

以矽基蝕刻角錐特徵進行LED側光整合式導光板的最佳化設計

陳宗男、張簡少棠、余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

經濟部在地型產業加值學界科專計畫編號：97-EC-17-A-07-S1-108

國科會計畫編號：NSC 97-2221-E-327 -011 -MY2

摘要

本文應用非等向性矽基濕式蝕刻於整合式導光板的設計與製造，配合具有蝕刻深度終止層的 SOI 矽基板，可製作出高精度的截頂角錐狀微特徵結構，以作為模仁薄板取代之電鑄起始層，利用蝕刻精準特性，製作出高精度且高重複性的鍍基薄板取代之。並分析角錐方位與入光稜鏡面設計之光學性質，發現 90°LED 入光稜鏡面配合 45°轉向之角錐，其出光角度分佈具有對稱與軸向集光的特性。文中以 3.5 吋 LED 光源導光板作為載具，應用 Fuzzy 最佳化來進行微特徵的分佈，藉由區塊間的平均輝度差異，自動調配微特徵間距疏與密，以提升整體的照度均勻性，因所提出的微結構出光特性與特徵密度分佈，可不藉由下擴散與稜鏡光學膜片，而達到提升軸向光強度的目的。此整合式導光板的設計，可達到薄形化、高輝度及低成本的目標。

關鍵字：非等向矽蝕刻、整合式導光板、模糊最佳化。

1. 前言

背光模組在主動矩陣驅動式液晶顯示器中扮演關鍵的角色，典型的背光模組包含了燈源(light source)、導光板(light guide plate)、反射片(reflector sheet)、擴散片(diffuser sheet)與增亮膜(prism sheet)等如所示，冷陰極管(cold cathode fluorescent lamp, CCFL)和光二極體(light emitting diodes, LED)為主要的燈源，但須藉由導光板上的微特徵設計與分佈，將點或線光源轉化成均勻的面光源。隨著市場需求，背光模組漸趨薄形化、輕量化、低耗能、與低成本的目標發展，整合式側光LED導光板，除可減少背光模組厚度外，尚可提高亮度與降低成本，因此成為未來的研發的重點。

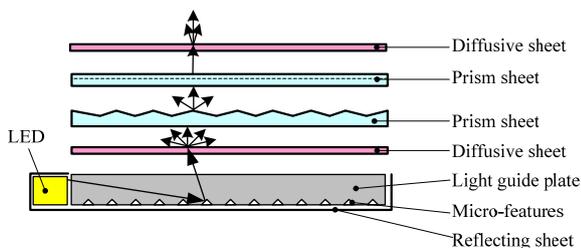


圖 1 傳統背光模組示意圖

微特徵的尺寸與密度分佈影響導光板的亮度與均勻性，多數的導光板設計有專利保護，均勻或隨機微特徵分佈為最基本的設計[5]。因為反射的光線與特徵密度成比例，因此也有文獻提出以一維線性或曲線方式進行特徵密度分佈[6]，特定的分佈曲線雖然簡化了分佈設計，卻限制輝度均勻性的最佳化。另一方面，因為LED光源則需考量二維的佈點設計，有些研究將導光板劃分為很小且特徵均佈的區塊，再使用最佳化的方法來搜尋每個區塊的最佳密度設計[4][7]，或有藉由模糊最佳化的方式，進行佈點密度的自動化[3]。

導光板的製造方式分為印刷式與非印刷式，印刷式導光板是將高分子網點印刷在基板上，非印刷式則是將微光學特徵設計以射出或熱壓的方式一體成形。非印刷式導光板通常有較優異的光學表現，一般可分類為噴砂、模仁蝕刻、微切削與LIGA-like模仁。噴砂的方式因無法精準定位且再現性低，造成光學特性表現不佳。以高速鑽石切削製造V型溝槽模具，因具有優異的光學特性與尺寸精度，成為目前業界研究的重點，但設備較昂貴，且需考量刀具的磨耗對特徵精度的影響，且其特徵分佈只能為規則的矩陣排列，若因應LED佈點必須是二維的任意分佈，則有應用上的困難。LIGA-like製程結合微影與電鑄製程著作模仁的薄板取代之(Stamper)，具有高精度與光學特性，可精準的製作二維任意佈點，成為學者積極研究的課題，但現有方法主要以光阻回熱來形成微透鏡，特徵曲率受光阻塗佈厚度與介面特性影響，光學特性不易掌握。

近年來由於光學模擬軟體如TracePro、ASAP與LightTools的發展，被廣泛使用在微結構光學特徵分佈以尋求輝度與均勻性的最佳化。然而特徵幾何設計是聯結設計與製造的關鍵，如果所設計的特徵結構與分佈無法被具體且精確的實現，光學模擬所尋求最佳化設計的改善將是徒勞。使用矽基非等向蝕刻配合電鑄可製作出V溝與角錐的微結構，可用來導光板與增亮膜[1][2][8]的模具製作，這種簡單的特徵結構有助於光學模擬的準確性，有助於模擬設計的體現，但蝕刻所造成的尖點，容易造成模具的磨損與成形的困難。

本研究利用SOI 矽基板並結合矽基非等向性蝕刻的製程，製作出高精度的截頂角錐微特徵，並分析不同矽基蝕刻特徵光學特性，藉由特徵稜面角度的安排，使其出光折射得到如典型外加兩片正交稜鏡片來提升軸向光強度的效果，以單一導光板取代傳統導光

*聯絡作者：jcyu@ccms.nkfust.edu.tw

板外加擴散片與增亮膜片(BEF)的使用。並運用模糊最佳化於特增密度的分佈，達到均勻出光。

2. 導光板的製作

矽晶圓非等向性濕蝕刻時，其基本形狀由蝕刻速度最慢的[111]面所定義，若是使用{100}的晶圓，其蝕刻出來的斜面角度為 70.5° ，而{110}的晶圓蝕刻出來的斜面角度為 109.5° ，蝕刻形狀在[111]面自然停止，若配合SOI晶圓作為蝕刻深度控制，則可蝕刻出截頂之結構如圖2所示，由於蝕刻表面為晶格面，而特徵大小由微影的精度決定，一般可達 $2\ \mu\text{m}$ ，且角度非常準確，表面粗糙度也可達到奈米等級。且可藉由光罩對準角度的設計，來旋轉微特徵來進行任意位置的特徵分佈。

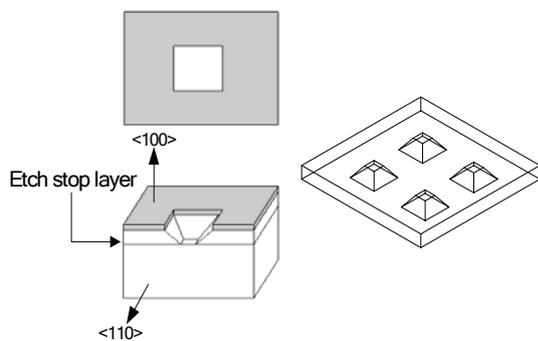


圖 2 化學溼蝕刻所形成的形狀

本研究所採用的Stamper製程以矽基板非等向性蝕刻配合蝕刻深度終止層，製作高重複性與高精度的截頂角錐微結構，再於表面蒸鍍沈積一層金屬層，作為電鑄的起始層，藉由微電鑄製作出精密的鍍基金屬或者是鍍鈷合金之模仁薄板取代，其詳細的流程如圖3所示[11]。

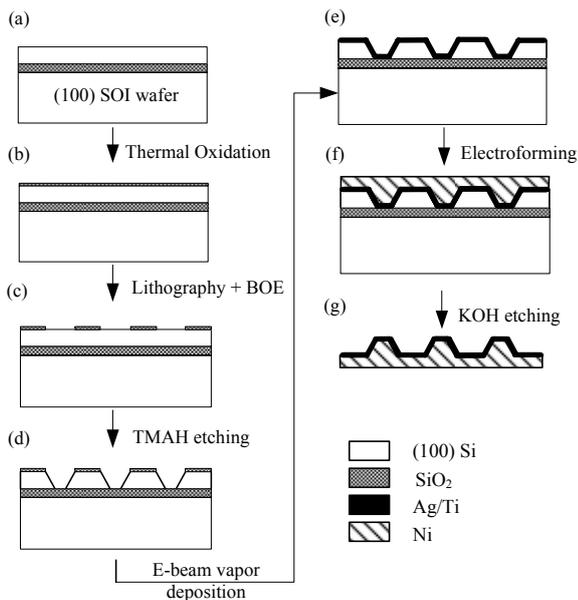


圖 3 模仁製作流程圖

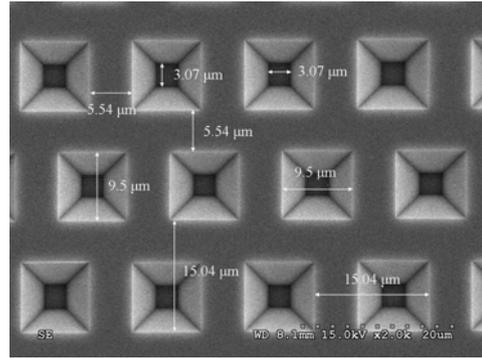


圖 4 化學溼蝕刻所形成的截頂角錐 SEM

3. 導光板光學模擬

3.1. 背光模組建立

本文是以3.5吋、長度為72.73 mm、寬度為57.95 mm、厚度為0.76 mm之導光板做為研究載具，並以TracePro分析軟體對導光板進行光路模擬。背光模組模擬的元件包括有導光板、白光LED、燈罩、反射片、光學稜鏡片等，如圖5所示。而光線數的選擇與光源的性質、模組的大小以及微特徵的結構等都有影響，為平衡模擬成本與準確性，經模擬結果的收斂性分析，每個LED光源採用三十萬條光線數做為後續光學模擬設定。

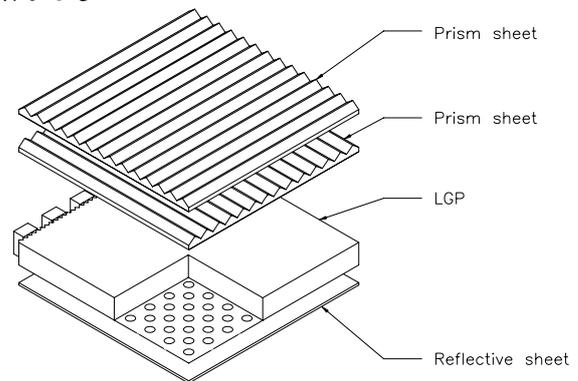


圖 5 典型背光模組的組合示意圖

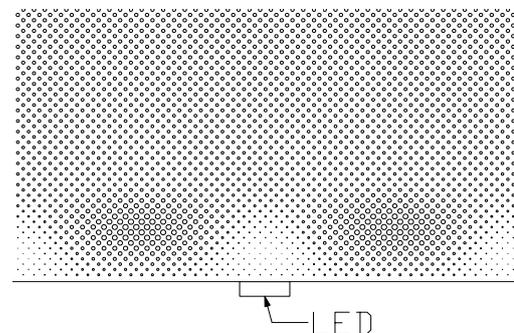


圖 6 典型導光板圓點微結構分佈示意圖

以市售3.5吋側光背光模組為對照組，其導光板微結構採用圓點做為佈點設計如圖6所示。以點密度

排列的導光板經 TracePro 線性最佳化的光強度分佈，出光效率為 84%，照度均方差為 346 lux，平均照度 5573 lux，如圖 7 所示。正軸向光強度為 3.7 cd，垂直燈源排列方向光強度分佈尚稱對稱，但在 LGP 沿光行進方向的出光角度在與軸向夾角 55° 的地方有較高的光強度 8.8 (cd)。一般為矯正出光偏向的問題，會採用下擴散片，將出光模態變為 Lambertian 分佈，小型背光模組為節省成本，往往省略下擴散片。

而為提高導光板的軸向輝度，傳統會加入一片與光行進方向平行的下稜鏡片及一片與光行進方向垂直的上稜鏡片，將出光角度集中到軸向。在本分析例以 TracePro 模擬加上兩片稜鏡片後的平均照度為 3585 lux，均方差為 175 lux，因稜鏡片的折反射與吸收損失照度，出光效率降為 77%，如圖 8 所示。在經過兩片稜鏡片後其光強度分佈明顯看出藉由稜鏡片折射出光角度往軸向集中在 $\pm 30^\circ$ 之內，雖然出光方向仍略為偏向 LED 的另一側，與軸向夾角 18°，但軸向光強度已由 3.7 (cd) 增加到約 18.1 cd。

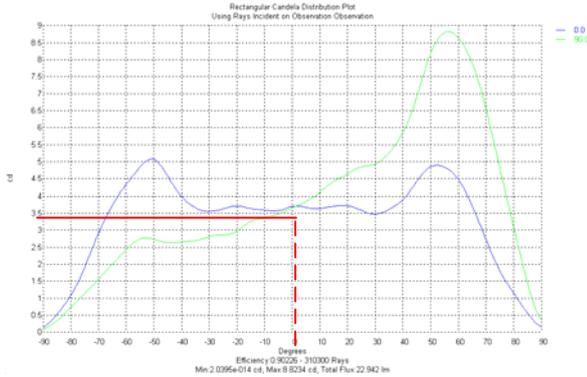


圖 7 以 TracePro 模擬導光板的出光角圖

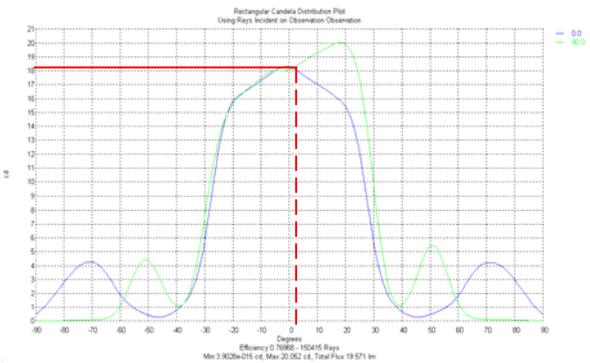


圖 8 導光板上加上二片稜鏡片的出光角圖

4. 整合式導光板設計

本文以所提出的薄板取代製程的微結構進行佈點設計，在先前研究中討論特徵尺寸、溝槽間距及截頂量大小等，進行分析及比較，顯示特徵大小 $10 \mu\text{m}$ 時光通量與輝度值最高，且溝槽開口較小有助於輝度的提升等[9]。另外在射出成型或熱壓成型時，考慮成品轉寫性的問題，角錐微結構其尖端的地方無法完

全的轉寫，最小的允許量通常為 $2 \mu\text{m}$ ，因此本研究採用底寬 $10 \mu\text{m}$ ，截頂寬度 $2 \mu\text{m}$ ，高度約為 $5.7 \mu\text{m}$ 的截頂角錐，藉由光罩對準的設計，截頂角錐旋轉 45° ，呈現類似菱形的微結構[12]。截頂寬度係考量成型可製造性、光學特性與模具耐磨性等，易準確控制的尺寸精度。

導光板在 LED 入光面加上具有 V 形稜鏡微結構，以增加 LED 的發散角度，避免光源附近亮度不均的現象。本文研究入光側稜鏡角度配合 45° 配置之截頂角錐對 LGP 出光角度分佈的影響，其配置如圖 9 所示， θ 變化為 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 與無稜鏡。

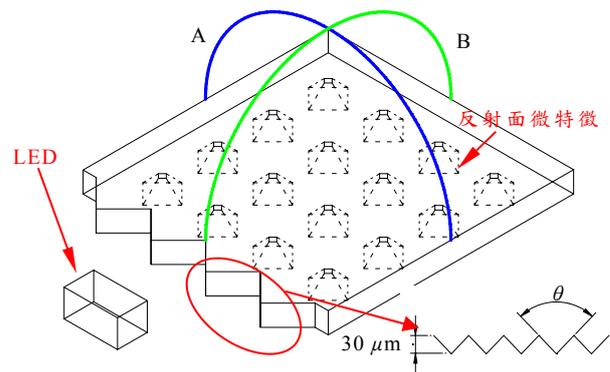


圖 9 反射面放置底為 $10 \mu\text{m}$ 正角錐示意圖

A 視角出光分佈因為是垂直光源方向的关系，所以光強度分佈都是左右對稱的，圖 10 為不同入光側稜鏡角度的出光分佈圖，其中在 θ 為 180° 表示沒有稜鏡時，出光有左右兩側的峰值，在軸向反而光強度最弱，而 θ 為 90° 時則出光往軸向集中。再觀察 B 視角，因為是平行光源方向的关系，出光角度偏向 LED 的另一側，在 θ 接近 30° 或無稜鏡時都沒有聚光的效果，在 θ 越接近 90° 時聚光效果越明顯，直到 θ 為 90° 時，軸向光強度 cd 值最高如圖 11 所示。

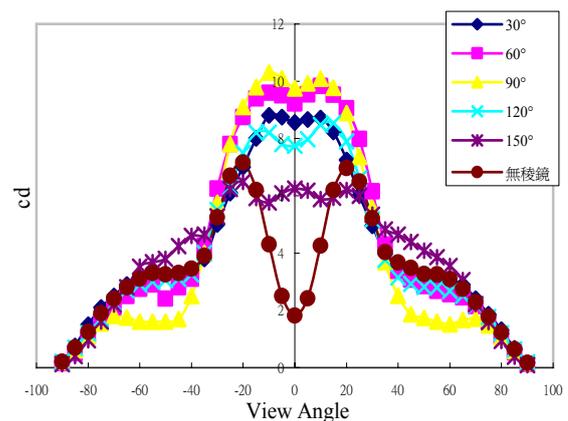


圖 10 A 視角的光強度分佈圖

因此所得到的結論是菱形角錐配合入光面 90° 的組合設計，軸向光強度最大值可到達 10 cd 左右，出現如同稜鏡片將出光集中到正向光的效果，因此只需要一片導光板即有傳統背光模組中的導光板上

兩片稜鏡片的效果，達到整合式導光板的目的，不僅可降低製造成本，同時更可提高光的使用效率。

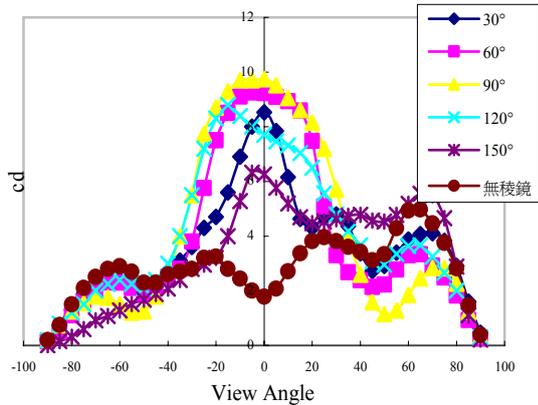


圖 11 B 視角的光強度分佈圖

5. 特徵分佈最佳化設計

導光板出光的均齊性會受到特徵密度分佈的影響，一般離光源越遠的部分，其特徵密度會較大，另一方面，因為LED類似點光的出光特性，在LED前方與LED之間的部分，其特徵密度分佈也要不同，因此LGP的密度分佈需以二維分佈的方式來提升其均齊性。為簡化導光板的分佈，首先以參數化的方式來控制分佈，再以模糊最佳化的方式來找尋最佳化的參數設計。

5.1. 特徵行間距參數

本研究將特徵排列成與LED平行的行 (Column)，並將導光板區分為六塊 (region, $R_1 \sim R_6$) 如圖 12 所示，行與行的間距函數以 7 個控制點 (anchor spacing, $s_1 \sim s_7$) 來分佈如圖 13 所示。每個控制點代表在該導光板在 x_i 位置之行特徵與下一行的間距，而控制點之間的行特徵間距則由相鄰控制點間距內差 (interpolation) 而來。例如位於 R_i 的特徵行，其與下一行的距離為 d ，而 d 值則由 R_i 相鄰的行距控制點 s_i 與 s_{i+1} 內插而得，而在行內特徵間的距離採等間距，但隨著行距 d 變動。藉由改變行控制點的大小，可調整 Region 的亮度。當間距控制點的增加，則相鄰 Region 的亮度會下降，反之則上升。利用調整控制點可此依據，使得導光板 Region 間的亮度均勻化。

5.2. 行內的特徵間距參數

上述的特徵分佈適用於線光源如 CCFL 的特徵分佈，但在第 1 個區域因為 LED 燈源的關係，每一個燈源有其照明角度，若每一行內的微特徵只採用等間距分佈，LED 前方與 LED 之間將會產生明暗的區域 (zone)。因此在 y 方向的特徵再依照特徵與 LED 間的距離，進行疏密的分佈以消除區域間的明暗差異，如圖 14 所示。對於特徵行 i 其基本的特徵間距由之前的行間距內插為 d_i 。而使用正弦波的方式來做調變特徵間距其公式如(1)。

$$d_{ij} = d_i + a \times \frac{n-i}{n} \times \sin \left[\frac{2\pi}{m} \times (j-1) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (1)$$

- n : the number of columns in the first region,
- d_i : the column spacing between columns i and $i+1$,
- m : total number of features between two adjacent LEDs in column i ,
- j : the feature number $j = 1 \sim m$, starting from the symmetrical axis of adjacent LEDs, and
- a : the modulation amplitude for the feature spacing in the first region.

在第 2 塊以後的特徵行，因 LED 已逐漸變為均勻的線光源，因此行內特徵間距便採等間距，而公式(1)將確保當特徵行排列至 R_1 與 R_2 的邊界時，調變振幅會逐漸降為 0，使得特徵分佈能平順的分佈，而區域間的亮度差異，可藉由改變震幅 a ，來減少區域間亮度差異。

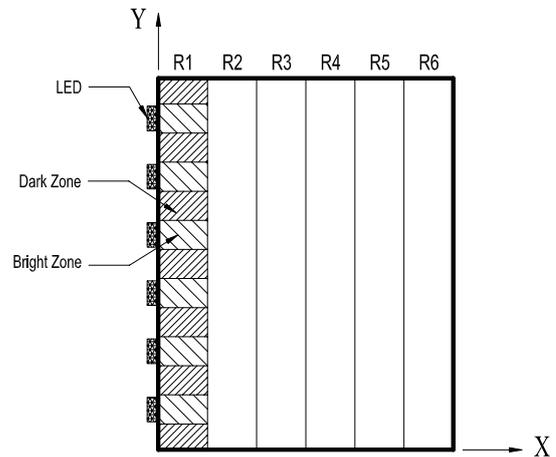


圖 12 導光板區塊分佈示意圖

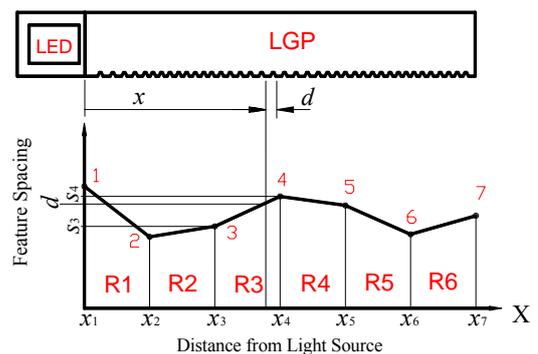


圖 13 導光板行間距的分佈控制函數圖

5.3. 應用 Fuzzy 最佳化分佈

本研究使用 Fuzzy 理論來作為上述 8 個控制參數的調整。所使用的為三角形歸屬函數，在輸入端的歸屬函數方面，共有兩個目標需要做控制，也就是一個

為控制整體亮度的部份，另一個則是控制入光側不均勻的地方。我們定義兩個指標作RIR與ZIR為行間距與震幅的調整。RIR為兩相鄰塊(Region)的平均照度與整個LGP的平均照度的比值。而第一塊分成13個區域(zone)如圖 12所示，ZIR代表亮區的平均照度與暗區的平均照度的比值。

$$\text{Regional Illuminance Ratio (RIR)} = \frac{\text{Average illuminance of adjacent regions}}{\text{Average illuminance of LGP}} \quad (2)$$

$$\text{Zone Illuminance Ratio (ZIR)} = \frac{\text{Average illuminance of bright zones}}{\text{Average illuminance of dark zones}} \quad (3)$$

照度比歸屬度並針對模糊詞進行歸屬度的分類，其模糊詞分為五項，包括有太亮、稍亮、剛好、稍暗、太暗等定義如圖 15所示，而其調整參數的從屬函數則如圖 16所示。由先前所得到的經驗法則得到調整模糊法則如下：

- R1: If RIR is *Too High* then *Increase* the control spacing.
- R2: If RIR is *High* then *Slightly Increase* the control spacing.
- R3: If RIR is *Just Right* then *Maintain* the control spacing.
- R4: If RIR is *Low* then *Slightly Decrease* the control spacing.
- R5: If RIR is *Too Low* then *Decrease* the control spacing.
- R6: If ZIR is *Too High* then *Increase* modulation amplitude.
- R7: If ZIR is *High* then *Slightly Increase* modulation amplitude.
- R8: If ZIR is *Just Right* then *Maintain* modulation amplitude.
- R9: If ZIR is *Low* then *Slightly Decrease* modulation amplitude.
- R10: If ZIR is *Too Low* then *Decrease* modulation amplitude.

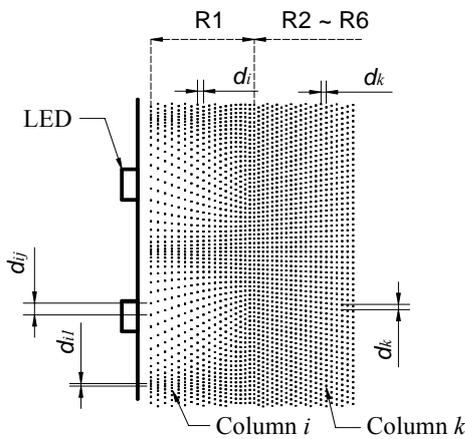


圖 14 以燈源中心作扇形微特徵分佈

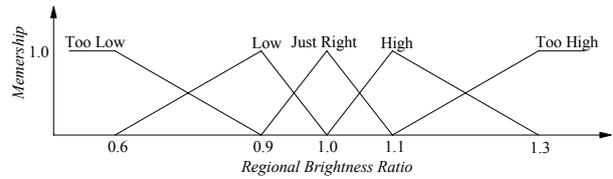


圖 15 各區塊亮度比的歸屬函數(RIR)

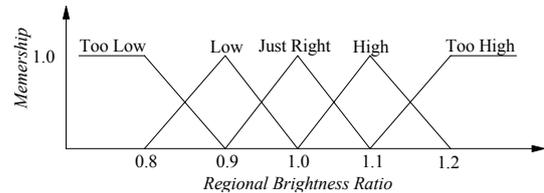


圖 16 LED 前方亮區與暗區亮度比的歸屬函數(ZIR)

再來則是要針對其歸屬度定義其太暗，間距要增大多少倍率，太亮間距要減少多少倍率，在此也定義了兩個改變間距倍率的歸屬函數，接著解模糊化，運用重心法以及Matlab程式來輔助運算反覆進行，以期能達到最佳化的光學設計結果。

5.4. 整合式佈點之最佳化

由前述光學分析之結果，決定以菱形角錐配合 90° 入光稜鏡。從圖 17與圖 18的照度圖可明顯發現在經過模擬之後導光板前方光線不均勻的地方變為均勻，至於光強度分佈則因為菱形角錐本身的聚光作用，每次模擬所得到的結果軸向光強度皆達 11(cd)。

利用照度資料數據配合 Fuzzy 最佳化理論的分析之後，照度平均值 AVE 與均方根值 RMS 如圖 19所示，變化了 16 次之後，RMS 降至 264 lux，AVE 升至 5987 lux，而在照度模擬中，必須訂定一個收斂標準，在此定義的標準為照度標準差最後模擬的三個數值之變異係數要在百分之一以下，在第 16 次之後照度平均值與均方根皆已在百分之一以下，因此判定其已收斂。

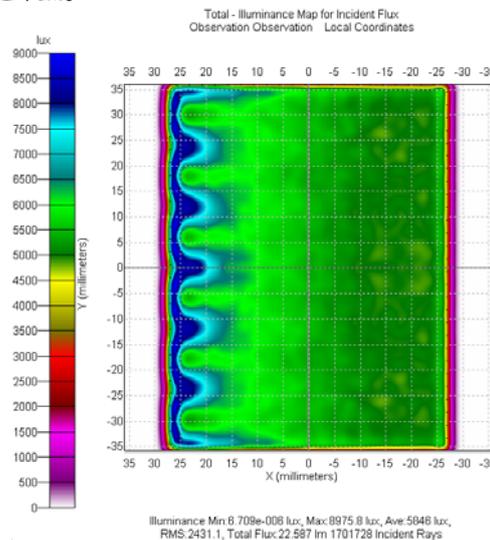


圖 17 等間距分佈照度圖

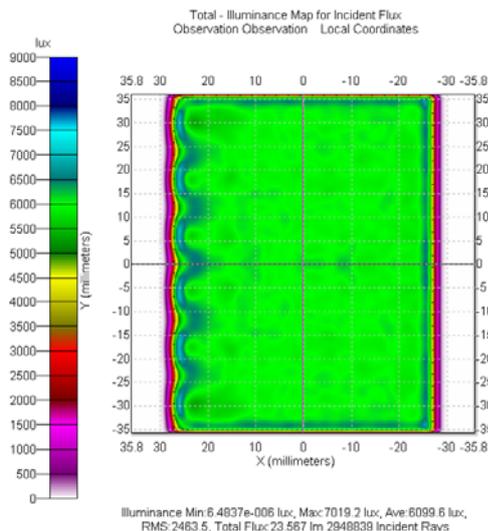


圖 18 最佳化後照度圖

6. 結論

本研究之製程所製成之薄板具有精準的截頂微特徵，且製作出來的特徵均一性高，經由量測截頂角錐的結果， $10\ \mu\text{m}$ 底寬微特徵大小的平面尺寸誤差範圍約在 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ 。應用 TracePro 光學模擬軟體以及 Fuzzy 最佳化理論的分析，進行底寬 $10\ \mu\text{m}$ 菱形角錐雙向聚光整合式導光板的模擬，得到最後的照度為 6099 lux，照度均方差為 264 lux，不只增加了導光板的亮度，更達到聚光的效果，最終可以單面導光板取代傳統導光板加上兩片 3M 的增亮膜片，達到減少厚度與成本及增加光的使用效率。

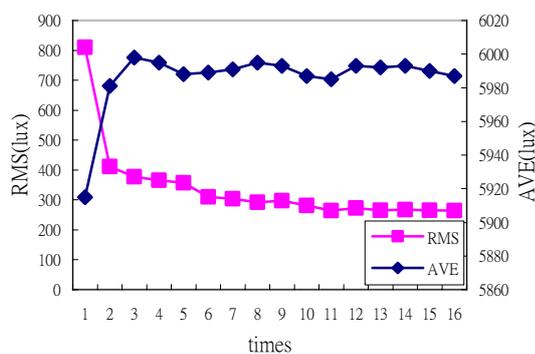


圖 19 照度平均值與均方根關係變化圖

7. 致謝

本研究承蒙經濟部在地型產業加值學界科專計畫經費支持，計畫編號：97-EC-17-A-07-S1-108，與國科會經費支持，計劃編號 NSC 97-2221-E-327 -011 -MY2，特誌謝意。

8. 參考文獻

- [1] C.-H. Chien and Z.-P. Chen, "Fabrication of a novel integrated light guiding plate by microelectromechanical systems technique for backlight system," J. Microlith., Microfab., Microsyst., Vol. 5(4), pp. 043011-1~043011-6, 2006.
- [2] L. Lin, T. K. Shia, and C.-J. Chiu, "Silicon-proceed plastic micro pyramids for brightness enhancement applications," J. Micromech. Microeng. 10, 395-400, 2000.
- [3] J.-C. Yu and P.-K. Hsu "Design Optimization and Stamper Fabrication of Light Guiding Plates Using Silicon Based Micro-Features." Proceedings of the Symposium of Design Test Integration and Packaging (DTIP) of MEMS and MOEMS, Rome, Italy, 1-3 April 2009.
- [4] J.-G. Chang, C.-T. Lee, Y.-B. Fang, C.-C. Hwang, "Generation of random non-overlapping dot patterns for light guides using molecular dynamics simulations with variable r-cut and reflective boundary techniques", Computer Physics Communications, Vol. 177, pp.851-862, 2007.
- [5] H. Taniguchi, Y. Hira, "Liquid crystal display device", US pattern 6099134, 2000/8/8.
- [6] K. Kashima and N. Yoshida, "Back lighting device for a panel," US Patent 5093765, 1992/3/3.
- [7] M. Sendova, "Optimized highly efficient large area modular flat panel display lighting device", US Patent 6132053, 2000/10/17.
- [8] H. Taniguchi et al., "Method for manufacturing a light guide plate", US pattern 6704070B2, 2004/3/9.
- [9] 余志成、徐珮凱(2008) "應用模糊最佳化於矽基微特徵之導光板勻光特徵分佈", 2008 年模具技術與論文集發表會論文集, pp. 50-56, 民國九十七年八月 22 日, 台北世貿展覽中心。
- [10] 李佩君, 2007, 導光板微結構分佈最佳化及模仁薄板取代製程之研究, 國立高雄第一科技大學, 碩士論文。
- [11] 余志成、李佩君, 以含深度終止層之非等向矽基蝕刻作為電鍍中介層之導光板模仁製作方法, 中華民國專利申請中, 申請案號: 96100909。
- [12] J. Yu, S.-T. Zhangjian, and Z.-N. Chen (2009), "Design of Integrated Light Guiding Plates Using Silicon-based Micro-Features," Proceedings of the 10th International Conference on Automation Technology, June 27-29, 2009, Tainan, Taiwan, R.O.C.

Optimal Design of LED Edge-lit Integrated Light Guide Plates Using Pyramidal Microstructure from Anisotropic Etching of Silicon

Zong-Nan Chen, Shao-Tang Zhangjian, and
Jyh-Cheng Yu*

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

Abstract

This study addresses the design of an integrated light guide plate (LGP) to produce a uniform illumination with enhanced axial luminous intensity without use of prism sheets and diffusive sheets. The LGP design applies the micron-sized features fabricated from a novel stamper process that combines anisotropic wet etching of silicon-on-insulator (SOI) wafers with electroforming to fabricate and distribute truncated square pyramid prisms precisely. The truncated square pyramidal features are orientated 45° to light of travel by mask design, which provides a narrow directional luminance distribution along the axial direction similar to the use of conventional two orthogonal prism sheets. By observing the illumination characteristics of LED edge-lit LGP, the distribution pattern of the LGP is transformed into the parameter design of 7 anchor spacing and the spacing modulation amplitude. This study manipulates the distribution parameters using the fuzzy optimization to obtain a LGP design with high illumination uniformity. The optical software program TracePro is applied to simulate the illumination performance of LGP and perform design optimization using Fuzzy theory to maximize the illumination intensity and uniformity by distributing the density of features. A design of 3.5 inch LED edge-lit LGP is used as an illustrative example. The proposed method not only reduces the manufacturing cost of back light modules but also increases the light efficiency.

Keyword: Anisotropic wet etching, Integrated-LGP, Fuzzy theory