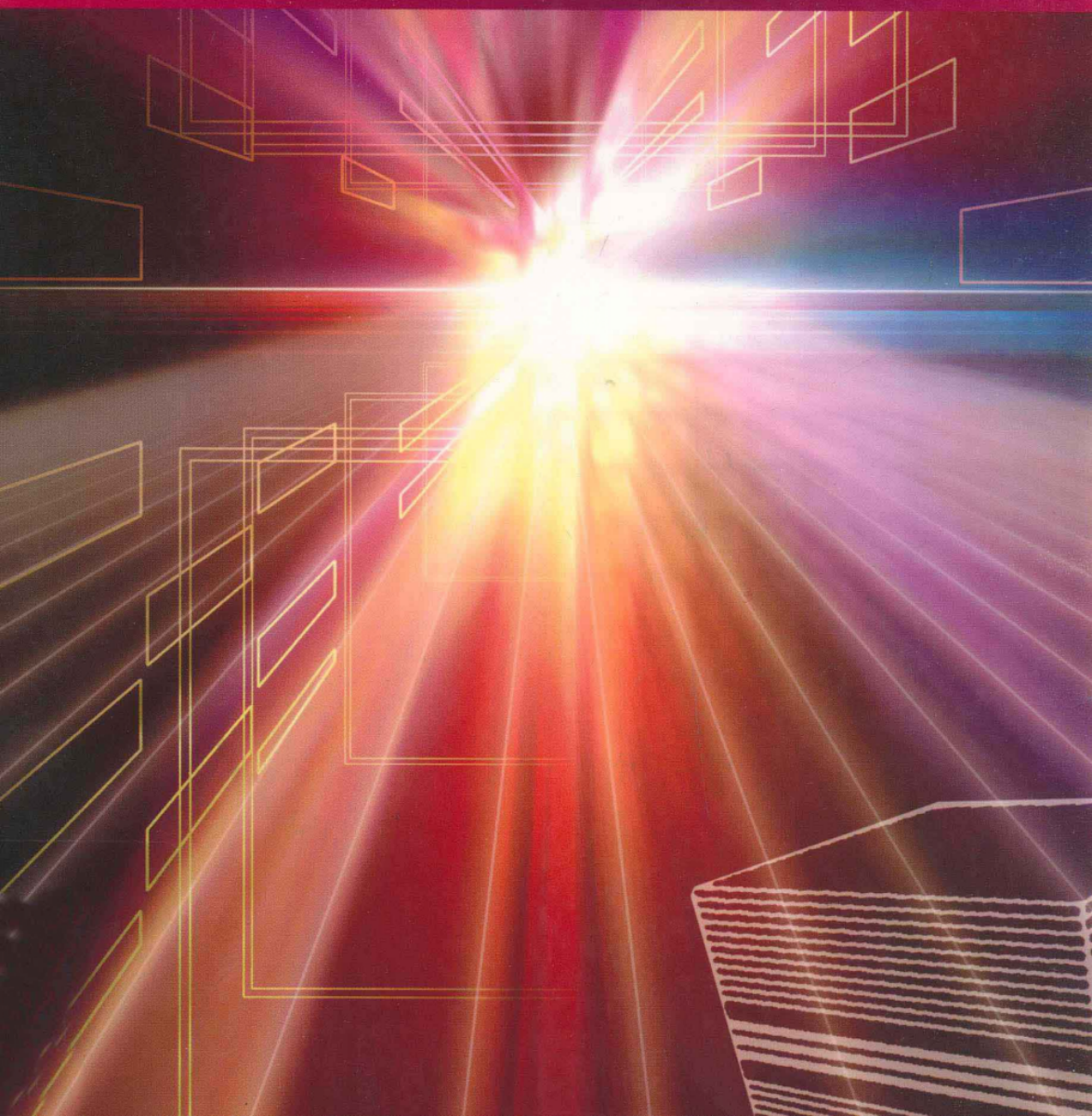


半導體雷射技術

Semiconductor Laser Technology

盧廷昌 王興宗 著



半導體雷射技術

Semiconductor Laser Technology

本書特色：

半導體雷射廣泛的存在於今日高度科技文明的生活中，如光纖通信、高密度光碟機、雷射印表機、雷射電視、雷射滑鼠、雷射舞台秀甚至雷射美容與醫療、軍事等不勝枚舉之應用都用到了半導體雷射。半導體雷射的實現可以說是半導體科技與光電科技的智慧結晶，同時也對人類社會帶來無與倫比的便利與影響。本書沿續「半導體雷射導論」由淺入深的介紹半導體雷射基本操作原理與設計概念，內容涵蓋了不同半導體雷射的構造與光電特性，以及半導體雷射的製程與信賴度，可為大(專)學四年級以及研究所一年級相關科系的學生與教師，提供有系統的學習半導體雷射的教科書，本書亦適用於想要深入了解半導體雷射的專業人員。

本書提供了：

- 迅速了解半導體雷射的操作原理
- 半導體雷射理論基礎與波導結構設計的概念
- 詳盡的半導體雷射速率方程式與動態特性討論
- 豐富的主題包括VCSEL、DFB、DBR與光子晶體雷射
- 實用的內容介紹雷射製程、特性測試與信賴度分析
- 超過180張生動的圖示
- 詳盡的範例與習題幫助了解半導體雷射的各種特性
- 全書一致的符號由淺入深的推導半導體雷射的特性



五南文化事業

ISBN 978-957-11-6066-5 (448)



五南圖書出版公司

半導體雷射技術

Semiconductor Laser Technology

盧廷昌 王興宗 著

五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

半導體雷射技術 / 盧廷昌 · 王興宗著. -- 初版. -- 臺北市 : 五南, 2010. 09

面 : 公分.

含參考書目及索引

ISBN 978-957-11-6066-5 (平裝)

1. 雷射光學 2. 半導體

448.68

99014867



5DD2

半導體雷射技術

Semiconductor Laser Technology

作 者 — 盧廷昌(395.7) 王興宗(6.3)

發行人 — 楊榮川

總編輯 — 龐君豪

主 編 — 穆文娟

責任編輯 — 陳俐穎

封面設計 — 簡愷立

出 版 者 — 五南圖書出版股份有限公司

地 址 : 106 台北市大安區和平東路二段339號4樓

電 話 : (02)2705-5066 傳 真 : (02)2706-6100

網 址 : <http://www.wunan.com.tw>

電子郵件 : wunan@wunan.com.tw

劃撥帳號 : 01068953

戶 名 : 五南圖書出版股份有限公司

台中市駐區辦公室/台中市區中山路6號

電 話 : (04)2223-0891 傳 真 : (04)2223-3549

高雄市駐區辦公室/高雄市新興區中山一路290號

電 話 : (07)2358-702 傳 真 : (07)2350-236

法律顧問 元貞聯合法律事務所 張澤平律師

出版日期 2010年9月初版一刷

定 價 新臺幣760元

序

半導體雷射廣泛存在於今日高度科技文明的生活中，成為許多光電系統中最重要之光電主動元件之一，例如在光纖通信、高密度光碟機、雷射條碼、雷射印表機、雷射電視、雷射滑鼠、雷射筆、雷射舞台秀甚至雷射美容與醫療、軍事等不勝枚舉之應用都用到了半導體雷射。半導體雷射的實現可以說是半導體科技與光電科技的智慧結晶，同時也對人類社會帶來無與倫比的便利與影響，因此，能夠瞭解半導體雷射的基本操作原理與設計概念，同時學習到半導體雷射的構造與光電特性，並認識半導體雷射的製程與信賴度，是非常值得相關領域的大(專)理工科學生、實際從事相關半導體雷射的科技人員以及光電元件或系統的研發專業人員深入瞭解。

本書基本上是作者前一本「半導體雷射導論」的延續，儘管在內容份量上與深度上都較為進階，但是本書「半導體雷射技術」的編排手法仍是以作為講授半導體雷射教科書為原則，當然也可當成一本半導體雷射的參考教材，本書可和前本結合以適用於大(專)學三、四年級以及研究所一年級以上相關科系，相當於一學年的完整半導體雷射的教材；本書亦適用於想要了解半導體雷射各種技術的專業研發人員單獨研讀參考。前本「半導體雷射導論」著重於半導體的基本特性、異質結構、發光與增益特性以及基本雷射原理；建議在研讀本書「半導體雷射技術」前可以先對這些內容有所了解，因為本書直接從半導體雷射元件的角度切入以探討半導體雷射的各種有趣的特性，此外建議本書的讀者需要具備在工程數學、近代物理與電磁學方面的基礎知識，也最好熟悉簡單的電腦輔助數學軟體，這些會幫助讀者更容易體會與瞭解本書所介紹的半導體雷射的各種行為。

II 半導體雷射技術

本書共有八章。前三章為半導體雷射的原理、波導結構與動態特性的探討，屬於基本學理的介紹；第四到第六章為三種不同共振腔形式的半導體雷射的介紹，屬於進階的內容；而最後兩章關於製程與信賴度的討論則是屬於工程的範疇。學校教師可依據教學屬性與學生程度及特質，擇其內容教授。

第一章為半導體雷射操作的簡介，一開始簡單介紹半導體異質結構與主動層增益的由來，然而若想要更深入了解這部分的讀者，強烈建議研讀前本「半導體雷射導論」；接著，使用描述載子濃度與光子密度的雷射速率方程式來推導半導體雷射的閾值條件與輸出特性，同時介紹雷射縱模的概念以及多縱模操作的雷射，最後再使用雷射速率方程式來討論非輻射放射復合、輻射放射復合與受激放射速率之間隨著注入載子濃度的消長。第二章將介紹半導體雷射的波導結構對雷射特性的影響，我們從一維波導開始，引導出波導模態與等效折射率的概念，然後推導出光學侷限因子的意義，以及其和雷射閾值條件的關係；進一步將一維的波導概念推廣到二維波導的橫面結構，二維橫面結構對常見的邊射型雷射而言，是非常重要的設計參數，本書將介紹等效折射率法與有限差分法來解二維橫面結構的波導模態，在第二章的最後將介紹這些波導結構對半導體雷射的遠場圖型，也就是遠場發散角的影響。第三章介紹半導體雷射的動態特性，我們將半導體雷射隨時間變化的參數，分成小信號與大信號響應兩個範疇來討論，在小信號近似中，先推導出小信號的雷射速率方程式，進而求出雷射調制的頻率響應，並介紹弛豫頻率與截止頻率的概念，接著引入非線性增益飽和效應，討論其對调制頻率的影響，並介紹高速雷射調制的設計原則，接著說明如何計算時域上小信號的暫態解；而在大信號響應中，我們將介紹導通延遲時間，以及使用數值方法獲得大信號在時域上的暫態解；接著，我們將介紹半導體雷射中的特有參數：線寬增強因子，對

頻率啁啾與雷射發光線寬的影響，最後將介紹半導體雷射的雜訊來源及其影響。

第四章為垂直共振腔面射型雷射的介紹，首先是這種短共振腔面射型雷射的歷史發展，再介紹布拉格反射鏡的結構，並使用傳遞矩陣法推導布拉格反射鏡的特性以及穿透深度的概念；接著，將介紹垂直共振腔面射型雷射的閾值條件與溫度特性，並介紹垂直共振腔面射型雷射的微共振腔效應，以及各種垂直共振腔面射型雷射的侷限構造；接下來，我們再分別介紹長波長垂直共振腔面射型雷射與藍紫光垂直共振腔面射型雷射的進展。第五章介紹 DFB 與 DBR 雷射，這兩種雷射皆是應用了週期性光柵結構而達到單縱模操作的雷射型態，為了要說明光柵結構的作用，將介紹微擾理論與耦合模態理論，並應用耦合理論推導 DFB 雷射的閾值條件，以及介紹不同種類的 DFB 雷射結構；接著應用傳遞矩陣的方法推導 DBR 雷射的閾值條件，最後說明波長可調式雷射的結構與工作原理。第六章是光子晶體雷射的介紹，首先是簡單介紹光子晶體的概念與應用，接下來介紹兩種不同工作原理的光子晶體雷射，一是光子晶體缺陷型雷射，一是光子晶體能帶邊緣型雷射，我們將簡單介紹這兩種雷射的原理、歷史發展、元件特性與未來展望。

第七章為半導體雷射的製作介紹，主要分為磊晶與製程兩部分；在磊晶部分，將介紹磊晶技術的發展，以及目前兩種最常見的磊晶系統：分子束磊晶與金屬有機化學氣相沉積；接著再介紹數種半導體雷射常用的化合物半導體材料系統，其中發光的波長涵蓋了從紅外光到紫外光的波段；在製程部分，將介紹半導體雷射的製作流程以及分別介紹這些流程所需的技術，包括蝕刻、沉積、離子佈植與金屬製程等。第八章則是介紹半導體雷射信賴度測試與劣化機制，首先是介紹各種半導體雷射特性測試的方法，接著討論信賴度測試方法、信賴度模型與分析方式；最後，分別介紹半導體雷射的劣化機制與半導體雷射失

效分析的方法。

為了使讀者學習到的概念更加實際與明確，本書在章節中編排了許多範例，這些範例不僅可幫助讀者熟悉半導體雷射的設計概念與元件特性，更可讓讀者迅速明瞭在書中所討論到的一些雷射物理參數的數值大小。在每章結束後，還伴隨有許多習題，這些涵蓋了數值或分析的問題可供讀者在學習完該章節後能有解決問題、推導公式與發展相關電腦數值模型的機會。由於近年來電腦輔助數學軟體的功能相當強大，本書在許多章節中特別介紹需要使用到數值方法的內容，希望讀者可以依此建立電腦模型來模擬雷射的特性，更能幫助讀者了解半導體雷射的行為。此外，本書還包含許多前瞻的雷射元件，例如光子晶體雷射就屬於相當新穎的半導體雷射結構，許多元件結構與理論都還在蓬勃發展中，特別把光子晶體雷射的內容放在本書中，一方面是希望整理出我們實驗室近幾年在這個領域上的成果，另一方面也想拋磚引玉藉此激發出年輕學子的創意，在半導體雷射的領域中持續創新；儘管如此，還有許多半導體雷射的技術因為本書篇幅的限制，無法收錄在書中，但是我們相信經由本書的引導可提供深入了解半導體雷射一系列進階技術完整的基礎。

本書的內容實源自這幾年在國立交通大學光電所開設的課程「半導體雷射」後半部的進階教材，在 2008 年出版了「半導體雷射導論」後，一直礙於忙碌的行程遲遲無法一氣呵成地完成半導體雷射下半部的內容；然而在最近持續授課的過程中，一方面一直有學生希望我們出版續集，一方面也有感於授課內容的需要，最後能夠在雷射發明 50 周年以及新竹交大光電所創立 30 周年的年度裡，完成並出版本書，我們心中有無限感恩！我們想感謝新竹交通大學和光電系提供良好的授課與研究環境，特別是田家炳光電大樓的完成，讓作者得以在嶄新優雅的空間中埋首寫作！本書的完成經歷了許多人的參與協助，我們要

感謝博士班的學生俊榮、士偉、柏孝與輝閔分別在面射型雷射、光子晶體雷射、雷射製程、雷射測試與信賴度分析等內容的提供，碩士班的學生鵬翔、永吉與詳淇使用電腦軟體繪出許多精彩的圖表，感謝當時在我們實驗室擔任博士後但現在任職於高雄大學的馮瑞陽教授提供的近、遠場模擬圖，此外我們非常感謝新竹交通大學光電系的陳瓊華教授與光電系統研究所的林建中教授對本書仔細的校稿，我們同時想感謝那些曾經指導教誨過我們的師長，曾經與我們共同奮鬥互相討論的同事，曾經給過我們無私評論的研究同行，得以持續激發我們完成此書。

最後，作者要深深感謝在這三年寫書過程中不斷給我們鼓勵和支持的妻子詠梅與竹美。

盧廷昌 王興宗
2010 于新竹交大

第一章 半導體雷射基本操作原理	1
1.1 雙異質介面	2
1.2 半導體光增益與放大特性	10
1.3 半導體雷射震盪條件	15
1.3.1 振幅條件	15
1.3.2 相位條件	17
1.4 速率方程式與雷射輸出特性	21
1.5 多縱模雷射頻譜	32
本章習題	37
參考資料	39
第二章 半導體雷射結構與模態	41
2.1 半導體雷射之垂直結構	44
2.1.1 雙異質結構波導之模態	46
2.1.2 光學侷限因子	59
2.1.3 傳遞矩陣法解一維任意結構波導之模態	62
2.2 橫面二維結構與模態	70
2.2.1 半導體雷射之橫面二維結構	70
2.2.2 等效折射率法求二維模態	74
2.2.3 有限差分法解二維模態	80
2.3 遠場發散角	84
本章習題	88
參考資料	90

第三章 半導體雷射動態特性 91

3.1 小信號響應	93
3.1.1 弛豫頻率與截止頻率	98
3.1.2 非線性增益飽和效應	105
3.1.3 高速雷射調制之設計	114
3.1.4 小信號速率方程式之暫態解	121
3.2 大信號響應	125
3.2.1 導通延遲時間	126
3.2.2 大信號調制之數值解	130
3.3 線寬增強因子與啁啾	133
3.3.1 頻率啁啾與頻率調制	133
3.3.2 半導體雷射之發光線寬	140
3.4 相對強度雜訊	143
本章習題	150
參考資料	152

第四章 垂直共振腔面射型雷射 153

4.1 垂直共振腔面射型雷射的發展	154
4.2 布拉格反射鏡	158
4.2.1 傳遞矩陣	159
4.2.2 穿透深度	165
4.2.3 布拉格反射鏡結構設計	168
4.3 垂直共振腔面射型雷射之特性	170
4.3.1 閾值條件	170

4.3.2 溫度效應	174
4.3.3 微共振腔效應	177
4.3.4 載子與光學侷限結構	184
4.4 長波長垂直共振腔面射型雷射	187
4.4.1 長波長面射型雷射的發展	189
4.4.2 主動層材料的選擇	192
4.4.3 DBR 的組成	193
4.5 藍紫光垂直共振腔面射型雷射	196
本章習題	209
參考資料	211

第五章 DFB 與 DBR 雷射 221

5.1 DFB 雷射簡介與雷射結構	222
5.2 微擾理論	227
5.3 耦合模態理論	232
5.3.1 光柵結構中的反正耦合	233
5.3.2 有限長度光柵結構的反射與穿透	240
5.4 DFB 雷射之特性	245
5.4.1 DFB 雷射振盪條件之解析	246
5.4.2 傳遞矩陣法計算 DFB 雷射之振盪條件	252
5.4.3 單模操作的 DFB 雷射結構	261
5.5 DBR 雷射	270
5.6 波長可調式雷射	274
本章習題	277
參考資料	278

第六章 光子晶體雷射 279

6.1 光子晶體簡介	280
6.1.1 一維、二維與三維光子晶體	282
6.1.2 平面波展開法	283
6.1.3 光子晶體相關應用	289
6.2 光子晶體缺陷型雷射	290
6.2.1 光子晶體缺陷型雷射操作原理	290
6.2.2 光子晶體缺陷型雷射的發展	292
6.2.3 缺陷共振腔的種類	297
6.2.4 電激發式光子晶體缺陷型雷射	299
6.3 光子晶體能帶邊緣型雷射	300
6.3.1 能帶邊緣型雷射操作原理	301
6.3.2 光激發式能帶邊緣型光子晶體雷射	312
6.3.3 電激發式能帶邊緣型光子晶體雷射	317
本章習題	321
參考資料	322

第七章 半導體雷射製作 327

7.1 半導體雷射磊晶技術	329
7.1.1 磊晶技術發展	329
7.1.2 分子束磊晶	330
7.1.3 金屬有機化學氣相沉積	332
7.2 半導體雷射常用材料	336

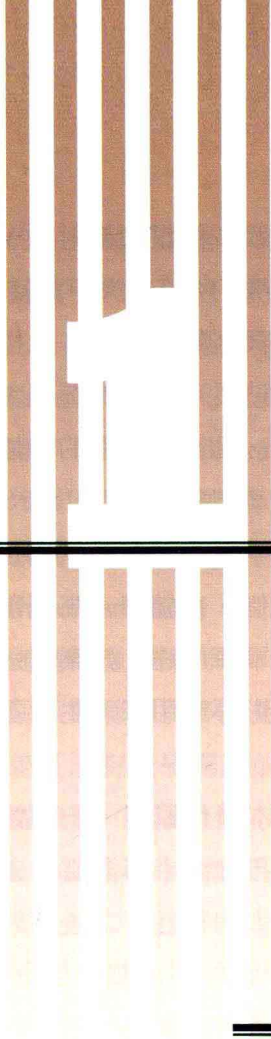
7.2.1 砷化鎵 (GaAs) 材料系統	338
7.2.2 砷磷化銦鎵 (InGaAsP) 材料系統	340
7.2.3 砷化鋁銦鎵 (InGaAlAs) 材料系統	343
7.2.4 磷化鋁銦鎵 (InGaAlP) 材料系統	344
7.2.5 氮化鎵 (GaN) 材料系統	347
7.3 半導體雷射製程技術	353
7.3.1 半導體雷射製作流程	353
7.3.2 蝕刻	362
7.3.3 沉積	366
7.3.4 離子佈植	370
7.3.5 金屬製程	373
本章習題	375
參考資料	377

第八章 半導體雷射信賴度測試與劣化機制 381

8.1 半導體雷射特性測試	383
8.2 信賴度測試與分析	397
8.2.1 信賴度測試方法	398
8.2.2 信賴度函數、故障率與故障時間	404
8.2.3 故障分佈函數	408
8.2.4 元件故障物理模型	415
8.3 半導體雷射劣化機制	418
8.4 半導體雷射失效分析	428
本章習題	432
參考資料	434

XII 半導體雷射技術

附錄 A	Kramers-Kronig 關係式	435
附錄 B	對數常態分佈紙	441
索引		443



第一章

半導體雷射基本 操作原理 與結構

- 1.1 雙異質接面
- 1.2 半導體光增益與放大特性
- 1.3 半導體雷射震盪條件
- 1.4 速率方程式與雷射輸出特性
- 1.5 多縱模雷射頻譜

雷射發明至今已有超過半世紀的歷史，在眾多種類的雷射中，半導體雷射一直在雷射的應用與產值中佔有最重要的角色之一，因為半導體雷射有許多特點，諸如：具有極小的體積與極輕的重量、低操作電壓、高效率和低耗能、可直接調制的特性、波長可調整的範圍大、可供應的雷射波長多、信賴度高、操作壽命長、具有可量產的特性並可相容於其他半導體元件整合成光電積體迴路(optoelectronic integrated circuit, OEIC)。這些優異特性，使得半導體雷射得以迅速的發展並應用在許多不同的領域上，舉凡光纖通信，光儲存，高速雷射列印，雷射條碼識別，分子光譜與生醫應用，軍事用途，娛樂用途、測距與指示以及近期的雷射滑鼠、微型雷射投影等應用深入生活各個層面。

在本章中我們會簡要說明半導體雷射的基本操作原理，一開始我們會先介紹 p - n 雙異質接面的操作特性；接著再介紹半導體雷射主動層中電光轉換的部份，也就是增益介質將光放大的特性，之後則討論雷射振盪的條件以及介紹半導體雷射的速率方程式，引入載子生命期、光子生命期、自發性輻射因子等參數，列出載子密度與光子密度的速率方程式來推導半導體雷射的閾值條件與輸出特性。

1.1 雙異質介面

一個基本的半導體雷射如圖 1-1 所示，包含了兩個平行劈裂鏡面組成的共振腔，稱為 **Fabry-Perot(FP)共振腔**，雷射光在共振腔中來回振盪，再從兩邊鏡面發出雷射光，這種雷射又被稱作為**邊射型雷射**(edge emitting laser, EEL)。而夾在 n -type 與 p -type 區域中的主動增益層為發光區域、透過適當的結構設計與激發過程可以將雷射光放大，其中採用雙異質接面的 n -type 與 p -type 的批覆層可分別作為電子與電