

LED 近光燈光學設計之研究

劉源昌¹ 黃浩榮² 賴永進³

¹ 中州科技大學電機與能源科技系教授 E-Mail:ycliou@dragon.ccut.edu.tw

² 中州科技大學電機與能源科技系講師 E-Mail:hhj@dragon.ccut.edu.tw

³ 中州科技大學電機與能源科技系助理教授 E-Mail: billlay @dragon.ccut.edu.tw

摘 要

本文目的是符合歐盟配光要求的高亮度 LED 汽車近光燈光學設計之探討,設計適合 LED 近光燈之複合式橢圓光學系統,包括 LED 光源、反射鏡、遮光片、以及投射透鏡之整燈整合設計,由於本文設計之光學系統之光源利用率很高,因此當 LED 流明數設定為 200 lm 以上時,配光結果即可符合 ECE R112 近光燈法規配光標準,意即若採用目前全世界最亮的一瓦白光 LED 僅需 2 顆,是目前國內外已有研究中使用最少 LED 數量,證實本文設計光學系統的實用性。

關鍵詞：光學設計、近光燈、發光二極體

通訊作者

姓名：劉源昌

E-mail：ycliou@dragon.ccut.edu.tw



壹、緒論

由於 LED 製造成本持續降低，以及效率和亮度不斷提高，配合 LED 所具有的壽命長、安全性高、發光效率高、色彩豐富、體積小、環保等特點，使得 LED 在一般照明市場應用得以大幅度擴張，帶動其市場需求成長。此外，近年來 LED 燈具也廣泛應用在居家、車輛、戶外、建築等照明，據研究顯示，LED 燈具約可節省超過 80% 以上的能源，因此 LED 燈具已成為未來趨勢。全球 LED 汽車車燈市場，短期間驅動力主要來自 LED 車燈本身之優勢，包含設計自由度大、環保節能、高安全性。中長期而言，除了 LED 車燈原本之優勢，與汽車市場拉動外，政策法令將成為推動 LED 車燈發展的重要因素，例如歐盟禁用有害物質限制令（禁止使用鉛、水銀、鎘等有害物質）將會驅動 LED 汽車車燈市場成長，由此可見 LED 車燈也是一個重要的研究領域[1-3]。

貳、文獻探討

本文針對 LED 近光燈的光學設計來研究，因此接下來回顧國內外有關於 LED 近光燈設計之研究情形。國外文獻方面在 LED 前方照明（例如遠光燈、近光燈）[4-13]從 2003 年開始，第一篇文獻為世界車燈大廠 Valeo[4]採用投射式光學系統模組設計，不同於目前的投射式系統有：僅採用一半之橢圓反射鏡、並將遮光片水平安置，頭燈設計使用了 28 顆模組；後續研究有文獻 6 探討關於 SAE 頭燈之可行光學系統有：自由曲面之反射面式光學、透鏡光學、拋物反射鏡與非球面透鏡組合光學、投射式模組系統、Fresnel 透鏡光學、複合式拋物集中器光學；日本車燈大廠 Koito[8]採用了反射鏡的形式設計遠、近光燈，SAE 近光燈使用了 13 個模組、每個模組有 2 顆 30 lm 的 LED，SAE 遠光燈使用了 14 個模組、每個模組有 1 顆 95 lm 的 LED；文獻 9 提出考慮到光學、電系、機械、溫度問題之反射式與投射式光學系統，並認為 5~10 年內可取代傳統頭燈；文獻 10 採用 LumiLeds Luxeon LED，近光燈使用 5 顆 LED、遠光燈使用 10 顆 LED，並認為投射式光學系統最有希望符合近光燈高照度與高梯度明暗截止線的要求；文獻 11 為日本車燈大廠 Koito 設計 Lexus LED 近光燈採用的方式，以投射式光學系統設計三種不同程度擴散有明暗截止線的光形、加上拋物柱面設計最擴散光形，組合成所需的近光燈組。國內研究情形：文獻 14、15 採用 Side Emitting LED 配合 MR（多重曲面）反射燈罩針對目前歐盟法規作概念性的近光燈設計，預計需 10 組反射燈罩才能達到法規最低要求。文獻 16 採用 Lambertian LED 的投射式近光燈設計，採用 7 個單元模組堆疊後的配光。文獻 17 採用 Lambertian LED 的 AFS-LED 頭燈系統設計。由上述文獻回顧可知，一般文獻上僅作概念式的敘述，不易得知其實際設計方式，意即只能知其 Know Why 但卻無從得知其 Know How，尚需花費很多的研發時間以累積實際的設計經驗，因此本文目的是符合 ECE R112 配光規範之高亮度 LED 近光燈光學設計之研究。



參、歐規近光燈配光規範與 LED 的選用

歐規 ECE R112 對於近光燈的要求如表 1 及圖 1 所示，對近光燈的光型與亮度要求精神，在於使駕駛人可以看清前方的路面與右方的狀況如標識牌、行人等，但卻不至於對前方車輛或對向來車的駕駛人造成不適的眩光，所以光型的上方暗區要求不得過亮，而亮區則集中於右下方。LED 方面採用 Lambertian 分佈的高功率 LED 如圖 2 所示。

肆、投射透鏡的設計

本文採用非球面透鏡 4 次曲面方程式[18]：

$$Z = \frac{r^2}{2R} + K \times \frac{r^4}{8R^3} \quad (1)$$

其中 R 為頂點曲率半徑、 K 為可調整之係數， $K=0$ 時為拋物面而 $K=1$ 時接近球面，所以該方程式設計出來的透鏡之幾何外形介於球面與拋物面之間，因為其聚焦能力較所有二次圓錐面為佳，惟當透鏡之口徑或厚度改變時，調整係數 K 須重新尋找以獲得最佳之聚焦結果，因此接下來探討相關之投射透鏡的參數設計。透鏡材質多為玻璃、壓克力或 PC(Polycarbonate)，其中投射透鏡一般為玻璃材質，所以取折射率為 1.58 或 1.508，當投射透鏡的口徑為 66 mm，並取頂點曲率半徑 $R=33$ mm，藉由折射定律：

$$n_{\text{AIR}} \times \sin(i) = n_{\text{Lens}} \times \sin(u) \quad (2)$$

$$n_{\text{Lens}} \times \sin(i') = n_{\text{AIR}} \times \sin(u') \quad (3)$$

數學計算推導及電腦程式設計模擬平行光束通過透鏡之光跡路徑如圖 3 所示，分析聚焦情形，經過一系列測試（如圖 4 所示）得知當 $K=0.54$ 時對於光束的會聚效果最佳，其幾何外形與聚焦情形如圖 5 所示，光軸上最大的球差值僅 0.5 mm、焦距為 46 mm、透鏡的厚度為 18.7 mm，此透鏡球面像差保持很小而且焦距長度不長對於整體燈具縱深的降低十分有利，所以是相當不錯的設計。

伍、反射鏡面的設計

本文經過一系列之研究分析，希望能在很有效率的方式之下決定反射鏡面的設計參數，而得到所需的配光控制，經進一步分析採用複合式橢圓反射鏡設計方程式[19]，以圓柱座標 (r, ψ, Z) 表示：

$$\left(\frac{r}{b(\phi)}\right)^2 + \left(\frac{Z}{a(\phi)} - 1\right)^2 = 1 \quad (4)$$

其中

$$a(\phi) = a_x \cos^{4/n} \phi + a_y \sin^{4/n} \phi \quad (5)$$

此反射鏡面的任一 ψ 截面橢圓有相同之頂點（在座標原點處）與第二焦點、而第一焦點則不同如圖 6 所示。由於有共同之第二焦點，投射透鏡焦點位置便可明確且輕易決定，LED 光源應位於垂直橢圓的第一個焦點以獲得上下方向最聚光的效果，所以光源初步位置亦可明確的決定，而配光控制便交由反射鏡面設計參數 $S = 2(a_x - a_y)$ （由如圖 6 中之幾何關係可推導得之）來決定，此外半軸長 $a(\psi)$ 如方程式(5)的設計目的是隨角度 ψ 的變化並非線性關係，而是如 S 形的非線性關係，在 $a_x \sim a_y$ 之間緩和變化；半軸長 b 可由橢圓幾何關係式 $b = \sqrt{a^2 - c^2}$ 決定，其中 c 為焦距，因此半軸長 a 、 b 皆隨角度 ψ 而異。

接下來搭配前節的投射透鏡（由於橢圓式反射鏡面在第二焦點聚光後會往後再次擴散開來，在 25 m 屏幕上便散成一團，所以務必搭配投射透鏡的聚光成平行光束）來測試此複合式橢圓反射鏡的配光性能，反射鏡垂直橢圓的長軸半長為 57 mm、焦距為 39mm、範圍僅需傳統投射式反射鏡面的上半部（如圖 7 所示），此乃因為 LED 其發光特性非全方位，分佈角度僅 ± 90 度，所以反射鏡面範圍僅需採用傳統光源設計之鏡面的一半即可，而且 LED 光源朝上、主軸與光軸向垂直以期 LED 大部分的光束皆可被反射鏡面包覆而能充分利用，並設定為 200 流明

(1) 設計參數 S 對於光型分佈之影響：

在此探討反射鏡面設計參數 S 對於光型分佈之影響。當 $S = 0$ 表示 $a_x = a_y$ ，反射鏡恢復為一般標準橢圓面，產生左右約 4.5 度、上下約 3 度的光型分佈如圖 8(a)所示，由於反射鏡在圓周方向範圍較光軸方向大，因此產生的配光範圍左右大於上下、並形成左右對稱、上下不全對稱的光型，但此配光範圍遠小於近光燈所需（ ± 9 度以上）的分佈；當 $S \neq 0$ 表示 $a_x \neq a_y$ ，反射鏡的水平橢圓與垂直橢圓為不同軸長，而且當 S 越來越大時，水平橢圓比垂直橢圓越來越大，因此產生配光如圖 8(b)~(d)所示， S 越大時光型分佈越往左右兩側擴散，呈現兩側翹起、左右對稱的弧形配光，由於垂直橢圓大小一直維持不變，因此在 HV 點仍維持上下約 3 度的配光。當 $S = 2$ mm 時（如圖 8(c)所示）光域左右擴大到 9 度，已符合近光燈光型的基本要求（左右超過 9 度以上）之寬廣扁平的配光，因此將以此光型應用至下一節其他參數之設計。並由上述結果可知此新型反射鏡面的配光控制僅需調整一個設計參數，所以相當有效率。

(2) LED 光源位置的分析：

由上述一系列分析可知，本文所設計的複合式橢圓型曲面可充分利用 LED 的特殊發光光型，搭配投射透鏡產生的光域分佈呈現兩側翹起、左右對稱的弧形配光，反射鏡面設計參數適當調整時可產生左右超過 9 度以上（近光燈光型的基本要求）之寬廣扁平的配光，尚需借



助後續遮光片的設計阻擋暗區部份的光束以產生清晰之明暗截止線。

陸、遮光片的設計

本文嘗試採用平面設計的遮光片，以減少製造上的難度、降低實際製造上的門檻，而且要能適合 LED 光源特性。如圖 9 所示遮光片的形狀呈朝下之扇形，左側上緣呈 15 角度向下傾斜、右側上緣為水平並與水平線相距 D 之高度，加上的遮光片的投射式光學系統組件與光線追跡示意如圖 10 所示。接下來探討距離 D 之設計，當 $D = 0$ 表示遮光片上緣切齊水平位置，產生的配光如圖 11(a) 所示，通過的光束太多卻破壞了水平明暗截止線，因此遮光片應上移；當 $D = 1 \text{ mm}$ 時產生的配光如圖 11(b) 所示，阻擋掉太多的光束使得通過的光域面積減少很多、而且中心最亮部分亦減少甚多；當 $D = 0.6 \text{ mm}$ 時產生的配光恰位於水平線下方如圖 11(c) 所示，因此本例之結果最佳。

柒、歐規近光燈配光標準之測試

本文在設計此 LED 投射式光學系統的各主要光學元件及各元件間的整合測試時，皆朝符合歐洲法規近光燈規範的光型分佈設計，最後的光域分佈如圖 11(c) 所示，左右分佈各約 11 度、最下方只到 4 度之寬廣但不高之配光、明暗截止線十分清楚，表 1 為歐規 ECE R112 右行車系近光燈亮區各個測試點及測試區域上認證規格照度要求值與本文之光學設計值之比較，結果證實本文發展之近光燈設計實例的每個量測點與區域皆可符合法規需求。

捌、結論

本文研發符合歐洲法規規範的白光 LED 近光燈的照明設計，產生之配光左右分佈各約 11 度、最下方只到 4 度之寬廣但不高之配光、水平及 15 度之明暗截止線十分清楚，各個測試點及測試區域皆可符合 ECE R112 配光標準，LED 光源流明數需求僅 200 Lm。若採用目前全世界單顆最亮的 1 Watt 白光 LED，近光燈僅需 2 顆，都是目前國內外已有研究中使用最少 LED 數量的新嚐試，符合本文以使用最少顆 LED 為設計方向之目標。

參攷文獻

- [1] 照明/太陽光電專輯，電機月刊，第 254 期 2 月號，2012.02。
- [2] (LED)車用光電特刊，光學工程季刊，第 110 期，2011.10。
- [3] 陳逸民，全球車用 LED 產業與市場，光連雙月刊，頁 67-70，No.88，2010.07。
- [4] P. Albou, LED Module for Headlamp, SAE Tech Paper Series 2003-01-0556, 2003。
- [5] Light-Emitting Diodes in Automotive Forward Lighting Applications: Materials Engineering

- Solutions to Fundamental Challenges, SAE Tech Paper Series 2004-01-0225, 2004.
- [6] Studies for Headlamp Optical Design Using Leds, SAE Tech Paper Series 2004-01-0434, 2004.
- [7] An Automotive Forward Lighting Optical System Using Leds, SAE Tech Paper Series 2004-01-0436, 2004.
- [8] Led Headlamps, SAE Tech Paper Series 2004-01-0437, 2004.
- [9] Necessity of New Approaches for LED Headlamp Design, SAE Tech Paper Series 2005-01-0448, 2005.
- [10] LED Headlamps – High Efficient Optical System, SAE Tech Paper Series 2005-01-0860, 2005.
- [11] LED Headlamp Development for Mass Production, SAE Tech Paper Series 2008-01-0339, 2008.
- [12] LED Solutions for Mainstream Penetration in Automotive Lighting, SAE Tech Paper Series 2011-01-0116, 2011.
- [13] Future Opportunities with LED Front Lighting, SAE Tech Paper Series 2012-01-0264, 2012.
- [14] 孫慶成，LED 頭燈設計原理介紹，AFS 暨 LED 頭燈系統研發技術研討會，財團法人車輛研究測試中心主辦，2004，12 月 2~3 日。
- [15] 彭偉捷，李宗憲，馬仕信，孫慶成，許日滔，高功率 LED 汽車近光頭燈設計，光學工程，90 期，頁 83-89，2005.06。
- [16] 許日滔，高效能 LED 頭燈設計，車輛研測資訊，45 期，頁 8-19，2005.03。
- [17] Hsu, J. T. and Wang, W. L. Automotive Forward Lighting with Use of High Flux White Light-Emitting Diodes, SAE Tech. Paper 2006-01-0104, 2006.
- [18] 劉源昌、賴添興，聚焦非球面厚透鏡的光學設計，光學工程季刊，頁 49-56，第 79 期，2002.09。
- [19] 劉源昌、黃浩榮、賴豈俊，LED 前霧燈光學設計之研究，工程應用技術學刊，第 2 卷第 1 期，2012.12。



表 1 歐規 ECE R112 近光燈配光標準與本文設計值之比較

測試點		本文設計值	認證規格(Lux)
1	Point B50L	0	≤ 0.4
2	Point 75R	12.2	≥ 12
3	Point 75L	8.6	≤ 12
4	Point 50L	13.1	≤ 15
5	Point 50R	13.9	≥ 12
6	Point 50V	12.9	≥ 6
7	Point 25L	2.8	≥ 2
8	Point 25R	2.7	≥ 2
Any point in zone III		< 0.7	≤ 0.7
Any point in zone IV		> 3	≥ 3
Any point in zone I		$< 2 \times 13.9$	$\leq 2 \times (E_{50R})$

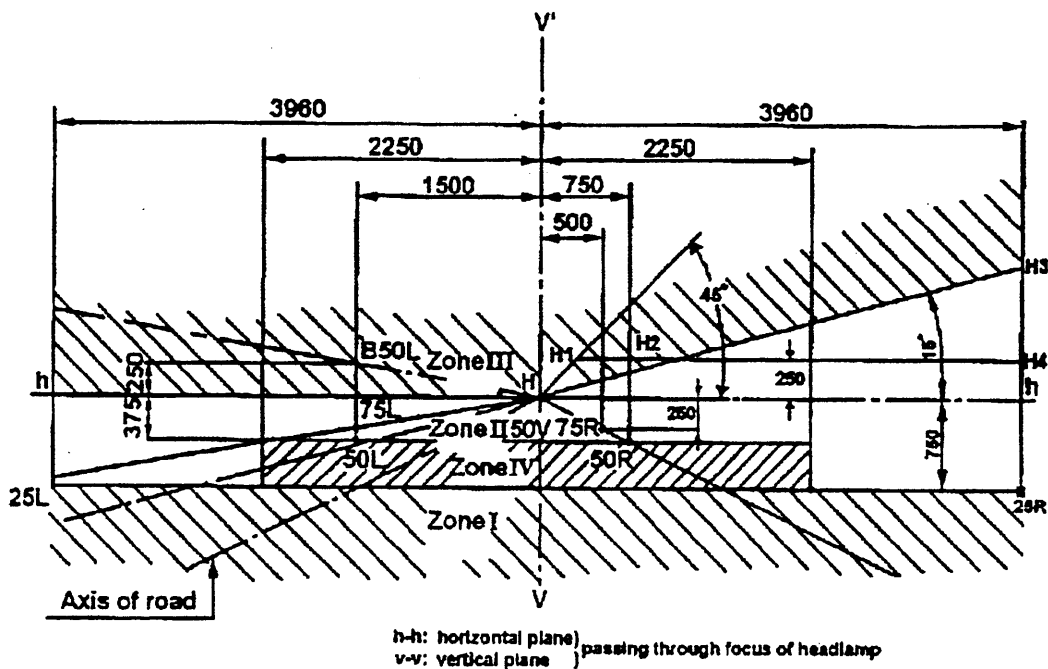


圖 1 歐規 ECE R112 近光燈規範要求的光型與測試點

Typical Representative Spatial Radiation Pattern for White Lambertian

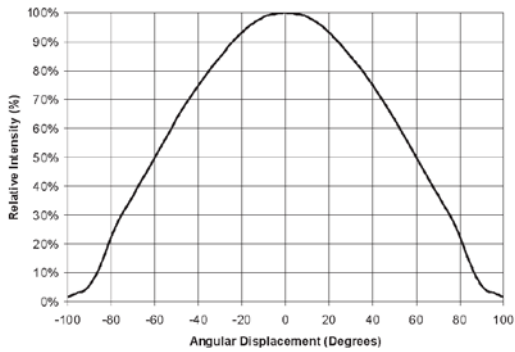


Figure 22: Typical Representative Spatial Radiation Pattern for White Lambertian.

Typical Polar Radiation Pattern for White Lambertian

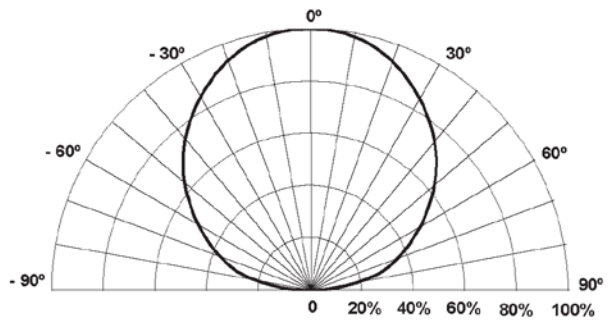


Figure 23: Typical Polar Radiation Pattern for White Lambertian.

圖 2 LumiLeds 最主要的 Spatial Radiation Pattern—Lambertian

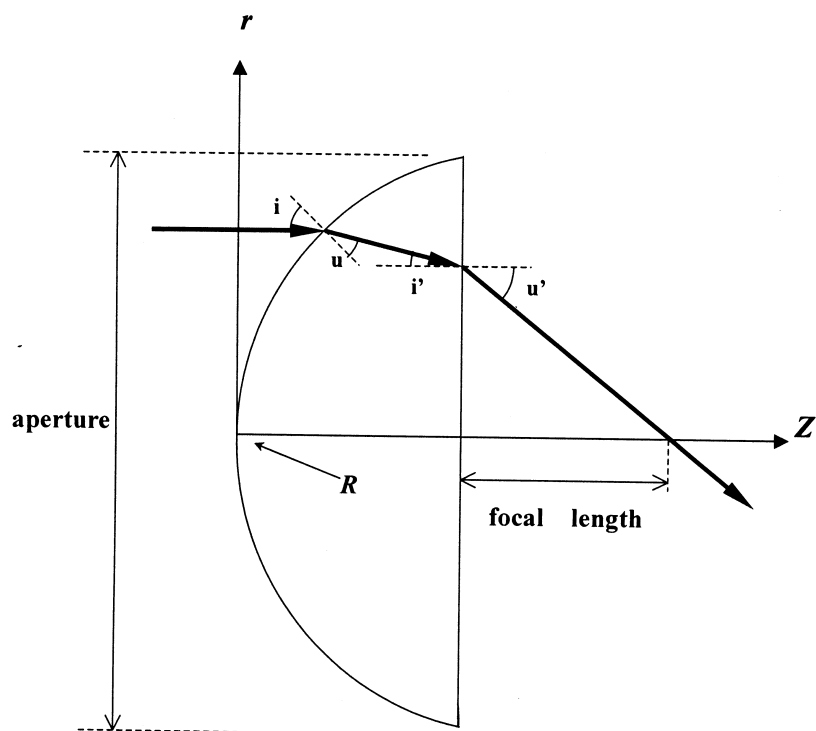


圖 3 平行光通過非球面透鏡之光跡路徑相關參數



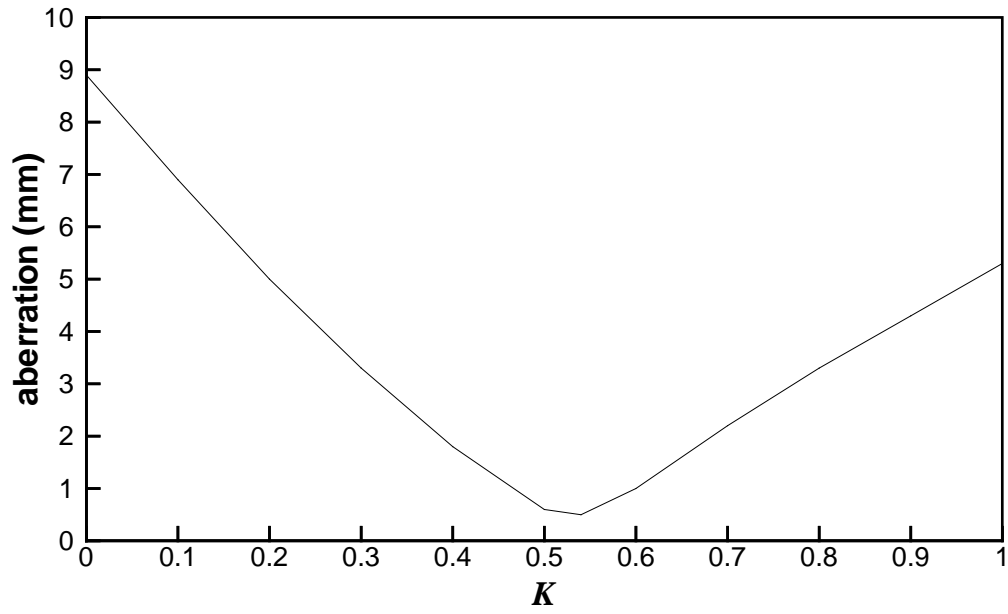


圖 4 不同可調整之係數 K 對於球差值之影響

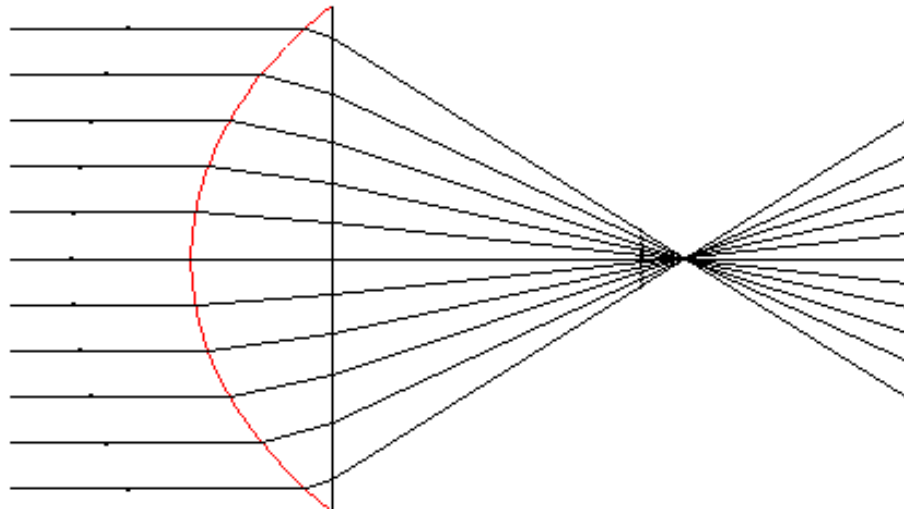


圖 5 非球面透鏡之聚焦情形

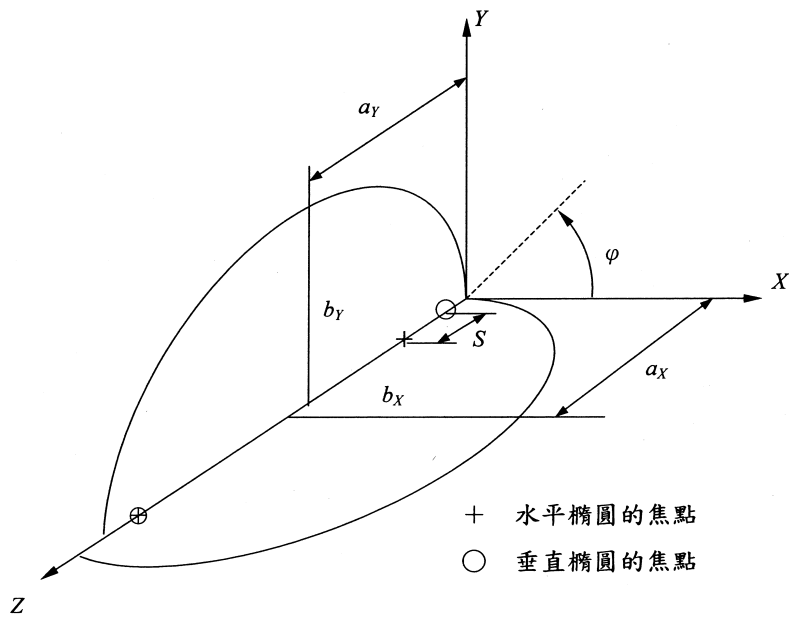


圖 6 複合式橢圓曲面設計之幾何關係圖

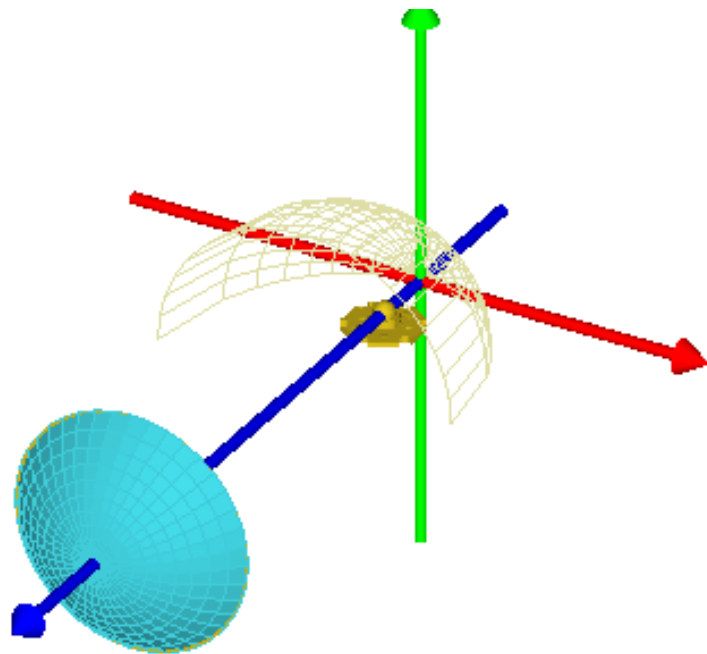


圖 7 投射式反射鏡面搭配投射透鏡



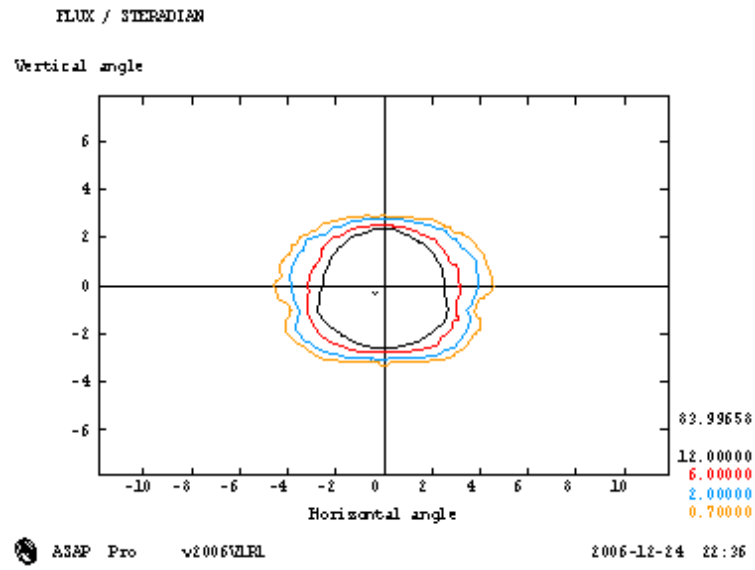


圖 8(a) 配光圖 (S = 0 mm)

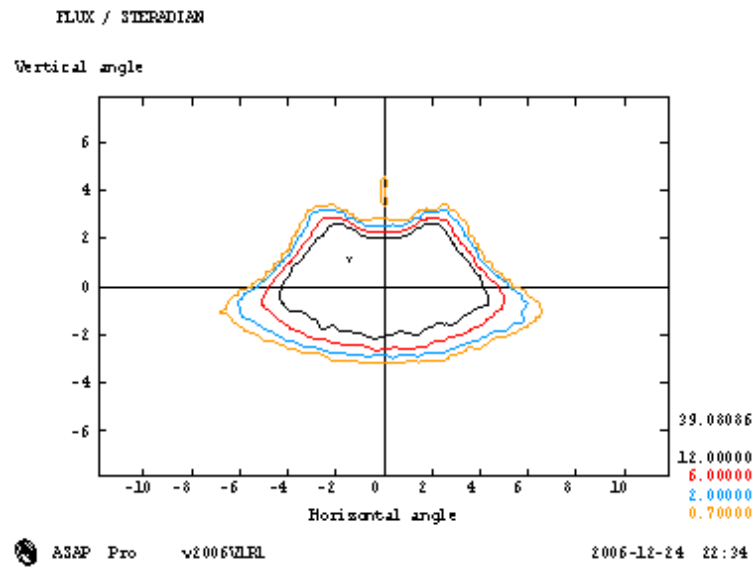


圖 8(b) 配光圖 (S = 1 mm)

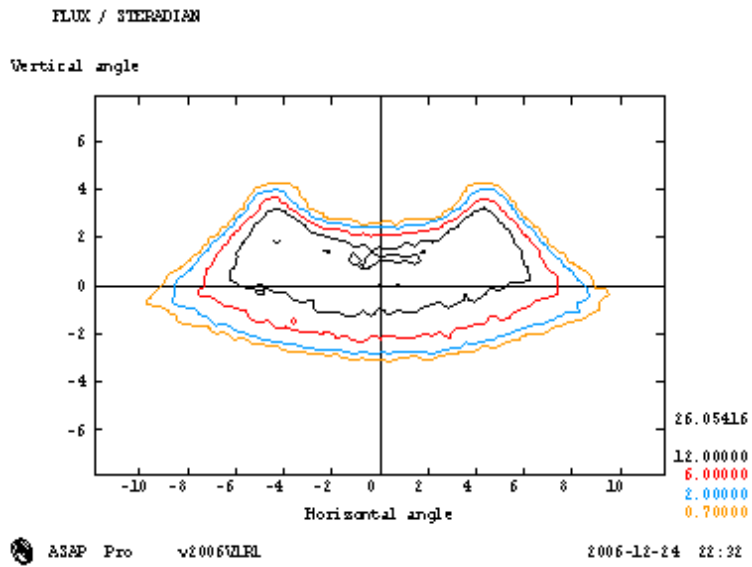


圖 8(c) 配光圖 (S = 2 mm)

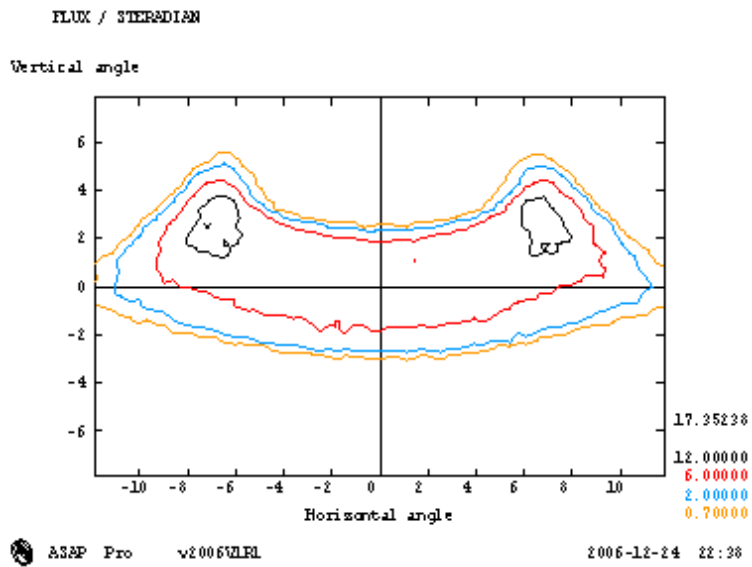


圖 8(d) 配光圖 (S = 3 mm)



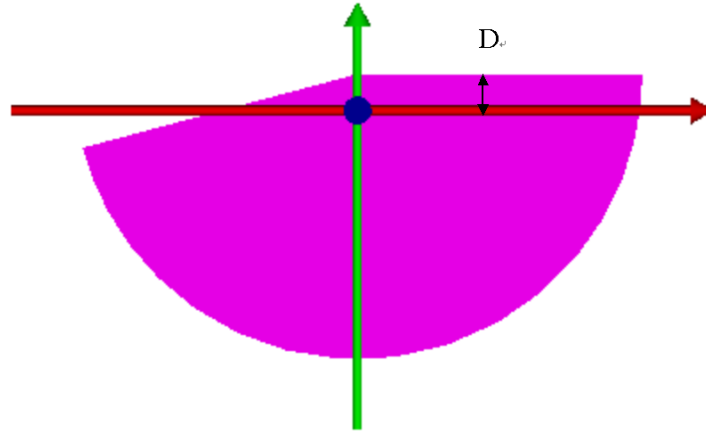


圖 9 遮光片的形狀

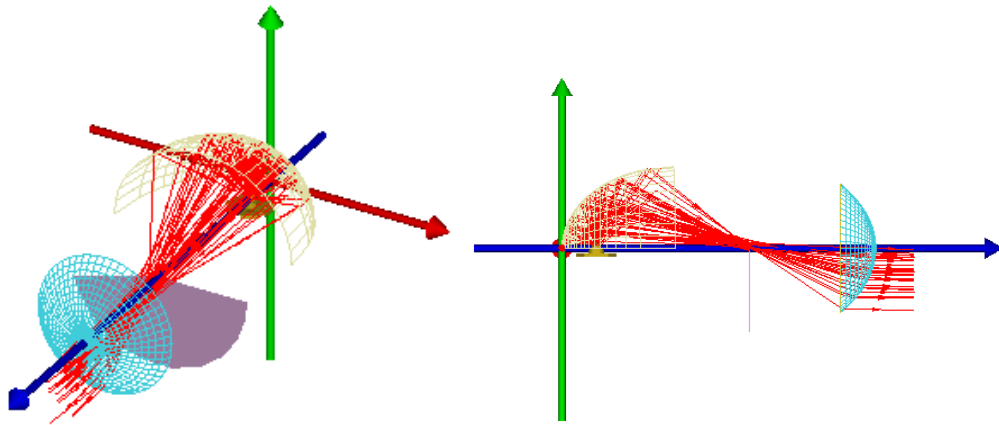


圖 10 LED 近光燈採用的投射式光學系統

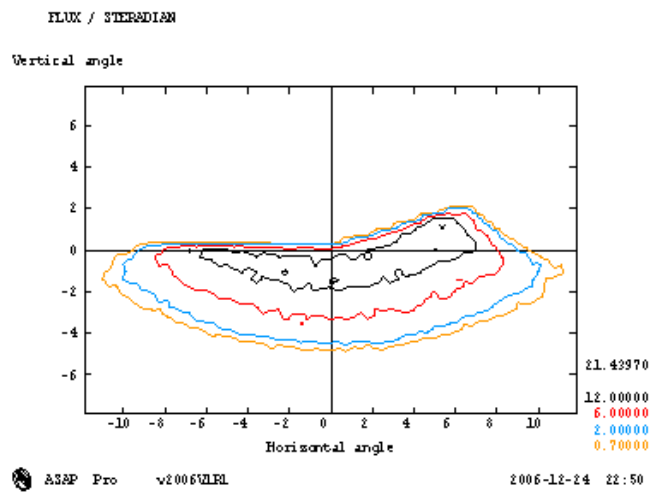


圖 11(a) 配光圖 ($D = 0 \text{ mm}$)

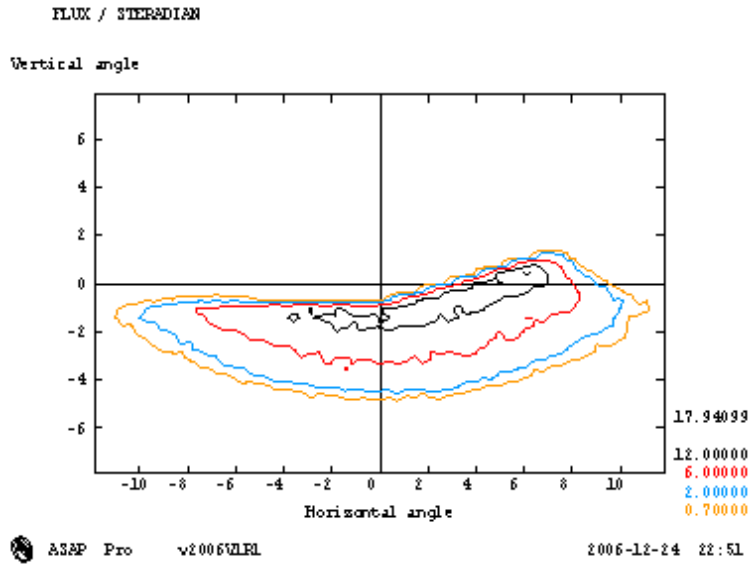


圖 11(b) 配光圖 (D = 1 mm)

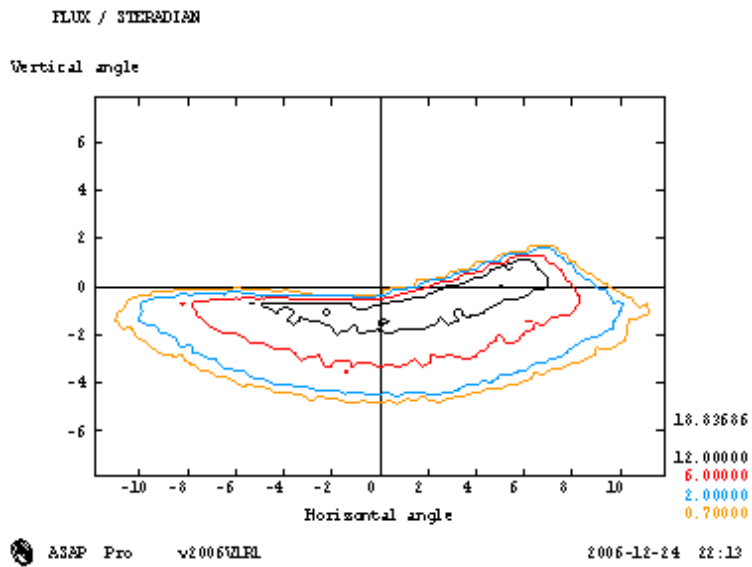


圖 11(c) 配光圖 (D = 0.6 mm)



Study for LED Vehicles Low Beam Optical Design

Abstract

Optical design for vehicles low beam with the high power LED to meet ECE R112 standard is studied in this paper. The new concept form of the reflector with Poly-Ellipsoid-System, the fan-shaped shield, and the projection lens with aspherical surface are proposed and examined their performance by means of the ray tracing method. The final light distribution can quantitatively meet the ECE R112 regulations.

Keywords : Optical design, Low beam, LED