出國報告(出國類別：其他(開會))

光電感測辨識模組與應用技術計畫－干涉光學辨識技術出國報告

服務機關：國防部軍備局中山科學研究院
姓名職稱：聘用技正/葉茂勳
派赴國家：美國
出國時間：100 年 10 月 15 日至 10 月 22 日
報告日期：100 年 11 月 21 日

出國報告審核表

<table>
<tr><td colspan="4">出國報告名稱：光電感測辨識模組與應用技術計畫－干涉光學辨識技術出國報告</td></tr>
<tr><td colspan="2">出國人姓名</td><td>職稱</td><td>服務單位</td></tr>
<tr><td colspan="2">葉茂勳</td><td>聘用技正</td><td>第五研究所</td></tr>
<tr><td>出國類別</td><td colspan="3">☐考察 ☐進修 ☐研究 ☐實習
☑其他　開會　（例如國際會議、國際比賽、業務接洽等）</td></tr>
<tr><td colspan="2">出國期間：100 年 10 月 15 日至 100 年 10 月 22 日</td><td colspan="2">報告繳交日期：100 年 11 月 21 日</td></tr>
<tr><td>計畫主辦機關審核意見</td><td colspan="3">☐1.依限繳交出國報告
☐2.格式完整
☑3.無抄襲相關出國報告
☐4.內容充實完備
☐5.建議具參考價值
☐6.送本機關參考或研辦
☐7.送上級機關參考
☐8.退回補正，原因：☐不符原核定出國計畫　☐以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料爲內容　☐內容空洞簡略或未涵蓋規定要項　☐抄襲相關出國報告之全部或部分內容　☐電子檔案未依格式辦理　☐未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔
☑9.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
☑辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同仁進行知識分享。
☐於本機關業務會報提出報告
☑其他：本報告已於 11 月 21 日辦理知識分享。
☐10.其他處理意見及方式：報告內容不涉機敏，資訊可公開。
敬會：保防官及保防督導官</td></tr>
<tr><td rowspan="2">審核人</td><td>出國人員</td><td>初審（業管主管）</td><td>機關首長或其授權人員</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

說明：

一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。

二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」爲原則。

<table>
<tr><td colspan="4">報　告　資　料　頁</td></tr>
<tr><td>1.報告編號：
CSIPW-100Z-H0007</td><td>2.出國類別：
其他(開會)</td><td>3.完成日期：
100 年 11 月 21 日</td><td>4.總頁數：
45</td></tr>
<tr><td colspan="4">5.報告名稱：光電感測辨識模組與應用技術計畫－干涉光學辨識技術出國報告</td></tr>
<tr><td rowspan="2">6.核准文號</td><td>人令文號</td><td colspan="2">100 年 9 月 28 日國人管理字第 1000013452 號</td></tr>
<tr><td>部令文號</td><td colspan="2">100 年 9 月 26 日國備科產字第 1000013750 號</td></tr>
<tr><td colspan="2">7.經　　費</td><td colspan="2">新台幣：107,285 元</td></tr>
<tr><td colspan="2">8.出(返)國日期</td><td colspan="2">100.10.15 至 100.10.22</td></tr>
<tr><td colspan="2">9.公 差 地 點</td><td colspan="2">美國聖荷西</td></tr>
<tr><td colspan="2">10.公 差 機 構</td><td colspan="2">美國光學學會(Optical Society of America)</td></tr>
<tr><td colspan="2">11.附　　記</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

系統識別號

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：光電感測辨識模組與應用技術計畫－干涉光學辨識技術出國報告

頁數 45 含附件：□是■否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

國防部軍備局中山科學研究院/葉茂勳/03-4712201#357177

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

葉茂勳/國防部軍備局中山科學研究院/第五研究所/聘用技正/03-4712201#357174

出國類別：□1 考察□2 進修□3 研究□4 實習■5 其他(開會)

出國期間：100.10.15~100.10.22 出國地區：美國

報告日期：100.11.21

分類號/目

關鍵詞：光學設計、繞射光學、奈米光子學、超材料、自適應光學、飛秒雷射加工

內容摘要：(二百至三百字)

本報告內容包含二大部份：第一部份為 Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光學與雷射技術研討會內容綜整，主題包括光學鏡頭設計技術、奈米光子學、新型超材料、自適應光學、光學在太陽能源的應用、飛秒雷射加工、以及光學檢測等技術領域，探討其關鍵技術發展現況與方向，並簡述本院相關技術研發現況。第二部份為綜整光電產品展示大會之參訪心得，拜訪光學鏡頭與元件製作、光電材料、光電零組件、光電檢測儀器等廠商，討論最新產品之規格功能及市場發展趨勢。

目　　次

壹、 目的……（9）
貳、 過程……（9）
參、 心得……（11）
肆、 建議事項……（45）

光電感測辨識模組與應用技術計畫－干涉光學辨識技術出國報告

壹、 目的

科技專案「光電感測辨識模組與應用技術計畫」，100 年度是三年計畫中之第三年，開發微型光學影像顯示模組、光學取像模組、光斑干涉影像辨識模組、複合式微光學元件之設計與製程等關鍵技術爲研發目標。本計畫在相關同仁共同努力下，已有具體研發成果及雛型成品，包括開發微型照像手機用光學取像鏡頭、採用繞射光學元件的太陽能聚光鏡組、及建立導光板微光學結構元件量產模仁製程技術等，協助國內廠商建立自主性技術能量。而隨著影像解析度與元件製程技術的精進，光學影像產品對於品質與性能的要求亦不斷提升，尤其在光學鏡頭設計、微光學元件與材料、非對稱型及非傳統光學元件的設計、製作、檢測等技術方面，急需與各國在此專業領域之專家學者或廠商，進行技術研討及產品商情蒐集分析，以利計畫後續之執行，此外並蒐集在國防科技研發上可運用之軍民通用技術，本次公差即在此需求下奉准編列執行。

貳、 過程

本次 Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII (2011 前瞻光學/第 27 屆雷射科學年會)之光學技術研討與展示大會，於 10 月 15 日至 10 月 22 日在美國 San Jose 舉行，共有約 150 個研討場次，發表之技術論文總計約 1000 餘篇，研討議題包括前瞻的光學架構設計、奈米光子學、新型超材料、自適應光學、再生能源光學、繞射與全像光學、偏振光學、非線性光學、影像感測元件、光通訊、微光學元件、生醫光學、照明之視覺與色彩、超快雷射光源之應用等。此次選擇參加與本計畫及本組(光電組)相關的技術主題，主要研討內容包括光學鏡頭設計技術、奈米光子學、新型超材料、自適應光學、光學在太陽能源的應用、飛秒雷射加工、以及光學檢測等技術領域。並參訪光電產品展示大會，拜訪光學鏡頭與元件製作、光電材料、光電零組件、光電檢測儀器等廠商，討論最新產品的規格功能及市場發展趨勢，並作爲本計畫後續建案技術研發之參考。本次公差依出國計畫執行過程如下表。

本次公差出國計畫執行過程表

日期	執　行　過　程
100.10.15	去程
100.10.16	1. Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 研討會報到註冊。 2. 專題課程研討會，主題：「奈米光子學」。
100.10.17	研討主題：新型超材料、繞射光學設計、三維結構設計與製作、生醫光學、偏振光學影像、自適應光學、及光學鏡頭設計。
100.10.18	1. 研討主題：奈米光子學、光學在診斷與醫療上的應用、生醫光學應用、全像光學設計、及光學儀具設計。 2. 參觀光電科技展，蒐集精密光學元件、光電新材料、雷射產品與元件、以及光電檢測等產品資料。
100.10.19	1. 研討主題：光學檢測、光學在太陽能源的應用、光學新材料、自適應光學應用、光學訊號處理。 2. 參觀光電科技展，蒐集光學設計軟體、及光電應用產品資訊。
100.10.20	研討主題：非線性新材料、飛秒雷射加工、光學與替代能源、光機學技術、奈米結構的非線性光學、人眼視覺與色彩。
100.10.21	回程
100.10.22	回程

參、 心得

一、Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光學與雷射技術研討會：

今年 Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光學與雷射技術研討會，共舉行 150 個研討場次，配合場次時間安排，選擇參加與本計畫及本組(光電組)相關的技術主題，研討內容整理為七大領域，包括光學鏡頭設計技術、奈米光子學、新型超材料、自適應光學、光學在太陽能源的應用、飛秒雷射加工、以及光學檢測等，內容歸類如下表。

Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光學與雷射技術研討會主題

項次	研　討　主　題
1	光學鏡頭設計技術(Optical Lens Design)
2	奈米光子學(Nanophotonics)
3	超材料(Metamaterials)在光學的應用
4	自適應光學(Adaptive Optics)
5	光學在太陽能源的應用(Optics for Solar Energy)
6	飛秒雷射加工(Femtosecond Laser Microfabrication)
7	光學檢測技術(Optical Measurement)

1. 光學鏡頭設計技術(Optical Lens Design)：

光學鏡頭主要功能為將欲拍攝的畫面(物面)上的各點(物點)成像在像面上的對應點(像點)，傳統的光學鏡頭(由至少一片的光學透鏡所組成)是利用光線通過鏡片表面產生折射，以持續光的傳播，因此鏡片的設計原理主要是基於光線的折射定律(Snell’s Law)，再配合像差理論設計出所需要的光學鏡頭。幾何光學通常以光線描述光在透鏡表面(球面或平面)的折射現象，參考圖 1，物面上 P 點發出光線，經過光學透鏡折射後，進入像面空間，因光線為電磁波，光線垂直於波前(Wavefront)，波前為光波等相位的波面，因此波前也稱為波面，另光線行進方向亦表示光波能量傳播方向。理想的光學鏡頭，從物面空間的物點發出的光波，波前為一球面形狀，經過光學鏡頭後至像面空間，其波前仍為一球面形狀，隨著光線的前進，球面波前的曲率半徑(Radius of Curvature)愈來愈小，因此當光線到達像點時，將會是一完美聚焦點(亦即為球面波前的曲率中心)，圖 1 左圖為單一物點 P 發出光線經過透鏡前後光學面產生折射後，會聚於完美的單一像點 P’，圖 1 右圖為 P 點在無限遠處的光路圖。

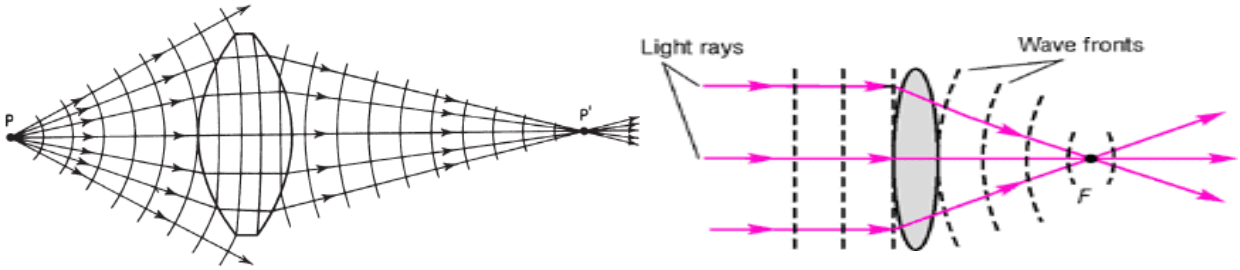


圖 1 理想光學鏡頭光路圖.

但在真實的光學鏡頭，光線經過光學透鏡折射至成像點，並非完美的一聚焦點，而呈現點擴散現象，稱爲像差，如圖 2 所示。像差是指成像的缺陷(光線成像點的偏差量)，通常與理想光學鏡頭的完美成像點或稱爲近軸焦點(Paraxial Focus)做偏差比較，稱爲像差(成像偏差)。使用光線追跡可計算出點擴散大小(Spot Size)，作爲成像品質優劣評估的指標。

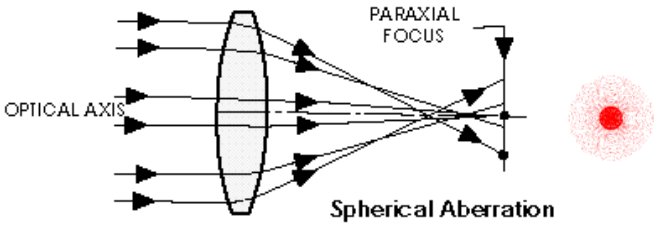


圖 2 真實的光學鏡頭成像點有像差現象(放大示意圖).

較常用的像差分析方式，係利用波面像差理論進行量化計算，如前所述光線垂直於波前(Wavefront)，理想的波前爲一球面形狀稱爲參考球面(Reference Sphere)，像差的存在表示光波經過光學鏡頭後，其波前並非一球面形狀，稱爲像差波前(Aberrated Wavefront)。參考圖 3，像差理論的成像偏差計算，係利用經過光學鏡頭出射光之像差波前與參考球面的差異值，一般稱爲波前光程差(Optical Path Difference，OPD)或波前像差(Wavefront Aberration)表示，其值愈小，成像品質愈好。像差理論的波前光程差與使用光線追跡的點擴散大小，均可作爲成像品質優劣指標，兩者亦互有關聯，波前光程差愈小，點擴散也較小，如圖 3 右圖所示。光學像差可解析成五種類型，包括球面像差(Spherical aberration)、彗差(Coma)、像散(Astigmatism)、場曲(Field Curvature)、畸變(Distortion)等，另若非單一波長，又因波長不同將產生色差(Chromatic Aberrations)。人

眼可視爲一光學系統，水晶體如同透鏡將光聚焦於視網膜上，水晶體亦存在光學像差，主要爲球面像差(簡稱球差)，另人眼散光現象屬於像散像差，有關人眼的光學特性將於後面論述。

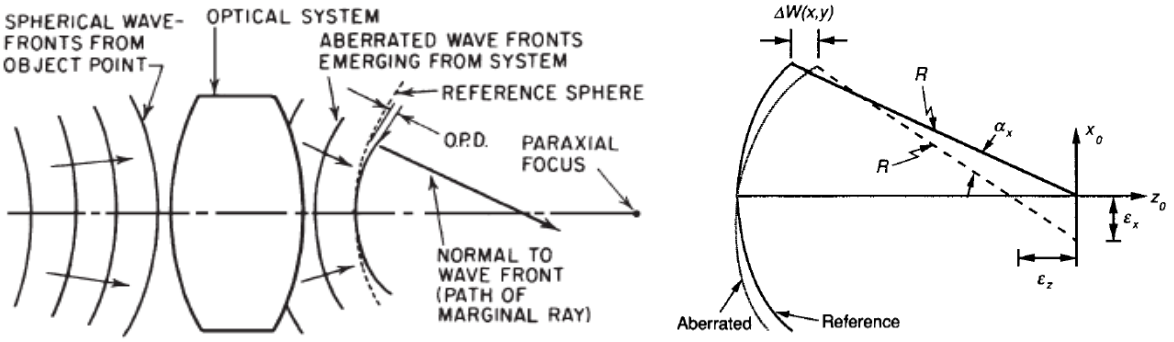


圖 3 像差理論的波前光程差(OPD)與波前像差

光學鏡頭設計者的主要任務爲利用光學鏡頭的相關設計參數，包括鏡片數量、材料、厚度、曲率半徑等，使得波前光程差或波前像差降至最小，以獲得較佳的成像品質，其中又以鏡片曲率半徑(Radius of Curvature)與形狀的影響最大。而光學鏡片的發展從傳統的球面透鏡開始，隨著超精密機械加工技術的進步，陸續開發出非球面鏡片，所使用的材質也從傳統玻璃，延伸至可大量射出成型的塑膠材料，對光學鏡片的製作與鏡頭像質的提升有很大的助益。由於非球面光學鏡片的製造與測量精度的不斷精進，非球面的形狀也較不受到限制，對光學系統設計者而言，使用非球面鏡片可設計出更輕巧且品質更好的光學鏡頭，圖 4 左圖爲使用傳統球面透鏡，右圖改爲爲非球面透鏡後，像質有明顯的改善。

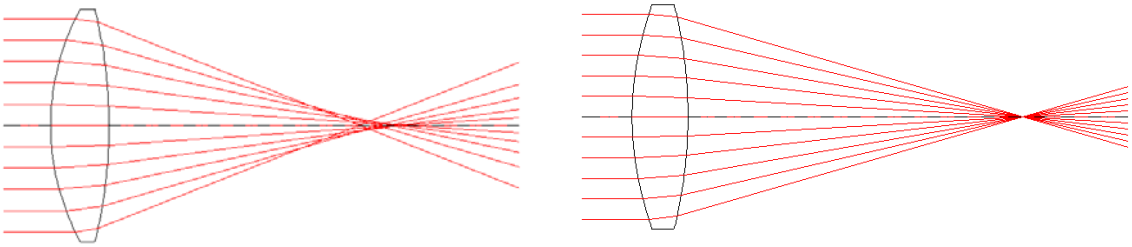


圖 4 傳統球面透鏡與非球面透鏡像質比較.

隨著鑽石單點切削(Diamond-Turning)加工技術的進步，另一新興的繞射鏡片亦逐漸應用於光學鏡頭，以進一步提升成像品質。繞射鏡片係利用微米等級的表面浮雕微細結構，藉由繞射原理改變光線行進時的波前形狀，產生表面相位調制，以達到光學鏡頭的

像質設計需求。繞射鏡片由於具有特殊的光學特性及可採用現代加工技術大量製作，是具有相當大發展潛力的光學元件。參考圖 5，圖(a)傳統折射光學鏡片；圖(b)繞射光學元件；圖(c)以光蝕刻製作的二元繞射光學元件；圖(d~e)顯示傳統折射鏡片與繞射元件具有相同光學成像功能，但後者厚度小很多。繞射鏡片另具有光學色差的補償修正功能(如圖 6 所示)，可減少光學鏡頭內鏡片數量，適用於要求輕薄短小的光學影像產品，包括應用於太陽能聚光器(將於後面詳述)。

如何利用傳統球面鏡片，搭配使用非球面鏡片及繞射鏡片，經由最佳化光學設計消除光學鏡頭的像差，以獲得最佳的成像品質，是本次研討會的重點主題，也是光學設計者持續努力的目標。本院目前已具備非球面光學鏡片與繞射鏡片的設計與製作能量，並已應用於紅外光學系統及太陽能聚光器。

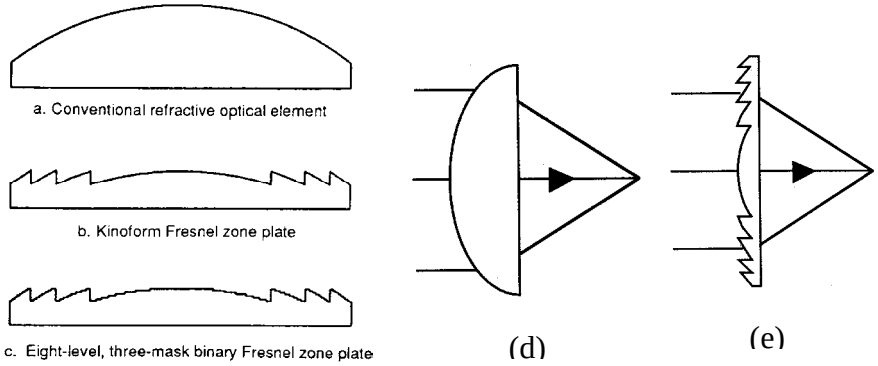


圖 5 傳統折射式光學鏡片與繞射式光學元件.

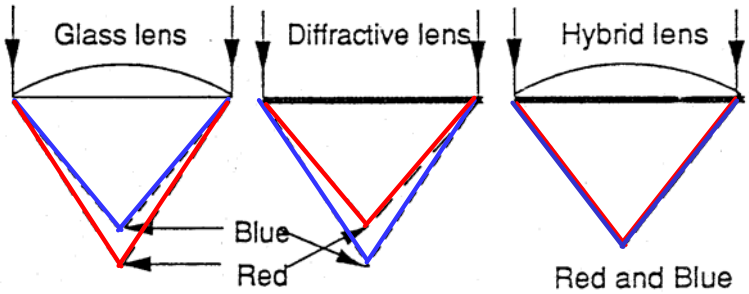


圖 6 繞射光學鏡片可提供色差的補償.

如前所述理想的光學鏡頭，波前爲一球面形狀，光線垂直於波前，因此當光線到達像點時，將會是一完美聚焦點。但依據波動光學理論，當光線前進時彼此亦有干涉現象，因此當光線到達像點時，不會聚焦完美的一點，而是擴散成一斑點的繞射圖案(Diffraction Pattern)，稱爲愛里斑(Airy Disk)，直徑約爲 2.44λW/L，如圖 7 所示，因此光學鏡頭最佳設計結果的點擴散(Spot Size)最小值爲愛里斑直徑，此時光學鏡頭設計已達到繞射極限

(Diffraction-limited)。其中 W 爲光學透鏡口徑，λ 爲光波長，L 爲透鏡至像面距離(若入射光爲平行光，則 L=f=透鏡焦距)，例如 W=50mm，L=100mm，λ=0.55μm，則聚焦點大小(愛里斑直徑)爲 0.671μm。

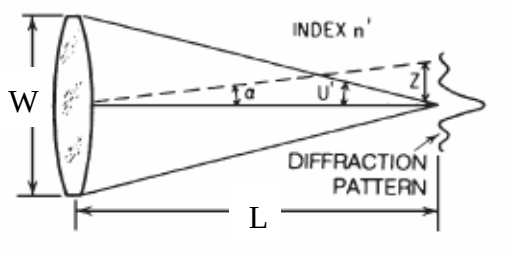


圖 7 理想的光學鏡頭的聚焦繞射圖案(Diffraction Pattern).

2. 奈米光子學(Nanophotonics)：

奈米科技是 90 年代快速發展的科學新領域，主要爲研究奈米級材料的電子、原子和分子運動規律與特性的新學科，奈米尺度(1 nm=10^{-9} m)。奈米科技的發展歷程，1982 年科學家發明掃描隧道顯微鏡(Scanning Tunneling Microscopy，STM)，使得人類首次在常溫環境下看見原子形態，進入一個原子與分子的微觀世界，提供研究奈米科技的重要工具。掃描隧道顯微鏡能達到原子級的超高解析度，具有空間的高解析度(橫向可達 0.1nm，縱向可達 0.01nm)，能直接觀察到物質表面的原子結構，不僅可作爲觀察物質表面結構的重要工具，並可作爲物質表面奈米級精細加工與製程的檢測工具。1986 年發明了利用雷射檢測針尖與表面的相互作用，進行表面成像的分析儀器，稱爲原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy，ATM)，是現今掃描探針顯微鏡(Scanning Probe Microscopy，SPM)的一種，也對奈米科技的發展產生了催化作用。

奈米材料又稱爲超微顆粒材料，由奈米粒子(尺寸在 1～100nm 間的粒子)組成。當人們將宏觀物體細分成奈米級超微顆粒後，與宏觀材料特性相比較，包括光學、熱學、電學、磁學、力學、化學等有著明顯不同的特性。奈米材料的特性，包括表面效應、小尺寸效應、量子尺寸效應、宏觀量子隧道效應等。幾種典型的奈米材料，包括奈米顆粒型材料、奈米固體材料、奈米膜材料、奈米磁性液體材料、奈米碳管等。

奈米光子學(Nanophotonics)主要探討奈米材料的光學特性，及在光電材料製作奈米級微結構所產生的光學現象與其應用，亦爲本次研討會重點主題。奈米超微顆粒材料方面，由於小尺寸效應，使它具有一般宏觀材料不具備的光學特性，例如光學非線性、光

吸收、光反射等，目前已應用於光學領域包括(1)红外反射材料：作爲高壓鈉燈及攝影用碘弧燈的燈泡罩內壁鍍膜材料，增強紅外光的反射率，並提升可見光的穿透率。(2)光吸收材料：將 30~40nm 的 TiO_2 奈米微粒摻入樹脂中製成的樹脂膜，對 400nm 波長以下的紫外光有極強的吸收能力，而摻入 Fe_2O_3 奈米微粒的聚酯樹脂膜，對 600nm 波長以下的光具有良好的吸收能力，可作爲光電元件的紫外線濾光器。(3)隱形材料：由於奈米微粒尺寸遠小於雷達波及紅外波長，因此奈米微粒材料對這種電磁波的透過率高於一般材料，也就是可降低電磁波的反射率，使得紅外偵測器與雷達接收到的反射波信號變得很微弱，進而達到隱形的功能。

本次研討會對於奈米材料微結構在光學領域的特性與應用，由美國 Dayton 大學 Joseph W. Haus 教授專題主講，主要探討兩種類型：超材料(Metamaterial)與光子晶體(Photonic Crystal)。

Metamaterial，中文一般譯爲超材料，是指由人工結構所構成的複合介質材料，具有超越自然界一般材料的光學與物理特性，該特性通常不是由構成的材料物性所決定，而是決定於其中的人工奈米微結構。例如一般光學材料的折射率，影響光線(或電磁波)在該物質內的傳播行爲，而折射率與材料的介電常數(Dielectric Constant，ε)及導磁率(Permeability，μ)有密切關係。超材料所產生的一些不尋常電磁波現象，目前已可利用非等向的(Anisotropic)與非均勻的(Inhomogeneous)的介電常數及導磁率，解析其電磁波性質，也能合理的解釋許多由超材料所引起的光學特性，包含人工磁性材料、負折射率材料、完美透鏡、隱形斗篷等，已經發展的這類型超材料，包括人工光子晶體、左手材料、以及超磁性材料等。但介電常數與導磁率這兩個物理量仍無法解釋某些超材料的新現象，例如：超穎材料的光學穿透量增強(Enhanced Optical Transmission，EOT)機制、電磁誘發穿透(Electromagnetically Induced Transparency，EIT)等，因此近年來，又引入電漿子超材料(Plasmonic Metamaterial)理論，以解釋 EOT 與 EIT 等現象。

光子晶體(Photonic Crystal)是指具有週期性排列用以調制電磁波傳播行爲的介電質材料，及能對光波作出反應的特殊晶格，亦即具有能夠影響光波行爲的規則性光學結構，這種影響類似於半導體晶體對於電子行爲的影響，而自然界中存在著各種形態的光

子晶體。目前奈米材料探討的光子晶體，係指由不同折射率的介質，以週期性排列而構成的人工微結構，藉由人爲的結構設計，製作特殊需求的人工光子晶體。由於介電常數存在空間上的週期性，引起空間折射率的週期變化，當人工光子晶體介電係數的變化很大且變化週期與光波長相當時，光波的色散關係將出現帶狀結構，稱爲光子能帶結構(Photonic Band Structures)，相對應的頻率區間稱爲光子頻率帶隙(Photonic Band Gap，PBG)，頻率落在帶隙中的光波或電磁波是被禁止傳播的，進而影響光線傳播行爲，因此可更明確的定義具有此光子頻率帶隙的週期性介電結構稱作爲光子晶體。然而介電常數週期性排列的方向，並不等同於帶隙出現的方向，在一維光子晶體和二維光子晶體中，也有可能出現全方位的三維帶隙結構，圖 8 分別爲一維、二維、三維的光子晶體結構示意圖。而有關光子晶體的特性分析，目前已結合固態物理及電磁理論，發展多種計算方法以探討其物理特性，包括平面波展開法(Plane Wave Expansion Method)、有限時域差分法(Finite-Difference Time-Domain Method，簡稱 FDTD Method)及傳遞矩陣法(Transfer-Matrix Method)等。

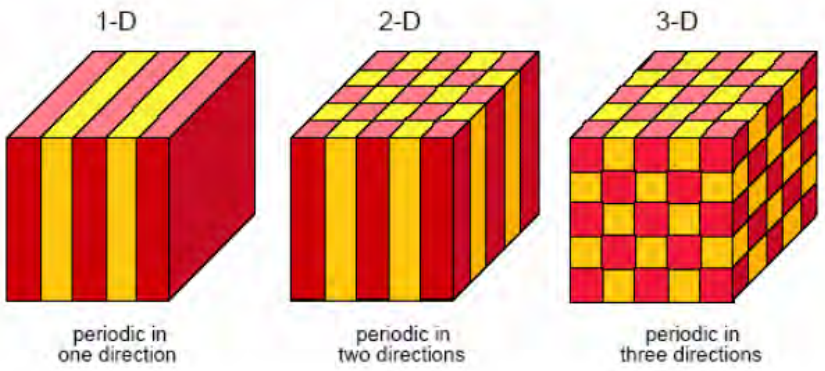


圖 8 一維、二維、三維的光子晶體結構示意圖.

3. 超材料(Metamaterials)在光學的應用：

超材料爲利用共振電磁場特性，於光電材料上製作特殊次波長(Sub-Wavelength)人工表面結構，以產生天然材料所沒有的電磁場反應，進而影響光波前進的波前(Wavefront)形狀，達到設計者需求的光電或光學特性。這些特性包括：人工磁性(Artificial Magnetism)、負磁導率(Negative Permeability)、負折射率(Negative Index of Refraction)、以及雙曲型色散(Hyperbolic Dispersion)等。利用這些特性，已有多種新穎的超材料元件被設計與製作出來，例如超透鏡(Superlens)、雙曲透鏡(Hyperlens)、隱形斗篷(Invisibility

Cloak)、以及電漿子波導(Plasmonic Waveguide)等。

(1). 超透鏡(Superlens)：

超材料能製作同時具有等效負磁導率與負介電常數的週期性金屬結構，這種雙負(Double Negative)材料具有等效的負折射率，造成光的傳播路徑不再遵守傳統的折射定律(Snell's Law)，圖 9 爲光線進入傳統光學材料與稱爲左旋(Left-handed)的超材料，造成折射光線不同的前進方向之比較圖。

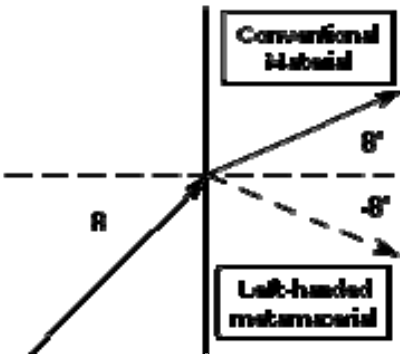


圖 9 光線進入傳統光學材料與超材料造成不同的折射現象.

所謂超透鏡即一塊具有負介電常數與負磁導率的平板金屬超材料，不只可以將傳導波(Propagating Waves)折向異於傳統光學的折射方向，亦可放大消逝波(Evanescent Waves)。因此若將一個點光源(其周圍的光場同時具有傳導波與消逝波)靠近此超材料平板，則此平板將具有透鏡功能，會將來自點光源的所有光線，聚焦成尺寸遠小於波長的像點(Image)，該平板透鏡被稱爲超透鏡，如圖 10 所示。此透鏡藉由抵消傳導波的相位累積(Phase Accumulation) 與放大消逝波而將來自點光源的所有光，聚焦至一個寬度遠小於波長的像點，此現象稱爲次波長成像(Subwavelength Imaging)，因而可突破前面所提的光學最佳成像點繞射極限愛里斑(Airy Disk)大小的限制，這種次波長成像效應又稱爲超透鏡效應(Supelensing Effect)。

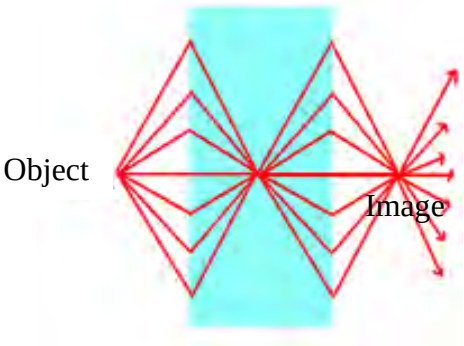


圖 10 超透鏡示意圖

(2). 雙曲透鏡(Hyperlens)：

雙曲透鏡可說是改良式的超透鏡，加州大學伯克利分校的研究人員 X.Zhang 等人提出雙曲透鏡結構。參考圖 11，點光源的近場光(次波長光源)可穿透雙曲透鏡在其中傳播，並在出射端被轉換成傳導波，最後在遠場區(Far Field Zone)形成點光源的放大實像，如此即可避免超透鏡只能在近場成像的缺點，且能鎖定尺寸比用聲波小 6~7 倍的物體，能在寬廣的頻譜中，得到深次波長的解析度，可改善超音波與聲納等聲波造影技術的放大效果與真實性，有助於提升超音波與聲納系統的影像解析度。目前設計的雙曲透鏡係將一維光子晶體捲成多層圓柱結構(Multilayered Cylindrical Structure)而製成的。用於製造雙曲透鏡的一維光子晶體，在每一個空間週期中包含有一層負介電常數材料(通常是金屬)以及一層正介電常數材料。光波長通常要比晶格常數(空間週期)大 10 倍以上，使得此多層結構可近似於一均勻介質，如此才可直接應用超材料概念，以一維光子晶體的等效介質行爲去預測彎曲結構的光傳播行爲。然而，雙曲透鏡目前只能用於 TM 波(磁場平行於圓柱軸)，且幾何結構都是圓柱形，因此還有需要改進的空間。

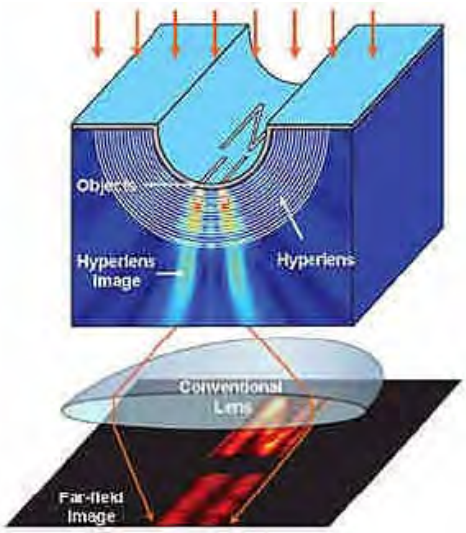


圖 11 可在遠場成放大實像的雙曲透鏡.

(3). 隱形斗篷(Invisibility Cloak)：

所謂隱形斗篷，就是用適當電磁材料所製成的一個「凸物」，這個凸物本身外界是看不到的，因此在這個凸物裡面的物體就不會被外界看到，而達到隱形的效果。參考圖 12~13，基本原理爲入射到隱形斗篷的光線不會被凸物所散射，而是沿著原先沒有這個凸物的表面(平面)反射，如同這個凸物不存在一樣。這些光線於繞過斗篷後會沿著入射

前的光線路徑繼續傳播，並且不會受到凸物的影響。在這個過程中，由於光線不會穿透凸物內部，所以在凸物底下的物體不會與外界有電磁交互作用，亦即被隱形。研究學者 John B. Pendry 等人已於 2006 年的 Science 科學雜誌上發表了符合 Maxwell 方程式的隱形斗篷理論。

由於材料技術的限制，大多數隱形斗篷只對紅外線等非可見光有效應，即便能在可見光下實現隱形效果，也需要限制在一定的條件下。日前美國加州大學伯克利分校的研究人員 X.Zhang 等人突破了這一難點，於本次研討會中提出可見光波段的地毯斗篷元件(A Carpet Cloak Device for Visible Light)，利用一種被稱爲擬保角映射(Conformal Mapping)的技術，在具有奈米大小孔洞的氧化矽表面上，製作一層氮化矽波導的隆起凸物(Bump)來隱藏物體，使得反射光的行爲與沒有隆起時一樣，讓隱形斗篷下的一個 300 奈米高、6 微米寬的物體，在可見光全波段中實現了隱形。由於這種隱身斗篷上有一層覆蓋物，研究人員稱其爲「地毯斗篷」，通過奈米表面結構設計技術，使得地毯在觀測上如同一個平滑的鏡面，觀察者在可見光下無法察覺其有隆起凸物存在。

設計上要實現隱形，首先必須改變經過物體四周的光線，使其波前(或波面)形狀不會受到物體的影響。爲達到這一目的，研究人員設計了一種具有可變折射率的材料，並將其轉化爲一種自然界中先前並不存在的超材料。這種材料主要分爲兩層，基板是一層透明的納米多孔二氧化矽(Nano-porous Silicon Oxide)，其上是一片氮化矽波導(Silicon Nitride Waveguide)。爲達到改變折射率的目的，研究人員還在氮化物上蝕刻出很多小的孔洞以構成所需的圖案。通過這種材料，斗篷便可以改變光線波面形狀，亦即改變光線的路徑，不會受到物體(凸物)輪廓的影響，從而達到隱形的目的。參考圖 12，圖(a)爲斗篷附近相對折射率變化圖，基板折射率相對較低，可將光線限制於波導內，並改變波面形狀與光線前進路徑，相對折射率變化是將經過斗篷凸物(Cloak Bump)的反射凸形波面，轉換爲平面波面的關鍵因素，也是隱形斗篷的主要原理；圖(b)爲隱形斗篷的結構剖面圖，基板是一層低折射率(n=1.25)的透明奈米多孔二氧化矽，其上是一片氮化矽波導，厚度分別爲 5~10μm 與 300nm，奈米孔洞的大小爲 25nm~65nm；圖(c)爲奈米孔洞的 AFM 原子力顯微鏡影像圖片；圖(d)爲隱形斗篷的 SEM 掃描電子顯微鏡影像圖，包括約 3000 個孔洞。

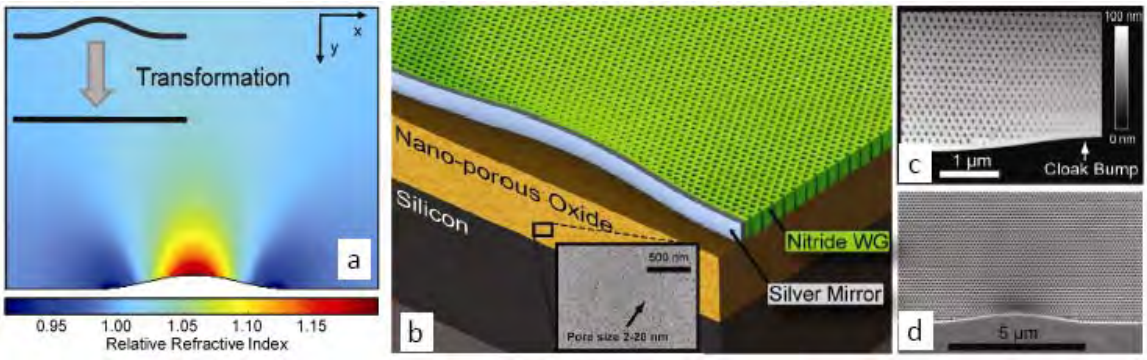


圖 12 隱形斗篷結構圖.

參考圖 13，圖(a)爲入射光(黑色箭號所示)到達斗篷凸物時，若無隱形斗篷效應，則反射光線將依一般凸物表面曲面形狀反射，扭曲了反射波面(Wavefront)，因此有散射現象；圖(b)有隱形斗篷效應時，反射光線將依平面表面形狀反射，因此反射光如同鏡面反射，無散射現象，亦即斗篷凸物對入射光的反射毫無影響，如同鏡面反射，斗篷凸物下的物體完全不會被看到，因此稱爲隱形斗篷；圖(c)爲藍綠紅三個波長(480nm、530nm、700nm)入射光線，分別經過平面(Flat)反射、一般凸物(Bump)反射、有斗篷效應凸物(Cloak)反射之影像圖。如同前面分析，經過平面(Flat)反射時，因依據反射定律，反射光影像仍接近一光點形狀。經過一般凸物(Bump)反射時，反射光有散射現象。經過有斗篷效應凸物(Cloak)反射時，反射光影像則與經過平面(Flat)反射時的影像相近，表示有斗篷效應的凸物被隱形。

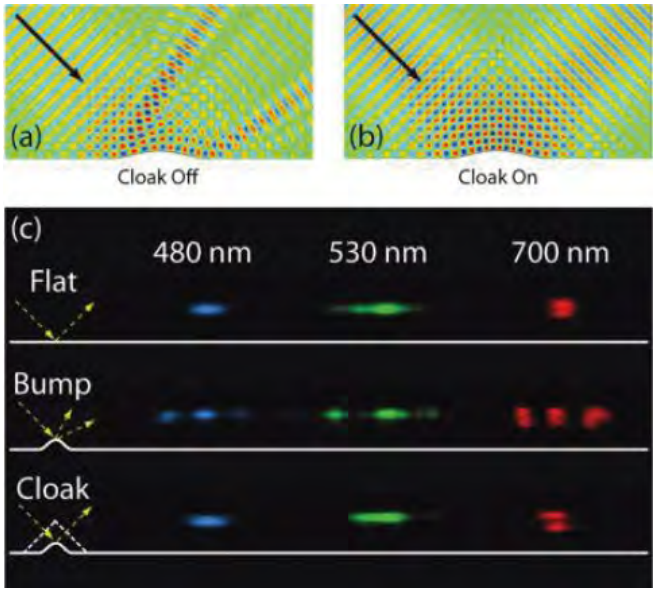


圖 13 隱形斗篷效應分析圖.

本裝置是首個應用於可見光波段的隱形斗篷，因爲隱形斗篷可視爲波面轉換光學元件，本技術對於可見光波段的轉換光學技術(Transform Optics)的發展將有所助益。未來發展上除隱形僞裝功能外，研究人員將更能利用操控光線與波面，進而改變光波傳播行爲，可應用於開發出更先進的顯微鏡和電腦所需的光電組件，以及藉由空間扭曲下的波面，推算出需要那一種材料才能讓光以特定方式轉彎，因此有助於設計出更好更小的天線及共振器。

(4). 時間隱形斗篷(Temporal Cloaking)：

時間隱形斗篷是利用人工結構所構成的複合介質材料，調制空間折射率的變化，改變電磁場分佈，引導光線繞過一定體積的空間(例如前面所提的地毯斗篷)，因此任何在這一體積內物質，實質上就變成不可見的(Invisible)，這是屬於空間隱形斗篷(Spatial Cloaking)。本次研討會中康奈爾大學(Cornell University)的 Moti Fridman 等人提出時間隱形斗篷概念與實驗(Demonstration of Temporal Cloaking)，參考圖 14，時間隱形斗篷由兩個稱爲分割時間透鏡(Split Time Lenses)所組成，每個透鏡又由兩個尖頂相接的半透鏡所構成，在兩個分割時間透鏡之間的空間是一個時空隱形斗篷(Spatial-Temporal Cloak)，它可以隱藏很短時間內發生的變化(或光波的路徑過程)，亦即可以隱藏時間中的事件(Cloaked Event)。

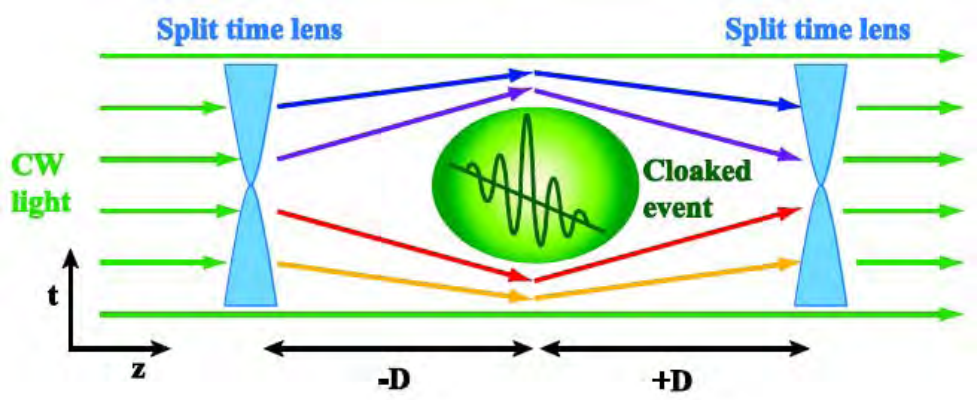


圖 14 時間隱形斗篷架構圖.

Moti Fridman 等人證明時間隱形斗篷(Time Cloaking)是可能的，因爲依據電磁理論，在物質的繞射(Diffraction)與色散(Dispersive)之間存有某種空間和時間之二元性。繞射是光束是在空間中傳播的干涉現象，等同於光束通過色散介質(Dispersive Medium)在時間上產生傳播光速不同的現象，換言之，繞射和色散在時空領域是對稱的。參考圖 14，

入射的連續光(CW Light)通過第一透鏡色散介質傳播的光束，將聚焦於時間光窗的邊緣，並產生一個時間空洞(Hole in Time)，光線再經第二透鏡後，關畢時間空洞。圖 14 不同的顏色光線表示不同的波長與色散，D 值表示光波速度的色散值大小，第一個透鏡在時間上加速光程，而第二個透鏡再放慢光程，這樣加速和放慢光程時間對於製作時間斗篷是很重要的關鍵因素。在這很短的時間內，對於觀察者而言，第二個透鏡出射光的波面(波面垂直於光線)與入射光的波面是相同的，看不出前後光波有被兩時間透鏡間的物質所干擾或扭曲，因此兩時間透鏡間的物質是被隱形的。康奈爾大學的時間斗篷目前約能持續 110 奈秒，如何延長隱形斗篷時間是值得持續研究的課題。

實驗部份如圖 15 所示，入射的連續光在時間空洞內由一短脈衝雷射光束加以干擾，當開啓時間隱形斗篷效應時，出射光即無干擾現象(紅色實線)，若每 24 微秒關畢時間隱形斗篷效應，出射光即出現干擾現象(藍色虛線)。

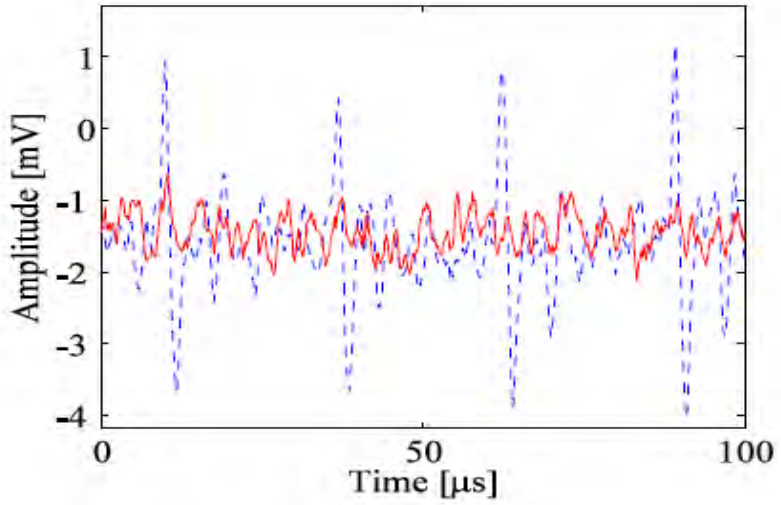


圖 15 時間隱形斗篷實驗結果.

(5). 電漿子新材料應用於波面控制(Plasmonic Metamaterials for Optical Wavefront Control)：

研討會中澳洲墨爾本大學 A. Roberts 等人於金屬薄表面製作利用相位移(Phase Shift)伴隨共振的口徑陣列結構，該結構可作爲透鏡產生三維聚焦功能，也可設計作爲四分之一平面相位波片，應用領域包括光學成像、資料儲存、電漿子天線等。其原理爲於金屬表面製作狹窄的線寬口徑陣列結構，將產生局部表面電漿子間隙共振，又稱爲腔體 Fabry-Perot 共振(Cavity Fabry-Perot Resonances)。由於產生共振的光波長與陣列結構有關，因此原始設計是作爲入射光波長或頻率的選擇元件。圖 16 爲陣列結構的剖面圖，

若增加長度 ℓ，降低寬度 W，將增大共振的光波長。

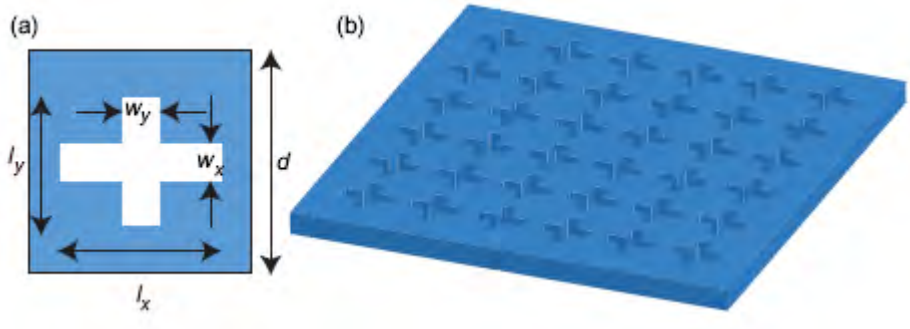


圖 16 共振口徑的陣列結構剖面圖.

由於共振口徑陣列對於入射光波產生局部表面電漿子共振，對於入射光電場會有相位移現象，因此作爲波面控制元件，經由適當的調整共振的口徑的幾何形狀，即可設計出所謂的電漿子透鏡(Plasmonic Lens)，對於入射光具有聚焦功能，若將口徑 x-y 兩方向設計成非對稱形狀，則將產生雙折射現象。圖 17 爲二維電漿子透鏡結構掃描電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy，SEM)圖，口徑陣列由厚度 140nm 的 Ag 金屬薄膜構成，入射光的電場相位受口徑陣列影響，產生拋物線狀的相位移(Parabolic Phase Shift)，使得入射光經過共振口徑陣列元件後，波面將如同經過一透鏡，具有會聚現象。圖 17(a)與圖 17(b)分別爲產生焦距+15 微米正透鏡與-15 微米負透鏡的共振口徑陣列元件表面結構圖，每一孔洞間距 400nm。圖 17(c)與圖 17(d)分別爲利用共焦顯微鏡所觀測到光線經過圖 17(a)正透鏡與圖 17(b)負透鏡的 3D 強度分佈圖(側面圖)，明顯看出圖 17(c)光線有聚焦現象，圖 17(d)光線有發散現象。

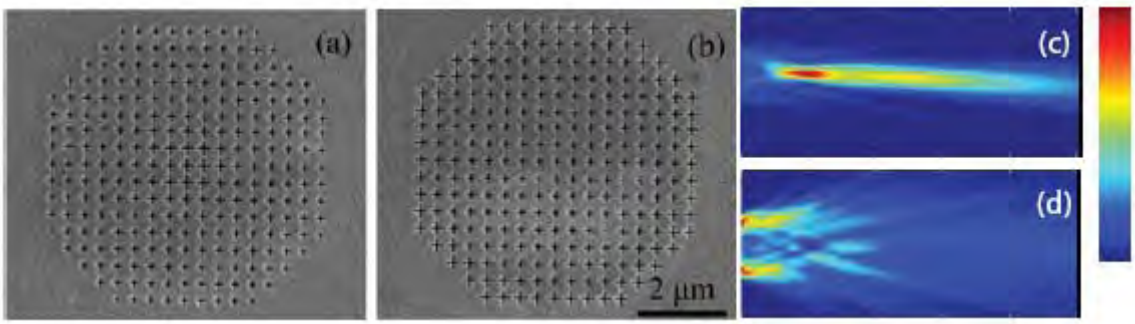


圖 17 電漿子透鏡表面結構圖與實驗結果.

4. 自適應光學(Adaptive Optics)：

自適應光學的發展起源於為得到較佳的宇宙視場，因來自宇宙的光線經過大氣因熱流造成光線相位的變形(Distortion)，並改變光線的前進方向與聚焦特性。發展自適應光學的目的，在於恢復光線原來的波面(Wavefront)形狀與特性，以便能獲得與觀測到正確的訊息。目前自適應光學已發展出補償波面變形的相關的軟硬體，並應用於其他科學領域，包括醫療用顯微鏡及自由空間的光通訊等，在國防應用上，可作為太空雷射武器雷射光之光波形狀修正，圖 18 為自適應光學應用於天文光學儀器系統結構圖。

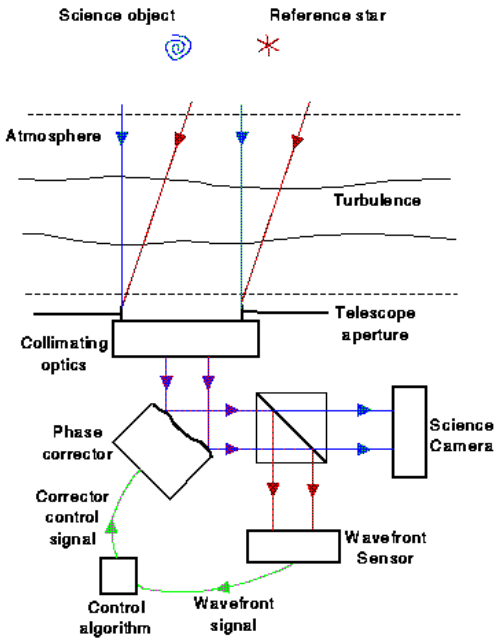


圖 18 自適應光學應用於天文光學儀器系統.

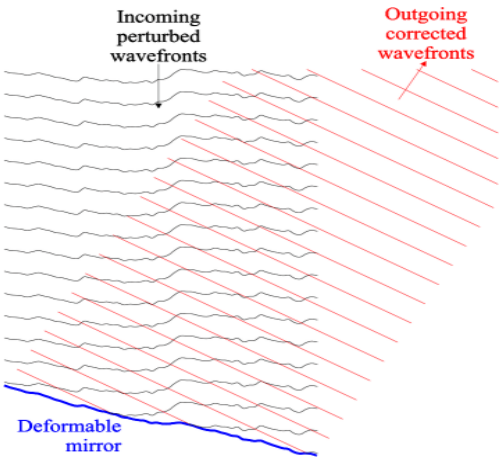


圖 19 可變形反射鏡功能示意圖.

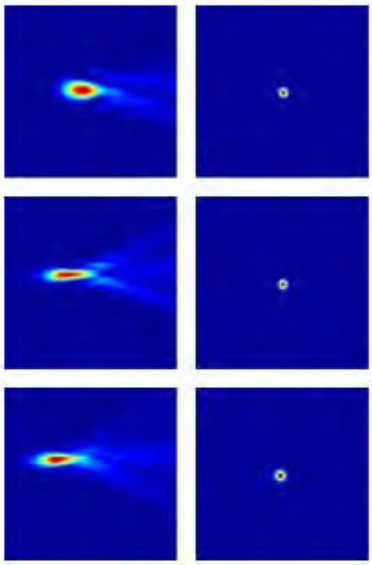


圖 20 原始影像(左半部)與經過自適應光學系統校正後的影像(右半部).

自適應光學主要包括三個重要組件：(1)波面感測元件(Wavefront Sensor)，由高感度陣列微透鏡與光電感測元件構成，將所接收的光能量轉成電流強度。(2)可變形反射鏡(Deformable Mirror)或稱爲相位修正器(Phase Corrector)，依據所接收的修正回饋訊號，調整反射鏡表面形狀(微小變量)，以補償因空氣擾動所造成的波面變形，恢復原有波面形狀，圖 19 爲可變形反射鏡功能示意圖。(3)補償理論與回饋訊號控制軟體(Software Feedback and Control Algorithms)，能即時將由波面感測元件所取得的波面訊息，依據變形補償理論計算，並傳送訊號至可變形反射鏡，調整表面應有的微小變形量，入射光線經可變形反射鏡反射後即可還原原有的波面形狀。圖 20 爲原始影像與經過自適應光學系統校正後的影像比較圖。

(1). 自適應光學儀器(Adaptive Optics Instrumentation)：

自適應光學除已應用於天文光學儀器上，近年來更應用人眼視網膜取像的醫療器材。美國 Rochester 大學自適應光學研究中心與 Indiana 大學均有相關研究成果，將自適應光學系統經適當的設計，可達到主動式的光束掃描視網膜，且能補償人眼的像差對視網膜取像的干擾(參考圖 21)，以及處理不同的瞳孔大小與成像時的離焦(Defocus)現象。理論上，自適應光學視網膜成像系統，在某一光學波長範圍內，可產生繞射極限的視網膜影像品質，並可在視網膜中心 30 度內的任何地方進行取像。但由於眼睛等暈的(Isoplanatic)角度大約 2 度，成像系統的視角不可能擴大到這麼大的角度範圍，因此需要藉由自適應光學相關組件，能隨著取像角度的變化作動態調整，才能達到大角度的取像區域。圖 22 爲視網膜的取像系統結構示意圖，圖 23 爲無自適應光學補償與有自適應光學補償的視網膜影像圖，右圖影像品質明顯較佳。

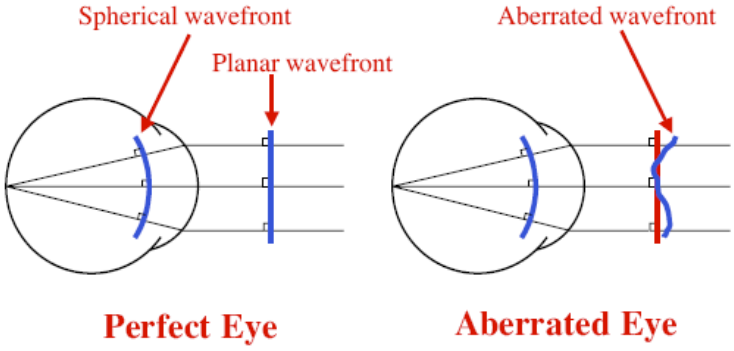


圖 21 人眼像差對視網膜取像波面干擾示意圖.

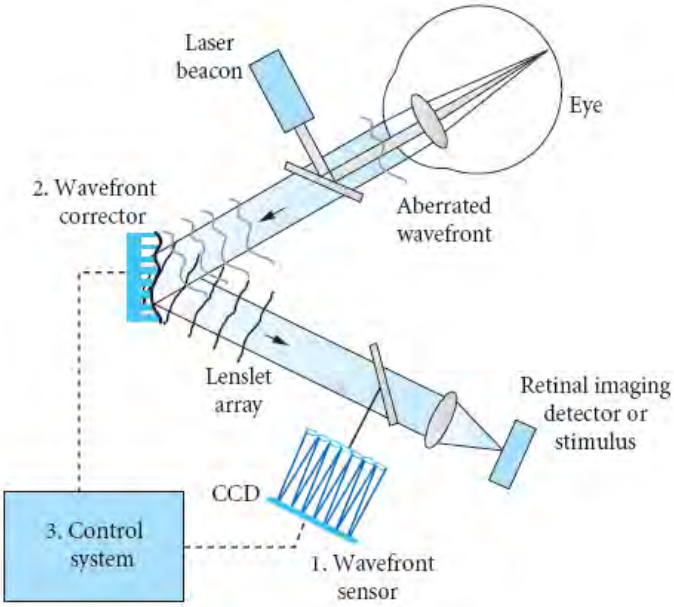


圖 22 視網膜的取像系統結構示意圖.

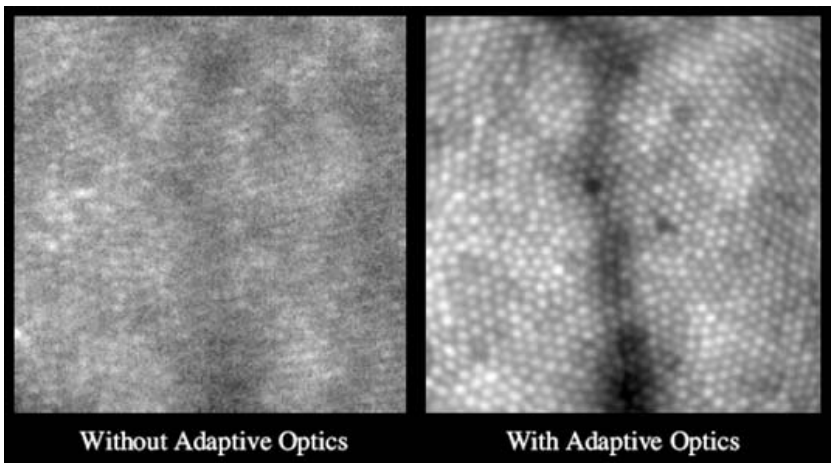


圖 23 無自適應光學補償與有自適應光學補償的視網膜影像圖.

(2). 眼睛視覺影像與水晶體透鏡光學特性(Ocular Imaging and Crystalline Lens Optical Properties)：

墨西哥 Susana Marcos 於研討會中提出利用自適應光學波面感測與影像處理方法，測量眼睛水晶體透鏡光學特性，包括形狀、漸變折射率、調節力(Accommodation)等。圖 24 爲人眼結構圖，一般年輕人的水晶體透鏡(Crystalline Lens)對於遠近物體具有很好的焦距或屈光度(Power)的調節力，且對於眼角膜(Cornea)的正球面像差，可利用水晶體透鏡的負球面像差加以補償，以獲得較佳的成像品質，但這種調節力也會隨著年齡的增加而降低。自適應光學波面感測元件可用於測量水晶體透鏡的像差，也可用於檢測眼睛

對於遠近物體焦距調節時的屈光度變化。

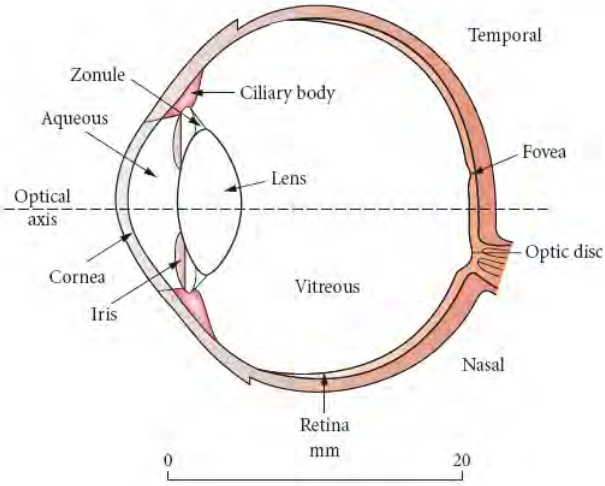


圖 24 人眼結構圖.

對於水晶體透鏡結構與光學特性的了解，將有助於隱形眼鏡的設計，甚至設計出非球面隱形眼鏡，以補償人眼本身的像差缺陷，使視覺影像更清晰。人眼像差主要來自水晶體透鏡，部份來自眼角膜，整個眼球像差係利用雷射光線追跡像差儀(Laser Ray Tracing Aberrometry)測量，眼角膜像差則使用 Placidodisck 角膜形狀儀測量，利用整個眼球像差減去眼角膜像差即可獲得水晶體透鏡像差。利用自適應光學波面感測器與可變形反射鏡，可偵測人眼的像差調節力，其方法爲利用可變形反射鏡(Deformable Mirror)改變波面形狀以補償眼球像差，由補償量推算人眼的像差調節力。實驗結果顯示年輕人對於像差(主要是球面像差)有較大的調節力範圍，從 1D 至 6D，D 爲屈光度單位，是焦距(單位：公尺)的倒數。圖 25(a)爲對於近視(Myopic)與遠視(Hyperopic)的人眼角膜與水晶體透鏡像差測量圖，圖 25(b)爲水晶體透鏡調節力與像差變化測量圖。

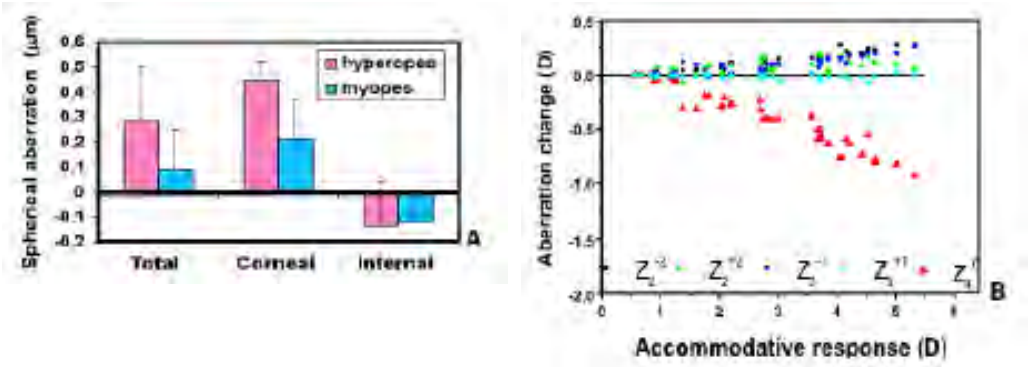


圖 25 人眼角膜與水晶體透鏡像差及調節力測量圖.

Susana Marcos 亦自行開發所謂的 Purkinje 影像系統，應用於水晶體透鏡表面曲率半徑的測量，搭配 Scheimplug 影像系統、光學同調斷層攝影術(Optical Coherence Tomography，OCT)及幾何光學畸變像差校正理論，獲得三維水晶體透鏡活體動態影像(Vivo Images)，如圖 26 所示。

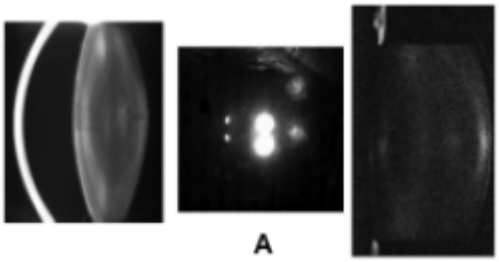


圖 26 水晶體透鏡三維影像圖.

由於眼睛水晶體透鏡內部漸變折射率光學特性，對於視覺影像品質扮演關鍵角色，Susana Marcos 藉由光學同調斷層攝影術所取得的活體動態影像，利用水晶體透鏡前後兩個曲面的光程差(OPD)造成的影像扭曲程度，重建水晶體內部折射率變化情形。圖 27(a)爲水晶體透鏡外部活體動態三維影像，圖 27(b)爲水晶體內部漸變折射率分佈圖影，圖 27(c)上圖爲水晶體內部折射率視爲定值的光線追跡圖，下圖爲水晶體內部改爲漸變折射率時的光線追跡圖，可明顯看出上圖有球面像差現象，下圖因漸變折射率對球面像差有補償效果，因此光線聚焦點較小，亦即在視網膜可獲得較清晰的影像。

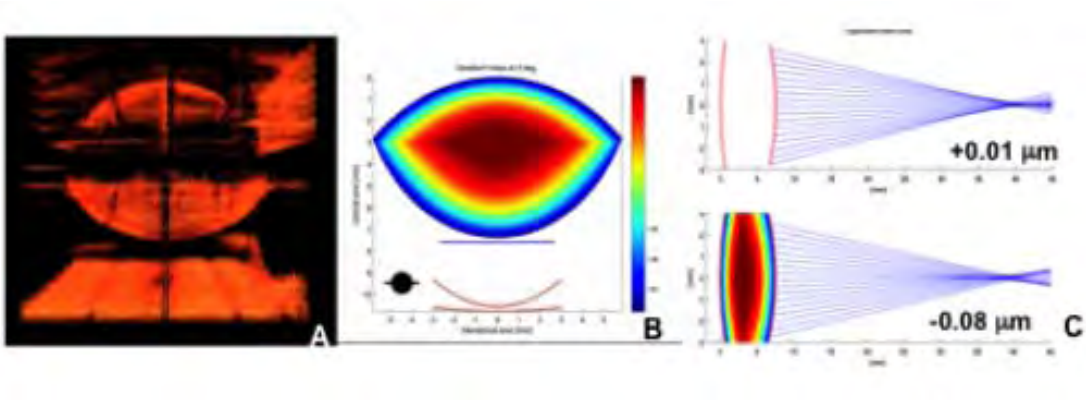


圖 27 水晶體透鏡三維影像、漸變折射率與對像差的補償光線追跡圖.

(3). 人眼模型的 ABCD 矩陣光線追跡方法：

墨西哥 J. F. Aguilar-Gutierrez 於研討會中提出新的眼睛模型的 ABCD 矩陣光線追跡方法(Emulation of Exact Ray Tracing by ABCD Matrix in A Human Eye Model)，一般眼睛的模型分析係假設人眼的曲率、厚度、折射率是一定值，但與實際光線追跡計算結果通

常差異很大。新的眼睛模型係將折射率改爲漸變式，眼睛外緣的折射率較中心光軸區域的折射率爲高，計算結果與實際光線追跡結果相當接近，新的眼睛模型 ABCD 矩陣如下式，d 爲人眼厚度，L 爲折射率改變比例：

$$A=\begin{bmatrix} \cosh(\frac{d}{L}) & L\sinh(\frac{d}{L}) \\ \frac{1}{L}\sinh(\frac{d}{L}) & \cosh(\frac{d}{L}) \end{bmatrix}.$$

圖 28 爲利用 ABCD 矩陣所計算的眼睛光線路徑及焦距(黑色光線)，與實際光線追跡計算結果(紅色光線)相比較，兩者差異很小。

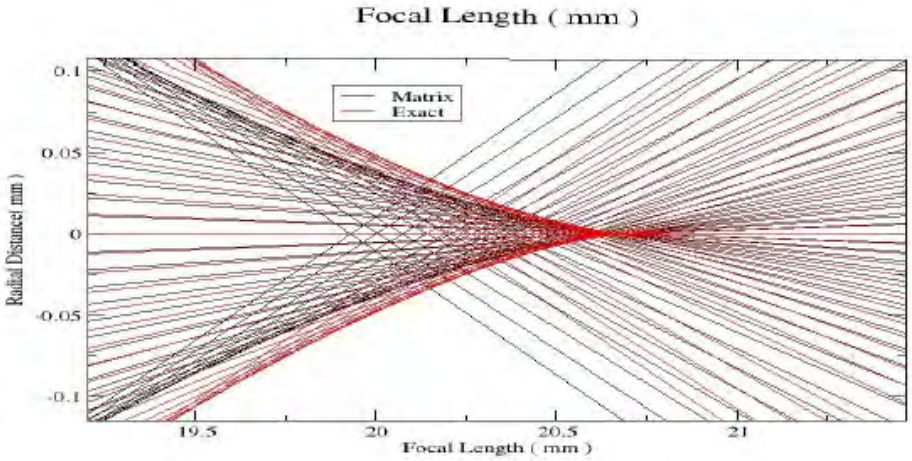


圖 28 ABCD 矩陣與實際光線追跡圖.

5. 光學在太陽能源的應用(Optics for Solar Energy)：

太陽能發電是近年來全球各國興起的綠色產業，雖然各類型太陽能板的光電轉換效率不斷在提升，但由於製程因素造成價格昂貴，相對於傳統能源，太陽能發電單位成本仍屬偏高，因此開發能將太陽光集中於太陽能板的光學聚光器(Collector)，也是光學業者研究焦點。目前較成熟的方式是利用拋物反射面鏡，及平板式菲涅爾繞射透鏡(Fresnel Lens)，如圖 29 所示，以取代傳統凸透鏡會聚光線於太陽能板上。另一種是利用全像(Holography)繞射原理，開發光伏太陽能電池(PV Cell)之平板式全像聚光器，如圖 30 所示，尺寸(厚度)較傳統折射式光學鏡片縮小許多。太陽光照射至全像元件，將被導向太陽能光伏電池板(Photovoltaic Cell)，設計時必須考量太陽光入射角度會隨時間的變化，入射光路徑並經過光學軟體光線追跡(Ray-Tracing)的模擬計算與耦合波動理論分析(Rigorous Coupled Wave Analysis)，以取得最佳的繞射效率，提升聚光能量。

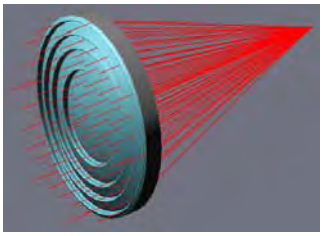


圖 29 平板式繞射光學元件.

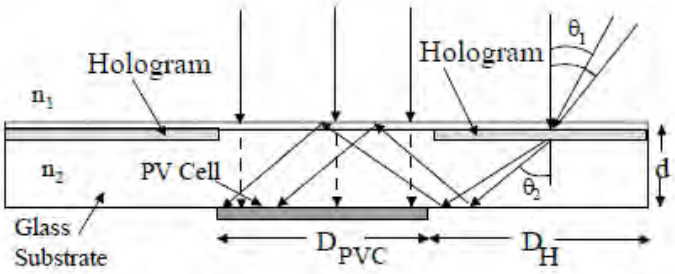


圖 30 平板式全像聚光器.

(1). 利用次波長繞射光柵作爲平面太陽能聚光器(Planar Solar Concentrators Using Subwavelength Gratings)：

本次研討會中印度 CSIR-Central Electronics Engineering Research Institute 研究機構人員 Bala Pesala 提出利用製作次波長繞射光柵，作爲太陽能聚光器，可集中光束能量於 1/10 的幾何面積上(Concentration Ratio >10X)。參考圖 31，次波長光柵製作在平面玻璃基板上，利用次波長光柵可產生較大的繞射角度，如圖示的+1 與-1 階繞射光線(+1T 與 -1T 方向)，大部份的入射光線將被導引至玻璃基板兩側的太陽能板上，將光能轉換成電能傳送出去，圖 31 基板兩側紅色部份顯示大部份入射光能量強度集中於此區域。次波長光柵設計時，可藉由光柵尺寸、間距、週期、厚度等參數的改變，使得入射光線在光柵界面的 0 階反射光與穿透光(圖 31 的 0R 與 0T 方向)的能量降至最小，將穿透光能量集中於+1 與-1 階繞射光線，以獲得最佳的光使用效率。

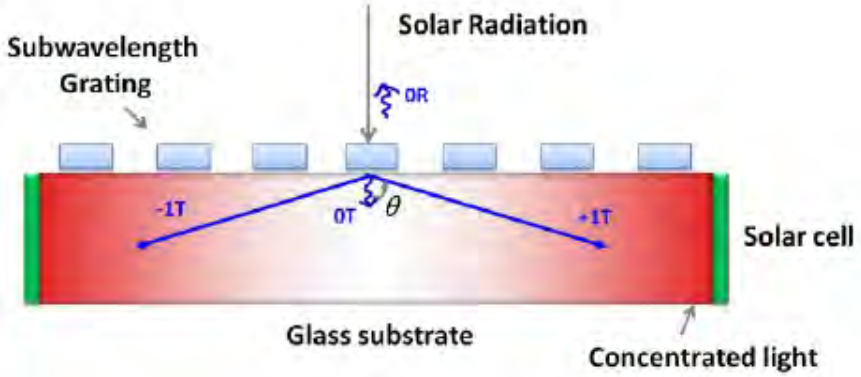


圖 31 次波長繞射光柵作爲太陽能聚光器結構圖.

圖 32 爲光束經過次波長繞射光柵後，+1 與-1 階繞射光線的能量分佈圖，顯示能量分佈與入射光波長及光柵尺寸的 tg/Λ 比值有關，tg 爲光柵厚度，Λ 爲光柵週期，經過

最佳化的分析結果，tg/Λ 比值爲 0.27 時，有最大的波長範圍(歸一化的波長值從 0.9 至 1.6)，有較大的能量分佈(紅色區域)，歸一化的波長定義爲 λ /Λ。

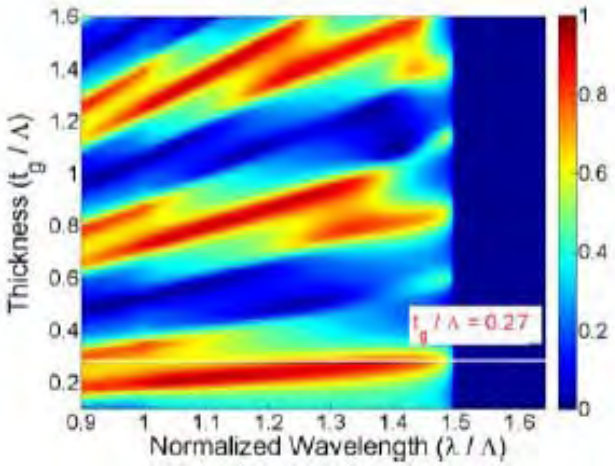


圖 32 +1 與-1 階繞射光線的能量分佈圖.

(2). 平面天線陣列的聚光器(Light Focusing by Planar Array of Antennas)：

本次研討會中 Northeastern 大學 Babak Memarzadeh 提出利用奈米級平面天線週期陣列結構，可作爲太陽能聚光器或光學感測器。圖 33 爲單一陣列元件結構圖，其設計概念類似於傳送電磁波的陣列天線，利用光學電漿子結構，產生表面共振效應，使得入射光在不同的陣列位置將產生不同的相位延遲，以補償不同光路徑的相位差，並使得經過平面天線陣列的光波爲收斂波面(Converging Wavefront)，進而會聚光束於一焦點。

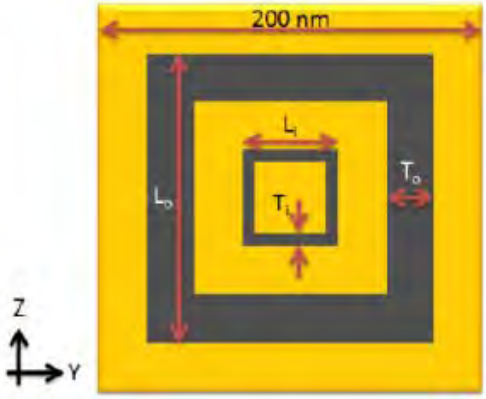


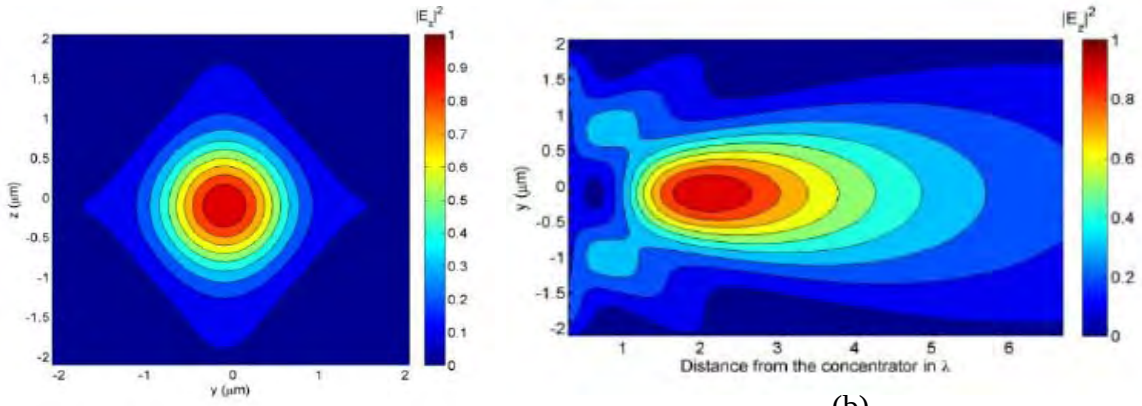
圖 33 平面天線單一陣列元件結構圖.

使用分析軟體爲有限時域差分法(Finite Difference Time Domain，FDTD)，以計算整個陣列各點的電磁場分佈情況及入射光的穿透率。假設陣列元件處於 y-z 平面，f 爲光線經過平面天線陣列後聚焦點距離(若入射光爲平行光，則稱爲焦距)，每一陣列位置的

相位延遲可藉由下列方程式計算：

$$\phi(y,z)=\frac{2\pi\sqrt{f^2+y^2+z^2}}{\lambda}-\frac{2\pi f}{\lambda}$$

圖 33 同心的環狀結構其優點爲各個單一陣列元件可產生較大的相位變化，若再增加同心環狀數或於基板雙面製作此陣列結構，亦可再加大相位改變量，以作爲調整聚焦點距離之設計參數。基板爲低折射率介電材料，磁導率 1.4，厚度 150nm，環狀結構使用銀金屬材料，經使用 FDTD 軟體最佳化設計後，Ti 值爲 5nm，To 值爲 20nm，最大相位改變量爲 160 度。圖 34 爲光束經過平面天線陣列後電場強度分佈模擬結果，使用 21x21 的陣列結構，圖 34(a)爲聚焦面(y-z 平面)的電場強度分佈圖，聚焦點陣列元件後 2λ 位置，可經由改變同心環狀幾何尺寸與數目、陣列數等設計參數，調整該聚焦位置，圖 34(b)爲聚焦光路(x-y 平面)的電場強度分佈圖。



(a) (b)

圖 34 光束經過平面天線陣列陣列之電場強度分佈模擬結果.

6. 飛秒雷射加工(Femtosecond Laser Microfabrication)：

雷射加工主要利用雷射光與材料的交互作用，其過程取決於雷射光與材料的特性，雷射光的特性包括波長、能量、功率、脈衝寬度、加工次數等，材料的特性包括種類與材質，如金屬、合金、玻璃等。材料表面吸收雷射光能量使溫度升高，進而改變材料表面結構與性能，造成破壞或剝離，若雷射光瞬間能量夠大，將使材料上升至氣化溫度。由於雷射脈衝寬度約爲 0.1 皮秒(Picosecond，1 皮秒=10^{-12}秒)，遠小於物質熱傳時間常數，對鄰近物質亦無任何損害，因此能夠精準切除特定區域及深度之物質。應用領域非常廣泛，包括 LED 基材加工、平面顯示器的玻璃加工、晶圓切割、光學模仁表面加工、精

密切割及鑽孔、3D 表面微結構加工等，在醫學上，可提供特定物質做選擇性波長之光熱效應醫療。

利用飛秒雷射脈衝加工三維結構爲研討會探討重點之一，對於能達到分子或原子解析度的光學材料表面結構加工，是雷射加工領域積極研究的目標。藉由光學螢光顯微鏡(Optical Fluorescence Microscopy)可觀測到單分子的解析度，因顯微鏡可將入射光轉變成波長等級的光點(Spot)，當使用次皮秒(Sub-Picosecond)超短雷射脈衝，可利用光與材料的非線性特性調整加工位置的定位，這也使得雷射三維結構加工進行奈米級領域範圍，有機會達到次百奈米(Sub-100nm)的解析度，其關鍵在於必須能精準控制雷射光能量的傳輸與加工位置的精度。

美國 Harvard 大學 Kevin Vora 等人於研討會中提出利用飛秒雷射脈衝加工二維與三維銀奈米微結構(2D and 3D Writing of Silver Nanostructures Through Multiphoton Photoreduction)，解析度從數百奈米至微米級，其方法爲利用摻有銀粒、聚合物、溶劑的樹脂與飛秒雷射脈衝產生非線性光學作用，並引入銀離子的縮影製程，可產生小於繞射極限的聚焦點，再藉由電腦控制的平移台快速移動工件，即可加工出所需的複雜奈米微結構元件。圖 35 爲工件準備與加工製程圖，左圖爲表面鍍有樹脂的待加工之工件，放置於右圖的精密三軸移動平台，使用 Ti:Sapphire 脈衝 50 飛秒(10^{-15}秒)的雷射加工，波長 800nm，脈衝雷射與樹脂內的銀離子將產生多光子與光縮影過程，藉由銀粒、聚合物、溶劑的混合比例不同，及調整脈衝雷射參數，即可控制加工的奈米微結構形態。

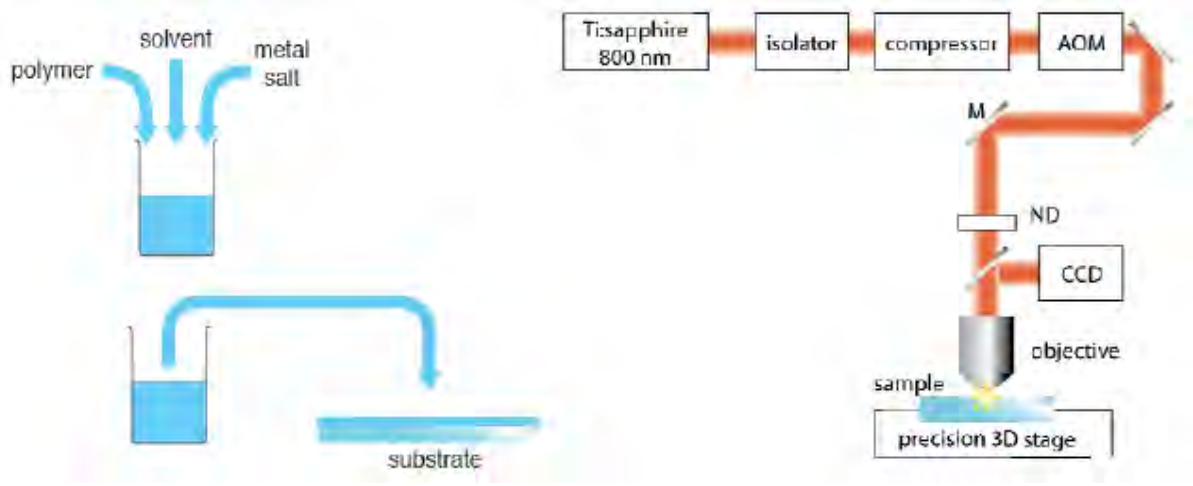


圖 35 工件準備與加工製程圖.

7. 光學檢測技術(Optical Measurement)：

(1). 數位全像干涉儀與顯微鏡用於三維物體檢測(Digital Holographic Interferometry And Microscopy For 3-D Object Visualization)：

本次研討會中美國 Dayton 大學 G. Nehmetallah 提出利用數位全像干涉儀，可即時測量物體表面微小的凹陷動態變形量，以及利用數位全像顯微鏡測量矽晶片(Si Wafer)上的球面鏡片三維輪廓。參考圖 36 架構，稱爲反射式菲涅爾(Fresnel)繞射數位全像干涉儀，氬(Ar)雷射光源經顯微物鏡(MO)聚焦，利用孔洞(Pin Hole)濾除高頻電場模態，再經過光圈(Iris)與透鏡產生準直的平行光束，光束經第一個分光鏡(BS)反射參考用光束，穿透光束至待測面(Target)，將帶有凹陷的資訊的光束反射，至第二個數位全像分光鏡(BS)，與參考用光束產生繞射條紋，以獲得待測面凹陷的變形量。圖 37(a)爲每 50 毫秒所拍攝的條紋影像，圖 37(b)爲經過相位重建處理後相對應的凹陷 3D 變形量。

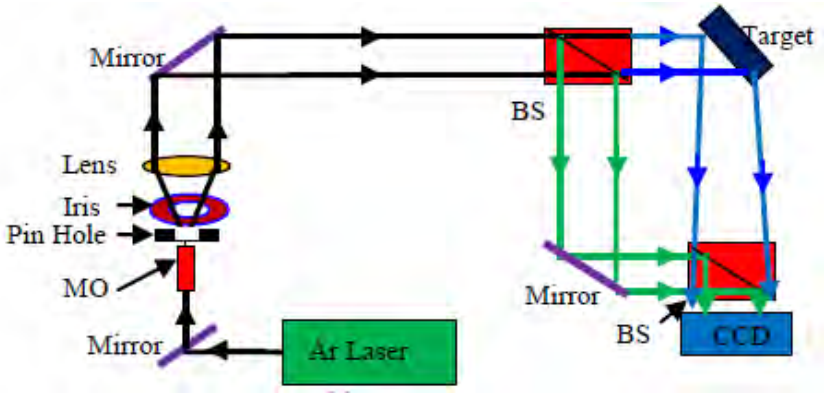


圖 36 反射式數位全像干涉儀架構圖.

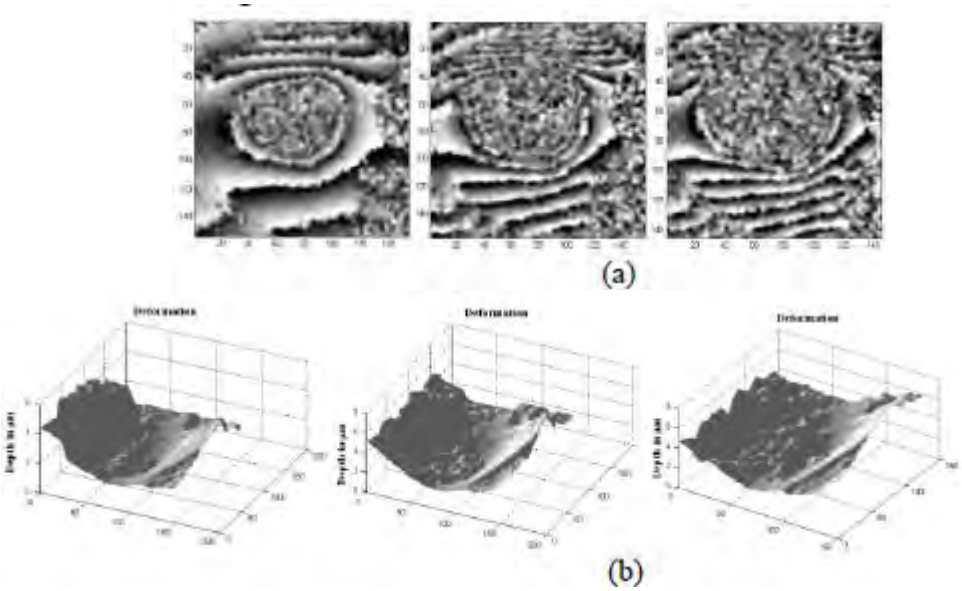


圖 37 數位全像干涉儀實驗結果圖.

圖 38 爲反射式數位全像顯微鏡架構，光路類似數位全像干涉儀，待測面(Target)表面高低起伏的 3D 輪廓與重建的相位成比例，在待測面前面多放置一顯微物鏡(MO)的目的在於提升空間解析度，可提升橫向解析度至顯微物鏡的繞射極限大小 0.61λ/N.A.，其中 N.A.爲顯微物鏡的數值孔徑大小，λ 爲光波長，本實驗 N.A.爲 0.25，計算出橫向解析度爲 1.2 微米。圖 39(a)爲矽晶片(Si Wafer)上的球面鏡片 2D 輪廓，圖 39(b)爲矽晶片數位全像圖，圖 39(c)爲相位重建後 3D 球面鏡片輪廓圖，圖 39(d)爲量測之 2D 剖面圖。

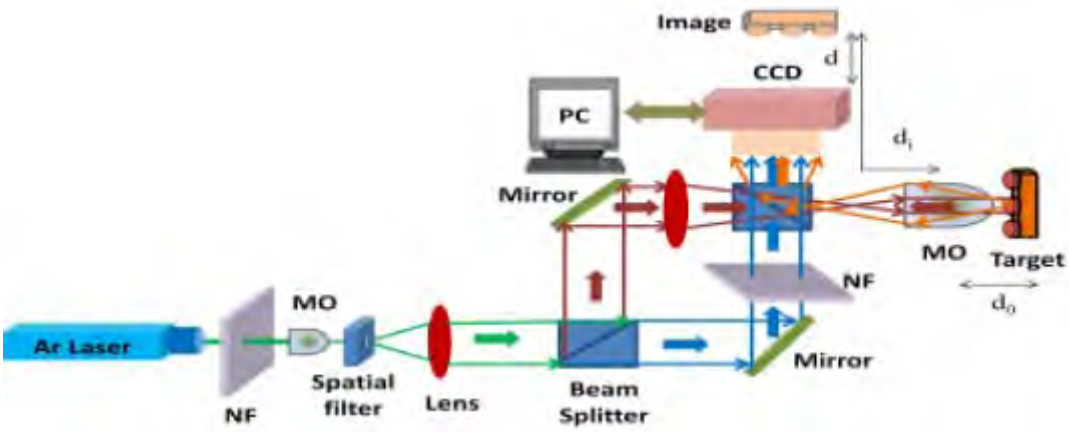


圖 38 反射式數位全像顯微鏡架構圖.

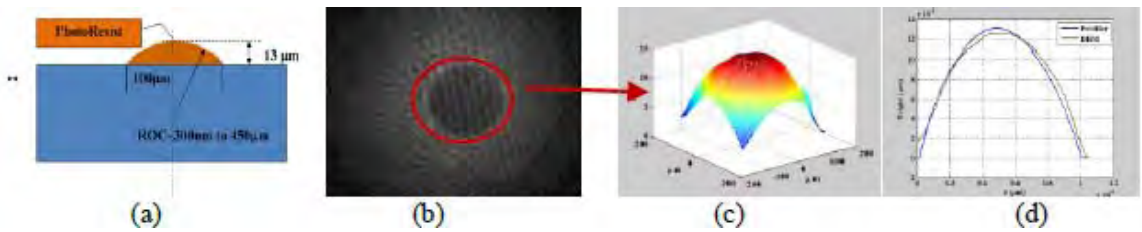


圖 39 數位全像顯微鏡實驗結果圖.

(2). 利用空間光調制器的光譜辨識系統(A System for All-Optical Spectrum Recognition Using a Spatial Light Modulator)：

美國 Rochester, Rochester 大學光學中心 E. Vornehm 等人於本次研討會中提出利用相位空間光調制器(Spatial Light Modulator，SLM)研發光譜辨識系統，光譜分析儀常應用於化學介質的辨識與確認。參考圖 40 架構，寬波段光源經過樣品後，帶有被吸收的光譜訊息的光束，經過 L1 與 L2 兩球面透鏡擴束及分光鏡(BS1)反射至 Littrow 光柵，光柵傾斜一角度 θ_L，光束經光柵將沿著 y 方向產生色散，圓柱透鏡將色散光聚焦於空間光調制器，設計上須確保色散引起的設計波長色散差值 δλ(本實驗 δλ=0.1nm)的光束，必

須聚焦於空間光調制器的不同排(Row)上，並記錄每 2 的相位變化。光束經空間光調制器後將反射至+x 與-x 兩方向，再經分光鏡(BS2)與集光鏡頭，將光束分別會聚於 D1 與 D2 兩感測器上，將 D2 減去 D1 的訊號差值，稱爲雙極光譜相關性(Bipolar Spectral Correlation)，以作爲光譜辨識。後續的研究將著重光源的特性，包括脈衝或連續波光源，及光源相干性等，以提升檢測速度。

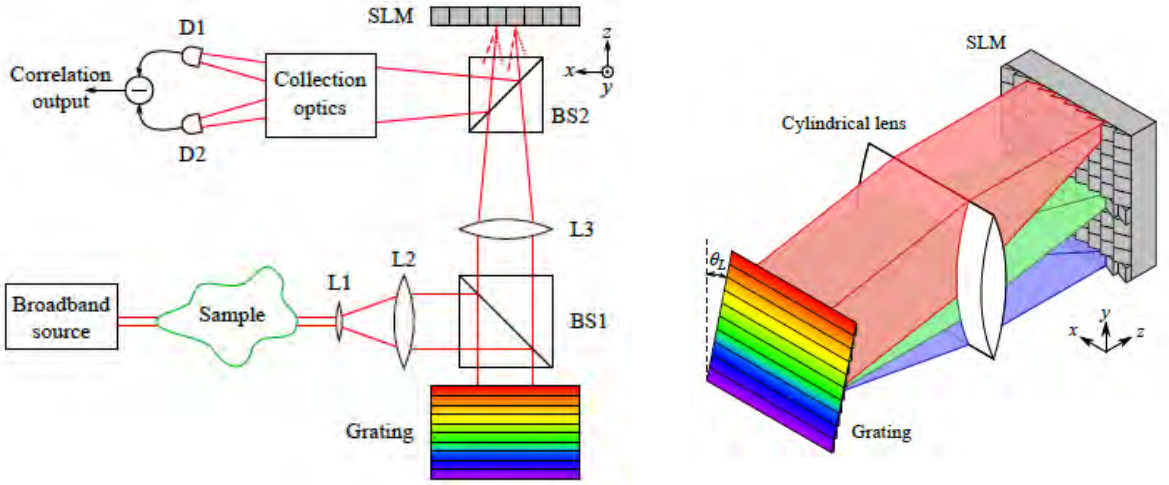


圖 40 利用空間光調制器之光譜辨識系統.

二、Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光電展會場：

本次 Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光電展會場有數十餘家知名光電廠商參展，內容包括光學元件、光電檢測儀器、自適應光學組件、光通訊組件、光學材料及雷射零組件等，另有數家知名學術研究機構展示研究成果，以下爲主要廠商之參訪心得：

1. Optimax Systems 公司：

Optimax 公司是美國主要的光學鏡頭/元件製造大廠，成立於 1991 年，目前約有 150 位具有光學技術專長的工程人員，可接受委託製作精密光學元件雛型製作、小量或大量生產，尤其是在顯示技術與太陽能相關元件雛型製作。該公司具有的技術能量包括：光學系統設計、精密鏡片製作、光機設計、光學鍍膜(高能量雷射鏡片鍍膜)、系統組裝與調校等。光學元件形狀包括球面/非球面鏡片、自由曲面元件、圓柱鏡、稜鏡等如圖 41~42 所示，可加工口徑最大範圍 3~300mm，可快速量產口徑 10~100mm，表面輪廓誤差在 0.5 微米以內。此外，亦可承接客戶公司委託開發與製作精密光學系統，應用領域包括天文光學系統、醫療光學器材、高能量雷射、半導體、及深紫外(Deep UV)、可見光、

紅外波段之光學產品。一般可見光材料主源要來德國 Schott、日本 Ohara、美國 Corning 等公司，紅外鏡片方面，材料主要來自美國 II-VI 公司。因元件製程採專業分工方式，因此產品均能維持一定水準，由於該公司長期累積系統整合經驗，亦可接受軍用器材光學元件量產製作，包括雙平行面的紅外光罩(Dome)，是值得本單位紅外鏡片委外製作與技術合作對象。

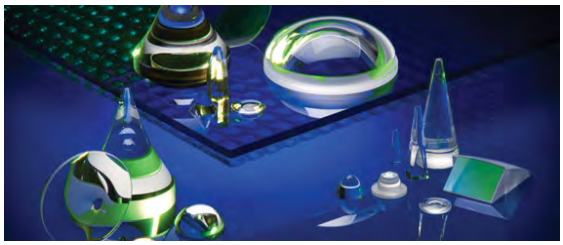


圖 41 非球面鏡片.

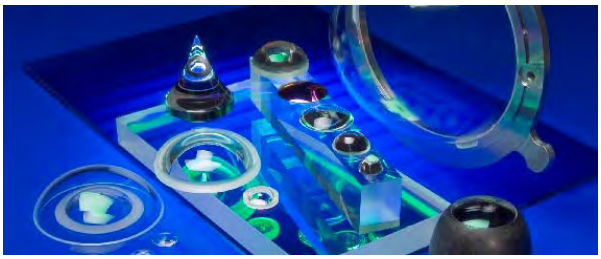


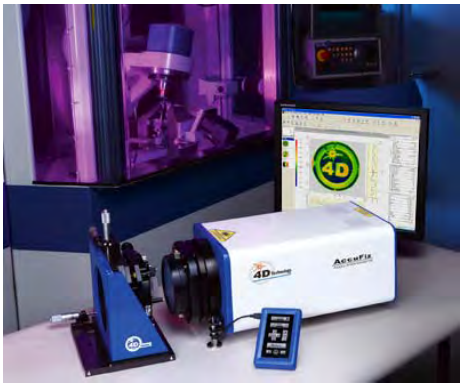
圖 42 雙平行面的光罩.

2. 4D Technology 公司：

4D Technology 公司是成立約 10 年的光學鏡片表面品質檢測儀器廠商，現場展示最新型兩種光學表面檢測儀器，AccuFiz Fizeau Laser Interferometer 菲索雷射干涉儀與 NanoCam Dynamic Profiler 表面輪廓儀。

(1). AccuFiz Fizeau Laser Interferometer 菲索雷射干涉儀：

AccuFiz Fizeau Laser Interferometer 菲索雷射干涉儀如圖 43 所示，爲非接觸式鏡片表面平整度的檢測儀器，操作介面已使用觸控式顯示面板。其工作原理爲測量被測工件表面波面(Test Wavefront)與參考波面(Reference Wavefront)間相位差所產生的干涉條紋，並經相位移干涉術(Phase-shifting Interferometry)數學計算，以獲得鏡片表面的平整度數據。其中參考波面由標準鏡面反射產生，而被測波面則由帶有高低起伏的被測工件表面反射所產生，被測波面與參考波面間的相位差即反映出待測物表面的平整度。



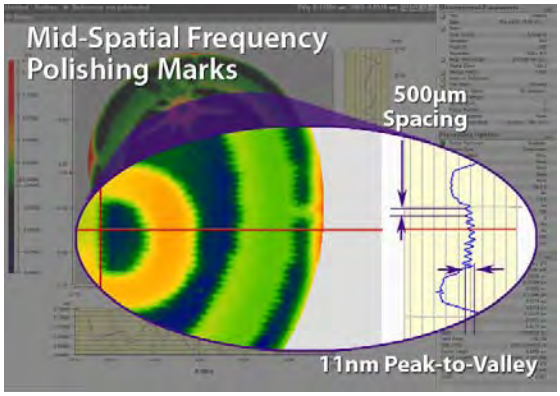


圖 43 AccuFiz 菲索雷射干涉儀.

(2). NanoCam Dynamic Profiler：

NanoCam Dynamic Profiler 爲非接觸式鏡片表面輪廓檢測儀器，如圖 44 所示，係利用掃描白光干涉儀原理(Scanning White Light Interferometer)進行表面輪廓測量，並藉由壓電轉換器(Piezo-electric Transducer，PZT)帶動垂直方向掃描，進而推算出三維的表面輪廓結構，因此本系統適用於表面有高低起伏的輪廓結構工件與其表面粗糙度測量，例如一般光學鏡片表面輪廓與其表面粗糙度檢測。本儀器爲非接觸式檢測，可避免一般使用探針式的機械測量方式，容易造成鏡片表面刮傷。

圖 44 NanoCam 表面輪廓檢測儀器.

3. Optikos 公司：

Optikos 公司是國際知名光學元件/鏡組檢測設備大廠，爲測試與量測儀器及系統(Test & Measurement Instruments and Systems)專業公司，可提供光學鏡片組裝對心、光學鏡頭焦距、MTF 像質檢測、各種光學像差檢測機台，波長包括紫外線、可見光、紅外線等波段。特別是光學鏡頭成像品質檢測所需的 MTF(Modulation Transfer Function)光學調制傳遞函數測量儀，擁有豐富的機台設計與軟體分析能力。並可依客戶需求，提供光電產品工程開發的設計與技術諮詢、光學檢測技術、及光電系統整合技術服務。

主要檢測能量包括：(a)透鏡元件檢測：可測量有效焦距(EFF)、後焦距(BFL)、F-數(F-number)、入瞳與出瞳直徑(Entrance & Exit Pupil Diameters)、及各種像差；(b)系統像質檢測：可測量 MTF、對比度、線性度、雜散光等；(c)紅外系統檢測：可測量最小可解析溫差(Minimum Resolvable Temperature Difference，MRTD)、最小可偵測溫差(Minimum Detectable Temperature Difference，MDTD)、等效雜訊溫差(Noise Equivalent Temperature Difference，NEDT)；(d)其它檢測：LED 功率與光譜、紫外至紅外波段穿透率、及各波段照明光度與色度檢測等，相關檢測設備如圖 45~48 所示。

(1). MTF Measurement Instrument MTF 測量儀：

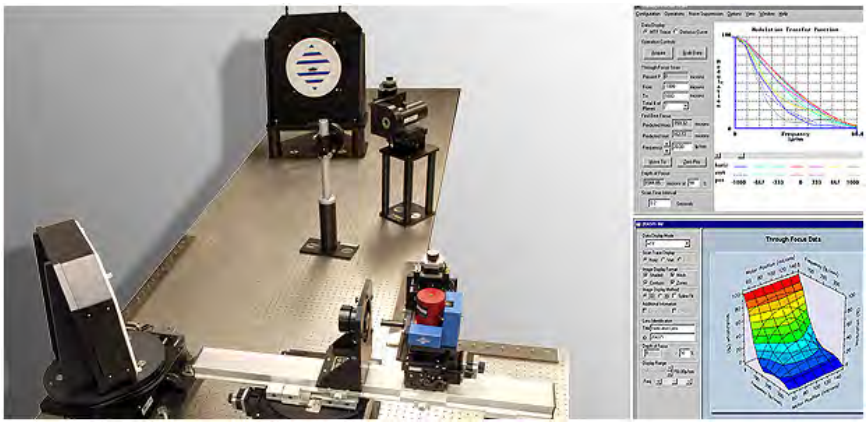


圖 45 MTF 測量儀.

(2). PMC-600 Photometric Camera 光度攝像測量儀：

圖 46 光度攝像測量儀.

(3). RAD-900 Infrared Radiometer 紅外波段輻射測量儀：

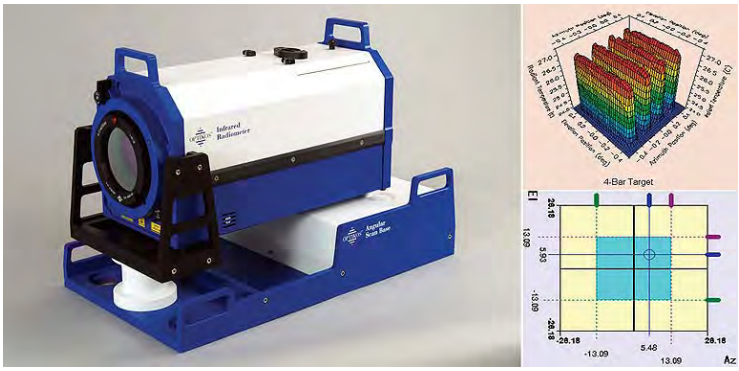


圖 47 紅外波段輻射測量儀.

(4). LensCheck LWIR Lens Measurement Instrument 長波長紅外波段鏡片測量儀：

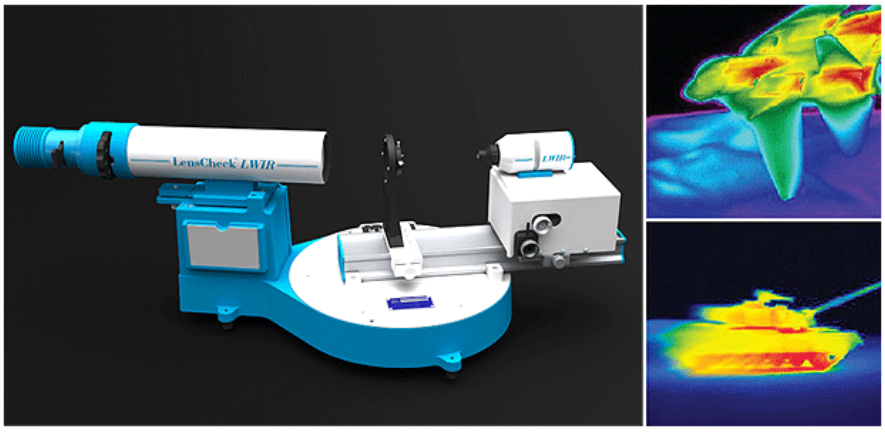


圖 48 長波長紅外波段鏡片測量儀.

4. Imagine Optic 公司：

Imagine Optic 爲開發自適應光學(Adaptive Optics)相關軟硬體公司，如前面研討會報告所論述，光線經過傳播的介質，因熱流或介質非均勻性擾動(Turbulence)問題，造成光線相位的變形，自適應光學發展的目的，在於恢復光線原來的波面(Wavefront)形狀與特性，以便能獲得與觀測到正確的訊息。由於擾動是持續變化，因此自適應光學必須要有快速的調制速度，能即時由波面感測元件偵測波面訊息，並依據變形補償理論計算，傳送訊號至可變形反射鏡表面，進行微小變形量補償，以恢復原有的波面形狀。Imagine Optic 公司產品針對不同的應用領域，包括雷射光波、醫療用顯微鏡生物影像、自由空間光通訊等，也有開發各類型的波面相位補償軟硬體組件。

Imagine Optic 公司開發了自適應光學所需的三個重要組件，如圖 49~51 所示，包括(1).波面感測器(Wavefront Sensor)，稱爲 HASO Shack-Hartmann Wavefront Sensors，具有 256 至 16000 的空間高解析度測量點數，橫向解析度 114μm 至 450μm，可同時測量光的相位與強度，及具有高測量精度(λ/100 至 λ/1000)與動態範圍(1500λ)；(2).可變形反射鏡(Deformable Mirror)，最大波面變化量±50μm，口徑 15mm 內有 52 個制動器，高精度的表面光學品質(10nm rms)與線性度(>95%)，口徑最大可達 350mm；(3).補償理論與回饋訊號控制軟體(Software Feedback and Control Algorithms)，利用 Zernike 多項式進行波面像差分析與補償量計算，再傳送控制指令至可變形反射鏡。

圖 49 波面感測器.

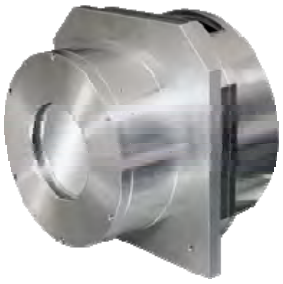


圖 50 可變形反射鏡.

圖 51 補償理論計算與回饋訊號控制軟體.

5. PiShaper 公司：

PiShaper 公司提供光束整形(Beam Shaping)所需的光學鏡組，尤其開發高效率準直光束整形光學鏡頭，可將一般雷射光源高斯強度分佈(Gaussian Intensity Distribution)轉換成平頂(Flat-top)均勻的強度分佈，用於雷射加工最受注目，如圖 52 所示。PiShaper 公司利用所謂折射場投影系統(Refractive Field Mapping Systems)，將光源的強度分佈變成可控制的，且在強度分佈轉換過程，能量並無損失。光學鏡頭設計上，在光源的波段範圍內的準直光束，可達到消色差設計(Achromatic Design)，且光束整形光學鏡頭，除可提供強度分佈轉換外，亦可同時改變光束口徑大小，例如使出射光口徑較出射光口徑大，達到擴束效果。圖 53(a)爲使用一般高斯強度分佈的雷射加工表面，因中央區能量較強而穿透，圖 53(b)爲使用轉換成平頂強度分佈的雷射加工表面，呈現明顯均勻的加工量。

圖 52 PiShaper 公司準直光束整形光學鏡頭與前後強度分佈情況.

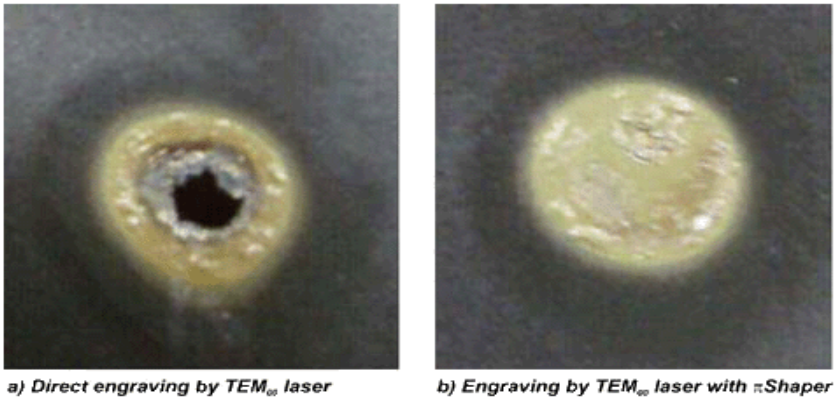


圖 53 一般雷射加工表面與使用光束整形光學鏡頭的雷射加工表面.

6. 其它：

展示會場有數家光學元件零組件廠商參展，德國 SCHOTT 公司主要生產各類型光學玻璃，近年來更切入電子、醫藥、電器、建築至通訊等技術領域，會場上主要展示可見光玻璃材料及特殊濾光鏡片。Edmund Optics 公司主要生產各類型光學鏡片、反射鏡、稜鏡與各波段濾光鏡片。CHROMA 公司利用物理蒸鍍方式，可提供各類型光學濾光鏡片。Reynard 公司除了一般光學元件製作，更可提供軍用光學零組件，包括藍寶石窗鏡(Sapphire Windows)、紅外波段濾光鏡片、雷射光保護鏡鍍膜、及各種軍用材料的鏡片加工。ALPAO 公司與 BOSTON 公司與前面所提的 Imagine Optic 公司類似，爲自適應光學相關軟硬體供應商。

Newport 公司產品原以製作光學儀具及檢測用周邊設備爲主，目前已切入光學元件製作、雷射光源、光纖通訊、光學檢測儀器等領域。THORLABS 公司展示光機組件、光纖通訊組件、相干性光源、光束功率與偏振光測量儀器、自適應光學組件等。Olympus America 公司主要展示光學顯微鏡等光學鏡片與鏡頭檢測儀器。

展示會場另有多家雷射零組件廠商參展，Fianium 公司與 NKT Photonics 公司展示光纖雷射(Fiber Laser)與超快高功率雷射，及相關光纖通訊組件。此外，Central Florida 大學光子學學院，美國光學學會(OSA)、美國物理學會(APS)等學術單位也展示相關研究成果及論文。

7. 相關記要：

本次研討會拜會之學者與廠商記要表

項次	人名/職稱	機構或廠商名稱	洽談內容記要
1	Joseph E. Vornehm /Professor	Institute of Optics, University of Rochester, Rochest, NY, USA	討論利用相位空間光調制器研發光譜辨識系統之光學設計。
2	Bala Pesala /Professor	CSIR-Central Electronics Engineering Research Institute, India	討論利用製作次波長繞射光柵，作爲太陽能聚光器之架構設計與應用。
3	Joseph W. Haus. /Professor	Electro-Optics Program, University of Dayton, OH, USA	討論奈米光子學、光子晶體、新型超材料研發技術現況與應用。
4	Richard D. Simmonds. /Professor	Department of Engineering Science, University of Oxford, United Kingdom	討論利用自適應光學在高折射率材料之 3D 雷射加工的技術現況與應用。
5	G. Nehmetallah. /Professor	Dept. of ECE, University of Dayton, Dayton, OH, USA	討論數位全像干涉儀與顯微鏡用於三維物體之光學檢測技術。
6	Susana Marcos /Professor	Instituto de Óptica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid (Spain).	討論利用自適應光學在眼睛視網膜影像與水晶體透鏡之光學特性。
7	Rick Plympton /CEO	Optimax Systems www.optimaxsi.com	討論光學鏡片、光機設計、系統組裝等設計製造能量，該廠商並可接受委託量產光學鏡頭/元件。
8	Stephen J. Mortinek /Director of International Sales	4D Technology www.4DTechnology.com	討論菲索(Fizeau)雷射干涉儀與非接觸式光學鏡片表面輪廓檢測儀器功能與產品技術研發現況。
9	Roger Kirschner /Sales and Marketing Director	Optikos www.Optikos.com	討論光學鏡片組裝對心、光學鏡頭焦距、MTF 像質檢測、及各種光學像差檢測機台功能。
10	Michael Feinberg /Director of Marketing and Sales	Boston Micromachines Corp. www.bostonmicromachines .com	討論自適應光學相關軟硬體及組件規格性能等。
11	Alexander Laskin /Project Manager	PiShaper www pishaper.com	討論光束整形所需的高效率準直光學鏡組技術。

肆、 建議事項

此次參加 Frontiers in Optics 2011/Laser Science XXVII 光學與雷射技術研討與展示會，無論在論文發表或產品展示方面，仍以歐美日國家佔大多數，顯示關鍵技術的研發，歐美日等國仍處於領先地位，在技術研發上確實有許多值得本院學習之處。

光學鏡頭設計上，使用非球面與繞射光學鏡片提升成像品質，皆有設計概念上的創新，將配合科專光電感測計畫之執行，應用於開發微型化陣列透鏡、光斑干涉圖案取像系統、太陽能聚光鏡等所需光學系統及關鍵性之光學組件。微型光學元件製程與檢測方面，最新飛秒雷射加工與波面像差檢測技術，可應用於開發陣列透鏡及量產模具製程，以實現大面積不變形光斑影像之讀取，對於科專計畫精密定位系統與指紋辨識模組開發將有所助益。

在國防科技研發運用上，自適應光學技術可應用於太空雷射武器雷射光之光波修正，提升系統精度與影像解析度。非球面與繞射光學技術，可應用於紅外影像尋標器之光學鏡頭開發，突破目前使用傳統光學球面鏡片的技術瓶頸，對縮小武器系統尺寸，提升影像品質，有相當大的幫助。建議事項如下：(1).本院已具有光學設計、光學元件製作、鍍膜與檢測能量。若能整合感測元件、影像處理、光電系統量測等專業能量，組成科專建案及技術團隊，開發紅外夜視器材、生醫檢測、自動光學檢測儀器等高價值化產品，應可創造更高的民生產業價值。(2).隨著光電產品朝向輕薄短小及多功能整合方向發展，本計畫目前已將陣列透鏡推廣應用於 LED 照明燈具，提升光效率，後續計畫應結合太陽能作爲照明替代能源，開發綠能產品。