

第一章 序論

1.1 前言

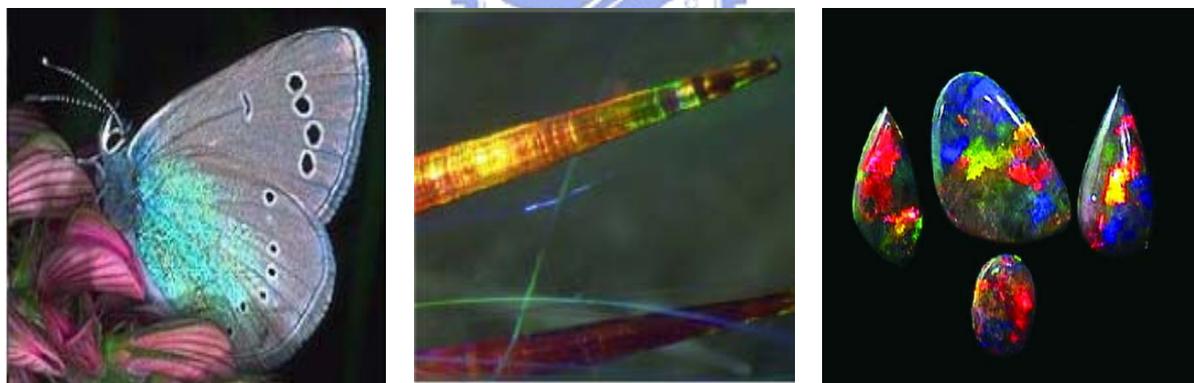
光對於地球生物的重要性，如同空氣與水一般不可或缺。人類對於光的探索與理解，如同在完全黑暗的甬道中摸索前進一般，過程非常艱辛與緩慢，即便是在科學昌明的今日，科學家仍對這個只喜歡走直線，而且又是宇宙中最快的東西感到頭痛不已，似乎是只要涉及到光的元件，發展的速度就格外緩慢。

二十世紀中葉以後，1960年雷射光的發明與光纖波導的概念，正式為「光」通訊提供了一個無限想像的空間。光子能隙的觀念在1990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仗，使人們可以隨意支使光在極小體積內的峰迴路轉。隨著光纖網路普及化趨勢及隨之而來的頻寬需求，製作高光學品質與適於量產的光纖元件乃技術研發的重點，而相關材料對光學特性的掌控，向來是光通訊技術研發人員所熱衷探討的話題。半導體物理的發展使科學家得以掌握某些材料中的電子能帶(electron bandgap)，因而掌握電子的傳播特性，從而造就電晶體時代的輝煌盛世。電子能夠有能帶，那麼光子呢？如果我們能夠找到一種材料，或者於某種材料上動些手腳，使得這種材料得以像半導體般影響電子傳播特性般地產生光子能帶，從而得以控制光子的傳播特性，那麼我們就能夠於光通訊領域扭轉乾坤，科學家已從自然界中尋獲到具備上述特性之物質，即為「光子晶體」(photonic crystals)。

1.2 光子晶體簡介

空間上介電係數或折射率呈週期性排列的結構稱為光子晶體。光子晶體是一種人造的週期性空間結構。光子晶體的週期習慣以光的波長為使用單位，由於光

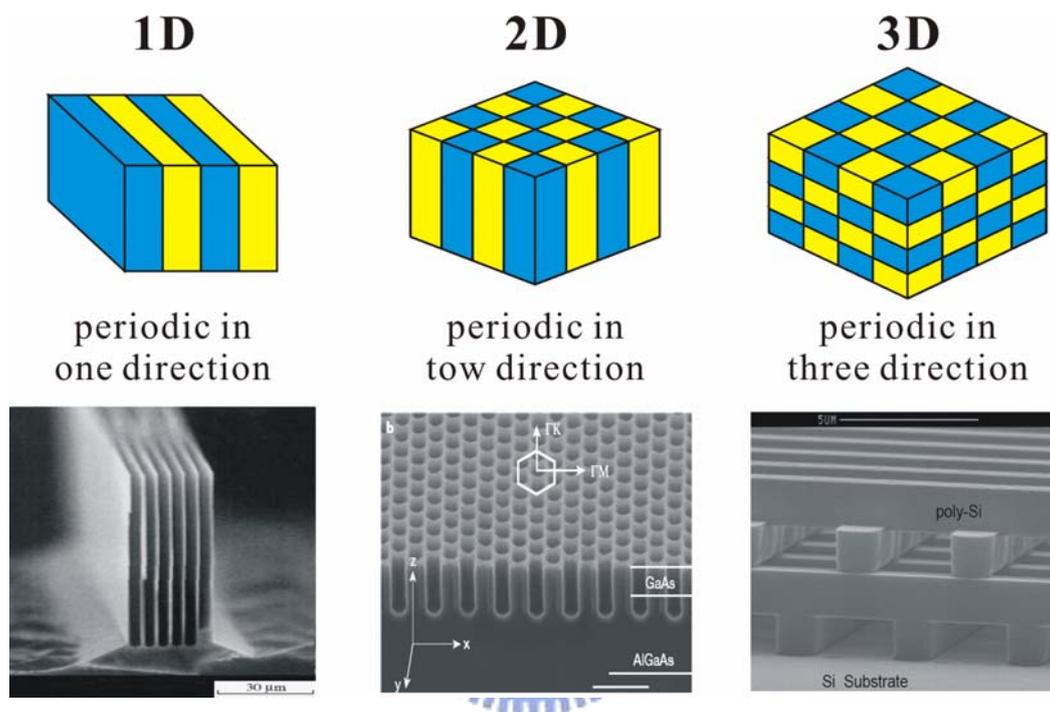
波與電子的機率波都是波函數，因此我們可以合理猜測，光在光子晶體中的波形，應該類似於電子在物質內的分布模式。光子晶體的人造週期性空間結構，類似於自然界物質的原子晶格排列，只不過原子的排列週期以埃（1埃=10⁻¹⁰公尺）為基本單位。自然界中，光子晶體的結構，如圖1-1所示，蝴蝶的翅膀、海老鼠的毛、蛋白石，或淡水著名的孔雀蛤的表面，我們都可以看見週期性的結構。它們的週期約為數百奈米，由於具有不完全的能隙，才使得它們能有鮮豔的顏色展現在可見光的範圍。能隙為能帶間隙(energy band gap)的簡稱，光子或電子能量可能在一特殊結構下呈現不連續性，即是某些能量無法存在於此結構下，此一不連續性的大小就稱為能隙寬度，既然電子在原子晶格內具有電子能隙的現象，那麼光子晶體內應該也有「光子能隙」的存在[1]，而符合此能隙的光波，因為無法存在於光子晶體內，因此當這種光波入射時必產生全反射的現象。簡言之，光子晶體可以看成一度空間的多層膜往二度、三度空間加以延伸，而且解釋的方法朝著採用類似於固態物理的電子理論發展。



【圖1-1 自然界中的光子晶體】左至右分別為蝴蝶翅膀、海老鼠的毛及蛋白石

光子晶體的概念，最早主要是於1987年由E. Yablonovitch及S. John所提出[2][3]，而真正引起眾人注目以及興趣主要是於1989年的時候，由Yablonovitch和Gmitter在實驗上驗證了光子晶體的存在[4]。光子晶體依介電係數或折射率在空間上週期性變化的情況，如圖1-2所示，可分為一維、二維及三維的結構。在圖1-2中，可看到此種材料的折射率變化週期性若為單一軸向上的(藍色與黃色分別代

表兩種折射率介質)，稱為一維光子晶體。若折射率變化週期性為雙軸(平面)上的，稱為二維光子晶體。若折射率變化週期性為三軸(立體)的，稱為三維光子晶體。一維光子晶體即為光學上的多層膜[5]，目前多使用在光學鏡頭上，讓某些波長的光無法穿透，而達到高效能的反射。而目前主要的發展為二維和三維的光子晶體結構，其運用大部分為光通訊產業方面。



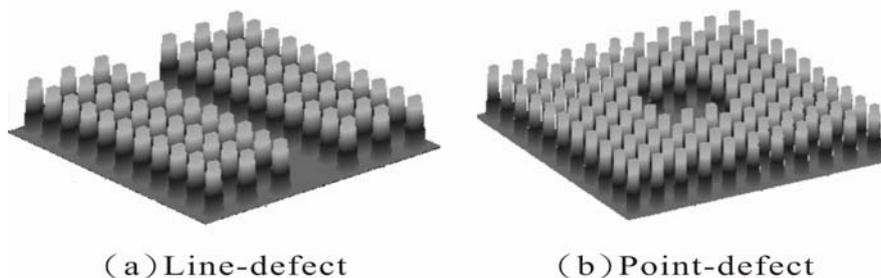
【圖1-2 三個不同維度的光子晶體】

光子能隙的理論提出後，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。光子晶體之所以在應用及發展上有如此的突破性進展，全是拜它的「缺陷」結構所賜。

1.3 光子晶體的缺陷

「缺陷」是光子晶體的一個特殊重要結構，它其實就是在週期性結構中故意製

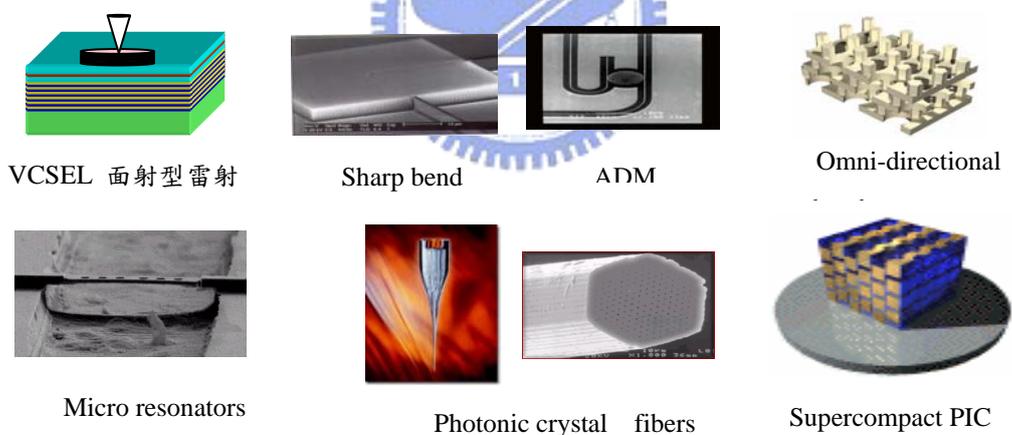
造瑕疵空間，而此瑕疵破壞了晶體的一貫週期性，此一缺陷在光子晶體內的特性如同光子的陷阱一般，使得光子有停留在此一缺陷的傾向，且只可在此缺陷中傳導。當然，光子是不會停留的，事實上，它是在此缺陷內來回地共振。若我們從最簡單的一維度多層膜解釋，故意把某一層薄膜的厚度，由四分之一波長增加到二分之一波長（或大於四分之一波長的合理長度）後，此波長的入射光將從百分之百反射變成零反射，亦即入射光會百分之百穿透週期性薄膜，而且其穿透頻寬非常得窄小，這個較厚的薄膜就是一個破壞週期的缺陷，若進一步推算電磁場在薄膜內的分佈狀況，可以發現此缺陷薄膜內的光強度遠大於其入射強度，而穿透強度等於入射強度（因為百分之百穿透），很明顯的，光子進入多層薄膜後，會在此缺陷內共振許多次才離開，同樣的原理和共振現象也存在於二、三度空間中。將這樣的觀念放在光子晶體結構中，假如在完整的光子晶體結構中，拿走了一排具有週期性排列的介質時，則會使原本完整的光子帶隙中產生一個或多個可用的傳導態，對於此種因缺陷而產生的傳導帶，我們稱之為缺陷模態(Defect Mode)，典型的缺陷可大致分為：(1)點缺陷(Point Defect) [6]、(2)線缺陷(Line Defect) [7] [8]，如圖1-3，如果是點缺陷，則光能量會在此缺陷點中形成高能量密度的共振，如雷射共振腔(Resonance Cavity)，光子晶體雷射在1996年被發表，至今仍是世界上最小的雷射結構。如果是線缺陷，則光能量會被聚集在這樣的缺陷中，就如同傳統光波導(Optics Waveguide)，但是相較於傳統波導利用光在高折射率材料下傳導，光子晶體能夠在折射率材料低如空氣的狀況下傳導，並且在九十度轉彎的大角度轉折之下，能量的損失極小的特性。



【圖1-3 光子晶體：(a). 線缺陷；(b). 點缺陷。】

1.4 光子晶體發展與應用

光子晶體中的缺陷，使其能隙範圍內產生一些狹窄的光子穿透頻道，進而衍生許多可以應用於元件製作上的新奇現象。光子晶體可應用於許多光電元件，包括：微小化低電流的半導體雷射、可調放射波長的高效率發光二極體、高效率光放大器、低損耗的大角度彎曲波導、VCSEL面射型雷射、光子晶體光纖[9]、高效率的光束分離器、光子晶體微型雷射共振腔，如圖1-4所示。此外，近幾年來爭論不休的反常現象—負折射率[10]，如果能成功的以光子晶體製造出負折射率的透鏡，則可以大幅提昇現階段光學儀器的解析度及開拓許多新奇的光學元件。光子晶體的實際應用，引導了所有光系統的研究機會，這些機會包括了光通訊、光顯示、光儲存及生醫光電。以光子晶體為基礎，可以預期這些應用將會有突破性的進展。



【圖1-4 光子晶體的各種相關應用】

1.5 光子晶體數值模擬

光子晶體在21世紀光通訊佔有舉足輕重的角色，甚至在未來將衝擊到目前的電

腦架構，但若在其發展上遇到瓶頸，並沒有直接的理論公式作這方面的理論分析，在沒有理論推導的情況下，便只能仰賴數值模擬方法解決目前的困難，進而了解其物理性質，做出最佳化的設計。

光子晶體特性的數值方法：包括計算頻帶結構的平面波展開法(plane wave expansion method)、計算二維系統內外的穩態電磁場的多重散射法(multi-scattering method)、可同時計算一維系統頻帶結構以及穿透與反射的傳輸矩陣法(transfer matrix method)。前述所有的方法都是在頻域(frequency domain)上處理，它們共同的優點是計算速度很快，所花的電腦資源較少，共同的缺點是只能計算穩態，且邊界條件必須夠簡單。例如：平面波展開法所針對的對象是無限大結構(無外邊界)的光子晶體；多重散射法只能計算由介電圓柱所構成的光子晶體；而傳輸矩陣法只可針對1維與2維的結構作計算。若是涉及光子晶體的暫態效應或較複雜的邊界問題時，通常就應該採用適合計算電磁波動態行為的「時域有限差分法」(finite-difference-time-domain method，簡稱FDTD法)，它是光子晶體理論研究與數值模擬計算很普遍採用的方法之一。

上述的幾種方法之外，還有將連續場切割成許多小區域作分析的有限元素分析法(Finite-element-method，簡稱FEM法)，每個小區域的集合體就是原來的連續場，然後建立每個元素的公式，再組合起來，就能求得連續場的近似解答。其具有對於線性、非線性問題均可解、內插函數之選擇可隨問題所需精度而調整及程式設計易於系統化等優點。

1.6 研究動機與目的

近年來，光子晶體光纖 (Photonic Crystal Fiber, PCF)引起各方學者專家們的熱烈討論。自1996年Knight[11]等人首次提出單模光子晶體光纖以來，更是引起多方的關注，與傳統光纖相比，光子晶體光纖擁有單模、異常色散、高雙折

射與高非線性等特色，被廣泛應用於光通信、光感測與非線性光學等領域。

相較於傳統光纖，光子晶體光纖更容易實現雙折射傳輸特性，這是光子晶體光纖的重要光學特性之一。先前研究者已提出許多高雙折射光子晶體光纖的結構。若藉由在光纖纖衣(cladding)引入結構非對稱性，這類光子晶體光纖可在長波長區間獲得較高的雙折射，並且以單模進行傳輸，因此是種較佳的高雙折射光子晶體光纖設計方式。到目前為止，我們看到了幾種在光纖纖衣引入非對稱性的作法，一是如Bath大學Russell[12]等人提出在纖衣中引入非對稱性結構，即減小光纖纖覆中一排圓形空氣孔的直徑；T. P. Hansen等人則是引入纖芯的非對稱性[43]，產生雙折射的效果。另一種是M. J. Steel等人採用橢圓空氣孔結構的光子晶體光纖[13-14]，Daru Chen等人利用橢圓空氣孔同時引入纖芯與纖衣的非對稱性[44]，以及，提出在纖芯引入橢圓空氣孔，在纖衣引入圓形空氣孔的結構[45]。Yuan-Fong Chau等人利用複合式的橢圓空氣孔結構，創造雙折射效果[46]。雖然由於橢圓空氣孔具有結構上強烈的非等向性(anisotropic)，因此可得到 10^{-2} 數量級的雙折射，但在實驗上對於橢圓空氣孔的長短軸比例需有高精確度的控制；相較之下，由Bath大學Russell等人提出的結構較易於製造，但其雙折射只單由一排直徑較小的空氣孔所貢獻，因此雙折射值偏小。為此，我們提出一種新的光子晶體光纖纖覆引入非對稱性的方法，以獲得較高的光子晶體光纖雙折射。我們考慮三角晶格的圓形空氣孔光子晶體光纖結構，纖衣是由兩套不同直徑大小圓形空氣孔呈週期性排列的複合體。與先前研究者所提出的結構相較，我們的光子晶體光纖雙折射是來自於整個纖衣的貢獻，此外，光纖纖芯是由完整週期結構中心移除一個空氣孔的點缺陷所構成，因此預期可產生較高的雙折射與具有較低的損失。

我們應用有限元素法，利用Comsol Multiphysics 3.2b軟體模擬新型光子晶體光纖的雙折射對結構參數與工作波長的關係，結果表明，在參數優化下該結構的雙折射可達 8.7×10^{-3} ，最低損失可達 5.27×10^{-5} dB/km，是Russell等人最大值的兩倍以上。