

國立臺灣大學電機資訊學院光電工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics
College of Electrical Engineering and Computer Science

National Taiwan University

Master Thesis

光柵式側向耦光技術應用於高功率半導體雷射

陣列之研究

Study of Grating Based Side-coupling Technology for
High Power Laser Diode Array

楊松蒲

Song-Pu Yang

指導教授：黃升龍 博士

Advisor: Sheng-Lung Huang, Ph.D.

中華民國 104 年 7 月

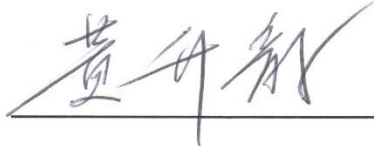
July 2015

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

光柵式側向耦光技術應用於
高功率半導體雷射陣列之研究
Study of Grating Based Side-coupling Technology
for High Power Laser Diode Array

本論文係楊松蒲君（學號 R02941077）在國立臺灣大學
光電工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國 104 年 7 月
27 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：



（指導教授）

李穎玫
黃傑輝

黃鼎偉

所 長

林恭如

致謝



兩年碩士生涯一閃即逝，過程中辛苦付出卻也收穫不少。首先感謝我的論文指導教授黃升龍老師，老師學問淵博、思緒清晰，每當學生有困惑時，都能及時提點，找出關鍵點提供思考方向；另外老師對於學術研究之熱誠，也令我相當欽佩！也要特別感謝兩年來不斷協助我的李穎玟教授，在研究內容上以及解決問題上都能及時幫助。能夠在兩位老師指導下有所學習及進步，是我碩士生涯中的榮幸。

此外要感謝管傑雄老師提供電子束微影系統，使得我們可以花費優惠價格來使用貴重的微影術機台，也要感謝管老師實驗室的學長，都能及時的給予實驗上的建議，以及辛苦維護機台使其平穩的運作。感謝李嗣涔老師免費提供之蒸鍍機及毛明華老師提供之乾式蝕刻機台，使得我研究中順利完成樣品。感謝物理系無塵室管理者黃智穎黃大哥，提供原子力顯微鏡及研究上的幫忙。感謝我的口試委員，黃鼎偉教授、李穎玟教授以及管傑雄教授，於口試中提供許多寶貴的建議，使得論文更加完整。

非常感謝實驗室中學長們的幫忙，尤其黎延垠學長經常幫忙我思緒的整理以及提供研究中的意見，令我受益良多，感謝王世昌學長平時的提點、鄭東佑學長在實驗模擬中的幫忙，感謝同屆同學平時在學習、研究中互相幫忙及討論，使得我的兩年碩士生涯多采多姿。

最後，我也要特別感謝我的父母以及家人的支持，有了你們平時的關懷與鼓勵，我才能順利的進行研究，才能有今日的成就！

中文摘要



近年來，利用半導體雷射激發之光纖雷射逐漸成為高功率雷射主流，藉由光纖輸出，此種雷射具有極佳的光束品質、窄線寬及高電光轉換效應等優點。半導體雷射陣列是一種可靠的高功率雷射激發光源，並且廣泛地使用在各種雷射幫浦應用上。本實驗室於 2011 年提出半導體雷射陣列之側向式光柵耦光系統，將 976-nm 半導體雷射陣列耦入內纖衣尺寸為 400 μm 光纖，其輸出功率為 21 瓦並達到 50% 耦光效率，但該研究提及第二次繞射效應所造成之耦光效率損耗，將使得光源要耦入更小內纖衣尺寸之光纖更為困難。

因此在本論文中，主要將光柵週期改變至 675 nm，在內纖衣尺寸為 400 μm 時，可以減少第二次繞射效應以提高耦光效率達至 67.63%，將光纖內纖衣尺寸縮小至 250 μm ，其耦光效率可接近光源以 680-nm 光柵耦入 400- μm 內纖衣光纖，因此提升光纖輸出亮度 2.36 倍；另外引用基因演算法方式，可以提供設計光柵及優化之方向，如解決第二次繞射損耗及折射率匹配液損耗等問題。在本論文中，利用基因演算法設計出光柵之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射效率呈現非對稱型態，並以增強 $+1^{\text{st}}$ 階繞射效率解決折射率匹配液帶來之損耗。此外，本論文將討論系統結構參數與光學架構因素損耗之關係，以達到高亮度、高功率輸出之光纖雷射側向耦光系統。

關鍵字：高功率光纖雷射、半導體雷射陣列、光柵、光柵耦合器、繞射

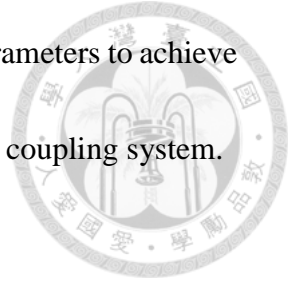
Abstract



In recent years, diode-pumped fiber lasers have become main-stream in the high-power laser field, owing to their superior beam quality, narrow linewidth, and high electrical-optical conversion efficiency. Besides, laser diode array (LDA) is a reliable high-power pump source, and it has been widely used in many applications. In 2011, we have demonstrated a side-coupling scheme, a 50% coupling efficiency was achieved by using 680-nm period gold-embedded grating to couple 21-W, 976-nm LDA pump source into a 400- μm double-clad passive fiber. But in such a system, there was coupling loss caused by the secondary diffraction. The issue made it harder to couple pump source into a small cladding fiber.

In this work, we achieve 67.63% coupling efficiency into a 400- μm fiber by using a 675-nm grating. In addition, even using the fiber with the cladding diameter to 250 μm , the coupling efficiency is as good as the above mentioned case. In this result, the brightness has been enhanced by a factor of 2.36. Secondly, we introduce a genetic algorithm to optimize the grating coupling efficiency by eliminating the secondary diffraction and index-matching-gel coupling loss. We design an asymmetrical $\pm 1^{\text{st}}$ -order-diffraction-efficiency grating to increase $+1^{\text{st}}$ order diffraction efficiency, and reduce the coupling loss caused by the use of index-matching gel. Finally, we discuss

the correlation between coupling loss issues and system structure parameters to achieve a high brightness, high power fiber laser output with a compact side coupling system.



Keywords: high-power fiber laser, laser diode array, grating, grating coupler, diffraction



目錄

致謝.....	iii
中文摘要.....	iv
Abstract.....	v
圖目錄.....	3
表目錄.....	6
第一章 緒論與研究動機.....	7
第二章 高功率光纖雷射簡介.....	9
2.1 雙纖衣光纖.....	9
2.2 內層纖衣幫浦技術.....	12
2.2.1 端面幫浦技術.....	12
2.2.2 側向幫浦技術.....	14
2.3 光柵輔助側向耦光技術.....	16
2.4 各項技術亮度耦合效率比較.....	17
第三章 側向耦光之光學系統原理.....	20
3.1 側向耦光之光學架構.....	20
3.2 反射光柵之二次繞射損耗.....	21
3.3 折射率匹配液造成之損耗.....	24
第四章 側向耦光光柵設計與製作.....	26
4.1 側向耦光光柵設計.....	26
4.1.1 光柵結構理論.....	26
4.1.2 矩形結構光柵之模擬.....	28
4.1.3 梯形結構模擬.....	30
4.2 基因演算法應用於光柵設計.....	32
4.2.1 基因演算法介紹.....	32
4.2.2 基因演算法法則及演算過程.....	33
4.2.3 基因演算光柵模型.....	35

4.2.4 基因演算法優化光柵結構	38
4.3 側向耦光光柵製作	40
4.3.1 內嵌式光柵製作與流程	40
4.3.2 基因演算法光柵製作流程	41
第五章 側向耦光光柵實驗與結果	44
5.1 半導體雷射陣列光源特性	44
5.2 側向耦光光柵實驗	48
5.3 基因演算法光柵實驗	56
5.4 無慢軸透鏡側向耦光光柵實驗	59
5.5 結果與討論	62
第六章 結論與未來展望	65
6.1 結論	65
6.2 未來展望	65
參考文獻	67

圖目錄



圖 1- 1 光柵側向式耦光基本架構	7
圖 2- 1 雙纖衣光纖端面結構圖	9
圖 2- 2 光纖截面折射率分布圖	10
圖 2- 3 內纖衣幫浦雷射機制示意圖	10
圖 2- 4 光纖雷射連續輸出功率演變圖	11
圖 2- 5 內層纖衣幫浦端面耦光之光學系統設計	13
圖 2- 6 V 型凹槽(V-groove)側向式耦光機制示意圖	14
圖 2- 7 嵌入式鏡面(embedded-mirror)側向式耦光機制示意圖	15
圖 2- 8 光纖斜角拋光之側向式耦光機制示意圖	16
圖 2- 9 側向式光柵耦光之系統架構圖	17
圖 2- 10 側向式光柵耦光系統之架構圖	17
圖 3- 1 側向耦光系統立體圖	20
圖 3- 2 側向耦光光學架構頂視圖	21
圖 3- 3 第二次繞射損耗圖示	22
圖 3- 4 第二次繞射損耗模擬架構圖	23
圖 3- 5 光源入射角度 80° 至 90° 之 0^{th} 、 1^{st} 、 2^{nd} 繞射效率圖	24
圖 3- 6 折射率匹配液損耗示意圖	25

圖 4-1 光柵相位匹配公式圖	26
圖 4-2 各種光柵形狀示意圖	27
圖 4-3 各種光柵形狀模擬效率圖	28
圖 4-4 矩形結構內嵌式光柵之基本架構	29
圖 4-5 矩形式光柵結構 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率之寬度與深度關係圖	30
圖 4-6 光柵結構示意圖	31
圖 4-7 梯形式光柵結構 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率之寬度與深度關係圖	32
圖 4-8 基因演算法基本流程	33
圖 4-9 染色體編碼方式	34
圖 4-10 基因演算法交配方式	35
圖 4-11 (a)基因演算法結構應用於光柵示意圖, (b)基因演算法結構使光 柵繞射效率不對稱之現象	36
圖 4-12 基因演算法程式區塊流程圖	37
圖 4-13 基因演算法結構示意圖	38
圖 4-14 基因演算法結果收斂狀況圖	39
圖 4-15 內嵌式光柵製作流程圖	41
圖 4-16 內嵌式光柵製程照片	41
圖 4-17 光阻倒塌現象之 SEM 圖	42
圖 4-18 基因演算法光柵製作流程圖	43

圖 4- 19 基因演算法 lift off 製程照片	43
圖 5- 1 側向耦光系統實驗架設圖	45
圖 5- 2 半導體雷射陣列光源 L-I 曲線圖	46
圖 5- 3 半導體雷射陣列頻譜圖	47
圖 5- 4 第二次繞射損耗、光柵週期及內纖衣尺寸關係示意圖	49
圖 5- 5 折射率匹配液塗佈於光柵之實驗圖	50
圖 5- 6 側向耦光量測系統	51
圖 5- 7 680-nm 光柵 400- μ m 內纖衣光纖耦光效率圖	52
圖 5- 8 折射率匹配液為 50 μ m 之側向耦光效率圖	53
圖 5- 9 折射率匹配液厚度造成耦光損耗示意圖	54
圖 5- 10 折射率匹配液厚度之影響於耦光效率圖	55
圖 5- 11 基因演算法結構於 10 mm 光柵中效率示意圖	56
圖 5- 12 基因演算法結構耦光效率圖	57
圖 5- 13 側壁蝕刻角度 SEM 圖	58
圖 5- 14 基因演算法結構 SEM 圖	59
圖 5- 15 (a)實驗架構圖, (b)無慢軸鏡耦光效率圖	60
圖 5- 16 光柵週期 675 nm 慢軸方向角度效率圖	61
圖 5- 17 光柵週期、 $\pm 4^\circ$ 繞射效率及第二次繞射損耗面積比較圖	61
圖 5- 18 基因演算法結構與側壁角度繞射效率關係圖	62

圖 5- 19 光柵週期、內纖衣尺寸、LDA 長度與第二次繞射效應關係圖

64

表目錄

表 2- 1 不同光源耦合機制下光亮度與光亮度轉換效率之綜合比較表	19
表 3- 1 第二次繞射損耗關係	22
表 3- 2 折射率匹配液損號關係	25
表 4- 1 不同金屬表面對於相同週期之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率比較.....	29
表 5- 1 半導體雷射陣列輸出功率與波長對應表	47
表 5- 2 10-mm 光柵之第二次繞射損耗.....	49
表 5- 3 折射率匹配液為 50 μm 之側向耦光效率表	53
表 5- 4 側向耦光理論值與實驗值比較表	55
表 5- 5 結構參數與架構因子關係表	63

第一章 緒論與研究動機



近年來，高功率光纖雷射發展迅速，高瓦數輸出及單頻之高瓦數輸出光纖雷射光源架構相繼提出，在多種系統架構中，目前以半導體雷射幫浦之光纖雷射逐漸成為高功率雷射主流，其具備極佳的光束品質、窄線寬、高電光轉換效率等特性。在高功率半導體雷射種類中，半導體雷射陣列能夠提供較穩定高瓦數的幫浦雷射輸出，目前已被廣泛應用於多種雷射系統架構。

在側向耦光技術中，為了保有半導體雷射陣列(laser diode array; LDA)本身之高效能與高亮度特性，我們試著以側向式耦光技術將光源耦合進入光纖內纖衣中。圖 1- 1 為光柵側向式耦光基本架構，使用 10-mm 半導體雷射陣列作為光源，經由快、慢軸柱狀透鏡與光柵耦合，產生 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光，經由光纖端面耦合進入光纖內纖衣中。

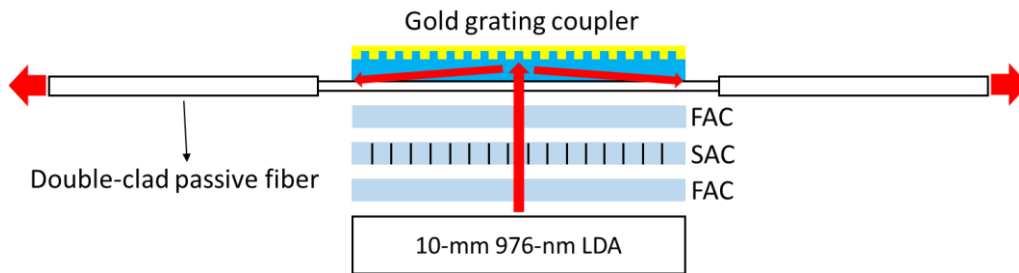


圖 1- 1 光柵側向式耦光基本架構

於本實驗室研究中，已使用側向式耦光系統應用於週期 680 nm 光柵，將 976-nm 半導體雷射陣列幫浦光源耦入內纖衣大小 400 μm 光纖得到輸出功率 21 瓦之雷射 [1]，其耦光效率達 50%，但在使用 680-nm 光柵時，因繞射角度不夠，而產生第二次繞射效應之耦光損耗，此效應在使用更小尺寸之內纖衣光纖時更為嚴重，不利於光纖亮度之提升。

在本論文中，我們將利用原本光學架構，設計一週期為 675 nm 之光柵以減少第二次繞射損耗，並且引入基因演算法來設計光柵，以非對稱性之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射效率解決折射率匹配液之損耗。第二章將詳細討論半導體雷射陣列於端面耦光及側向耦光技術綜合比較；第三章將討論側向式耦光光學系統原理，包含光學架構、

第二次繞射損耗及折射率匹配液損耗；第四章說明側向耦光光柵設計，並闡述光柵理論與模擬設計光柵參數，並且介紹基因演算法概念及如何應用於光柵設計，以及光柵製程步驟說明；第五章則分別闡述半導體雷射陣列光源特性、四個側向耦光光柵實驗、基因演算法光柵實驗、無慢軸透鏡實驗以及最後實驗結果分析與討論。

第二章 高功率光纖雷射簡介



本章節中，介紹半導體雷射陣列於高功率光纖雷射的應用，及目前端面和側面耦光技術與種類，最後與我們的側向耦光架構技術做綜合比較。

2.1 雙纖衣光纖

雙纖衣光纖(double-clad fiber; DCF)為各類光纖中之一種結構，圖 2- 1 為雙纖衣光纖端面結構圖，中心為纖心(fiber core)，包覆於纖心之內層結構即為內層纖衣(inner cladding)，於內層纖衣與最外層包覆的保覆層(jacket)及為外層纖衣(outer cladding)。

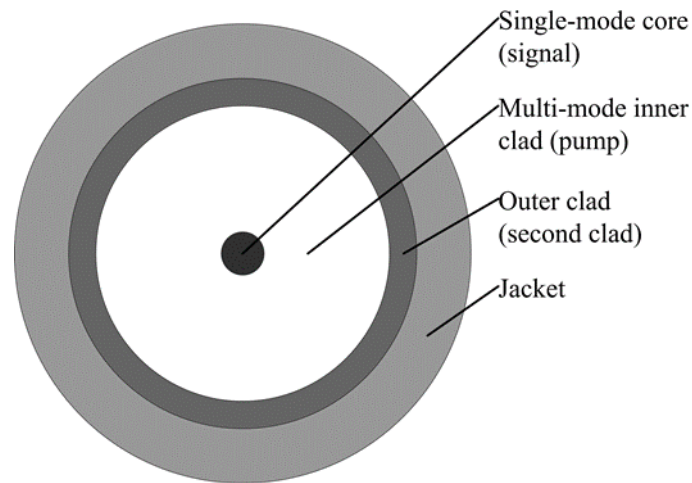


圖 2- 1 雙纖衣光纖端面結構圖

藉由調整內層與外層纖衣折射率來達到不同用途，圖 2- 2 為光纖截面折射率分布圖 [2]，在圖(a)中可以看到內層纖衣折射率低於外層纖衣，信號光源傳遞於纖心中，內層纖衣與外層纖衣來調變色散效應，可利用於光纖通訊中，以減少資訊傳遞失真；圖(b)之內層纖衣折射率高於外層纖衣，此種結構於 1989 年應用在高功率光纖雷射與放大器中 [3]，通常於纖心中摻雜增益介質，其傳遞信號光源與被放大光源，而幫浦光源傳導於纖心與內層纖衣中，將信號光放大之用。在高功率光纖雷射的工作機制中，又以內層纖衣幫浦雷射技術為目前的主流技術，將幫浦光源耦合至一雙纖衣光纖之內層纖衣中，不僅可接受之入射角度較廣以及

數值孔徑(numerical aperture; NA)大等特性，可增加耦合之幫浦光源之效率與雷射輸出。

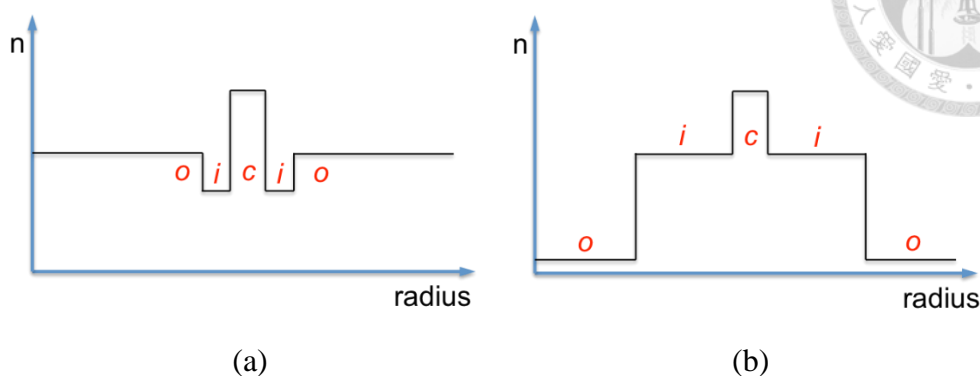


圖 2- 2 光纖截面折射率分布圖, (a)色散補償雙纖衣光纖, (b)高功率光纖雷射與放大器。

圖 2- 3 為內纖衣幫浦雷射機制之示意圖 [2]，圖中低亮度(brightness)幫浦光源由雙纖衣光纖左側入射，由於內層纖衣的具有較大的數值孔徑值，可接收大角度與大範圍之入射區域，當幫浦光源於光纖內層纖衣傳輸的同時，摻雜增益介質之纖心將吸收傳輸於內層光纖衣的幫浦光源而產生雷射訊號光源，雷射訊號光源將藉由選定之雷射共振腔條件，由光纖端面之纖心的部分輸出雷射模態單一且高亮度之放大信號光源。

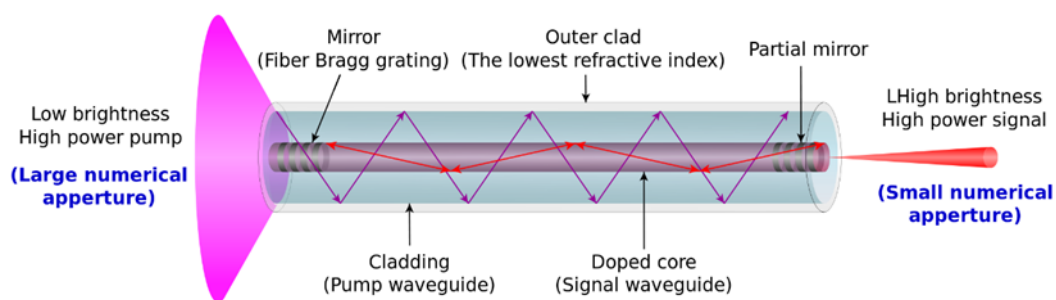


圖 2- 3 內纖衣幫浦雷射機制示意圖 [2]

高功率半導體光源幫浦之光纖雷射技術於近年中有許多突破性的發展，如圖 2- 4 所示以連續波(continuous-wave; CW)之輸出光源為主之高功率光纖雷射[4-11]，由 1990 年代末期約數十瓦輸出至 2010 年可達萬瓦等級輸出。

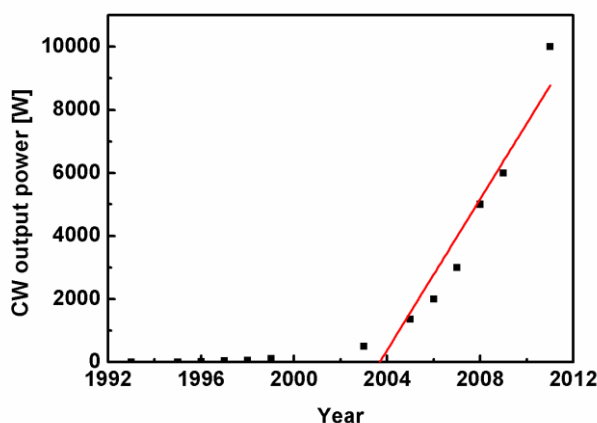


圖 2-4 光纖雷射連續輸出功率演變圖 [1]

另外，高功率光纖雷射對於一般傳統式的固態雷射有多項優勢：光纖本身的雷射共振腔之結構較固態雷射較為細長，因此能提供較大的表面與體積比 (surface-to-volume ratio)，利於高功率操作環境下擁有較好的散熱效率，使得在散熱上之需求降低；光纖雷射光源具有良好的模態場型輸出，我們可藉由設計纖心的尺寸以及纖心與內層光纖衣的折射率差值，使雷射訊號輸出模態為單一場型光源，因為光纖本身波導的特性，能達到良好的濾波效果以及增加雷射輸出的效率。迄今為止，光纖雷射出射光源的高亮度以及高瓦數輸出，以及雷射單一模態場型的輸出等等優點，應用於各個不同的領域上，例如材料切割、非線性光學之研究、醫學美容以及軍事應用等等。

內纖衣幫浦雷射機制可接受大角度的入射光源之特性，因此在幫浦光源選擇上較為廣泛，目前常用之幫浦光源多為半導體雷射或是半導體雷射陣列。半導體雷射不但有良好的能量轉換效率，也能提供高亮度、高功率輸出和較佳的自發輻射生命週期，不僅如此，不同的半導體材料能提供多種輸出波長之選擇，波長範圍由可見光波段到近紅外光波段。直到 2000 年後，半導體雷射陣列與半導體雷射陣列堆疊 (laser diode stack; LDS) 的製作穩定發展，以及在價格上能夠取得優勢狀況下，不僅突破單一半導體雷射輸出瓦數不足之限制，輸出瓦數也可突破千瓦數量級，因此能在雷射市場上馳騁多年 [12]。

雖然半導體雷射陣列與半導體陣列堆疊雷射能有以上之優點，但還是有些許問題尚待克服及解決。由於雷射發光面積在快慢軸方向上大小不同，造成輸出光的快軸與慢軸發散角度亦不同，因此在光源準直上不能僅利用單一傳統之透鏡，必須分別針對快軸與慢軸架設柱狀透鏡，雷射出光之光源大小、波長以及輸出模態之偏振態也將隨著操作狀態不同而改變。

儘管目前半導體雷射陣列有上述困難待需解決，但我們還是能利用其優勢應用於目前的光纖雷射當中。例如半導體雷射陣列輸出功率大以及擁有高亮度輸出之特性，非常適合做為一般雷射之幫浦雷射應用，好比半導體幫浦固態雷射技術(diode-pumped solid-state laser; DPSSL) [13]。於近年中，利用半導體雷射陣列等高功率輸出雷射做為幫浦光源之系統架構日益增加，應用於增益介質的摻鎳光纖(Yb:fiber)系統中為其一例。

2.2 內層纖衣幫浦技術

2.2.1 端面幫浦技術

在內層纖衣幫浦技術中，以端面耦光技術(end-coupling)之系統架設為主流。為了達成端面耦光之系統架設，需要考量半導體雷射陣列之輸出光場型與模態，成為此光學系統設計之兩大因素。由於半導體雷射陣列的光場型為線性約 1 公分之光源大小，運用不同之光學系統架設將光源轉換成方型出光場型(square shape)亦或是圓形出光場型(circular shape)，以端面耦進我們的光纖內層纖衣中達成內層纖衣幫浦之機制。

圖 2-5 為不同之內層纖衣幫浦端面耦光之光學系統設計，圖 2-5(a)為光束扭轉耦合器(beam twister couplers)之技術 [14]，由半導體雷射陣列出光，先經由一顆快軸微型聚焦透鏡(fast-axis collimator; FAC)及特殊設計之光束扭轉陣列器(beam twister array)將光源之橫向出光長度縮短，再經光路設計將光源會聚至光纖之內層纖衣中；圖 2-5(b)為微型步階鏡(micro-step mirrors)之技術 [15, 16]，架構主要是將光半導體雷射陣列光源出光後入射至一步階鏡(step mirrors)中，藉由

特殊設計之角度與多重微型矩陣排列將光源反射至後方的光學路徑，可有效將 1 公分出光面積之光源會聚至一直徑為 $400\ \mu\text{m}$ 的光纖中。

在高功率光纖雷射應用上，若我們需要高瓦數輸出，例如百瓦至千瓦數等級之雷射，大部分以半導體雷射陣列堆疊做為幫浦光光源。於半導體雷射陣列堆疊之端面耦光技術中，主要是以多重之雷射陣列搭配光路徑設計架構來進行耦光，圖 2- 5(c)為 M-blocks 之技術 [17]，將單一陣列雷射藉由多排之組合，透過橫向堆疊與縱向堆疊來達成一超高瓦數輸出之幫浦雷射光源；(d)為 T-bar 之技術 [18]，其設計與 M-blocks 之技術方式雷同。

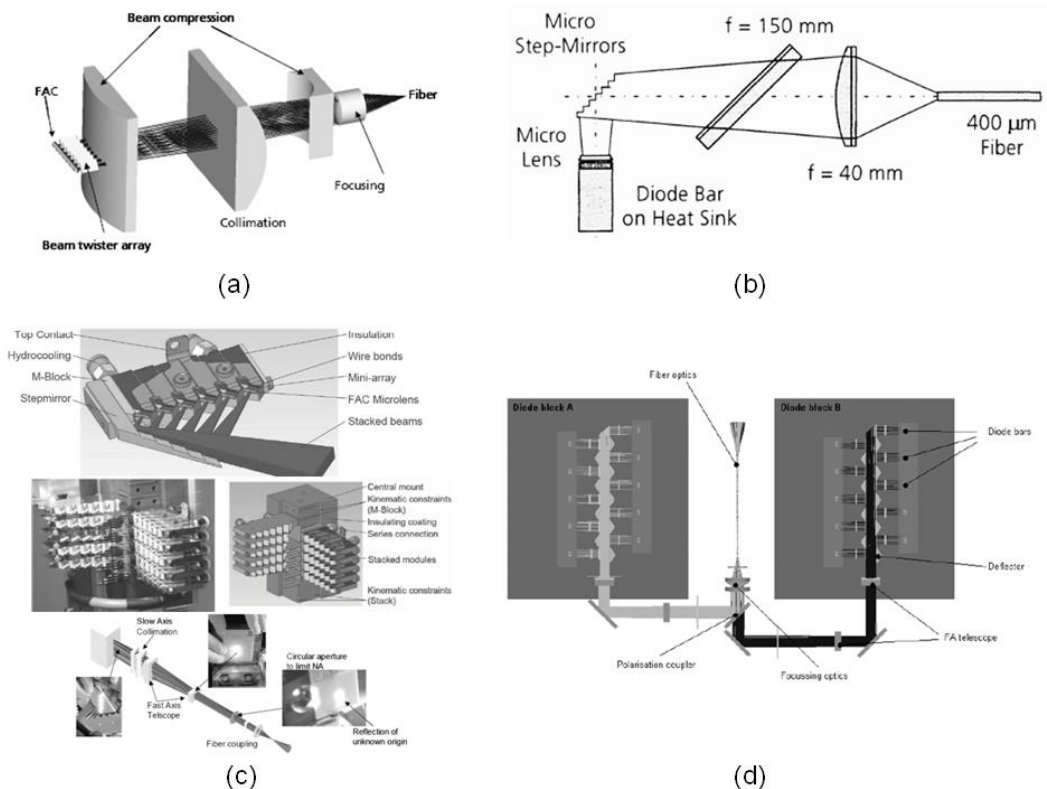


圖 2- 5 內層纖衣幫浦端面耦光之光學系統設計(a)光束扭轉耦合器 [14], (b)微型步階鏡 [15, 16], (c) M-blocks methods [17], (d) T-bars methods [18]

在多種的端面耦合技術中，半導體雷射陣列屬於細長之 1 公分光場型，故將此光源耦合進入光纖端面需要之光學設計較為複雜，另外，光路徑系統之部分元件需要較為精密的設計，不僅提高製作成本也提升系統複雜度及空間。於此光路

徑之設計中，幫浦光源經由不同之光學元件改變場型光源，也會大幅降低其光源亮度之特性。



2.2.2 側向幫浦技術

有別於一般之內層纖衣端面耦光技術，側向耦光技術於近年來也逐步發展中。一般而言，側向耦光之系統架構較端面耦光之架構來的簡易，可接受入射面積大之光源，不僅如此，側向式耦光機制並不被光纖內纖衣的尺寸侷限，也不需要較大的光纖數值孔徑值。

近幾年來，許多側向式耦光系統的架構被提出，圖 2-6 為 V 型凹槽(V-groove)側向式耦光機制示意圖 [19,20]，由單一出光之雷射二極體幫浦光源，經由一微型透鏡後聚焦至增益介質的光纖側面，光纖側面有一特殊切角的 V 型凹槽(V-groove)於光纖之內纖衣中，藉由入射幫浦光源聚焦至 V 型凹槽之側面上並且發生全反射機制，將入射光源反射導入光纖之內纖衣中。

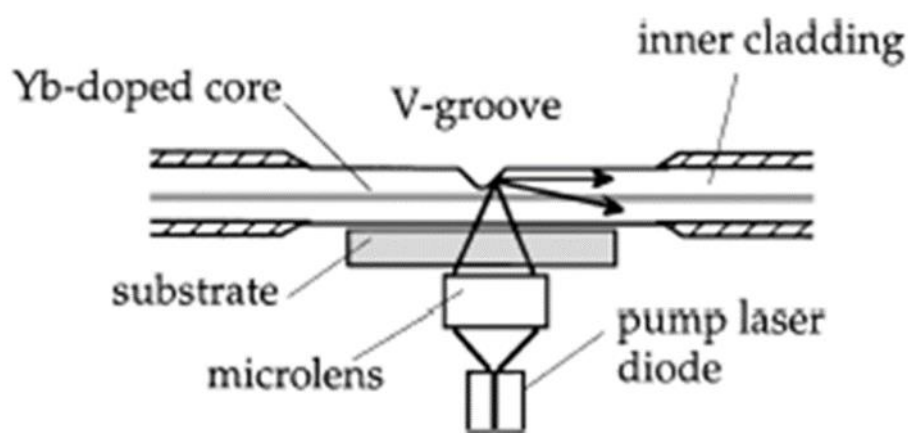


圖 2-6 V 型凹槽(V-groove)側向式耦光機制示意圖 [19, 20]

在 V 型凹槽的側向幫浦系統中，幫浦光源之耦光效率可達到 90%，耦光功率約為 4 W，但幾何結構造成許多問題，其一是必須改變原本光纖的內纖衣結構，對光纖造成物理性破壞，不僅如此，以此方式進行側向式耦光，將無法選擇以半導體雷射陣列做為幫浦光源，故無法提升耦光之功率。

圖 2-7 為嵌入式鏡面(embedded mirror)側向式耦光機制示意圖 [21]，其耦光機制與先前的 V 型凹槽結構相似，主要是藉由一適當設計之曲型鏡面嵌入至光

纖之內纖衣結構凹槽中，由單一出光之雷射二極體做為幫浦光源，經入射至嵌入式鏡面後發生全反射，並將入射光源耦合至光纖之內纖衣中。

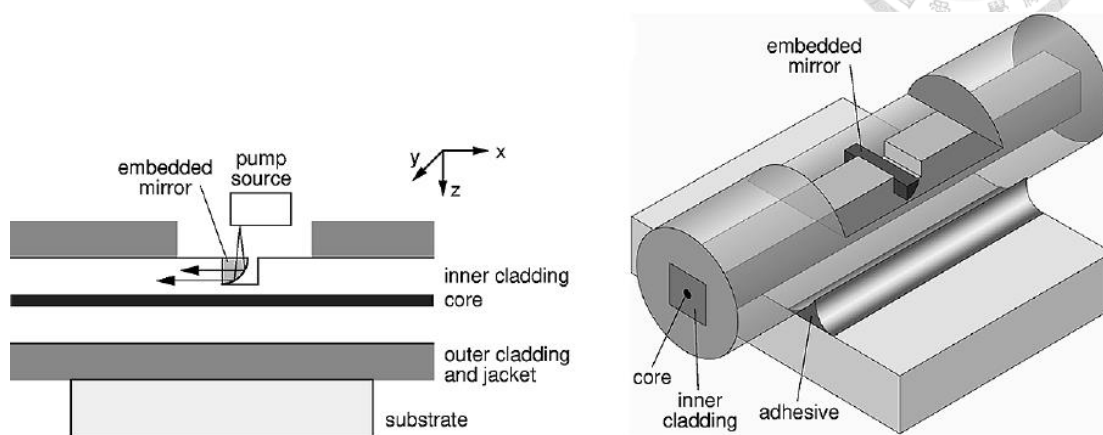


圖 2-7 嵌入式鏡面(embedded-mirror)側向式耦光機制示意圖 [21]

在嵌入式鏡面側向式耦光系統中，整體耦光效率可達到約 80%，耦光功率約為 2.5 W，但先天性的缺點與 V 型凹槽結構相同，都必須先破壞內纖衣之結構，同時也只能用單一出光光源做為幫浦光源，限制了提升耦光功率之可能性。

圖 2-8 為光纖斜角拋光之側向式耦光機制示意圖 [22]，與前面所述之側向式耦光機制不同，主要差異是將一光纖之端面做大角度拋光，再與另一增益介質之光纖側面做熔燒接合，幫浦光源藉由熔接之光纖將光源由側向導入至增益介質之光纖中。雖然整體系統皆以全光纖系統之架構為主，但幫浦光源需藉由一 7x1 之光纖耦合器(fiber coupler)耦合至側向熔燒光纖中，不僅提升了整體系統的複雜性，也相對增加了耦光系統的成本及空間，除此之外，側向熔燒接合的過程中會對兩光纖造成物理破壞，耦合效率也與熔燒接合的良率及熔燒各項參數息息相關。

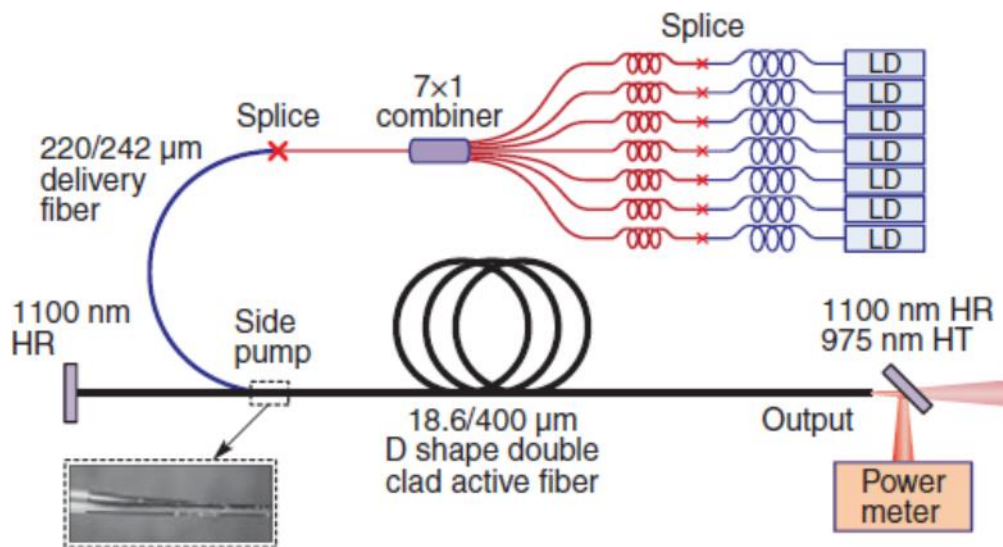


圖 2-8 光纖斜角拋光之側向式耦光機制示意圖 [22]

2.3 光柵輔助側向耦光技術

在側向式耦光技術中，側向光柵式耦光系統於早期先被提出。圖 2-9 為側向式光柵耦光系統之架構圖 [23]，運用單一雷射二極體光源作為幫浦光源，經一顆聚焦透鏡後由光纖側向入射至光柵中，藉由光柵產生之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光後，將幫浦光源導入一面平滑 D 型之內層纖衣中，其耦光效率約為 57%，耦光功率約為 1.2 W。但在此架構之光路設計下，由於幫浦光源正向入射於光柵，光柵之表面金屬將會吸收較大量之幫浦光源而產生熱膨脹，金屬光柵會因熱膨脹而發生形變，導致光柵週期改變及整體耦光效率下降。為了提升整體的耦光效率，我們將改變此架構原先設計，由單一雷射二極體光源改變成 1-cm 長的半導體雷射陣列作為幫浦光源，藉由更完善的光路設計及光柵結構設計以提升整體之耦光功率及效率。

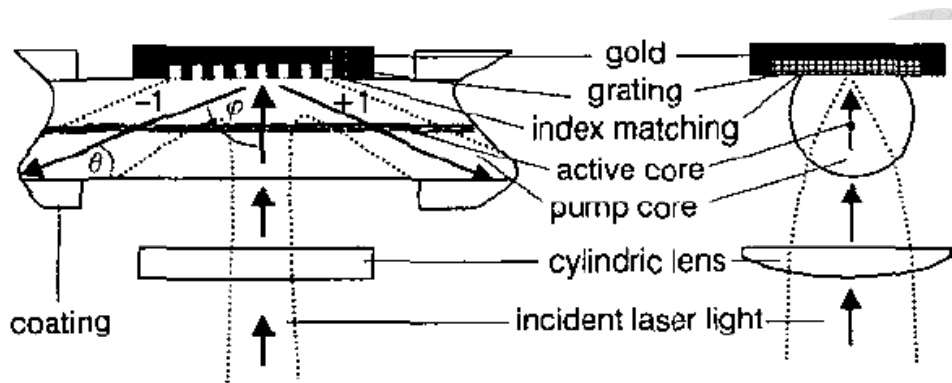


圖 2-9 側向式光柵耦光之系統架構圖 [23]

本實驗室先前之研究中，架設一側向式耦光系統應用於 $400\ \mu\text{m}$ 光纖內纖衣大小之光纖中，幫浦光源為 $21\ \text{W}$ 於 $976\ \text{nm}$ 之雷射波段，達到約 50% 之耦光效率，圖 2-10 為側向式光柵耦光系統的架構圖，圖中為一 $1\ \text{cm}$ 長之半導體雷射陣列，經由一系列之微型聚焦透鏡後入射至反射型光柵，藉由光柵產生之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光後將幫浦光源導入至光纖之內層纖衣中。

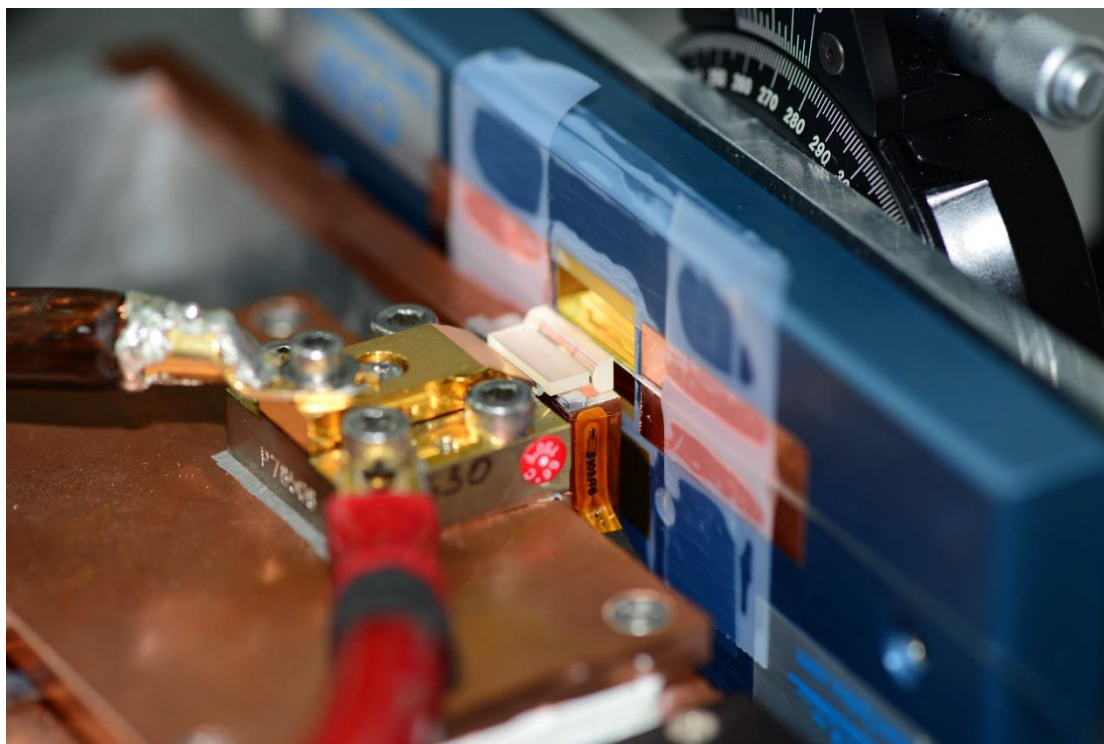


圖 2-10 側向式光柵耦光系統之架構圖

2.4 各項技術亮度耦合效率比較

作為一般光源之光亮度(brightness; B)的定義如下 [24]:

$$B \equiv \frac{P}{\Omega \cdot A_e} = \frac{P}{\pi w_0^2 \frac{1}{4} \pi \theta_0^2} = \frac{4P}{\pi^2 w_0^2 \theta_0^2} \quad (2.1)$$



其中， P 為雷射光源之瓦數功率， Ω 為光源之固態發散角度(solid-angle)， A_e 為光源之發光面積大小， w_0 為雷射光源之光腰大小， θ_0 為雷射光源之發散角度，光亮度之單位定義為 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。由不同的幫浦光源耦合機制，我們可以整理並比較其光亮度值以及光亮度轉換效率於不同耦合機制下的結果，為不同光源耦合機制下之光亮度與光亮度轉換效率之綜合比較表 [1]，由表 2-1 中可得知，運用光柵側向耦光系統能有不錯的光亮度轉換效率，其原因為其他系統的波前扭曲較此架構嚴重，倘若能提升耦合功率或耦光效率，將能再提升光亮度與轉換效率。與先前研究結果之比較，倘若能減少光纖內纖衣之大小，光亮度以及光亮度轉換效率皆能提升，同時也必須將繞射角度增加，以減少第二次繞射損耗，故於我們的實驗架構中，將以 $250 \mu\text{m}$ 之內纖衣大小及週期為 675 nm 光柵作為實驗參數並應用於實驗架構中。

表 2-1 不同光源耦合機制下光亮度與光亮度轉換效率之綜合比較表 [1]

	LD to DCF	LDA to DCF	Multi LD end coupling	Multi-mini bar end coupling	Clad adhesive side coupling	Grating coupling (400 μm)	Grating coupling (250 μm)
Maximum coupling power (W)	2	40	700	1000	100	20	4.65
Brightness (MW/cm ² -steradian)	0.15	0.206	17.7	5.15	1.7	0.103	0.061
Brightness conversion efficiency	1.6%	3.7%	1.2%	0.2%	1.16%	2.78%	2.58%
Power conversion efficiency	89%	71%	50%	50%	90%	50%	40%
Reference	[19,20]	[15]	[17]	[18]	[22]	[25]	

第三章 側向耦光之光學系統原理

在本章節中，我們將討論側向耦光系統架構、光學元件以及耦光機制，在此機制下帶來之損耗效應，並且分別針對第二次繞射損耗與折射率匹配液損耗做說明。

3.1 側向耦光之光學架構

傳統的光纖耦光機制以端面耦光方式為主，運用光學路徑設計，將幫浦光源耦合至光纖的纖心中，但此法僅使用於低功率之幫浦光源。然而，常見的高功率幫浦光源亮度小，若要達到高光耦合效率，必須使用雙纖衣光纖結構，可減少因高功率光源輸出對光纖產生的熱能，可以增加幫浦光之吸收，故高功率光纖雷射的通常會選用將幫浦光源耦合至雙纖衣光纖之內纖衣作為主要的幫浦機制。

在此論文研究我們採用以側向式耦光方式將幫浦光源耦入雙纖衣光纖。一般端面耦合技術所需光路徑設計及光學耦合機制較為複雜，相對地，側向耦光技術利用光纖與半導體雷射陣列幾何結構相似特點可簡化光路設計，對光纖數值孔徑的需求也相對減少，可達到高亮度且高效率的耦光。

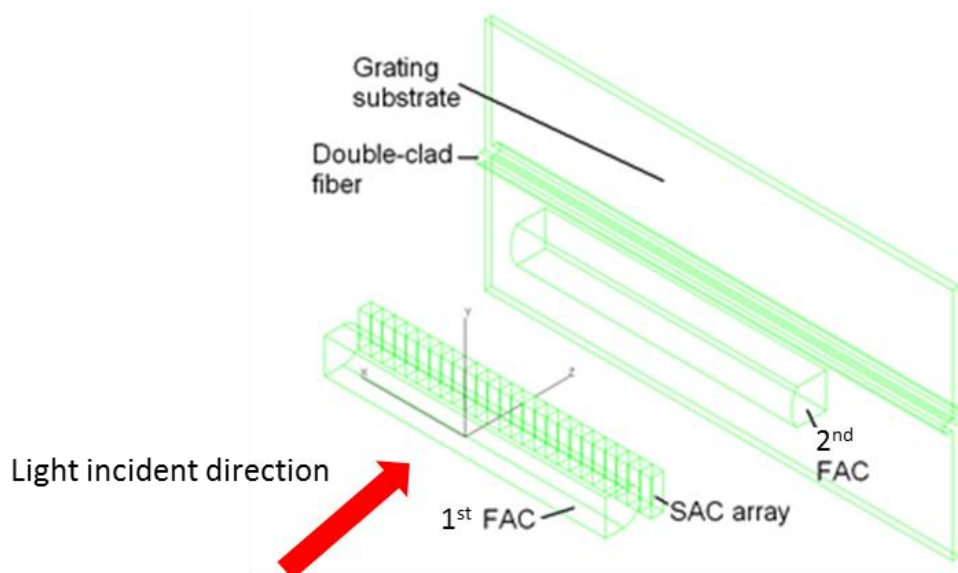


圖 3-1 側向耦光系統立體圖。FAC: fast-axis collimator; SAC: slow-axis collimator

圖 3-1 為側向耦光系統立體圖，在此設計中，讓半導體雷射陣列光源經由數個柱狀透鏡正向入射至光柵。半導體雷射陣列由 19 顆雷射二極體所組成，每顆

雷射二極體為 $100\ \mu\text{m}$ 長、每顆間距為 $500\ \mu\text{m}$ 寬以及光源波長為 $976\ \text{nm}$ ，光源發出 TM 偏振方向的模態，其入射電場方向與光柵槽方向平行。半導體雷射光源出光後，經由半圓柱狀快軸準直鏡(fast-axis collimator; FAC)來將快軸方向光源準直化(圖 3-1 之 1st FAC)，慢軸方向有相對應每顆雷射二極體之慢軸準直透鏡(slow-axis collimator; SAC)來準直化慢軸方向光源。第二顆快軸準直鏡(圖 3-1 之 2nd FAC)與雙纖衣光纖在光路徑上，形成一組透鏡組，藉由調整兩透鏡之距離，可以讓半導體雷射光源平行入射在光柵上，將光源耦合進入光纖中，因此我們可以得到對稱的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率，雷射光將往光纖雙向進行傳輸，如圖 3-2 所示。當入射光傾斜一個角度，從對稱的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射效率改變為非對稱的形式，因此雷射光可從雙向傳輸改變為單向傳輸。在此實驗中，我們設計並製作出：

以金內嵌於玻璃基板之光柵，即在玻璃基板上製作出圖形，在經過蝕刻後再將表面鍍上金，詳細的製作過程將在第四章說明。

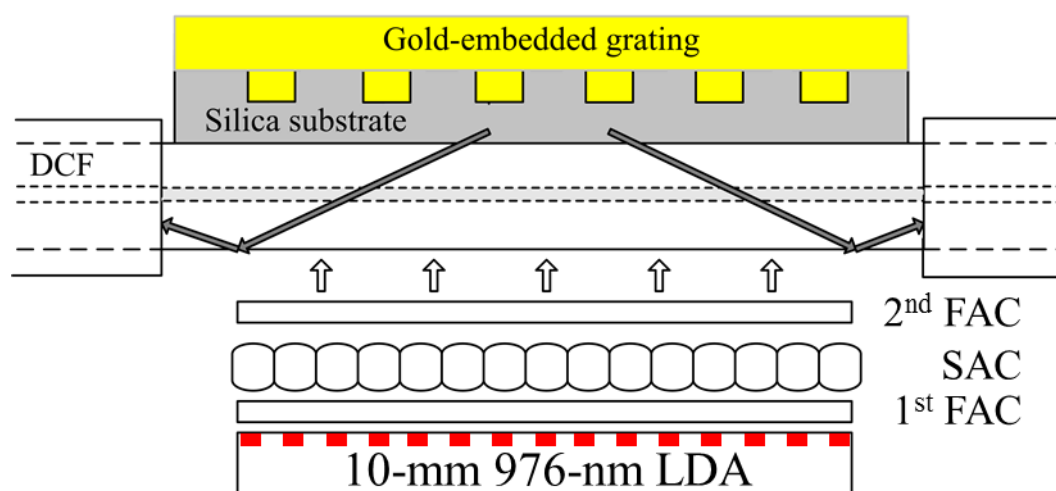


圖 3-2 側向耦合光學架構頂視圖

3.2 反射光柵之二次繞射損耗

為了滿足 3.1 節所述之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射角度的設計，主要由兩個因素所決定：內外纖衣介面之全反射角以及第一次繞射光再次與光柵耦合產生第二次繞射損耗。圖 3-3 為反射光柵之第二次繞射損耗示意圖，由圖中可知，入射之半導體雷射光

經由光柵而產生大角度繞射的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光，此繞射光由路徑中經過光纖的側面發生第一次全反射，其反射光源會再次入射於光柵上，因此而發生第二次的繞射機制，入射之半導體雷射光源會因此而產生部分的功率損失。

影響第二次繞射損耗有以下幾個因素：(1)繞射角度值；(2)玻璃基板厚度；(3)光纖直徑大小，二次繞射損耗影響因素列於表 3-1。

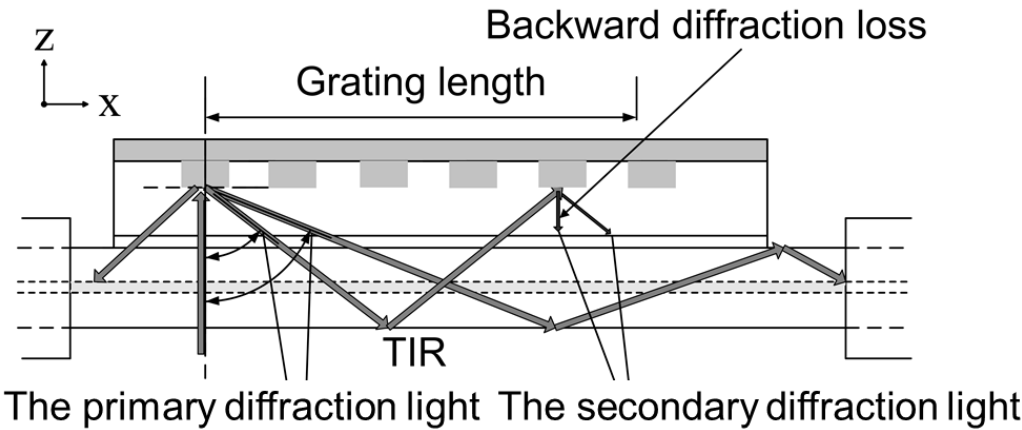


圖 3-3 第二次繞射損耗圖示

表 3-1 第二次繞射損耗關係

	繞射角度值	玻璃基板厚度	光纖直徑大小
第二次繞射損耗增強	減少角度	減少厚度	減少直徑
第二次繞射損耗減弱	增加角度	增加厚度	增加直徑

圖 3-4 為模擬中，輸入光源以 85.35° 入射光柵，會產生 0^{th} 、 1^{st} 、 2^{nd} 繞射光，其效率分別為 17.84%、44.88%、33%(圖 3-5)， 0^{th} 與 2^{nd} 繞射光會保留於光纖內，其總和效率約為 50%，而 1^{st} 繞射光因為無法在光纖與空氣介面產生全反射，因此這部分光源無法保留於光纖中，推估第二次繞射所造成的損耗約為 50%。

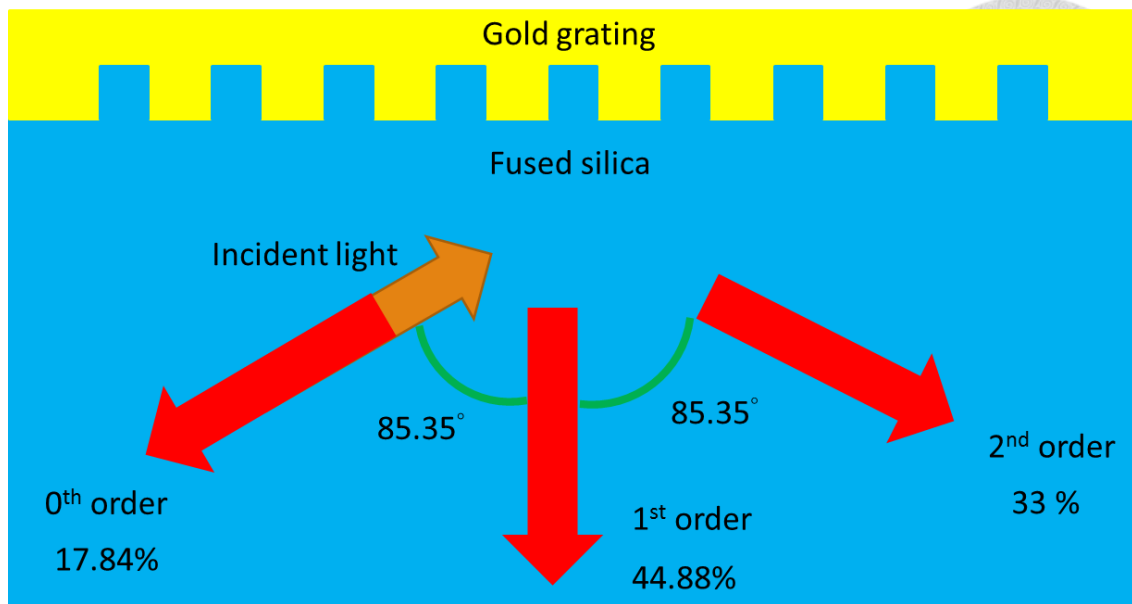


圖 3-4 第二次繞射損耗模擬架構圖

此損耗的現象產生的原因主要是由於 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光在玻璃基板及光纖中行徑的橫向距離不足所產生。為避免反射光柵之第二次繞射損耗，於光柵設計上可選擇採用以下兩種方法，第一是縮小光柵的週期值，進而改變 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光之繞射角度值，使繞射角度變大而產生較長的光路徑橫向距離，減少第二次繞射損耗之區域；第二則是增厚玻璃(fused silica)基板，使得繞射光於行徑中有更長的橫向位移。

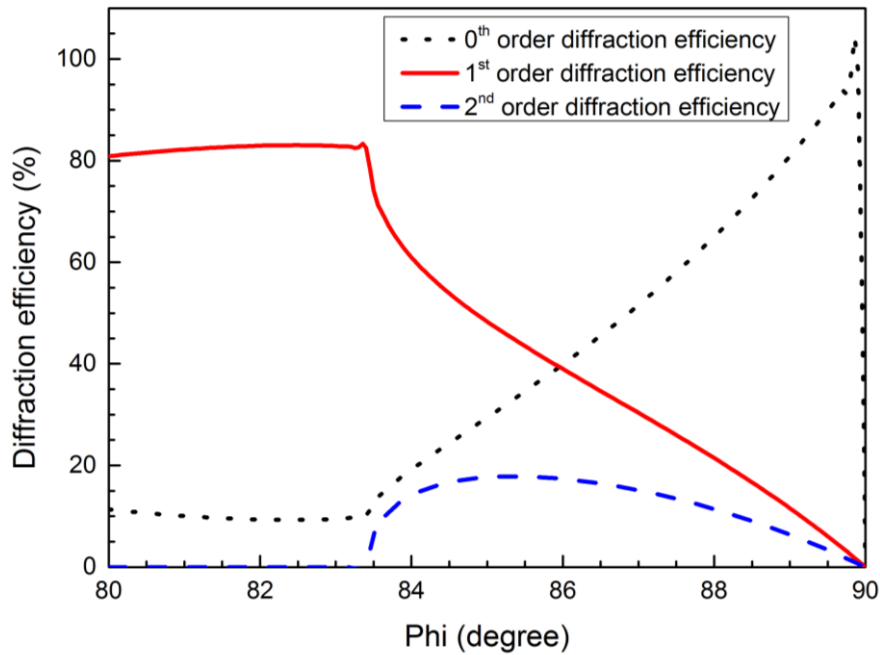


圖 3-5 光源入射角度 80 °至 90 °之 0th、1st、2nd 繞射效率圖

3.3 折射率匹配液造成之損耗

由於光柵是內嵌於玻璃基板上，玻璃基板與光纖需要緊密接合，以減少光散射所造成的損耗，所以我們使用了折射率匹配液，來當作是附著劑及提供光路行徑中維持折射率不變之材料。圖 3-6 所示，折射率匹配液將會加在玻璃基板與光纖之間之介面，且橫向長度與光柵一致。考慮到前節所述之第二次繞射損耗效應，光柵 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射角度傾向採取最大值，然而，繞射角度越大，在光柵兩側邊緣的損耗亦會增加。例如左側光柵之向左邊繞射光，會因為繞射角度太大，而在繞射後之光源路徑不會經過折射率匹配液，因此此光源就無法耦合進入光纖；同理，在右側光柵也是如此，因此我們視為是另一種折射率匹配液造成之損耗。

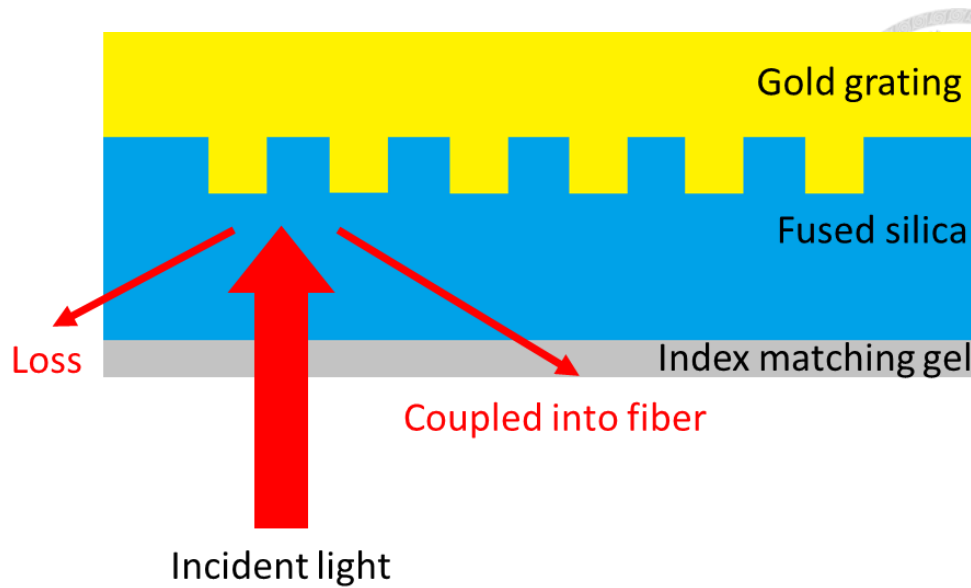


圖 3-6 折射率匹配液損耗示意圖

折射率匹配液造成損耗之因素有：繞射角度值及玻璃基板厚度，其折射率匹配液損耗影響因素列於表 3-2。若與第二次繞射損耗之作相同表格比較，在繞射角度值與玻璃基板厚度，折射率匹配液損耗與第二次繞射損耗趨勢完全相反，而光纖直徑大小並不會影響折射率匹配液損耗。

表 3-2 折射率匹配液損耗關係

	繞射角度值	玻璃基板厚度	光纖直徑大小
折射率匹配液損耗增強	增加角度	增加厚度	無關
折射率匹配液損耗減弱	減少角度	減少厚度	無關

第四章 側向耦光光柵設計與製作

在本章節中，我們將討論側向式耦光光柵基本原理、以理論模擬找出最佳參數、介紹基因演算法並且說明如何以它設計光柵，最後討論實際製作光柵之製作流程。

4.1 側向耦光光柵設計

4.1.1 光柵結構理論

本節我們將討論如何設計側向式耦光光柵，使得 ± 1 階繞射光能夠獲得最佳的繞射效率，首先是光柵相位匹配定理來決定光柵結構的週期與繞射光角度值，光柵相位匹配公式如下：

$$\Lambda(n_1 \sin \theta_1 - n_2 \sin \theta_2) = m \lambda_0 \quad (4.1)$$

如圖 4-1 所示， Λ 為光柵結構之週期， n_1 為入射光源對於介質之光學折射率， θ_1 為入射光源之入射角度值， n_2 為繞射光對於介質之光學折射率， θ_2 為光源經過光柵後繞射角度值， m 為繞射光階數， λ_0 為真空中入射光源之波長。

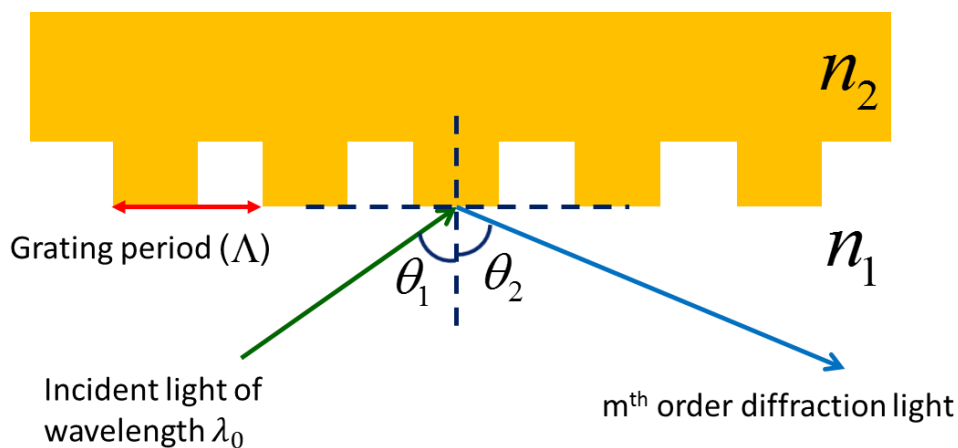


圖 4-1 光柵相位匹配公式圖

在本研究中，入射光源以平行法線方向入射光柵， θ_1 被設定為 0° ，而繞射光源與入射光源存在相同介質中，故 $n_2 = n_1$ ，因此公式(4.1)可簡化如下：

$$\Lambda n_1 \sin \theta_2 = m \lambda_0 \quad (4.2)$$

理論上，一光柵結構之 ± 1 階繞射光效率主要由以下幾個要素決定(1)光柵結構中的寬度(width)以及深度(depth)、(2)入射光源的偏振模態、(3)組成光柵結構之材料。目前並無一個簡單且直觀的設計公式來決定光柵繞射效率，但我們還是可以藉由嚴謹式耦合波理論(rigorous coupled-wave analysis; RCWA)的原理架構來對於光柵結構進行數值理論模擬 [26]，藉由 Rsoft Design Group 中的 DiffractMOD 模擬模式軟體工具，來獲得光柵結構中不同寬度及深度之繞射效率，並進行優化 [27]。

經由先前研究文獻可知 [28]，光柵之結構大致可歸類為以下三類：(a)矩形結構式光柵(binary grating)，(b)鋸齒形結構式光柵(blazed grating)及(c)弦波形結構式光柵(sinusoidal grating)(如圖 4- 2)。並且如圖 4- 3 所示，若將不同結構的優化至最佳效率狀況下，矩形結構式光柵可能獲得最高的繞射效率，故我們選擇以此矩形式來作為理論模擬以及實作之結構。

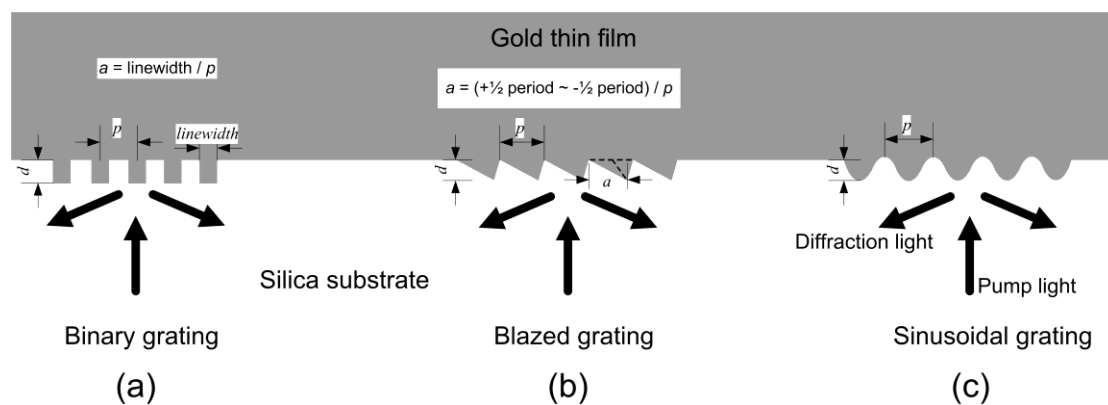


圖 4- 2 各種光柵形狀示意圖 (a)矩形式結構，(b)鋸齒形結構，(c)弦波形結構 [28]

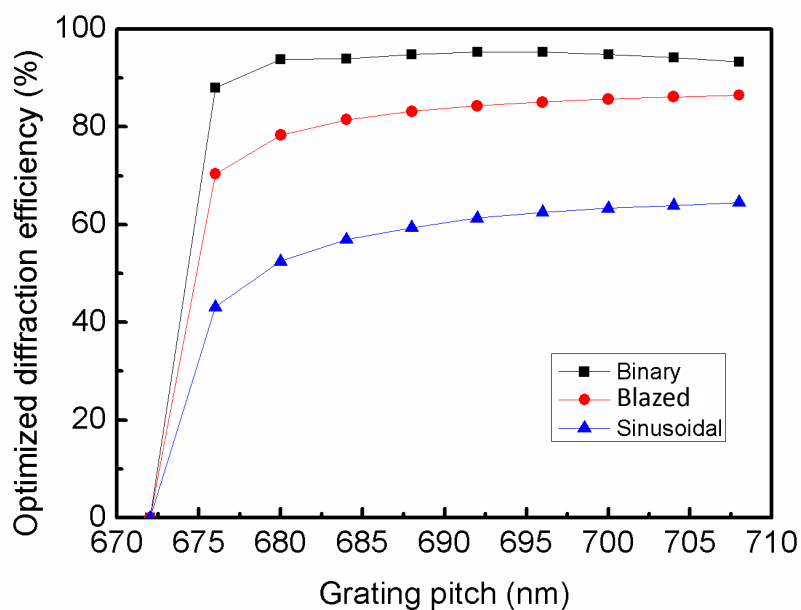


圖 4-3 各種光柵形狀模擬效率圖 [28]

4.1.2 矩形結構光柵之模擬

如 4.1.1 節所述，我們可藉由嚴謹式耦合波理論之理論，來進行矩形結構式光柵的數值模擬。首先我們藉由光柵匹配公式(4.2)，改變光柵的週期(period)來優化 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光的的角度值；並改變光柵凹槽結構的深度與寬度來調變 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光的效率。在反射型矩形結構式光柵中，不同結構表面之材料也會影響效率，所以我們選定幾種不同的金屬材料來做模擬實驗。

為於光柵週期 675 nm 下，對各個選定之表面金屬材料來分別分析對 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率優化的模擬結果 [29, 30]；由於不同的金屬材料在波長為 976 nm 下有不同實部折射率(n)值與虛部折射率(k)值，由模擬結果可知以較小的實部折射率與較小的虛部折射率的情形下，能獲得較好的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光源效率。由此結果，我們選定以金作為製作反射型矩形結構式光柵的金屬表面材質，以獲得最佳的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率。

表 4-1 不同金屬表面對於相同週期之 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率比較

Material	n (at 976 nm)	k (at 976 nm)	Maximum diffraction efficiency for $\pm 1^{\text{st}}$ order	Optimal width (nm)	Optimal depth (nm)
Au	0.13	6	90.04%	143	129
Ag	0.206	6.587	88.26%	154	116
Cu	0.528	6.344	73.06%	155	115
Al	1.457	9.265	71.19%	175	95

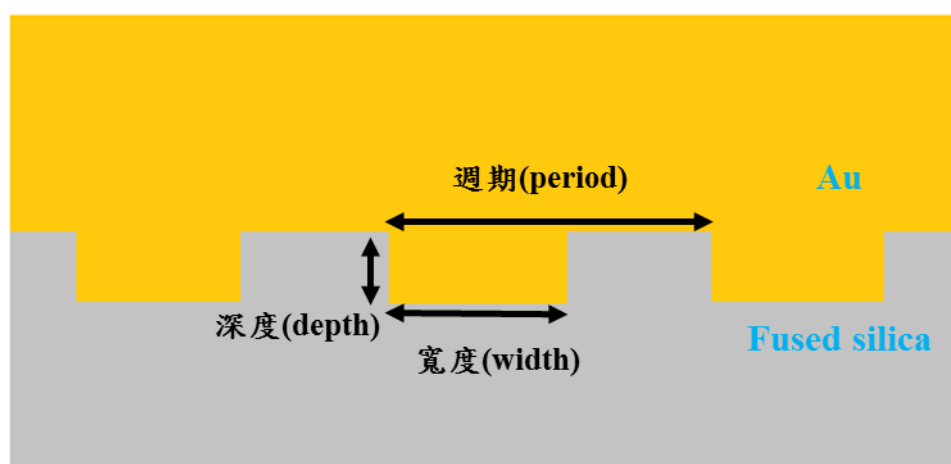


圖 4-4 矩形結構內嵌式光柵之基本架構

圖 4-4 為我們設計之反射型矩形結構內嵌式光柵之基本架構，使用基板為玻璃材料 fused silica，；我們可利用電子束微影技術來定義光柵結構中的寬度，並於基板上利用反應離子蝕刻之技術蝕刻出適當的深度而形成矩形結構；最後於表面鍍上一層高純度金 Au (99.99%)，完成光柵結構。

在入射光源波長為 976 nm，由玻璃基板色散關係可知其折射率約為 1.4507，將光柵結構及本節所述之各項參數輸入 Rsoft 的 DiffractMOD 模擬軟體工具中，再藉由模擬不同寬度與深度，來幫助我們獲得最佳化的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率。模擬

結果由圖 4- 5 所示，在光柵設計之週期為 675 nm，我們可以得到以寬度為 143 nm 與深度為 129 nm 的情形下， $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率之總和可以達到 90.04% 的最佳效率輸出，與表 4-1 第二列數據互相應證。

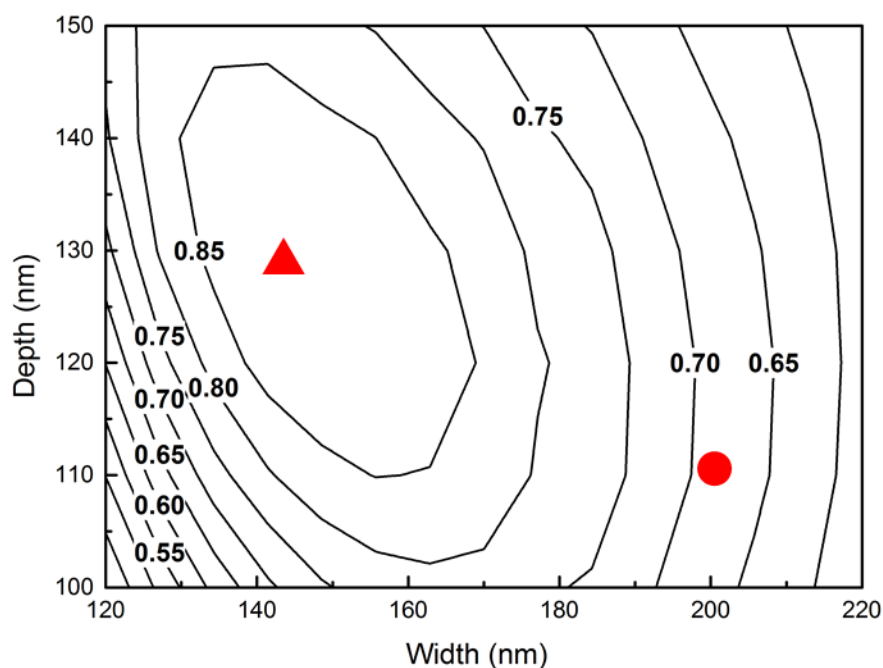


圖 4- 5 矩形式光柵結構 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率之寬度與深度關係圖

4.1.3 梯形結構模擬

在實際製作矩形結構式光柵過程中，我們利用反應離子蝕刻技術於玻璃基板上製作出理想的深度，達到最佳的優化設計。但於反應離子蝕刻技術中，並沒有辦法使得玻璃基板上蝕刻出完整的矩形結構，基於目前蝕刻的技術，蝕刻的凹槽結構側邊將無法維持完整的 90° 側壁角度，換言之，凹槽結構的側壁會維持大角度的斜向側壁，使得我們無法得到理想的情況，維持本身矩形的凹槽結構光柵。圖 4- 6 為理想結構與實際製作結構的光柵凹槽結構之比較。

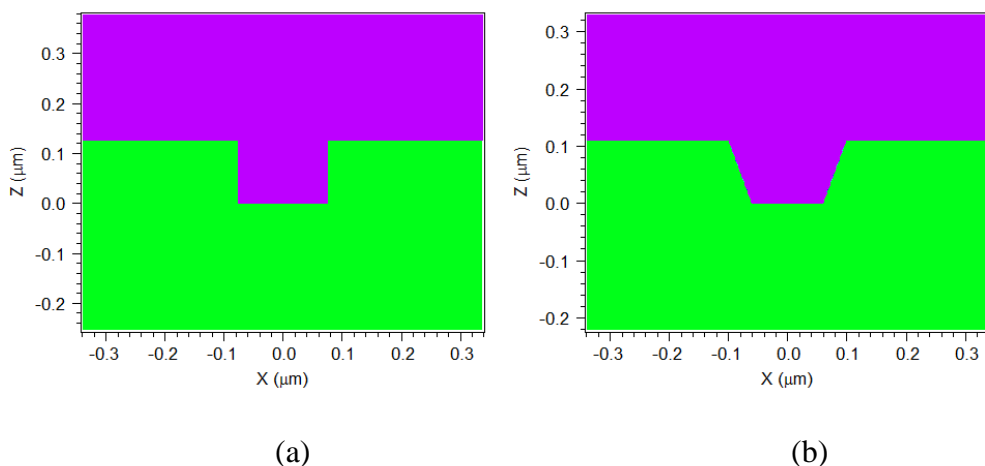


圖 4- 6 光柵結構示意圖, (a)矩形式光柵, (b)梯形式光柵, 紫色為材料金結構, 綠色為玻璃基板結構。

於實際製程中，運用反應離子蝕刻技術將無法將側壁角度由目前的 70° 上修至 90° 理想側壁角度，故原先圖 4-4 的理論模擬架構將無法實際反應出真實的光柵的凹槽結構，我們可改變原先的光柵凹槽結構模擬參數，由原先的矩形結構改變成實際製作的梯型結構來進行優化與結構模擬。圖 4- 7 為光柵梯形凹槽結構之不同深度與寬度下， $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光源之效率分布圖，由圖中可知，於適當的光柵凹槽結構之深度與寬度的設計下， $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光源之光效率可達到 86% 以上，最佳效率落於寬度 198 nm、深度 110 nm，其效率也可達至 90.04%。

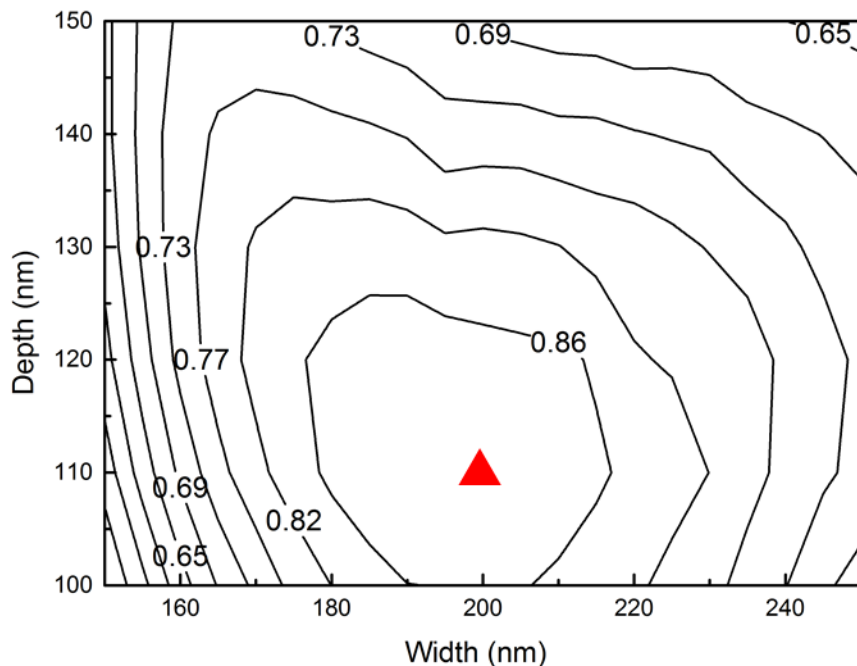


圖 4- 7 梯形式光柵結構 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率之寬度與深度關係圖

與先前的矩形結構式光柵比較，我們可發現梯型結構光柵之最優化的凹槽寬度與深度與矩形結構的優化結果有些差異。對凹槽結構寬度而言，由原先的理想值 150 nm 增加至 200 nm，但對於凹槽結構的深度而言，由原先的 125 nm 減少至 110 nm，在 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光源最佳效率皆有 90.04%，於實際應用中，梯形結構式光柵還是可以維持高效率的 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光源之光效率輸出。

4.2 基因演算法應用於光柵設計

4.2.1 基因演算法介紹

於 1960 年代時期，生物學家 Alex Fraser 提出人為交換染色體 DNA 來促進生物演算之方法，此想法成為發展基因演算法(genetic algorithm; GA)之先驅。而到了 1975 年，由密西根大學 John Holland 教授將基因演算法發展出較成熟的模型，其靈感來自於自然界生物體內基因中的 DNA 編碼及繁殖原理，應用於模擬物種在自然環境與人造環境下的現象。Holland 教授認為，可將物種特性進行編碼，如同 DNA 一樣，而自然或是人造環境可比擬為適應函數 (fitness function)，

透過環境適應函數來篩選個體，並且繁衍出下一代物種，致使獲得最適合此環境之個體。



4.2.2 基因演算法法則及演算過程

基因演算法可以由以下幾個成分組成：

- (1) 基因(gene)：演算法中的變數。
- (2) 染色體(chromosome)：由變數組合而成，視為一個個體。
- (3) 族群(population)：個體集合而成。
- (4) 適應函數(fitness function)：計算染色體適應性之函數。
- (5) 交配池(mating pool)：擁有較佳適應函數值之染色體被放置之處。

如圖 4-8 所示，由基因組成之染色體帶有個體的資訊，在經過環境考驗下，也就是適應函數計算下，此染色體擁有一個適應函數值，當演算法無法達到終止條件時，交配池中擁有較佳適應函數值之染色體進行複製、交配及突變，產生下一代染色體，再次經由適應函數計算適應值，直到滿足終止條件為止。

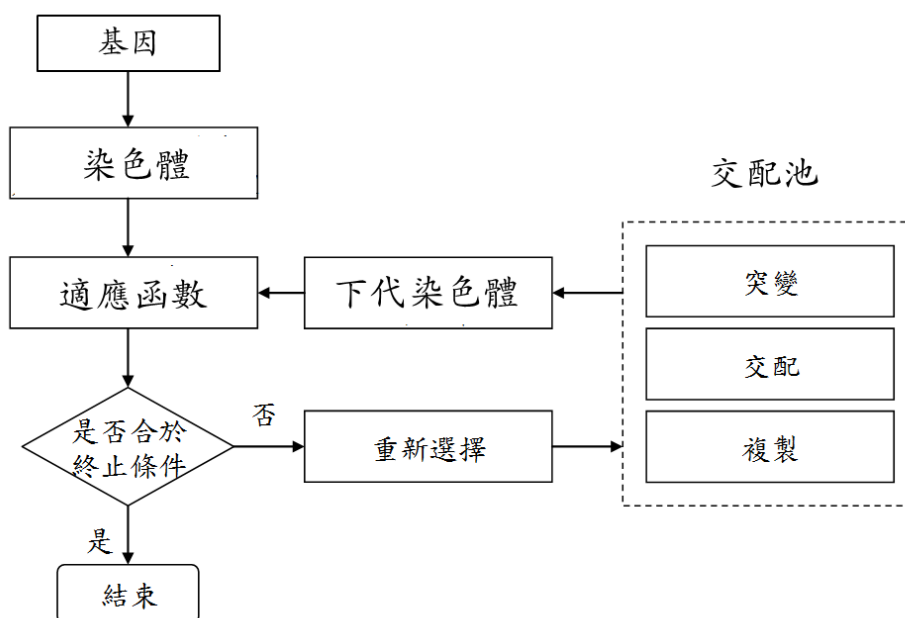


圖 4-8 基因演算法基本流程

染色體編碼方式有以下幾種：(a)二元編碼、(b)實數編碼及(c)文字編碼等方式，可以依據適應函數與物種上資訊關係來決定編碼方式，以利演算法的進行。

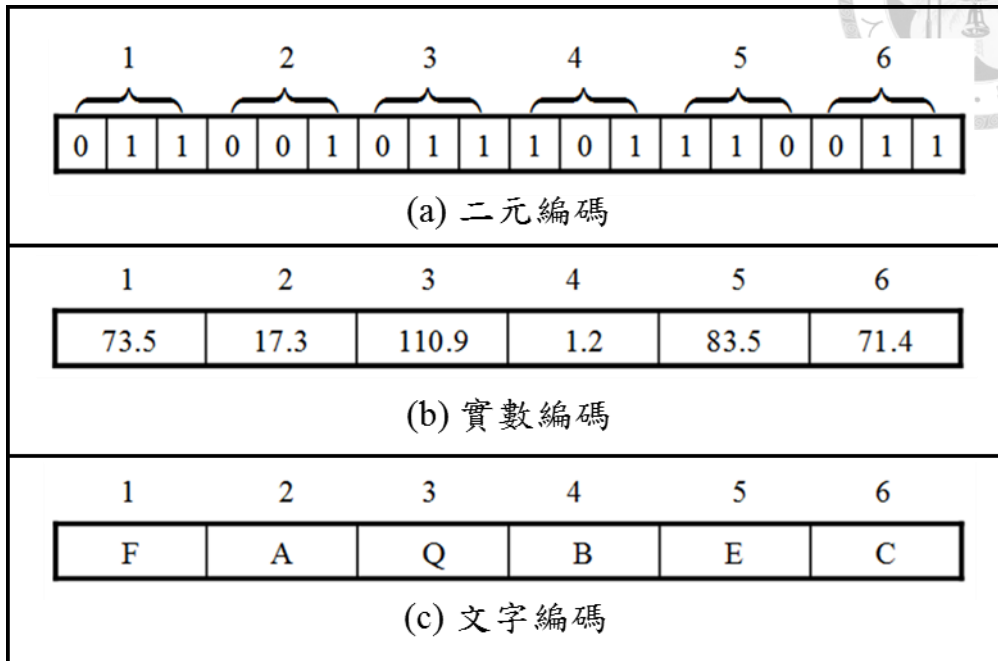


圖 4-9 染色體編碼方式

基因演算法中的運算方式包含：

(a) 複製(reproduction)：在複製的運算概念下，是依據每一物種的適應程度來決定其下一子代中，應被淘汰或複製的各數多寡的過程。其又可分為競爭式選擇及輪盤式選擇，競爭式選擇在每一代的演化過程中，隨機選取兩種或更多的個體，經過適應函數計算出適應值後，選擇具有最大適應函數之個體即被送入交配池中。輪盤式選擇則是按每個個體的適應函數值大小來分割輪盤，適應值越大所占的面積越大，再隨機選取輪盤中的一點，其所對應之個體被送入交配池中，與競爭式選擇最大的不同在於加入機率的概念，讓較小適應值的個體也有機會進入交配池中。

(b) 交配(crossover)：隨機選起交配池中兩個個體作為母代，彼此互相交換物種內的資訊，進而產生新的個體，透過此運算累積前代優秀資訊，傳承給子代產生更高的適應值。交配可分為單點交配、雙點交配及字單交配。如圖 4-10 所示，單點交配在個體中隨機選取交配點，在此交配點後所有之資

訊進行交換，產生新的兩個個體。雙點交配在個體中隨機選取兩個交配點，在交配點間之資訊交換，產生新的兩個個體。字罩交配需先隨機產生與個體相同大小之字罩，由個體資訊與字罩上資訊作用後，產生新個體。

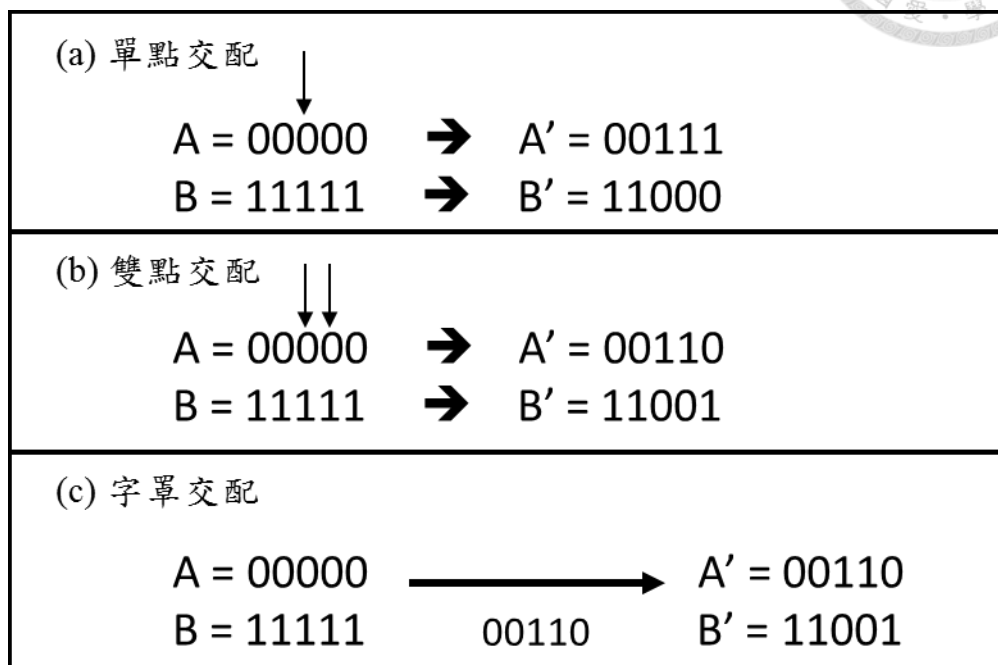


圖 4-10 基因演算法交配方式

(c) 突變(mutation)：隨機選取一個體，並且隨機選取一突變點，改變此突變點之資訊，突變可以為單一突變或是字罩突變等方式進行突變。

4.2.3 基因演算光柵模型

在本研究中，利用基因演算法的主要目的是用來改善 3.3 節中所描述的折射率匹配液所造成之損耗，藉由基因演算法找出特別的結構，使得光源 $\pm 1^{\text{st}}$ 繞射效率有不對稱的現象，將更多的入射光源耦合進入光纖，以提高耦光效率，且增加光源亮度。如圖 4-11(a)所示之例子，在光柵結構 A 部分，還是維持 $\pm 1^{\text{st}}$ 繞射效率相同之結構，在左側 B 及右側 B'改為基因演算法結果之結構。圖 4-11(b)中光柵結構為圖 4-11(a)之 B 結構， -1^{st} 階之效率為 17.89%、 $+1^{\text{st}}$ 階之效率為 64.75%；如 3.3 節所敘述， -1^{st} 階光源無法耦入光纖中，所以我們藉由基因演算法來調製

$\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射光效率，使得 $+1^{\text{st}}$ 階光源由原本對稱型結構效率 45.02% 提升至非對稱型效率 64.75%。

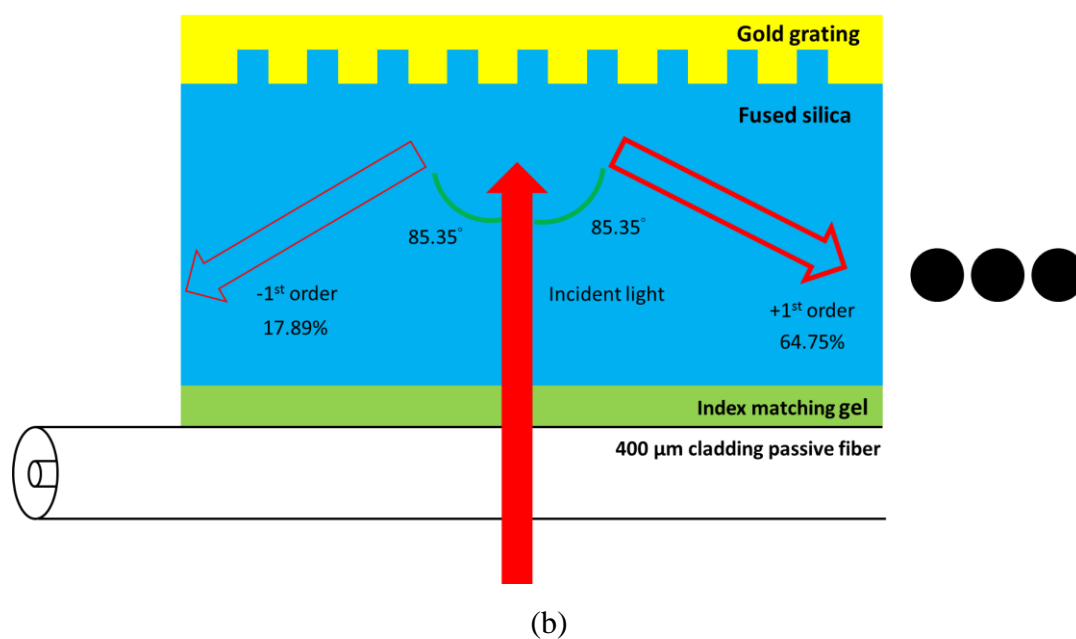
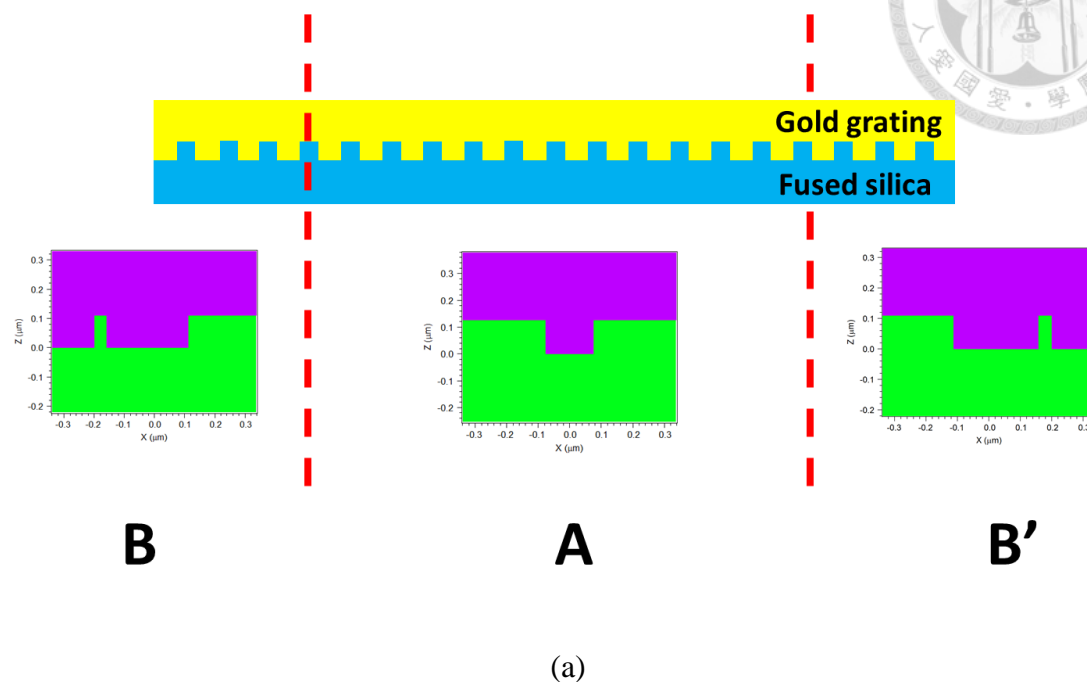


圖 4- 11 (a)基因演算法結構應用於光柵示意圖, (b)基因演算法結構使光柵繞射效率不對稱之現象

在基因演算法程式運算過程中，我們採取二元編碼方式，將光柵一個週期內，切割成若干個等分區域，而二元編碼中 1 與 0 分別對應區域之材料性質。我們選擇使用單點交配方式，將交配池中的個體進行交配，產生下一代之新個體。另一

方面，對於新一代之個體進行單點突變，由舊一代、新一帶及突變後之個體分別進行適應函數運算後，按照適應值排序，選出排序前面幾名，取代原交配池之個體。不斷進行新一代個體之交配過程，直到滿足終止條件後，結束基因演算法運算程式。

圖 4- 12 為基因演算法流程簡圖，在每個區塊(block)代表一個矩陣，矩陣之每列為個體數(chromosome)、每行為基因數(gene)，也就是切割區域數，由於製程上線寬的因素，在此我們選擇切割週期 675 nm 為 15 個區域，每個區域 45 nm。最初代先亂數產生 10 個個體，放入群體(population)矩陣中，再以適應函數計算，選出適應值前五高之個體，由於我們目標是最佳化+1th 階效率，同時 0th 階反射效率不改變狀況下，所以適應函數設定為總和±1st 繞射效率值加上+1st 階繞射效率值。接下來將選出之 5 個個體(pool)進行單點交配產生 20 個新個體(crossover)，及進行單點突變產生 5 個新個體(mutation)。將以上共 30 個個體(new population)進行適應函數計算，按照函數值高低排序，取出前五高之個體，取代原本群體矩陣。第二代後，族群矩陣如同交配池矩陣，族群不須再做適應函數計算，直接進入交配及突變步驟。

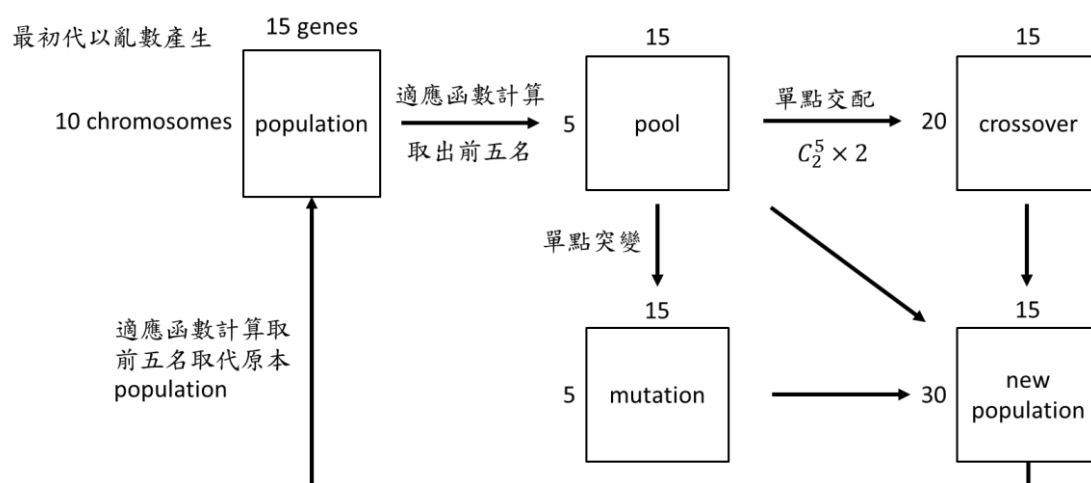


圖 4- 12 基因演算法程式區塊流程圖

最後，我們定義新族群(new population)矩陣個體適應值平均值為 Y_N 與母代個體適應值平均值為 Y_{N-1} ，終止條件設定為 $(Y_N - Y_{N-1})/Y_N$ 小於 0.001，且須連續

十代皆滿足此條件，方終止基因演算法運算。此時取出族群中適應值最高之個體，即為我們欲求之效率最佳化非對稱型光柵結構。



4.2.4 基因演算法優化光柵結構

如 4.2.3 所述，我們將週期 675 nm 光柵切割 15 個區域，希望藉由基因演算法找出 $\pm 1^{\text{st}}$ 階繞射效率非對稱型光柵結構。圖 4- 13(a)為模擬軟體 Rsoft 中之圖像，可以看出此二元編碼為「111011111100000」，圖 4- 13(b)為基因演算法優化後之光柵結構，將此結構代入 Rsoft 進行模擬，可得 $+1^{\text{st}}$ 階繞射效率為 62.88%、 -1^{st} 階繞射效率為 22.41%。其中 $+1^{\text{st}}$ 階繞射效率高於對稱型光柵結構，因此將此結構運用於光柵兩邊邊緣將有效增加耦光效率。

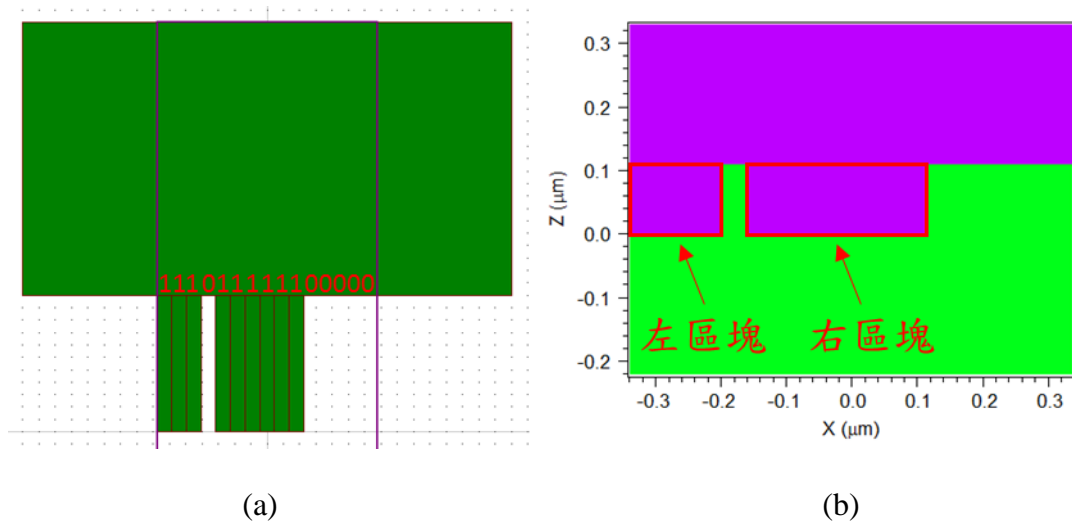


圖 4- 13 基因演算法結構示意圖，(a)基因演算法編碼與結構關係，(b)基因演算法結構圖。

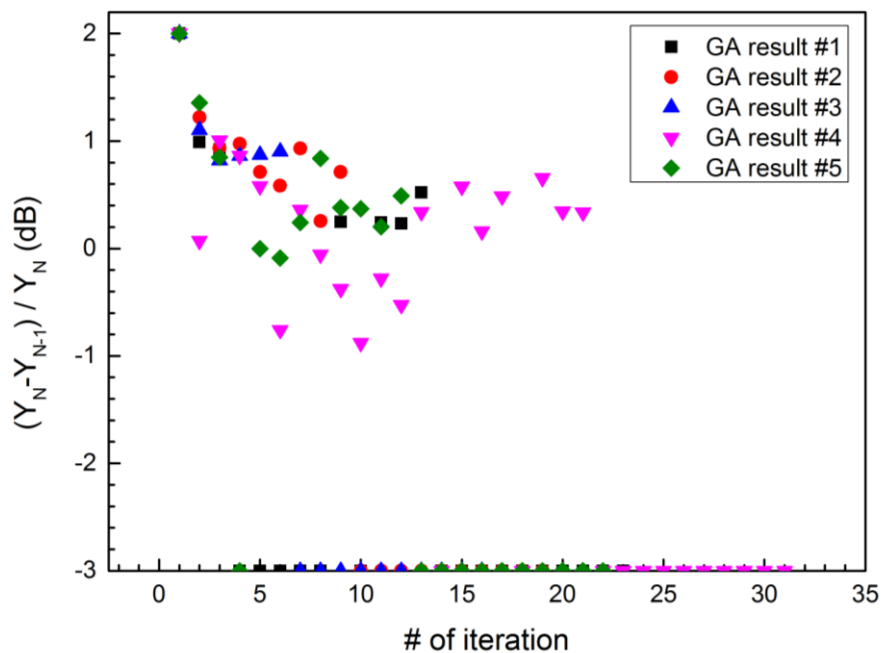



圖 4- 14 基因演算法結果收斂狀況圖

基因演算法收斂結果畫於圖 4- 14 中，在第一次演算過程中(黑框點)，可以看到運算至第五次及第六次時，在母帶個體適應值平均值均小於 0.001，看起來是以收斂狀態，但是在第七次後因為基因突變之過程找到適應值更佳之母帶，因此母帶適應值平均值又重新提高，直到演算至第二十三次後收斂。而五次演算結果皆為圖 4- 13(a)之光柵結構，在運算 10 次以內可使收斂值小於 5%、30 次內能達到終止條件，因此我們選定此運算結果之結構進行光柵製程實作。

接下來我們對於圖 4-13(b)之結構進行更進一步細部微調：(1)左區塊位置最佳化(2)左區塊寬度最佳化(3)右區塊位置最佳化(4)右區塊寬度最佳化。進行以上四種微調後，發現將左邊區塊增加 5nm 後，+1st 效率值從 62.88%增加至最佳值 64.75%，因此我們就依此結構來製作非對稱式光柵，但在製程上面臨了線寬變小的問題，無法使用對稱型光柵製程方法製作，將在 4.3 側向耦光光柵製作中說明。

4.3 側向耦光光柵製作

4.3.1 內嵌式光柵製作與流程



接下來我們依據優化後的參數來製作反射型矩形結構內嵌式光柵，光柵凹槽結構的寬度為 200 nm，深度為 110 nm 與週期為 675 nm。圖 4- 15 為矩形結構內嵌式光柵的製作流程圖。如圖 4- 15(a)所示，首先將光阻塗佈於玻璃基板(fused silica)上，利用旋轉塗佈機(Laurell ws-400e)，塗佈一層電子束微影技術所需的特定光阻 ZEP520A 薄膜厚度約 300 nm，旋轉塗佈參數為 5000 轉(rpm) 90 秒，再將已塗佈光阻之玻璃基板放在 180 °C 烤盤上，加熱 2 分鐘；由於我們使用的基板為玻璃屬於非導體，必須再於 ZEP520A 光阻膜層上旋轉塗佈上一層 ESPACER，以導去多餘的電子避免因電子堆積而造成微影線寬變形不平整。ESPACER 旋轉塗佈參數為 1500 轉 90 秒，可於光阻上塗佈一層約 20 nm 厚的導電薄膜，實際照片於圖 4- 16(a)；圖中(b)為電子束微影，使用電子束微影機(ELIONIX ELS-7000)特定的顯影參數(300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ ，dose time: 0.34 μs)可於光阻上精準繪製出所需要的線寬需求 200 nm 以及光柵週期 675 nm；圖中(c)利用顯影液 N-50 將被電子束微影破壞鍵結的光阻部分顯影去除，顯影出繪製的線寬與週期；(d)為利用反應式離子蝕刻機(SAMCO RIE-10NR)來對玻璃基板做乾式蝕刻，蝕刻出製理想的深度 110 nm；(e)利用去光阻液 ZDMAC 將殘存的光阻 ZEP520A 去除，僅存蝕刻完成的玻璃基板 fused silica；(f)利用熱蒸鍍機(ULVAC YH-500A)於基板表層鍍上特定厚度的高純度金(99.99%)做為光柵材料，完成反射型內嵌式光柵製程於圖 4- 16(b)所示。

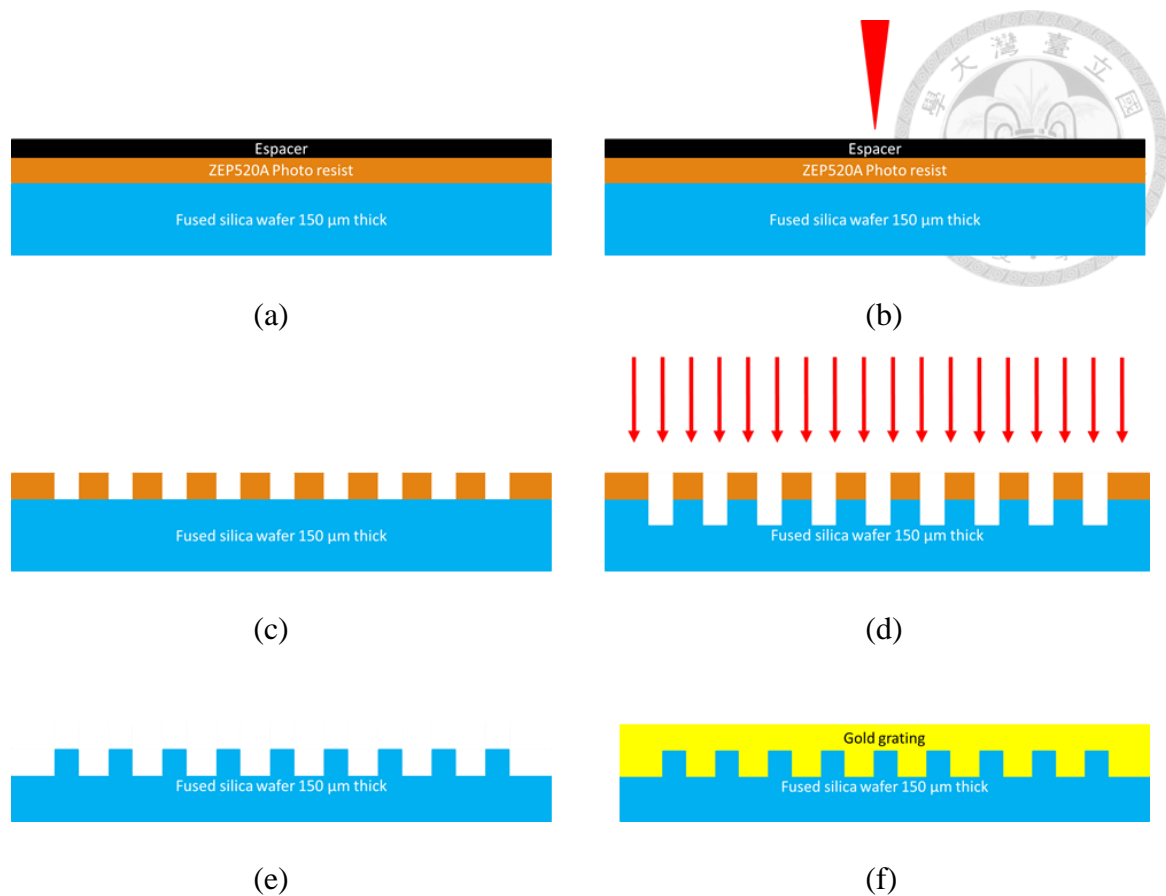


圖 4- 15 內嵌式光柵製作流程圖

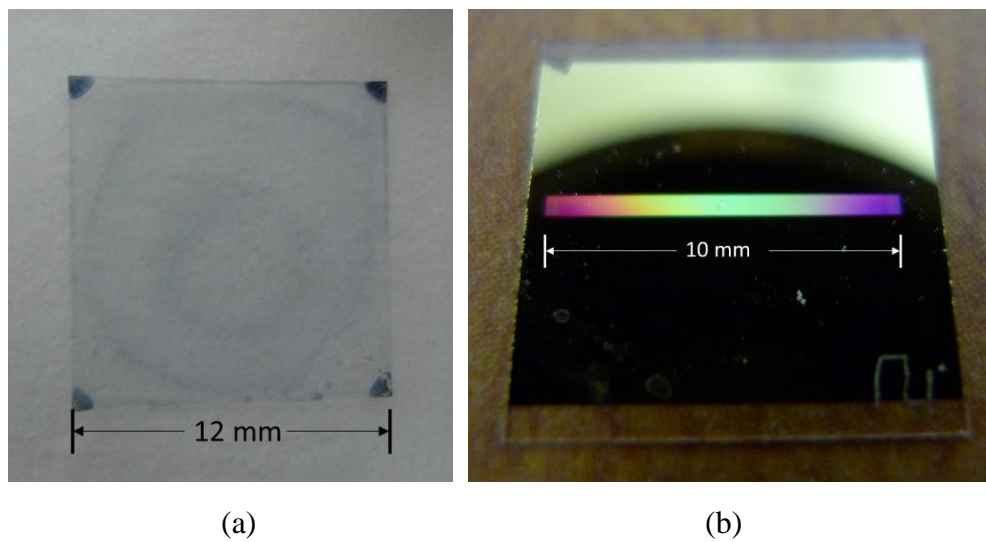


圖 4- 16 內嵌式光柵製程照片, (a) ESPACER 塗佈情形, (b) 10-mm 光柵完成圖

4.3.2 基因演算法光柵製作流程

由基因演算法程式運算，所得到的非對稱型繞射效率之光柵結構，在結構有 40 nm 線寬之圖形，此結構於內嵌式光柵製作流程中，在電子束微影後，發現光

阻倒塌之狀況，如圖 4-17 中線寬大小不一或是線寬斷續之現象，由於光阻厚度為 300 nm，而未被顯影之光阻寬度為 40nm，此深寬比太大導致光阻易崩塌，而無法作為反應離子蝕刻阻擋層。

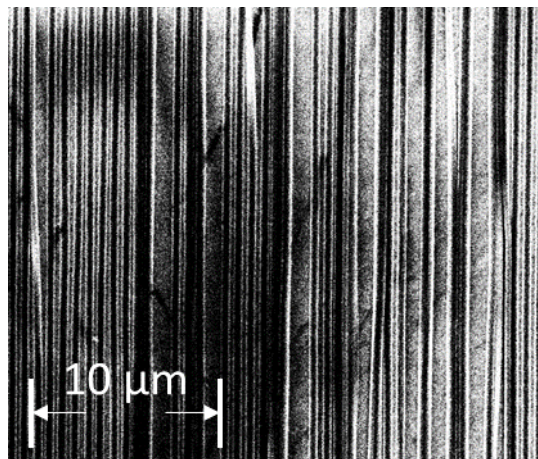


圖 4-17 光阻倒塌現象之 SEM 圖

因此，我們考慮使用另一種製程方式來製作，利用電子束微影可畫出小線寬之優勢，由鉻 Cr 來當作蝕刻阻擋層，將原始圖案反白後再利用電子束微影，將圖形轉印在光阻上。顯影後鍍上一層鉻，再將光阻除去，即完成鉻防阻層圖形。圖 4-18 基因演算法光柵製作流程圖中(a)將光阻以及 ESPACER 塗佈於玻璃基板 fused silica 上；圖中(b)為電子束微影，施予特定設計的顯影參數可於光阻上精準繪製出所需要的基因演算法結構圖形；圖中(c)利用顯影液 N-50 將被電子束微影破壞鍵結的光阻部分顯影去除，顯影出繪製之基因演算法結構；(d)利用熱蒸鍍機於已有圖形結構之基板上，鍍上一層約 20 nm 的鉻蝕刻阻擋層，於圖 4-19(a)；(e)利用去光阻液將光阻掀離(lift off)，因此在玻璃基板上可以得到我們像要之鉻阻擋層圖形，如圖 4-19(b)；(f)為利用反應式離子蝕刻機來對玻璃基板做乾式蝕刻；(g)利用鉻蝕刻液將殘存的鉻阻擋層去除，僅存蝕刻完成的玻璃基板 fused silica；(h)利用熱蒸鍍機於基板表層鍍上特定厚度的高純度金(99.99%)做為光柵材料，完成基因演算法光柵結構製程。

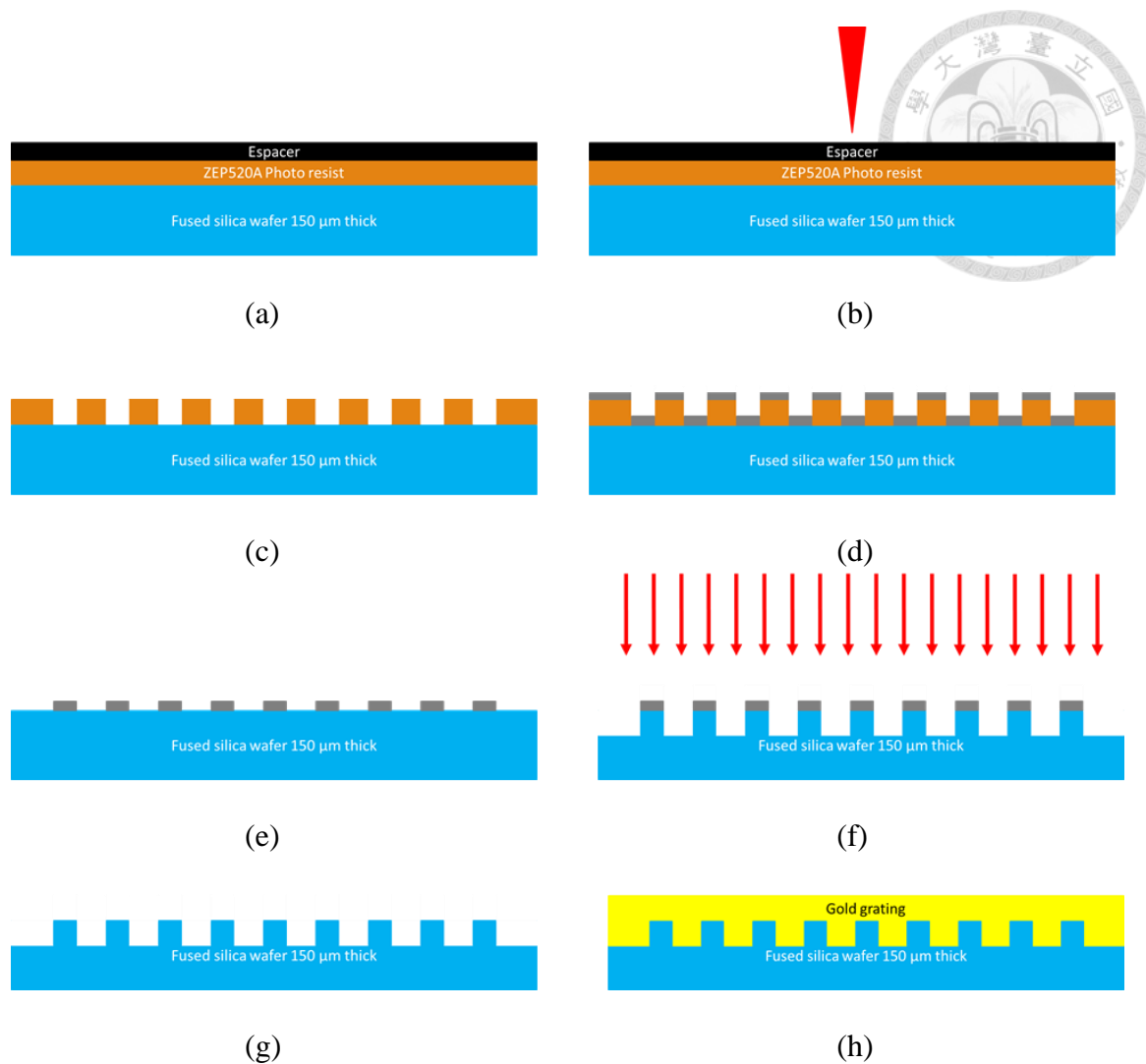


圖 4- 18 基因演算法光柵製作流程圖

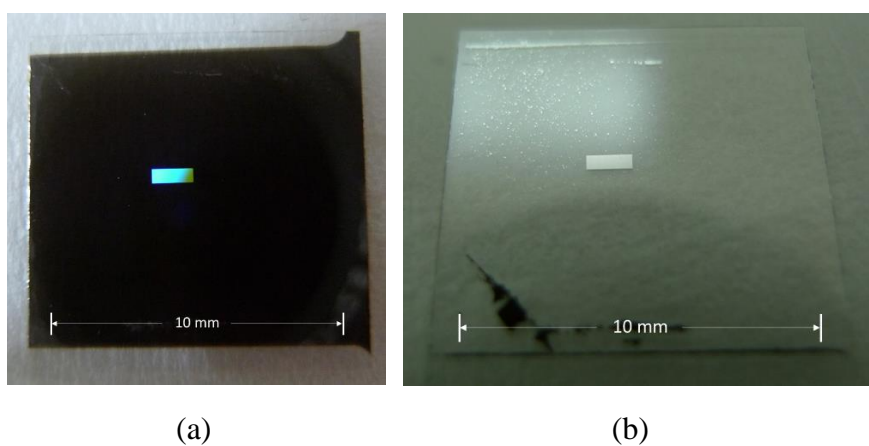


圖 4- 19 基因演算法 lift off 製程照片, (a)製程 lift off 前, (b)製程 lift off 後

第五章 側向耦光光柵實驗與結果



於本章節中討論實驗架構中之光源特性、側向耦光光柵、基因演算法光柵及無慢軸透鏡四項實驗，分別針對各實驗分析與討論，並且統整出結構參數與光學架構帶來的損耗之關係。

5.1 半導體雷射陣列光源特性

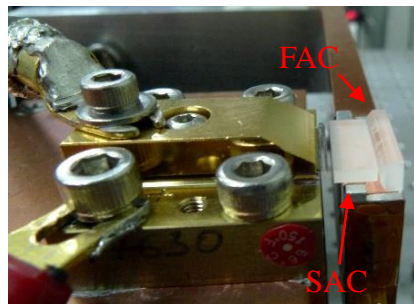
本實驗中使用之半導體雷射陣列光源為 DILAS 所製造，為了爾後的耦光效率分析，須量測其光源特性作為分析依據。由於半導體雷射波長會受到溫度及輸入電流大小所影響，所以我們使用溫控儀(THORLABS, TED 350)控制致冷晶片溫度使得半導體雷射陣列運作於 25 °C，再利用風冷系統冷卻致冷晶片，圖 5-1(d)為輸出場型圖，因為此光源為屬近紅外光，需要使用近紅外光卡(THORLABS, VRC4)來顯示光源，產生二次諧波效應，使得紅外光轉為人眼可視之綠光，圖 5-1(e)為耦光系統示意圖。圖 5-2 為此半導體雷射陣列光源功率對輸入電流圖(L-I curve)，量測功率點在第一顆 FAC、SAC 及第二顆 FAC 後。



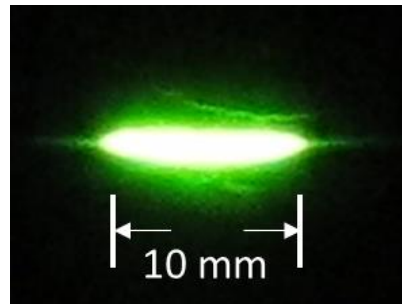
(a)



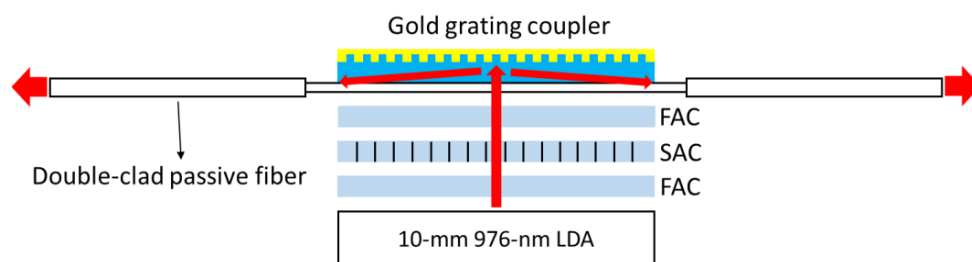
(b)



(c)



(d)



(e)

圖 5- 1 側向耦光系統實驗架設圖, (a)半導體雷射陣列冷卻系統, (b) LDA 側向圖, (c) SAC 與 FAC, (d)半導體雷射陣列輸出光源, (e)耦光示意圖

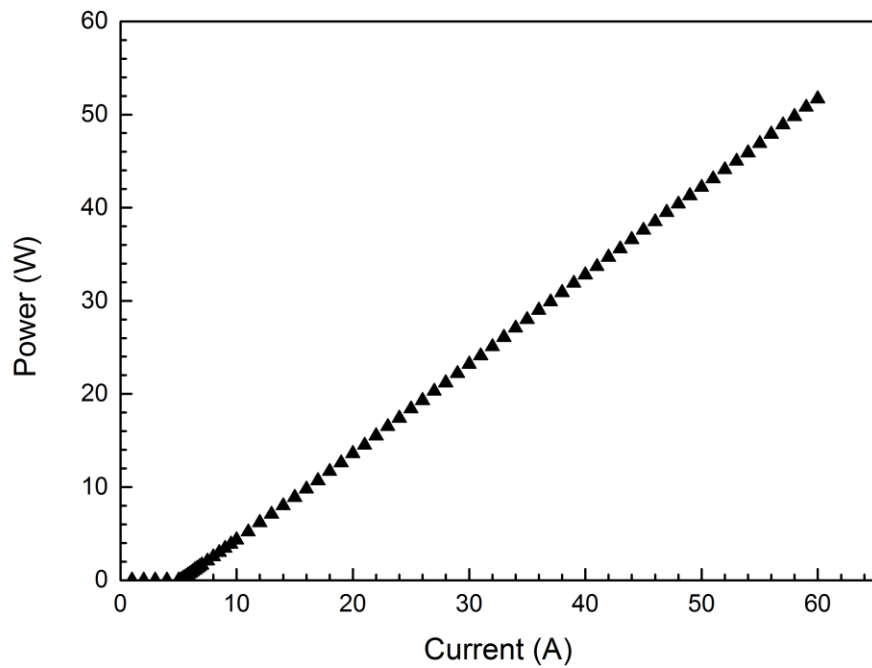
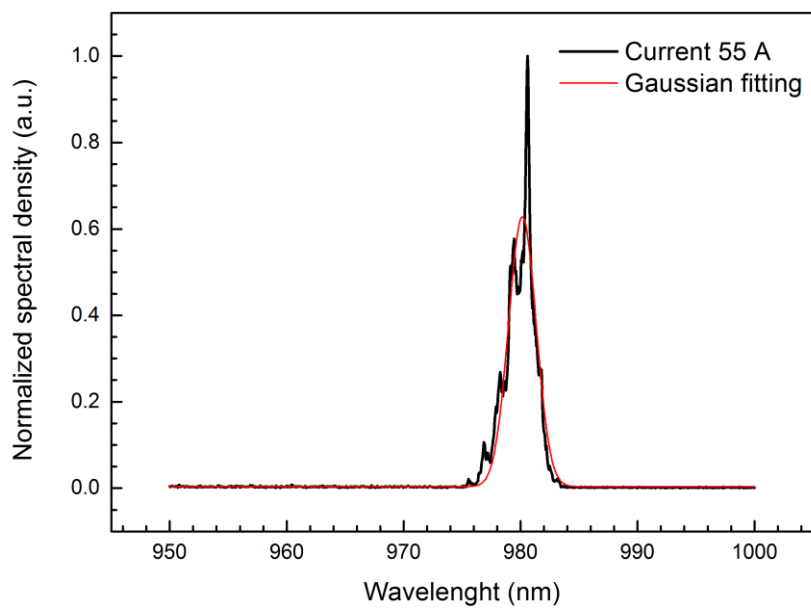
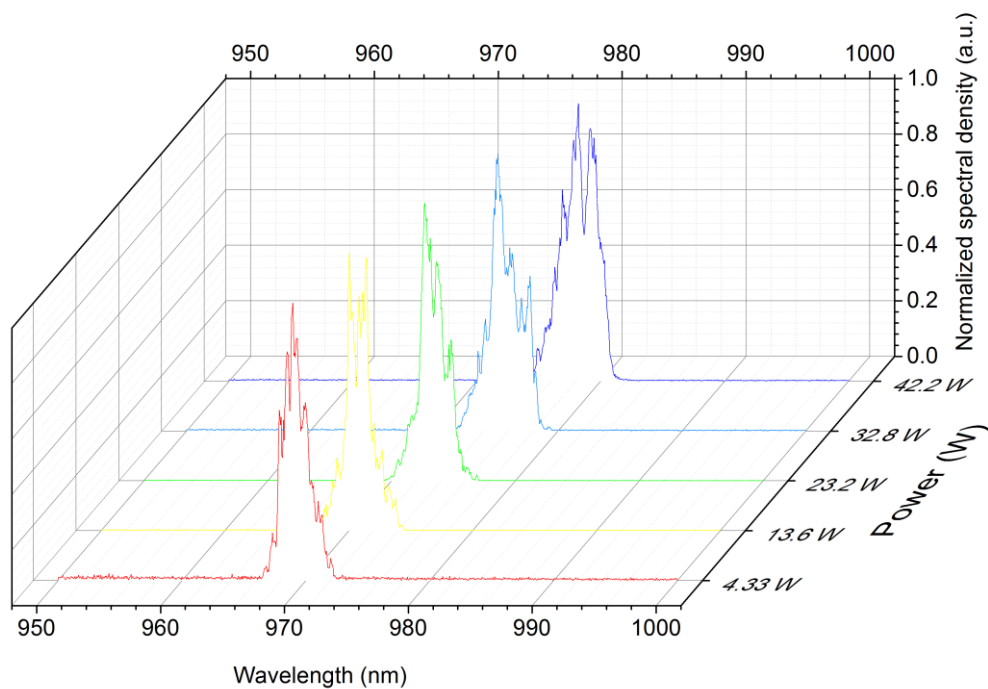


圖 5-2 半導體雷射陣列光源 L-I 曲線圖，光源雷射閾值為 5.4 A

因為光柵對於不同波長會有不同的繞射效率，因此為了便於分析，我們也量測此半導體雷射陣列光源耦合入光纖後之頻譜圖，圖 5- 3(a)為各輸入電流 55 A 下之頻譜圖，黑色線為實際量測曲線、紅色線為高斯擬合結果，圖 5- 3(b)為半導體雷射陣列不同輸入電流下之頻譜圖，表 5- 1 為半導體雷射陣列輸出功率與波長對應表，其平均頻寬(FWHM)為 3.03 nm。



(a)



(b)

圖 5-3 半導體雷射陣列頻譜圖, (a) 半導體雷射陣列輸入電流 55 A (47.9 W) 頻譜圖, (b) 半導體雷射陣列不同輸入電流之頻譜圖

表 5-1 半導體雷射陣列輸出功率與波長對應表



輸入電流	輸出功率	中心波長
10 A	4.33 W	969.1 nm
15 A	8.9 W	970.0 nm
20 A	13.6 W	970.8 nm
25 A	18.4 W	972.3 nm
30 A	23.2 W	973.3 nm
35 A	28 W	974.5 nm
40 A	32.8 W	975.6 nm
45 A	37.6 W	977.0 nm
50 A	42.2 W	978.3 nm
55 A	47.9 W	980.2 nm

5.2 側向耦光光柵實驗

由於 3.2 節所述之現象，第二次繞射會造成耦光上的損耗，因此，估計此效應在 10-mm 的光柵中所產生的影響效果，整理於表 5- 2 中。首先我們引用公式 4.1 來計算週期 680 nm 與 675 nm 分別對應之 $\pm 1^{\text{st}}$ 繞射角度值，依據圖 5- 4 所示，將基板厚度加上內纖衣直徑後，再乘上正切角度值，可得到橫向位移量。若光源經過兩倍之橫向位移量未大於 10 mm 時，將會再次入射光柵，形成第二次繞射損耗現象，此效應在 10-mm 光柵中佔有之比例列於表 5- 2 最後一列。在表 5- 2 中，當我們設計光柵週期為 675 nm 時，由於繞射角度的增加，可以有效降低第二次繞射損耗，進而提升耦光之效率。

表 5-2 10-mm 光柵之第二次繞射損耗

	實驗一	實驗二	實驗三	實驗四
光柵週期	週期 680 nm		週期 675 nm	
繞射角度	81.64°		85.35°	
內纖衣尺寸	400 μm	250 μm	400 μm	250 μm
橫向位移	3.74 mm	2.72 mm	6.76 mm	4.92 mm
損耗面積比例	50.28%	91.02%	0%	1.64%

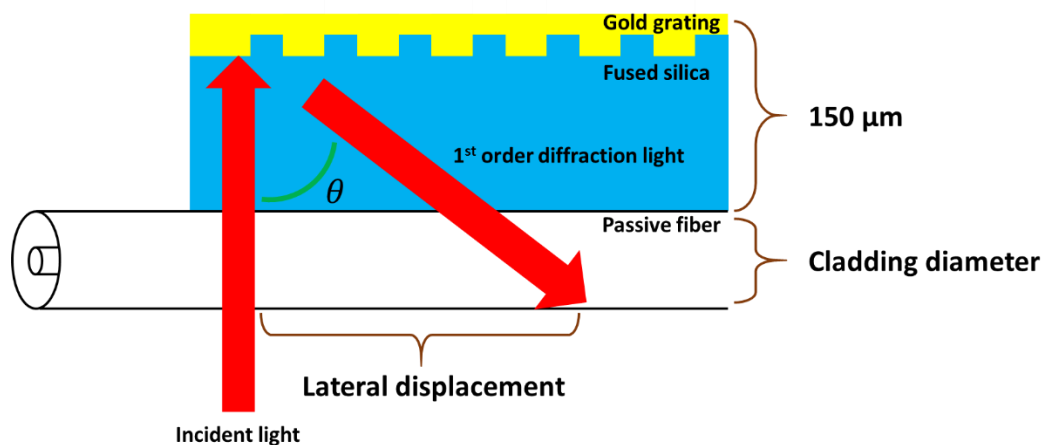


圖 5-4 第二次繞射損耗、光柵週期及內纖衣尺寸關係示意圖

接下來，我們討論耦光效率的量測，在本研究中將利用週期 675 nm 及 680 nm 光柵，將 976-nm 半導體雷射陣列分別耦入內纖衣直徑 400 μm 及 250 μm 之雙纖衣光纖中，並且分析 675-nm 光柵是否如預期，可有效降低第二次繞射所造成的損耗。

在耦光實驗的過程中，我們首先將製作好之光柵背面塗覆一層散熱膏，貼附於水冷系統上，於顯微鏡輔助下貼上兩張間距約 300 μm 膠帶，如圖 5-5 (a)。此膠帶約為 50 μm 厚，圖 5- 5(b)為(a)圖紅色區域顯微鏡下之拍攝圖，圖 5- 5(c)所示將折射率匹配液(THORLABS, G608N3)填入此凹槽中，再將填好之匹配液刮平整於膠帶，最後將膠帶撕下，完成一個長為 1 cm、寬 300 μm 及厚為 50 μm 之匹

配液於光柵上於圖 5-5(d)中，將已經剝除光纖外衣(jacket)之雙纖衣光纖，在顯微鏡輔助下貼附於光柵上，兩端再以膠帶固定位置，完成光纖與光柵貼合。

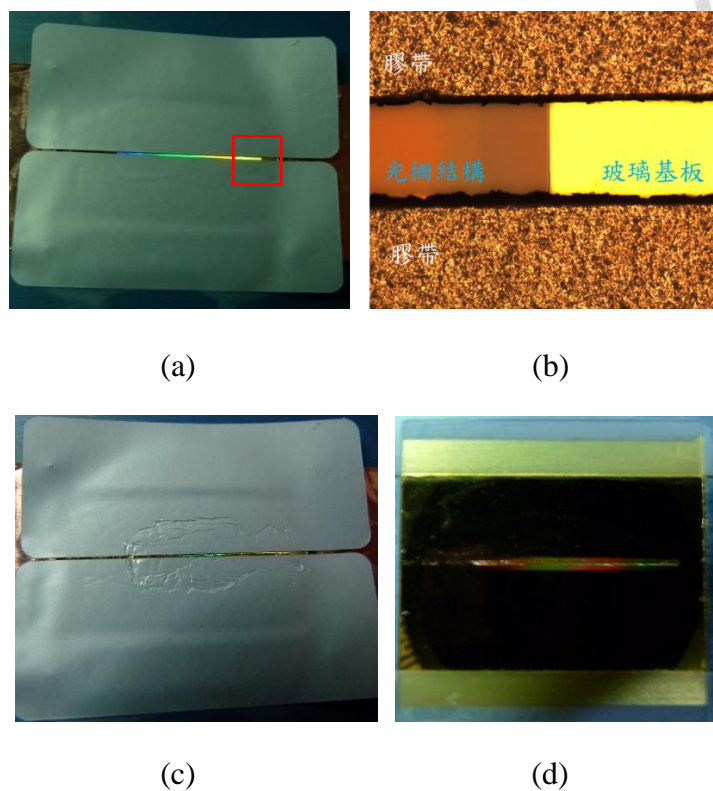


圖 5- 5 折射率匹配液塗佈於光柵之實驗圖, (a)間距 300 μm 寬之膠帶,(b)顯微鏡下拍攝圖, (c)塗上折射率匹配液, (d)折射率匹配液於光柵上

隨後將光纖、光柵及水冷系統移置三維平移台上，並且在光纖兩側放上功率量測器(Coherent, PM30)，完成如圖 5- 6 所示的光學量測系統架構，並進行耦光實驗。

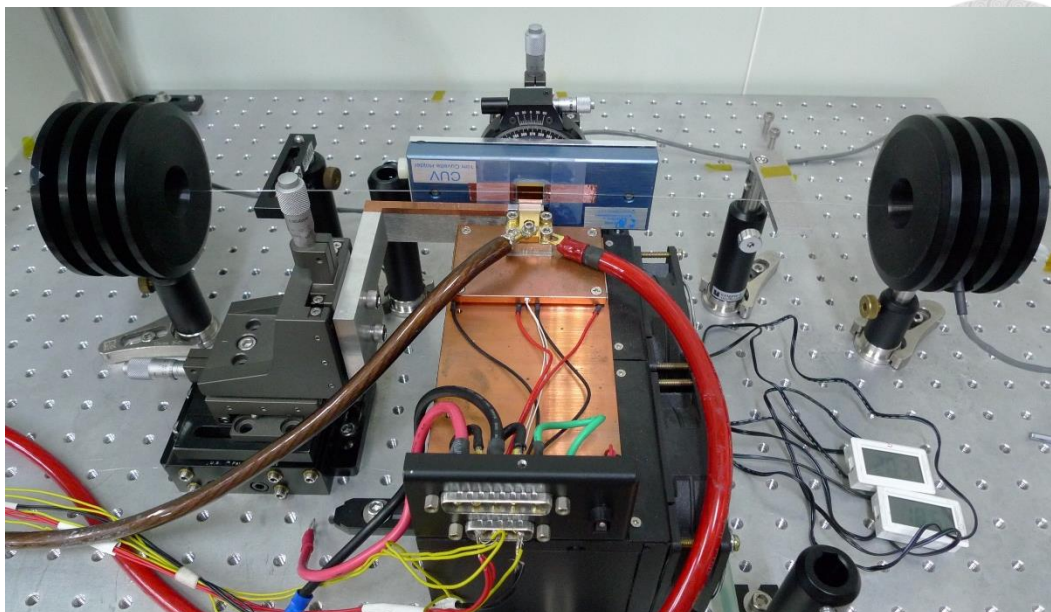


圖 5- 6 側向耦光量測系統

圖 5- 7 為實驗一之耦光效率圖，在圖中斜率較陡的紅色線為輸入瓦數 0.64 瓦至 2 瓦之線性擬合線，在此輸入瓦數中耦光效率下降較為劇烈，其原因為半導體雷射模態隨著輸入功率增加而變差，另一較緩的紅線為輸入瓦數 2 瓦以上之線性擬合線，耦光效率在 2 瓦以上是較緩下降趨勢，其因為光柵 0^{th} 階繞射光(正向反射)增加而影響半導體雷射陣列，以及熱效應所帶來之影響。我們將兩條擬合線所交叉後，得到輸入瓦數對應之效率值作為依據，便於分析在沒有熱效應下此實驗之耦光效率，因此在實驗一之耦光效率值為 56.62%。

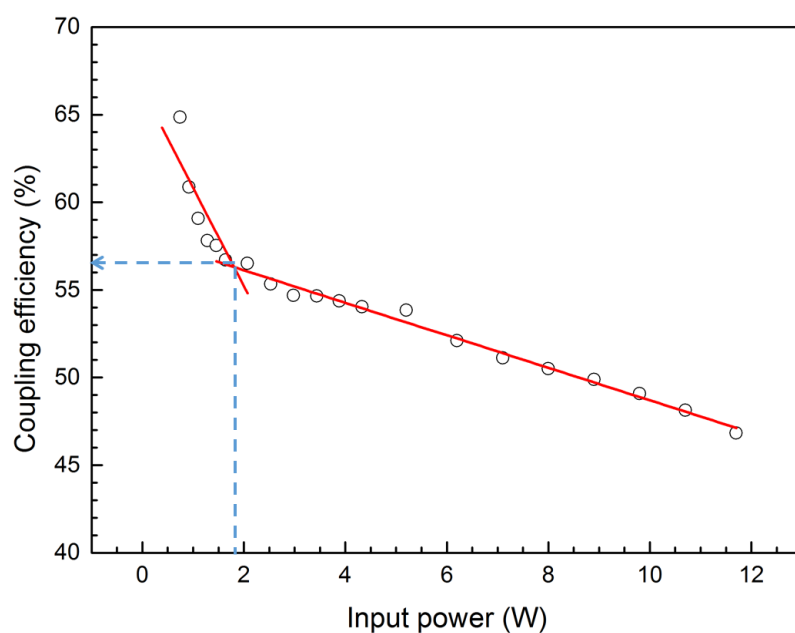


圖 5- 7 680-nm 光柵 400- μm 內纖衣光纖耦光效率圖，其斜率分別為-5.62%每瓦及-0.9%每瓦。

圖 5- 8 為實驗一至實驗四之耦光效率量測圖，其耦光效率值依據圖 5- 7 方式找出列於表 5- 3。在表 5- 3 中，內纖衣尺寸為 400 μm 之實驗結果與理論推導相當接近，但是在內纖衣為 250 μm 卻與理論值差異甚大，我們認為折射率匹配液之塗佈厚度影響耦光效率甚鉅。如圖 5-9(a)所示，灰色部分為折射率匹配液，對於內纖衣尺寸 250 μm 而言，厚度為 50 μm 之折射率匹配液太厚，大幅增加光源在傳遞時於光纖側向上損耗，光源由折射率匹配液散射至空氣介質中，因此使得耦光效率與理論值差異甚大。

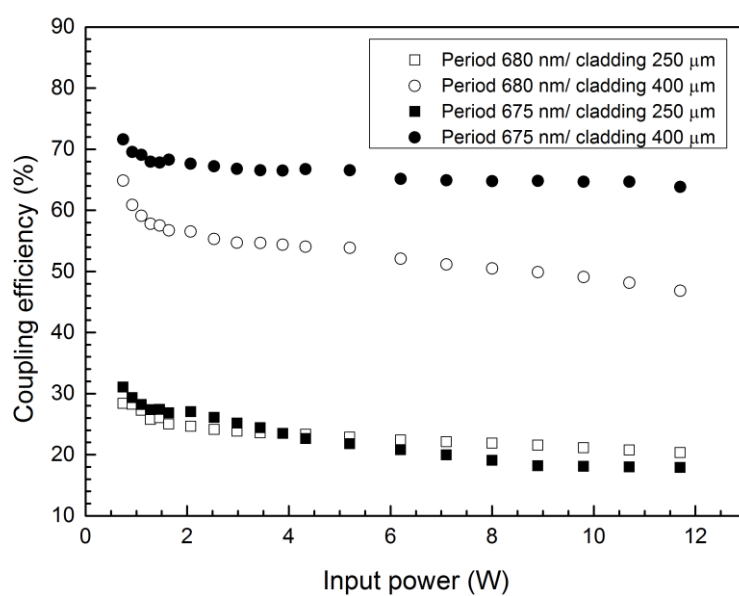


圖 5-8 折射率匹配液為 $50\ \mu\text{m}$ 之側向耦光效率圖

表 5-3 折射率匹配液為 $50\ \mu\text{m}$ 之側向耦光效率表

	實驗一	實驗二	實驗三	實驗四
光柵週期	週期 680 nm		週期 675 nm	
內纖衣尺寸	400 μm	250 μm	400 μm	250 μm
理論值	65.94%	53.94%	70.04%	62.35%
實驗值	56.52%	24.64%	67.63%	27.05%

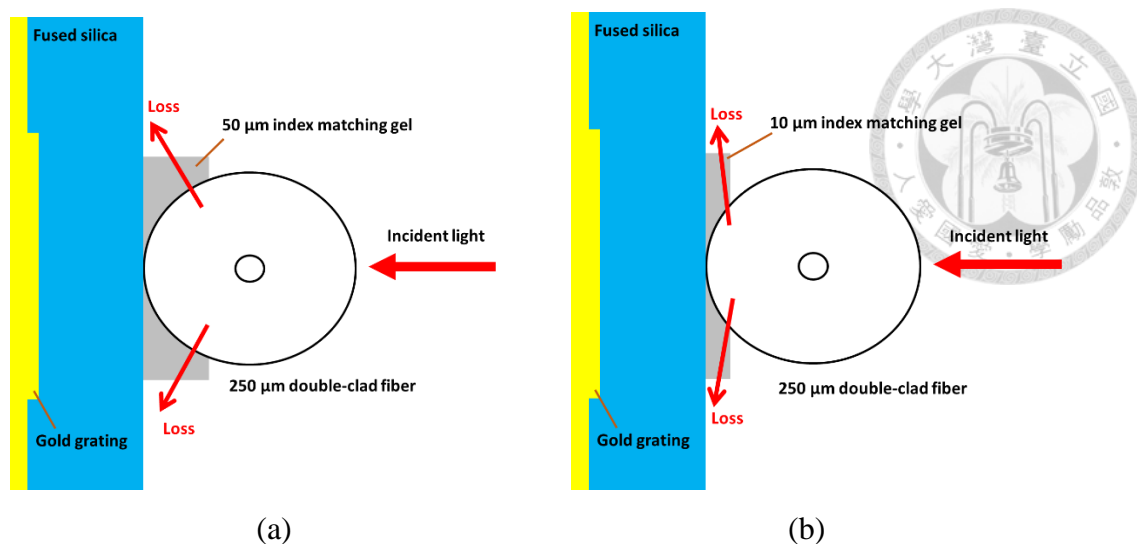


圖 5- 9 折射率匹配液厚度造成耦光損耗示意圖, (a)塗膠厚度 50 μm , (b)塗膠厚度 10 μm 。

基於上述之原因，我們改以聚氯乙烯材質之保鮮膜作為材料，經由螺旋測微器與表面厚度儀 alpha-step 量測後，確認保鮮膜厚度約為 10 μm ，因此我們在實驗二與實驗四使用保鮮膜作為折射率匹配液之塗佈工具。由於折射率匹配液厚度改變至 10 μm 後，減少了折射率匹配液產生之散射耦光，耦光效率有明顯提升，如圖 5- 10 所示。

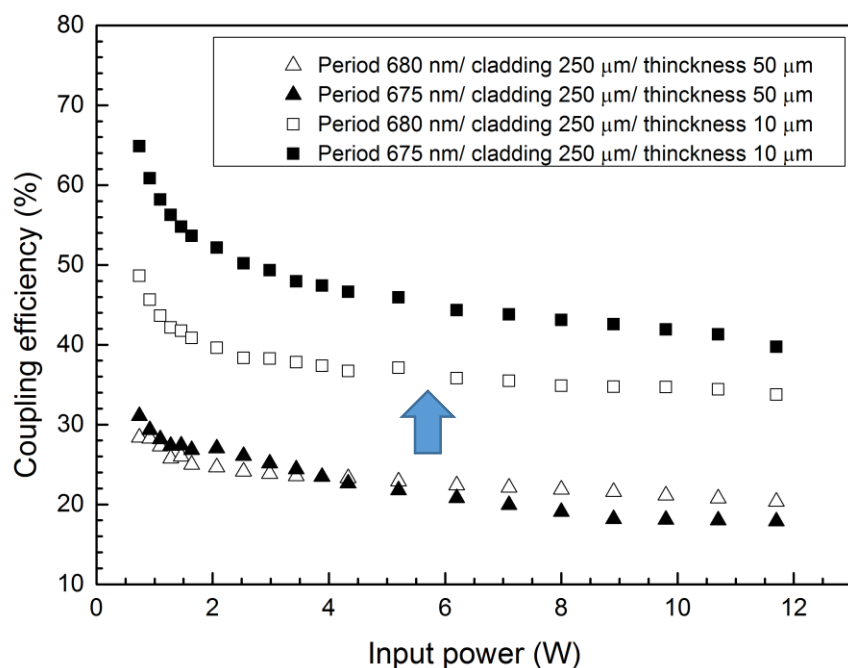


圖 5-10 折射率匹配液厚度之影響於耦光效率圖

將四個實驗數據重新整理於表 5-4 中，並且在第二次繞射損耗改善上，以實驗值與理論值之比例差作為量化比對。當使用內纖衣尺寸為 400 μm 的光纖時，675-nm 光柵之實驗與理論的比值為 96.56%，較 680-nm 光柵之情形(85.71%)高出 10.85%，而當使用 250- μm 光纖時，675-nm 光柵之實驗值與理論值的比值為 83.67%，較 680-nm 光柵情形(73.43%)高出 10.24%，由此可證明使用 675-nm 光柵減少第二次繞射效應效果顯著。

表 5-4 側向耦光理論值與實驗值比較表

	實驗一	實驗二	實驗三	實驗四
光柵週期	週期 680 nm		週期 675 nm	
內纖衣尺寸	400 μm	250 μm	400 μm	250 μm
理論值	65.94%	53.94%	70.04%	62.35%
實驗值	56.52%	39.61%	67.63%	52.17%
理論值/實驗值	85.71%	73.43%	96.56%	83.67%

5.3 基因演算法光柵實驗

當第二次繞射損耗因光柵週期優化而改善後，我們將著手解決於 3.3 節所述之折射率匹配液損耗問題，搭配 4.2 節之基因演算法來改善此效應。透過基因演算法我們設計如圖 4-11 (a) 之 10-mm 光柵，估計將再提升約 4% 之耦光效率，總效率約 74%，其結構如圖 5-11 所示。

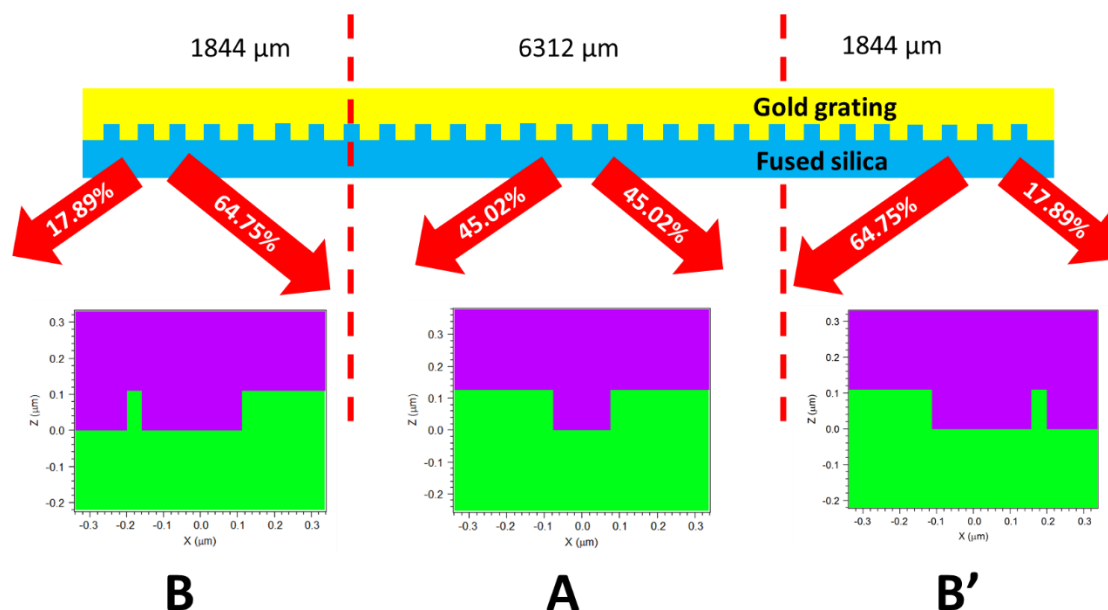


圖 5-11 基因演算法結構於 10 mm 光柵中效率示意圖，A 結構為對稱效率結構，B 與 B' 為基因演算法效率非對稱結構，紫色為金光柵結構，綠色為玻璃基板。

依前節所述之方式如圖 5-6，將光柵架設於系統中進行內纖衣尺寸 400 μm 之耦光量測，並將其結果紀錄於圖 5-12 中。實驗所得之耦光效率為 43.00%，比預期結果(74%)降低約 31%，為了討論耦光效率差異，我們檢視基因演算法製程光柵結構與內嵌式光柵製程對於耦光效率所造成的差異。

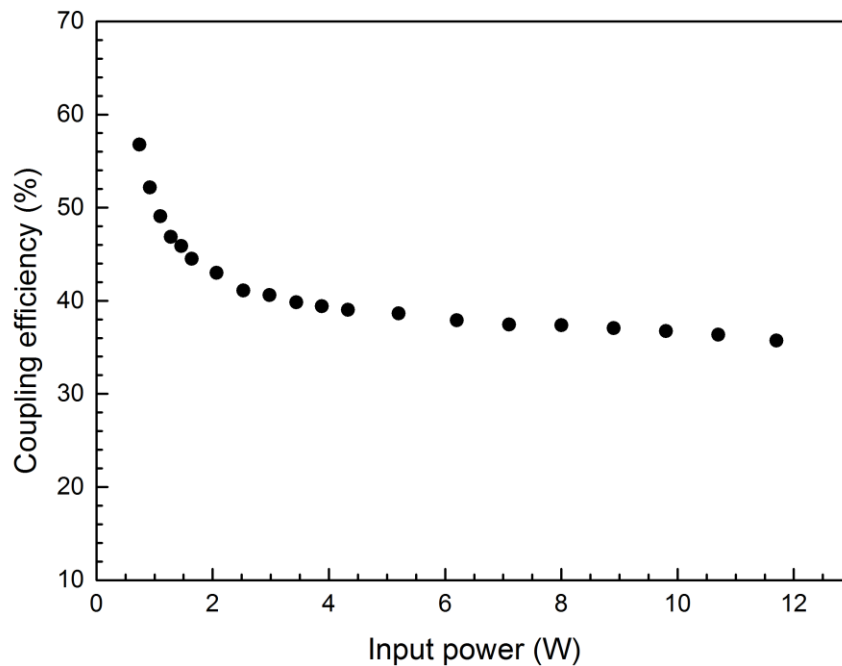
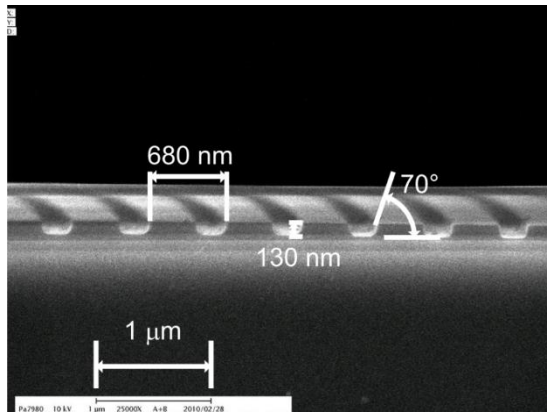
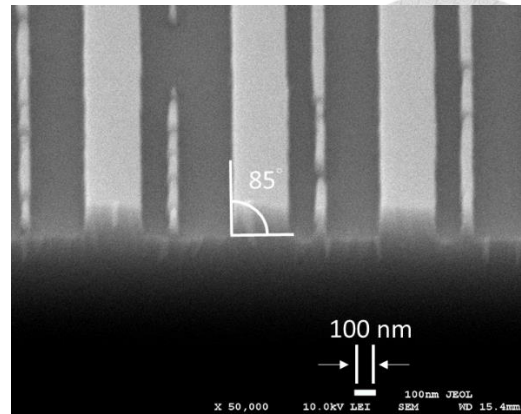


圖 5- 12 基因演算法結構耦光效率圖

在 4.3 節敘述中，內嵌式光柵與基因演算法光柵製程上，在蝕刻過程中兩者所選擇之抗蝕刻層分別是光阻與金屬鉻，如圖 5- 13 所示，利用光阻作為蝕刻阻擋層時 [1]，經過乾式蝕刻後所得到之側壁角度為 70° ，而利用鉻作為蝕刻阻擋層得到之側壁角度為 85° 。有於此基因演算法光柵實驗之 10-mm 光柵的 A 結構 (圖 5- 11)是根據側壁 70° 的最佳效率值設計值製作，而使用鉻為蝕刻阻擋層製程所產生之側壁為 85° ，因此在基因演算法中間區域結構的效率值需要根據圖 4- 5 矩形式光柵結構 $\pm 1st$ 階繞射光效率之寬度與深度關係圖中之圓點計算，模擬結果之效率只有 67.4%(原始最佳效率 90.04%)，是導致本實驗效率未達預期原因之一。



(a)



(b)

圖 5-13 側壁蝕刻角度 SEM 圖, (a)內嵌式光柵側壁蝕刻角度 [1], (b) 基因演算法光柵側壁蝕刻角度。

另外我們也檢視圖 5-11 中之 B 結構在製程上是否能夠實現。在圖 5-14 中，左側為一 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 之 B 結構，其拍攝倍率為 250 倍(白色尺標為 $100\mu\text{m}$)，右側圖拍攝倍率為 15,000 倍(白色尺標為 $1\mu\text{m}$)右上圖為淺色區域中為完整的理想結構，但是在右下圖深色區域卻發現較細線寬之結構無法實現，導致基因演算法結構特色在本實驗中無法有顯著之效果。

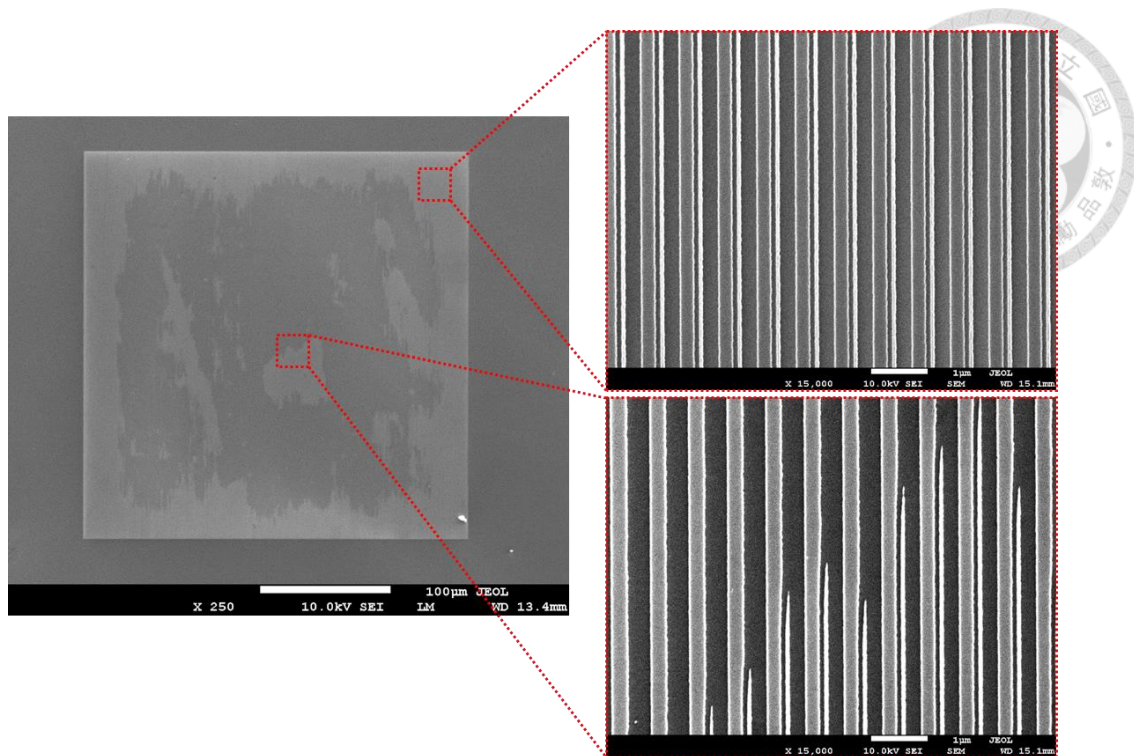
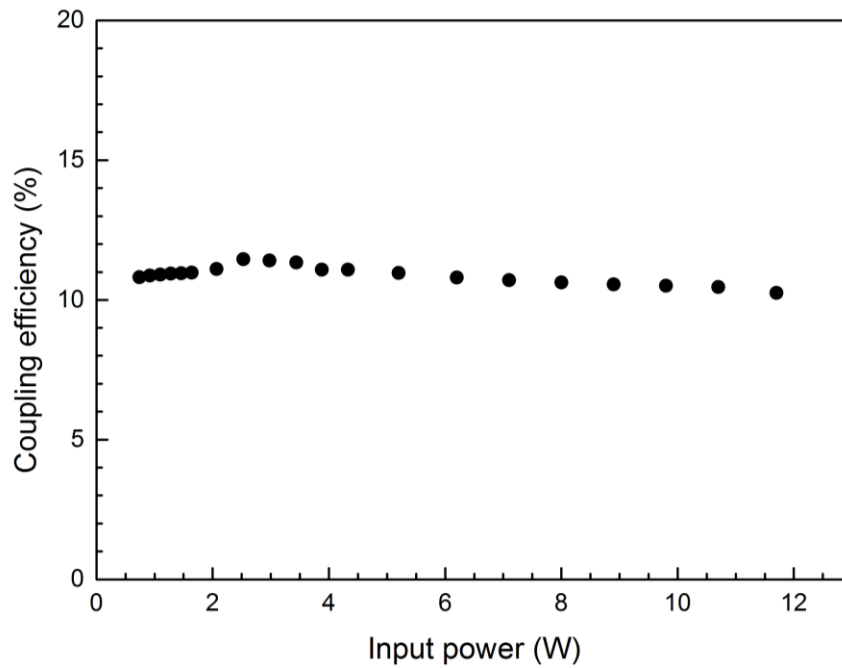
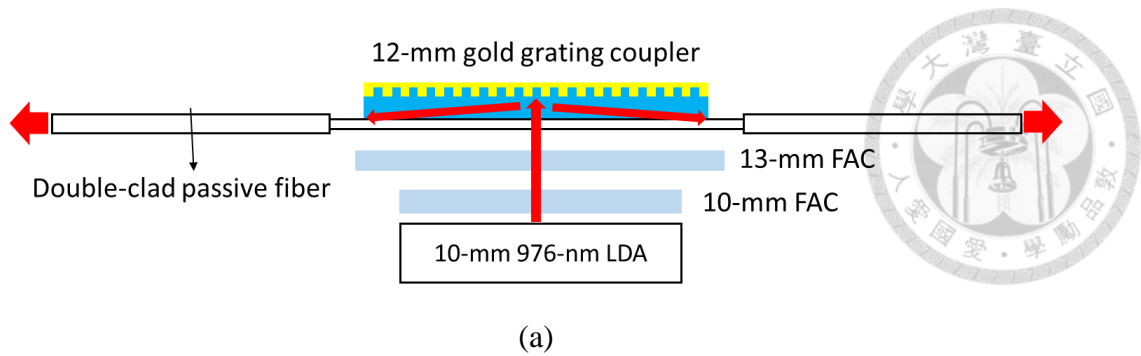


圖 5- 14 基因演算法結構 SEM 圖，左圖拍攝倍率為 250 倍，右上及右下圖拍攝倍率為 15,000 倍。

為了使基因演算法結構光柵能夠實現，並且提升耦光效率，我們必須在 10-mm 光柵結構之寬度與深度值須使用 4.1.2 節中之垂直側壁結構最佳值設計製作，以提升光柵整體結構之效率；在 10-mm 光柵兩側區域 B 結構部分，需要在製程步驟中改善，例如在電子束顯影時之 dose time 校正、lift off 製程中使用較緩和方式掀離光阻等，使得基因演算法結構能夠完整及均勻地實現。

5.4 無慢軸透鏡側向耦光光柵實驗

為了能將側向耦光系統應用於商用產品上，必須有效利用整體系統空間，以節省成本及提高便利性，因此我們思考若在本實驗架構中，減少一透鏡元件，並且同時能夠維持耦光效率下，能夠使得整體光路更簡潔，研發出效率高、便利性高及價格更低廉之產品。在圖 5- 15(a)中我們的設計是將慢軸透鏡移除於系統，同時考慮半導體雷射陣列慢軸方向上之散射角度 4° 造成光源橫向發散，將原本週期 675 nm 之 10-mm 光柵改為 12-mm 光柵來做實測，其耦光效率於圖 5- 15(b) 中。



(b)

圖 5- 15 (a)實驗架構圖, (b)無慢軸鏡耦光效率圖

無慢軸透鏡耦光效率約為 11.2%，效果甚為不佳，其原因為慢軸方向缺少準直鏡，因此光柵需對於慢軸方向有好的容忍度時，才能有效的提升耦光效率。於圖 5- 16 所示，週期 675 nm 光柵慢軸僅在 $\pm 0.2^\circ$ 內有 90%效率，而當角度擴大為 $\pm 4^\circ$ 時，效率將降至 52.38%及正向反射效率提升至 41.79%，有太多的正向反射光回返至半導體雷射光源，影響其運作狀況，因此以週期光柵 675 nm 在本實驗上之耦光效率不佳。

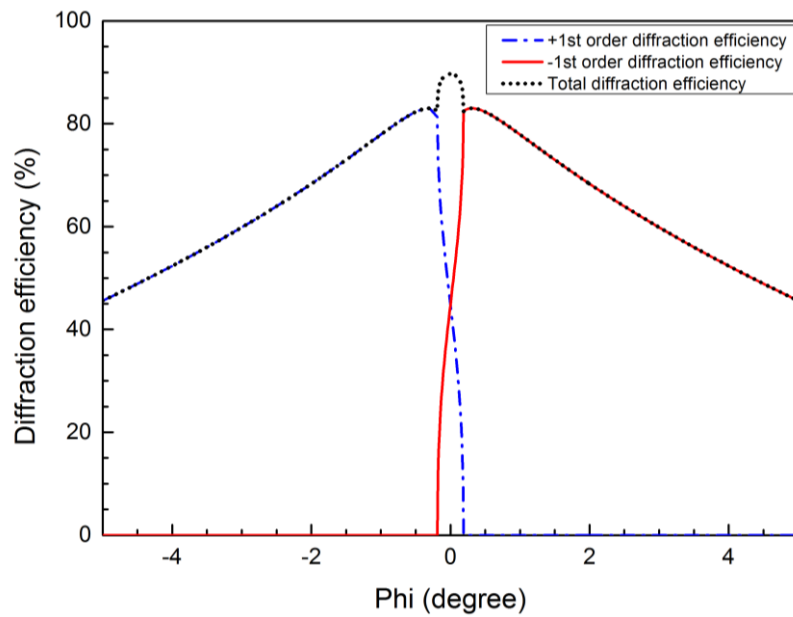


圖 5-16 光柵週期 675 nm 慢軸方向角度效率圖

接下來我們對於光柵週期、內纖衣尺寸、慢軸方向 $\pm 4^\circ$ 繞射效率以及第二次繞射損耗面積比例四項參數進行整理討論，圖 5-17 顯示第二次繞射損耗面積比例隨著光柵週期增加與內纖衣尺寸增大而影響加劇，但 $\pm 4^\circ$ 繞射效率卻隨著光柵週期增加而提升，因此避免第二次繞射損耗效應與慢軸方向高容忍度無法同時兼得。

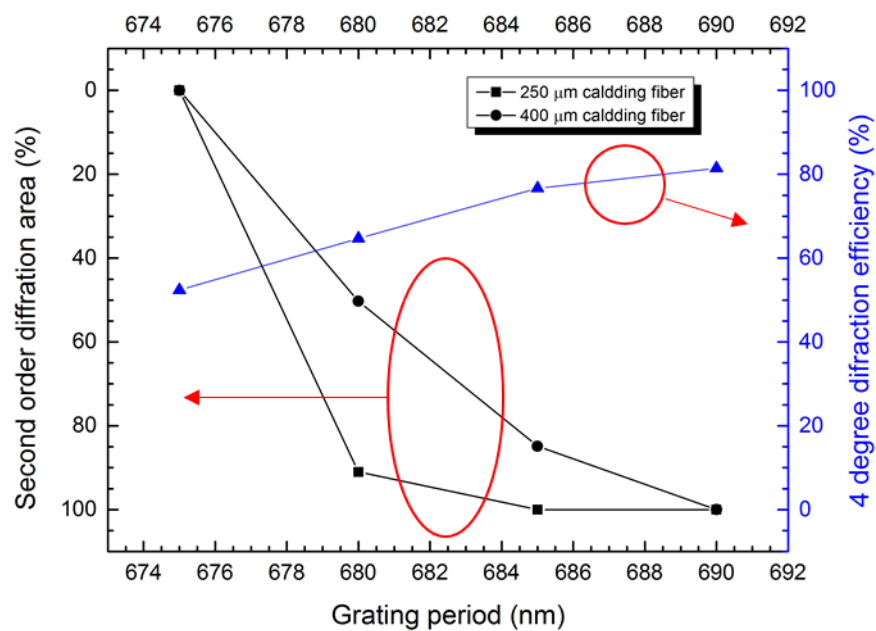


圖 5-17 光柵週期、 $\pm 4^\circ$ 繞射效率及第二次繞射損耗面積比較圖

5.5 結果與討論

本章節內容分別針對於第二次繞射效應、折射率匹配液效應及無慢軸準直鏡效應三項進行實驗。在 5.2 節實驗中，明確的證實若光柵週期減小，可減少第二次繞射損耗效應。5.3 節中，由於製程上的因素，導致在實驗上無法明確證實基因演算法結構效果，起初在基因演算法結構中，因有 40 nm 線寬之結構，無法藉由原本 4.3.1 節所述之內嵌式光柵製程製作，因此我們改以 4.3.2 節所敘述之基因演算法光柵製程實現，主要是將光阻蝕刻防阻層改為鉻金屬作為蝕刻防阻層，而製作出蝕刻側壁為由原本 70°變為 85°，由圖 5-18 所示，基因演算法結構會因側壁角度變化而失去效率不對稱性及繞射效率值，因此利用基因演算法製程能同時得到 40 nm 線寬結構以及近乎垂直之蝕刻側壁，此兩項特性皆利基因演算法結構的實作，並且可以獲得非對稱繞射效率現象，以減少折射率匹配液造成之損耗。

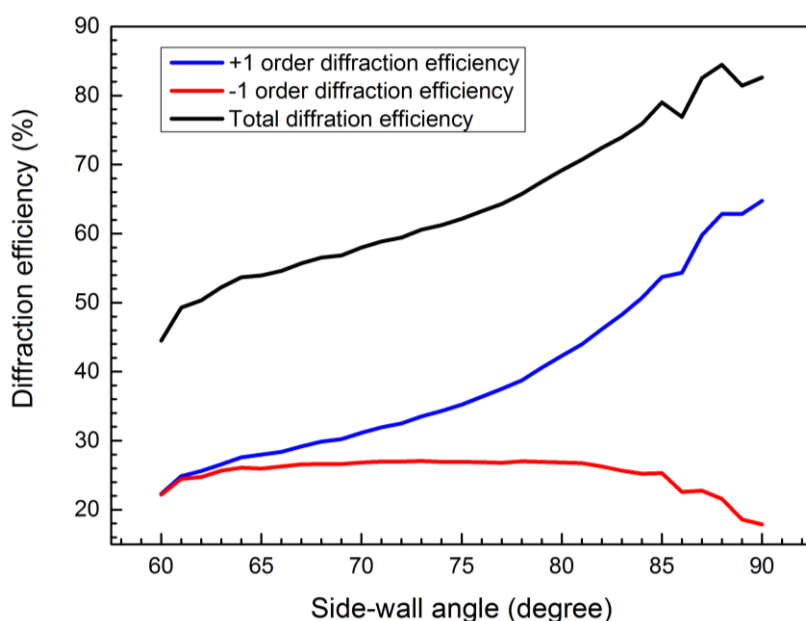


圖 5-18 基因演算法結構與側壁角度繞射效率關係圖

在本節三個實驗中，在光柵深度及寬度最佳化狀況下，討論主要影響耦光效率之光柵與光纖結構參數有以下幾項：(1)光柵週期、(2)內纖衣尺寸，在側向耦光架構中影響效率之因子有：(1)第二次繞射效應、(2)折射率匹配液、(3)慢軸方向容忍度，這些參數與影響因子皆環環相扣，但每個參數與因子之趨勢各不相同，因此將這些參數與因子關係整理於表 5-5 中。本研究最終目的為達到高亮度之

光纖輸出，其方法有兩種：(1)避免第二次繞射損耗及(2)減小內纖衣尺寸，而在光纖內纖衣尺寸由 $400\ \mu\text{m}$ 縮小至 $250\ \mu\text{m}$ ，勢必加劇第二次繞射損耗，因此需將光柵週期由 $680\ \text{nm}$ 改至 $675\ \text{nm}$ ，提高繞射角度來避免損耗，實驗結果其亮度可提升約 2.36 倍。

表 5-5 結構參數與架構因子關係表

	光柵週期	內纖衣尺寸	LDA 長度
第二次繞射損耗	正相關	負相關	正相關
折射率匹配液於光柵邊緣損耗	負相關	無關	負相關
慢軸方向容忍度降低	負相關	無關	無關

在實際應用的開發價值上，可以從高亮度輸出及無慢軸透鏡兩觀點切入，而高亮度輸出主要是藉由減少光柵週期而得，但在慢軸方向容忍度卻與其背道而馳。我們若想解決此問題，可從光源部分著手，改變半導體雷射陣列長度為 $5\ \text{mm}$ ，使得我們所需要之光柵長度只需 $5\ \text{mm}$ ，在此架構改變下，第二次繞射損耗效應減小許多；因此在結構參數上多了“半導體雷射陣列長度”，其關係列於表 5-5 LDA 長度一欄。以利討論結構參數與光學架構關係，我們將光柵週期、內纖衣尺寸、半導體雷射陣列長度及第二次繞射損耗繪於圖 5-19，圖中 10-mm LDA 與 5-mm 分別表示半導體雷射陣列長度，括號中代表第二次繞射損耗面積比例，在綠色區域中若使用 $10\ \text{mm}$ 之半導體雷射陣列，搭配對應之光柵週期與內纖衣尺寸，就不會有任何第二次繞射損耗，若進入黃色區域，則第二次損耗現象開始出現；當我們將光源改以 $5\ \text{mm}$ 之半導體雷射陣列時，圖中無第二次繞射效應區域增加，在黃色與綠色區域皆無損耗；圖中的四個十字標定與羅馬數字分別代表 5.2 節實驗一至四，可與表 5-2 互相參照，例如實驗一參數之第二次繞射損耗面積比例為 50.28%，改變光柵週期至 $675\ \text{nm}$ 後，實驗三參數第二次繞射損耗面積比例變為 0%，若我們將實驗一之半導體雷射陣列改為 $5\ \text{mm}$ 時，第二次繞射損耗面

積比例就會降為 0%。因此我們可以用相對較大之光柵週期搭配小尺寸之內纖衣，以提升慢軸方向之容忍度，提高商用產品開發價值。

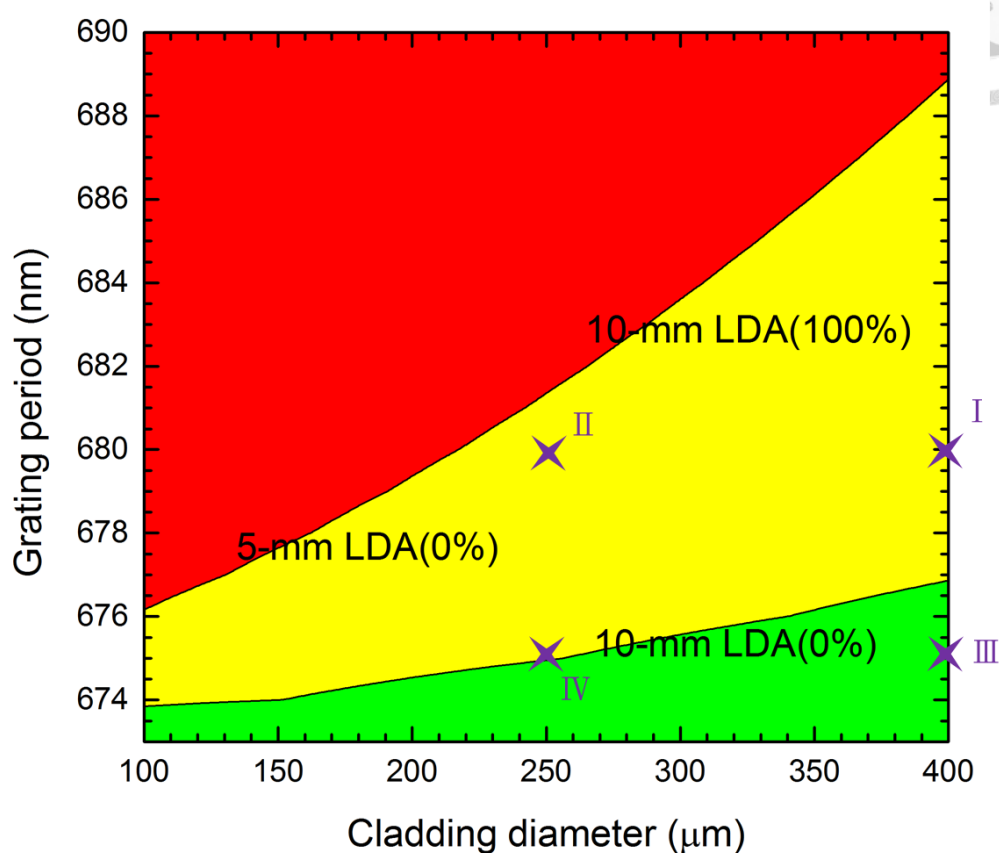


圖 5-19 光柵週期、內纖衣尺寸、LDA 長度與第二次繞射效應關係圖，使用 10-mm LDA 在綠色區域無第二次繞射損耗，在 10-mm LDA(100%)線上代表有 100% 第二次繞射損耗，而使用 5-mm LDA 在綠色以及黃色區域無第二次繞射損耗。

同時我們可以利用基因演算法，設定其適應函數，找出高慢軸方向容忍度之結構及改善第二次繞射效應等等，以將圖 5-17 之 $\pm 4^\circ$ 繞射效率提高及圖 5-19 中無第二次繞射效應之區域面積增加，因此基因演算法可以視為在側向耦光設計中增加耦光效率之利器。

第六章 結論與未來展望



6.1 結論

本研究中，我們以內嵌式光柵製程製作出 10-mm 675-nm 週期之光柵，並且與 680-nm 週期光柵分析比較耦光效率，證明 675-nm 週期光柵有效減少第二次繞射損耗，另外我們改善折射率匹配液塗佈厚度由 50 μm 減低至 10 μm ，使得 250- μm 內纖衣耦光效率提升 25% 至 52.17%，其結果接近 680-nm 光柵 400- μm 內纖衣耦光效率值 56.52%，光纖輸出亮度可提升 2.36 倍。

此外我們也利用基因演算法來設計光柵，解決折射率匹配液在光柵邊緣部分之損耗，製程上也重新設計，蝕刻防阻層由原本的光阻改為鉻金屬，除了提供更小線寬製作之可能性外，還使得蝕刻側壁由 70° 提升至 85°，讓基因演算法光柵之 $\pm 1^{\text{st}}$ 繞射效率非對稱性質更加顯著，但在實作上因為基因演算法結構之側壁角度提升，光柵中間部分結構尚未優化至 90.04%，以及光柵邊緣結構無法均勻呈現 40-nm 線寬，導致目前實驗結果無法證明基因演算法光柵效果。

最後我們測試無慢軸鏡之側向耦光，根據半導體雷射陣列之慢軸發散角 $\pm 4^\circ$ 度，製作 12-mm 675-nm 光柵進行側向耦光實驗，實驗結果顯示耦光效率不佳，其原因為 675-nm 光柵對於慢軸容忍度較差，因此我們將側向耦光系統中光柵週期、內纖衣尺寸、慢軸方向 $\pm 4^\circ$ 繞射效率與第二次繞射效應整理比較，並且將結果繪於圖 5-17，圖中顯示光柵週期對於第二次繞射損耗及慢軸方向容忍度呈現相反趨勢，因此我們在光柵設計上須做取捨，以使得在無慢軸實驗之耦光效率有良好的表現。

6.2 未來展望

目前我們利用縮小光柵週期避免第二次繞射損耗，但是較小光柵週期卻不利於實際應用方面，因此我們可利用縮短半導體雷射陣列的方式，來減少第二次繞射損耗，同時保有慢軸容忍度及將光源耦至更小內纖衣尺寸之光纖，也可以減少光柵製程之電子束顯影時間。

基因演算法製程中還需要在電子束顯影時之 dose time 校正、lift off 製程中使用較緩和方式掀離光阻等方式改善，以得到 40-nm 線寬均勻呈現，以及光柵針對側壁 85°設計優化後，達到改善折射率匹配液在光柵邊緣之損耗。

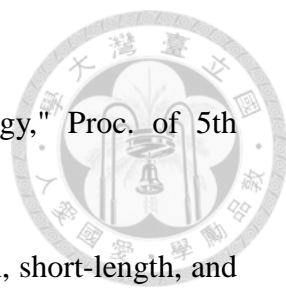
綜合以上論述，將半導體雷射陣列縮短，其優點有(1)降低第二次繞射損耗、(2)提升慢軸方向容忍度、(3)電子束顯影時間減少，我們可以進而利用基因演算法，設定不同的適應函數，來針對於第二次繞射效應與慢軸容忍度設計光柵，再將耦光效率提升，達到系統簡潔及高亮度輸出之特性，提高實際應用之可能性。

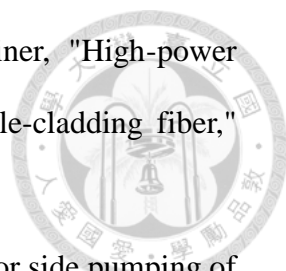
參考文獻



- [1] 黃玠維, "次波長光柵實現半導體雷射陣列側向激發之高功率光纖雷射," 國立臺灣大學, 博士論文, 2012.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Double-clad_fiber
- [3] E. Snitzer, H. Po, R.P. Tumminelli, and F.Hakimi, "Optical fiber lasers and amplifiers," U.S. patent 4,815,079, Mar. 21, 1989.
- [4] R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper, and D. C. Hanna, "Ytterbium-doped fiber amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.* 33, pp. 1049—1056, 1997.
- [5] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. Mc-Collum, "Double-clad, offset core Nd fiber laser," *Optical Fiber Sensors*, paper PD5, 1998.
- [6] G. G. Vienne, J. E. Caplen, L. Dong, J. D. Minelly, J. Nilsson, and D. N. Payne, "Fabrication and characterization of $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ phosphosilicate fibers for lasers," *J. Lightwave Technol.* 16, pp. 1990–2001, 1998.
- [7] V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. S. Yeh, and E. Zucker, "110W fiber laser," *Electron. Lett.* 35, pp. 1158—1160, 1999.
- [8] J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer, and A. Tunnemann, "500 W continuous-wave fiber laser with excellent beam quality," *Electron. Lett.* 39, pp. 645—647, 2003.
- [9] Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," *Opt. Express* 12, pp. 6088—6092, 2004.
- [10] V. Fomin, A. Mashkin, M. Abramov, A. Ferin, V. Gapontsev, and IPG Laser GmbH Burbach Germany, "3 kW Yb fiber lasers with a single-mode output," *International Symposium on High-Power Fiber Lasers and their Applications*,

2006.

- 
- [11] E. Stiles, "New developments in IPG fiber laser technology," *Proc. of 5th International Workshop on Fiber Lasers*, 2009.
- [12] D. Kouznetsov and J. V. Moloney, "Highly efficient, high-gain, short-length, and power-scalable incoherent diode slab-pumped fiber amplifier/laser," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 39, pp. 1452—1461, 2003.
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Diode-pumped_solid-state_laser
- [14] P. Schreiber, B. Hoefer, P. Dannberg, and U. D. Zeitner, "High-brightness fiber-coupling schemes for diode laser bars," *Optics & Photonics 2005*, pp. 587602—587602—10, 2005.
- [15] H.-G. Treusch, K. Du, M. Baumann, V. Sturm, B. Ehlers, and P. Loosen, "Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays," *Optoelectronics and High-Power Lasers & Applications*, pp. 98—106, 1998.
- [16] K. Du, M. Baumann, B. Ehlers, H. Treusch, and P. Loosen, "Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode laser bars," *Advanced Solid State Lasers*, 1997.
- [17] H. Schlüter, C. Tillkorn, U. Bonna, G. Charache, J. Hostetler, T. Li, C. Miester, R. Roff, T. Vethake, and C. Schnitzler, "Dense spatial multiplexing enables high brightness multi-kW diode laser systems," *Lasers and Applications in Science and Engineering*, pp. 61040M—61040M—8, 2006.
- [18] M. Haag, B. Köhler, J. Biesenbach, and T. Brand, "Novel high-brightness fiber coupled diode laser device," *Proc. SPIE*, p. 64560T, 2007.
- [19] L. Goldberg, J. P. Koplow, and D. A. Kliner, "Highly efficient 4-W Yb-doped fiber amplifier pumped by a broad-stripe laser diode," *Optics Letters*, vol. 24, pp. 673—675, 1999.

- 
- [20] L. Goldberg, J. P. Koplow, R. P. Moeller, and D. A. Kliner, "High-power superfluorescent source with a side-pumped Yb-doped double-cladding fiber," *Optics Letters*, vol. 23, pp. 1037–1039, 1998.
- [21] J. P. Koplow, S. W. Moore, and D. A. Kliner, "A new method for side pumping of double-clad fiber sources," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 39, pp. 529–540, 2003.
- [22] Q. Xiao, P. Yan, S. Yin, J. Hao, and M. Gong, "100 W ytterbium-doped monolithic fiber laser with fused angle-polished side-pumping configuration," *Laser Physics Letters*, vol. 8, pp. 125–129, 2011.
- [23] R. Herda, A. Liem, B. Schnabel, A. Drauschke, H.-J. Fuchs, E.-B. Kley, H. Zellmer, and A. Tuennermann, "Efficient side-pumping of fibre lasers using binary gold diffraction gratings," *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 276–277, 2003.
- [24] J. Walpole, "Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 28, pp. 623–645, 1996.
- [25] 林軒立, "光柵式側向耦光技術於摻鉕釔鋁石榴石晶體光纖雷射之研究," 國立臺灣大學, 碩士論文, 2013.
- [26] Rsoft Design Group, <http://optics.synopsys.com/rsoft/>
- [27] M. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, and T. Gaylord, "Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 12, pp. 1068–1076, 1995.
- [28] C.-W. Huang, D.-W. Huang, C.-L. Chang, D.-Y. Jheng, K.-Y. Hsu, C.-H. Kuan, and S.-L. Huang, "Demonstration of side coupling between high power laser diode array and double-clad fiber using sub-wavelength grating," *CLEO: Science and Innovations*, 2011.

- [29] P. Johnson and R. Christy, "Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd," *Physical Review B*, vol. 9, pp. 5056, 1974.
- [30] M. A. Ordal, R. J. Bell, R. Alexander Jr, L. Long, and M. Querry, "Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W," *Applied optics*, vol. 24, pp. 4493 – 4499, 1985.