

應用模糊最佳化於矽基微特徵之導光板勻光特徵分佈

Application of Fuzzy Optimization to the Pattern Distribution of Light Guiding
Plates using Silicon based Micro-Features

余志成

J.-C. Yu

國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系 副教授

Associate Professor,

Department of Mechanical and Automation Engineering,

National Kaohsiung First University of Science and Technology

徐珮凱

P.-K. Hsu

國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系 研究生

Graduate student,

Department of Mechanical and Automation Engineering,

National Kaohsiung First University of Science and Technology

摘 要

本文應用非等向性矽基濕式蝕刻，配合具有蝕刻深度終止層的 SOI 矽基板製作出高精度的梯形長溝及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，而其微結構的精度是由矽晶圓[111]面蝕刻停止的特性及深度蝕刻終止層的設計，因此可以製作出高精度且高重複性的截頂角錐結構。本文依據此微結構進行導光板微特徵分佈的最佳化設計，以 3.5 吋 LED 光源導光板作為載具，進行整合導光板入光以及反射面的設計，並運用 Fuzzy 最佳化來調整微特徵的分佈，經由 TracePro 光學模擬軟體模擬導光板，藉由區塊間的平均輝度差異，調配微特徵間距疏密，以提升整體的輝度與均齊性，所得設計平均輝度為 2266(nit)，均齊性為 89.91%。

關鍵詞：非等向性矽基濕式蝕刻、導光板、模糊最佳化

Abstract

This study applies a novel fabrication process of molding stamper that combines anisotropic wet etching of silicon-on-insulator (SOI) wafers with electroforming to produce an accurate stamper. Because the geometry of the fabricated feature of SOI using anisotropic wet etching is defined by the [111] crystal plane and the etch stop, the dimensional accuracy and the surface characteristics of the micro features, such as trapezoid-grooves and prisms, are extremely high. This study manipulates the pattern distribution of the micro features to obtain the required optical characteristics. A light guide plate (LGP) of 3.5 inch using LED light source is used as an example for the study of integrated LGP. Trapezoid-grooves and prisms are applied to both side of LGP to achieve the uniformity and brightness enhancement requirements. This study also applies commercial software-TracePro to simulate the luminance performance of LGP and perform design optimization using Fuzzy theory to maximize the luminance intensity and uniformity by distributing the density of features. The simulation results show that the average brightness is 2266 (nit) and the uniformity of LGP arrives at 89.91 percent.

Keywords: Anisotropic wet etching, LGP, Fuzzy theory

1. 前言

液晶顯示器以主動矩陣驅動式液晶中的 TFT-LCD (Thin Film Transistor LCD) 為發展主力。TFT-LCD 並非自發光性裝置，其必須利用外來之光源如：發光二極體 (LED)、冷陰極射線管等，透過背光模組之設計，將原本點或線型光源轉化成高亮度且均一輝度的面光源。而背光模組是由稜鏡片 (Prism)、導光板 (Light Guide Plate)、光源 (Light source)、擴散片 (Diffuser sheet)、反射片 (Reflector sheet) 及外框架等零件組裝而成，如圖 1 所示。背光模組主要目的在於導引光線方向，高輝度與高均齊性為背光源之發光特性的主要訴求，而模組之出光角度直接影響了光使用效率與畫面顯示視角。在模組中又以導光板最重要，因為它控制了光線是否均勻發散出去的關鍵。

背光模組已日趨薄形化、輕量化、高輝度、低耗能、高 NTSC 及低成本的目標發展，LED 光源的背光模組較為符合薄形化與輕量化需求，但 LED 在模擬時常會出現入光區的光源處產生暗帶或太亮的問題，帶有微稜鏡結構的光源線性化裝置[2]，可使點光源轉換成線光源，而照明效率也可以達到 80%到 90%。或在導光板入光面間加入側向反射片[3]，讓光線束先在燈罩中均勻反射，再進入導光板中，以改善入光面光線集中的現象。

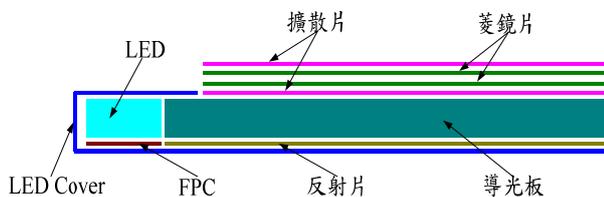


圖 1 背光模組示意圖

藉由導光板反射面特徵的分佈，以提升輝度及均齊性為光學設計的重點，許多學者多使用田口最佳化的方法[4][5][6]，或分子動力學 (Molecular Dynamics) 的原理分佈微結構，達到特徵疏與密的最佳排列[7]。而一般非印刷式導光

板模仁的製作，常使用的製造方法有噴砂 (Sand-burst)、蝕刻 (Etching)、微切削加工 (slot-cut)、與 UV-LIGA 等[8]，但噴砂網點圖形受限制，精度差，且網點的位置也控制不易、影響光學表面、特徵重複性較差與底切的問題。而微切削加工專用的機台成本高，機台控制與鑽石刀具的磨耗也是一項挑戰。UV-LIGA 的光阻網點幾何曲面受微影與迴熱條件影響，所以不易事先規劃。另外，在射出成型或熱壓成型時，會考慮成品轉寫性的問題，一般的 V 形長溝與角錐微結構，其尖端的地方均有無法完全轉寫的問題。

所以本研究將利用 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，而其微結構的精度是由矽晶圓[111]面蝕刻停止的特性及深度蝕刻終止層的設計，因此可以製作出高精度且高重複性的截頂角錐結構。並以此微結構，再配合 Fuzzy 的最佳化方法進行光學模擬，使微特徵間距作疏與密的調配，以達到高輝度與均齊性的光學特性。

2. 導光板薄板取代之製作

矽晶圓非等向性濕蝕刻其基本形狀由蝕刻速度最慢的[111]面所定義，在 $\langle 100 \rangle$ 晶圓上蝕刻的斜面角度為 70.5° ，而 $\langle 110 \rangle$ 晶圓上蝕刻的斜面角度為 109.5° ，蝕刻形狀在[111]面自然停止，因此可蝕刻出 V 形溝槽與到金字塔之角錐結構。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。但其自然停止的蝕刻深度受開口寬度影響，不同寬度之開口會造成特徵高低不一的情形，若單純以時間控制蝕刻深度，在完成 V 形特徵前停止蝕刻來控制蝕刻深度，因影響蝕刻速率均勻性十分複雜，不容易精準控制不同位置之特徵蝕刻深度，因此本研究將採用蝕刻深度終止層的設計來控制導光板微結構的高度。

本研究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梯形溝槽與

截頂角錐微結構，再於表面濺鍍或蒸鍍沈積一層金屬層，作為電鑄的起始層，再藉由微電鑄製作出精密的鎳基金屬或者是鎳鉻合金之模仁薄板取代[9]。目前已完成 SOI 晶圓製作出梯形長溝與截頂角錐（圖 3）之薄板取代，特徵角度 70.5° ，微結構大小 $70\mu\text{m}$ ，間距 $10\mu\text{m}$ 。

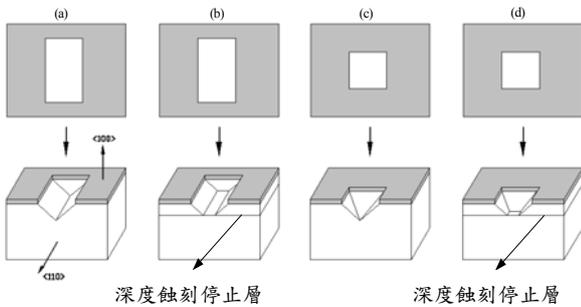


圖 2 $\langle 100 \rangle$ 矽晶圓不同尺寸之矩形蝕刻窗與深度停止層在化學溼蝕刻所形成的形狀

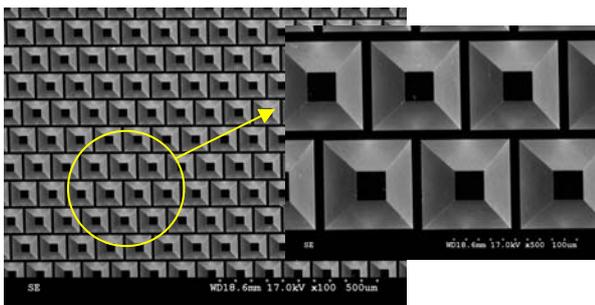


圖 3 電鑄後之截頂角錐薄板取代 SEM 圖

3. 導光板光學分析

3.1 背光模組建立

本研究以 3.5 吋、長度為 72.73mm 、寬度為 57.95mm 、厚度為 0.76mm 之導光板為設計載具，並以 TracePro 光學分析軟體針對此導光板進行光路模擬。其元件包括導光板、白光 LED、燈罩、反射片、前端遮蔽區、平行方向與垂直方向的 3M BEF 片、LED 入光分佈觀察斷面以及背光模組出光觀察面等。白光 LED 光通亮數值為 4.23781 lm 以利進行光學模擬軟體的分析，並採用三十萬條光線數以做為光學模擬[10]。

3.2 導光板入光面特徵設計

導光板入光面係利用如圖 4 所示之模組來進行分析，並採用六顆 LED 的方式，以及在導光板 LED 入光面加上 V 形稜鏡的設計，並變化稜鏡角度與深度，且於離入光面 3mm 處設置一 LED 入光分佈觀察斷面，觀察入光特性，以期得到較均勻的入射光。透過 TracePro 光學模擬軟體模擬 V 形稜鏡的深度及角度其平均照度與照度均方根的影響，而經由初步分析結果發現，LED 入光面若無加上微結構，光線即集中在 LED 的前方，反之，若 LED 入光面加上具有 V 形稜鏡微結構後，即有助於增加光源的分散，增加 LED 的發散角度，並且避免光源附近亮度不均的現象。

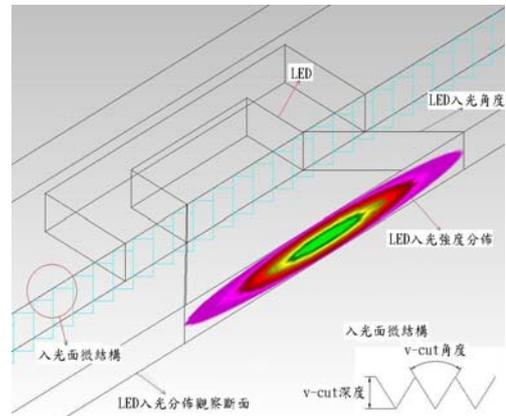


圖 4 LED 入光面微結構設計與入光角度示意圖

本文變化 V 形稜鏡的角度由 70° 到 130° ，深度由 $10\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ ，分析對亮度及斷面均勻性的影響。當角度越大時，平均照度會越小，但照度均方根變化曲線如拋物線般，在 90° 有較小的照度均方根，所以在入光面的角度方面即設定 90° ；而由分析結果也可發現，V 形稜鏡微結構的深度對平均照度及照度均方根影響並不大，所以我們選擇入光面 V 形稜鏡微結構的深度為 $30\mu\text{m}$ 。

4. 特徵分佈最佳化設計

4.1 反射面微特徵形狀

本研究在導光板反射面所使用的微特徵結構形狀以<100>晶圓的蝕刻特徵，蝕刻窗為 $10\mu\text{m} * 10\mu\text{m}$ 的矩形，一般蝕刻為角錐狀，但特徵若為尖頂型式，成品在製作過程中有一定的困難度，但若角錐截頂，則會影響有效的反射面積，因此考慮射出成型成品尖端的轉寫性，以 SOI 晶圓設定特徵高度為 $5\mu\text{m}$ ，截頂量為 $3\mu\text{m}$ 如圖 5 所示，將此特徵經過模擬之後，輝度比未截頂時的值衰減有限，對於光學反射並不會造成明顯的影響，但可增加未來在特徵成形上之可製造性與組裝性。

4.2 反射面設計規劃

由導光板入光面加上 V 形稜鏡微結構後，即有助於分散光源的較果，但從整體模組來看，如圖 6 所示，可以很清楚地看出在導光板接近光源處仍有因 LED 光源造成的明顯明暗分佈不均的現象，因此在微特徵分佈上必須掌握其光源分佈特性進行規劃。

本研究將導光板等分成 6 個區域，共有 7 個控制點，並以截頂角錐的微結構作為反射面之設計，如圖 7 所示，並運用 Fuzzy 理論來作為最佳化分佈的方法，也就是當亮度太亮，則將間距調大，若太暗，則將間距調小。一般文獻以直線或二次曲線來進行間距的調配[13]，將限制分佈最佳化的效果，本研究則將導光板區分成 6 個區域，利用每個區域亮度的不同而調整該區域的間距，形成非連續之曲線，且區分後的區域每個控制點代表在該導光板位置之行內特徵間距與下一行的間距，而控制點之間的特徵間距則由相鄰控制點間距內差而來，且利用此依據，使得微特徵行的間距會受到相鄰控制點而改變。

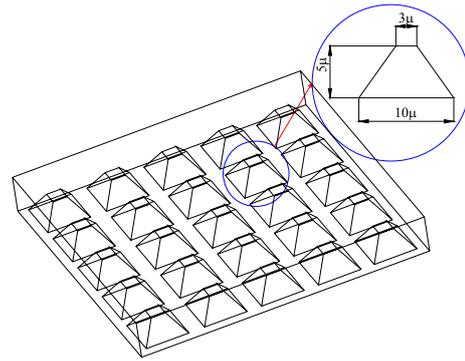


圖 5 反射面微結構示意圖

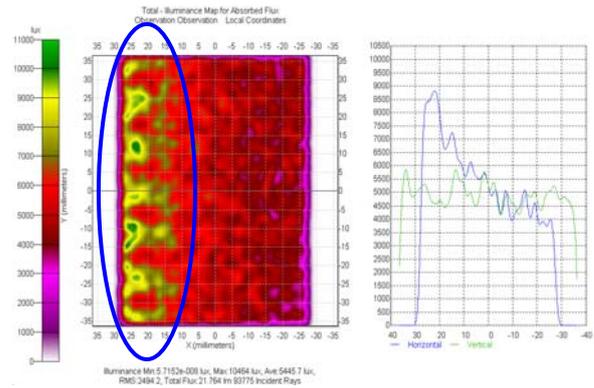


圖 6 導光板前端因 LED 光源造成出光不均的情況

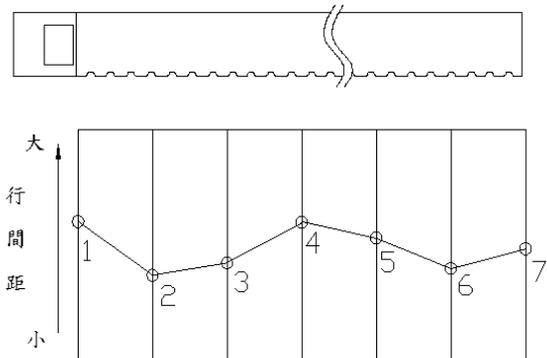


圖 7 導光板等分成 6 個區域共 7 個間距控制點

由圖 6 可觀察到導光板接近光源處仍有因 LED 光源造成的明顯明暗分佈不均的現象，因此利用在靠近光源端的區域以扇形方式分佈特徵點，將導光板的第 1 個區域特徵點作二維的分佈，以燈源為中心，微特徵左右間距以正弦波 (Sin Wave) 方式來調變燈源左右側的特徵疏密。並同樣地運用 Fuzzy 理論的方法來調整正弦波的振幅，調整的方法為以兩 LED 燈間距為 S ，

將 S 劃分為四個區域，因對稱的關係，以其相鄰兩個區域 A 與 B 的亮度比來進行振幅的調整，以解決明暗分佈不均的現象。如此分佈，即在 LED 燈源中心間距最大，到兩 LED 燈之間特徵間距為最小，而變動振幅隨著遠離燈源區而減少，在第二個區域以後便可忽略 LED 燈源在垂直光源方向的差異，而簡化為一維的間距分佈。

4.3 應用 Fuzzy 最佳化分佈

模糊控制一般藉由專家的知識或經驗，將直覺式的調整機制規則進行量化，因為導光板的出光受到反射特徵數量的控制密度，若該區域比平均輝度為高，則可降低該區域的特徵密度，反之則調高其特徵密度。但要其調整量應該多少，則可藉由模糊控制器裡的推理引擎進行調整。

本研究採用三角形歸屬函數最為模糊集合的定義，而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，而根據實驗而歸納出，此兩個目標輸入端的歸屬函數在此均為一樣，如圖 8 所示，並針對模糊詞進行歸屬度的分類，其模糊述詞分為五項，包括有[太亮]、[稍亮]、[剛好]、[稍暗]、[太暗]等定義，其中圖 8 的 \bar{R}_i 為單點附近的平均亮度， \bar{R} 為整塊導光板的平均亮度。並針對縱向區塊亮度表現的[增大]、[稍增]、[維持]、[稍減]、[減少]也定義了改變間距倍率的歸屬函數如圖 9 所示。

再來是要利用模糊規則中 *If.....then.....* 的建立，首先定義要控制整體亮度的部份，共有五條規則定義如下：

- If 縱向區塊亮度 [太亮] then [增大] 縱向特徵間距*
- If 縱向區塊亮度 [稍亮] then [稍增] 縱向特徵間距*
- If 縱向區塊亮度 [剛好] then [維持] 縱向特徵間距*
- If 縱向區塊亮度 [稍暗] then [稍減] 縱向特徵間距*

If 縱向區塊亮度 [太暗] then [減少] 縱向特徵間距

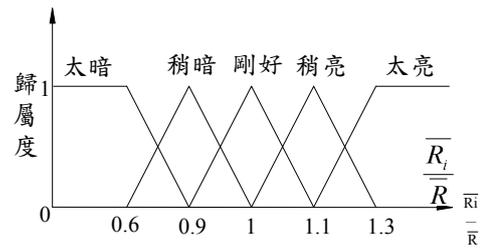


圖 8 輸入亮度比的歸屬函數

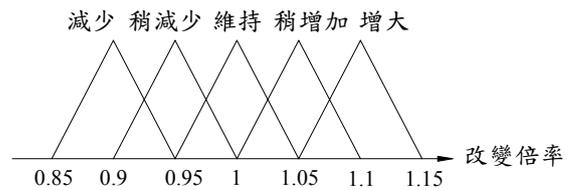


圖 9 控制整體亮度部份的倍率之歸屬函數

另外再定義五條規則，來控制 LED 入光的第一區域，以正弦波振幅調變橫向特徵分佈間距的差異。

本研究運用了 Matlab 撰寫模糊推論程式，每一次都將 7 個控制點代入運算，算出新的間距之後，再輸入光學模擬軟體 TracePro 裡面分析出新的數據，如此反覆遞迴。在開始進行分析模擬時，首先利用平均照度配合 Fuzzy 理論來分析導光板前方光線不均勻的區域，並同時調整整體之平均照度及照度均方根，待導光板前方光線較為均勻之後，即在導光板等分六個區域中的每一個區域量測 8 個點的輝度，6 個區域共有 48 個量測點，且同樣利用 Fuzzy 理論與 7 個控制點來調整特徵的間距，並分析整體平均輝度值，最後再運用九點量測來量測平均輝度與均齊性。如圖 10 所示，共變化 24 次實驗，而從圖 11 以及圖 12 之照度圖可明顯的發現初始設計與最佳設計後的照度分佈。所得之佈點設計經輝度模擬得到中心輝度為 2387 (nit)，九點平均輝度為 2266 (nit)，九點均勻性為 89.91%。

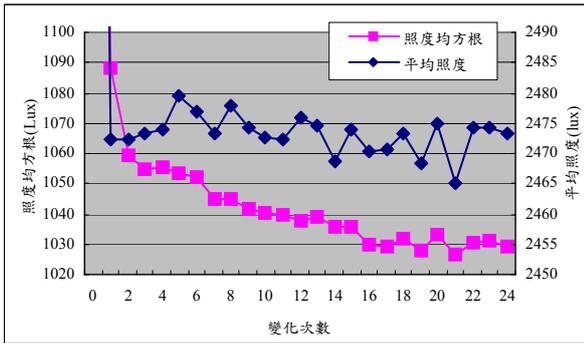


圖 10 經照度分析之後照度均方根與平均照度關係圖

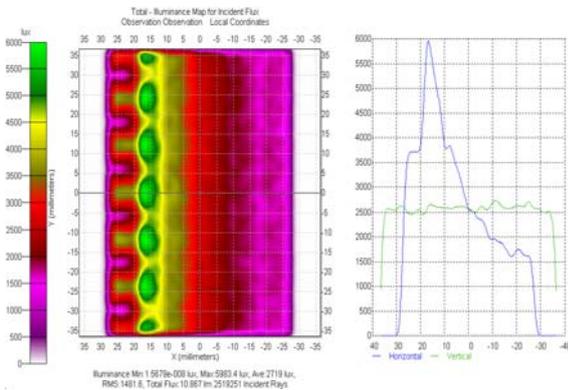


圖 11 未經由 Fuzzy 調整的照度圖

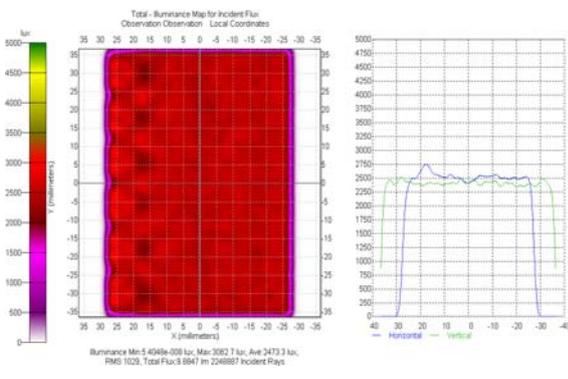


圖 12 經由 Fuzzy 調整過的照度圖

5. 結論

本論文應用具有蝕刻深度終止層的 SOI 矽基板並結合矽基非等向性蝕刻的製程，以及利用電鑄複製的程序，成功地製作出高精度的梯形長溝以及截頂角錐狀微特徵結構，而依據此微特徵，運用 TracePro 光學模擬軟體來進行導光板入光面與反射面微結構分佈之分析，並配合模糊理論的方法調整導光板間距變化，經由最佳化之

後，達到高輝度與高均齊性的要求，驗證了該項薄板取代製程的應用。

誌謝

本研究承蒙國科會經費支持，計劃編號 NSC 96-2221-E-327 -043，特誌謝意。

參考文獻

- [1]. 李昆錦，2007，"背光模組技術與發展"，背光模組產業技術發展研討會專題演講資料，12月7日。
- [2]. 簡昭珩、陳志朋、黃昱傑，2007，"LED光源線性化模組於導光板之應用"，中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會，p5816-5821，中壢。
- [3]. 楊錫杭、薛文林、劉毅，2007，"高功率發光二極體適用之側向反射片於導光板設計與製作"，中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會，p5755-5760，中壢。
- [4]. 林奕村，2005，利用田口方法進行背光模組之設計，國立臺灣科技大學，碩士論文。
- [5]. 張政德，2004，背光模組導光板微結構設計對光學輝度分佈影響之研究，崑山科技大學，碩士論文。
- [6]. 邵龍志，2005，背光模組之導光板V-CUT微結構光學設計與模擬，義守大學，碩士論文。
- [7]. Jee-Gong Chang, Cheng-Tai Lee, Yu-Bin Fang, Chi-Chuan Hwang., 2007, "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.
- [8]. 蔡坪芫，2007，"背光模組結構"，背光模組產業技術發展研討會專題演講資料，12月7日。
- [9]. 余志成、李佩君，中華民國專利申請中，申請案號：96100909。
- [10]. 徐珮凱，2008，基於創新模仁薄板取代製程之整合式導光板微結構分佈之研究，國立高雄第一科技大學，碩士論文。
- [11]. 余志成、徐珮凱、黃世仁、盧燕祥，2008，"配合矽基非等向蝕刻之幾何特性進行導光板特徵分佈的模糊最佳化"，精密機械與模具技術研討會，p83-88，高雄。
- [12]. 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。
- [13]. Kashima, K., & Yoshida, N., "Back lighting device for a panel", 1992/3/3, US Patent 5093765.