

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

光纖通訊應用光電元件製作及數值模擬—子計畫二：

特殊光波導的研究

Research on Special-Type Optical Waveguides

計畫編號：NSC 90-2215-E-002-028

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：張宏鈞 台灣大學電機系、光電所暨電信所教授

計畫參與人員：于欽平(台大電信所) 李進發(台大電信所)

陳鴻仁(台大光電所)

一、中文摘要

本計畫以全向量有限差分法分析研究具有一個週期缺陷的空氣孔洞光子晶體光纖的模場以及色散特性，另以先前發展的引進不均勻元素的三維全向量有限元素法數值模型，精準計算以多重量子井為導波層的條載式通道半導體光波導的各項模態特性。

關鍵詞：光波導、光子晶體光纖、多重量子井光波導、有限差分法、有限元素法

Abstract

In this research we study modal and dispersion characteristics of air-hole photonic crystal fibers formed through the introduction of a one-period defect using a full-vectorial finite difference method numerical model. On the other hand, by employing an efficient and highly accurate three-dimensional full-vectorial finite element numerical model we have established by introducing the technique involving inhomogeneous elements, we accurately calculate various modal properties of strip-loading semiconductor waveguides using multiple-quantum well layers as the guiding region.

Keywords: Optical waveguides, Photonic crystal fibers, Multiple-quantum-well (MQW) optical waveguides, Finite difference method, Finite element method

二、計畫緣由與目的

本計畫利用我們已建立的有限差分法與有限元素法理論分析模型研究兩類特殊結構的光波導，研究項目之一為以全向量有限差分法模態分析模型研究新近被提出的光子晶體光纖的模態及色散特性，研究項目之二為以有限元素法準確分析以多重量子井為導波層的條載式通道半導體光波導。我們所發展的三維全向量有限元素法數值模型，結合我們提出的加入不均勻元素的技術，可處理介質波導在介質介面尖角奇點的場量分布，因而可求得高精準的有效折射率[1]。

自從 E. Yablonovitch 於 1987 年提出光子能隙結構或光子晶體的概念之後，相關的理論以及實驗研究工作一直持續至今。其主要的觀念是空間中介質折射率的週期性結構使得光波形成特定無法在結構中傳播的頻帶，因而可以有許多光電技術上的應用。光子晶體光纖可視為一種二維的光子晶體結構，它是光子晶體這一領域的一項研究成果，雖然它的導波並不完全基於光子能隙的原理，而仍可用一般介質波導經由全反射方式導波的原理加以解釋。光子晶體光纖最早由英國 University of Bath 的 T. A. Birks 及 P. St. J. Russell 等人所研製[2]，圖一所示為一典型的光子晶體光纖截面構造圖，可以看成石英柱中埋有在二維平面週期排列的柱形空氣孔洞，圖中的小圈代表空氣區域，而中心部位缺少一個空氣孔洞可以看成是二維週期結構的一個缺陷，構成導波區域，或是等效的纖芯，而

纖芯外的孔洞區域則是等效的纖殼。由於孔洞區域因空氣的折射率較石英小，其等效折射率較纖芯區域為小，故有等效全反射的效果[3]。更有趣的是纖殼區域的等效折射率隨波長減小而增大，使得光纖得以在很寬的波長範圍內維持單模態的特性[4]，或是大直徑的纖芯仍可設計成單模態光纖。另外，光子晶體光纖由於波導色散(waveguide dispersion)甚大，使得其色散行為與普通光纖甚為不同，因而在色散補償及非線性光學有其特殊應用。

光子晶體光纖結構以電磁導波邊界值問題的觀點看，較傳統光纖複雜許多，其空氣孔洞的大小以及幾何排列的改變均有可能影響導波及色散特性，因之以準確的電磁方法分析其導波模態特性在設計上或深入研究其各項特性的工作上相當重要的。在本研究中，我們採用全向量有限差分法模型以求解向量模態。

在光波導的問題中，介質不連續及尖角不連續的處理對於數值解的準確度影響甚大。最近我們建立了一項有效的方法[1]，在有限元素法模式中引入非均勻元素，以一個非均勻元素處理不同介質的介面，發現只要介面上的不均勻元素取得夠細，數值準確度即可提高，等效的減少了總分割數，或是計算矩陣的大小。我們應用此一方法於矩形介質波導以及脊形波導的精確分析，在這些波導的直角不連續採用不均勻元素，並與文獻上的其他數值結果比較，證明本方法的有效性。利用此有限元素法，我們得以非常精準的計算條載式通道多重量子井半導體光波導的全向量模態，包括 TE 及 TM 模，並瞭解層狀結構中以及尖角奇點附近的場分布及其數值效應，也可精準地預測其雙折性。

三、結果與討論

首先探討光子晶體光纖的模態特性，如圖二所示，直徑為 d 的小圈代表空氣孔洞， Λ 為相鄰空氣孔洞中心間的距離，圖二中的等位線代表以我們的有限差分模型所計算出的 x 極化基模態的模場分布，所用參數數值為 $\Lambda=2.3$ 微米， $d=0.6$ 微米，波長 $\lambda=0.6328$ 微米，中心部位缺少一個空氣

孔洞的區域可視為等效的纖芯半徑約為 $\Lambda/2=2.3$ 微米。圖二顯示模場分布被有效地限制於纖芯區域內，而較小的空氣孔洞較能形成單模態波導，圖三為在 $d/\Lambda=0.3$ 時所算出的模態係數(即有效折射率)隨 Λ/λ 的變化情形。雖然實際上圖三中應有兩條曲線分別代表極化互相垂直的兩個模態，因極為相近無法區別，此光纖可視為單模光纖，且其單模特性呈現在極為寬廣的頻率範圍，此與[4]中的實驗結果吻合。我們的計算結果顯示當空氣孔洞變大，例如 $d/\Lambda=0.5$ 時，高次模態將會出現，而由於纖殼區域的等效折射率下降，形成導波較強的波導，基模態的模場也更集中於纖芯中。

我們亦計算光子晶體光纖的色散係數(ps/nm-km)，它與模態傳播常數的一次及二次微分有關，精準的求取傳播常數是相當重要的。我們考慮石英材料的材料色散，採用四項 Sellmeier 公式，在 $\Lambda=2.3$ 微米時，不同空氣孔洞直徑所對應的色散係數曲線示於圖四，顯示改變 d 可移動零色散點所在的波長。在 $d=0.621$ 微米與 $\lambda=0.813$ 微米時，我們所算出的色散係數為 -74.5 ps/nm-km，其曲線斜率為 0.472 ps/nm-km/nm，與[5]之實驗結果，色散係數為 -77.7 ps/nm-km，斜率為 0.464 ps/nm-km/nm 相當接近，顯示我們的模型的可靠度。更多的計算結果請參[6]與[7]。

在以有限元素法準確分析以多重量子井為導波層的條載式通道半導體光波導方面，我們所發展的全向量有限元素法係採用 Hx-Hy 法或 Ex-Ey 法，引入 Ez 及 Hz 連續的限制，使用八點矩形元素，並可呈現波導尖角附近電場分布及其奇點特性[1]，[8]。考慮如圖五所示的波導，設 $W=3$ 微米， $H=1$ 微米，多重量子井區域有三個 10 毫米厚的量子井(GaAs, $n=3.609$)，由 5 毫米厚的 $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 層($n=3.459$)隔開，波導殼層為 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ ($n=3.299$)，以 Hx-Hy 法與 Ex-Ey 法所獲得的基模態有效折射率分別為 3.345966 與 3.345969 ，極為吻合[9]。圖六繪出基模態的 x 與 y 方向電場分量的分布等位線，尖角附近的場型亦能準確呈現。其次考慮另一波導，設 $W=3$ 微米， $H=2.1$ 微米， $D=0.2$ 微米，多重量子井區域有 70 個 4 毫米厚的 InGaAs 量子井

($n=3.4636$)，由 10 毫米厚的 InP 層 ($n=3.17174$) 隔開，多重量子井總厚度為 980 毫米，操作波長為 1.52 微米。我們研究整個多重量子井區域以同厚度的等效均勻材質代替時，所計算基模態傳播常數的誤差，其隨著多重量子井週期數的變化情形示於圖七(多重量子井總厚度固定在 980 毫米)，顯示當週期數大於 30 時，誤差呈遞減現象，因此當多重量子井週期數夠大時，等效均勻材質層的近似較能適用。

四、計畫成果自評

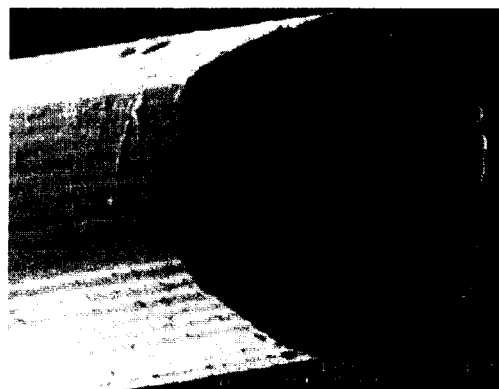
本計畫研究內容與原計畫相符，在獲得補助三位研究生的人力之下，相關預期目標大致達成。我們展示分析光波導領域常用的全向量有限差分法可以有效用來分析研究光子晶體光纖的模場以及色散特性。而以我們所發展的引進不均勻元素的三維全向量有限元素法數值模型，仔細分析以多重量子井為導波層的條載式通道半導體光波導，提供極高準確度的模態特性，甚具學術價值。

五、參考文獻

- [1] D. U. Li and H. C. Chang, "An efficient full-vectorial finite-element modal analysis of dielectric waveguides incorporating inhomogeneous elements across dielectric discontinuities," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, pp. 1251–1261, 2000.
- [2] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.*, vol. 21, pp. 1547–1549, 1996.
- [3] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and J.-P. de Sandro, "Properties of photonic crystal fiber and the effective index model," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 15, pp. 748–752, 1998.
- [4] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 961–963, 1997.
- [5] M. J. Gander, R. McBride, J. D. C. Jones, D. Mogilevtsev, T. A. Birks, J. C. Knight,

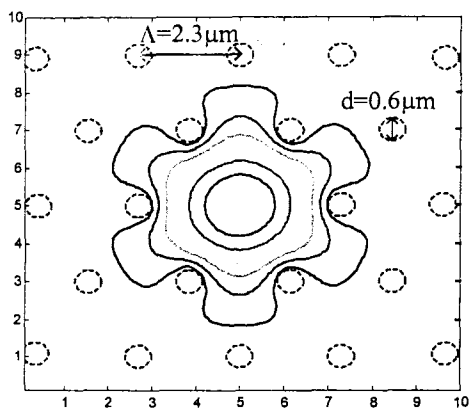
- and P. St. J. Russel, "Experimental measurement of group velocity dispersion in photonic crystal fibers," *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 63–65, 1999.
- [6] C. P. Yu and H. C. Chang, "Finite difference modal analysis of photonic crystal fibers," *Proc. Optics and Photonics Taiwan '01 (OPT '01)*, vol. I, pp. 178–180, Kaohsiung, Taiwan, R.O.C., December 13–14, 2001.
- [7] C. P. Yu and H. C. Chang, "Research on photonic crystal fibers using finite difference electromagnetic analysis," *XXVIth General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI) Proceedings CD-ROM*, paper 1197, Maastricht, the Netherlands, August 17–24, 2002.
- [8] D. U. Li and H. C. Chang, "Full-vectorial finite element modal analysis of bounded and unbounded waveguides," *Proc. 2001 Asia-Pacific Microwave Conference*, vol. 1, pp. 376–379, Taipei, Taiwan, R.O.C., December 3–6, 2001.
- [9] H. C. Chang and D. U. Li, "Full-vectorial finite-element analysis of multiple-quantum-well semiconductor waveguides," *2001 Asia-Pacific Radio Science Conference Digest (AP-RASC'01)*, p. 89, Chuo University, Tokyo, Japan, August 1–4, 2001.

六、圖表

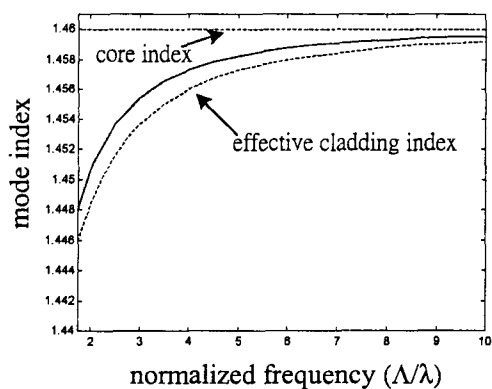


Homepage of the Opoelectronics Group, Department of Physics, University of Bath.

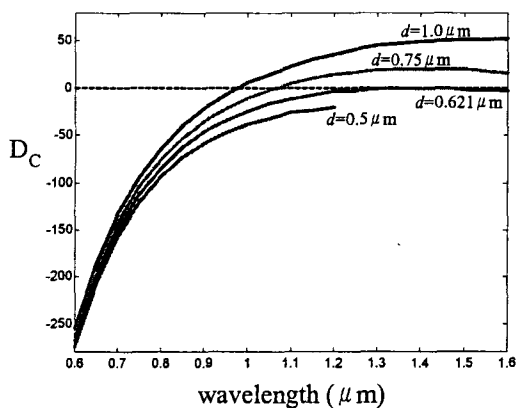
圖一 光子晶體光纖的 SEM 圖。



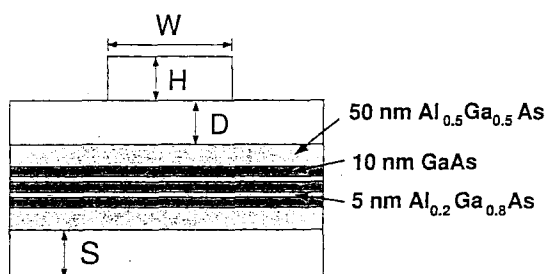
圖二 光子晶體光纖x極化基模態的模場分布。



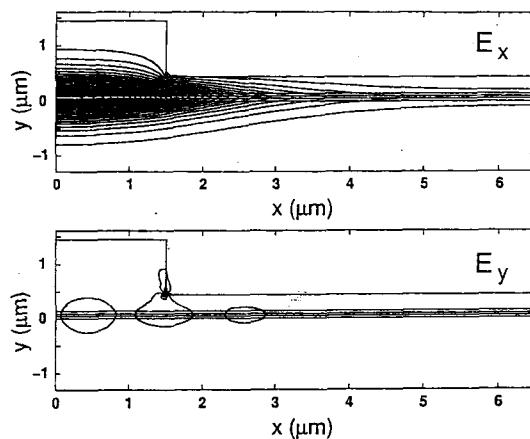
圖四 單模態光子晶體光纖的模態係數(即有效折射率)隨 Λ/λ 的變化圖。



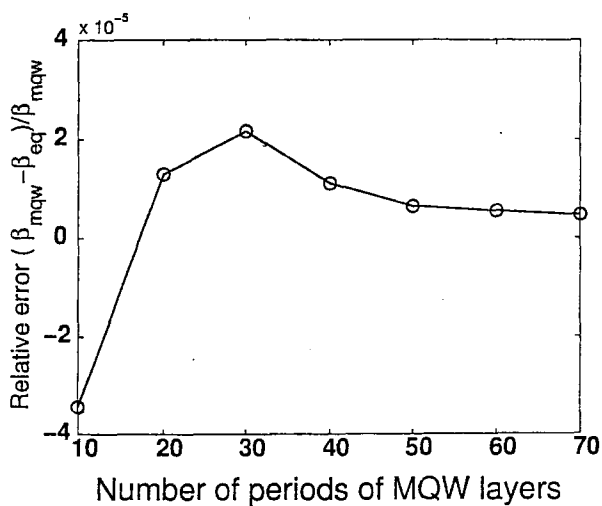
圖四 在 $\Lambda=2.3$ 微米時，不同空氣孔洞直徑的光子晶體光纖所對應的色散係曲線。



圖五 以多重量子井為導波層的條載式通道半導體光波導結構圖。



圖六 圖五之波導基模態的x與y方向電場分量的分布等位線。



圖七 整個多重量子井區域以同厚度的等效均勻材質代替時，所計算基模態傳播常數的誤差隨著多重量子井週期數的變化情形。