

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

特殊光波導的分析與設計(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-002-008-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學電信工程學研究所

計畫主持人：張宏鈞

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 12 月 21 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

特殊光波導的分析與設計(3/3)

Analysis and Design of Special-Type Optical Waveguides (3/3)

計畫編號：NSC 92-2215-E-002-008

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 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) 江柏叡(台大光電所)

許森明(台大電信所) 莊英傑(台大電信所)

黃介銘(台大光電所) 周允賢(台大光電所)

一、中文摘要

本計畫建立先進的全向量有限差分法光波導模態分析模型，得以有效分析與設計以光子能隙效應導光的光子晶體空氣波導，並計算所需的光子晶體能隙結構。由於完美匹配層吸收邊界條件的引用，得以計算光波在光子晶體光纖傳播的可能洩漏損耗。本計畫並推展採用線性複合邊界結點三角形元素的全向量有限元素法至三維各向異性光波導之分析，亦以有限元素法研究二維抗諧振反射光波導(ARROW)之組成材料為各向異性時以及介質為各向異性材質的板形波導時之複合模態的特性。

關鍵詞：光波導、光子晶體光纖、反共振反射光波導、有限差分法、有限元素法、光波導元件

Abstract

In this research we have established advanced full-vectorial finite difference method based optical waveguide mode solvers and are able to effectively analyze and design air-core photonic crystal fibers (PCFs) with their functions based on photonic band gap effect. We are also able to calculate the required photonic band diagrams using the finite difference method. By incorporating into the model the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary conditions, possible leakage losses for light propagating in PCFs can be determined. We have also generalized our full-vectorial finite element method based on hybrid edge/nodal

elements with linear triangular shape to the analysis of three-dimensional anisotropic optical waveguides. By using the finite element method, we have also studied hybrid-mode characteristics of two-dimensional antiresonant reflecting optical waveguides (ARROWs) with anisotropic materials and anisotropic slab waveguides.

Keywords: Optical waveguides, photonic crystal fibers, antiresonant reflecting optical waveguides (ARROWs), finite difference method, finite element method, optical waveguide devices

二、計畫緣由與目的

隨著光通訊產業，包括高密度分波多工系統，的蓬勃發展，以數值分析輔助研發及設計所需用到的導波結構元組件，是更形重要的課題。本計畫利用我們持續優化的包括有限差分法、有限元素法在內的數種理論分析模型分析與設計數種特殊結構的光波導。在本計畫中，我們所研究的結構包括以光子能隙效應導光的光子晶體空氣波導、三維各向異性光波導、組成材料為各向異性之二維抗諧振反射光波導(ARROW)以及介質為各向異性材質的板形波導。本報告根據光子晶體空氣波導之有限差分分析、三維各向異性光波導之有限元素分析、以及各向異性平面波導之研究等三部分分別說明研究成果。

三、結果與討論

1. 光子晶體空氣波導之有限差分分析

有別於文獻上多以平面波展開法或其他特殊方法分析研究光子晶體光纖的傳播特性，本研究以在光波導領域廣被採用的三維全向量有限差分法數值模型研究各式光子晶體光纖，包括空氣纖芯光子晶體光纖的向量模態特性，發表論文於 Optical and Quantum Electronics 國際學刊[1]，近來在該學刊 most viewed papers 五篇名單中一直高居第一或第二位。上述工作係採用傳統同一場量的網格，本研究亦已建立一套新穎的採用有限差分時域(FDTD)法中通用的 Yee 網格的三維全向量有限差分法數值模型[2]，並在計算區域邊界加入完美匹配層(PML)吸收邊界條件，得以吸收波導截面往外傳的波，所推出的特徵值方程式得以求得複數的傳播常數，其虛部對應波導的洩漏損耗。另外以有限差分法方式，本研究亦提出計算二維光子晶體能隙結構的準確與有效的方法[3]，除了矩形單一晶包外，經由單一晶包形狀的面積移轉技巧與週期性邊界條件的適當應用，如圖一所示，三角形單一晶包的問題亦可順利處理。本研究已受邀發表四篇國際研討會邀請論文[4]–[7]。以下為空氣纖芯光子晶體光纖計算結果之一例：圖二為具六圈孔洞的空氣纖芯光纖以及計算區域與 PML 配置，相鄰孔洞中心距離為 2 微米，空氣孔洞填充率為 0.7，圖三(a)為纖芯模(core mode)與表面模(surface mode)之有效折射率隨波長的變化，圖三(b)為兩種模態之傳播損耗隨波長的變化，圖四為對應於圖三(a)之 A, B, C, D 四點之兩種模態的場型圖

2. 三維各向異性光波導之有限元素分析

我們先前曾提出一項引入非均勻元素的有限元素法[8]，採用矩形元素，應用於矩形形狀的介質波導，甚具效率及準確度，且能分析尖角附近的電場分布。不過傳統上在有限元素法的發展多採用三角形元素，以便較能適應任意形狀的幾何邊界，在介質波導全向量分析的領域，已有複合邊界結點三角形元素的全向量有限元素法的提出，以便能有效地匹配邊界條

件，在上年度中，我們已成功建立一套相同方法程式以分析各式光波導[9]。在本年度中，我們將程式模型擴展至三維各向異性光波導之分析，圖五為鉍酸鋰埋入式波導之一例[10]，並顯示其 PML 放置區域，圖六展示其截面線性三角形元素分割情形，圖七為其 E_{11}^y 模的等效折射率計算值隨 k_0a 變化的情形，顯示我們的結果與[10]相符。

3. 各向異性平面波導之研究

在本年度中我們應用先前提出的一項改良有限元素法[11]，分析研究傳播特性較複雜的具各向異性材質的平面抗諧振反射光波導 (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，近年來受到許多注意，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。以下提出一些主要結果，圖八(a)為 ARROW 基本結構圖，圖八(b)為單光軸各向異性 ARROW 的座標系統圖， $\hat{c}$ 代表光軸。圖九為光軸落於 x - z 平面($\theta = 90^\circ$)時導波模之洩漏損耗對光軸方向變化情形，圖十為對應的有效折射率在不同 $AR = n_o/n_e$ 數值的變化圖。另外，我們亦以相同方法分析研究如圖十一所示的單光軸各向異性板形波導， z 為傳播方向。圖十二為光軸落於 x - y 平面($\phi = 0^\circ$)時多模波導模態之有效折射率對光軸方向變化情形，圖十三為光軸落於 x - z 平面($\theta = 90^\circ$)時之有效折射率對光軸方向變化情形，而圖十四為光軸落於 y - z 平面($\phi = 90^\circ$)時之有效折射率對光軸方向變化情形。以上結果顯示我們的方法可以研究複雜的平面介質波導。

四、計畫成果自評

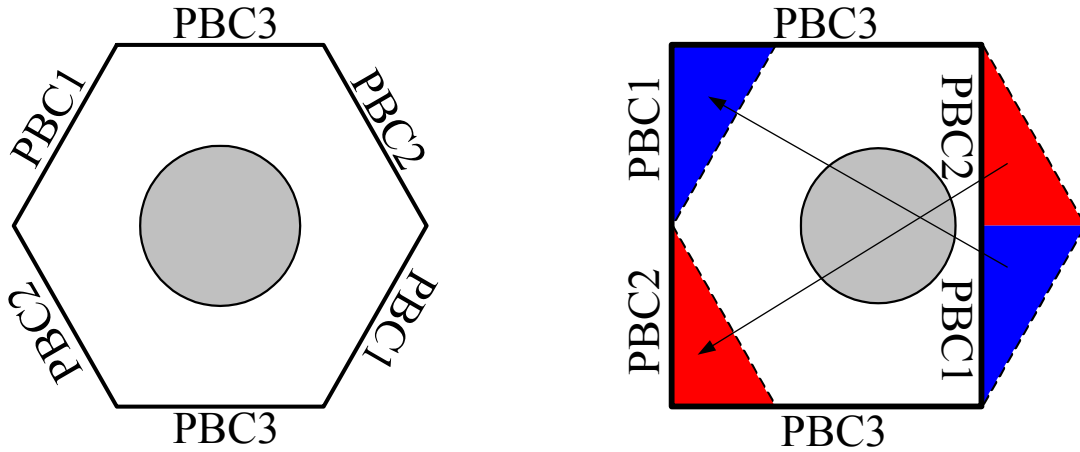
本計畫研究內容與原計畫相符，預期目標大致達成。在光子晶體空氣波導之有限差分分析方面，本研究建立一套新穎的採用 Yee 網格的三維全向量有限差分法數值模型，並在計算區域邊界加入完美匹配

層(PML)吸收邊界條件,得以求得複數的傳播常數,其虛部對應波導的洩漏損耗。另外,本研究亦提出以有限差分法方式計算二維光子晶體能隙結構的準確與有效的方法。在有限元素分析方面,本研究將複合邊界結點三角形元素的全向量有限元素法程式模型擴展至三維各向異性光波導之分析。在各向異性平面波導之研究方面,本研究探討了具單軸各向異性材質的平面抗諧振反射光波導以及單光軸各向異性多模板形波導中的複雜模態特性。

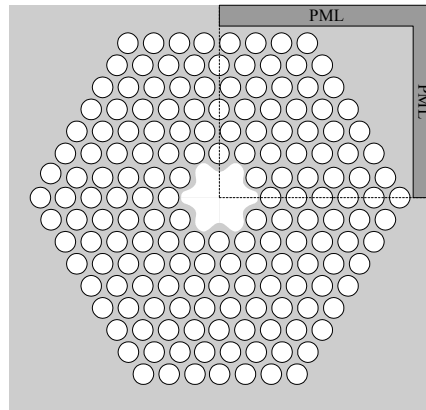
五、參考文獻

- [1] C. P. Yu and H. C. Chang, "Applications of the finite difference mode solution method to photonic crystal structures," *Optical and Quantum Electronics*, Special Issue of the 11th International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modelling (OWTNM '03), vol. 39, pp. 145–163, 2004.
- [2] C. P. Yu and H. C. Chang, "Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers," *Optics Express*, vol. 12, pp. 6165–6177, 13 December 2004.
- [3] C. P. Yu and H. C. Chang, "Compact finite-difference frequency-domain method for the analysis of two-dimensional photonic crystals," *Optics Express*, vol. 12, no. 7, pp. 1397–1408, 5 April 2004.
- [4] H. C. Chang and C. P. Yu, "Yee-mesh-based finite difference eigenmode analysis algorithms for optical waveguides and photonic crystals," in *OSA 2004 Integrated Photonics Research (IPR '04) Digest* (CD ROM), paper IFE4, San Francisco, California, June 30–July 2, 2004. **(Invited paper)**
- [5] H. C. Chang and C. P. Yu, "Yee-mesh-based finite difference optical waveguide eigenmode solver with perfectly matched layer absorbing boundary conditions," in *Proceedings of 5th Asia-Pacific Engineering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory*, pp. 158–164, Kyushu University, Fukuoka, Japan, July 29–30, 2004. **(Invited paper)**
- [6] H. C. Chang and C. P. Yu, "Finite difference frequency domain method for photonic crystal structure modeling," in *Record of 2004 Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu (JCEEE-2004)* (CD ROM), paper 08-1P-01, Kagoshima, Japan, September 27–28, 2004. **(Invited paper)**
- [7] H. C. Chang and C. P. Yu, "Finite-difference frequency-domain method for leaky photonic crystal fiber analysis," presented at *International Workshop on Photonic-Crystal Devices and Their Application*, (Workshop Digest, pp. 25–26), National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, R.O.C., October 16–17, 2004. **(Invited)**
- [8] 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 Journal of Quantum Electronics*, vol. 36, pp. 1251–1261, 2000.
- [9] H. J. Chen and H. C. Chang, "Modal analysis of two-dimensional antiresonant reflecting optical waveguides," in *Proceedings of Optics and Photonics Taiwan '03 (OPT '03)*, Vol. III, pp. 212–214, Taipei, Taiwan, R.O.C., December 25–26, 2003.
- [10] J. A. M. Svelin, "A modified finite-element method for dielectric waveguides using an asymptotically correct approximation on finite elements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, pp. 258–266, 1991.
- [11] D. U. Li and H. C. Chang, "Finite-element analysis of ARROW waveguides," in *Proceedings of the 1998 International Photonics Conference (IPC'98)*, pp. 310–312, Taipei, Taiwan, R.O.C., December 15–18, 1998.

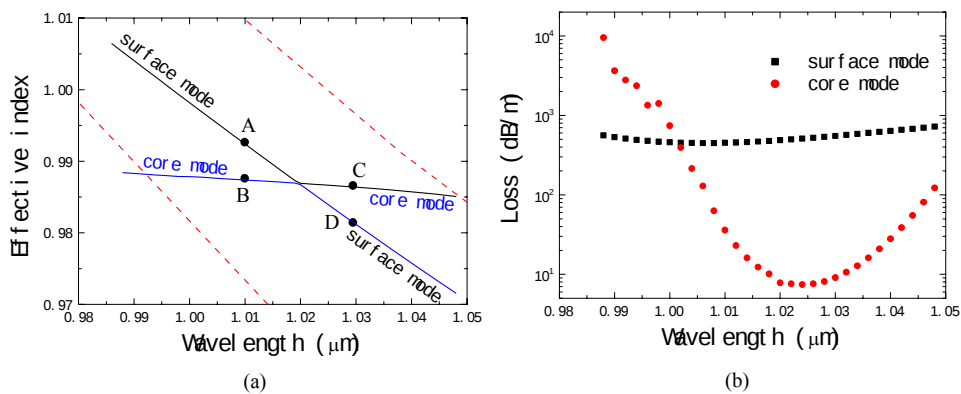
六、圖表



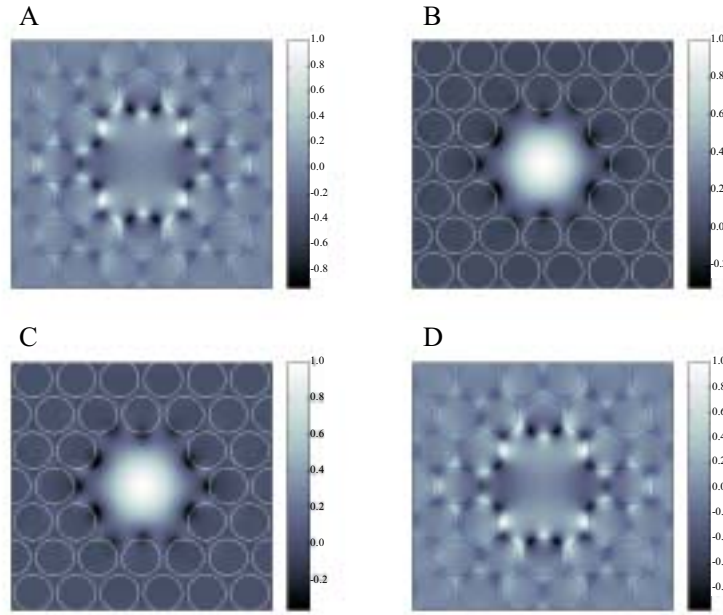
圖一 圖左為三角形晶格單一晶包與對應的週期性邊界條件。圖右為面積移轉後之單一晶包[3, Fig. 3]。



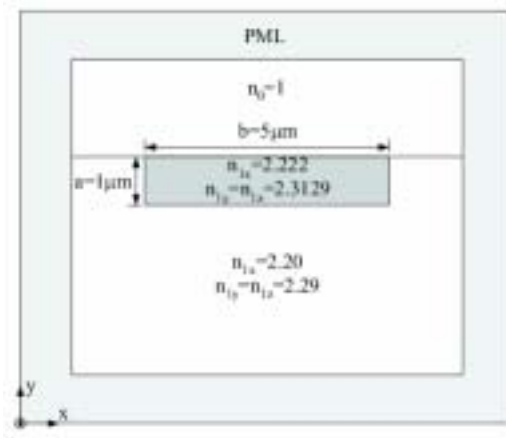
圖二 具六圈孔洞的空氣纖芯光纖以及計算區域與 PML 配置[2, Fig. 12]。



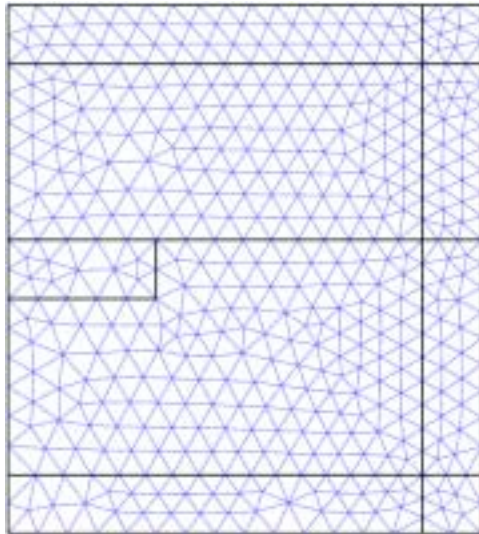
圖三 (a)纖芯模(core mode)與表面模(surface mode)之有效折射率隨波長的變化。(b)兩種模態之傳播損耗隨波長的變化[2, Fig. 13]。



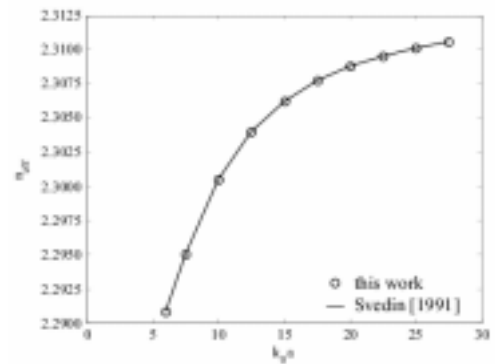
圖四 對應於圖三(a)A, B, C, D 四點之纖芯模(core mode)與表面模(surface mode)的場型圖[2, Fig. 14]。



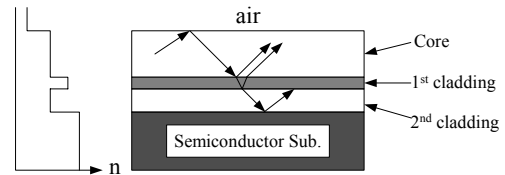
圖五 鋱酸鋰埋入式波導。



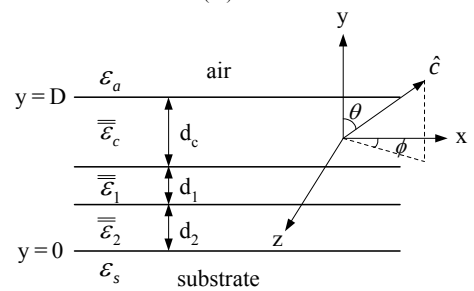
圖六 圖五問題之截面線性三角形元素分割圖。



圖七 圖五波導之 E_{11}^y 模的等效折射率計算值隨 k_0a 變化圖，顯示我們的結果與[10]相符。

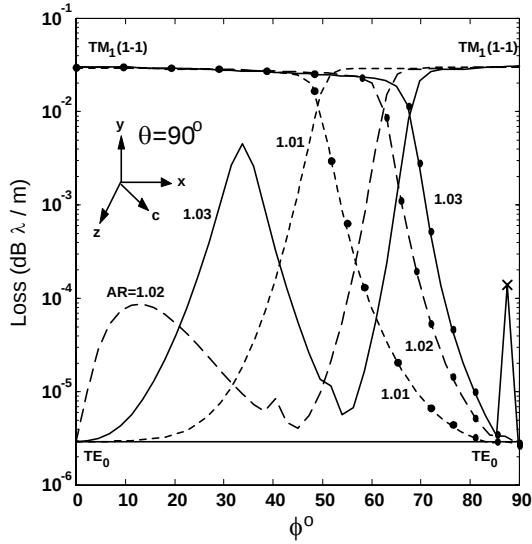


(a)

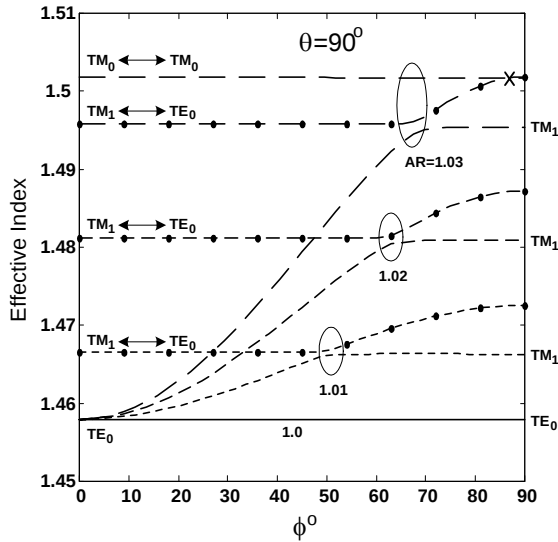


(b)

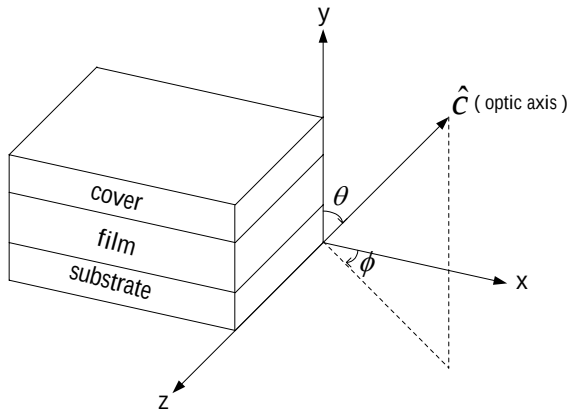
圖八 (a) ARROW 基本結構圖。(b)單光軸各向異性 ARROW 的座標系統。



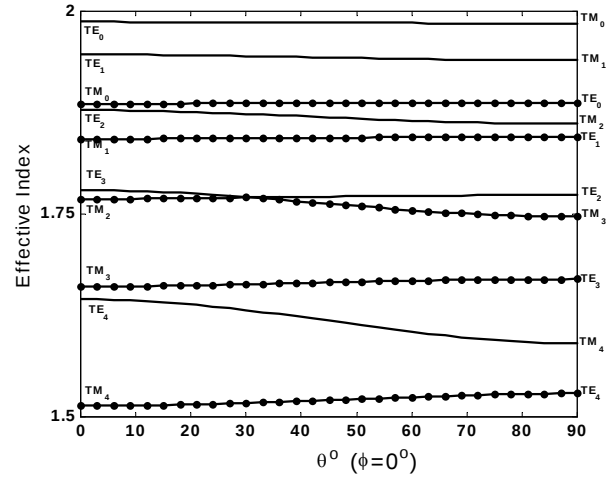
圖九 圖八(b)之光軸落於 x - z 平面($\theta = 90^\circ$) 時導波模之洩漏損耗對光軸方向變化圖。



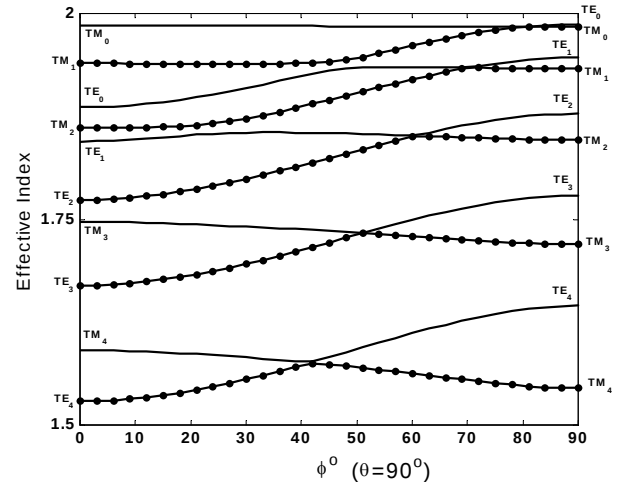
圖十 對應於圖八之有效折射率在不同 $AR = n_o/n_e$ 數值的變化圖。



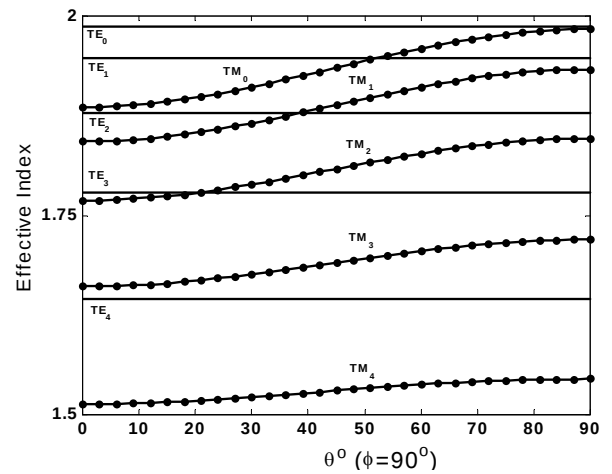
圖十一 單光軸各向異性板形波導, z 為傳播方向。



圖十二 圖十一之光軸落於 x - y 平面($\phi = 0^\circ$) 時多模波導模態之有效折射率對光軸方向變化圖。



圖十三 圖十一之光軸落於 x - z 平面($\theta = 90^\circ$) 時多模波導模態之有效折射率對光軸方向變化圖。



圖十四 圖十一之光軸落於 y - z 平面($\phi = 90^\circ$) 時多模波導模態之有效折射率對光軸方向變化圖。