

逢甲大學學生報告 ePaper

脊狀波導的洩漏模態

Leaky Modes of Rib Waveguide

作者：余岩諤、張詠琪、吳芸瑄

系級：光電四甲、光電三甲、光電三甲

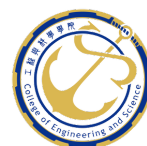
學號：D1188876、D1228639、D1261651

開課老師：蔡雅芝

課程名稱：光波導元件模擬與分析

開課系所：光電科學與工程學系

開課學年：114 學年度第 2 學期



中文摘要

光波導在傳輸過程中，若光場的侷限不佳，容易因繞射效應而向外洩漏，造成傳輸損耗。為探討此問題，我們利用 RSoft CAD 設計製作多層結構之脊狀波導 (Rib Waveguide)，並以 BeamPROP 進行數值模擬計算，找出該波導的模態及對應的場分佈，並分析入射波位置對耦合程度的影響。我們分別以疊代法 (iterative method) 與相關法 (correlation method) 求解波導模態，前者求得之基模並未收斂，意味著疊代法無法有效處理洩漏模，後者則進一步求得 $m=0、1、2$ 三種有效折射率含虛部的洩漏模態。模擬得到的場分佈顯示，光源置於脊狀波導中心時透過與基模耦合，系統的耦合效率最高，而光源位置適度偏移仍可藉由二階模態維持傳輸功率，證實此脊狀波導結構在低損耗與對準容忍度上具有應用價值。

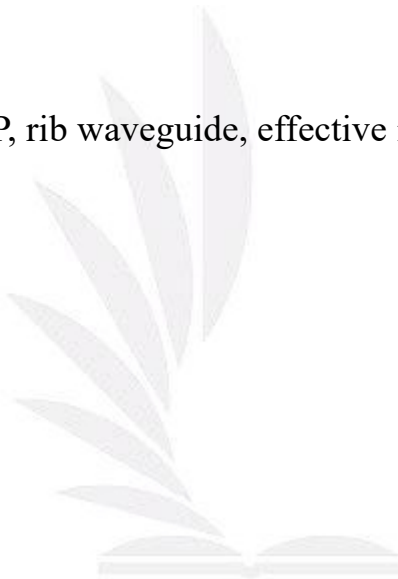
關鍵字：BeamPROP、脊狀波導、有效折射率



Abstract

During the propagation in optical waveguides, light that is not properly confined will leak outward due to diffraction, resulting in transmission loss. To address this issue, we used RSoft CAD to design a multilayer rib waveguide and employs BeamPROP to calculate the waveguide's modes and field distributions. The waveguide modes are solved using both the iterative method and the correlation method: the former yields a fundamental mode whose electric field dose not converge at the domain boundary, while the latter identifies three leaky modes ($m = 0, 1, 2$) whose effective indices possess non-zero imaginary parts. The calculated mode distribution indicates that the coupling efficiency is highest when the light is launched at the center of the rib waveguide to excite the fundamental mode. By coupling to the second-order mode, moderate shift of launching position does not change the transmitted power significantly. Out studies confirm the practical value of rib waveguide in achieving low loss and good alignment tolerance.

Keyword : BeamPROP, rib waveguide, effective index



目 次

一、系統簡介.....	4
二、內容及結果.....	5
(一) 元件規格	5
(二) 計算參數	5
(三) 操作步驟	6
(四) 元件布局圖 Device Layout.....	7
(五) 模擬結果與分析	7
三、討論及心得.....	11
四、參考文獻.....	13



一、系統簡介

在平板波導 (planar waveguide) 中，光場的侷限僅發生於單一維度 (x 軸)，光在沿 z 軸傳播的同時，仍會因繞射效應而在 y 軸方向擴散。為避免此問題並實現二維光場侷限，不僅上下界面需要滿足波導條件，側向邊界也同時須發生全反射，此即通道波導 (channel waveguide) 的基本設計概念。通道波導按幾何結構可以分為三類：完全蝕刻的條狀波導 (stripe waveguide)、局部折射率提升的埋入式波導 (buried waveguide)，以及蝕刻未完全穿透基底薄膜的脊狀波導 (rib waveguide) [1]。其中，脊狀波導因保留了部分基底薄膜層 (slab layer)，使光場同時受到脊狀凸起區 (rib) 與薄基底層 (slab) 的共同侷限，在單模控制、製程整合與傳播損耗等方面具有獨特優勢[2]。

最早在 1980 年代，因應積體光學與矽基光電技術的發展需求，傳統的平板波導與全蝕刻通道波導在單模控制、損耗與製程整合上，逐漸無法滿足高速光通訊與積體化需求，研究者因此提出「部分蝕刻」的波導設計概念。1991 年首次提出大型單模脊狀波導設計；隨著 SOI (Silicon-on-Insulator) 平台的逐漸成熟，脊狀波導在 1990 年代末至 2000 年代成為矽光子積體電路核心結構之一，研究重點轉向單模條件、低損耗、偏振控制與高密度整合[2]。

脊狀波導的基本導光原理與傳統光纖相同，都是內全反射 (Total Internal Reflection, TIR)。對於非對稱平板波導結構，薄膜層 (film) (折射率為 n_f) 上方為包覆層 (cover) (折射率 n_c)，下方為基板 (substrate) (折射率為 n_s)，且滿足 $n_f > n_s \geq n_c$ ，結構可參考圖一。包覆層與 film 界面、film 與基板界面各自對應一個臨界角：

$$\begin{cases} \theta_{1c} = \sin^{-1} \left(\frac{n_c}{n_f} \right) \\ \theta_{2c} = \sin^{-1} \left(\frac{n_s}{n_f} \right) \end{cases} \quad (1)$$

由於 $n_f > n_s \geq n_c$ ，兩臨界角滿足 $\theta_{2c} > \theta_{1c}$ 。依光線在 film 內的傳播角 θ ，可區分三種情況：當 $\theta_{1c} > \theta$ ，光同時穿透包覆層與基板，形成輻射模 (radiation mode)，光場無法被侷限於 film 中。當 $\theta_{2c} > \theta > \theta_{1c}$ ，光在 cover 界面發生全反射，但仍穿透基板，形成基板輻射模 (substrate radiation mode)。當 $\theta_{2c} > \theta > \pi/2$ ，光在上下界面皆發生全反射，光場完全侷限於 film 中，形成傳導模 (guided mode) [1]。

以矽基脊狀波導為例，film 為 Si ($n \approx 3.48$)，基板與包覆層通常為 SiO_2 ($n \approx 1.44$)。由於 slab 層仍保留部分厚度，橫向光場邊界過渡較為平緩，與蝕刻側壁的接觸面積和光場強度顯著減少，大幅降低了製程粗糙度引起的側壁散射損耗。相較於全蝕刻條狀波導具有更低傳播損耗與更佳偏振穩定性，同時仍可維持良好的光場侷限能力，因此常被用於需要低損耗與電極整合的元件設計[3]。

在應用方面，脊狀波導已廣泛用於光通訊系統中的分波器、耦合器與干涉式結構（如 MZI、AWG），並在高速電光調變器（尤其 Mach-Zehnder modulator）中扮演關鍵角色，因其可在維持低光學損耗的同時提供良好電場與光場重疊效率；此外，在矽光子與鋰鈮酸鋰薄膜（Lithium Niobate on Insulator, LNOI）平台中，脊狀波導亦被用於降低側壁粗糙造成的散射損耗並提升電光調變效率，同時在中紅外光子學領域也被用於氣體感測與光譜分析等應用[4]，脊狀波導兼具低損耗、良好偏振控制、製程相容性高與易於電極整合等優點，雖然其彎曲半徑較大且光場侷限性不如全蝕刻波導，但在高性能光子積體電路中仍具有不可取代的重要地位，並隨著矽光子與 LNOI 技術發展成為關鍵波導結構之一。

二、 內容及結果

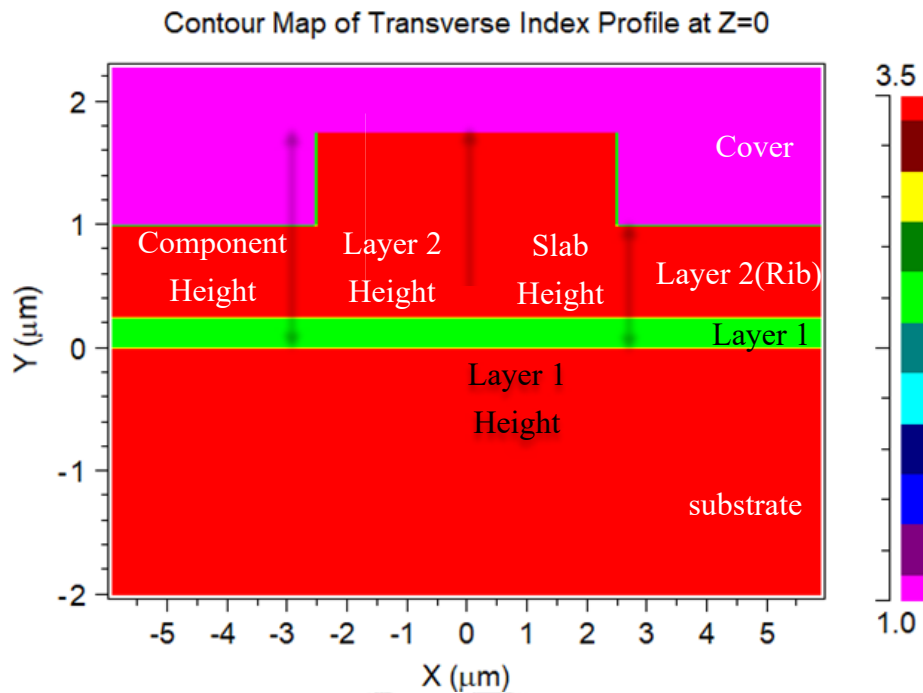
（一） 元件規格

- 3D Structure Type: Multilayer
- Free space wavelength: 1.55 μm
- Background index: 3.5
- Index Difference: 0.45
- Component Width/Height: 5.0/1.75
- Cover Index: 1.0
- Slab Height: 1.0 μm
- Layer 1 Height: 0.25 μm
- Layer 1 Index: 2.5
- Layer 2 Height: 1.5 μm
- Layer 2 Index: 3.5
- step_size = 0.05 μm
- Length = $2^{15} \times \text{step_size}$

（二） 計算參數

表一、脊狀波導的計算參數

	X (μm)	Y (μm)	Z (μm)
Domain Min	-5.9 (default)	-2	0 (default)
Domain Max	5.9 (default)	2.28 (default)	1638.4 (default)
Grid Size	0.05 (default)	0.02	0.2
Slice Grid	0.05 (default)	0.02 (default)	0.2

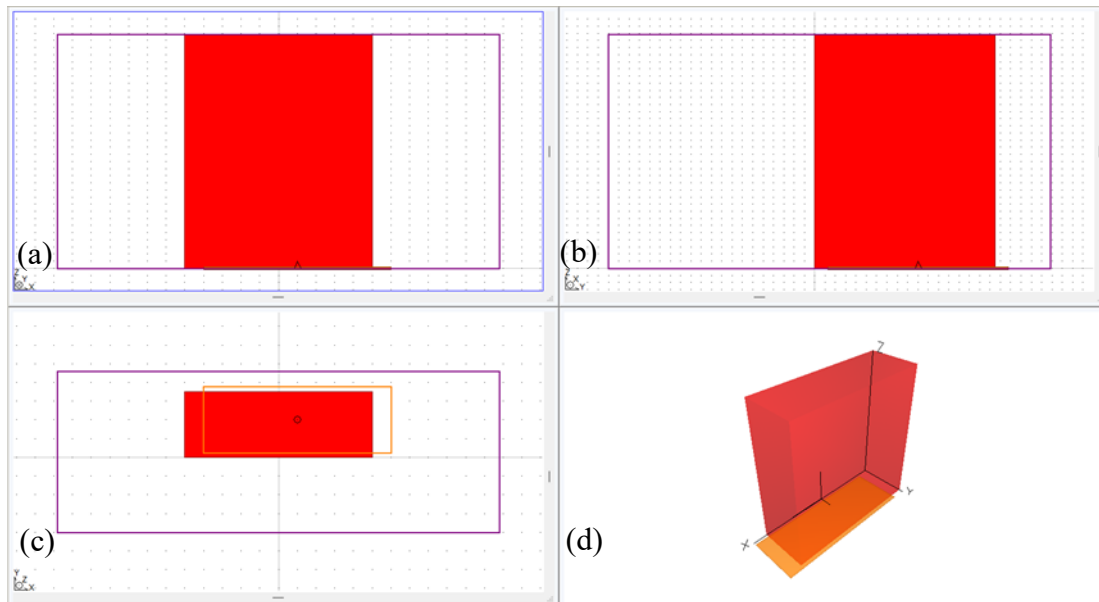


圖一、脊狀波導的幾何結構及參數定義示意圖

(三) 操作步驟

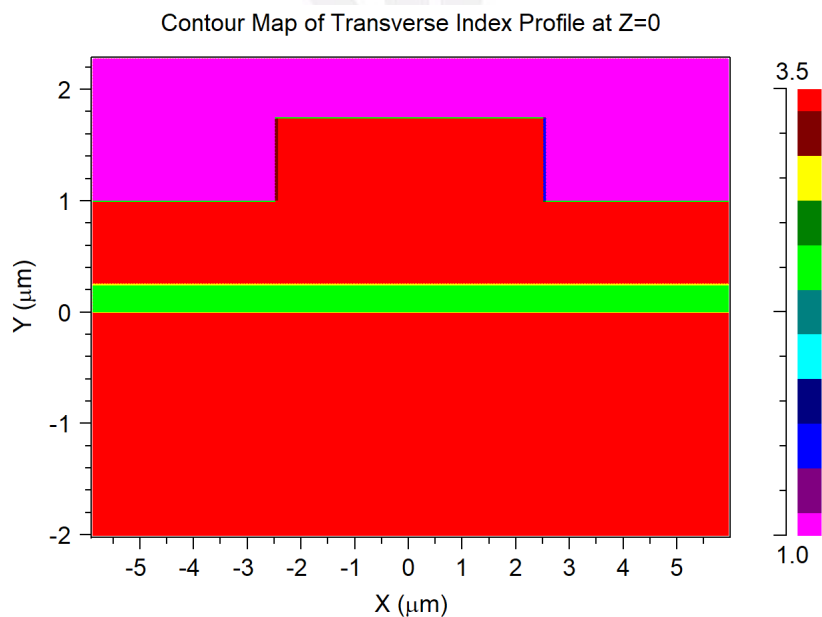
1. 依據元件規格，將相應資訊填入起始視窗(start-up window)中。點選 Edit Layers，在 Layer Table 0 中設定脊狀波導 Layer 1、Layer 2 的折射率及厚度。
2. 打開 symbol table editor，利用 new symbol 定義 Length 參數。
3. 畫出一直線段並檢查起、終點。起點(X, Y, Z)值為(0, 0, 0)、終點 Z 方向的 Reference Offset Value 為 Length。
4. 畫出此波導的 transverse index profile，並確認折射率分佈符合設定。
5. 定義路徑：將此波導設為 path 1。
6. 開啟 Edit Launch Field 視窗，選擇入射波形式為高斯波(Gaussian wave)，並由 $(x, y) = (0.5, 1.0)$ 處入射。
7. 開啟 Compute Modes 視窗，將 Y Domain Minimum 設為 -2 (比預設值大，以便觀察電場外漏狀況)，Y Grid Size 設為 0.02，Z Slice Grid 設為 0.1，最後將步幅改成自訂值。
8. 於 Compute Modes 視窗的 BPM Options 區，將 Vector Mode 選擇 *semi* (半向量模式)，Polarization 選擇 *TE*。
9. 點選 Mode Options，將 mode length 由預設值改設定為元件長度 Length。
10. 先以疊代法(iterative method)計算基模，將求得的 transverse mode profile 存檔。
11. 再以相關法(correlation method)計算所有模態及其頻譜分佈，將求得的 transverse mode profile 存檔。

(四) 元件布局圖 Device Layout



圖二、脊狀波導在(a)XZ (b)YZ (c)XY 及(d) 3D 模式下的 Layout

(五) 模擬結果與分析

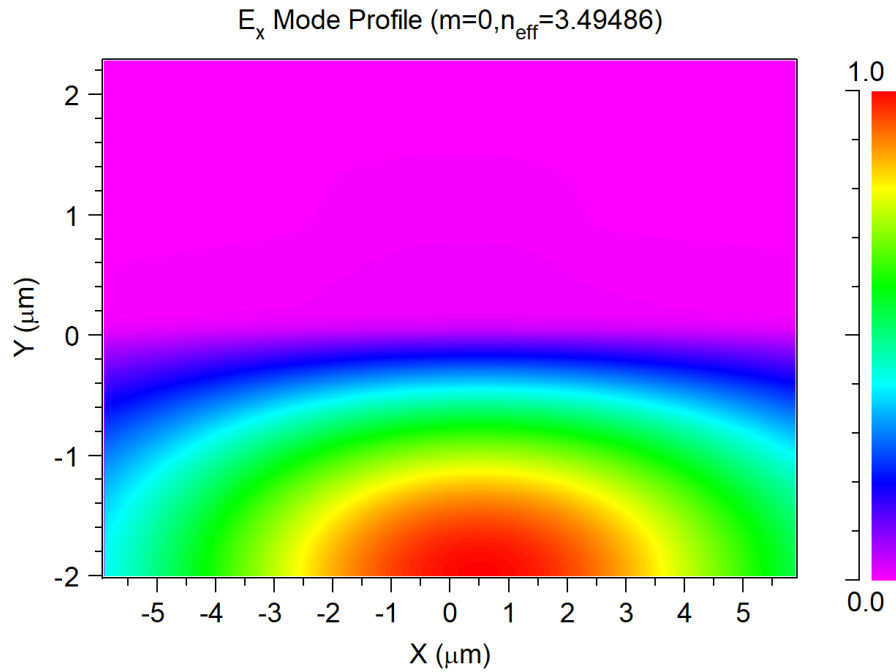


圖三、脊狀波導的橫向折射率分布圖

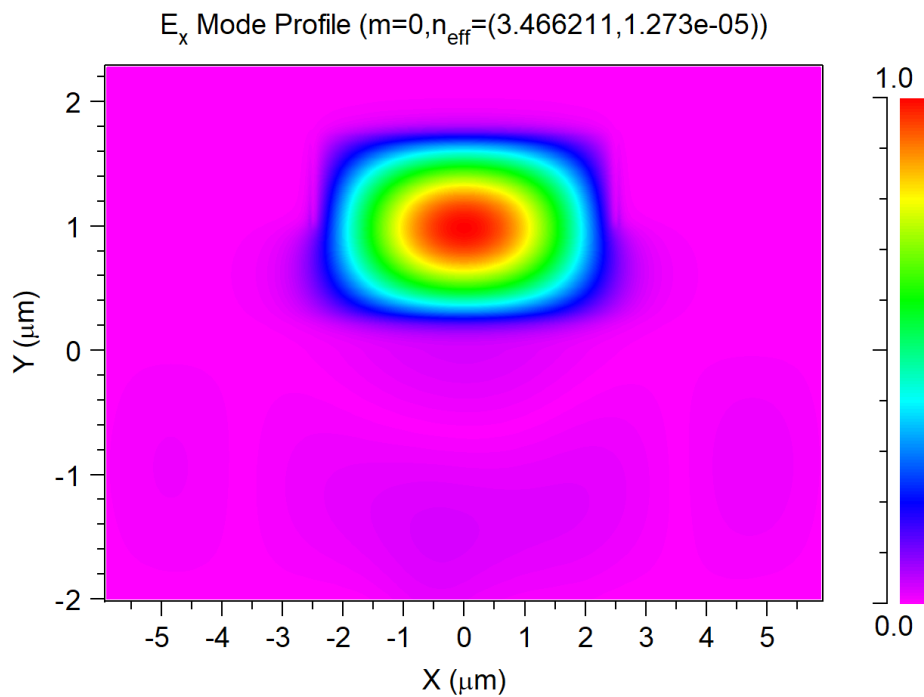
1. 調整 $Y_{\min}$ 抑制邊界反射

由於此元件的模態屬於洩漏模，光場能量會不斷向下方高折射率基板流洩。因此在設定模擬範圍時必須刻意將 $Y_{\min}$ 往下延伸，在核心與邊界間提供足夠的基板緩衝空間，讓外漏能量自然發散，並在底部被完美匹配層 (PML) 完全吸收，確保模態頻譜的精準度。

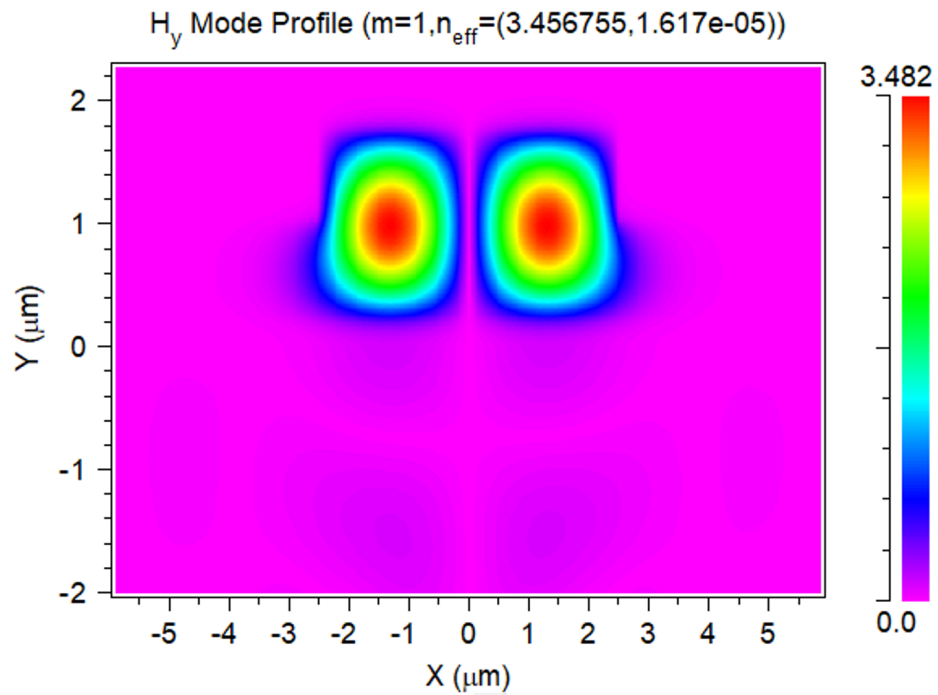
圖四為以疊代法模擬所得的脊狀波導的基模，其有效折射率 $n_{eff} = 3.49486$ ，但圖中的電場並未落在脊狀凸起區域，反而集中在下方的低折射率層（基板），而且在 $-y$ 方向明顯未收斂，因此不是一個侷限態。我們稍後會進一步分析原因。



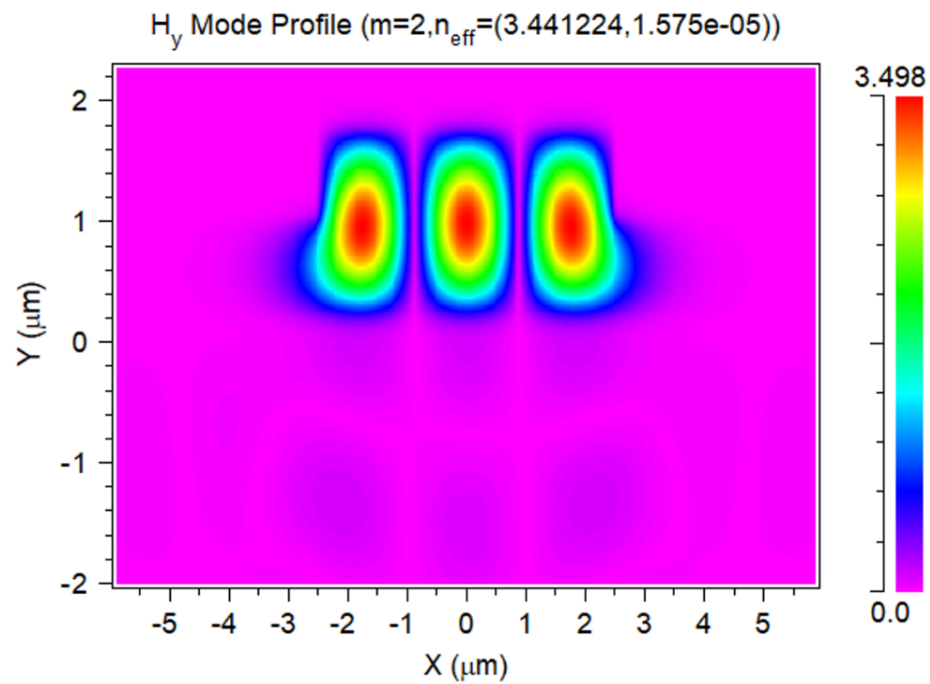
圖四、疊代法模擬所得之波導 E_x 偏振 ($m=0$) 場型分佈。



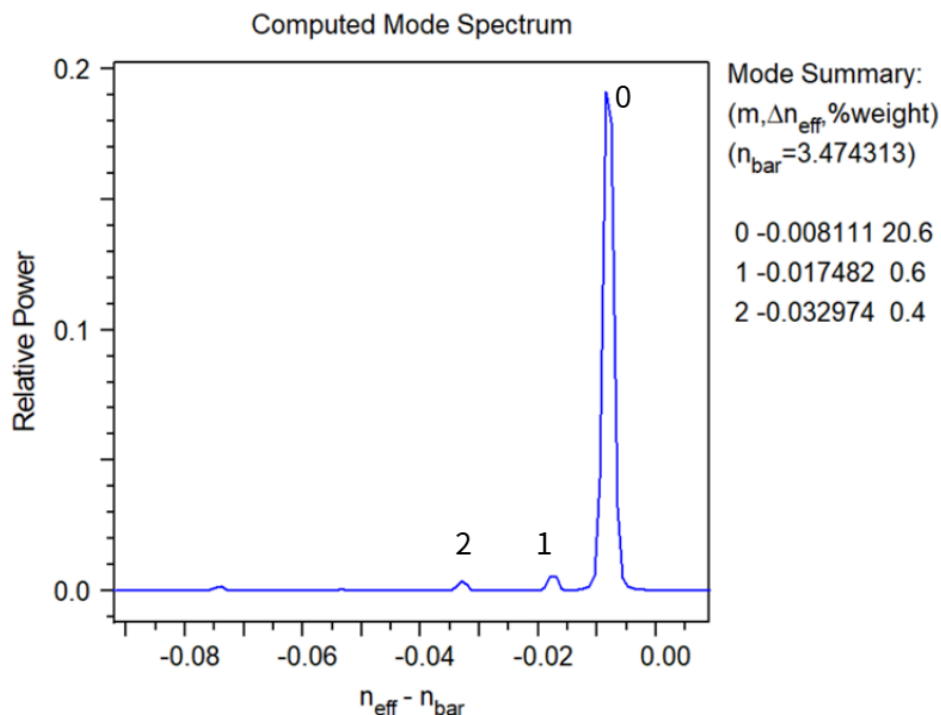
圖五、相關法模擬所得之波導 E_x 偏振 ($m=0$) 場型分佈



圖六、相關法模擬所得之波導 E_x 偏振 ($m=1$) 場型分佈



圖七、相關法模擬所得之波導 E_x 偏振 ($m=2$) 場型分佈



圖八、相關法計算之波導模態頻譜與能量權重分佈圖

2. 入射位置對輸出功率之影響與模態耦合分析

(1) $m = 0$ 基模耦合

由圖八可知當光源對準波導的脊狀區域中心(即圖三中的座標(0,1)處)時，頻譜在 $m = 0$ 處激發出最強烈的光學相對功率峰值。這是由場型的空間對稱性決定。入射的高斯波與基模 ($m = 0$) 皆為中心對稱的單峰場型，兩者空間重疊積分 (Overlap Integral) 最大，故能量高效耦合。反之，一階模 ($m = 1$) 為反對稱結構 (左正右負)，與入射場積分後正負相位強烈抵消，因此其激發權重趨近於零。

(2) $m = 2$ 二階模之能量補償

當光源位置稍微偏離中心時，雖然光源與基模耦合效率會下降，但偏移後的位置剛好重疊在二階模 ($m = 2$) 對稱三峰結構的側邊次波峰上。由於二階模各波峰相位相同，不產生相位抵消而能被有效激發。此外，二階模因洩漏模共振效應，其損耗虛部反常地低於一階模，使能量在傳播時衰減極慢，成功提供波導結構在偏心入射下的傳輸能量補償，提升了對準容忍度 (Alignment Tolerance)。

(3) $m = 1$ 高損耗模之強烈耦合

當光源偏移量完全脫離脊狀凸起區邊界時，剩餘功率出現斷崖式陡降。此時光源激發導波模的能力降至冰點，偏心光源轉而與反對稱的一階模 ($m = 1$) 及基板輻射模強烈耦合。然而，一階模的洩漏損耗虛部為所有少模中最高，加上直接打在脊狀結構外側的光無法滿足全反射導光條件，導致光能量在傳播過程中迅速向基板外漏散失，功率隨之歸零。

三、 討論及心得

本實驗模擬一個多層結構組成的脊狀波導，透過數值計算，分析該波導在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波長下的模態特徵與橫向電場強度分布，探討疊代法與相關法兩種演算法在求解波導模態時的差異。

在電磁學課程中，由馬克士威方程組(Maxwell's equations)簡化後的橫向波動方程 (Helmholtz Equation) 表示為：

$$(\nabla_{\perp}^2 + k_0^2 n^2(x,y) - \beta^2)\psi(x,y) = 0 \quad (2)$$

其中傳播常數

$$\beta = k_0 n_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \quad (3)$$

此外，脊狀波導依賴核心折射率高於包層的條件，使光場以全反射方式被侷限於核心區域內傳播，對應於光學中的全反射原理。

在模態求解方法上，本實驗採用的疊代法與相關法在原理與適用範圍有所差異。疊代法的原理是將傳播座標 z 替換成虛數距離 $z' = iz$ ，使各模態的傳播項由震盪轉變為指數成長，成長速率等於個模態的傳播常數 β 。由於基模具有最高的傳播常數，成長速率最快，經過足夠的傳播距離後將主導所有其他模態，最終場分布收斂至基模場型。高階模態雖可透過正交化程序逐一求得，但此方法本質上不適用於洩漏模態 (leaky mode) 或有損耗的模態 [5]。正如本實驗的圖四所示，疊代法求得的基模的電場分布高度集中在脊狀波導下方的低折射率基板，而非預期的脊狀凸起區域，而且電場在計算範圍的邊界並未收斂。

相關法則將任意初始場注入波導，在正常的光束傳播法(Beam Propagation method, BPM)下進行傳播，並在傳播過程中計算輸入場與傳播場之間的相關函數：

$$P(z) = \int \phi_{in}^*(x) \cdot \phi(x, z) dx = \sum_m |c_m|^2 e^{i\beta z} \quad (4)$$

其中， $\phi_{in}^*(x)$ 為入射場的共軛複數， $\phi(x, z)$ 為傳播場， c_m 為模態展開係數。對此相關函數進行傅立葉轉換後，頻譜中的峰值即對應各模態的傳播常數 β ，再透過第二次傳播重建各模態的橫向場分布。此方法雖然速度較慢，但能同時提取結構的所有模態，且適用於疊代法難以處理的洩漏模態與輻射模態[5]。本實驗中，相關法透過場的橫向相關性運算，成功抽離出到脊狀結構橫向侷限的洩漏模態，求得的有效折射率皆呈現複數形式：

$$n_{\text{eff}} = n_{\text{real}} + i \cdot n_{\text{imag}} \quad (5)$$

其中虛部 n_{imag} 為此波導的傳播損耗，隨著模態階數由 0 增加到 2，橫向 X 軸的光場分裂節點變多，呈現單峰、雙峰與三峰分布。雖然此元件的寬度達到 $5.0\ \mu\text{m}$ ，但從場型圖可以觀察到，光場高度集中在脊狀凸起區。這點證實了「部分蝕刻」設計既能維持大型單模/少模的均勻場型，又能有效減少全蝕刻通道波導所

帶來的側壁散射損耗。

最後，根據模擬計算結果我們可以觀察到 n_{eff} 隨模態的增加而遞減，此趨勢與理論預測吻合：

$$n_{cladding} < \dots < n_{eff}(m=1) < n_{eff}(m=0) < n_{core} \quad (6)$$

此現象可從模態場分布的物理特性加以解釋。基模的場分布最集中於波導 film 區域，與高折射率介質的重疊積分最大，因此等效感受到的折射率最高， n_{eff} 最接近 film 折射率 n_f 。隨著模態指數增加，模場在橫向的振盪次數增多，能量向兩側 substrate 與 cover 區域滲透的比例也隨之增加。由於 substrate 與 cover 的折射率均低於 film，高階模所感受到的等效折射率因此降低， n_{eff} 逐漸趨近 substrate 折射率 n_s ，最終趨近截止條件（cut-off condition）[6]。



四、 參考文獻

- [1] G. Lifante, *Integrated Photonics: Fundamentals*. Chichester, West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons, 2003, pp. 53–60.
- [2] R. A. Soref, J. Schmidtchen, and K. Petermann, “Large Single-Mode Rib Waveguide in GeSi-Si and Si-on-SiO₂,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 27, no. 8, pp. 1971–1974, 1991.
- [3] J. Lousteau et al., “The Single-Mode Condition for Silicon-on-Insulator Optical Rib Waveguide with Large Cross Section,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 8, pp. 1923–1929, 2004.
- [4] M. M. Milošević et al., “Rib waveguides for mid-infrared silicon photonics,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 26, no. 9, pp. 1760–1766, 2009.
- [5] RSoft Design Group, BeamPROP User Guide, Version 8.3, Ossining, NY: RSoft Design Group, Inc., pp. 20–21, 54–55.
- [6] P. Karasiński et al., “Optical rib waveguides based on sol-gel derived silica–titania films,” *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 16, pp. 5544–5551, 2011.