

新世紀奈米級光電材料結構 -- 光子晶體

楊志忠

國立台灣大學光電所

e-mail: ccy@cc.ee.ntu.edu.tw

摘 要

光子晶體(photonic crystal)係在二維或三維空間中，讓材料折射率或介電常數產生週期性變化的結構，這種結構模仿原子在固態晶體中的排列。因此，類似電子於固態晶體中的能帶結構，產生光子的能帶結構。在光子晶體中，電磁波的傳播特性，包括振幅、相位、偏極化方向和波長，都可以經由控制發光頻譜、群速色散、偏極特性、相位匹配等光子晶體的特性而得以大幅度的調變。光子晶體結構的尺寸約為光訊號在材料內波長的四分之一，所以在大部份光電應用波段內，其尺寸在二十五到一百奈米之間。本文將簡介各種光子晶體的結構，包括以半導體及光纖為素材的光子晶體，並說明其一些特殊的光電特性以及可能的應用。光子晶體可以提供許多新型光電元件的製作，尤其重要的是可以大幅縮小元件的體積，並從事密集的積成，預計將對光電技術發展產生革命性的影響。

一、前言

在現代科技發展中，光電科技乃為新興領域，其應用涵蓋各重要範疇，如光纖通訊、光顯示、光資訊儲存、高效率照明及生物醫學方面的應用。隨著光電科技在基礎研究上不斷的突破，它已經在我們的日常生活中造成重大的影響，這樣的影響力並將持續而且擴大。最近十年來，光電科技在新材料的成長技術、新製程技術的發展、高功能元件之設計與製作以及成熟穩定系統的完成，都有傲人的成績。光電科技不僅是重要的科學課題，也是關乎經濟成長的關鍵工業。

在許多處理光訊號的元件結構中，由於電磁波相位週期性的本質，使得週期性結構成為關鍵要

素。例如多種不同形式的光柵在所有光電系統中即占重要地位。另外，週期形式介電係數的電、聲、或磁式調變也應用於控制光訊號上。不論是材料的永久或動態調變，都代表電磁波基本參數的控制，包括強度（吸收、放射、散射）、相位（群速、群速色散）、偏振（非等向性）、波長（頻譜分佈）。這些控制可以經由微觀或介觀的材料成長、製程、幾何尺寸與波長相近之元件結構來達到目標。

二、光子晶體的概念與應用

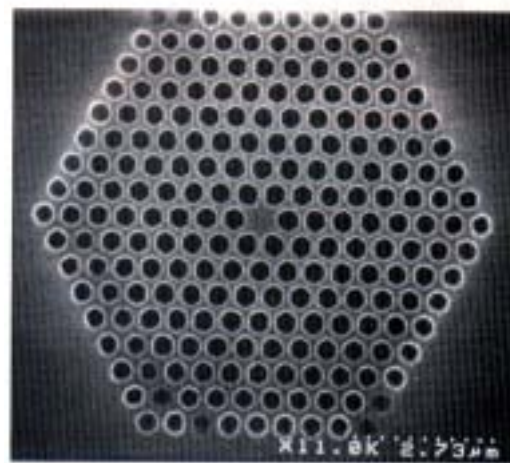
光子晶體(或叫光子能隙結構晶體)的概念於1987年首先由 Yablonovitch^[1]及 John^[2]分別提出。但是它一直沒有受到太多的注意，直到最近這幾

年，因為各種製作相關結構的製程技術發展成熟，光子晶體才受到注目。基本上，光子晶體是在二維或三維空間中，讓材料折射率(或介電常數)產生週期性變化的結構，這種結構模仿原子在固態晶體中的排列。所以，類似電子於固態晶體中的能帶結構，在光子晶體中就產生光子的能帶結構。因此，在光子晶體中電磁波的傳播特性，包括振幅、相位、偏極化方向和波長，都可以經由控制發光頻譜、群速色散、偏極特性、相位匹配等光子晶體的特性而得以大幅度的調變。特別是，如果在週期性的排列中故意安排一些瑕疵，將會在光子晶體的能隙範圍內產生一些狹窄的光子穿透頻道，進而衍生很多可以應用在元件上的新奇現象。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、可調式半導體雷射、可調放射波長且高效率的發光二極體、高效率光放大器、低耗損的彎曲波導、微腔振盪器、可調式窄波通光柵、加減濾波器、多工器和分工器、動態增益平衡器、高效率開關、調幅器、小型化耦合器、光迴旋器、光路由器、高敏感性的感測器、超寬頻光源產生器、短脈衝產生設施等等。另外，如果能善用最大折射率的對比(空氣和所用材料的對比)，那麼二維或三維空間光柵所需要的尺寸將會大大地減小，這讓極度緊密的元件積成更容易實現。既然這種人造晶格的結構參數大小可以任意控制，各種光學元件密集的整合積體化將會更容易。光子晶體結構的尺寸約為光訊號在材料內波長的四分之一，所以在大部份光電應用波段內，其尺寸在二十五到一百奈米之間。

三、光子晶體結構與製作

在過去的三四年中，利用各種不同的材料，各

式光子晶體的製作技術突飛猛進。研究成果包括：(一)利用乾式蝕刻在三五族半導體上產生空氣洞，配合於中心一個點瑕疵的安排，形成一個微腔半導體雷射的共振腔(參見圖一 -- 二維光子晶體結構中心瑕疵的上視圖)^[3]，這裡所謂的瑕疵即是週期性結構中某些位置該有空氣洞而未有洞；(二)在矽/二氧化矽結構或三五族化合物層上用空氣洞排列成彎曲的波導(參見圖二 -- 二維光子晶體結構中由線瑕疵形成的彎曲波導上視圖)^[4,5]；(三)由具有特意安排空氣洞的二氧化矽細絲形成的光子晶體光纖(參見圖三 -- 光子晶體光纖的截面圖和近照圖 注意中心有一個瑕疵)^[6]；(四)奈米尺寸小球自動組合形成的珍珠結構(opal)或反相珍珠結構(inverse opal) (參見圖四 -- 一個珍珠結構的例子)^[7]；(五)以自行衍生(auto-cloning)技術生長二維或三維矽及二氧化矽交替區域結構^[8]；(六)電化學蝕刻形成的微孔洞結構^[9]；(七)以擴散成鍵技術形成三維光子晶體(參見圖五 -- 砷化鎵棒堆疊的例



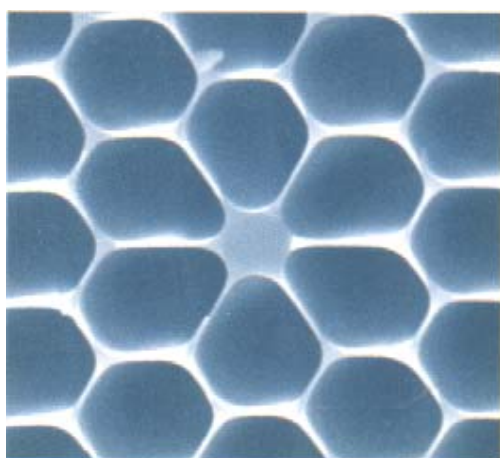
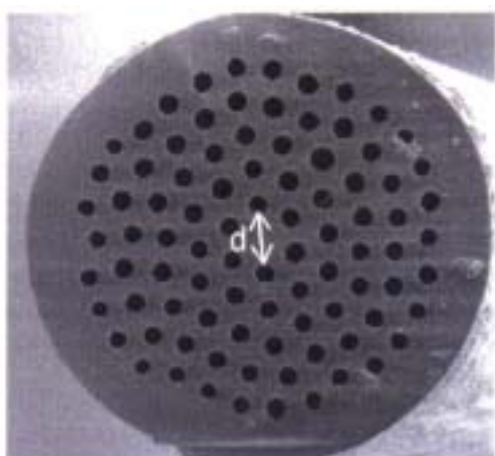
圖一 二維光子晶體結構中心瑕疵的上視圖

子)^[10]；(八)二維光子晶體中的第二度非線性光學^[11]等等。此外，經由數值模擬計算後，一些基本二維

光子晶體的光學特性已經相當瞭解。為了所需求的光學特性和新的應用，人們也提出更多新奇的三維



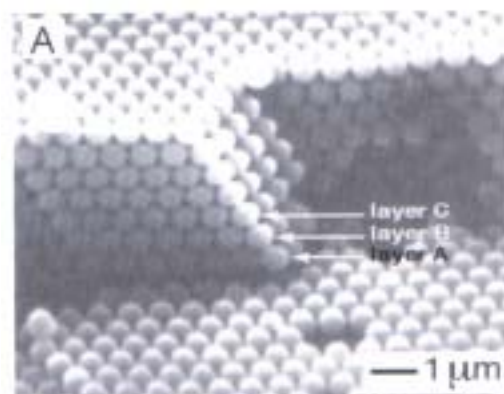
圖二 二維光子晶體結構中由線瑕疵形成彎曲波導的上視圖



圖三 光子晶體光纖的截面圖(上)和近照圖(下) 注意中心有一個瑕疵

結構。圖六展示出一個例子^[12]。所有這些光子晶體結構都顯示出很多新奇的光學現象，這些光學現象都有極廣泛的應用。

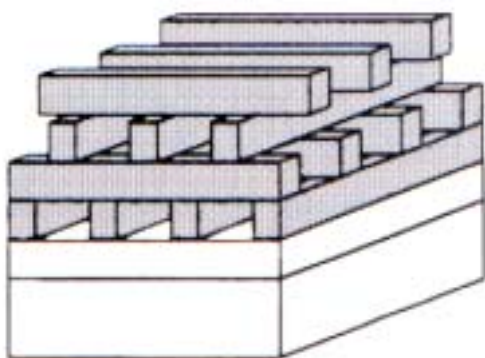
光子晶體這些獨特的光學特徵及其應用的重要性可以從下面兩個例子進一步瞭解。第一個例子是在光通訊和其他的系統中，群速色散是一個關鍵的問題，而在適當設計的光子晶體光纖中，群速色散在一個大波長範圍內可以降低到很小的值^[5]。雖然到目前為止，所製造出來的光子晶體光纖只到到七百毫微米波長附近具有接近零的群速色散，但是相信在不久的將來，適當設計的光子晶體光纖在一千五百五十毫微米的通信波段上會有接近零的群速色散。如果有這種色散小而又便宜的光纖，光通信技術將會有巨大的改變。另一個光子晶體光纖擁有的重要特徵，亦即在極大的波長範圍內是單模態傳輸，此現象意涵在光子晶體光纖中控制導波模態的彈性。這個特徵讓我們在不同的應用中有一種新方法來控制光纖的模態。舉個例子來說，以光子晶體光纖來作半導體雷射的尾纖(pigtail)，藉著控制光子晶體光纖的模態分佈，封裝上的耦合效率可以



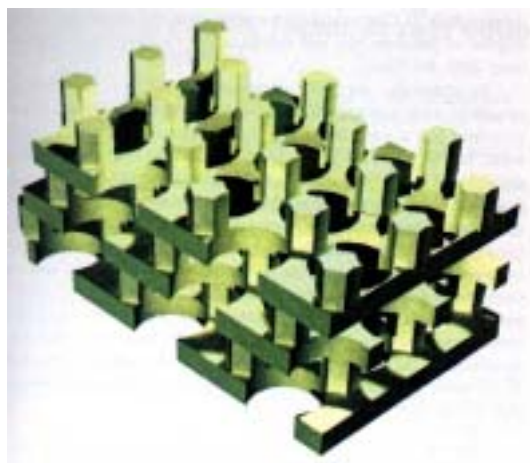
圖四 一個珍珠結構(opal)的例子

大大的改善。所以這種可以控制模態分佈的光子晶體光纖在光電元件設計和製造上是非常有用的。

第二個例子則是彎曲波導，如圖二所示，在積體光學光路中，彎曲損耗是一個關鍵的問題。最近發現在光子晶體波導中，大角度(大於九十度)的轉彎處損耗可以減到極小^[4,5]。雖然這種二維波導還需要改進，但是這個突破已經促成了學術界熱烈的研究討論。這些使我們相信光子晶體的研究發



圖五 砷化鎘棒堆疊的例子



圖六 一個新穎設計三維光子晶體的例子

展一定會為所有光電元件的設計和製造帶來新的

革命。在光子晶體中也發現了許多其他新光電現象，例如控制自發放射(spontaneous emission)及超快光學的特性。

然而，即使有了這些成就，一般相信，光子晶體研究發展仍處於萌芽階段。從基本特性瞭解的立場看，仍有許多問題需要研究，諸如設計與製造完全能隙(full band gap)光子晶體、區域連接度(domain connectivity)的效果、三維光子晶體的設計、製程技術與理論、發光光子晶體中非輻射性躍遷的性質、具吸收特性介電質光子晶體特性、光子晶體中二度與三度非線性光學等。除此之外，到目前為止，所有的光子晶體都以“單原子”晶格結構(類似矽之原子晶格結構)來製做，二元以上之光子化合物(類似砷化鎘、磷砷化鎘鎘等)、光子非晶系(類似非晶系矽)、光子量子結構(類似量子井、量子線、量子點)的發展將增加了控制光訊號的彈性，這些都是尚未開發的園地。再者，光子晶體的動態控制可以讓我們調變適應系統應用上的光訊號。以上皆代表科學與技術上值得研究的新領域。換句話說，光子晶體的實際應用引導了所有光系統的研究機會，這些系統包含了光纖通訊、光顯示、光學儲存以及生醫光電。以光子晶體為基礎，可以預見這些應用將會有很大的進展。

四、光子晶體的數值模擬

理論上，雖然週期性的結構如光子晶體結構具有眾所週知的波傳播特性，但仍有很多性質需要去探索，或經由更進一步的理論來解釋。例如一個被稱為“永久單一模態的光子晶體光纖”已經提出了，在這種光纖中即使在很短的波長下仍然只有單一模態。這個罕見的特性可以用等效折射率來解

釋，而且已經用數值分析來證實。此外，在具有二維週期性結構 有限高度及單條直線形瑕疵的光子晶體薄板中，經由線性波導的研究，理論上發現在純二維結構下(即無限高度)，單一波導模態可能不存在。因此，光子晶體的理論研究可以提供對於各種結構本質特性的瞭解以及相關元件的設計資訊。就像在文獻中常看到的，許多研究光子晶體的團體，除了做實驗外也花了相當多的努力於發展研究光子晶體用的數值理論工具以及各種結構上新特性的理論。這些團體有美國的麻省理工學院、加州理工學院及歐洲日本的研究群。尤其，光子晶體實驗中，製作一個結構所需經費相當大，時間相當久，實驗前的數值模擬以求最優設計極為重要。

五、結語

本文介紹了光子晶體的基本觀念及結構，在光子晶體中，我們可以發現許多新穎光電現象，開發新元件應用，不管是針對基礎研究或實際應用，我們都需要尋求新的製程技術來製作新的光子晶體結構和高品質元件。光子晶體的研究是世界科技發展的焦點，既然臺灣特別善於製造光電元件和零組件，為了能在二十一世紀的高科技市場中競爭，光子晶體實為臺灣光電界急需發展的科學與技術。

參考資料

- [1] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987).
- [2] S. John, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987).
- [3] O. J. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, *Science*, **284**, 1819 (1999).
- [4] E. Chow, S. Y. Lin, S. G. Johnson, P. R.

- Cilleneuve, J. D. Joannopoulos, J. R. Wendt, G. A. Vawter, W. Zubrzycki, H. Hou, and A. Alleman, *Nature*, **407**, 983 (2000).
- [5] M. Loncar, T. Doll, J. Vuckovic, and A. Scherer, *J. Lightwave Tech.* **18**, 1402 (2000).
- [6] J. C. knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. St. J. Russell, *Science*, **282**, 1476 (1998).
- [7] A. Blanco, E. Chomski, S. Grabtchak, M. Isisate, S. John, S. W. Leonard, C. Lopez, F. Meseguer, H. Miguez, J. P. Mondia, G. A. Ozin, O. Toader, and H. M. van Driel, *Nature*, **405**, 437 (2000).
- [8] S. Kawakami, *Electron. Lett.* **33**, 1260 (1997).
- [9] U. Gruning, V. Lehmann, S. Ottow, and K. Busch, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 747 (1996).
- [10] S. Noda, N. Yamamoto, M. Imada, H. Kobayashi, and M. Okano, *J. Lightwave Tech.* **17**, 1948 (1999).
- [11] C. De Angelis, F. Gringoli, M. Midrio, D. Modotto, J. S. Aitchison, and G. F. Nalesso, *J. Opt. Soc. Am. B*, **18**, 348 (2001).
- [12] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 3490 (2000).