

微光學元件之設計技術與應用

Designs and Applications of Micro Optical Elements

林暉雄

Hui-Hsiung Lin

自 1997 年微透鏡的研製開始，國科會精密儀器發展中心 (以下簡稱精儀中心) 成功地開發出數種關鍵性的微光學元件，包括菲涅爾微透鏡、光束整型器、遠場繞射圖像元件 (或電腦全像片)、無繞射光束產生器、長焦深雙波長讀寫頭物鏡、凹面型微光柵元件、微型柱狀鏡等。精儀中心專注於關鍵性微光學元件之設計與開發，也致力於發展微光學系統，如微光譜儀與微全生醫系統等，七年來成果豐碩，並廣泛地應用於生醫奈米／微系統、光通訊分波元件、光資訊讀取系統等科技或工程領域。

PIDC began developing micro-lens and related application technology in 1997. Up to now, various crucial micro optics with multi-functions have been unceasingly and successfully carried out, including Fresnel μ -lens, beam shaper, far-field diffractive pattern generator, nondiffraction beam generator, dual wavelength and long focal length for picked-head objective lens, concave μ -gratings, μ -cylindrical lens, and so on. Notwithstanding the researches in PIDC are contributed mainly to the design and fabrication of micro optical elements, the above achievements have been exploited in the field of microsystems as well, which was exemplified by a microspectrometer and a μ -TAS. Our striving to develop micro optics during the last seven years has brought us fruitful results, such as the wide-range application to bio-nano/microsystems, devices for the wave division demultiplexer, picked-head systems for optical information, and many others in the fields of SciTech and engineering.

一、前言

近年來由於微奈米半導體技術、微機電製程與封裝技術等持續不斷地發展，帶動高科技的進步，相對地檢測儀器與消費性電子產品大都朝向輕薄短小與多功能化發展，如攝影機、光碟機、數位相機、行動電話相機、感測器 (sensor / detector)、傳

感器 (transducer)、傳收器 (transceiver) 等，在這些微小系統中嵌入微小光學元件，已是關鍵性技術。大部分傳統光學系統中之關鍵元件已經被微光學元件 (micro-optical elements) 所取代，使得光機電系統的設計也多朝向微小化與模組化發展。利用電腦輔助設計 (CAD) 與微奈米加工技術製作之表面浮雕光學元件具有重量輕、造價低廉、複製容易之優

點，又能實現傳統光學難以完成之陣列化、微小化、積體化、任意波面變換等新穎功能，進而促使微光學工程與微光電技術在雷射微加工、光纖通訊技術、光計算、光連接、光資訊存取、生醫技術等眾多領域中呈現出前所未有的商業契機與寬廣之應用領域。

所謂微光學⁽¹⁾ 是指研究微米、奈米級尺寸之光學元件的設計、製程技術，及利用此類元件實現光波之發射、傳播、調變、接收的理論與技術之新學科。微光學之發展主要有三個分支⁽²⁾：(1) 以折射原理為基礎之折射光學 (refractive optics) 與梯度折射率光學 (gradient index, GRIN)，(2) 以繞射理論為基礎之繞射光學 (diffractive optics) 或二元光學 (binary optics)⁽³⁾，(3) 以波導理論為基礎之積體波導光學 (integrated waveguide optics)，三者元件性能與製程技術上，各有其優點與特色，其應用領域也不盡相同。由於半導體製程技術之蓬勃發展使得微光學與微電子學成為相輔相成之新興技術，也是未來具有前瞻性的高科技產業，國科會精密儀器發展中心(以下簡稱精儀中心) 所研製開發的微光學元件也涵蓋這三大領域。微光學元件的分類組織圖，參考圖 1。

1. 繞射光學

繞射光學理論是在 1980 年代末 1990 年代初發展起來的一個新興光學理論分支。它是基於光波繞

射理論、以半導體工業製程技術為加工方法，並研究如何利用繞射效應設計光學元件來實現各種光學功能的學科。近年來由於高科技產業蓬勃發展，相關技術不斷地進步，消費性電子產品等相對地也朝向輕薄短小發展。繞射光學元件 (diffractive optical elements, DOEs) 不僅可以實現傳統光學元件所無法實現之特殊功能，而且具有體積小、重量輕、結構緊密、易於複製、成本低廉等優點，使得光學系統更容易地朝向輕型化、微型化、積體化等方向發展。所謂繞射光學元件是一種振幅－相位型光學元件，其中純相位元件 (繞射相位元件) 因其無能量衰減損耗且繞射效率高，近年來已廣泛地被應用在微光電系統中。這種純相位的繞射元件是將一個厚度連續變化的表面浮雕輪廓微縮到近兩個波長厚度的薄層內，使其相對應的相位調制限制在(0, 2π) 內，理論上繞射效率可達 100%。由於繞射光學元件所具有之獨特優點，使其在光通信、光計算 (optical computing)、大容量數據儲存、光學連接 (optical interconnection) 等眾多領域，已有廣闊的應用前景，在光學理論分支中繞射光學已成為熱門研究領域之一。

繞射相位元件的製作方式有兩種。(1) 多階狀分布的繞射相位元件的製作：是用台階狀的相位分布來作近似表面輪廓結構，即所謂二元光學元件。該製程利用類似 VLSI 之半導體製程技術來製作繞射相位元件，一般相位分布有 2^N 個台階時，需要

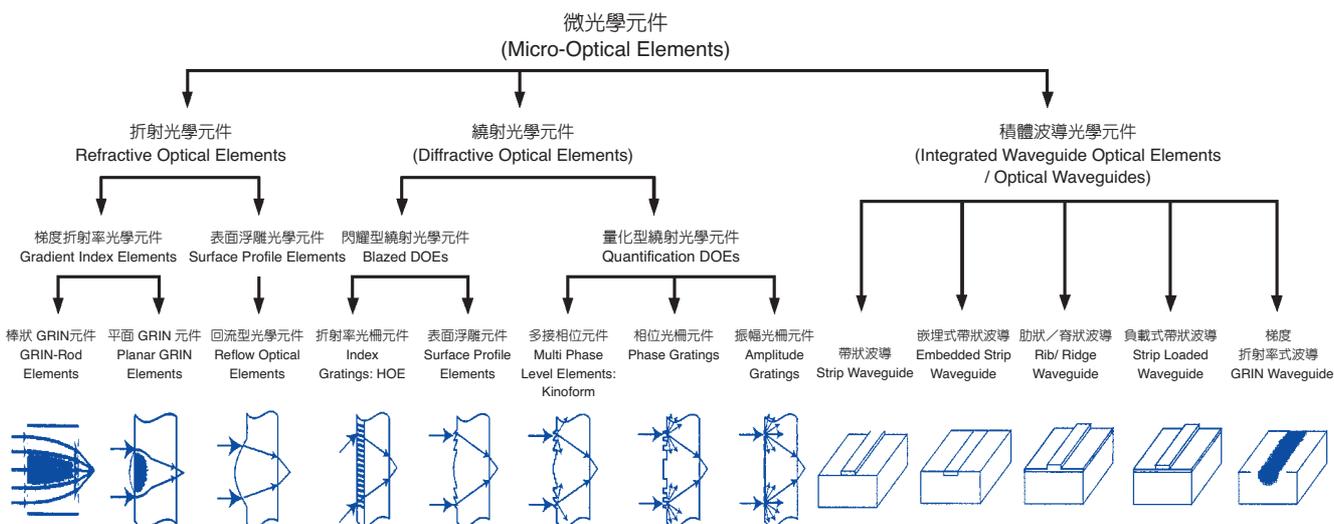


圖 1. 微光學元件的分類組織圖。

製作 N 個二元光罩，並進行 N 次光刻與蝕刻，套刻次數愈多，誤差就越大，進而製作高效率、高精度之二元光學元件就愈困難。(2) 連續相位分布的繞射相位元件的製作⁽³⁾：目前連續相位分布的繞射光學元件可由新近提出的直寫技術來實現。不需要經過光罩、直接以通過聚焦的電子束或雷射束掃描於基片表面的感光塗層，再控制光能量、曝光時間，以形成連續形式的浮雕輪廓，再經反應離子蝕刻技術將其轉移到石英基材上，或利用準分子雷射微刻除加工法 (excimer laser ablation micromachining)⁽⁴⁾，只需一片石英光罩，無需任何搭配半導體製程，即可快速製作繞射元件。繞射光學元件依據不同的計算特質可分類為⁽⁵⁾：

- (1) 數位全像圖 (digital holograms)：設計 DOEs 產生半色調 (half-tone) 影像。
- (2) 聚焦器 (focusator)：設計 DOEs 使雷射出射光束會聚在一個小的空間區域。
- (3) 繞射光柵、矩陣照明器 (matrix illuminator)：設計 DOEs 來生成二元影像 (binary image)。
- (4) 軸向鏡、多焦透鏡：設計 DOEs 形成軸向影像。
- (5) 補償器 (compensator)：運用 DOEs 產生波前。
- (6) 無繞射或 Bessel 光束、高斯－赫米特 (Gauss-Hermite mode) 光束：設計 DOEs 來產生各種不同模態之光束。

2. 折射光學

折射式微光學元件，主要工作原理係利用幾何光學理論為依據，故折射式微光學元件對不同波長入射光的影響，主要在微光學元件材料之折射率不同導致光波匯聚、發散或偏折之現象，而其色散 (dispersion) 現象相對地比繞射元件小⁽³⁾。而繞射式微光學元件，係一多層次的扁平元件，利用材料折射率或表面起伏結構的調變技術，以獲得出射光所需之波前 (wavefront)，此特性使其與入射光之波長有相當密切的關聯，入射光波長微小的變動將對出射光的波前造成很大影響。為能同時具有前二者的優點，目前折射式微光學元件大都結合繞射式元件成複合式微光學元件，不但可解決有關色散、熱效應等問題，還可減少微光學元件的數量，達到減輕整體光學系統重量的目的⁽³⁾。

折射式微光學元件相較於繞射式微光學元件具有較大的數值孔徑 (numerical aperture, NA)，且不同波長入射光的影響較小，並可依所需排列組合成折射式微透鏡陣列，是雷射對光纖之光束耦合、VCSEL 之光束準直、光束塑形、液晶投影電視之亮度增強等應用的重要元件^(6,7)。折射式光學元件的製作方法有離子交換 (ion exchange)、光熱能 (photothermal)、熱流動 (thermal reflow)、雷射光刻 (laser photolithography)、灰階光罩 (gray-tone mask)、液滴 (droplet) 等多種成型方式^(3,7,8,9)。若將微光學元件的基本元素：微折射元件與繞射元件，重新組合排列後，可衍生出三種功能性微光學次系統元件⁽¹⁰⁾：(1) 複合式光學元件 (hybrid optical elements)、(2) 堆疊式積體光學元件 (stacked optical elements)、(3) 平面式積體光學元件 (planar optical elements)。

3. 積體波導光學

近年來由於網路之快速發展，相對地帶動了通訊之高頻寬需求，未來在寬頻通訊建設的大量成長以及網際網路市場的蓬勃發展下，將深具市場潛力。因此對光通訊之光波傳系統需求就格外迫切，而積體波導光學和光纖之光學元件則是此系統之基礎，如光纖、雷射、光偵測器、光調變器 (modulator)、光開關 (switch) 及波長分波元件 (wave-length-demultiplexer / WDM) 等。對於光波傳遞可分為兩大類：一是時間諧振 (time-harmonic) (如連續之單色波)，另一個是完全和時間相關 (如脈衝波)。大部份元件可以利用和時間無關，而入射一單色波長來加以設計，如模態求解 (mode-solver) 和 BPM (beam propagation method) 方法；如要得到和時間相關之設計方法，可以使用 FDTD (finite-difference time-domain) 來計算模擬。設計光波導之其他方法還有如模態耦合理論 (coupled-mode theory, CMT)、本徵模態傳播法或轉換矩陣法 (eigen mode propagation method or transfer matrix method) 等。

二、繞射式光學元件之設計方法與案例

繞射式光學元件的設計理論一般可分為兩種：

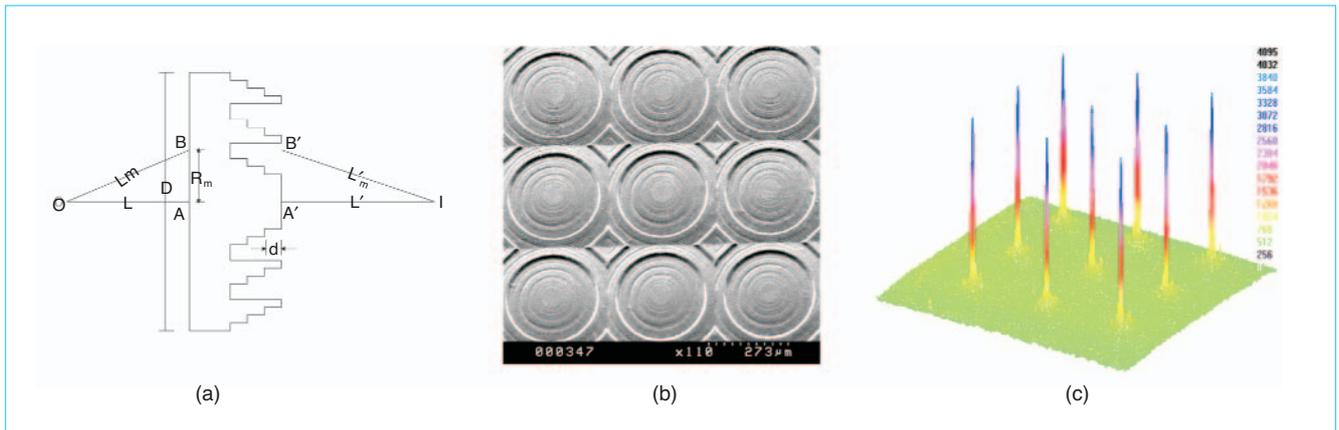


圖 2. 利用光程差法設計焦距 15 mm、孔徑 $333 \mu\text{m}$ 之 3×3 十六階微透鏡陣列，(a) 設計光路與模型示意圖，(b) 元件 SEM 圖及 (c) 元件光學性能檢測結果。

向量繞射理論 (vector diffraction theory) 與純量繞射理論 (scalar diffraction theory)，兩者最大之區隔在於繞射光學元件線寬週期小於或相當於光波波長，且光波之偏振特性與不同偏振光之間的相互作用會影響光波之繞射結果時，就必須嚴格地考慮邊界條件，並求解馬克斯威方程式 (Maxwell's equation)，這也就是所謂向量繞射理論或稱嚴格耦合波理論 (rigorous coupled-wave theory)；當元件線寬週期大於光波波長十倍，且光的偏振特性不顯著時，即可使用簡單之純量繞射理論來設計分析繞射光學元件。自 1997 年開始以 Fresnel 微透鏡的研製出發，至今已經陸續成功地開發出數種不同功能與關鍵性的微光學繞射元件，如下所述。

1. 純量繞射理論之設計方法與案例

(1) 光程差法

以 Fresnel zone plate (FZP) 微透鏡為模型，進行設計高階微透鏡時，以純量繞射理論 (scalar diffraction theory) 與幾何光學理論為基礎的光程差法 (optical path difference method) 來分析，並以光線之光程差原理設計一個二元型高階微透鏡陣列元件⁽¹⁾，參考圖 2。

(2) G-S 演算法

G-S 演算法 (Gerchberg-Saxton algorithm) 是 1972 年 Gerchberg 與 Saxton 首先提出從輸出入平面測量之兩個光波強度數據值為依據，來恢復其輸

出入平面上光場相位分布的一種演算法，通稱為 G-S 演算法 (或稱為 IFT 演算法：iterative Fourier-transform algorithm)。利用此演算法計算四階 128×128 像素圖像顯示器⁽¹²⁾ 之結果，元件設計之 SNR = 2.52、其設計之繞射效率為 75.53%、均勻度為 29.2，參考圖 3。

(3) Y-G 演算法

Y-G 演算法 (Yang-Gu Algorithm，或稱楊—顧演算法) 是 1980 年 G. Z. Yang 與 B. Y. Gu 所提出，Y-G 演算法是改良自 G-S 演算法。所謂 Y-G 演算法是在 G-S 演算法內引入了一非對角元素矩陣項，以致於整個系統之迭代有內外兩個循環，雖費時較久，卻使其適合任意線性變換系統、能量有損耗系統、非么正變換系統，更具有抗噪訊、易推廣到多波長、多平面系統、不易出現微擾停滯現象，及對初值設定不敏感等優點。運用繞射元件來實現光束整形，把高斯光束 (Gaussian beam) 整形成貝索光束 (Bessel beam)⁽¹³⁾，再利用貝索光束的準直特性，將環與環之間的距離擴大，以利於遠距離之光束準直。精儀中心所設計使用的波長為氦氖雷射 632.8 nm ，目標是將半徑為 1.2 mm 的高斯光束整形成半徑約為 6 mm 的貝索雙環高階或單環零階光束，參考圖 4。

再利用楊—顧法設計設計平頂光束整形器⁽¹⁴⁾，該繞射式光束整形相位光學元件能使雷射光的輸出能量分布由原本的高斯分布轉為均勻分布，就是使

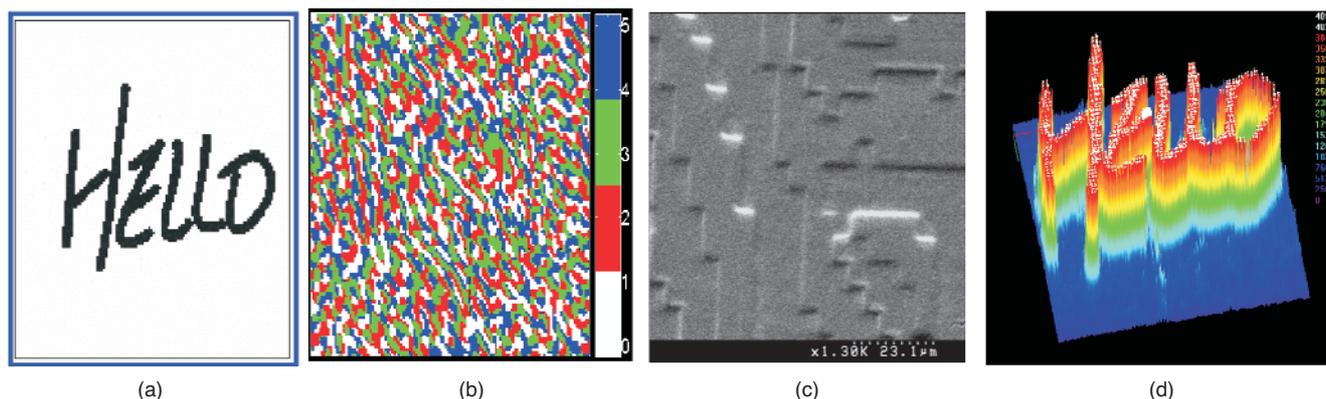


圖 3. 利用 G-S 演算法設計四階繞射光學元件之 (a) 元件目標值示意圖, (b) 優化後元件表面輪廓分佈示意圖, (c) 元件 SEM 攝影圖, (d) 元件繞射性能檢測結果。

該元件具有調制雷射光束在自由空間中強度分布的功能。本設計將相位分階的過程放置於迭代的迴圈之中，雖然會增加計算的時間，對於所得到的結果不會因事後的相位分階而引入了分階誤差，所得到的效果比起連續相位再分階改善許多。我們模擬一 He-Ne 雷射波長為 $0.6328 \mu\text{m}$ ，其輸入參數為輸入半徑 $R_1 = 1.5 \text{ mm}$ 、輸出半徑 $R_2 = 1.5 \text{ mm}$ ，其取樣點數：輸入 $N_1 = 750$ 及輸出 $N_2 = 150$ ，成像距離 30 cm ，設計結果參考圖 5。

(4) 模擬退火演算法

模擬退火演算法 (simulated annealing algorithm) 是利用物理現象中固體退火過程為背景，要找一系統之值函數 (cost function) 的最佳解，運用統計性質作為判斷接受與否之判據準則，使得演算方法跳脫局部極小值之範圍，用來解決大規模組合優化問題。模擬退火演算法具有結構簡單、運用靈活，尤

其特別是平行計算等優點，適合直接求解階梯狀二元相位分布之優化問題，雖較容易獲得計算域之整體最佳解，惟其計算量較大，尤其是高階分布之相位元件其計算量更是龐大，所以較費時。我們利用此演算法計算 32×32 像素圖像顯示器⁽¹³⁾之結果，元件設計之 $\text{SNR} = 10.98$ ，其設計之效率為 73.04%、均勻度為 2.84，請參考圖 6。

(5) F-R 共軛梯度法

共軛梯度法 (Fletcher-Reeves conjugate gradient method) 是解決非線性最佳化問題的一種演算法，也是目前處理無約束最佳化問題 (unconstrained optimization problem) 中最常被使用的方法之一。首先假設一個初始值，然後由迭代公式向前得到一個修正之近似值，迭代公式是由一個純量 (稱為步距) 及向量 (搜索方向) 所組成，亦即必須先決定搜索方向，而該純量是決定在這方向上需要多大之步

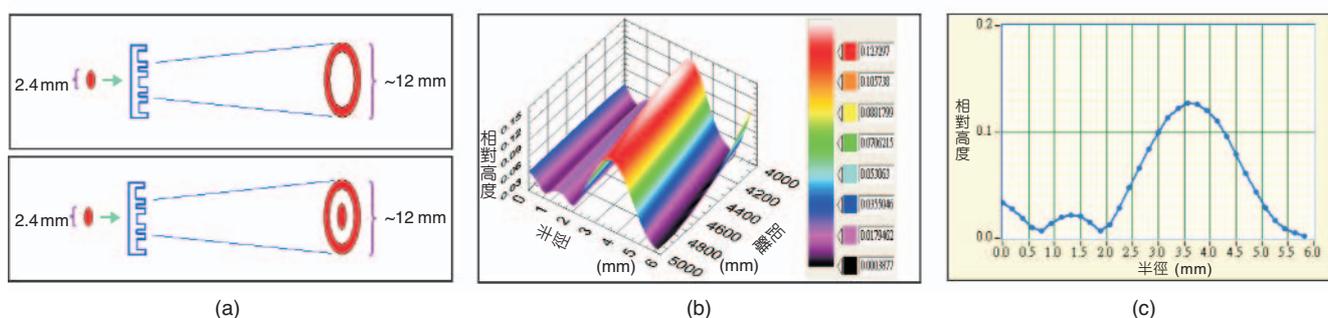


圖 4. 利用 Y-G 演算法設計空心光束產生器之 (a) 元件目標值示意圖, (b) 優化後元件光場三維分佈示意圖, (c) 優化後元件光場二維分佈示意圖。

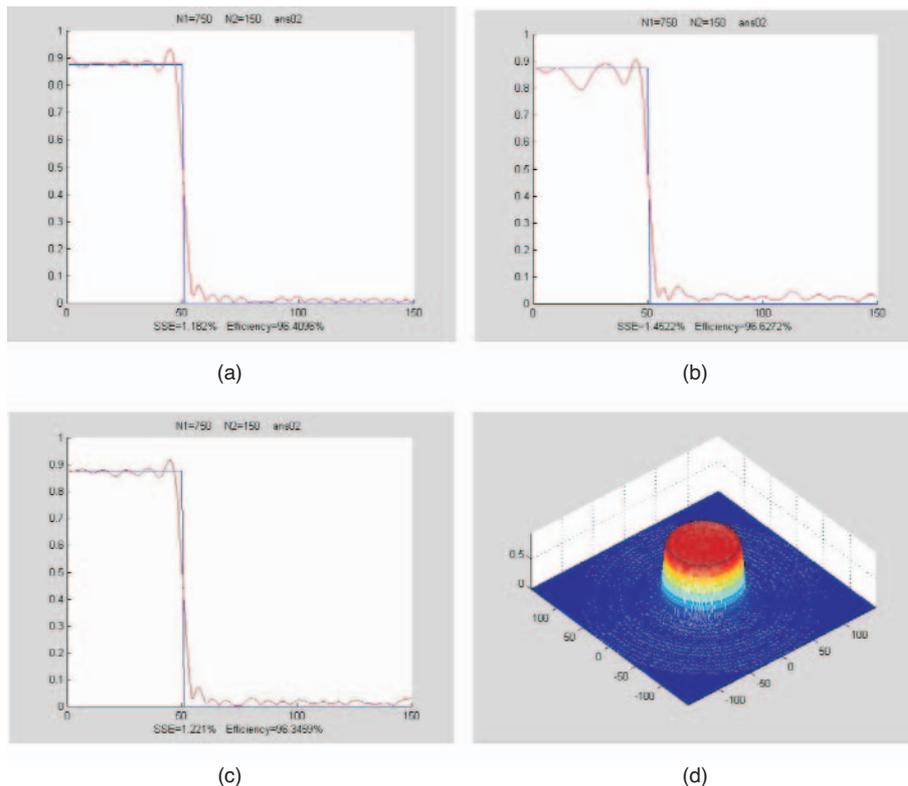


圖 5.

(a) 使用連續相位的計算結果，(b) 連續相位分八階後的結果，(c) 將分階過程植入程式疊代中的計算結果，(d) 平頂光束整型器所得到的輸出光場分布圖。

距，再選取前次方向的組合以得到更加逼近於最佳值的新搜索方向搜索，逐次搜索的方向必須是共軛，且不涉及求解二階偏微分矩陣的 Hessian 矩陣。利用此法設計雙波長繞射型長焦深物鏡⁽¹⁵⁾，設計之波長為 650 nm (DVD)、780 nm (CD)，其輸入與輸出平面上信號窗口半徑為 2.1 mm、0.3 mm，輸出光軸長度 1.14 mm，取樣點數為輸入 $N_1 = 600$ 、輸出 $N_2 = 30$ ，光軸 $N_z = 20$ ，焦點分布在 1.8 mm 與 2.4 mm，焦深 $\pm 120 \mu\text{m}$ ，請參考圖 7。

2. 向量繞射理論之設計方法

(1) Chateau 嚴格耦合波理論

1981年 Moharam 提出體積型平面光柵嚴格耦合波分析 (rigorous coupled-wave analysis, RCWA) 方法來處理高階繞射光的耦合作用。而後數年經過多次的演進與發展，1994 年 Chateau 以 RCWA 為基礎提出新型演算法。利用 Chateau RCWT 法設計反射式鋁介質矩形槽表面輪廓浮雕之平面式彩色二階繞射光柵⁽¹⁶⁾，以可見光 TE 極化平面波 30 度入

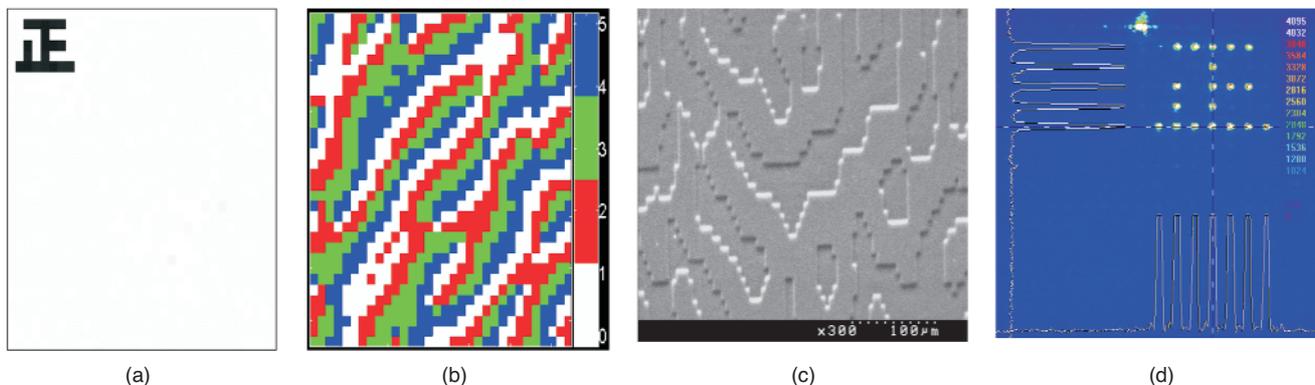


圖 6. 利用模擬退火法設計 32×32 像素四階繞射相位元件之 (a) 元件目標值示意圖，(b) 優化後元件表面輪廓分布示意圖，(c) 元件 SEM 攝影圖，(d) 元件繞射性能檢測結果。

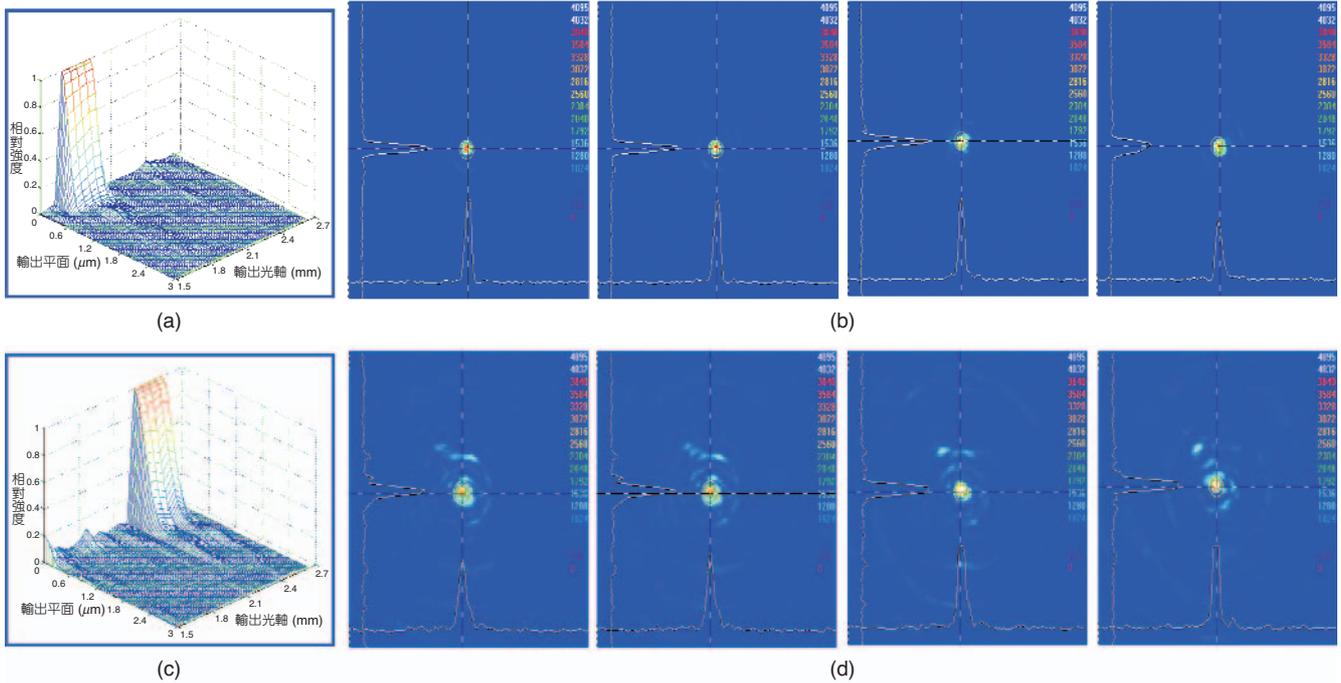


圖 7. 利用共軛梯度法設計雙波長繞射型長焦深物鏡之元件經優化與後光場重建後 (a) 為 650 nm 之結果，(b) 為 780 nm 之結果，再經製程實驗後之元件於光軸上進行每 60 μm 取樣測量其焦點分佈狀況 (c) 為 650 nm 之能檢測結果，(d) 為 780 nm 及性能檢測結果。

射，光柵週期 0.9 μm ，工作週期為 0.5 μm ，光柵厚度 0.17 μm ，請參考圖 8。

(2) Moharam 嚴格耦合波理論

1995 年 Moharam 再提出對稱性與精確度更佳之傳輸矩陣法 (transmittance matrix)。嚴格耦合波分析不僅適用於一般理想光柵，也可應用於其他光電元件中之光柵結構，或分析計算製程中輪廓誤差對光柵元件效率之影響。我們利用 Moharam RCWT 法設計反射式金屬表面輪廓浮雕之閃耀型

(blaze type) 繞射光柵⁽³³⁾，以可見光波段 (380–780 nm)，入射角 35.5 度，光柵週期為 1.0 μm ，光柵高度為 0.321 μm ，請參考圖 9。

三、凹面型微光柵分光元件之設計方法與案例⁽¹⁷⁾

研究開發各種繞射光學元件、微光柵或微透鏡一直是精儀中心努力之目標，將微光學設計技術應用於生醫微系統 (如 $\mu\text{-TAS}$)、微光譜儀或光通訊領

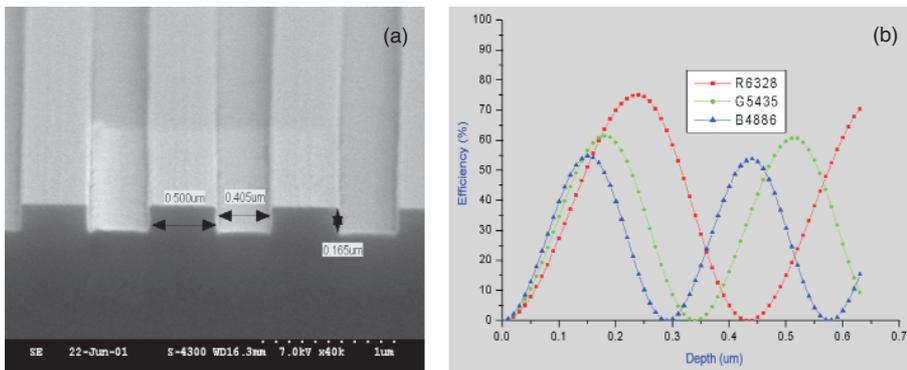


圖 8. 利用 Chateau RCWT 法設計平面式彩色光柵之效率分析與製程，(a) 為元件的 SEM 攝影圖，(b) 為元件經優化後之效率分析結果

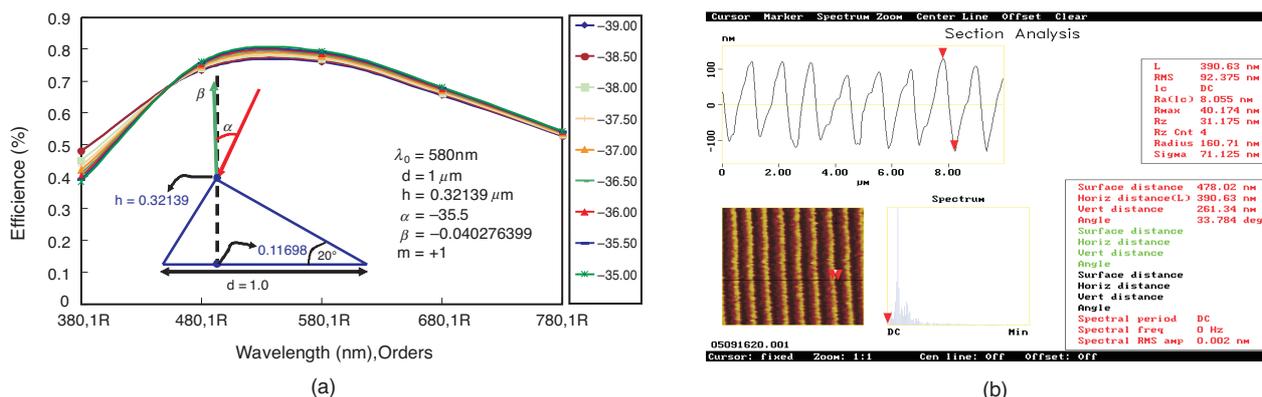


圖 9. 利用 Moharam RCWT 法設計平面微光柵之效率分析與製程，(a) 為元件經優化後之效率分析結果，(b) 為元件經 AFM 之檢測結果。

域等，則是主要的設計與開發重心。凹面光柵元件早於西元 1882 年時為 H. R. Rowland 所提出，120 年來已經發展出各種不同之應用，尤其在光譜分析儀與光通訊用途之波長多工／解多工器的系統中，凹面光柵已經扮演獨當一面之關鍵性角色。

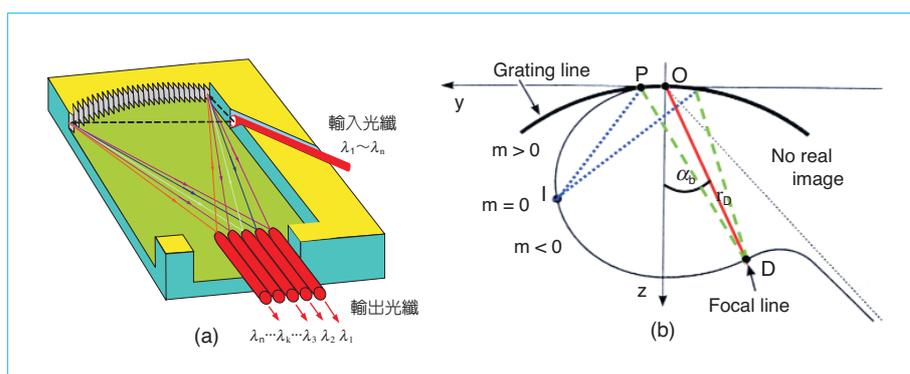
凹面型微光柵元件當今最關鍵之課題有二：其一、目前尚無商用軟體可供模擬與製作設計，必須自行編碼進行數值計算；其二、要求具備高品質的平坦度與垂直度之側壁深蝕刻製程。文獻已發表之微光柵側壁鏡面深蝕刻製程包括有化學輔助離子束蝕刻 (CAIBE)、反應離子蝕刻 (RIE) 或聚焦式離子束製程技術 (FIB) 等技術。在旁軸近似下運用光程展開法、光程追跡法、惠更斯積分法和嚴格耦合波理論等進行設計與分析該元件之分光特性及光場分布，並成功地開發出凹面型微光柵元件之分析設計技術與高品質之感應耦合電漿 (ICP) 側壁鏡面製程技術⁽¹⁸⁾，包括應用於生醫晶片之光譜範圍為 380—780 nm、解析度約為 0.18—0.40 nm 之閃耀式凹面型微光柵，與應用於高密度波長多工解／多工器之

81 通道、頻寬 (FWHM) 約為 0.181 nm、頻道間距小於 0.39 nm 之準階梯式凹面型微光柵。

1. 凹面型微光柵之設計原理⁽¹⁹⁾

凹面型微光柵的結構結合了光柵分光和凹面鏡成像的功能，在一般平面微光柵分光時，入射光及繞射光均為平面波，因此通常在光學系統中需要額外加上兩個凹面鏡提供聚焦與分光的功能，若設計成凹面型微光柵，則只需要一個元件即可達成相同目標。為了準確設計分析凹面型微光柵元件之最佳化結構，使用下面分析理論進行模擬分析：(1) 泰勒光程展開法；(2) 光束追跡法；(3) 惠更斯積分法；(4) 嚴格耦合波理論。光束在自由空間中傳播其光柵結構如圖 10(a)，考慮光柵曲線 (grating line)，參考圖 10(b) 為泰勒光程展開法示意圖。假設入射光點位於光柵曲線左側 I 點上，O 為光柵曲線中心，D 為觀察點，若要獲得完美的無像差 (aberration-free) 之凹面光柵時， $F(y)$ 必須為零，觀察點 D 即形成無像散點 (stigmatic point)。為了分析

圖 10. (a) 凹面型微光柵之結構示意圖，(b) 泰勒光程展開法的光柵曲線示意圖。



像差，對光程函數作四階的泰勒級數展開，至於要設計出既無彗差又無球差是不可能之事，只有羅倫圓的凹面光柵具有無彗差。

為了更嚴謹、更有效率地模擬計算凹面型微光柵元件之光學特性，再引用嚴格耦合波理論來計算各繞射級數之效率，並進一步設計分析光柵齒形之最佳結構。後面將運用上述之分析理論實際設計四組元件：應用於生醫晶片之分光元件與光通訊用途之高密度波長分波元件。

2. 應用於生醫晶片之凹面型微光柵分光元件⁽²⁰⁾

應用於生醫晶片之凹面型微光柵分光元件所設計之自由光譜範圍 (FSR) 為 580 nm，所以繞射級數設計在 +1 級，波長工作區間為 380–780 nm，因此可考慮此光柵之結構為閃耀型光柵。為了考量此光柵與線型 CCD (1024 × 7.8 μm) 組裝問題，特別設計中心波長之繞射角度在零度附近，光柵的設計參數為：中心波長為 580 nm，光柵週期為 1 μm，光柵高度為 0.32139 μm，閃耀斜角 (blaze angle) 為 17.7299 度，羅倫圓直徑為 7800 μm，光柵長度為 2170 μm，中心波長繞射角為 -0.040276 度，光柵分光頻寬 (FWHM) 約為 0.18–0.40 nm，頻道間距 (channel spacing) 小於 1 nm。當入射角為 -35.5 度時可獲得反射角為 -0.040276 度，相當準確地落在光柵曲線的法線上，而且所設定之光譜範圍皆有很好的效率分布，如圖 11(a)。利用惠更斯積分法將上述所設計之光柵參數代入後，可計算出其光場分布情形，包括 380 nm、580 nm 與 780 nm 等前中後三光譜區於成像處之光場強度分布圖，參

考圖 11(b)、(c) 與 (d) 所示。由輸出頻譜圖可清楚觀察出 380 nm 波段相鄰兩頻譜之串音 (crosstalk) 程度約 -23 dB，580 nm 波段相鄰兩頻譜之串音程度較高，約 -20 dB，而 780 nm 波段相鄰兩頻譜之串音程度又再高一些，約 -18 dB。

3. 光通訊用途之高密度波長分波元件⁽²¹⁾

光通訊用途凹面光柵所設計之自由光譜範圍 (FSR) 為 155 nm，所以繞射級數設計在 +10 級，波長工作區間同為 1528.77–1560.61 nm，因此可考慮此光柵之結構為閃耀型光柵。光柵的設計參數為：中心波長為 1550 nm，光柵週期為 10 μm，光柵高度為 13.6662 μm，頂角為銳角，閃耀斜角 (blaze angle) 為 53.8059 度，羅倫圓半徑為 30767 μm，光柵長度為 8560 μm，中心波長繞射角為 37.6117 度，共 81 通道，頻寬約為 0.181 nm，頻道間距小於 0.39 nm。再分析其各階繞射效率之分布狀況，可明顯看出最強之譜線皆落在第十級上，而且其他級繞射光強度都相對地小很多，再分析所設計之頻譜範圍內之光效率分布曲線後，可獲得各波長對光柵高度之效率分布。當微調光柵結構時，同時進行計算各個入射角微量變化對繞射角 (反射角) 與繞射效率之影響，此步驟可設計出一組最佳化之凹面型微光柵參數。當入射角為 -70 度時可獲得反射角為 37.6117 度，與入射光同側而且所設定之光譜範圍皆有很好的效率分布，參考圖 12(a)。

同樣運用惠更斯積分法計算入射光經凹面光柵分光後在成像處繞射光場分布情形，將上述所設計之光柵參數代入後，可分析出其光場分布情形，參考圖 12(b) 與 (c) 所示。經由圖中輸出之頻譜圖可

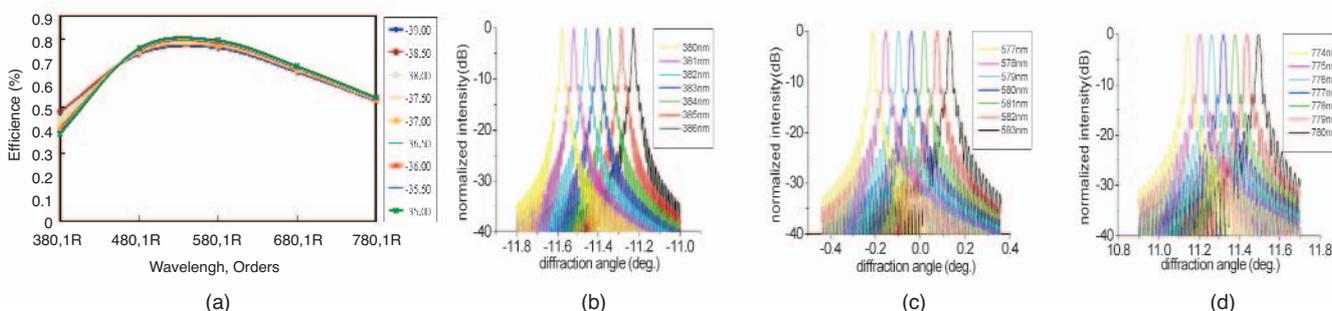


圖 11. (a) 微調應用於生醫晶片微光柵的齒形結構，使其滿足所需的 FSR 有均勻的常態分布。模擬波長 (b) 380 nm、(c) 580 nm、(d) 780 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度分別約為 -23 dB、-20 dB、-18 dB。

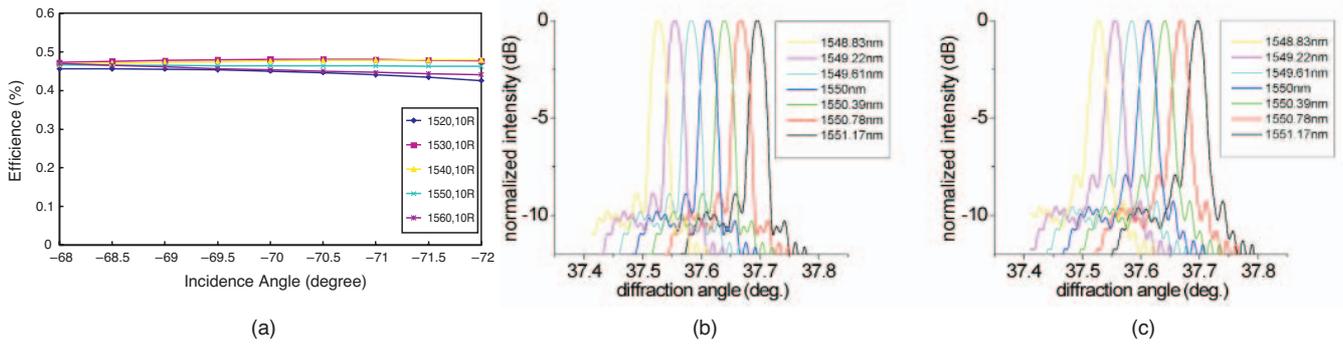


圖 12. 光通訊用途凹面光柵，(a) 其中心波長附近入射角對繞射效率之影響分布圖。光柵齒形為 (b) 銳角與 (c) 直角時，波長 1550 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度分別約為 -10 dB 與 -7 dB。

清楚觀察出 1550 nm 波段相鄰兩頻譜之串音程度約 -10 dB，由於頂角為銳角之光柵齒形結構，其尖端部分已經超過黃光製程極限，圖案容易變形，因此再模擬一組相同參數但是其光柵齒形之頂角結構為直角，同樣分析其中心波長 1550 nm 波段相鄰兩頻譜分佈情況，發現其串音程度卻提高，約 -7 dB。由此可見，直角齒形微光柵其光譜雜訊較銳角齒形微光柵之光譜雜訊還要高 3 dB。

所完成製作之凹面型微光柵元件，經由 SEM 攝影，可明顯觀察出閃耀型微光柵清晰的輪廓。量測得光柵側壁鏡面的高度大約是 56 μm ，參考圖 13(a)。該元件經鍍上金膜反射層後，利用原子顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 量測其反射面的粗糙度，其掃描的區域為 10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ ，鍍上金的平均粗糙度 (R_a) 為 4.81 nm，參考圖 13(b)。利用寬頻 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源 (C + L band) 與光譜分析儀 (OSA: accuracy 0.02–0.04 nm) 等周邊儀器及若干紅外光學器件，架設一套光纖自動對準被動元件檢測系統。經由元件輸出端分別為單模單埠光纖與單模陣列光纖 (間距 250

μm) 接收光訊號後進入光譜分析儀，可測量得頻道之輸出頻譜圖，參考圖 13(c)。運用前述所設計之各種光柵參數，目前已經完成其中一組元件之製程與檢測，該結果與設計之各項參數相當吻合，也達到當初所要求之規格，但是插入損耗較大，已經著手進行設計波導型結構與設計微型柱狀鏡，可克服此缺點。為了更進一步驗證將凹面型微光柵元件應用於生醫晶片，精儀中心正持續進行其他設計參數之微光柵製程與相關之光學特性檢測。

四、積體波導光學元件之設計方法與案例⁽²²⁾

1. BPM 方法

BPM (beam propagation method) 方法對於積體光學及光纖光波導元件之設計來說是最廣泛被使用的^(23,24)，其中最主要原因是觀念簡單、直接，而且程式容易撰寫。除此之外，BPM 還是一種非常有效率的方法，可以用加密格點方法來得到精確的答案，當然也可以以粗格點來試算概略結果。另一特

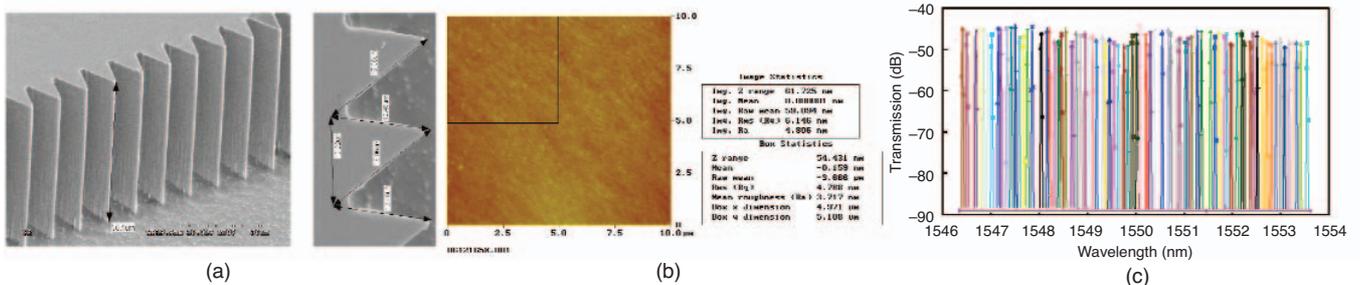


圖 13. 利用 ICP 側壁鏡面蝕刻製程所完成之凹面型微光柵元件的 (a) SEM 攝影圖，以及鍍上金反射膜層後，(b) 利用 AFM 量測其反射面的粗糙度 (c) 測量得其 81 通道之頻譜特性圖。

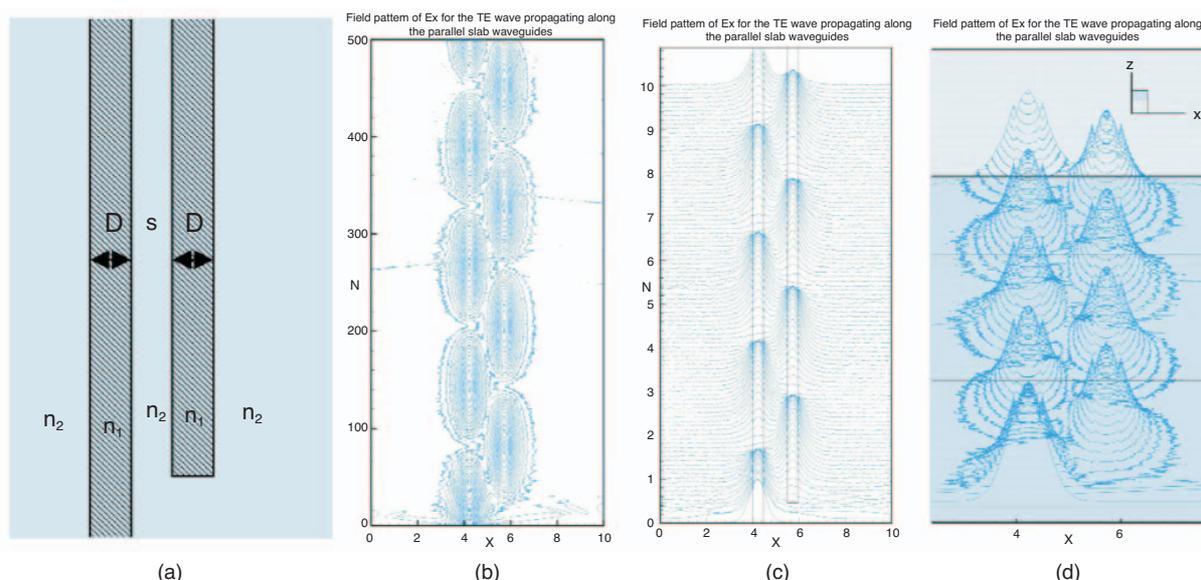


圖 14. (a) 光耦合元件之結構示意圖，(b) 光耦合元件之電場等高線圖，(c) 在不同 z 軸斷面之電場圖形，及 (d) 其強度大小。

點則是對於較複雜之幾何結構，BPM 並不需要特別修正其方法就可直接求解。再者，BPM 不僅可以解耦合模態，還可以解其他導波區及輻射區等。若加上極化項及非線性條件，則 BPM 可以很彈性地加以計算處理，可見其擴充性非常地強。

(1) 純量 BPM

BPM 本質上是一種數值法，它可求解單色波長之波方程式的特解，若以純量場來區分時，它就忽略了極化現象，若旁軸近似條件加入時，則光波方向就被限制在某一個角度裡前進。

(2) 向量 BPM

在純量之電磁場中是不考慮極化現象的⁽²⁵⁾，若極化現象為一不可忽略項時，必須考慮向量電磁場，則波方程式就必須重新推導。運用上述方法進行設計一組光耦合元件 (directional coupler) 分光波導，來求解二維半向量之 BPM 方程式，其結構如圖 14(a) 所示。光耦合元件是兩根非常靠近的導波管⁽²⁶⁾，造成光波在單獨之導波管裡能量被互相吸引，並且在彼此波導裡互相傳遞能量，只要藉著調整其同步現象及耦合係數便可控制其交換能量。計算參數 $D = 0.45 \mu\text{m}$ 、 $S = 1.05 \mu\text{m}$ 、 $n_1 = 1.5$ 、 $n_2 = 1.3$ 、 $n_0 = 1.42$ ，入射波長為 $1.15 \mu\text{m}$ ，格點大小取

$\Delta x = \Delta z = 0.5 \mu\text{m}$ ，計算區域為 $10 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ ，右邊波導之 z 軸起始位置為 $0.42 \mu\text{m}$ 。設計結果參考圖 14(b)、(c) 及 (d)，可明顯看出，光波能量從左邊導入而直接被導引到右邊，然後又從右邊被導引到左邊，如此週而復始地在兩邊導波管裡互相交換能量而往下傳遞。

(3) 大角度 BPM

以上兩節所探討之 BPM 方法，不管是純量、半向量或是完全向量之計算，均是在小角度之範疇裡，也就是在旁軸近似的假設條件下才成立，如果遇到導波管之彎曲度超過較大角度時，所使用之簡化的 BPM 方程式就需要修正以降低其計算誤差量。因為當導波管彎曲角度較大時，對於電場之二次微分項就不能忽略了，一般最常用之修正法為多階段 Padé (multistep Padé-based wide-angle technique) 方法⁽²⁷⁾。利用大角度 BPM 方法進行設計 Y 型光波導來進行 BPM 大角度之模擬設計，其波導結構如圖 15(a) 所示，計算結果則如圖 15(b)，由圖中可看出 Padé 之高階項能有較佳之模擬結果。

2. 有限差分時域法

有限差分時域法 (FDTD) 對於積體光學來說是一種非常廣泛的求解方法，特別是非常適合於光子

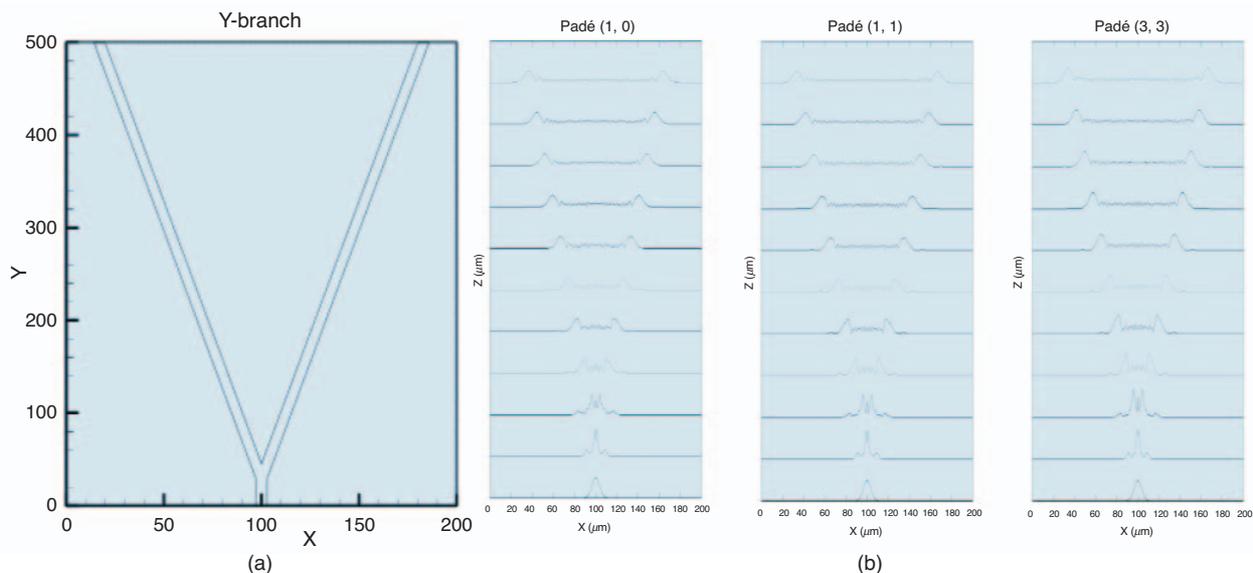


圖 15. (a) Y 型光波導結構，(b) Y 型光波導結構之計算結果，依次為 Padé (1, 0), Padé (1, 1) 及 Padé (3, 3) 階數。

能隙元件 (photonic bandgap device) 問題之計算，此時如果以 BPM 來求解光能隙元件，將是非常不合適的。關於 FDTD 之基本理論及介紹可參考一些文獻及書籍^(28,29)，其求解過程是利用有時間項之 Maxwell 方程式直接積分再表成離散式以進行求解。

在計算過程中，所採用之邊界條件是不同於本文 BPM 所使用之穿透邊界，而是文獻中最喜愛的完美匹配吸收邊界層 (perfectly matched layer absorbing boundary conditions) PML，此方法是由 Berenger 在 1994 年首先提出，可參考文獻 30。PML 是假設有一人工材料層在計算域之四周圍，使其滿足某一方程式而吸收由計算域所傳來之訊息。以此方法先驗證模擬紅光之波長在自由空間中

傳遞，而結構依次是光柵、透鏡，然後才是光柵加上透鏡之複合元件。參數之設定波長是以紅光 650 nm 為主，對於不同之幾何結構格點取 $0.05 \mu\text{m}$ ，微小透鏡之直徑為 $30 \mu\text{m}$ ，聚焦在 $44 \mu\text{m}$ 處附近，設計結果參考圖 16。

五、微柱狀透鏡之設計與案例⁽³⁰⁾

在設計側壁式凹面型微光柵時，即面臨插入損耗很大與收光效率低等問題，解決此問題有兩種方法，其一是將整個側壁式凹面型微光柵結構波導化，如此所有的光束皆限制於平板波導 (slab waveguide) 中，因此光場入射與出射皆由脊狀波導

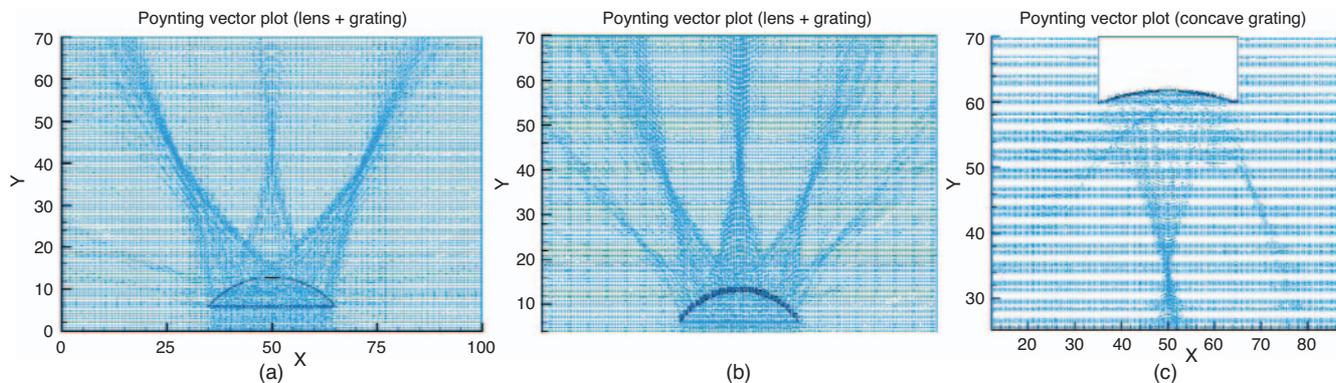


圖 16. 紅光通過一 (a) 穿射式元件透鏡 + 平面光柵複合元件、(b) 穿射式透鏡+凹面光柵複合元件、(c) 反射式透鏡 + 凹面光柵複合元件之 FDTD 模擬結果的繞射光場圖。

(rib waveguide) 引導至光纖端；其二是設計微柱狀透鏡，包括弧矢面向 (sagittal) 與子午面向 (meridional) 微柱狀透鏡，作為側壁式凹面型微光柵在自由空間中傳播時光場入射與出射的耦合聚焦使用。利用 SU-8 厚膜光阻作為微柱狀透鏡的材料，經過設計與實驗後，由 AFM 測量之側壁平坦度值為 $R_{rms} < 25 \text{ nm}$ ($10 \times 10 \mu\text{m}^2$)，由 SEM 測量垂直度約為 $89.5^\circ - 90^\circ$ ，元件的膨脹率約為 2.5–3.0%。將上述完成之微柱狀透鏡設計於微流道中，以 488 nm Ar^+ 雷射進行螢光 (532 nm 綠光) 激發實驗，再將該微柱狀透鏡進行光束準直效果測試，可得到不錯的準直效果，參考圖 17。

六、電子束微影技術製作灰階繞射光學元件⁽³¹⁾

在微光學領域的應用上，由於電子束微影技術具備製作尺寸匹配於次波長元件 (特別是短波長元件，如可見光波段) 的能力，再加上整合三維結構功能，而成為製作相關光學元件的利器之一，如用來製作菲涅耳鏡、平面式微光柵、閃耀式光柵、繞

射式光學元件及全像片等。運用 Raith 50 電子束微影系統為製程平台，該圖形產生系統可外掛一產生三維圖形的程式。基本原理為將欲產生之三維結構圖案轉化成一 256 階的灰階圖檔，再藉由此外掛程式將灰階分布轉化成相對的電子劑量分布，經由微影製程後，即可得到三維的奈米結構。利用此系統設計一組灰階結構的 Fresnel 微透鏡，直徑 1.2 mm，焦距 4.15 mm，模擬設計值與實驗結果參考圖 18。

七、生醫微光電系統之設計方法與案例

從 1997 年開始，精儀中心已經陸續成功地設計出各種關鍵性角色的微光學元件，包括 Fresnel 微透鏡、光束整型器、遠場繞射圖像產生器、無繞射光束產生器、空心光束產生器、長焦深雙波長讀寫頭物鏡、凹面型微光柵元件、色彩分光微光柵、微型柱狀鏡及灰階 Fresnel 微透鏡等等。精儀中心除了專注於關鍵性微光學元件之設計與開發外，也將若干微光學元件設計組合成微光學系統，如微光譜儀與微全生醫系統等，七年來成果豐碩，並廣泛

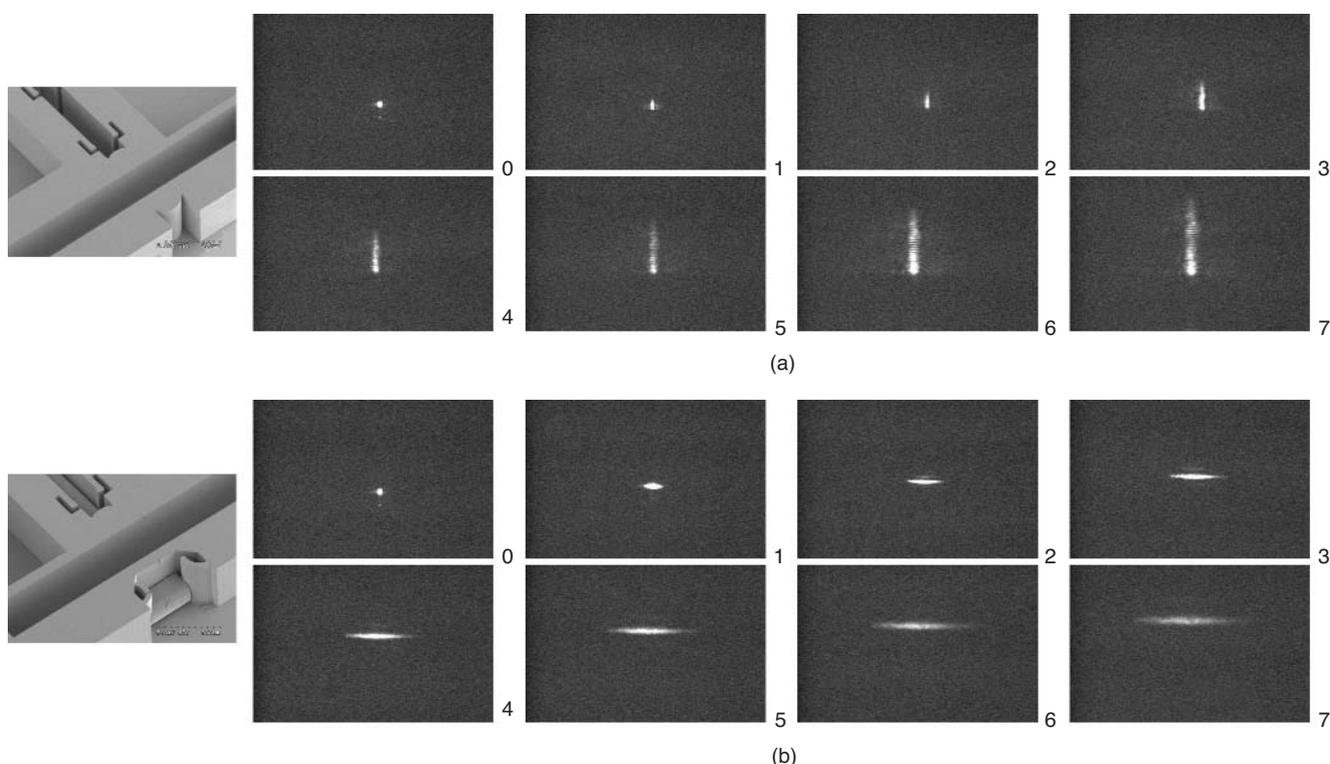


圖 17. 將完成之雙向微柱狀透鏡設計於微通道中，進行雷射激發螢光實驗，(a) 弧矢面向與 (b) 子午面向的聚焦實驗結果。

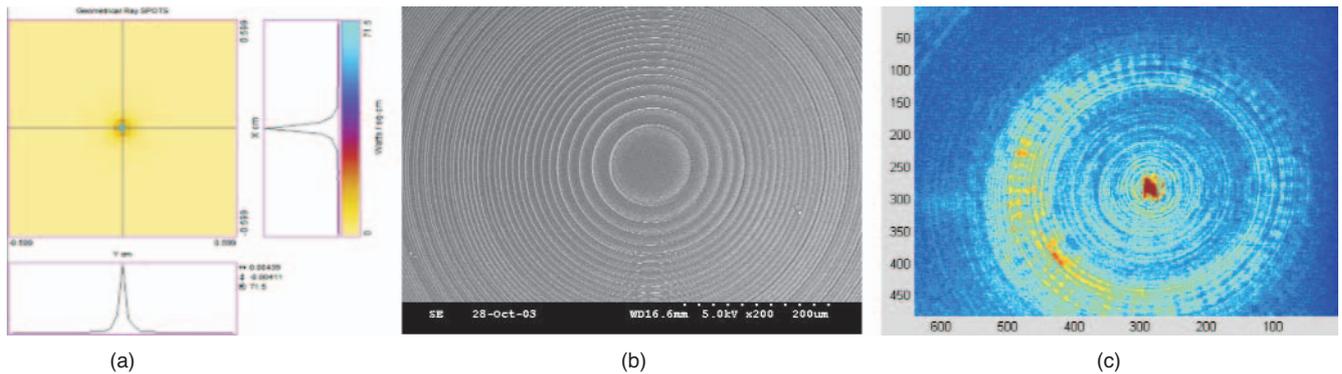


圖 18. 灰階結構的 Fresnel 微透鏡的 (a) 模擬設計值，(b) E-beam 灰階微影製程後之元件 SEM 圖，(c) 光場實驗測量圖。

地應用於光資訊讀取系統、奈米生醫微系統、光通訊分波元件等科技與工程領域。

近年來，生醫晶片或生醫微系統晶片之研究隨著微機電系統技術發展而大行其道，其具有將多種生化反應過程縮至一微小晶片上，使所需樣品量大幅減少，節省了昂貴試劑的實驗成本等優勢。因此，近年來如陣列式生醫晶片、微流體生醫晶片或微全分析系統 (micro total analysis system, μ -TAS) 等各種晶片已經逐步地在文獻上發表。

然而，生醫 (系統) 晶片大都必須經由特定之檢測系統加以讀取，而該類儀器除了昂貴、體型龐大外，管理與操作等皆很複雜，無庸置疑的，更難實現其可攜性，因而相對提高檢測成本。因此，精儀中心利用過去微光學元件與微機電製程技術之設計經驗，將凹面光柵、微柱狀透鏡、微流道、微面鏡、微橢面鏡、Fresnel 灰階高數值孔徑微透鏡等關鍵元件，設計成具備檢測雷射誘導螢光 (laser induced fluorescence, LIF) 的微光電檢測系統⁽⁴¹⁾，請參考圖 19，使其能維持甚至超越原有檢測系統的性能，並在與可拋式生醫晶片搭配後，在成本、可攜之功能或是使用方便性等方面都更具優勢，以期未來能設計出具多功能檢測平台之微光電系統。

八、結論

由於微奈米半導體技術、微機電製程與封裝等技術高度的發展，帶動高科技的進步，精儀中心在此科技潮流中從沒缺席過。從國內第一個開發出十六階高效率繞射元件⁽³²⁾開始，一直扮演著關鍵性

的角色，並廣泛地應用於奈米生醫微系統、光通訊分波元件、光資訊讀取系統等科技與工程領域。精儀三十年了，回顧過去，從傳統光學元件的設計與拋光製程技術、開發微光學設計與製程技術，到大口徑星載遙測用光學系統，一步一腳印地累積了無數豐碩的實務經驗。

目前精儀中心的研發技術已經深入奈米科技與生醫領域，如可應用於高能雷射光學元件的抗反射結構及選擇極化光 (為平面顯示器內導光板之設計先驅) 的次波長繞射光學元件、應用於光通訊的光子晶體，以及應用於微奈米生醫檢測系統的 SPR 奈米被動光學增幅元件等。另外，研發團隊更嘗試將包括微流道與各種微光學元件作一整合成微系統檢測晶片，若能成功的話，將是國內首先開發出一具體而微的生醫微全分析系統 (micro total analysis system, μ -TAS)⁽⁴¹⁾。未來在微奈米光學元件的設計、製程與檢測技術上的創新研究與系統整合，則是技術團隊的努力標竿。

參考文獻

1. W. B. Veldkamp, *SPIE*, 1544, 287 (1991).
2. S. Sinzinger and J. Jahns, *Microoptics*, Verlag GmbH: Wiley-Vch (1999).
3. W. B. Veldkamp and T. J. McHugh, *Scientific American*, **266** (5), 92 (1992).
4. X. Wang, J. R. Leger, and R. H. Rediker, *Applied Optics*, **36** (20), 4660 (1997).
5. V. Soifer, V. Kotlyar, and L. Doskolovich, *Iterative Method for Diffractive Optical Elements Computation*, Taylor & Francis (1997).
6. B. P. Keyworth, D. J. McMullin, and L. Mabbott, *Applied Optics*, **36** (10), 2198 (1997).

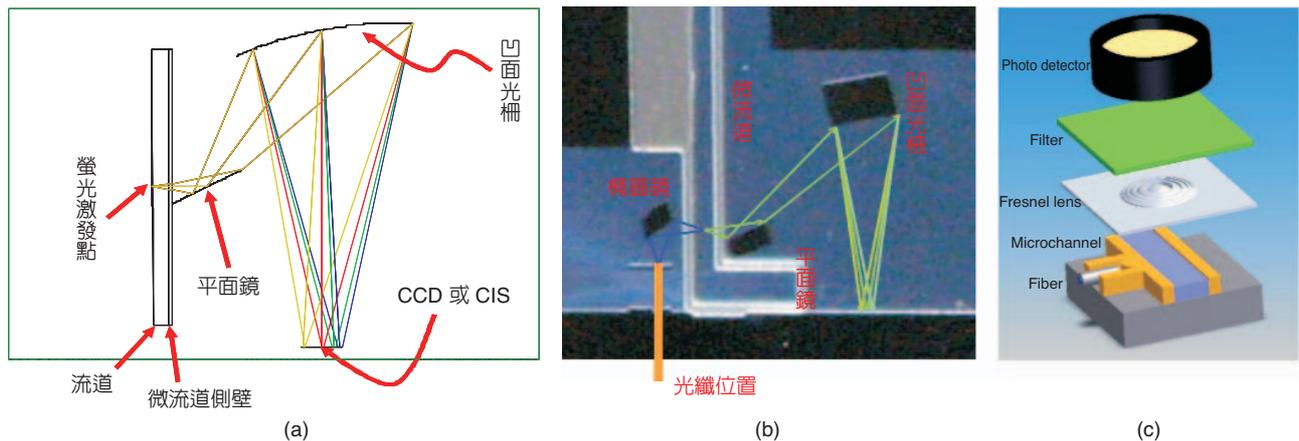


圖 19. 整合凹面光柵、微柱狀透鏡、微流道、微面鏡、微橢面鏡、Fresnel 灰階高數值孔徑微透鏡等關鍵元件，設計成具備檢測雷射誘導螢光的微光電檢測系統：(a) 側面收光功能之光學設計模擬光路示意圖，(b) 側面收光功能之微系統晶片離型樣品示意圖，(c) 上面收光功能之系統架構圖。

7. N. F. Borrelli, *Microoptics Technology*, New York : Marcel Dekker (1999).
8. S. Sinzinger and J. Jahns, *Microoptics*, Wiley-VCH (1999).
9. D. L. MacFarlane, V. Narayan, J. A. Tatum, W. R. Cox, T. Chen, and D. J. Hayes, *IEEE Photonics Technology Letters*, **6** (9), 1112 (1994).
10. H. P. Herzig, *Micro-Optics: Elements, Systems and Applications*, Taylor & Francis (1997).
11. 林暉雄, 陸懋宏, 科儀新知, **21** (4), 91 (2000).
12. 張哲瑋, 林暉雄, 周曉宇, 郭文凱, 1999 台灣光電科技研討會, 1211 (1999).
13. 傅同龍, 林暉雄, 林宇仁, 楊宗勳, 周曉宇, 第六屆奈米工程暨微系統技術研討會, 4B-4 (2002).
14. 林宇仁, 傅同龍, 林暉雄, 周曉宇, 第六屆奈米工程暨微系統技術研討會, 4B-5 (2002).
15. H.-H. Lin, M.-H. Lu, J.-W. Chang, and C.-R. Yang, *Proceedings of International Photonics Conference (IPC2000)* (II), 734 (2000).
16. J.-W. Chang, H. -H. Lin, Bruce. C. -S. Chou, and S. -E. Wang, 奈米元件技術研討會 (SNDT 2001) (2001).
17. 林暉雄, 林俊廷, 林宇仁, 傅同龍, 林郁欣, 陸懋宏, 科儀新知, **24** (3), 58 (2002).
18. 林郁欣, 徐永裕, 劉祥麒, 郭文凱, 周正三, 第七屆微系統科技協會年會暨微機電研討會論文集, 172 (2001).
19. M. C. Hutley, *Diffraction Gratings*, National Physical Laboratory (1982).
20. M. G. Moharam, et. al., *JOSA*, **12**, (5), 1077 (1995).
21. 林暉雄, 林俊廷, 傅同龍, 林宇仁, 周曉宇, 第六屆奈米工程暨微系統技術研討會, 4B-1 (2002).
22. 林暉雄, 林俊廷, 傅同龍, 林宇仁, 楊宗勳, 周曉宇, 陸懋宏, 2002台灣光電科技研討會 (2002).
23. 張哲瑋, 林暉雄, 科儀新知, **23** (5), 49 (2002).
24. S. Seki, T. Yamanaka, and K. Yokoyama, *Proc. Inst. Elect. Eng.*, **138**, 123 (1991).
25. K. L. Johnson, *M. S. Thesis*, University of Minnesota, Department of Elect. Eng. (1993).
26. W. P. Huang and C. L. Xu, *IEEE J. Quantum Electron.*, **29** (10), 2639 (1993).
27. W.-P. Huang, C.-L. Xu, and S. K. Chaudhuri, *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (6), 1527 (1992).
28. G. R. Hadley, *Opt. Lett.*, **17**, 1426 (1992).
29. K. S. Yee, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, AP-14, 302 (1966).
30. A. Taflov, *Computational Electrodynamics : The Finite Difference Time Domain Method*, Norwood, MA : Artech House (1995).
31. J.-P. Berenger, *J. Computational Phys.*, **114**, 185 (1994).
32. J. Hsieh, C.-J. Weng, H.-H. Lin, H.-L. Yin, Y. C. Hu, H.-Y. Chou, C.-F. Lai, and W. Fang, *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS*, Waikoloa, HI, Aug 2003, Paper TuP 7 (2003).
33. H.-L. Yin, Y.-J. Lin, C.-S. Yu, C.-S. Huang, S.-C. Cheng, Y.-C. Hu, and H.-Y. Chou, G14, 第七屆奈米工程暨微系統技術研討會, 40 (2003).
34. F. H. -H. Lin, J.-H. Huang, E. H. -Y. Chou, C. -R. Yang, B. C. -S. Chou, R. K. -S. Luo, W. -K. Kuo, J. -W. Chang, M. -H. Lu, W. -H. Huang, and C. -J. Chen, *SPIE Int. Symp., Micromachining and Microfabrication*, Santa Clara U.S.A., **3511**, 67 (1998).

- 林暉雄先生為國立交通大學光電工程研究所博士候選人，現任國科會精密儀器發展中心助理工程師。
- Hui-Hsiung Lin is a Ph.D. candidate in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao-Tung University. He is currently an assistant engineer at Precision Instrument Development Center, National Science Council.