

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※
 ※
 ※ 新型光電材料、元件及雷射光源(二)—子計畫二： ※
 ※ 半導體光波導傳播特性之研究(VI) ※
 ※
 ※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

執行期間： 88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

計畫主持人：張宏鈞教授

- ☐赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

中 華 民 國 八 十 九 年 十 月 三 十 一 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
新型光電材料、元件及雷射光源(二)—子計畫二：
半導體光波導傳播特性之研究(VI)

Research on Propagation Characteristics of Semiconductor
Optical Waveguides (VI)

計畫編號：NSC 89-2215-E-002-032

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 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：李岱威(台大電機系) 蔡宙融(台大電信所)

于欽平(台大電信所) 江衍忠(台大電機系)

一、中文摘要

本計畫成功地建立一套有效且精準的三維全向量有限元素法數值模型，引進不均勻元素的技術，處理波導不同介質界面及尖角的邊界條件，達成矩形介質波導及脊狀波導的更準確的模態分析。另外，應用先前提出的改良有限元素法，詳細分析研究各種平面反共振反射光波導的各項特性。

關鍵詞：光波導、半導體波導、波導理論、有限元素法

Abstract

In this research we have established an efficient and highly accurate three-dimensional full-vectorial finite element numerical model by introducing inhomogeneous elements to properly handle the boundary conditions at the interface between different dielectrics and at the corners of the dielectric structure. More accurate modal analysis has been achieved for rectangular dielectric waveguides and ridge waveguides. On the other hand, various properties of different antiresonant reflecting optical waveguide (ARROW) have been investigated in detail using our recently proposed modified finite element method.

Keywords: Optical waveguides, Semiconductor waveguides, Waveguide

theory, Finite element method

二、計畫緣由與目的

利用有限元素法解析介質或光波導至少有二十年以上的歷史[1]，但更佳的法則持續被提出。在光波導的問題中，介質不連續及直角不連續的處理對於數值解的準確度亦影響甚大。在某些情況，例如雙折性很重要，或是波導的極化特性有必要被考慮，如在波導極化控制器[2]中的現象，數值準確度是相當重要的。在本計畫中我們建立了一項有效的方法[3]，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，發現只要界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。

另外，在本計畫中我們應用先前提出的改良有限元素法[4]，詳細分析研究各種平面反共振反射光波導 (antiresonant reflecting optical waveguide, 或稱 ARROW) 的各項特性。ARROW 為一種洩波波導 (leaky waveguide) 的結構，其傳播常數為複數，代表光波沿波導具有功率損耗，它是較新的一種光波導，近年來受到許多注意[5], [6]，它的優點包括有效的單模態傳播、低損耗、較大的模場分佈適於與光纖

連接、容易製造、具有用的極化及波長選擇特性等。通常利用橫向共振法可以尋找洩波模態的複數傳播常數，但由於複數很難尋。為了易於分析及設計更複雜結構的 ARROW，我們已建立了一套有系統的改良的有限元素法分析方法[4]。由於 ARROW 是有用的結構，在本計畫中，我們應用所提出的有限元素法，詳細探討各式不同結構 ARROW 的特性，包括對於極化較不敏感 ARROW-B 結構[6]，以及 ARROW 方向性耦合器。

三、結果與討論

對於折射率為二維分布的介質波導，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，並使用八點矩形元素。應用於矩形介質波導，我們的元素分割示意圖如圖一，跨過介質界面以及直角不連續處的較小的元素即為不均勻元素。在各個不均勻元素內，仔細處理邊界條件，是得以達成數值精準的原因。我們將改變不均勻元素的大小，以檢驗數值準確度的收斂性。首先以圖二所示之正方形波導為數值實例，其折射率對比為 1.5 比 1，元素分割示意圖如圖二(b)，由於對稱性，僅解析其一象限即可。圖三為計算所得之電場以及磁場之 x 及 y 分量的場線圖，圖四為以磁場公式計算所得之基模傳播常數在不同的未知量數目以及不同的不均勻元素寬度下之相對誤差，其中 $N_x=N_y$ 為結點的數目， W_i 為不均勻元素的寬度。圖四顯示在固定的結點數之下，計算準確度隨 W_i 的減小而增加，顯現本方法的有效性。接著我們分析如圖五所示之脊形波導的模態特性。其場型之一例示於圖六。我們將所計算的有效折射率與至少五項前人所提出的不同方法做比較，發現我們的結果亦較具均勻性，詳細的討論請參見[3]。

其次討論 ARROW 波導的分析。假設理想的 ARROW 材質為無損耗，則通常由有限元素法所獲得的傳播常數應為實數，與洩波模態的特性不符。我們提出改良的有限元素法[4]，引入波場在空氣層及基座

係衰減變化的假設於有限元素法的推導中，因而能準確地算出複數的傳播常數。我們研究不同 ARROW 結構的傳播特性，包括 ARROW-B 以及雙波導形成方向性耦合結構[7]，瞭解其偶模、奇模特性及洩波現象。圖七所示為 ARROW 方向性耦合器結構圖，當 $n_d > n$ 時屬於 ARROW 波導， $n_d < n$ 時屬於 ARROW-B 波導， d_c 為導波區域的寬度， n_s 為基座折射率， n_0 為空氣。ARROW 方向性耦合器的偶模與奇模場型示於圖八，所用參數為 $d_1 = d_u = d_m = 2 \mu\text{m}$ ， $d_c = 4 \mu\text{m}$ ， $d_d = 0.089 \mu\text{m}$ ， $n = 1.46$ ， $n_d = 2.3$ ， $n_s = 3.5$ ， $n_0 = 1$ ；ARROW-B 方向性耦合器的偶模與奇模場型則示於圖九，所用參數為 $n = 1.54$ 及 $n_d = 1.46$ ，餘則與 ARROW 耦合器相同。兩者之衰減隨最接近空氣層厚度 d_u 之變化分別示於圖十及圖十一，顯示偶模與奇模的衰減可有顯著的不同。

四、計畫成果自評

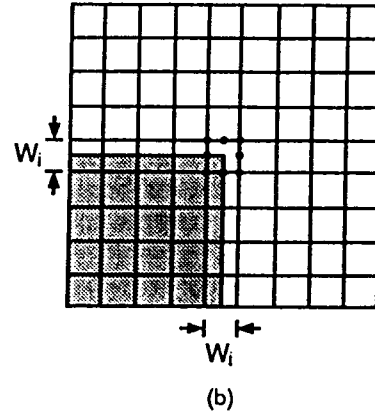
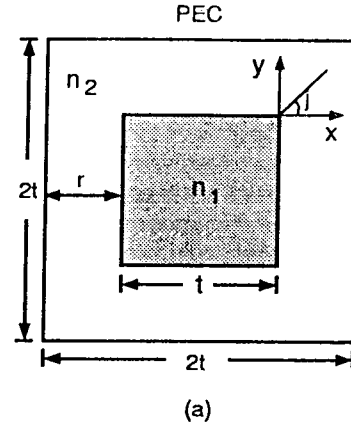
本計畫研究內容與原計畫相符，預期目標大致達成。所建立的三維全向量有限元素法數值模型，可用以研究各種不同的光波導。所提出的引進不均勻元素，處理波導不同介質界面及尖角的邊界條件，達成矩形介質波導及脊狀波導的更準確的模態分析的方法，甚具創新性，完整的論文已被接受發表[3]。而應用改良有限元素法，可以研究各種平面反共振反射光波導的特性，包括在本報告簡述的方向性耦合器結構，此部分成果正進一步整理準備投稿發表。

五、參考文獻

- [1] B. M. A. Rahman and J. B. Davies, "Finite-element analysis of optical and microwave waveguide problems," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-32, pp. 20-28, 1984.
- [2] Z. M. Mao and W. P. Huang, "Analysis of polarization rotation in periodically loaded rib waveguides by transfer matrix method," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 768-773, 1994.
- [3] D. U. Li and H. C. Chang, "An efficient

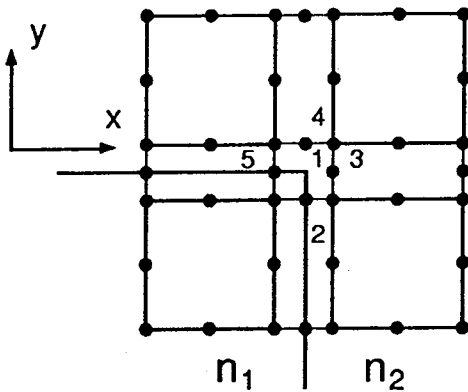
full-vectorial finite-element modal analysis of dielectric waveguides incorporating inhomogeneous elements across dielectric discontinuities," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 11, November 2000. (in press)

- [4] D. U. Li and H. C. Chang, "Finite-element analysis of ARROW waveguides," in *Proceedings of the 1998 International Photonics Conference (IPC '98)*, Taipei, Taiwan, R.O.C., December 15-18, 1998.
- [5] M. A. Duguay, Y. Kokubun, T. L. Koch, and L. Pfeiffer, "Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO_2 -Si multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, pp. 13-15, 1986.
- [6] T. Baba and Y. Kokubun, "Dispersion and radiation loss characteristics of antiresonant reflecting optical waveguides—Numerical results and analytical expressions," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, pp. 1689-1700, 1992.
- [7] Y. H. Chen and Y. T. Huang, "Coupling-efficiency analysis and control of dual antiresonant reflecting optical waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1507-1513, 1996.

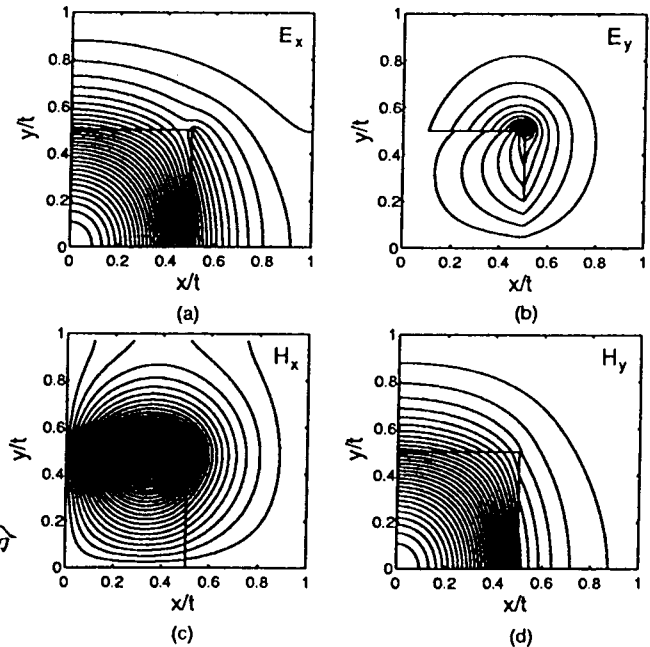


圖二 正方形波導的截面。(a) 波導結構。(b) 元素分割。

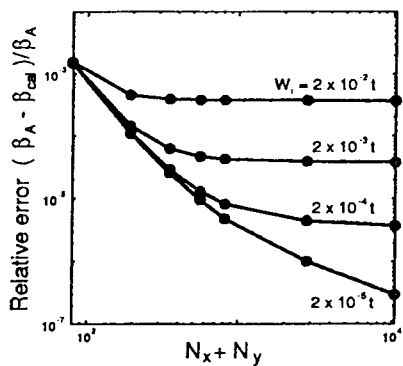
六、圖表



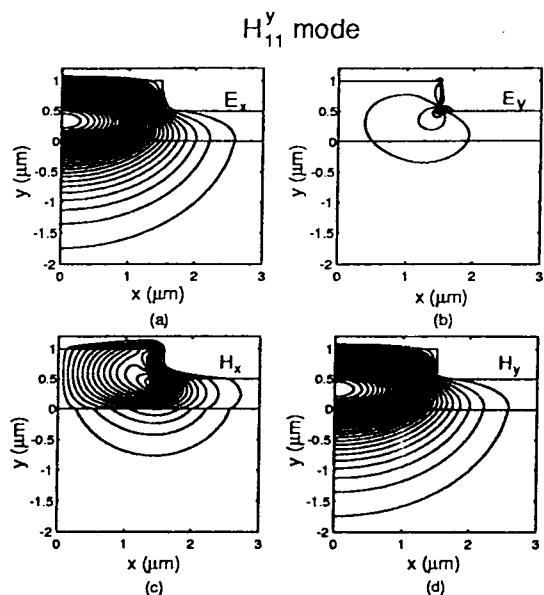
圖一 包含不均勻元素的尖角附近元素分割圖。



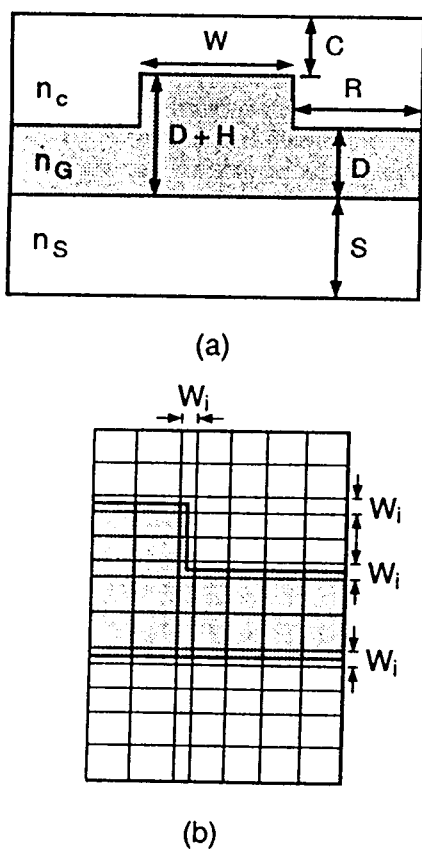
圖三 正方形波導基模的場線分布圖。(a) E_x 。(b) E_y 。(c) H_x 。(d) H_y 。



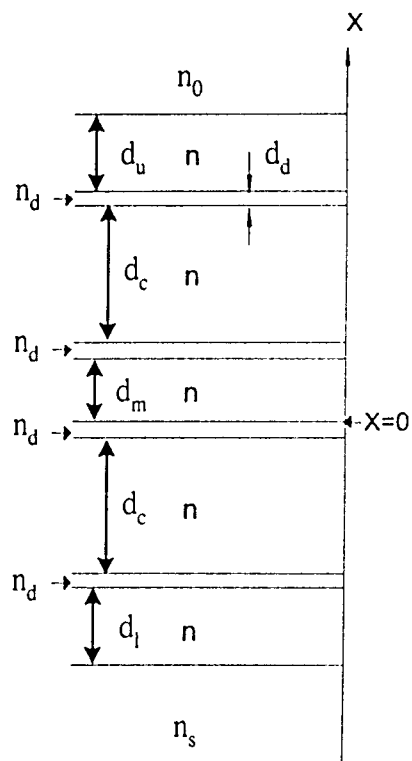
圖四 以磁場公式計算所得之正方形波導基模傳播常數之相對誤差隨未知量數目 $N_x=N_y$ 以及不均勻元素寬度 W_i 之收斂情形。



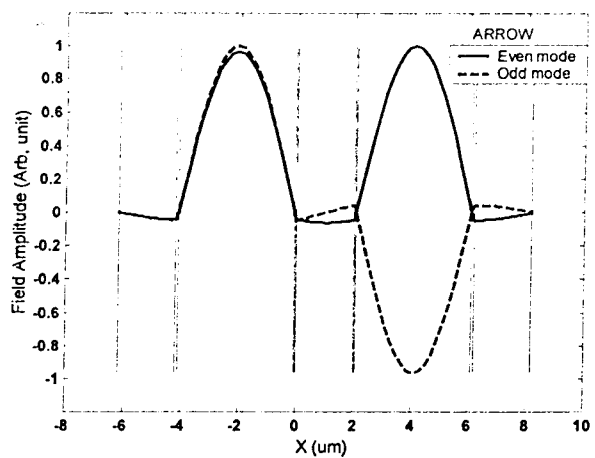
圖六 脊形波導基模的場線分布圖。(a) E_x 。(b) E_y 。(c) H_x 。(d) H_y 。



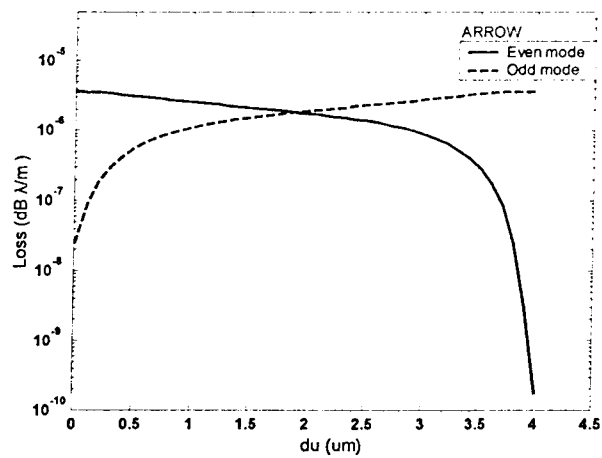
圖五 (a) 脊形波導的截面結構圖。(b) 元素分割。



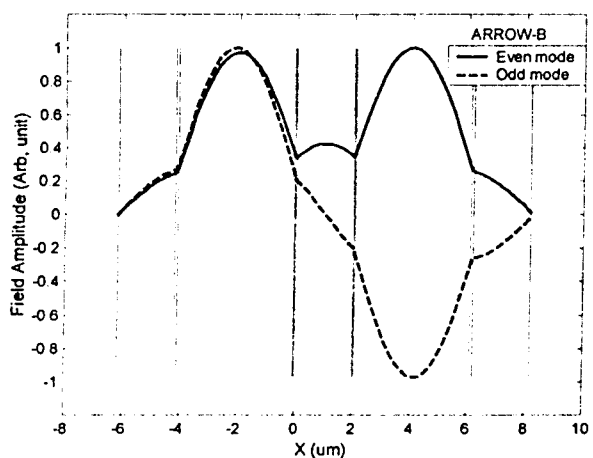
圖七 ARROW 方向性耦合器結構圖。



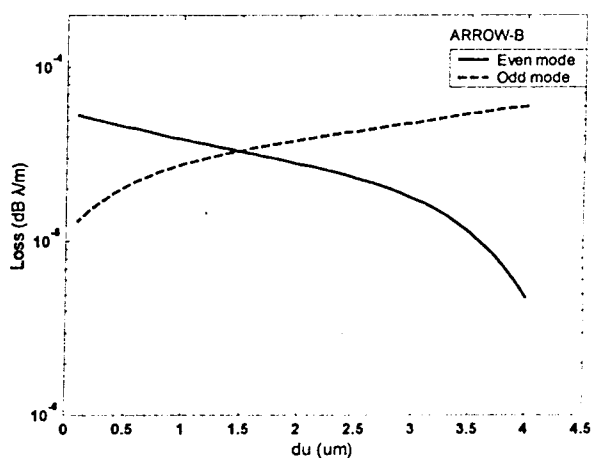
圖八 ARROW 方向性耦合器的偶模與奇模場型。



圖十 ARROW 方向性耦合器的偶模與奇模之衰減隨最接近空氣層厚度 d_u 之變化。



圖九 ARROW-B 方向性耦合器的偶模與奇模場型。



圖十一 ARROW-B 方向性耦合器的偶模與奇模之衰減隨最接近空氣層厚度 d_u 之變化。