

光的 峰迴路轉

人類對於光的摸索，從完全的無知，到對光本質的了解，最後能在某種程度上控制光的方向和行為，其過程是非常緩慢的。然而在這資訊爆炸的時代，由於光的寬頻特性，使得人們更加渴望能提高對光的操控能力。

■ 蔡宗祐

光對於地球生物的重要性，如同空氣與水一般不可或缺。地球時時刻刻都有一半的表面積受到太陽的照射，植物因此得以生長，草食動物與肉食動物也直接或間接地從植物獲取生存所需的養分。動物死亡後的屍體再回歸泥土，成為植物的肥料，生物得以不斷地繁衍，而生生不息。

某些有趣的學說認為，人類對火光的使用，起源於雷電引起的森林大火烤焦了一些動物的屍體，人類發現烤熟的肉味道鮮美，進而設法由鑽木或碰撞火石來取得火苗，後來更進一步做成火把，以便取暖及照明之用。可是火到底是什麼？光的本質又是什麼呢？為什麼我們無法觸摸到它，卻又真實地感受到它的熱量呢？為何我們可以在水面上看到自己的倒影？又為什麼筆直插入水中的樹枝會出現彎折的假像呢？

人類對光的探索和理解，如同在完全黑暗的甬道中摸索前進一般，過程非常艱辛而緩慢。即便是在科學昌明的今日，科學家仍對於如何駕馭這個只喜歡走直線，而且又是宇宙中速度最快的東西感到頭痛不已。似乎只要是涉及到光的元件，其研究發展就格外的緩慢。

在二十世紀中葉後（其實也不過數十年前），一九六〇年雷射光的發明和光纖波導的觀念，正式為「光」通訊提供了一個無限的想像空間。另外，光子能隙的觀念在一九九〇年後逐漸受到重視，這個觀念似乎提供一個可以控制光子的權杖，使人們可以隨意地支使光在極小體積內峰迴路轉。本文將試著描述光如何從歷史的黑暗甬道走到羊腸小徑，以及淺述光學理論和未來在通訊上的應用。

光的歷史甬道

鏡花水月常用來形容世間一些似有實無的虛幻事物，因為鏡中花、水中月只不過是光的反射，眼睛所見並非實體；而這一句成語也適切點出，物像可經由光滑平面將光反射而重現虛像的現象。根據歷史文獻記載，古羅馬時代所使用的「燃燒玻璃」，其實就是一種凸透鏡。根據描述，它可以用來聚焦太陽光，並藉以產生火苗。此一古物已被考古學家挖掘出來，並證實其年代約在西元前一百年左右。大約在同一時期，古羅馬人也曾使用一種裝水的透明玻璃來放大物體影像，以便從事更精細的工作。由此可見人類很早就懂得運用光的折射現象了。

然而光學理論真正的發展，是在十七世紀之後。十七世紀是光科學發展的一個極為重要的時代，一些偉大的科學家在這個世紀發現了許多光的現象和重要原理，奠定了未來光科學的研究基礎。西元一六一一年，克卜勒（Johannes Kepler）發現光在大角度入射時的全反射現象，此一全反射現象就是目前通訊光纖內，光傳輸的基本工作原理。西元一六二一年，史奈爾（Willebrord Snell）發現了著名的折射定律，即

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

n_1 和 θ_1 分別為入射介質的折射係數和入射角， n_2 和 θ_2 則為傳輸介質的折射係數和折射角。史奈爾的折射定律是光學史上一個相當重要的發現，光的折射角度可以透過折射定律精確地求出。可是它

終究只是一個現象的描述，是何種理由呢？那個時候，人們對光的本質究竟是什麼仍是一無所知。

一六六五年，虎克（Robert Hooke）發現光的繞射現象，並提出一個大膽假設：光如同水波一般，是一種向外擴散的能量波動，當時發現重力的偉大科學家牛頓，並不同意這種說法。事實上，當時已有一些實驗證明光具有粒子性，同時也有實驗證明光的波動性。而牛頓則傾向認為光應該是一種粒子，而且必須在一種叫做乙太的介質中才能傳播。之後的數個世紀（十七～二十世紀），科學家們就陷入一場光到底是波還是粒子的爭論。有趣的是，當時電磁理論的研究與光的研究幾乎是毫不相關的，也沒有人曾想過光其實就是短波長的電磁波，這個秘密一直到十八世紀中葉才被麥克斯威爾（James C. Maxwell）在完全偶然的情形下發現。

麥克斯威爾整合許多科學家的電磁實驗結果，將其歸納成一組具對稱性的完美方程式。從方程式中，他推導出電磁波在介質中的傳遞速度，而此純數學的計算結果居然與實驗中測得的光速值不謀而合。至此，光即是電磁波的觀念，才廣泛地被科學家們接受，而光的波動學說也因此有了難以撼動的基礎。

在科學的世界中，只有真理可以永遠存活，科學家的名望並無助於真相的釐清。牛頓對光的觀點最後被證明並不正確，乙太這種物質一直到一九〇五年愛因斯坦提出相對論後才被大膽推翻，確認宇宙中並沒有乙太這種物質的存在，光不需要任何介質，可以在完全真空中傳播。至於光在實驗中所顯示的粒子性，則是隨著二十世紀量子理論的成熟才慢慢被釐清。由於量子力學已經超出本文的範圍，在此就略而不提。即便是目前光波導（optical waveguide）的應用原理，其主體觀念也不過是光的全反射、折射定律及麥克斯威爾方程式的配合

使用罷了。

全反射的應用

根據歷史記載，在古代戰爭時，人類就曾經利用銅鏡反射太陽光給遠方的陣營，以達到傳遞訊息的目的，這很可能是人類最早的光通訊方式。約從一九六〇年代開始，美國及其他先進國家察覺到電話訊息流量的成長非常快速，他們預估一般電話線路系統不久將無法負荷如此龐大的資訊交流，因此積極投入研發，希望能找出有效的替代技術。其中有三種不同的科技發展：同軸電纜傳輸、微波無線通訊及光纖通訊，逐漸被認為是最可行的方案而成為主流。理論上，光纖通訊可提供最高的訊號傳輸量，然而其技術發展卻是最壘礙難行。光纖通訊困難之處並不在於光纖的製程，而是光纖兩端用以處理光訊號的光元件設計，研發尚未能成熟。

光纖波導的原理其實相當簡單，就是應用光波從高折射係數介質進入低折射係數介質時所發生的全反射現象。藉由全反射原理，光波能量被限制在直徑約10微米（1微米等於百萬分之一米）的玻璃纖維內，做單一方向的傳輸。目前光纖製程技術已經非常成熟，市售的單模光纖能量衰減率可達每公里0.3分貝（dB/km）以下（即每傳輸一公里，能量損失小於6.6%）。以每公里0.25分貝為例，假設每當光的傳輸強度衰減至0.1倍時（90%的能量損失）必須加以放大，則約每四十公里光纖就必須經過一個中繼信號放大器，將訊號放大至原來的功率強度。如此，大約20~30個中繼信號放大器就可讓光訊號環繞台灣一整圈。

光纖通訊之所以讓許多科學家和工程師抱以極大的希望，主要是因為它可以提供相當大的頻寬，遠超過電線電纜所能提供的寬度，而頻寬的大小，直接影響到波道（頻率）數目及

資訊傳輸量的多寡。一條單模光纖內可以同時傳遞許多不同頻率的訊號波道，而各個波道間幾乎不會相互干擾（或說干擾極小）。這就很像一條多線道的高速公路一般，如果我們規定各線道上的汽車不可互換跑道，則每一輛汽車可以在固定的線道上以極高的速度行駛；此外，交通流量又與高速公路的線道數目成正比。

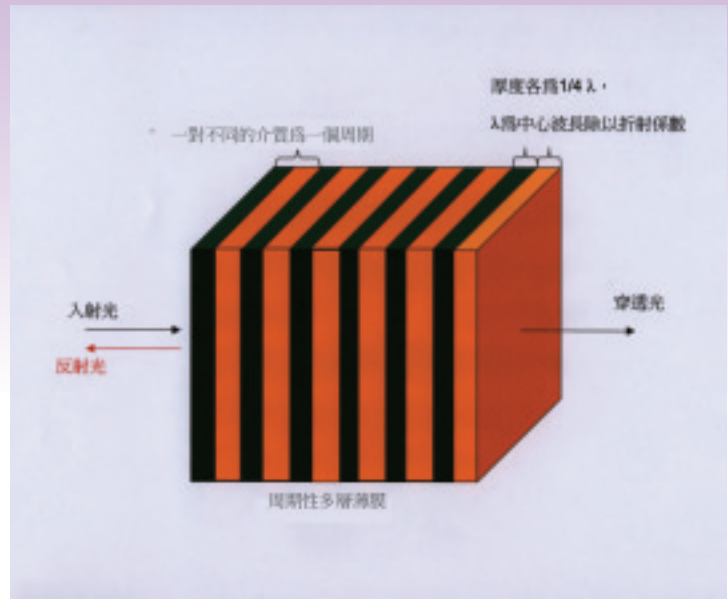
但是問題是：如何把某一線道的車輛引出交流道或將其接引到另一條高速公路，而不會影響到其他線道車輛的行駛。在光纖通訊中，分波多工／解多工器（wavelength division multiplexer/demultiplexer, WDM）的功用是將許多波道的訊號匯流至一條單模光纖中，或是把一單模光纖內的各個波道分離出來。顯然，分波多工／解多工器的技術成熟度關係到光纖內可負載的波道數目，是光纖通信中關鍵性的組件。

目前已經商業化的技術有薄膜濾波器（TFE）、陣列波導（AWG）、光纖光柵（FBG）等技術。這三種技術各有優缺點，也各自占有一定比例的市場。其中薄膜濾波器由於原理簡單且製作成本低，目前約占WDM市場的80%左右。薄膜濾波器的原理是利用光的多次反射和干涉，產生出特殊的反射頻寬。由於此一原理與稍後提到的光子晶體能隙理論相似，在此先對它做簡單說明。

光的多層薄膜干涉

薄膜濾波器的工作原理，是利用光進入多層薄膜後，在每一層之間不斷地反射，彼此間由於相位干擾，造成一特殊的全反射頻譜，利用這一全反射頻譜，我們可過濾出想要的波道。

後來科學家進一步發現，當物體的厚度接近光波波長時，反射波的強度對於厚度的變化非常敏感。原因是：光進入物體內被第二界面反射後，會和通過第一界面的前進波產生相消



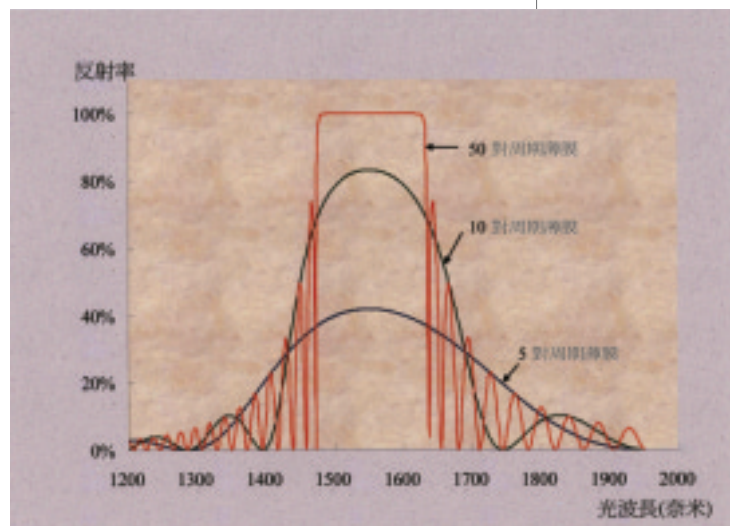
或相長性干涉，造成反射波強度降低或反射波強度變強的現象。

科學家的直覺反應是：如果有好幾層的物質（即使是透明物質），每一層都恰好是使得反射波強度變強的厚度，譬如說四分之一波長時，這個波長的光是否可以被完全反射回去？的確，多層反射、干涉可使得反射光加強，而且頻寬變得更明顯，這也就是多層薄膜的應用原理。

多層薄膜的反射頻譜，可以應用在太陽眼鏡或一般眼鏡上，以阻隔有害的紫外光。它也

周期性多層薄膜，每層厚度為 $1/4\lambda$ ，此處 λ 為中心波長除以薄膜的折射係數。

利用周期性多層薄膜干涉，反射光強度會隨薄膜層數的增加而增強；然而反射光的頻寬（所含的波長範圍）卻隨著薄膜層數的增加而減少。





三維光子晶體結構 二〇〇〇年由強生 (Steven Johnson) 和貞諾普羅 (John Joannopoulos) 提出。

廣泛應用在各式光學儀器上，例如雷射共振腔的前後反射鏡面上，就鍍有多層薄膜，可反射特殊頻率的光波，不同的多膜頻譜設計可改變雷射腔內的共振頻率。多層薄膜也可以用來擋掉不想要的光，而過濾出想要的光的頻率，這就是前面提到的訊號波道分波多工器 (WDM) 的原理。

一個相當簡單的周期性多層薄膜結構，就能有這麼多用途，科學家們不由得想到，是否在二度或三度空間裡具有周期性的結構，也有類似的現象和更為寬廣的應用空間。為了求得多層薄膜的反射頻譜和光場強度分布，可以藉由符合邊界條件的傳輸矩陣來運算。然而這種運算方法，用在二度或三度空間中，具有周期性結構的物體上時，卻無法勝任。這時候就需要一個新的理論，來解釋在一度、二度及三度空間中的干涉現象，光子晶體能隙理論也就是在這種情形下應運而生。

光子晶體是一種人造的周期性空間結構。此一人造結構類似自然界物質的原子晶格排列，只不過原子的排列周期以埃 (1埃 = 10^{-10} 公尺) 為基本單位，而光子晶體周期則習慣以光

的波長為使用單位。由於光波與電子的機率波都是波函數，因此我們可以合理猜測，光在光子晶體中的波形，應該類似於電子在物質內的分布模式。

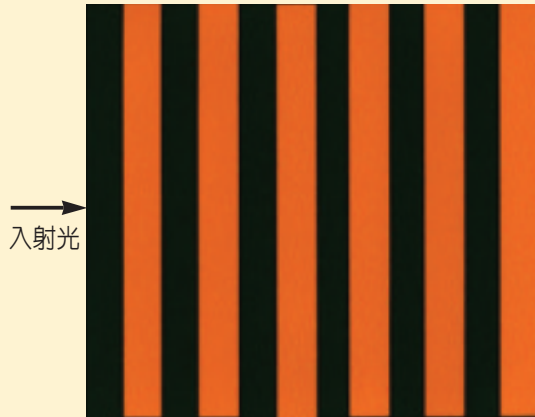
能隙為能量帶間隙 (energy band gap) 的簡稱。光子或電子能量可能在一特殊結構下呈現不連續性，即是某些能量無法存在於此一結構下，此一不連續性的大小就稱為能隙寬度。既然電子在原子晶格內具有電子能隙現象，那麼光子晶體內也應該有「光子能隙」的存在。而符合此能隙的光波，因為無法存在於光子晶體內，所以當這種光波入射時必然出現全反射現象。簡言之，光子晶體可以看做是把一度空間的多層薄膜往二度、三度空間加以延伸，而解釋的方法則採用固態物理的電子能隙理論。

在光子能隙理論提出之前，多層薄膜干涉的原理已為人所熟知，電子能隙理論也已發展成型。一九八七年，傑伯諾維契 (Eli Yablonovitch) 和貞諾普羅 (John Joannopoulos) 兩人不約而同地提出了光子能隙理論，理論提出之後，二維光子晶體的重要應用隨即相繼提出，如光子晶體雷射、90度彎折光波導、高密度分波多工器 (DWDM) 等。在進一步探討光子晶體的應用之前，我們必須先解釋一個使光子晶體更有價值的結構——「缺陷」。

十全十美不見得就是最好的

「缺陷」是光子晶體的一個特殊重要結構，它其實就是在周期結構中故意製造的瑕疵空間，而此瑕疵破壞了晶體一貫的周期性。此一缺陷在光子晶體內的特性如同光子的陷阱一般，使得光子有「停留」在此一缺陷中的傾向。當然，光子是不會停留的，事實上，它是在這一缺陷內來回地共振。

讓我們從最簡單的多層薄膜來解釋，當我們故意把某一層薄膜的厚度從四分之一波長增



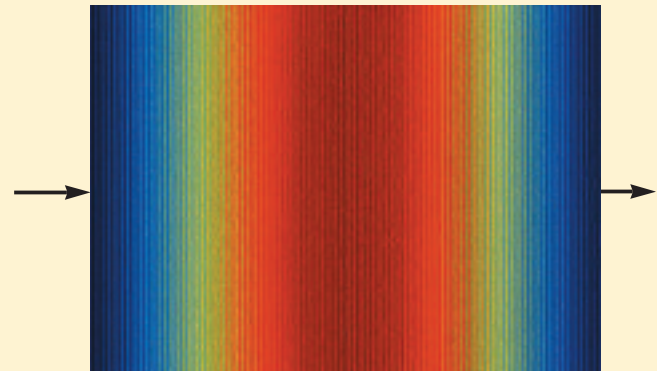
周期性薄膜



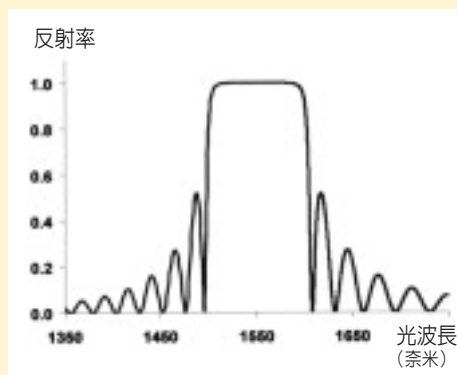
「缺陷」薄膜，厚度 ($1/2\lambda$) 比其他層 ($1/4\lambda$) 大，破壞了周期性結構。



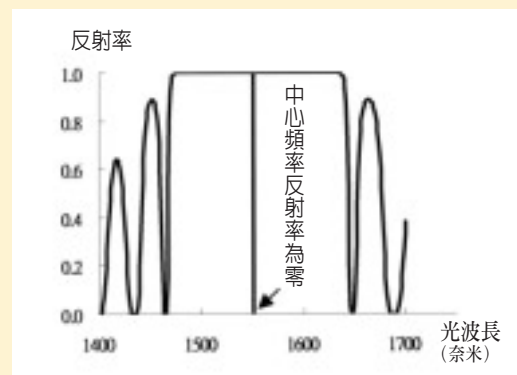
入射光中心頻率為1550奈米，產生全反射。顏色代表相對光場強度。紅色最強，藍色最弱。紅色為光波共振最強烈之處。



入射光中心頻率為1550奈米，100%穿透（零反射）。「缺陷」位置為光波共振最強烈之處。



周期性薄膜反射頻譜



缺陷薄膜反射頻譜

加到二分之一波長（或大於四分之一波長的合理長度）後，此波長的入射光將從百分之百反射變成零反射，亦即百分之百穿透！而且其穿透頻寬非常的窄小，這個較厚的薄膜就是一個破壞周期的缺陷。若進一步推算電磁場在多層薄膜內的分布狀況，可以發現此缺陷薄膜內的光強度遠大於其入射強度，而穿透強度等於入射強度（因為100%穿透）。很明顯地，光子進入多層薄膜後，會在此缺陷中來回共振許多次後才離開，同樣的原理和共振現象也存在於二、三度空間中。

這種因缺陷而產生的極為窄小的頻寬，可以提供精確的濾波效果。此種濾波結構並不一定多層膜，它也可以應用在光纖上或是在半導體基板的脊狀波導上。所謂脊狀波導就是在半導體基板上蝕刻出如山脊般的形狀，使光被局限在脊內傳輸。在半導體基板上，一條脊狀波導被蝕刻出數個周期性排列的圓孔。但在中心處間距比較大（缺陷），破壞了周期結構，使得只有中心頻率可以通過此波導而達到濾波的效果。

目前最小的雷射

光子晶體的二度空間結構一般也是在半導體的基板上加以蝕刻而成，它看來就像平面上布滿周期性排列的坑坑洞洞。二維光子晶體的

應用之一是光子晶體雷射，它的雷射共振腔就是平面上不遵守周期性排列的區域，也就是光子晶體的一個缺陷。光子晶體雷射在一九九六年被發表，至今仍為世界上最小的雷射結構。因為其共振腔極小，所以它產生的雷射頻寬變得相當地窄小。

另外，光子晶體結構也可以降低雷射的臨界工作電壓（就是使雷射發光的最小電壓），如此可減少能量的耗損；由於雷射在運作時，自發性光輻射是朝各個方向散發出去的，而貢獻到共振模態的比率非常少（約在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 之間），因此一般雷射的電光轉換效率很低。二維光子晶體經過適當設計，可抑制二度空間的自發性輻射，所以自發性輻射貢獻到共振模態的比率可大幅提高（ ~ 0.06 ）。目前也有理論提出，利用三維光子晶體做出零臨界工作電壓雷射的可能性。

光的強制左右轉

二維光子晶體的另一個重要應用，是製作大角度彎曲的光波導。在積體光學元件中，因為考慮到光的能量損耗及製程成本，我們希望能盡量縮小光元件的長度，並把許多元件製作在一個極小的基板上。如此一來，光就必須在這基板上做多次大角度彎折。一般脊狀波導和光纖一樣，都是利用全反射來傳遞光波，當這些波導彎曲角度過大時，全反射的條件就無法繼續維持，光波就無法在波導內傳遞，這也是積體光學元件長久以來面臨的困難。

二維光子晶體做成的光波導看起來就像是一條缺陷線，光的能量被局限在此一缺陷中，並沿著唯一自由度方向（左、右）傳遞。我們如果在兩平行波導之間安排一缺陷點，那麼此缺陷點的行為就像是對光子有誘捕功能一般，可以把光誘離原來路徑，並將之導入另一波導。當然，「誘捕」是擬人化的形容詞，實際

一維光子晶體能隙的應用 在光波導上加以周期性蝕刻，並使中心處的蝕孔間隔較大，此一空間缺陷使得波導可以過濾出特殊頻率的光。



麻省理工學院卓諾普羅 (John Joannopoulos) 研究群

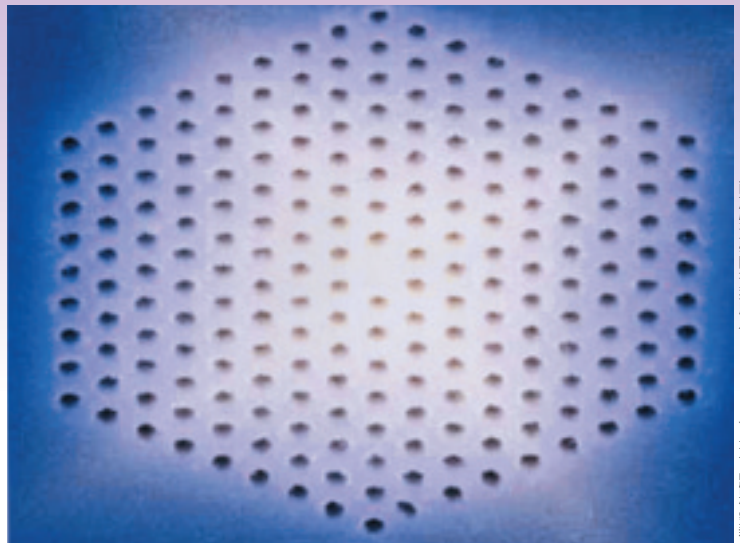
上是光在波導內左右（X方向）傳遞時，同時也在做上下（Y方向）共振，當遇到缺陷點時，因為下方反射率由100%變成零，光自然往缺陷方向偏行。利用此現象，由二度空間光子晶體做成的光波導，可以讓光在極小的空間內連續做大幅度轉彎。這種控制光在半導體基板上「峰迴路轉」的能力，可大幅縮小積體光學元件的體積，降低能量損耗，並使元件密度大幅提高。

除了光波導和雷射的應用之外，光子能隙邊緣所出現的色散現象（即是讓不同頻率的光，產生前進速度上的差異）也可以應用在高密度分波多工器（DWDM）、波道塞取器或光學編碼等通訊用途上。光子晶體能隙理論的提出距今也不過十多年光景，但是粗略估計，目前國外已有約五百多個研究團隊專注在光子晶體能隙理論的研究、驗證和應用的研發。

光的未來路

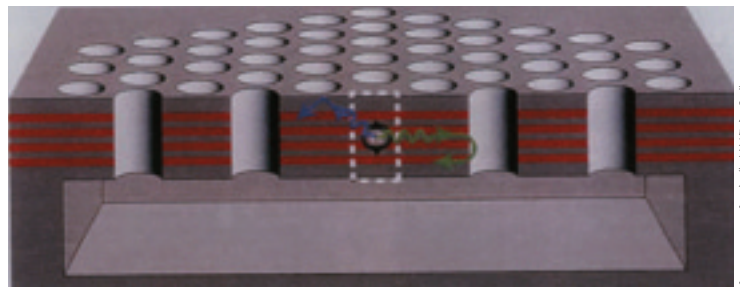
在對光的摸索中，人類從完全的無知，發展到對光本質的了解，現在已能初步控制光的方向和行爲。相較於電子元件的進步，光的研究發展其實是極為緩慢的；可喜的是，眼前對於光的研究，正步入一個加速起飛的階段。除了上述所提的一些光通訊元件結構外，光顯示器（如LCD）、光儲存技術（如CDROM）等，也是目前研究的焦點，而且發展也非常快速。

當我們預測未來光學研究會朝那個方向發展時，也許檢視過去的一個迷思，或可提供我們一個較為正確的方向。記得雷射光剛發明的時候，許多科學家曾聲稱光未來終將取代電，光腦將取代電腦。但是事實證明這只是一廂情願的看法，其實並不正確。因為光與電各有其無法被取代的優點，與其說兩種科技相互競爭，倒不如說光與電必須互相配合，才能使系統達到最高的效能。因此，光電元件的研發和



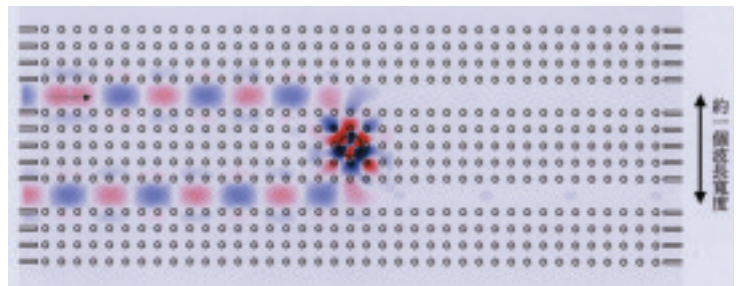
南加州大學歐布萊恩 (John O'Brien) 光子晶體研究組

二維光子晶體結構 用電子束雕像儀器，在半導體基板上做鑽孔蝕刻，蝕孔間距約0.5微米，中間未蝕刻——「缺陷」處形成一個超微光子共振腔。



《普氏物理》(Physics Today)

利用二維光子晶體所形成的微型雷射 中間的缺陷即形成光子共振腔。



麻省理工學院貝諾普羅研究群網站

二維光子晶體結構的彎曲波導 因為中心缺陷設計（蝕刻孔徑較大）可使光子在約一個波長距離內做兩次90度轉折。

光電系統的整合，才是光學未來的發展方向。我們很難預測這個世紀光子的研究會發展到什麼境界，但是可以確知的是，它必然是一個「充滿光明」的時代。 □

蔡宗祐
成功大學電機工程學系