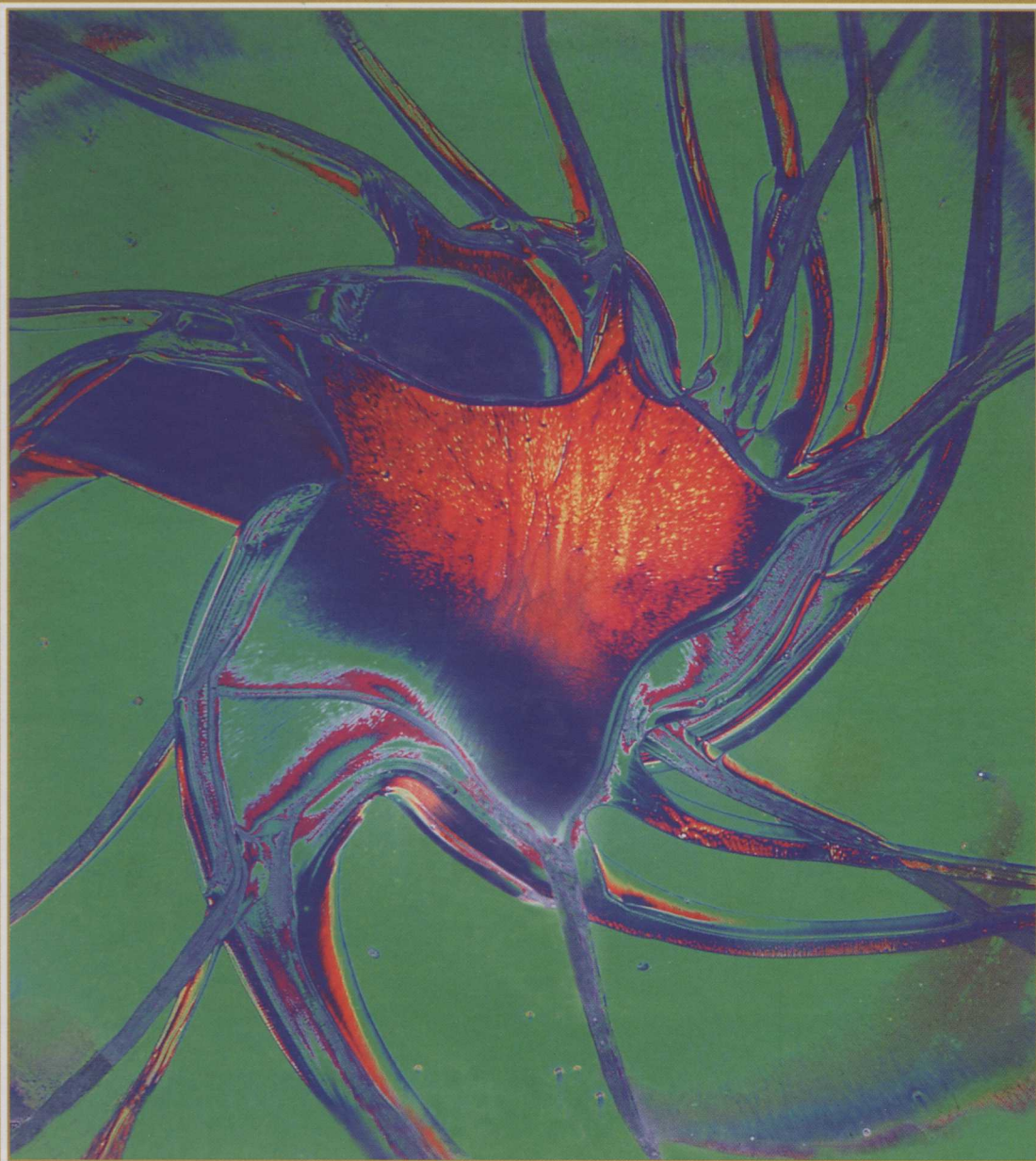


薄膜光學與鍍膜技術

Thin Film Optics and Coating Technology

李正中 編著

第七版
Seventh Edition



藝軒圖書出版社

科學圖書出版委員會

光學與薄膜技術

李正中 著

薄膜光學與鍍膜技術

Thin Film Optics and Coating Technology

第七版

Seventh Edition

李正中 編著



藝軒圖書出版社

ISBN 978-957-616-970-0

電話：(07) 526-7898

傳真：(07) 526-7895

地址：高雄市中區中正路2號7樓之3

（捷運維多利亞公園站3號出口）

電話：(04) 2206-8119

傳真：(04) 2206-8120

地址：台中市北區五權路178號

（對面：五權路五權路口）

電話：(02) 2367-6825

傳真：(02) 2367-0346

地址：台北市羅斯福路四段20號2樓之3

（口出：羅斯福路四段20號2樓之3）

電話：(02) 2367-6825

傳真：(02) 2367-0346

地址：台北市中正路2號7樓之3

（捷運維多利亞公園站3號出口）

電話：(07) 526-7898

傳真：(07) 526-7895

地址：高雄市中區中正路2號7樓之3

（捷運維多利亞公園站3號出口）

電話：(04) 2206-8119

傳真：(04) 2206-8120

地址：台中市北區五權路178號

（對面：五權路五權路口）

電話：(02) 2367-6825

傳真：(02) 2367-0346

地址：台北市羅斯福路四段20號2樓之3

（口出：羅斯福路四段20號2樓之3）

電話：(02) 2367-6825

傳真：(02) 2367-0346

地址：台北市中正路2號7樓之3

（捷運維多利亞公園站3號出口）

電話：(07) 526-7898

傳真：(07) 526-7895

地址：高雄市中區中正路2號7樓之3

（捷運維多利亞公園站3號出口）

電話：(04) 2206-8119

傳真：(04) 2206-8120

地址：台中市北區五權路178號

（對面：五權路五權路口）

電話：(02) 2367-6825

傳真：(02) 2367-0346

地址：台北市羅斯福路四段20號2樓之3

（口出：羅斯福路四段20號2樓之3）

國家圖書館出版品預行編目資料

薄膜光學與鍍膜技術／李正中編著.--第七版.

--新北市：藝軒，2012.04

面；公分

ISBN 978-957-616-970-0（精裝）

1. 光學 2. 科學技術

471.7

101002546

本書任何部份之文字或圖片，如未獲得本社書面同意，
不得以任何方式抄襲、節錄及翻印

新聞局出版事業登記證局版台業字第一六八七號

薄膜光學與鍍膜技術(第七版)

(精裝)定價新臺幣 800 元

編著者：李 正 中

發行所：藝軒圖書出版社

發行人：彭 賽 蓮

總公司：藝軒圖書文具有限公司

新北市 23144 新店區寶高路 7 巷 3 號 2 樓

電話：(02) 2918-2288

傳真：(02) 2917-2266

網址：www.yihscient.com.tw

E-mail：yihscient@yihscient.com.tw

劃撥帳號：01062928

帳戶：藝軒圖書文具有限公司

台北門市

台北市羅斯福路四段 50 號 2 樓之 2

(台大對面，捷運新店線公館站 4 號出口)

電話：(02) 2367-6824

傳真：(02) 2365-0346

台中門市

台中市北區五常街 178 號

(健行路 445 號宏總加州大樓)

電話：(04) 2206-8119

傳真：(04) 2206-8120

高雄展示處

高雄市中正三路 5 號 7 樓之 2

(捷運橘線，06-信義國小站 3 號出口)

電話：(07) 226-7696

傳真：(07) 226-7692

本公司常年法律顧問／魏千峰、邱錦添律師

二〇一二年四月第七版 ISBN 978-957-616-970-0

※本書如有缺頁、破損或裝訂錯誤，請寄回本公司更換。

讀者訂購諮詢專線：(02) 2918-2288

緬懷恩師 張桐生教授

一位成功的物理學家與教育家

七版序

花所以開得美而且多樣是為了生命的延續，

這是自然現象，但

花要開得美需有適當的滋潤與陽光；

科技的創造與演進是人類文明進化的動力，

若其中無智慧，則

科技對人類是好是壞將隨環境流轉。

資訊的儲存與呈現近來有急速的變化，特別在呈現上喜歡利用色彩將科技藝術化，提升生活的品質，因此有不少廠商希望藉由薄膜來增添其產品的色彩。本書前幾版在第二、三、四及九章也曾談論過薄膜與色彩，但色彩涉及人的生理與心理，特別是如量測才可被公認，需要有更明確的說明，所以本版特擇其要義增列為第 17 章，並舉例說明如何利用薄膜來呈現色彩，希望有助於愛好此道者。

除增加第 17 章以外，本書也在內容上略做修改，並增添一些新資料，這些資料有些來自向本人詢問疑難的啟發，事實上教學相長確有其事。讀者、學生及廠商詢問的問題，宛如促使花開得美麗多彩之滋潤的泥土、水氣與陽光，使本人多了不少想法，確實豐富了本書的內容，甚為感謝！

每次再版此書都充滿感恩有良好環境可做研究，而努力將新資料加入，希望自己所學習到的和研究出來的知識能傳承下去。

感謝所有協助過我的師友及學生們，感謝內人洪素華願意讓我每日多留一點時間在學校工作，並承擔絕大部分的家務。

李正中 於 中央大學
薄膜技術中心

2012 年 2 月 10 日

六版序

陽光照，萬物艷麗多彩，是自然之美；

薄膜鍍，光電功能彰顯，是科技之美。

陽光之所以為白光而能展現多彩，是因它包含非常純的各色光，不多一色也不少一色，以顏色不多不少，故既可無色亦能全彩；薄膜之所以能顯現多樣光電功能，是因他每一層厚度相位精確，不厚一點也不薄一點，以膜層厚薄恰當，故光行如意而有大大用。

光學薄膜早已存在於自然界中，有在水中游的：例如鮑魚殼、九孔殼、海螺、珍珠、魚鱗；有在陸上走的：例如金龜子、甲蟲；有在天空飛的：例如美蘭蝶翅膀、孔雀羽毛、鴿子頸羽；也有在地底裡的：例如蛋白石等礦石。它們的共同特色是陽光一照，色彩艷麗，而且色彩隨視角不同而變，以及成膜方法非常環保便宜。人造光學薄膜在結構上與自然界的光學薄膜相似，但它的開發並非受到自然界光學薄膜的啟發，反而是人類研發光學薄膜至今，才愕然發現自然界早已存在著許多光學薄膜，而且其結構遠超過我們的想像，此結構如何形成更是非我們所能了解，面對自然界，要學的東西還真多！

本書日譯本 2008 年 7 月初版四刷，中文版今要出第六版，如此能讓社會分享研究心得，略盡學者本份，要感謝讀者的支持。本版比第五版增加了一些新資料，並應讀者要求將部分要點的物理原理陳述更清楚。第 2 章、第 3 章及第 8 章因為數學公式較多，所以重點著以藍色，其他章之重點則用粗體字提示，以方便初學者能快速記住要義。

本版之校正，受到中央大學薄膜技術中心的同學幫忙很多，特別是羅美鈴、張德宏、吳鏜、李坤憲和廖博輝；內人洪素華不時提醒要運動保持健康，才有精神善盡教學與研究之責，並完成本書，在此一併致謝。

李正中 於 中央大學
薄膜技術中心

2009 年 4 月 8 日

五版序

紅塵中 奉香與持刀何異
空明裡 不應有夢
昭日下 繁華與幻花同體
真科技 合乎大道

人類體會到要重視自然環境由來已久，環境受污染非全由科技的開發，而是人類在改善自己的生活的過程中只依有限的知識謀求近利卻缺乏深遠規劃的智慧，忽略了科技原為探索宇宙萬物進而提升人文水準。雖然科技工程中確實有污染環境的副產物，但只要知其原因必可事先做防範措施。本書所述之鍍膜技術早已考慮到這一點，因此在第一版時即列出第 14.3 節特別加以提醒。

本書會刊出第五版實非本人當初寫第一版時所能預料，彼時只是一本赤子之心，盡量將自己知道而對光電界有用的資料寫出供後人參考，以盡一己之力而已，期望無愧於社會給與自己成長的機會。

第五版與第四版之內容差異不大，只是添加一些新資料，並將有些讀者有疑問的地方詳細說明。教學相長之言果然不虛，讀者之問題使本人成長不少，因而也充實了本書的內容，謝謝這些好學的讀者。

本人同時也要感謝艾嘉猷博士舉例實驗現象提出斜向入射時 S-偏振光與 P-偏振光偏移量的問題，使本人有機會說明，並添加在第 8.3.1 節中。在增添新資料及編輯時，中大薄膜技術中心的同學幫忙很多，沒有他們的幫忙，在這麼忙碌的工作中實在無法於短時間內完成第五版，而內人洪素華承擔大部分的家事使本人能安心且能長時間留在學校專心研究、教學及處理一些服務公務之事，也是本書能夠及時完成的主要原因之一。

李正中 於 中央大學
薄膜技術中心

2006 年 5 月 27 日

四版序

舉凡歐洲諸強國及美、加、俄、日本等科技進步的國家對於薄膜光學與鍍膜技術的研發皆甚重視，因為它是多種科技的必要支柱。

在賀方涓博士、凌國基教授、趙煦教授及鍍膜機製造業者等友人共同努力下，薄膜光學與鍍膜技術在台灣於學術上不但有了新的面貌，而且已蔚然成為一項蓬勃發展的產業，此書在此一發展中能略盡棉薄之力，本人甚感欣慰。尤其印刷本書第三版時，日文譯版“光学薄膜と成膜技術”幾乎同時問世，並於次年再版。此勉勵本人應更努力於教研，以期更能回饋社會。

有些讀者曾問本人如何快速讀取本書要義而應用之，對研究生或工程師而言，此實無捷徑。然若不做實驗，則對第 10 章以後各章節快速瀏覽即可，而若著重製鍍技巧，對第 5 章及第 10 章以後各章節可多花些時間研讀。

亦有部分讀者希望能多舉些範例參考，適逢再版，除修正一些筆誤與略加補充一些內容外，並於第 16 章增加了一些例題，希望對這些讀者能有所助益。感謝陳昇暉、郭倩丞、任貽均、陳裕仁、陳錫釗、李雅萍等同學對上述工作的協助。

做一件事需要備有一些知識，但同時具足熱心、安心與專心則是完成事情的關鍵。從事光學鍍膜多年深覺學海無涯，熱心是使本人努力不懈的動力；能安心在中大研究教學，是得自學校、國科會及國內、美、日各廠商的贊助以及同事、朋友與學生們的幫忙；可以專心致力於教學研究則是內人洪素華長期的鼓勵與協助，本書能完成他們居功厥偉。

李正中 於 中央大學
薄膜技術中心

2004 年 8 月 2 日

三版序

本書能使讀者從中獲益而有第三版的呈現，令本人甚感欣慰，在此深表謝忱。

本書原為授課之講義，因此隨著科技的進展必須補充新的教材，這些新教材已增添在本版中。其中，紫外光及 X-光波域之光學薄膜，可歸類於短波長範圍，故另成一章，即第 15 章。

這次再版，承蒙各位師友提供文獻、照片及建議，本人衷心感謝；對於本書引用之文獻、圖、表，能獲得原作者、出版社及相關公司之允許，本人在此謹致十二萬分謝意；尤其感謝日本 ULVAC, Inc. 技術開發部部長沈國華先生，於百忙之中特地撥冗詳閱本書第二版並對諸多疏漏提供寶貴意見，使本書更臻完善。

本人同時要感謝光學薄膜實驗室的學生，劉旻忠、吳駿逸、唐謙仁……等，幫忙繪圖、打字及整理，讓本書順利付梓。能安心從事研究而無後顧之憂乃人生一大樂事，此得助於內人長年來的支持，同時鼓勵本人從事教育，實為本書之催生者。

本書若有不周之處，尚請讀者先進不吝賜教。

李正中 於中央大學

2002 年 6 月 12 日

一版序

隨著光電科技的發展，光學薄膜的應用愈來愈不可或缺，而且品質上的要求也愈來愈高，因此十多年來作者常被邀請到各處講課及到各公司實際訓練他們的工程師，本書之雛形即為這些講義及其相關資料，也是作者在國立中央大學光電科學研究所開設薄膜光學之講義。

有感於光電科技之發展極為快速，學校訓練出的學生人數不敷研究單位及工業界所需，因此有人建議作者將過去之講義及講稿整理成此書，希望更多人能從此書直接獲習所需之知識。這也是編寫此書最主要的目的。

編寫此書花最多的時間是把講義中所提到的參考文獻之原出處及作者名字找出，但有些時間過得太久了，且當時並沒有出書的打算，故沒留下原稿。幸好作者自 1980 年以來受教於 H. A. Macleod 教授，所做筆記相當完整，因此在學理部份尚易安排，本書也是依循這理念寫成第二章到第九章，其中並加入新近發表在期刊、會議、其它雜誌或作者研究室的新作品。此中設計理念有些過去也曾被提及但並沒有被重視，直到最近鍍膜技術及電腦計算的能力都大有進展，才有實現的可能，作者盡量把這些分別加入在各章節中。第十章到第十四章則偏重於實驗、新的鍍膜技術及量測工具與技術。最後在第十五章舉例說明如何完成製鍍光學濾光片，以供初學者參考如何將理論及實驗結合在一起。

薄膜光學涵蓋很廣，本書無意將之全部寫入，只盡量提供原理及重點，並附參考資料，有興趣者可依此深入研究，雖然如此，必亦有失漏之處，尚祈各界多多指教。

本書之能完成除感謝 H. A. Macleod 教授教導之外，並得友人提供資料及學生幫忙整理，在此至誠感謝。

李正中 於中央大學

1999 年 11 月 11 日

作者簡介

李正中

現職：國立中央大學理學院 院長
國立中央大學 光電講座教授； 國立中興大學 兼任薄膜講座教授
國立中央大學薄膜技術中心 主任
國家實驗研究院儀科中心(ITRC) 兼任研究員
中華民國光電學會 理事長

學歷：成功大學物理系 學士(1969)；成功大學物理所 碩士(1974)
亞歷桑那大學光學中心 博士(1983)

經歷：成功大學物理系 助教；中山科學研究院 副研究員
中央大學光電科學研究所 第五屆所長
國立中央大學光電科學與工程學系 籌備系主任；第一屆系主任
中華民國真空學會第六屆 理事長；光電科技協進會(PIDA)常務董事
國科會精儀中心光學鍍膜訓練班 主任
中華民國光學工程學會學術主任委員、季刊總編輯、第十屆理事長
國家科學委員會工程處光電學門 召集人
工業技術研究院光電所、材料所、電子所 顧問
國際光學工程學會(SPIE) Fellow；美國光學學會(OSA) Fellow
SPIE Fellow 遴選委員會 主席；SPIE 台灣分會、OSA 台灣分會 會長
高等教育評鑑中心基金會、財團法人全國認證基金會 評鑑委員
巴黎第 13 大學雷射物理實驗室 客座教授；日本 ULVAC 千葉超材料
研究所 教授研究員；上海交大國家重點複合材料實驗室 客座教授
Applied Optics, Optics Letters, Optics Express, Thin Solid Films, Optical
Engineering, Applied Surface Science, Journal of Physics D: Applied Physics、
New Journal of Physics 及 Optics Communications 等學術期刊之審查

著書：1.“Ion beam sputtering”，1995, Chapter of “Thin Films for Optical System”，Ed.
by F. R. Flory, Marcel Dekker Inc. (合著書)
2.“真空技術與應用”，2001, 國科會精密儀器中心出版(合著書)。
3.“光學薄膜と成膜技術”，2002 年, ULVAC 譯 (日文), 2003 年二
刷, 2005 年三刷, 2008 年四刷。
4.“光學元件精密製造與檢測”，2007, 國研院儀科中心出版(合著書)。
5.“光電科技概論”，2008, 中央大學光電系出版(合著書)。
6.“Thin Film and Coatings”，2009, Chapter of “Handbook of Optical
Metrology-Principle and Application, Ed. By Toru Yoshizawa, CRC.

專長：薄膜光學、鍍膜技術、薄膜特性之測量、干涉光學、薄膜色彩。

網頁：<http://www.dop.ncu.edu.tw/cclee/> 或 <http://www.ncu.edu.tw/~tftc/>

符號說明

A	吸收	J	離子流密度
A、Air	空氣	K, k	波數，波向量
A	面積	k	消光係數
B	磁感強度	L	四分之一波厚低折射率膜
C	光速度	L	損耗
D	電位移	l	雷射共振腔長度
D	光密度	M	四分之一波厚中間折射率膜
D ₆₅	標準照明體(T _{cp} =6,504K)	M	膜矩陣
d	膜幾何厚度	m	級數
d	膜微粒間距	m	質量
E	電場強度	N	光學常數 N = n-ik
E	等效折射率	n	折射率
F	Fabry-Perot 干涉儀中之反 射函數	n	膜料蒸氣參數
F	施力	n*	窄帶濾光片空間層之等效折 射率
ζ	銳度	nd	光學厚度
f ₁ 、f ₂	原子散射因子	P	堆積密度
G	玻璃基板	P	偏振度
g	相對波數(g = λ_0/λ)，波數比	R	反射率
H	四分之一波厚高折射率膜	r	反射係數
H	磁場強度	Re	實數部分
HV	微硬度	S、Sub	基板
I	光強度	S	散射
I	電流	S	斜率
I	離子流	T	透射率
Im	虛數部分	T	溫度
J	電流密度	T _c	色溫

T_{cp}	相關色溫	Δv_h	半高寬
t	透射係數	δ	膜之相厚度
t	時間	ε	介電質常數
t	膜厚度	ε	微量代表符號
V	電壓	ϕ	相位移
$V(\lambda)$	光譜光視效函數	ϕ	入射掠角
v	波速	γ	對稱膜堆之等效相厚度
W	光能量	η	斜向入射光學導納
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	配色函數	η_E	斜向入射等效折射率
Y	光學導納 $Y = NY_0$	λ	波長
Y_0, y_0	真空中光學導納	λ_0	中心波長
(x, y)	色度值	λ_p	峰值波長
y	光學導納	μ	導磁率
z	光行進方向	μ	膜密度
α	吸收係數	ν	頻率
α	膜料蒸發方向	θ	光在膜層行進之角度
$\alpha - i\beta$	導納軌跡之實數部和虛數部	θ_0	入射角
α	$= 2 \frac{\pi}{\lambda} nd$ 代表膜之相位	θ_B	Brewster 角
β	$= 2 \frac{\pi}{\lambda} kd$ 代表膜之吸收	θ_B'	準 Brewster 角
β	基板傾斜角	θ_C	臨界角
β	膜柱狀結構傾斜角	θ_{cone}	入射光半寬角
Γ_i	表面電漿波內阻尼	ρ	電荷密度
Γ_{rad}	表面電漿波輻射阻尼	ρ	反射係數
Δ	微量變化，橢圓參數，p-偏振光與 s-偏振光之相位差	ρ	膜層密度
Δg	半寬度 = $2\Delta g$	σ	導電率
Δ_i	p-偏振光與 s-偏振光導納比	σ	表面粗糙度
$\Delta\lambda_h$	半高寬	σ	應力
		σ	波數
		τ	透射係數

τ_C	衰減時間常數
Ω	基板公轉角速度
ω	基板自轉角速度
ω	光角頻率
Ψ	勢透射率
Ψ	橢圓參數

目次

符號說明	xvii
1. 引言	1
2. 基本理論	7
電磁波	7
單界面之反射與透射	17
單層膜之反射與透射	38
多層膜之反射與透射	57
多層膜矩陣的一些特性	62
非相干性之反射與透射	66
3. 光學薄膜設計之圖示法	78
向量法	78
導納軌跡法	88
計算機程式之應用	119
4. 分光鏡	125
中性分光鏡	125
雙色分光鏡	132
偏振光分光鏡	134
5. 高反射鏡	139
金屬膜反射鏡	139
全介電質膜高反射鏡	155
全介電質膜高反射帶之拓寬	160
膜層損耗對四分之一波膜堆的影響	163
6. 截止濾光片	171
非干涉型截止濾光片	171
干涉型截止濾光片	172

7. 帶止濾光片	195
高低折射率膜堆法	195
折射率漸變膜及非均勻膜法	197
8. 帶通濾光片	206
寬帶濾光片	206
窄帶濾光片	207
多腔窄帶濾光片	222
誘導透射濾光片	239
9. 斜向入射薄膜	248
斜向入射時薄膜折射率之修正	248
斜向入射時光學導納之修正	250
消偏振鍍膜	256
斜向入射效應之應用	269
10. 光學薄膜的製鍍方法	272
液體成膜法	272
氣體成膜法	275
增能助鍍及其他方法	301
11. 光學薄膜之特性與製鍍技術的改進	303
各種改進膜質的製鍍方法	316
混合式改進法	334
以單一材料製鍍多層膜	340
膜微觀結構與雙折射特性	343
12. 薄膜厚度之均勻性及鍍膜厚度之監控	348
膜分佈之理論分析	348
實作基板支撐架及膜厚監控的選擇	359
13. 光學薄膜特性的量測	378
薄膜光學常數的量測	378
薄膜透射率、反射率、吸收與散射量測	391
薄膜堆積密度之量測	402
薄膜表面輪廓及粗糙度的量測	403
薄膜微硬度、抗擦性、附著性及環境溫溼變化之量測	407

薄膜應力之量測	413
薄膜微觀結構之分析	420
薄膜成份之分析	422
雷射輻射對薄膜損傷承受值的量測	423
14. 光學薄膜材料	430
光學薄膜之基本要求	430
常用光學薄膜之製鍍與特性	437
兩種材料混合的折射率	443
毒性	445
15. 紫外光及 X-光波域之光學薄膜	447
紫外光光學薄膜	449
X-光光學薄膜	452
16. 光學濾光片製鍍範例	463
濾光片的設計	463
基板的準備	483
鍍膜與膜厚之監控	485
光學成效檢驗	486
非光學特性之檢驗	488
鍍膜機的清理	488
17. 光學薄膜與色彩	490
CIE X Y Z 色度座標	490
光度學	492
光源	494
光學薄膜的色彩與測量	496
附錄一 光學薄膜材料特性	506
附錄二 配色函數與光譜光視效函數	511
附錄三 有關薄膜光學原理、製作及檢測之參考書與會議	514
名詞索引	518