

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

適用於光導波元件的有限差分數值模型之發展(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2215-E-002-020-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學光電工程學研究所

計畫主持人：張宏鈞

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 30 日

行政院國家科學委員會特約研究人員專題研究 計畫期中進度報告

適用於光波導元件的有限差分數值模型之發展(2/3)

Development of Finite Difference Numerical Models for Photonic Guided-wave Devices (2/3)

計畫編號：NSC 91-2215-E-002-020

執行期限：91年8月1日至92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) 林邦彥(台大電信所)

吳勁龍(台大電信所) 黃永成(台大電信所)

洪崇庭(台大光電所) 陳銘鋒(台大光電所)

中文摘要

本計畫改良並發展數種應用於研究各種光導波元件的有限差分數值模型，包括全向量有限差分模態分析模型之改良與應用、時域波束傳播法之發展、二維有限差分時域法之發展、以及融燒式光纖耦合器的繼續研究。第二年執行情形，依四項研究課題，分述於本報告。所引參考著作係已完成之期刊論文及研討會論文。

關鍵詞：光波導、波導元件、有限差分法、波束傳播法、時域波束傳播法、時域有限差

分法、光纖耦合器

Abstract

This research concerns improvement and development of several finite difference (FD) numerical models as tools for studying various photonic guided-wave devices, including improvement and applications of our full-vectorial FD waveguide mode solver, development of time-domain beam propagation method (FD-BPM),

development of 2-D finite difference time domain method, and continuous research on fused fiber-optic couplers. The results of four topics of study obtained in the second phase of this research are briefly described respectively in this report.

Keywords: Optical waveguides, waveguide devices, finite difference method, beam propagation method, time-domain beam propagation method, finite difference time domain method, fiber-optic couplers

I. 改良的全向量有限差分模態分析模型之應用：

有限差分法是分析介質波導模態最常用的方法之一，唯對於不同折射率介質接面上的邊界條件之處理方式是影響數值準確度的因素之一。早期的簡化處理方式乃是採用網格間的折射率平均，其準確度僅有 $O(h^0)$ ，其中 h 代表網格寬度，亦即再密的網格也無法增加準確度。如果將邊界條件加以匹配，準確度可增至 $O(h^2)$ 。對於截面折射率為二維的光波導，例如階射率光纖，我們已經由匹配介面邊界條件建立收斂性較佳的全向量模態分析模型，包括磁場分量模型以及電場分量模型，可以採用較粗的網格，因之節省計算時間[1]。我們應用此改良的全向量有限差分模態分析模型於截面形狀為啞鈴形的融燒式耦合光纖之分析，並與我們先前以邊界積分法的分析結果比較。與邊界積分法類似，我們亦採非均勻網格，在尖角附近使用足夠密的網格，所獲得的正規化傳播常數、耦合係數、與形狀雙折性數值，和邊界積分法的分析結果比較，其差異分別為 0.0001%、0.04%、與 3%，此一致性展示本改良的模態分析模型的準確性。我們亦應用本改良分析模型於光子晶體光纖不同極化基模態之簡併特性的研究，結果發表於[2]與[3]。

II. 時域波束傳播法之發展：

通常所用的(頻域)波束傳播法(BPM)僅能處理光波前向傳播的問題，雖然有所謂的雙向 BPM，我們先前也曾提出可利用 Pade approximants 分析光波導不連續的問題，但在使用上尚未具普遍性。因之，遇到有反射或其他散射現象存在的結構，另一可以採用的方法是 FDTD 法。FDTD 法雖是一項有力的技術，但它要求足夠細的網格以及時間步驟，因而是極耗用計算時間的方法。在訊號調制頻率極低於光載波頻率的情況下，時域波束傳播法(TD-BPM)是最近被提出的一項有效的方法，主要是在時間軸上提出光載波頻率項而僅分析緩慢變化的脈波波形，因之得以採用較大的時間步驟。從上年度，我們著手建立 TE 波的時域二維 BPM[4]，在本年度中進行更多數值實例的分析與探究。圖(一)為所考慮的板形介質波導九十度轉折且有四十五度切角之一例，所用參數為波導寬度 $d = 3 \mu\text{m}$ ，基座折射率 $n_1 = 1.0$ ，導波層折射率 $n_2 = 1.5$ ，以導波模態之高斯脈衝由左

側入射所獲得之不同瞬間之脈衝場分布示於圖中。我們在這項研究的一個心得是 TD-BPM 仍需足夠細的網格方能獲致收斂的數值結果，因此直接採用 FDTD 法或許是較為實用的方式。

III. 二維有限差分時域法之發展：

我們先前在非線性光波導光柵的研究工作中，已建立了一維 FDTD 法模型，適用於分析非線性週期結構或不均勻光柵中的脈衝傳播反射透射問題。在本年度中我們建立了二維的 FDTD 法模型，其中引入了有效的 PML 吸收邊界，得以研究各種不同的導波元件結構，包括高折射率對比直角波導轉向結構，其計算結果如圖二所示，為電場垂直於紙面而連續波的導波模態由左邊入射的情況，所示曲線為磁場分布圖。

IV. 融燒式 4×4 光纖耦合器的研究：

在本年度中，我們針對四根單模光纖排列所構成的 4×4 融燒式耦合器結構，利用邊界積分法，進行準確的模態分析，計算傳播常數、耦合係數、相關的結構雙折性。根據我們先前對於 2×2 與 3×3 耦合器的研究經驗，發現利用邊界積分法解析時，如果採用均勻邊界分割，需要分割至數千段以上，才能獲得兩位有效數字的結構雙折性數值，計算量相當驚人，因而提出不均勻分割的方法，在邊界形狀的尖點附近，由於場量變化急劇，因此採用較密的分割，其餘部分則採用較疏的分割，得以節省大量的計算時間而仍得到可靠的準確度 [5]。此研究經驗應用於本 4×4 耦合器結構中，如圖三(a)所示，圖三(b)則為計算三維元件響應特性所採用之分段近似示意圖。圖四為輸入光由一根光纖進入，正方形排列四根光纖的輸出光功率隨元件抽拉長度變化的情形。在正方形排列時，元件響應對於極化狀態幾乎沒有差異。

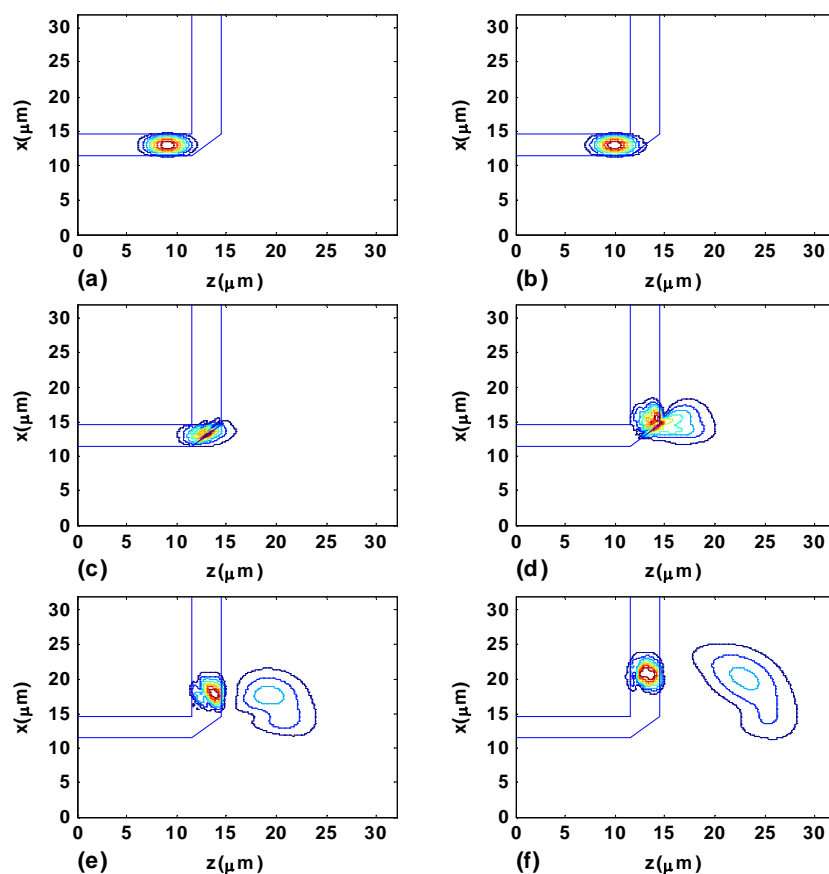
計畫成果自評

本計畫研究內容與原計畫相符，預期目標大致應可達成，將在期末成果報告中詳加自評。

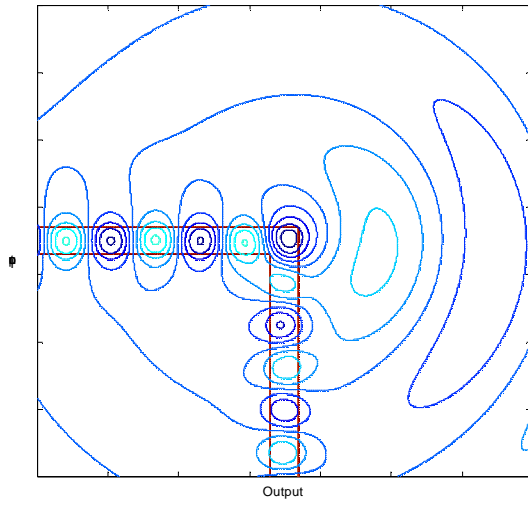
參考文獻

- [1] Y. C. Chiang, Y. P. Chiou, and H. C. Chang, "Improved Full-Vectorial Finite-Difference Mode Solver for Optical Waveguides with Step-Index Profiles," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 20, No. 8, pp. 1609–1618, August 2002.
- [2] Y. C. Chiang and H. C. Chang, "Highly Accurate Analysis of Photonic Crystal Fibers Using an Improved Finite Difference Mode Solver," in *Proceedings of Optics and Photonics Taiwan '02 (OPT '02)*, Vol. III, pp. 198–200, Taipei, Taiwan, R.O.C., December 12–13, 2002.
- [3] C. P. Yu, Y. C. Chiang, and H. C. Chang, "Finite Difference Modal Analysis of Photonic Crystal Fibers," submitted to *IEEE Photonics Technology Letters* for publication.

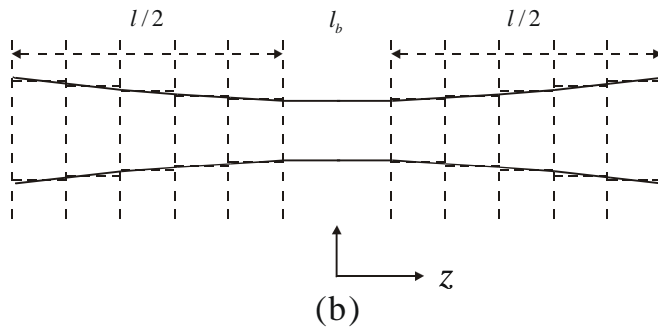
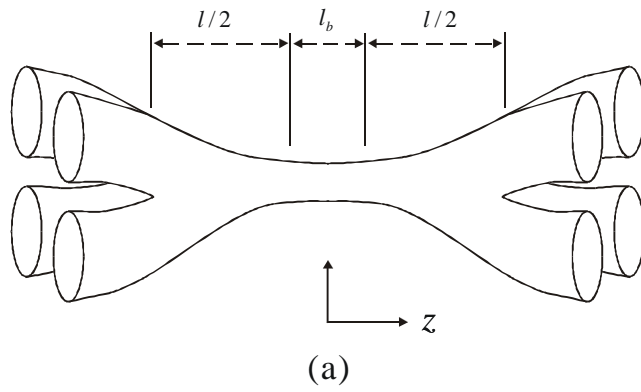
- [4] B. Y. Lin and H. C. Chang, "On the Alternating Directional Implicit Method Applied in the Finite Difference Time Domain Beam Propagation Method," in *Proceedings of Optics and Photonics Taiwan '02 (OPT '02)*, Vol. II, pp. 144–146, Taipei, Taiwan, R.O.C., December 12–13, 2002.
- [5] Y. C. Tsai, B. R. Jiang, and H. C. Chang, "On the Convergence Characteristics of the Modal Analysis of Fused Fiber-Optic Couplers," to be presented at *CLEO/PR 2003*, Taipei, Taiwan, R.O.C., 2003.



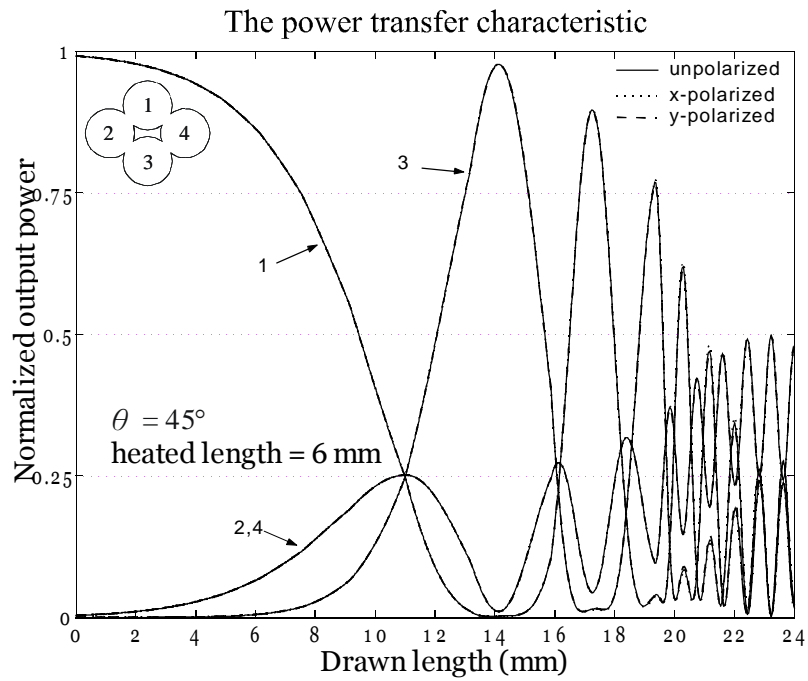
圖(一) 板形介質波導九十度轉折且有四十五度切角之一例，以導波模態之高斯脈衝由左側入射所獲得之不同瞬間之脈衝場圖。(a)–(f)分別為 $t = 0$ fs, 5 fs, 20 fs, 35 fs, 50 fs, 與 65 fs 的計算結果。



圖(二) 電場垂直於紙面而連續波的導波模態由左邊入射於高折射率對比直角波導轉向結構的FDTD計算結果，所示曲線為磁場分布圖。



圖(三) (a) 4×4 融燒式光纖耦合器結構。(b) 計算三維元件響應特性所採用之分段近似示意圖。



圖(四) 輸入光由一根光纖進入，正方形排列四根光纖的輸出光功率隨元件抽拉長度變化的情形。在正方形排列時，元件響應對於極化狀態幾乎沒有差異。