

光子晶體在光通訊之應用技術

張乃元

工研院工業材料研究所

微感測器實驗室 研究員

摘要

光子晶體(Photonic Crystals)在最近數年受到全世界產學研界廣泛的注目，重視的原因在於光子晶體提供光線傳輸一個全新的平臺(Platform)。以光子晶體製作的光子元件(Photonic Devices)可能應用於高速的光驅動開關、高輸出效率發光二極體、低功率雷射(Microlaser)等，取代現有的光電元件，進而實現高速Optical Computing的夢想，引導人類社會中凡與通訊、資訊及能源相關領域的生活，進入高速、寬頻、低能源消耗的新時代。

關鍵詞

光子晶體(Photonic Crystals)、光通訊(Optical Communication)、光子能隙(Photonic Bandgap)、光波導(Optical Waveguide)

簡介

當一束光在介質中傳播，可能遇到規則與不規則之相異介質介面，其中，規則介面像反射鏡、光柵與透鏡，而不規則介面如毛玻璃等。這些光傳播的物理現象主要可分成穿透、吸收、散射與反射，其基本原理為反射、折射、繞射與干涉。對於光在介質表現取決於材料表面與內部結構，

由材料表面與內部結構之細微，與分子結構之形狀，造成光的傳播物理現象，而其中的物理理論可由光電子原理解釋，解釋光強度分佈與傳播方向和物質細微結構尺度與折射率有著密不可分的關係。

所以光電子領域中藉由物質改變光的行為，而達到對光的應用，如在液晶顯示器、發光二極體、光纖通訊等。大部分的這些特性都是藉由改變

物質分子尺度內分子結構來達成。但光波在物質中的電磁特性，也可以藉由在波長尺度上特定的分子結構加以改變。在1987年，由UCLA大學的E. Yablonovitch和S. John首先指出，如果我們在電磁波中製造出具有其波長尺度下形成週期性排列的介質，則電子的物質波與原子晶格的大小成類比，電磁波在此巨觀排列的行為將有如電子在晶體中般，彼此排列週期、空間結構和介質的介電常數來控制，毋須改變物質的內在化學結構，我們可以在電磁波的波長尺度下設計並製造出我們想要的光的特性，在光波尺度下，這種新的人工晶體被叫做光子晶體(Photonic Crystals)。相對於電子在半導體晶體的特性，在這種光子晶體中，我們也可以製造出一種光子的能隙(Photonic Bandgap)，使具有特性波長的光子無法在此晶體中傳播，形成一種光子的絕緣體。目前，電子工業因為速度與容量關係，愈來愈需要使用光波器件，這種光子晶體在製造光波元件上可能有很大的應用範圍，因此被視為是相當嶄新且重要的新一代光電材料。

光子晶體在最近數年受到全世界產學研界廣泛的注目，重視的原因在於光子晶體提供光線傳輸一個全新的平臺(Platform)。目前在國外，有超過500多個研發單位投入在此種晶體的理論與製造上（詳見網頁：<http://www.neci.nj.nec.com/homepages/v>

[vlasov/photonic.html](http://www.neci.nj.nec.com/homepages/vlasov/photonic.html)），其中比較有名的如美國麻省理工學院Dr. John d. Joannopoulos的實驗室、日本Kyoto大學Dr. S. Noda的實驗室等。這些研究單位以光子晶體製作的光子元件可能應用於高速的光驅動開關、高輸出效率發光二極體、低功率微雷射(Microlaser)等，取代現有的光電元件，進而實現高速Optical Computing與All Optical Network的夢想，引導人類社會中凡與通訊、資訊及能源相關領域的生活進入高速、寬頻、低能源消耗的新時代。

很令人訝異的是，這些潛在的應用都建立在一個觀念上相當簡單的結構為基底的共通材料技術上。光子晶體藉由週期性的結構“設計”影響光子的行為，極為類似半導體晶體之於電子的方式。整個觀念的核心在於產生一個光子的“能隙”(PBG)，在此能隙範圍內所屬的光線頻率不存在(i.e., Forbidden to Exist)於此光子晶體內，且此光子能隙受到光子晶體內週期性結構排列方式而異。

和半導體不同的是，在半導體材料中原子藉由存在於原子間的作用力而自然地週期性排列形成單結晶晶體；光子晶體卻必須透過合成的方式以人為製作。製作具有週期性排列的光子晶體無疑是一項技術難度相當高的挑戰，原因在於光子晶體內之“格子常數”(Lattice Constant)必須與入射光之波長相近，對多數光通訊系統而

言，這代表光子晶體內之“格子常數”的尺寸約在1微米左右。這個尺寸約比一般半導體結晶材料之格子常數大約2000倍，而僅是人類頭髮直徑的百分之一程度，在製作技術上仍存在相當的困難度。一般而言，光子晶體是由不同介電常數的材料所構成，例如將含有約微米尺寸之空氣以週期性排列於光折射率(Refractive Index)相異之基材中時，即製成所謂的Inverse Opal光子晶體；當基材之折射率與空氣之差異足夠大時，在光子晶體中就會形成所謂的光子能隙。光子晶體即為介電基材中存在適當比例（即空氣與基材之體積比值）的空氣填充週期性排列之光能隙材料。

光子晶體的基本架構為在1-D、2-D或3-D上具有週期性排列的介質所組成，其中1-D的架構即是一般所謂的光學多層膜，它被廣泛用在光學鏡片上，由週期排列的多層介質膜造成1-D的光子能隙，使某些波段的光子無法穿越，達成高效率的反射。具有2-D與3-D的週期性排列結構則是目前最受到重視的光子晶體，其可能的應用範圍很多，如光子的共振器，這種東西是藉由在光子晶體製造一瑕疵點，因為某些波段的光無法穿越此光子絕緣體晶體，因此這些光子將被限制在此瑕疵點中，形成一高能量密度的共振場，若此瑕疵點有Population Inversion的特性，則一理想具零臨界電壓的雷射可被製造出來。除在光子晶

體製造一瑕疵點外，也可以製造瑕疵線，使光僅能在此線上傳播，達成光學導波的效果，這可能是光子晶體目前最重要應用了。

因為在光電子元件中，我們大都需要藉光學波導將光束縛在一狹小區域，使之不散開以便進行調變，但一般傳統的光學波導是製造一具較高折射率的區域，利用其與較低折射率介質間形成的全反射，而將光侷限在高折射率介質中，因此光的能量傳遞、色散效應、可彎曲程度等皆受到限制。

相對於此全反射式波導，光在具有光子能隙的結構中，光場以各不同的入射角度進入而無法傳遞出去，若在此能隙結構中製造一通道，則光波將被強迫在此通道中前進。有別於傳統之光學波導須受限於在高折射率的介質中傳播，這種波導可以在折射率低如空氣的環境下傳播，也可以在90°大轉彎的光學波導中轉彎，而僅有非常少的能量損失，這種光學元件因為對波長具有選擇性，因此也可以用在光通訊中將特性波長的光子取出並轉向，作為通訊中一種的濾波器件(Channel-drop Filter)。此種在光子能隙中新的導波行為有很多很重要的應用，尤其在以光子晶體取代光纖作為光通訊通路上與積體光學器件上，更是具有非常大的商業價值。

故本篇文章將介紹光子晶體以積體光學（光學波導）與LED之形式應

用於光通訊之技術。

一、光子晶體在積體光學（光學波導）之應用

積體光學在二、三十年前就受到大家的重視，它的基本構想是希望引進積體電路的技術與經驗，將一般光學元件整合在一基材上，利用光子取代電子作為訊號的傳遞。因為光子比電子具有更快的速度與更大的頻寬，因此對目前幾達極限的積體電路而言，積體光學會有更好的表現。

但近十幾年對積體光學元件的發展，並不如想像般的順利，目前以積體光學技術所製造的商品，大多為一些比較簡單的電光、聲光調變器、光分離器、分工/解分工器等，距離全光式、多元件的積體光學器件仍有一段遙遠距離。究其原因，很大一部份出現在光學波導的限制上，傳統積體光學波導的製程是以利用擴散、鍍膜、蝕刻等技術在基材上，製造一較高折射率波導，利用其與基材間的全反射進行導光。因為此波導區與基材的折射率差一般很小($Dn=0.1\sim0.001$)，這種波導對光的束縛能力相對很微弱，因此，即使在僅有 5° 的彎曲下，一般光場也會有超過一半的輻射損失。光波難以彎曲，意味著光學元件積體化的困難。

為了解決這個問題，有各式各樣的波導模型與模擬被提出，但在實驗

上，以傳統方法為主體的光學波導仍難以達成 10° 以上的彎曲，要進行 90° 的彎曲更為不可能的事情。

但近年來對光子晶體的研究與發展，出現了一個新的解決辦法，如前節對光子能隙波導的特性所述，在光能隙材料中，光場若以各不同的入射角度進入皆無法傳遞出去，因此可以一瑕疵通道作為波導，光場僅能在此通道波導中前進，因此可進行大角度的彎曲，這種波導在積體化光學元件中是非常重要的，可以大量減少體積，達成輕、薄、短、小的要求。Dr. R. F. Cregan等前幾年在Science上提出，一種以光子晶體取代光纖作為光通訊通路受到大家的重視，他們所提出的作法是將一堆外徑為1mm的玻璃柱綁在一起，在中間留下一些空白作為空氣通道，將此捆玻璃柱放入一光纖拉引機中加熱拉長，而形成週期性玻璃-空氣結構的光能隙材料與中間區域的空氣通道。傳統的光纖是由較高折射率與低折射率間介面的全反射而形成波導，在這樣的波導中，光的傳遞功率與資訊數量受到介質對能量的忍受力與色散效應所限制。

而在圖一的光子能隙光纖中，具有1-D週期性排列的介質結構，會形成一種新的光子能隙，相對於此，能隙的光波波長無法在其中進行傳播，如在此材料中有一空氣通道，雖然空氣具有最低的折射率，但光在此空氣通道中傳播，遇到光子能隙時無法穿越

而被反射回來，其原理如同電子之於原子晶格的布拉格反射(Bragg Reflection)，因此光子的傳播被受限於此空氣通道中，因為是以空氣為傳播介質，其光的傳遞功率大幅提高、沒有傳遞損失且無色散效應的問題，是最為理想用以導光的波導。

這種導光特性同樣也可應用在一般的平面形波導上，尤其在積體光學元件所需的高密度微細波導中，本計畫的目的即為結合此種光子能隙結構與積體光學技術，製作並分析光子能隙波導，期能達成對積體光學元件輕、薄、短、小的積體化要求。

光子晶體對某些波長的光源會有反射的現象，但是當晶體內有晶格缺陷時，這些照射在缺陷上，原本應該被反射的光，便會延著晶格缺陷向晶體內部傳導。傳統的光學將此一現象稱之為「波導」。以傳統積體光學所製作之波導，其彎曲的角度通常不會大於 1° ，如此在波導中運行的光才不致離開波導，使光子能量侷限於波導之中。然而，光子晶體中缺陷所產生的波導，其彎曲的角度甚至可達 120° 以上，也不致使光有太大的喪失。其製

作出的元件尺寸(數十到數千微米)，又遠小於傳統積體光學元件的大小(數公分)，有許多應用上的研究皆朝向波導，即光通訊的應用上發展。因此，光子晶體可被視為下一代光通訊被動元件的基本技術。

二、光子晶體LED之應用

除此之外，傳統發光二極體所產生的光以四面八方向空間放射，有許多能量因未能直接放射至元件所需放射的方向，使得光在元件內多次反射後，被材料本身吸收，導致元件發光效率降低。將元件本身以光子晶體方式包圍，由於光子晶體可使光子沿著晶體缺陷傳播，因此只要設計好光子晶體中缺陷的位置與傳播方向，如此LED所發出的光能量便沿著設計好的晶格向外放射，可大量提升其發光效率。

目前以電子束微影技術製作光子晶體結構的研究，一類是以波導為目標，可分為片狀波導與自我複製法波導。此外，發光二極體(LED)也可應用此技術製作光子晶體結構，以達到提昇發光效率的目的。以下分述這些技術的發展現況。

1. 二維光子晶體片狀波導(Two-dimensional Photonic Crystal Slab Waveguides)

在 Nature, vol. 407, p. 983, 2000文獻中，美國Sandia National Laboratories



▲圖一 光子晶體光纖

(Albuquerque)的研究群發表此一結構。他們以GaAs基板證明了光子晶體能隙可以二維的結構表現，**圖二**為其結構圖。波長為1550nm的紅外光射入其GaAs導光層中，其上下分別為空氣與AlGaAs。由於GaAs的折射指數大於空氣與AlGaAs，因此可作為片狀導光層之用。

由其計算結果顯示，此一結構的TE Mode具有光子晶體能隙，而TM Mode則沒有光子晶體能隙。量測結果中即發現TE Mode的光波無法通過光波導，但TM Mode的光波可以通過光波導，因此證明光子晶體片狀波導可以GaAs材料實現。

由於此一文章的發表，爾後又陸續有許多論文以計算或實驗的方式驗證二維光子晶體片狀波導的特殊效果。讀者可以Photonic Crystal Slab Waveguide的關鍵字搜尋，便可得到相關資料。

除了孔洞的結構（**圖三(a)**）外，還可以柱狀結構（**圖三(b)**）形成光子晶體，**圖三**為中央大學材料所以GaAs製作之二維光子晶體結構。

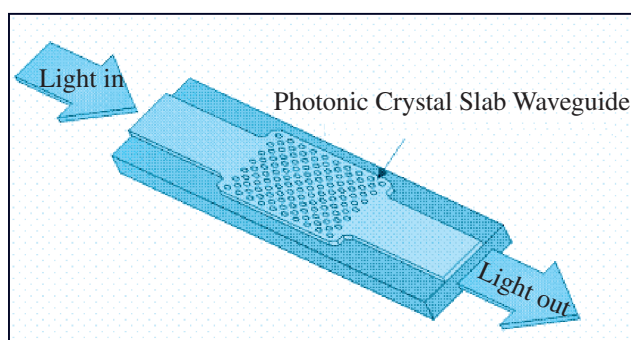
2.以光子晶體結構增加發光二極體的發光亮度

由於LED的發光沒有方向性，但在應用上時常只需其中一個方向的光。因此，設法讓射往其他方向的光都朝同一方向射出，便是LED發光效率提昇的方式之一。LED的材料通常是成長於某種基板上，可視為在基板

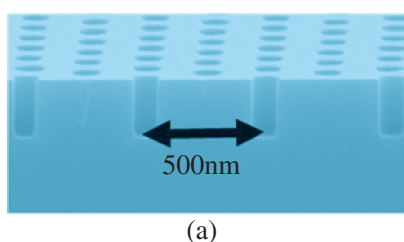
上的一平面波導。在此平面波導上加入二維光子晶體的孔洞狀結構，可使得侷限於LED中的光不再向波導的方向發射，如此增加了向波導正上方發射的機會，提昇了LED的發光效率。

在文獻Appl. Phys. Lett. ol.75, p. 1.36, 1999中報導，要達到這樣的效果，其光子晶體的晶格常數約為波長的0.55倍(600~960nm)，其波導的厚度約為波長的0.25倍(420nm)。此文獻將光子晶體的原理應用於InGaAs材料的LED上，其中心發光波長為1500nm。

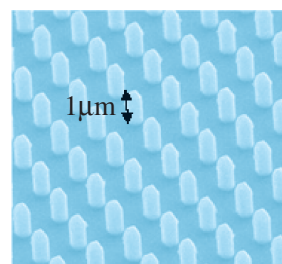
圖四為此文獻所用之光子晶體結構



▲圖二 2-D光子晶體片狀波導的示意圖



(a)



(b)

▲圖三 以GaAs為基材之(a)孔洞、(b)柱狀光子晶體結構 (國立中央大學電機系詹益仁教授提供，<http://newton.cc.ncu.edu.tw/~trich/NCUPCR/NCUPCR.htm>)

(但尺寸比此文獻來得小，可用於較短的波長)。若要將光子晶體的原理應用於增強藍光氮化鎵(GaN)LED的發光效率，其發光波長若為410nm，則晶格常數為226nm，波導的厚度則為103nm。這樣尺寸的圖樣適合用E-Beam Writer製作，然而這樣的結構只能使垂直於樣品表面極化的光產生作用，另一極化方向的光則不受光子晶體的影響。因此，效率提昇的效果有限。

最近，雖然 2-D之光子晶體被大量地研究，但若要用於製作光通訊的被動元件，仍須克服幾個問題。首先，由於2-D光子晶體的光侷限能力有限，光喪失的問題仍然嚴重。此問題也許得用3-D光子晶體方可解決，但目前3-D光子晶體的製程仍然十分繁複。因此，為將光子晶體實際應用於光通訊上，須解決2-D光子晶體光喪失的問題，或解決3-D光子晶體製程困難的問題。另外，目前光子晶體之研究仍然以被動元件為主，如：波長分工器等。其他光通訊常用之可調式的被動

元件，如：調制器、可變式衰減器或切換器等元件，仍然有待世界的研究團隊努力開發。

由於傳統光纖的光場尺寸為6~8微米，而光子晶體中運行於晶格缺陷之光場約為數百奈米，在光纖與光子晶體間的界面，低的光耦合率是目前所面臨到的困難，此方面將會在光通訊領域有很大的研究空間。

參考文獻

1. "NSF unveils plans for sex new nano research centers", Materials Today, vol.4, no. 6, 2001, p. 17.
2. 李世光、孫美芳 "初探我國發展微機電系統與奈米技術新興科技的人才培育與發展策略" 科技發展政策報導, SR9011, p. 845, 2001。
3. <http://cnst.nctu.edu.tw>
4. <http://www.ncku.edu.tw/%7Ecnckumems/>
5. <http://www.ee.ucla.edu/faculty/Yablonovitch.html>
6. <http://home.earthlink.net/~jpdowling/pbgbib.html>
7. S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M. Sigalas, W. Zubrzycki, S. R. Kurtz, Jim Bur, "A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths," Nature, vol. 394, p. 251, 1998.
8. V. N. Bogomolov, S. V. Gaponenko, I. N. Germanenko, A. M. Kapitonov, and E. P. Petrov, B. I. Stepanov, N. V. Gaponenko, A. V. Prokofiev, A. N. Ponyavina and N. I. Silvanovich, S. M. Samoilovich, M. V. Lomonosov, "Photonic band gap phenomenon and optical properties of artificial opals," Phy. Rev. E vol. 55, p. 7619, 1997.
9. Francois Bresson, Chii-Chang Chen, Gou-Chung Chi, Yu-Wen Chen, "Inclusion of defects in opal-like photonic crystals layers with a stop-band in the visible range", submitted to Synthetic Metals.
10. Alexei A. Erchak, Daniel J. Ripin, Shanhui Fan, Peter Rakich, John D. Joannopoulos, Erch P. Ippen, Gale S. Petrich, Lesile A. Kolodziejski, "Enhanced coupling to vertical radiation using a two-dimensional photonic crystal in a semiconductor light-emitting diode," Appl. Phys. Lett. vol. 78, p. 563, 2001.
11. M. R. Wang, H. Su, "Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication," Appl. Opt. vol. 37, p. 7568, 1998.
12. 圖片源於中央大學微光電實驗室。
13. <http://www.ee.princeton.edu/people/Chou.php>
14. Peigem Ni, Bingying Cheng, Daozhong Zhang, "Inverse opal with an ultraviolet photonic gap," Appl. Phys. Lett. vol. 80, p. 1879, 2002.

▼圖四 光子
晶體LED結構

