

逢甲大學學生報告 ePaper

Mode Cutoff for Multilayer Fiber

- 作者:陳冠中、劉威昌、曾志翰
- 系級:光電系四年級
- 學號:D9535559、D9586562、D9586589
- 開課老師:蔡雅芝 老師
- 課程名稱:光電數值模擬實驗
- 開課系所:光電學系
- 開課學年: 98 學年度 第一學期



中文摘要

本實驗的目的是為了能了解多層光纖的特性,以及檢視光在多層光纖 中傳輸的效能,並且熟悉 BeamPROP 模擬軟體的操作。

主要是使用 BeamPROP 模擬軟體的電腦操作部份,利用 BeamPROP 模擬軟體中的參數設定,先設計出一段符合基本元件參數的 Layout 圖,配 合光學以及光纖傳輸的計算公式,以及 BeamPROP 模擬軟體中的檢視功 能,互相比較是否符合所求,其中需注意的是,計算後的模態在模擬時是 否收歛,收斂與否關係到光傳輸時的光功率是否集中不擴散。並且利用程 式內建功能找出 Index Profile 圖形,再找出各模態收斂時的圖形及折射率, 最後檢視此元件成為 single-mode 時的 cutoff wavelength 和 cutoff core diameter。

由模擬後的結果得知,由於多層光纖是步階式光纖的一種,而步階式 的折射率變化,它的傳遞都是靠光打進兩介質間造成全反射來行進。多層 光纖是由多種介質組合而成,所以可依據想要的最低色散值改變介質間的 組合。如果光纖本身所模擬出的模態會發生未收斂,則打進去光纖的訊號 傳遞就不能很完全的傳送到輸出端,因此使得光功率無法集中而擴散。如 果要使多模光纖改變為單模光纖時,可透過改變光纖纖核直徑或改變入射 光的波長,方能轉變為單模光纖。



關鍵字:BeamPROP、cutoff-wavelength、cutoff core diameter、Layout、

多層光纖

目 次

I. 簡介	3
Ⅱ.原理	3
III.步驟	6
IV.結果分析/討論	10
V.結論	13
VI.參考文獻	14



一、簡介:

光纖可分為單模光纖(single-mode fiber)及多層光纖(multilayer fiber)兩類。光 束在單模光纖中傳播時,會產生材料色散、波導色散等,這些都會產生相應光功 率的擴散。但多層步階折射率光纖(step-index fiber)中,則會有模態色散。主要是 不同的模態,光束的傳播速度都不相同,因此有模態色散。多層光纖(multilayer fiber)是為了使某範圍波長色散值較小而設計。

BeamPROP 是一個整合電腦輔助設計 (CAD) 與模擬 (Simulation) 程式的 專業軟體,因此我們利用此軟體,設計一截簡單的多層光纖,並計算該光纖所有 的模態及 Cutoff wavelength 並且檢視 Cutoff core diameter。

二、原理:

多層光纖(multilayer fiber)具有讓色散平坦化的功效。通常光纖在某特定 波長時其色散值為零。而為了使光纖變成在某特定波長範圍內的色散值最小(而 不再是某特定波長),可以改變光纖內部之折射率分佈。而多層光纖這種雙包層 的設計可以使材料色散和波導色散這兩色散曲線平坦化。

多層光纖的優點在於它的數值孔徑(NA 值)比單模光纖大,因此在耦合時能 接受更多的光功率及多角度的變化,使更多的光功率在光纖中傳輸,因此能比單 模光纖搭載更多的訊號量。由於光纖的所有模態的模擬結果,若是不收斂,則表 示光功率在光纖中傳播到最後會有所損耗掉,因此模擬時,務必使所有模態的模 擬結果完全收斂,才能達到光功率在光纖中傳輸的完整性。

在平面波導中,導光侷限在1D空間,必然通過波導軸平面,因此呈現的模態不是TE mode,就是TM mode。在光纖中為2D侷限,導光未必通過光軸,可分為子午光(meridional ray)及斜射光(skew ray),如圖一



子午光及斜射光都會形成導引模(guided modes),且各有對應的傳播常數 (propagation constant)。子午光的導引模可區分為TE mode及TM mode,而斜射光 導引模含Ez及Bz分量,因此為混合模(hybrid modes),而在弱導引光纖(weakly guiding fiber)中,導引模會很接近平面偏振之行進,使Ez及Bz分量近似為E與B垂 直Z軸的線偏振波(linearly polarized, LP),所以在垂直Z軸的平面上,場的大小會 變化 E_{lm} (r, Φ)會趨近於線性偏振波 LP_{lm} 。其中l、m由邊界條件可得。(課程講義Unit 4)。

由於步階式多層光纖是以兩種或多種不同折射率的介質構成,因此,當入射 光束的入射角大於臨界角時,會產生全反射

$$\frac{\partial \mathcal{D}}{\partial \mathcal{D}} || \mathcal{D} || \theta \ge \theta_c = \sin^{-1}(\frac{n_2}{n_1}) \tag{1}$$

此為全反射條件。由(1)的全反射條件,及基本步階折射率光纖(step-index fiber)的波導性質,可推導一V值

$$V \equiv \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{2}$$

其中a為纖芯半徑、 λ為入射光波長、n2為外層介質的折射率。而基本步階折射率光纖(step-index fiber)的傳播常數,會隨著波導特性及波長而變,因此,我們可以定義出歸一化傳播常數,並利用與V值的對應關係,可得



圖二傳播常數b對V值的對應圖。

一V值與歸一化傳播常數的對應圖(如圖二),用來得知計算後的V值所產生的模 數。當多層光纖的V值小於2.405時,其所有模態會收斂呈現出單膜光纖的結果。 以下是本實驗使用之光纖的元件參數

基本元件參數:

- Free space wavelength: 1.55 μm
- Core index:

1.45,
$$\frac{a}{3} < r < \frac{2a}{3}$$

1.47, otherwise

- Cladding index: 1.44
- Total core diameter: 8.2 μm
- Length: 10000 μm



圖三 欲設計之光纖示意圖

變數:

- 將 z 軸的 step_size 由預設值 10 µm 開始,逐次減半,直至計算結果收斂。

4

在 CAD 中設計出符合圖 三折射率分佈的 $n(x) = n_0 + \Delta \cdot f(x)$ 。 得 index profile f(x)為

$$\begin{cases} n_a = n_0 + \Delta(1+A) \\ n_b = n_a + \Delta(0+A) \end{cases}$$
(3)

將(6)式中的兩式聯立得

$$\Delta = n_a - n_b \tag{4}$$

$$A = \frac{n_b - n_0}{n_a - n_b} \tag{5}$$

其中 n_a 為1.47、 n_b 為1.45、 n_0 為 cladding index。

利用 beamPROP 軟體中的步階函數 step(x) 〔參考文獻[1]、[2]〕

$$step(x) = \begin{cases} 1 & 0 \le x < 0.5 \\ 0 & 0.5 < x < 1 \end{cases} \quad \{x \in [0,1) \}$$
(6)

依元件參數中的 Core index 條件中的 r 位置,可定義出適當的 step(x)函數輸入於 User Profile f(x)中,得

$$step\left(\frac{3}{2}x\right)$$
 (7)

其中,A為位移量。因為基本式中皆令位移量A等於零,因此需再將A加回來, 得步階函數

$$step\left(\frac{3}{2}x\right) + A$$
 (8)

以上用來為 symbol 設定的初始條件。

三、步驟:

 開啟 beamPROP 程式後,將條件基本參數輸入,所有參數如圖四,再到 Symbol 去新增所需要用到的參數 Length、N_a、N_b、N₀、N、A、step_size 以及 delta 需設定為 N_a-N_b

(Nb-N0)∕(Na-Nb)
width
10000
0
1.44
1.47
1.45
0
1.44
8.2
Na-Nb

圖四 参数设定

 設計一 Layout,設 Z 軸長度為 Length,另外利用程式內建的步階函數(step function) step(x),設定新的 User Profile 1 為 step(1.5x)+A,如圖五設定完成 初始設定完後先 test 看圖是否符合所要的折射率分佈。

3D Structure Type:	Default (Fiber) 💌	Index Taper: None	▼ Malar	inla	User Profile Edito	pr	
Index Profile Type: Combine Mode:	User 1 💌	Width Taper: None Height Taper: None		ers Symbols	User Profile:	User Pro	file 1 💌
Merge Priority:	0	X Pos Taper: None	Profi	les More	Source Type:	Expressi	on 💌
Display Color: Seg Orientation:	Default 💌	Y Pos Taper: None	Tap	ers	Expression [f(x',y',z'); x'	/y'=-1,1; z'=0,1; f=	0,1]:
Starting Vertex		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Ending Vertex		Step(1.3 A)*A	Ϋ́	
Material	Properties: Locally	Defined 🔹	Material Pro	operties: Locally De	Points: 101	101	101
Index Di	iference: delta		Index Differ	ence: delta	Min: -1	-1	0
Index (in	iag part): alpha		Index (imag	part): alpha	Max: 1	1	1
Compon	ent Width: width		Component	Width: width			
Compon	ent Height: height		Component	Height: height	OK Canc	el Test	Symbols
X:	Y:	Z:	X:	Y:			
Deference	0	lo Defenses	Deference	0	[10000		
Tupe: Nono 1	Tupe: Nono	Tupe: Nono -	Tupe: Offect -	Tupe: Offect	Tupe: Offect =	Ř.	
NUM			Offeet Value	□ Type. Ulisec	Officet Volum		
0					- Length	1	
Relative To:	Relative To:	Relative To:	Relative To:	Relative To:	Relative To:		
Component: 0	Component: 0	Component: 0	Component: 1	Component: 1	Component: 1		
Madau Cr.d.	I Markau Rough	- Vorteur Chat -	Mortour Chart		Votor Chat -	T	

圖五 Layout 設定

點選■Display Material Profile,在 Display Mode 選擇 High code,按下 OK 後觀察所設計之 Layout 的 Index Profile 是否符合所需要的圖形,如圖六。



圖六 heightcoded 圖形

4. 點選 Launch Field,在 Launch Field 點選 New 使它為 1, Type 設定為 Gaussian, 而 Position X 和 Position Y 都設定為 2, 如圖七。因為高斯函數為對稱函數 需破壞其對稱性才能掃描出所有模態,所以才要改變 Position X 與 Y 的參數。

Launch Field: 1	New	Pow Phas	er: 1 se: 0
		J	Polarizer
-Launch Field Option	15		
Туре:	Gaussian 💌	Pathway:	0 << >>
Tilt:	No 💌	Background N:	default
Mode:	0	Cover N:	default
Mode Radial:	1	Delta N:	default
Random Set:	0	Phi:	default
Input File (E-Major):		Theta:	default
Input File (E-Minor):		Width:	default
Align File:	No 🔻	Height:	default
Normalization:	None 💌	Length:	default
		Position X:	2
		Position Y:	2
		Position Z:	default
		Neff:	default
	ОК	Cancel	Symbols

圖七 Launch field 設定

5. 以上步驟都合乎要求後,點選 Compute Mode,設定 Z 軸的 Grid size 為 step_size,如圖八。按下 OK 後即可看到所有的模態及各模態的折射率。

Mode Cutoff for Multilayer Fiber

		×			Y			z			
	Current Value	Default Value	Use Defs	Current Value	Default Value	Use Defs	Current Value	Default Value	Use Defs		
Domain Min:	-12.1	-12.1	~	-12.1	-12.1	~	0	0			
Domain Max:	12.1	12.1	~	12.1	12.1	•	10000	10000			
Grid Size:	0.1	0.1		0.1	0.1	~	2.5	10	1	step_si	ze
Slice Grid:	0.1	0.1	•	0.1	0.1	~	5	5			
Monitor Grid:							2.5	2.5			
	BPM Opt Vector M Polarizat	ions lode:	niform None TE	С Semi С ТМ	rid Uption:	8	Adv	ew Gind			
	Di	oplau Mod	~	0	utout Prof		E	stimated 0.000 m	lime:		
Launch	. [0	ontourMa	e. 5 (XY)		DYTYRRE	in. I		Save Sett	ings		
Symbols		Display			Output .			ок			
Mode Option	IS						Ī	Cance	1		

圖八 Compute Mode 設定

 點選 ♦ ,設定Scan為BP Mode Solver、變數為width、增加模式為Fixed Increments、掃描範圍從最低4到最高9、掃描步幅Incr.為0.2,如圖九。再到 Measurements選擇bp_mode_neffr,如圖十。之後開始按OK掃描。

enera	al		Cluster option	s	Out	put Prefix:		25	-
Sca	an BP Mode Solver	- F	Enable clu	stering	wie	ith	Sa	ve settings	ОК
Opt	timize User	N	lo, processes	0	_	Symbols	т.	est metric	Cancel
/indov	w: Verbosity:	т	ask group siz	ze: 0		dvanced	i —	Help	Resume
i i	Normal (• Low Minimize C Medium						·		-
CI	Hide C High	I.] Skip maste	Setting	JS Pr	eferences]		Post-proces
		1							
ndep	p. vars Measurements	Metrics							
Inde	ependent variables (scan) - th	e quantities to	varv						
maa			, all						
	Meta:								
	Mastalla	Active	Type	Losuz	Hiah	Incr.	Stens	Function	Meta
	variable	ACUAC	1,900	LOH			otopo		mota
1	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26	Ľ	motu
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26	E	
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26	E	
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
	width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
	Available symbols:	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
-	Available symbols:	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		
	Available symbols: width	Y	Fixed inc	4	9	0.2	26		

圖九 width Scanner 設定

Mode Cutoff for Multilayer Fiber

eneral	Cluster options	Output Prefix:		
Scan BP Mode Solver 👻	Enable clustering	width	Save settings	OK
Optimize User	No. processes: 0	Symbols	Test metric	Cancel
indow: Verbosity:	Task group size: 0	Advanced	Help	Resume
C Minimize C Medium C Hide C High	Skip master Settings.	Preferences		Post-proces
ndep. vars Measurements Me	etrics			
Measurements - intermediate quantities	to build the metric function			
Available:	Act	ive:		
bp_mode3d_m00 [3D profile of m bp_mode3d_m01 [3D profile of m	ode m0(bp	_mode_nettr		Special Symbols
bp_mode3d_m00 (3D profile of m bp_mode3d_m01 (3D profile of m bp_mode_neff_matrix [Complete mod bp_mode_neffc_0 [Complex effectiv bp_mode_neffc_1 [Complex effectiv bp_mode_neffc_1 [Complex effectiv bp_mode_neffic_1 [Imag part of effective bp_mode_neffic_0 [Imag part of effective]	ode m00 A bp. ode m0 Add al effect e index two inde trive inde trive inde trive inde	mode_nettr		Special Symbols
bp_mode3d_m00 [3D profile of m bp_mode3d_m01 [3D profile of m bp_mode_neffmatrix [Complete mod bp_mode_neffc0 [Complex effectiv bp_mode_neffc1 [Complex effectiv bp_mode_neffc1 [Complex effectiv bp_mode_neffc1 [Imag part of effective bp_mode_neff1 [Imag part of effective bp_mode_neff1 [Imag part of effective mode_neff1 [Imag part of effective] Update Edit meas Deletive	ode mOl A odd effec e index tive inde ctive inde ctive inde te meassurement te meassurement	mode_nettr		Special Symbols
bp_mode3d_m00 (3D profile of m bp_mode3d_m01 (3D profile of m bp_mode_neff_matrix [Complete mod bp_mode_neffc_0 [Complex effectiv bp_mode_neffc_1 [Complex effectiv bp_mode_neffc_1 [Complex effectiv bp_mode_neffic_1 [Imag part of effective bp_mode_neffic_1 [Imag part of effective mode_neffic_1 [Imag part of effective] [Update	ode m00 Add bode m0r Add all effect Fremove re index Fremove twe inde Vering index twe inde User measuremer te meas User measuremer	It Accept Rejev	et _	Special Symbols
bp_mode3d_m00 (3D profile of m bp_mode3d_m01 (3D profile of m bp_mode_netfmatrix [Complex effectiv bp_mode_netfc_0 [Complex effectiv bp_mode_netfc_1 [Complex effectiv bp_mode_netfin_1 [Imag part of effectiv bp_mode_netfin_0 [Imag part of effectiv bp_mode_netfin_0 [Imag part of effectiv mode_netfin_0 [Imag_	ode m00 Add bode m00 Add la effect Remove e index Remove two inde User measurement te meas User measurement New meas Name:	Accept	ct Type Scalar	Special Symbols
bp_mode3d_m00 [3D profile of m bp_mode3d_m01 [3D profile of m bp_mode_neffmatrix [Complex effectiv bp_mode_neffc_0 [Complex effectiv bp_mode_neffc_1 [Complex effectiv bp_mode_neffi_0 [Imag part of effectiv bp_mode_neffi_0 [Imag part of effective bp_mode_neffi_0 [Imag part of effective	ode m00 Add jade affecc e index ive inde tive inde te meas User measurement New meas Name: File:	t Accept	ct Type: Scalar Indices:	Special Symbols
bp_mode3d_m00 [3D profile of m bp_mode3d_m01 [3D profile of m bp_mode_neff [Complex effective] bp_mode_neffc_0 [Complex effective] bp_mode_neffc_1 [Imag part of effective] bp_mode_nefficient [Imag part of effective] Update Edit meas Deletive] Type: Matrix File: <pre>spreix indices: [:,:] Meaning: 3D profile of mode m00</pre>	de mOl A dode mOl A lal effec e index vive inde vive inde vie vive inde vive inde vinde vive inde vive inde vive inde vinde vive inde vive inde vi	it	ct Type Scalar Indices:	Special Symbols

圖十 Measurements 選擇 bp_mode_neffr

重複步驟5,其中將變數改為free_space_wavelength,Low改為1.5,High改為
 4,Incr.改為0.1,如圖十一,之後開始掃描。

	Variable	Active	Туре	Low	High	Incr.	Steps	Function	Meta
free	e_space_wavelengt	Y	Fixed inc	1.5	4	0.1	26		
dd	Available symbols: free_space_wavelengt	h 💌							Up

圖十一 Wavelength Scan 設定

7. 掃描完後即可得到此元件成為single-mode時的cutoff wavelength及cutoff core diameter。

四、結果分析:

µmneff	m=0	m=1	m=2	m=3	m=4	m=5
step_size=10	1.450338	Х	Х	Х	Х	Х
step_size=5	1.452358	1.440746	1.440649	Х	Х	Х
step_size=2.5	Х	Х	Х	Х	Х	Х
step_size=1.25	1.456723	1.450983	1.450983	1.444215	1.443786	1.44422
step_size=0.625	1.456723	1.450983	1.450983	1.444215	1.443786	1.44422

表一 不同 step_size 下各模態的收斂情形

由此表可知在 step_size = 10µm 時,在模態 m=0 時就未收斂,因此改變其值, 於是將 step_size 減半,在模態 m=2 時也未收斂,而在 step_size = 1.25µm 時,所 有模態發生收斂,為了確保是否真的收斂並再將 step_size 減半,發現有效折射率 值與 step_size = 1.25 時相同,所以在 step_size = 1.25µm 確定收斂。而當 step_size 在 2.5µm 時,由於程式問題,無法得知到底是否收斂的數據。



圖十二 是由表一作圖而來, 佐證在收斂時有效折射率是一樣的



圖十三 各模態的場分佈圖。與收斂時所對應的有效折射率

此圖可看出簡併態在場分佈圖(c)與(d)為簡併,(e)與(f)也為簡併態,因為可看出 其場分佈旋轉了90°。



圖十九 設 width 為變數掃瞄出來的圖

使用 Scan 功能掃描出 Mode 0 與 Mode 1 時的 width,由曲線的趨勢可以得出在寬度小於 4.4µm 只有基模的存在。



圖二十 設 free_space_wavelength 為變數掃瞄出來的圖

使用 Parameter Scan 功能掃描出 Mode 0 與 Mode 1 時的 wavelength,由曲線的趨勢可以得出在波長 2.8 µ m 為截止波長。而 Scan 的參數設定是由較大的範圍與較大的格點先掃描一次,依結果最後才在最接近的值設較密的格點使曲線能較易看出趨勢。

五、結論:

光纖的種類不管是單模光纖、多模光纖或多層光纖只要是步階式的折射率變 化,它的傳遞都是靠光打進兩介質間造成全反射來行進。如果光纖本身所模擬出 的模態會發生未收斂,則打進去光纖的訊號傳遞就不能很完全的傳送到輸出端, 會因為此原因而有所損耗。而當光纖收斂時,總共出現四種模態此與利用公式計 算出來的 V 值再去對應圖二找出四個模態相符,表示此數據無嚴重誤差。

要使多模光纖改變為單模光纖時,可透過改變光纖纖核直徑或改變入射光的 波長,方能轉變為單模光纖,由程式模擬出圖十九與圖二十,曲線的趨勢可得使 其變為單模光纖的參數。所以得到當λ>λ。時可得到只有一個模態在光纖中傳 遞,當 diameter 小於所量測出 4.4μm 時,為單模光纖。



參考文獻

[1]BeamPROP 8.1 User Guide

[2]RSoft CAD Environment 8.1 User Guide

[3]Snitzer, E., "Cylindrycal Dielectric Waveguid Modes," J.Opt.Soc.Am 51:491,1961

[4]S.O.Kasap," Optoelectronics and Photonics Principles and Practices"

