

LED 組合式導光條的設計與應用

賴彥璋、高榜德、林士凱、余志成*
國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系
*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

摘要

本文探討組合式導光條設計與擴散內套的量測和模擬，導光條以 V-cut 作為光耦合特徵以提升軸向光強度，並探討 LED 入光和導光管與導光條連結處形狀的設計，來分析光源進入導光條後的出光效率，再來針對 V-cut 特徵的角度選取和使用模糊最佳化進行特徵的深度分布，使出光角度能有效的集中且照度分布均勻，並且設計直條和平面彎曲兩種組合的導光條模組。為提升組合導光條的出光均勻性，本研究分析以噴砂製作擴散表面的內套，進行擴散光形的量測，並以光學模擬找出其 BSDF 模型的 ABg 對應參數，套用至所建立的擴散內套上，分析組合式導光條使用擴散內套對於出光照度均方根值的影響。最後提出組合式導光條的應用例，例如車外訊號燈、車內與室內照明等，驗證設計可行性。

關鍵字：組合式導光條，ABg BSDF，出光均勻性，模糊最佳化，擴散板

Abstract

This study investigates the design of assemblable lightguide bars and the optical property of diffuse cover. We use V cut as light coupling structures and control the lead angles of V cut to increase the axial intensity. Fuzzy optimization scheme is applied to distribute V-cut depth to improve the illuminance uniformity. A straight and an arc assemblable lightguide bar modules are proposed. To improve the uniformity of assembled lightguide bars, we use sandblasting to create the diffuse cover. The light emission pattern of the sample diffuse cover is measured, and compared with the simulation result to find its corresponding BSDF ABg parameters using Tracepro. The diffuse cover is applied to the assembled lightguide bars to analyze the diffusive effect on the illuminance RMS. Finally, several examples of assembled LED lightguide bar are presented to illustrate the future applications in signal lamps and indoor illumination.

Keywords: Assemblable lightguide bar, ABg BSDF, Illuminance uniformity, Fuzzy, diffuse

一、簡介

車燈發展至今從簡單的反射面與燈殼花紋構成的燈具，轉變為透明燈殼配上多重反射面的設計，增加燈具的立體感與設計感，更進一步使用 LED 取代傳

統燈泡作為燈具的光源，而 LED 具有能量轉換效率高、省電、高壽命...等等的優點。

LED 的照明應用主要分為反射式、直下式、混合式與導光式，目前車燈設計方面以反射式的設計居多如圖 1，利用 LED 與反射鏡的排列，使得車燈造型更具設計感與科技感，但缺點因為 LED 的光源特性使得直視車燈會有刺眼的感覺，近來 BMW、AUDI 等大廠推出以導光條方式作為訊號功能的車燈如圖 21，利用 LED 側面入光加上導光元件分布微結構的方式如圖 33，使得出光較柔和且均勻。

本文設計直條與平面彎曲的組合式導光條模組，藉以減少 V-cut 調整與導光條射出成型的難度，此外為了遮蓋導光條的特徵與結合處，在導光條上面我們需要增加擴散內套，如同液晶螢幕的擴散片的功能一樣，讓導光元件的出光更加均勻，擴散片的製作上有利利用擴散粒子參雜 4 或者利用加工微結構的方式 5678，雖然這些方式能夠較精確的控制通過擴散片的出光情形，但成本較高，本文利用表面噴砂的方式製作擴散試片，因為容易取得且成本較低。

本文將對於獨立的導光條模組進行設計與最佳化，與擴散試片的量測與模擬資料比對，得出其表面的擴散參數，再配合導光條模組進行光學模擬。

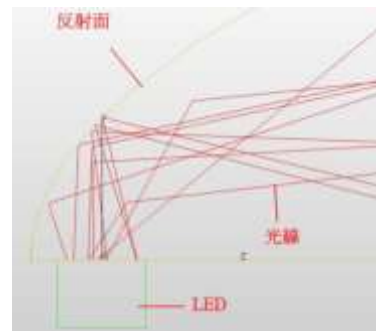


圖 1 反射式 LED 車燈

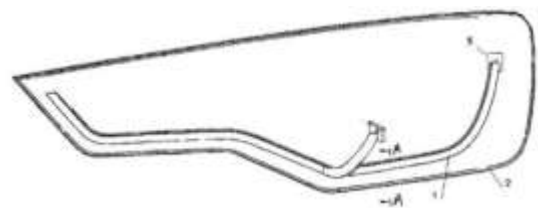


圖 2 AUDI A1 畫行燈 1

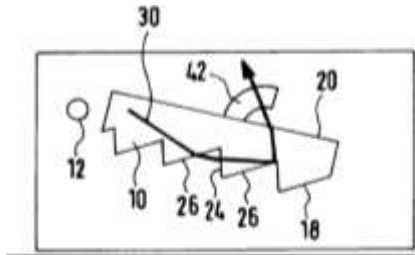


圖 3 側光式導光條使用 V-cut 特徵示意圖 3

二、組合式導光條設計

本文在討論關於組合式導光條 LED 入光的設計，V-cut 特徵的設計與分布最佳化，以及平面彎曲導光條的設計與導光條模組的接合，考量加工特性，以凸弧狀卡榫作為導光條間的結合特徵。本文中使用的 LED 為 3(mm)X3(mm)，中央發光直徑為 2.6 mm，可視角 (Viewing Angle) 為 120 度，操作流明值為 31.2 lm。

1. 導光條入光與 V-cut 特徵的設計

首先我們先從 LED 的入光開始談起，我們設計了三種入光方式：導光條中間、導光條中間側面、導光條端面入光，因前兩者都發生較高漏光缺陷，因此選擇端面入光，**端面入光導光條設計**如圖 4，決定 LED 入光的方式後，我們進行 V-cut 特徵的設計，分別為凸起式與凹下式的 2 種設計如圖 5，以改變其 V-cut 特徵 α 與 β 角度組合，進行多組出光角試驗，模擬結果如圖 6、7，當凸起式 $\alpha=60$ 度、 $\beta=30$ 度，主峰角接近 0 度主軸，較符合我們的需求，而凹下式則以 $\alpha=30$ 度、 $\beta=60$ 度較佳，**再將兩種設計較佳數據進行比較**如圖 8，我們發現到凹下式的設計其光強度值 (cd) 要優於凸起式，所以最終我們選擇凹下式 $\alpha=30$ 度、 $\beta=60$ 度作為後續的設計。

2. 直條導光條的 V-cut 分布最佳化

在決定了入光的方式，V-cut 特徵與結合特徵後，接著進行 V-cut 的深度的分布，我們使用深度 0.3mm，週期 1.2mm 作為初始設計，模擬後計算其 RIR (Regional Illuminance Ratio) 值，即控制點的局部照度與整體導光條平均照度的比值，若 RIR 大於 1 則降低控制點的特徵深度，反之則增加控制點的特徵深度，而在兩個控制點間的特徵深度則以內差方式作線性分布。並利用 Yu 與 Hsu 提出的模糊最佳化方法 (Fuzzy Optimization)，作為特徵深度調整倍率的理論基礎，經過多次優化後得到一組最佳化的深度分布如圖 9，照度圖如圖 10，計算各次優化後的 RMS 值如圖 11，其 RMS 值降低了約 37%，表示我們使導光條的均勻性上升。

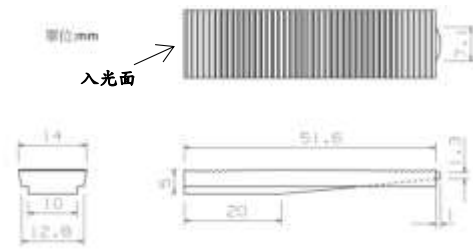


圖 4 直條導光條尺寸圖



圖 5 V-cut 設計方式：(a) 凸起式 (b) 凹下式

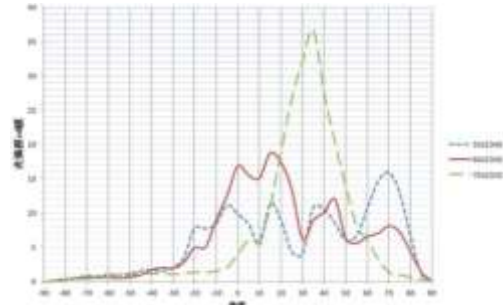


圖 6 凸起式模擬結果比較圖

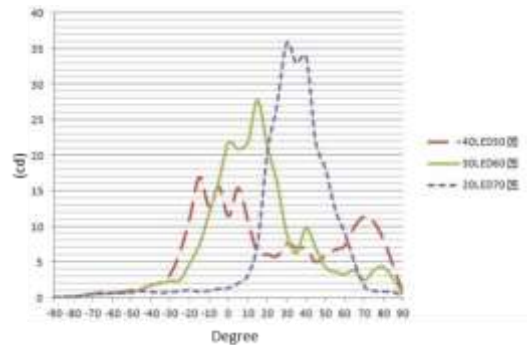


圖 7 凹下式模擬結果比較圖

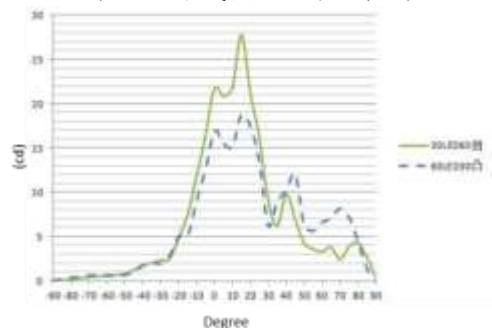


圖 8 凸起與凹下式角度比較圖

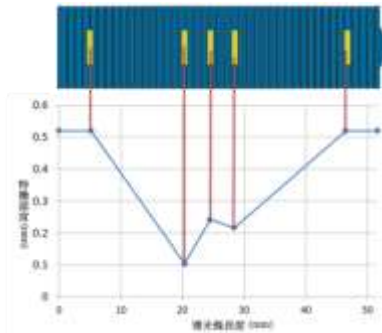


圖 9 直條導光條最佳化深度分布

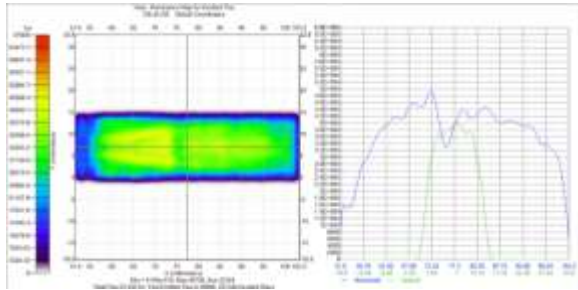


圖 10 直條導光條特徵分布最佳化的照度圖

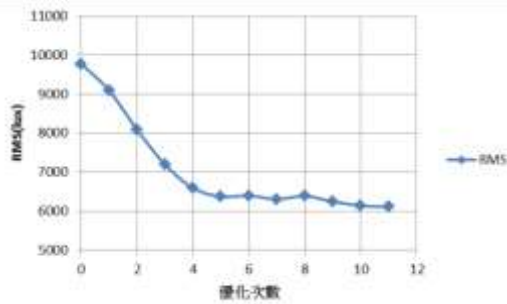


圖 11 直條導光條各次模擬後的 RMS 值

3. 平面彎曲導光條的 V-cut 最佳化分布

在造型上，不只有直條形狀的導光條模組，所以我們再設計平面彎曲導光條如圖 12，V-cut 的深度為 0.3mm，週期為 1.2mm 的初始設計，在優化方面與直條導光條的方法大同小異，但在控制點的位置上，我們必須做轉換，先找出其對應的橫軸投影 X，利用 $r(\sin\theta)=X$ (r 為平面彎曲導光條的半徑)，得到 $\theta=(\sin)^{-1}*(X/r)$ ，然後我們可以知道控制點對應的弧長等於 $(\theta/360)*2\pi r$ 如圖 13 所示，將其轉換成類似直條導光條的方式進行優化，經過多次優化後，我們可以得到如照度均勻性最佳的深度分布，其照度圖如圖 14，計算各次優化後的 RMS 值如圖 15，RMS 值約降低了 26%。

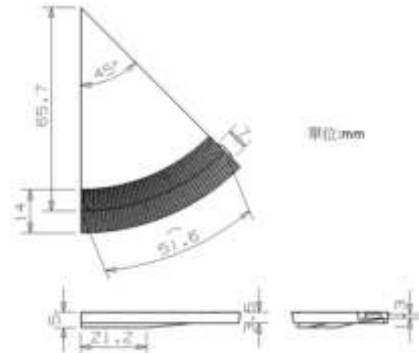


圖 12 平面彎曲導光條尺寸圖

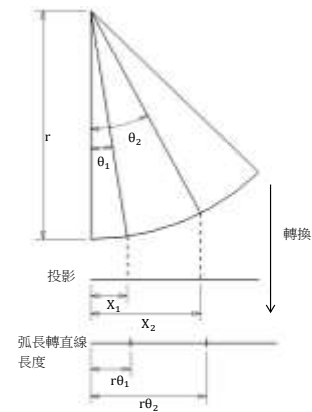


圖 13 平面彎曲導光條轉換計算示意圖

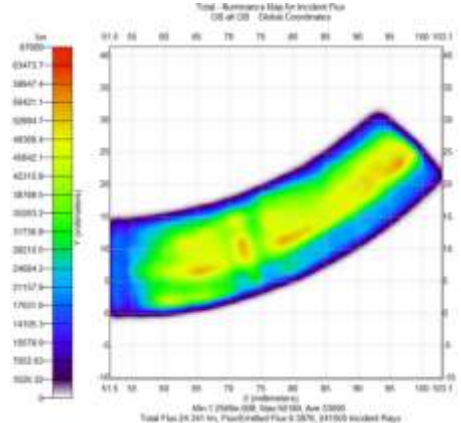


圖 14 平面彎曲導光條特徵分布最佳化的照度圖

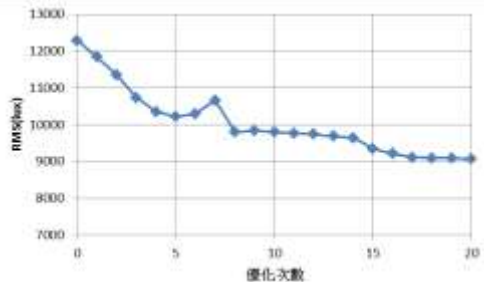


圖 15 平面彎曲導光條各次模擬後的 RMS 圖

三、擴散表面的模型建製與分析

從前面最佳化的結果我們可以發現，即使經過了多次的優化，導光的出光並非完全均勻，所以我們打

算利用擴散片的特性，製作擴散內套放置在導光條上方，一方面為了美觀讓 V-cut 特徵隱藏在內套下，並且遮掩兩條導光條結合的部分，另一方面則使出光均勻化。

1. 擴散片表面粗糙度的量測

我們利用表面噴砂的方式製作 50(mm)×70(mm) 的擴散試片，在這裡我們使用兩種不同的噴砂顆粒來製作，並使用表面輪廓儀量測其表面粗糙度，量測資料如表 1、表 2，從量測資料可以得知，使用噴砂得到的表面粗糙度並非十分均勻，但基本上使用較粗顆粒噴砂的試片平均粗糙度大於較細顆粒的試片。

表 1 較細顆粒噴砂的表面粗糙度(Ra)量測資料

Ra	point1	point2	point3	point4	point5
position1	6125	5819	5242	6350	6935
position2	6804	6066	6286	4937	7362
position3	6451	6283	6283	6928	5642
position4	6422	6330	7713	7236	7137
position5	5368	7111	6764	6814	5365
position6	6258	6078	7743	6400	6680
position7	7599	7490	6612	7076	7006
position8	8123	8010	6242	5628	6878
position9	6522	6532	5994	5328	7230
平均粗糙度	6560				單位:A
標準差	745.2				

表 2 較粗顆粒噴砂的表面粗糙度(Ra)量測資料

Ra	point1	point2	point3	point4	point5
position1	8288	9386	10545	10522	10120
position2	8251	7523	7082	10467	9287
position3	8259	9239	9711	8220	9696
position4	7516	9655	8808	8353	7255
position5	7743	8293	5588	6568	7420
position6	10317	6923	8604	10010	10035
position7	7987	8682	8898	9051	9079
position8	9527	8157	6511	6825	8218
position9	9454	9075	9011	8669	8283
平均粗糙度	8602				單位:A
標準差	1168.4				

2. LED 經擴散片後光形變化的量測

我們將一片擴散片分為三個區域，使用可視角 27 度的紅光 LED 透過擴散片後進行光形量測，量測結果如圖 16，全擴散角數值如表 3，從這個量測結果可以看出，使用同一種顆粒噴砂，在不同位置的光形變化並不大，所以我們可以將一種噴砂顆粒產生的粗糙表面視為只有一種的光形變化，經過較細顆粒的擴散片出光後的平均擴散角約 42.11 度，經過另外一片約在 39.15 度，表示粗糙度較小的擴散片有比較大的擴散角，但相差約在 3 度左右。

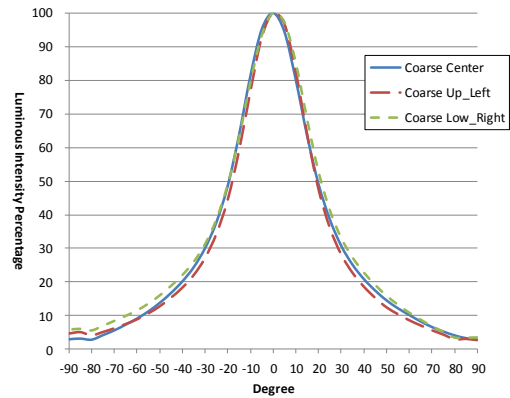


圖 16 粗顆粒噴砂擴散片光形量測結果

表 3 全擴散角量測結果

	θ_C	θ_L	θ_R	平均	標準差
細	43.85	41.76	40.74	42.11	1.29
粗	39.22	37.36	40.88	39.15	1.44
					單位:度

3. 利用 Tracepro 模擬得到 ABg 參數

為了進行散射的模擬，我們需要一個適合的 Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF) 模型，方便我們將量測的資料轉換成參數來敘述量測物散射的特性，例如 Harvey-Shack BSDF model 在表示表面散射特性常被使用，它根據 $\vec{\beta}$ 與 $\vec{\beta}_0$ 這兩個向量來敘述 BSDF 如圖 1710，而本研究使用的軟體為 Tracepro，在 Tracepro 中使用的是 ABg BSDF model 如式 1。

$$BSDF(\vec{\beta} - \vec{\beta}_0) = \frac{A}{B + |\vec{\beta} - \vec{\beta}_0|^g} \quad (1)$$

其中 A: 振幅參數(amplitude parameter)

B: 轉折參數(roll-off parameter)

g: 為曲線斜率

$\vec{\beta}$ 與 $\vec{\beta}_0$ 向量從 Harvey-Shack BSDF model 而來，為光線擴散後在平面上的投影向量；如圖 18 所示 10，A 決定了曲線的高度，當曲線從平緩轉變成指數性的下降的點由 B 值決定，而 g 參數決定了曲線的斜率。

我們使用較細顆粒噴砂的擴散試片作為本文量測與模擬取得其 ABg 參數的對象，首先量測 LED 的光形，得到可視角約為 27 度，之後在 LED 出光方向上約 4mm 處放置擴散片後進行量測，得到量測資料後，使用 Tracepro 模擬量測的狀態，然後針對 B 與 g 參數進行調整，讓模擬的資料與量測資料吻合如圖 19，最後得到的參數數據為 Absorptance = 0.35，BTDF = 0.65，A = 0.026，B = 0.03，g = 2.3，結果符合先前的推測，由於 LED 的可視角為 27 度，套上擴散片後平均擴散角變為 42.11 度，改變的幅度不大，所以 B 參數會較小。

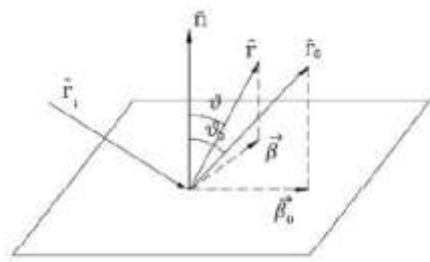


圖 17 Harvey-Shack model 所使用的向量圖 10

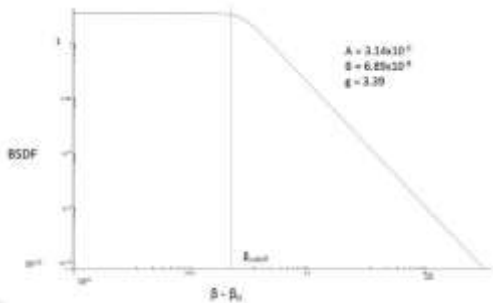


圖 18 ABg BSGF model 的曲線圖 10

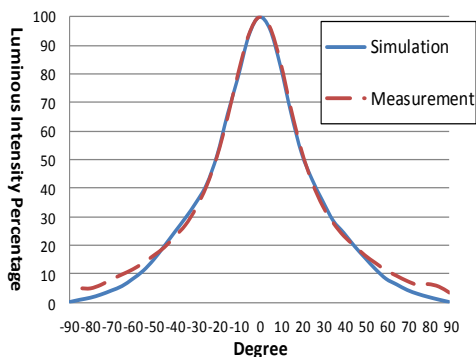


圖 19 Tracepro 模擬結果與實際量測結果比較圖

4. 導光條配合擴散內套的模擬與比較

得到 ABg 參數後，我們就可以設計擴散內套，其斷面如圖 20，在外側表面套上先前得到的參數進行模擬，首先我們作直條導光條的輝度模擬與比較，其觀察面的設置如圖 21 在導光條上方設置五個 5x5(mm) 的觀察面量測輝度，結果如表 4 所示，同樣的我們也在平面彎曲導光條上設置五個 5x5(mm) 的觀察面如圖 22 量測輝度，其量測結果如表 5，從表 4、表 5 的模擬資料可以發現，雖然輝度有所下降，但其標準差也降低了，表示使用了擴散內套的導光條模組，能有效的提升出光的均勻性。

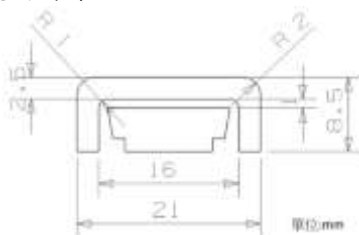


圖 20 擴散內套斷面尺寸圖

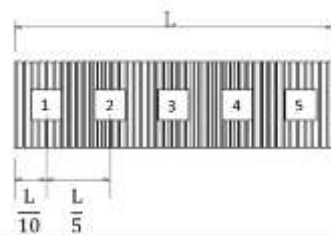


圖 21 直條導光條輝度觀察面的設置

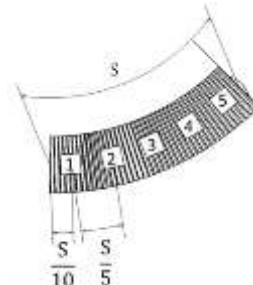


圖 22 平面彎曲導光條輝度觀察面的設置

表 4 直條導光條有無加上內套之輝度比較表

	position1	position2	position3	position4	position5	標準差
未加上內套	36800	17783	73257	119950	66091	34897
加上內套	7230	20246	18838	18748	15558	4705
						單位:nit

表 5 平面彎曲導光條有無加上內套之輝度比較表

	postion1	postion2	postion3	postion4	postion5	標準差
未加上內套	16232	9043	1375	7556	17374	5899
加上內套	8006	16395	9582	8852	19688	4666
						單位:nit

5. 組合式導光條配合擴散內套的光學模擬

接著我們使用了兩條直條導光條與一條平面彎曲導光條如，來比較有無使用擴散內套的出光狀況，模擬結果如圖 24，無使用內套有明顯的亮區產生，而使用內套後其照度較為均勻，這點我們也可以從 RMS 值的變化來得知，原本的 RMS 值由 4791.3 降為 3285.3，表示其亮度差異較小，出光較為均勻。

然後依光軸方向距離在導光條加上擴散內套的組合 10m 處設置觀察面，用以模擬其光形與光強度值，其模擬結果如圖 25，中心(0,0)的亮度約為 22cd，左右的範圍都超過 20 度，上下也超過 10 度，一般駐車與行車的法規亮度下限為 4cd，表示以單一此種組合的模組是能夠符合駐車、行車的法規要求。

我們製作了直條與平面彎曲導光條的目的在於能夠自由組合，配合各種不同的造型與需求來設計導光條的樣式如圖 26，使用擴散內套的模擬結果如圖 27，從結果我們可以發現使用擴散內套會使亮度下降，不過均勻性會比較好，讓這類的導光元件不只能運用在車燈上，也能使用於其他的用途。



圖 23 導光條套上擴散內套

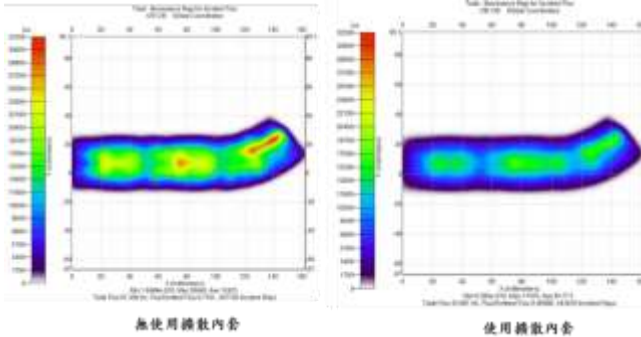


圖 24 套上擴散內套後的模擬結果

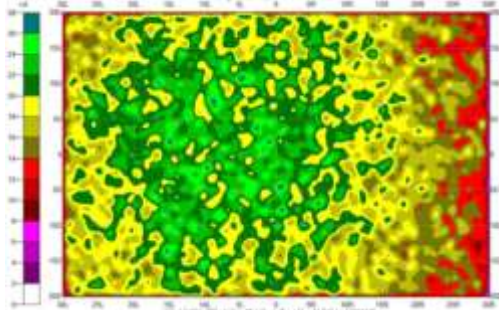


圖 25 離導光條 10m 的光形與光強度模擬

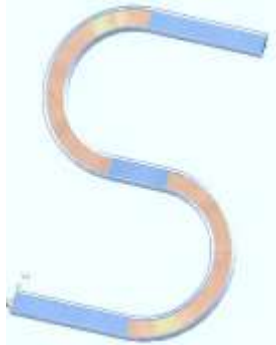


圖 26 直條與平面彎曲導光條的組合造型

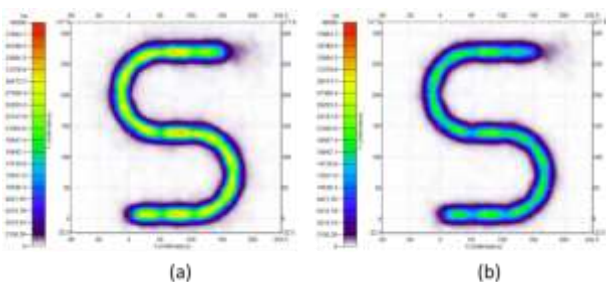


圖 27 S 形組合式導光條模擬結果(a)無內套(b)有內套

四、結論與後續展望

本次研究我們設計了直條與彎曲兩種不同的組合式導光條模組，藉由選取頂角為 90 度導角為 30 度的 V-cut 特徵來使出光集中於軸向，並使用模糊最佳化變動特徵深度的分布，來優化照度的均勻性，直條導光條的 RMS 值改善了 37%，而平面彎曲導光條改善了 26%，藉由直條與彎曲的組合可以得到不同形狀的平面光條。

為增加組合式導光條的出光均勻性，使用兩種不同顆粒大小來噴砂製作擴散試片，經過光學量測分析 LED 的光線通過兩種擴散片後，其光形的變化，藉以模擬得到 ABg 參數後套入到擴散內套中，使用了擴散內套的導光條 RMS 由 4791.3 降低到為 3285.5，表示使用擴散內套的確改善了照度的均勻性。但不同噴砂粗糙度對於擴散差異並不明顯，未來可考慮以咬花的方式製作擴散片，藉以製作不同的擴散表面。

目前的亮度以行車、前駐車的要求已經足夠，但若是要求達到晝行燈的法規(下限為 400cd)要求尚嫌不足，而組合式的設計，不只能用在車外訊號燈上，用於車內照明或者是室內的裝飾照明也是相當適合的。

五、參考文獻

1. 潘彪等，2010，一種光導式車燈位置燈，CN 201680163U。
2. John F. Van Derlofske, Thomas A. Hough, 2003, "Flux Propagation in Light Pipe Illumination Systems", Proc. SPIE 5186, Design of Efficient Illumination Systems, 44, November 10.
3. Matthias Gebauer, Steffen Wiersdorff, 2009, Lighting Mechanism, US Patent No:7494257B2.
4. 許瑋宗，2008，新型導光板對背光模組暗區現象消除之研究，國立中山大學機械與機電工程學系，碩士論文。
5. 林奇鋒等，2011，“表面結構對擴散板之 LED 光源擴散效應分析”，機密機械與製造科技研討會論文集。
6. 朱信樺等，2011，“微結構擴散膜在 LED 背光模組之均勻化效能分析”，精密機械與製造科技研討會論文集。
7. 黃皇齊，2003，應用 UV-LIGA 於導光板模仁之製作研究，國立高雄應用科技大學，碩士論文。
8. Jun-Bo Yoon, 2008, "3-D Diffuser Lithography and Its Application to LCD/LED Backlight Unit and Flexible Front-light Unit", IDW 2007, Sapporo, Japan, pp1345-1348.
9. J. C. Yu, P. K. Hsu, 2009, "Design Optimization and Stamper Fabrication of Light Guiding Plates Using Silicon Based Micro-Features", DTIP of MEMS and MOEMS, Rome, Italy, pp. 1-3.
10. Sam Richardson, Characterization of Surface Degradation by Laser Light Scattering.