取其一半約為140lux作為明暗基準，此外，配合照明對比系統載具模擬其觀察面出光情形，其結果如圖11(b)，將輸出A-A剖線之數據曲線與明暗基準線共同繪製如圖12，由圖中將基準線劃過數值曲線可得到三段模擬觀測面線寬度A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>與A<sub>3</sub>，分別與實際線寬A<sub>1</sub>'、A<sub>2</sub>'及A<sub>3</sub>'之比值，作為各線段之照明對比比例，而整體照明對比度則將各段之比值相加取其平均如式(2)。

$$Total(\%) = avg. \left( \frac{A_1}{A_1'} + \frac{A_2}{A_2'} + \frac{A_3}{A_3'} \right) \quad (2)$$



(a) 網點優化後平均照度 (b) 照明對比判定

圖 11 C<sub>2</sub>型照明對比度判定方法

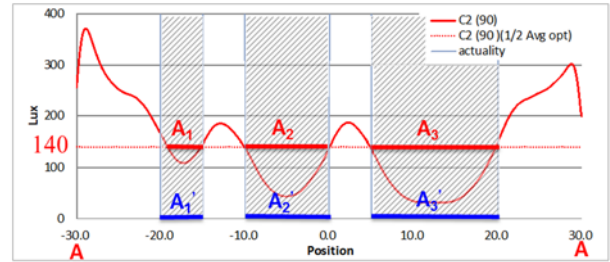
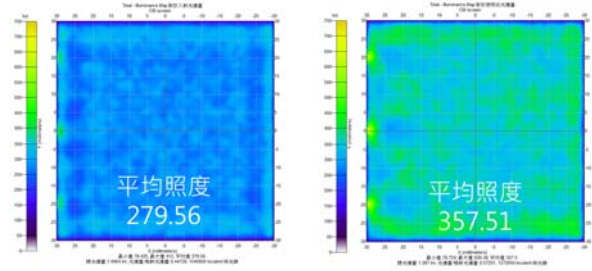


圖 12 C<sub>2</sub>型 A-A 剖線之照明對比度

### 3.2. C<sub>2</sub> vs P2<sub>V-cut</sub> 照明對比判定之特徵選擇

經由照明對比度判定機制分別針對C<sub>2</sub>與P2<sub>V-cut</sub>進行分析，以平均照度方面分析結果如圖13，分別為P2<sub>V-cut</sub>=357.51 lux及C<sub>2</sub>=357.51 lux，兩相比較P2<sub>V-cut</sub>型於觀察面上整體亮度較佳。然而，利用條碼式判定載具結果分析如圖14，在計算出整體照明度如表3，結果分析C<sub>2</sub>型整體照明度優於P2<sub>V-cut</sub>型，因此在照明平板的微特徵選擇中，圓柱形特徵結構將優於角錐型特徵結構。



(a) C<sub>2</sub>型平均照度 (b) P2<sub>V-cut</sub>型平均照度

圖 13 C<sub>2</sub>與 P2<sub>V-cut</sub>平均照度

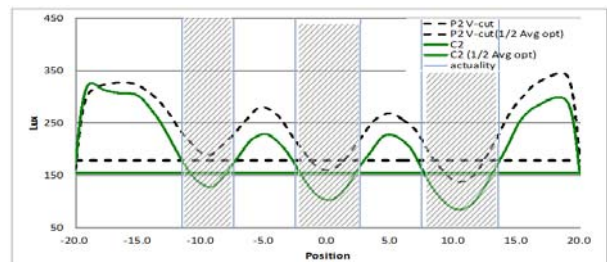


圖 14 C<sub>2</sub>與 P2<sub>V-cut</sub> 數值分析擷取



表 3 C2 與 P2<sub>V-cut</sub> 照明對比度

	4 mm	5 mm	6 mm	average
C2 (%)	68.36	86.72	90.49	<b>81.86</b>
P2 <sub>V-cut</sub> (%)	0	49.22	60.55	38.89

### 3.3. C2 型-參數設計

結構分析中C2型系統設計於導光平板表現較佳，因此將針對C2型參數設計並求取最佳化參數。於圓柱體特徵而言，將探討圓柱體與底面所夾之角度 $\theta$ (圖15(a))、圓點直徑D及特徵之間深寬比H/D(圖15(b))。利用實驗計畫L9直交表作為參數設計的依據，並由有效照明指標之值作為觀測值，其分析結果如表4，整理可得各因子之間的關係折線圖如圖16，圖中可選出C2型最佳參數設計C2<sub>OPT</sub>分別為 $\theta=90^\circ$ 、 $D=90 \mu\text{m}$ 及 $H/D=1$ 。

### 3.4. 照明對比度比較

由C2型特徵優化後之最佳參數C2<sub>OPT</sub>型，與Jakubowsky, 2014[1]系統特徵設計進行照明對比度之比較。其中C2<sub>OPT</sub>與Jakubowsky型參數特徵皆為凸點圓柱型特徵，Jakubowsky型結構尺寸分別為 $\theta=90^\circ$ 、 $D=50\mu\text{m}$ 及 $H=42\mu\text{m}$ 。經由網點優化分析結果C2<sub>OPT</sub>型與Jakubowsky型的平均照度與出光效率兩者相較相近如圖17，因此可再利用照明對比度判斷兩者之間優劣性。

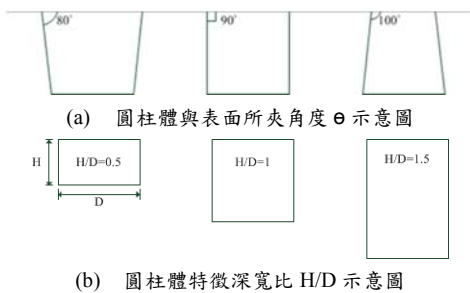


圖 15 圓柱體特徵參數示意圖

表 4 C2 參數設計

L9	$\theta$	D	H/D	OB	OB(AB)	index(%)
1	80	50	0.5	30.38	5.46	82.03
2	80	90	1	58.78	6.28	89.32
3	80	130	1.5	67.85	12.30	81.87
4	90	90	0.5	44.59	6.34	85.78
5	90	130	1	61.36	6.87	88.80
6	90	50	1.5	33.38	3.73	88.83
7	100	130	0.5	55.25	10.36	81.25
8	100	50	1	28.45	3.72	86.92
9	100	90	1.5	38.06	5.92	84.45
OPT	90	90	1	46.1	4.02	91.28

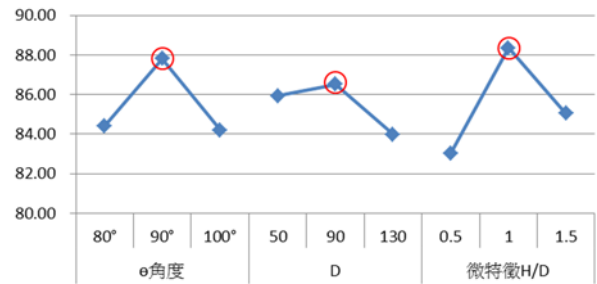


圖 16 C2 型因子效果回應圖

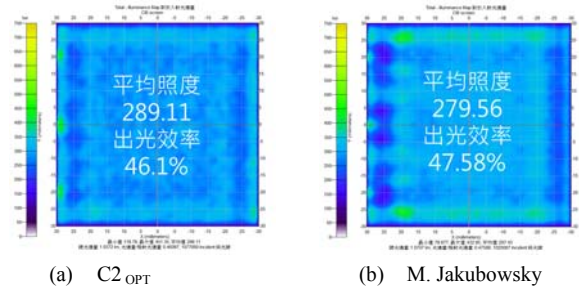


圖 17 C2 與 P2<sub>V-cut</sub> 平均照度

再利用照明對比度判別機制模擬C2最佳化特徵分佈後與Jakubowsky設計實際應用時之量化分析，以條碼式線寬為例並將數據擷取結果如圖18、

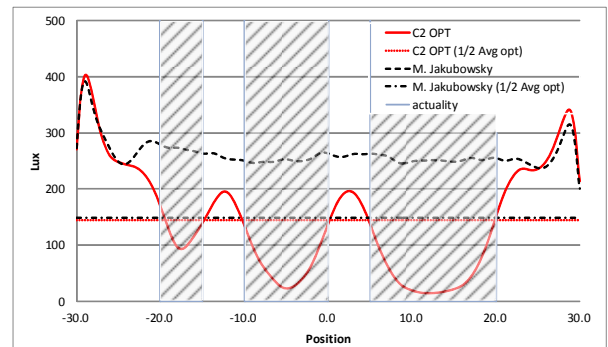


圖19。再計算出整體照明度分析(表5) C2<sub>OPT</sub>=96%，對比度相當清晰，反之Jakubowsky型並無法有效利用照明度分析進行判斷，因Jakubowsky型採用特徵朝上之系統設計，此類型將導致大的的光直接經由LGP直接出光，並無有效照明至紙張面。

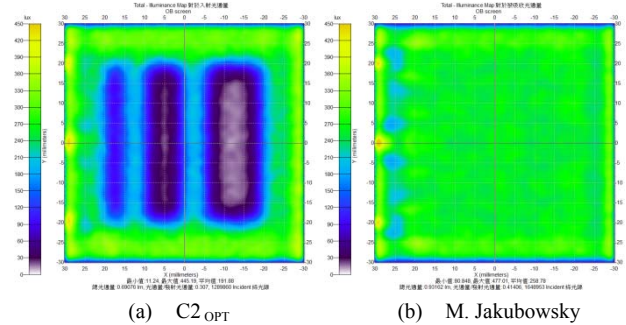


圖 18 C2<sub>OPT</sub> 與 P2<sub>V-cut</sub> 條碼式照明對比度模擬結果

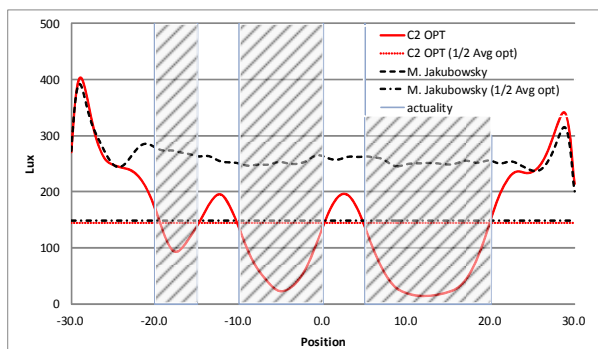


圖 19 C2 OPT與P2<sub>v-cut</sub>數值分析擷取

表 5 C2 OPT 與 P2<sub>v-cut</sub> 整體照亮度

Theory	5 mm	10 mm	15 mm	AVG <sub>Total</sub>
C2 OPT	89.89	100	99.22	95.77
M. Jakubowsky	N/A	N/A	N/A	N/A

#### 4. 結論

本研究探討LED側光式照明平板微特徵及系統設置組織化，由光型分布圖發現C2、P2、P4、P2<sub>v-cut</sub>及P4<sub>v-cut</sub>具有中間集光效果，以圓柱型設計而言以C2系統配置最優；而角錐型分析顯示，增加稜鏡設計的P2<sub>v-cut</sub>及P4<sub>v-cut</sub>的系統設置可使光型更為集中並可增加光型整體的亮度，然而兩者比較發現P4<sub>v-cut</sub>雖具有較強的光強度，但大部分的光皆會造成眩光，並非較佳的系統設計，綜觀整體系統設計中，以C2系統設計為最佳，而P2<sub>v-cut</sub>次之。

在照明對比度方面，由C2與P2<sub>v-cut</sub>相互比較判定，其結果以C2系統整體對比度較優，因此可決定C2系統設計作為參數優化的基礎。優化後的圓柱型參數C2<sub>OPT</sub>分別為 $\theta=90^\circ$ 、 $D=90\ \mu\text{m}$ 及 $H/D=1$ 。最後由C2<sub>OPT</sub>與Jakubowsky[1]相互做照明對比度判定，其結果C2<sub>OPT</sub>整體對比度為88%，反之Jakubowsky設計並無法有效判定，因文獻中的光學系統設計導致大部分光皆由LGP直接出光導致眩光之情形，未來將試製成品並與模擬比對驗證。

#### 5. 參考文獻

- [1] F. C. Tengler, M. Jakubowsky, and A. Neyer, "High transparent light guiding plate for single-sided light emission," *Microelectronic Engineering*, vol. 119, pp. 174-177, 2014.
- [2] J. H. Lee, J. Yeon, K. D. Kim, and J. B. Yoon, "Mass-Producible Polydimethylsiloxane (PDMS) Frontlight Unit (FLU) for Reflective Displays," *Journal of display technology*, vol. 7, pp. 526-531, 2011.
- [3] J. C. Yu and P. K. Hsu, "Integration of Stamper Fabrication and Design Optimization of LCD Light Guides Using Silicon-based Microfeatures", *Microsystem Technology*, vol. 16, pp. 1193-1200,

2010.

- [4] 余志成, 張簡少棠, "具軸向集光效果之整合式導光板," 專利號碼: I429971, 2014.
- [5] J. G. Chang, and Y. B. Fang, "Dot-pattern design of a light guide in an edge-lit backlight using a regional partition approach," *Optical Engineering*, Vol. 46, pp. 043002.1- 043002.9, 2007.
- [6] Y. C. Kim, " Optimize pattern design for the thin LGP," *Optik*, vol. 124, pp. 2171-2173, 2013.
- [7] <http://www.pcstore.com.tw/homerunmart/M13645929.htm>
- [8] [http://www.oyeatek.com/product\\_detail.php?class3\\_id=340&class2\\_id=23&class1\\_id=6](http://www.oyeatek.com/product_detail.php?class3_id=340&class2_id=23&class1_id=6)

## Optical design of High Transparent Light Guide Plate for Reading Illumination Using Single Side Edge-lit LED

Chaio-Kai Chang, Jyh-Cheng Yu\*

Department of Mechanical and Automation Engineering  
National Kaohsiung First University of  
science and Technology

\*Corresponding Email: [jcyu@nkfust.edu.tw](mailto:jcyu@nkfust.edu.tw)

### Abstract

This study analyzes the optical design of light guide plate for reading illumination using single side edge-lit LED. A simulated scheme using TracePro is proposed to compare the design of light guide plate for reading illumination and presents the optimum feature design and layout. The light paths of LGP for reading assisted illumination can be roughly classified into two category: (1) the ray reflected by the coupling feature and refracted out of LGP directly, and (2) the ray refracted through the coupling features downward and reflected by the reading surface (usually a book page) and refracted out of LGP again. Since the LGP is for illumination assisted of reading, only the second type is effective for illumination purpose. The first type, on the other hand, will result in glare problem to the reader. A quantified metric is proposed to determine the light extraction efficiency of cylindrical and pyramidal microstructures to select the preferred system design. The analysis shows that a convex cylindrical features facing the reading surface will provide the best light extraction efficiency. This study proposes a method to quantify the illumination resolution, and applies to the parameter design of the cylindrical microstructures using Taguchi method. The proposed design is analyzed and compared with the literature result, and show significant improvement of reading illumination.