

自然界與科技領域中的光學薄膜— 從色彩顯示談起

Optical Thin Film in Nature and Made by Human Being—from the Color Display Point of View

李正中

Cheng-Chung Lee

自然界動植物及礦石中存在著許多光學薄膜，顯示了非常富麗的色彩，其作用可用光波原理解釋，人類依此原理也用光學薄膜製成各種顏色，並開發不少科技，本文用圖片舉例比較說明。兩者有不少雷同處。因此我們以為自然界的薄膜值得探究者不少，不論在結構上或製程上可供人類師法之處甚多。

Nature shows its iridescent color from various structures of optical thin films in the animal, plant and mineral. Such a fruitful color can be explained by the theory of wave optics in function of optical interference. Based on the principle of interference, variant scientific applications including color display have been made by our human being. The similarity of natural and man-made color has been explored and explained by means of photos and figures in this article. The result reveals that human being just reached to the shallow region of the nature. A lot of structural thin films in the nature are still worth to learn, such as why the thin film is in such a structure and how was it made.

一、前言

本文所述之光學薄膜 (optical thin film) 泛指薄膜的功能可用波光學 (wave optics) 來解釋的薄膜。此薄膜在層數上可以是單層也可以是多層；在架構上可以是單方向做平面的排列，也可以是呈二度空間及三度空間的排列；在材質上可以是全部沒有吸收的透明膜，也可以是無吸收膜或是部份吸收膜搭配吸收膜組成的膜堆。

當光波遇到一膜界面時會被分成兩光波，多界面則分成多光波。這些光波會互相干涉 (interference) 造成光譜在空間的重新分布。干涉與膜厚度 d 及膜折射率 n 有關。當 nd 值等於光波長的四分之一倍時，干涉呈現最大的加強性干涉或破壞性干涉，至於是加強或是破壞取決於相鄰膜界面材質的相對折射率。由於 nd 值已定，各波長 λ 不同，於是造成各波長干涉情形不同。例如以白色光照射之，若綠光在反射上是呈破壞性干涉，結果就看不到綠

色，而其互補色洋紅色就呈現出在反射光上；反之，若綠色光在反射上是建設性干涉則反射光會呈現綠色。

當膜界面愈多，各色光干涉不同的程度就愈強烈，於是造成色彩鮮豔的反射光，而且不同角度看它時 nd 變成 $nd\cos\theta$ ，因此相對應之干涉光波會變，也就是隨角度不同，我們會看到不同的顏色的反射光，這會使薄膜顯得更為富麗多彩。在自然界中，我們可以在海洋的魚類貝殼類、地上爬的走的、空中飛的動物以及礦石、植物中找到不少這種例子。在人為科技中，利用這種多層膜干涉來改善我們的日常生活，例如鍍膜應用在眼鏡、相機、放映機、望遠鏡、顯微鏡、電視及掃描器等等；或用這種多層膜干涉來達到某種科技目的，例如鍍膜應



圖 1. 多彩九孔貝殼為光波經貝殼上多層光學薄膜干涉的結果。

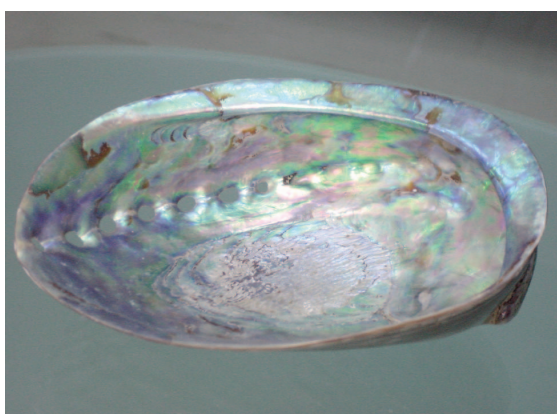


圖 2. 鮑魚貝殼具有富麗的色彩，為光波經貝殼之多層光學薄膜干涉的結果。

用於光資訊、光通訊、光色顯示、雷射及雷射所衍生之相關科技、光學儀器、光檢測、生物醫學光電、能源環保、照明、國防、人造衛星、外太空及宇宙探索等等。

本文將就自然界與科技領域中取幾則例子，從顏色的顯示現象上來說明及比較光學薄膜在其中的作用原理與應用。

二、自然界中之光學薄膜

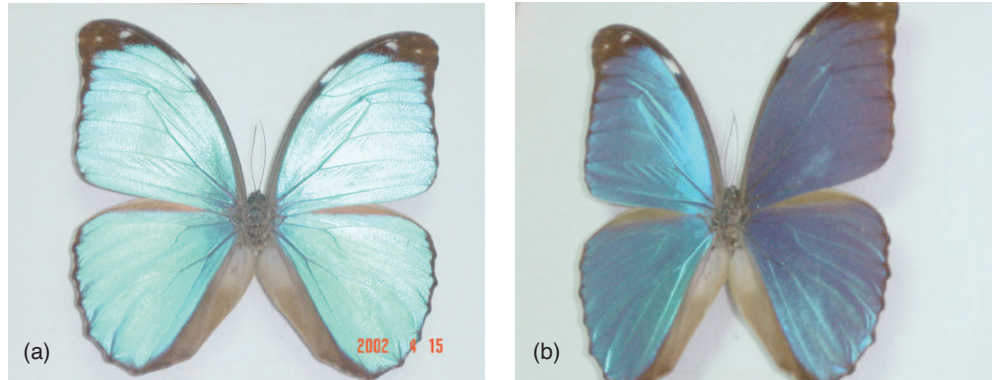
自然界存在著許多光學薄膜，分別可在一些動植物及礦石中發現。例如九孔殼 (圖 1)、鮑魚殼 (圖 2)、魚鱗、海螺殼 (圖 3)、珍珠、甲蟲殼、金龜殼、蜘蛛、蝴蝶翅膀 (圖 4)、蜻蜓翅膀、蟬羽、孔雀羽、鴿羽、蜂鳥羽等等，其顏色鮮豔多彩且隨角度不同其色調 (hue) 會變。這種隨角度顏色會改變的特性，有些很明顯以裸眼就可分辨出來，通俗性的書籍早有介紹，並視之為光學薄膜干涉的效果^(1,2)，近年來也有科學家利用新的科技做更深入的分析⁽³⁻⁷⁾。以下舉幾則例子做介紹。

貝殼類的多層膜結構較為簡單，如九孔、鮑魚、珍珠是由成長基因使然，抑或成長過程中因環境、養分及溫度的變化而長出一片片的薄膜，如圖 5⁽³⁾ 所示。圖 5 為珍珠剖面之掃描式電子顯微鏡 (SEM) 照片，那一層層薄膜為碳酸鈣晶片，晶片與晶片間為折射率較低之水質細胞層，總共有數十到數百層之多。依光學薄膜理論，多層且有周期性的



圖 3. 海螺殼，珍珠般的粉紅色光澤為光經貝殼上多層光學薄膜干涉的結果。

圖 4.
美蘭蝶翅膀，(a) 正面看
呈青綠色，(b) 45 度角
側視呈藍色。



薄膜，在某波段反射率會很高，亦即某顏色反射很強，膜層數愈多，反射愈高，顏色也愈明顯。若周期性漸變的一些多層膜堆疊在一起則可反射許多色光，例如反射了可見光大部份光譜只殘留些微的藍色與紅色則會呈現亮麗的粉紅色，這就是大家喜歡的粉紅珍珠。鮑魚的結構和珍珠差不多，但層數較少，碳酸鈣膜層也較寬平，不同角度看它顏色不一樣，例如正向看為綠色，斜向看變成藍色。這是因為顏色與膜層的光學厚度有關，當斜向視之，其光學厚度以 $\cos\theta$ 比例變小，亦即高反射之顏色會往短波長飄⁽⁸⁾。將碳酸鈣膜層與水質細胞層交互相疊共 31 層做模擬，得圖 6。圖 6(a) 之光譜圖表示正視、30 度及 60 度視角之光譜圖；圖 6(b) 為每隔

10 度由正視到 60 度之視角所顯示的反射色度變化曲線，顏色由青綠色變藍，最後呈紫紅色。由於結構中有水，若失去水則等效厚度變薄，原有之干涉

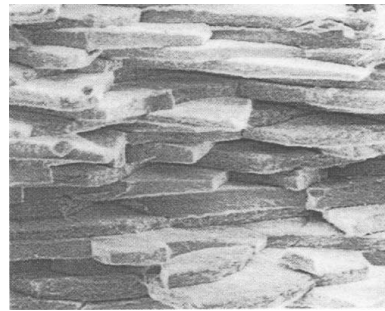


圖 5. 珍珠剖面之掃描式電子顯微鏡 (SEM) 照片⁽³⁾。

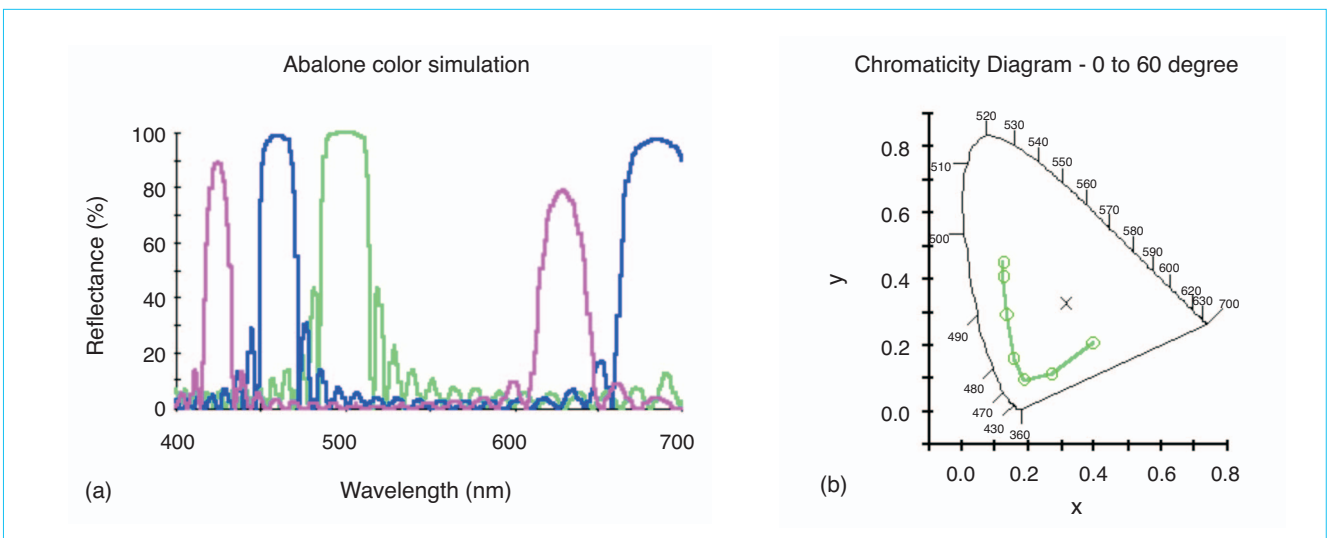


圖 6. 鮑魚貝殼多層膜模擬：(a) 反射光譜圖，正視 (青綠色)、30 度 (藍色) 及 60 度 (紫紅色)；(b) 反射色度，每隔 10 度由正視到 60 度的變化曲線，顏色由青綠色變藍，最後呈紫紅色。



圖 7. 魚鱗反射各色光而呈銀白色。

條件被破壞，顏色就不再那麼鮮艷美麗。這是為什麼珍珠要常接觸身體，以保有其濕氣，避免水成分散失。除上述九孔、鮑魚、珍珠外，自然中尚有其他生物也有類似的結構，而如魚鱗、魚眼等呈廣波域高反射之銀白色，這是因為魚鱗及魚眼有反射各色光的周期性膜堆相互疊加，所以各色光皆被反射，看起來即成銀白色，如圖 7 所示。以上所述以四分之一波厚為周期性的膜堆是科學儀器中常用的標準設計。

甲蟲及蜘蛛產生的顏色與上述略有不同，主要是來自其光柵結構加多層光學薄膜總干涉的合成結果。光柵的週期決定色調，多層光學薄膜則產生高反射增加光柵之反射繞射效率，例如參考文獻 (4) 所述，發現蜘蛛在空氣中呈藍色，但在水中呈綠色，經分析蜘蛛的光柵週期約 460 nm，因此在空氣中只有波長小於 460 nm 的光波可被反射出來，故呈藍色；但在水中，水折射率比空氣大 1.33 倍，於是綠色就有機會被看到了。但只有單層之光柵反射繞射效率很低，若加上多層薄膜增加反射率則可使反射繞射效率增加十幾倍。這就是蜘蛛及甲蟲反射色會那麼明亮鮮豔的原因。這種加鍍多層膜以提高反射繞射效率的設計曾被用在高功率雷射的應用上^(9,10)。

蝴蝶的結構比貝殼及甲蟲更為複雜，蝴蝶翅膀幾乎是由許多小片薄膜疊成三度空間的光柵與多層膜。以美蘭蝶 (morpho) 為例，外觀如圖 4。其翅膀是由許多小羽片組成，每一小羽片其橫向由多層膜組成，此多層膜又構成縱走斜向脊形光柵，如圖 8 所示。如此結構及層與層間之間距大約幾百奈米，因此造成多角度的繞射色光，其青綠色與藍色的反

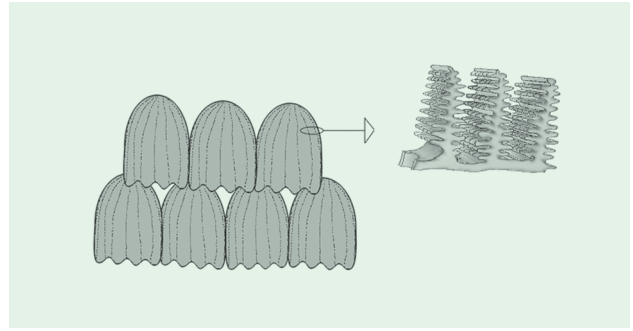


圖 8. 美蘭蝶翅膀小羽片結構示意圖。

射率高達 80%。從多層光學薄膜的觀點來看，那是多束光波干涉的結果。若從光子晶體 (photonic crystal) 的觀點來看，平面型的多層薄膜為一維晶體，當多層膜構架成二度空間及三度空間時，則是二維及三維的光子晶體，其晶格大小若在一百多到數百奈米則光子隙帶 (band gap) 造成的反射的光波為可見光，美蘭蝶的膜層結構剛好反射了青綠色。

蝴蝶種類很多，在陽光下所呈現之顏色也相當多，但其結構與上述差不多。英國 University of Exeter 的 Peter Vukusic 在這方面作了不少研究⁽⁵⁾。鳥羽的結構也是如此。以上所述之奈米結構展現出隨角度呈現多彩的現象又稱為結構型色彩 (structural color)，可以用光子晶格來描述它。鳥類羽毛的顏色有不少是這種結構型色彩⁽¹⁾，其中以孔雀的尾羽為典型的範例，晶格間距與週期決定其顏色之色調與飽和度。以孔雀尾羽為例，晶格間距在 140 nm、150 nm 及 165 nm 相對應於藍色，綠色及黃色，但孔雀尾羽的黃色不是純色調中的黃色，其中含有 450 nm 的干涉反射色，值得注意的是孔雀尾羽的棕色也是多波域干涉之反射色而不是顏料的顏色^(6,7)，這是比較少見的，因而顯得特別有意義。

以上自然界薄膜的展現在人類的科技中也有相當多的發明，有的早已經用在日常生活中，有的正是今日高科技儀器中不可或缺的元件，而有的是目前大家急欲開發的理論與實驗，請見下節解說。

三、科技中之光學薄膜—人造光學薄膜

一層薄膜有兩個界面，因此至少有兩束光可引起干涉造成各種色彩，例如肥皂泡泡，其原理如圖

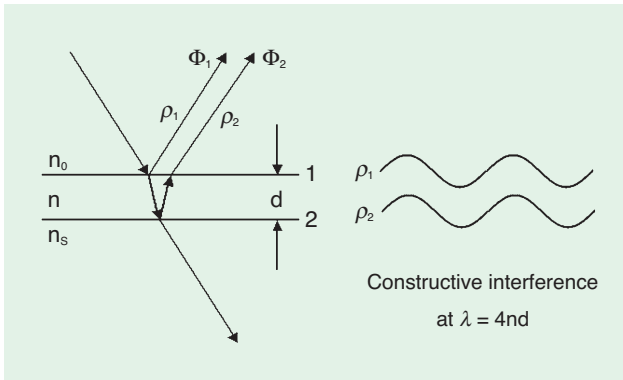


圖 9. 單層膜產生色彩之原理。

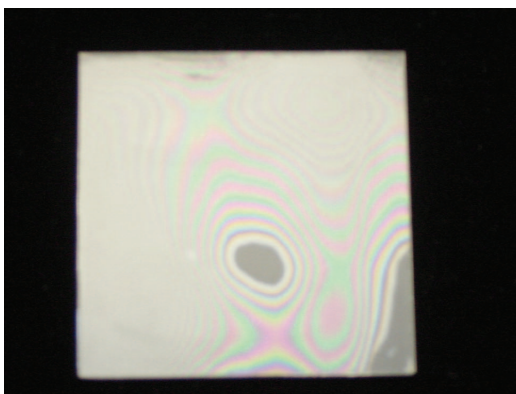


圖 10. 不等厚度空氣層彩色圖。

9 所示。圖中肥皂液之折射率 $n = 1.33$ ， $n_0 = n_s = 1.0$ 為空氣， ρ_1 與 ρ_2 分別為界面 1 與 2 之反射係數， ϕ_1 與 ϕ_2 為反射相位移，分別為 0 及 180 度，隨著膜厚增加兩波漸趨重疊 (同相)，亦即某色光之波長 $\lambda = 4nd$ 時，該顏色光波會產生加強性干涉，因此當膜厚 d 大約從 85 nm 起，開始可以看到各色光的加強性干涉，顏色由藍青綠黃橙紅到紫，再重複藍青綠黃橙紅紫，一直到膜層太厚干涉對比度太差就看不到顏色了。這種單層膜的反射色在許多地方也可以看到，例如水面上的油層、金屬表層。甚至空氣層若夠薄也會產生干涉條紋 (自然界多有此例)，圖 10 為空氣薄層夾在兩片玻璃的反射干涉色彩圖，相同顏色的同曲線表示相同的空氣層厚度，這就是光學元件製造者用來檢驗元件平整度或曲面是否達到理想的原理，其作法為取一標準片與待測片相干涉檢視其干涉圖，稱之為 Fizeau 干涉條紋，由條紋偏離直線的多少可判斷待測面與標準差距多

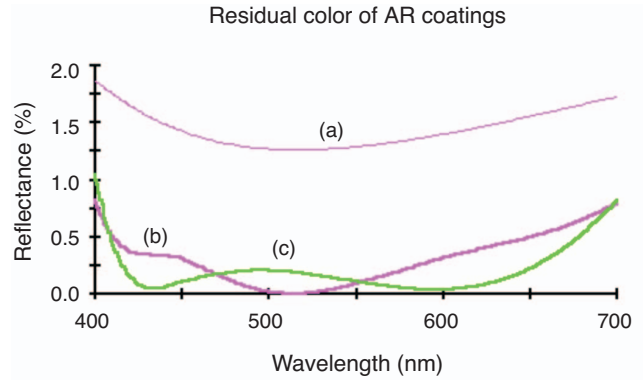


圖 11. 眼鏡鏡片的抗反射膜光譜圖，(a) 單層一細粉紅色，(b) 多層一粗粉紅色，(c) 多層一粗綠色。

少，偏離一條干涉條紋表示差距二分之一波長。

單層膜亦可用來減低反射以增加影像對比度及透光率，最常見的是鍍在光學元件的表面，如照相機、顯微鏡、投影電視機等的鏡片，眼鏡鏡片也是。但若要反射率很低、低反射區又要很廣，則要鍍多層膜。圖 11 是常見的眼鏡鏡片的抗反射多層膜光譜圖，選不同材料或鍍法可使反射看起來為綠色 (c) 或粉紅色 (b) 而仍然保持夠寬的低反射區，圖中 (a) 呈粉紅色但反射沒那麼低的細粉紅色曲線是只鍍單層膜。至於太陽眼鏡對顏色的要求則更為考究，除了可防止紫外光紅外光以保護眼睛外，還要在顏色上顯得炫眼且亮麗，在此選藍綠色太陽眼鏡為例如圖 12 所示，以與圖 4 美蘭蝶做比較，我們可看出其相似處，隨著視角不同顏色會變是多層膜干涉的共同特性。其他更炫眼或比較柔和色系的太陽眼鏡也可由多層光學薄膜鍍成，其顏色也是隨視角起變化的。將薄膜做成藝術品也相當有潛力，圖 13 是用薄膜畫成的彩色畫，畫中涵括三原色且其色彩能隨視角而變。但若將之印在書上⁽⁸⁾，則無法轉變視角分辨出是否該畫為薄膜畫，如圖 14 所示，因為油墨的顏色是靠吸收而非靠干涉產生。靠吸收產生的顏色在任何角度看都是同一色。要將薄膜畫複製勢必很難，這也是為什麼可以利用薄膜為有價證券做防偽的原因。

利用多層膜作成各種富麗且高雅的顏色是可以比美自然動植物的顏色而且可作成比較大的面積，圖 15 是鍍在筆記型電腦外殼的寶石色，正視為青

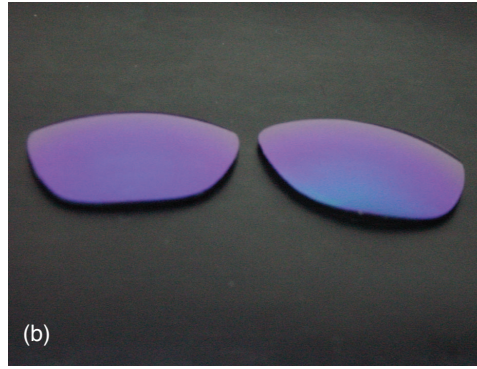


圖 12.
太陽眼鏡隨著視角不同，顏色由藍綠色轉為深藍色：(a) 10° 視角，(b) 45° 視角。

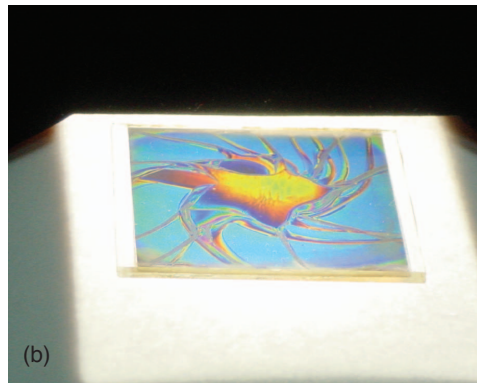
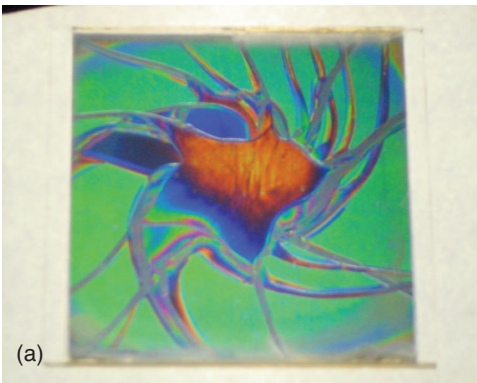


圖 13.
用光學薄膜製成的彩色畫：(a) 正視，(b) 60° 視角⁽⁸⁾。

綠色，隨著視角不同顏色變成深藍及玫瑰紫。若將薄膜蝕刻成如圖 16，此另一名稱為光子晶體，則經由調整孔形、孔深、孔距、週期、排列方式等參數可產生多樣式的色彩，如圖 17 所示，圖中八個光子晶體薄膜結構略有不同，因此顏色也不一樣。請注意圖 17(a) 與 (b) 視角不同顏色也不同，而且最左邊之結構在正視時透射率很高，我們可以看到底下的字，宛如沒有鍍膜。

多層光學薄膜不只可產生各種顏色，在近代科

技中亦扮演相當重要的角色。顯示器及光資訊輸出輸入所必需的光三原色即為其例，圖 18 即為由多層光學薄膜做成的紅綠藍三原色濾光片，一般用於掃描器及投影電視機的三原色濾光片需要鍍三十幾層。

一維的光學薄膜在過去的科技中已做出重要的貢獻，未來更會如此。而二維及三維光學薄膜在光顯示、光通訊、光計算、環保、能源控制、國防以及未來科技的開發上也都是有趣的課題。

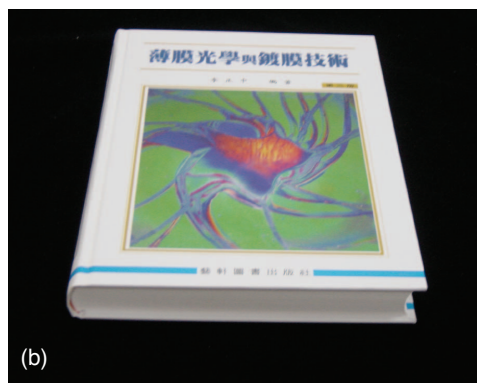
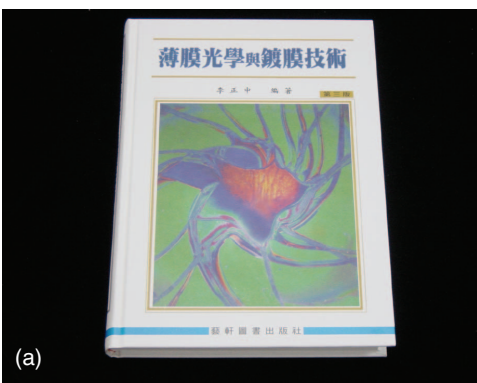


圖 14.
將圖 13 的畫印製成書的封面：(a) 正視，(b) 60° 視角⁽⁸⁾。

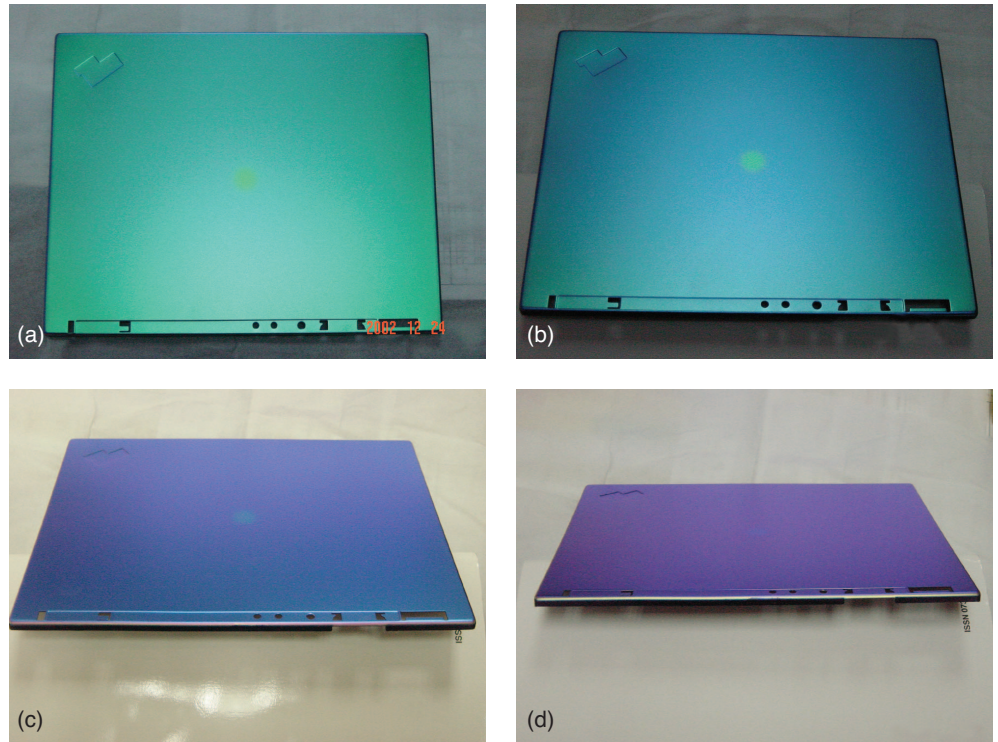


圖 15.
寶石色的筆記型電腦外殼：(a) 正視，(b) 45° 視角，(c) 60° 視角，(d) 75° 視角。

四、結語

自然界的動植物及礦石中存在著許多光學薄膜，可視為一度空間、二度空間及三度空間的多層薄膜，亦可視之為一維、二維及三維的光子晶體。薄膜或晶格大小皆為奈米級數，經由不同結構可產生各種顏色而不需染料或顏料。顏色顯示只是其中表相之一，人類感官能及者有限，自然界之生物因這種結構而進行傳訊、維生、演進等等不知幾許。人類在科技進展中利用多層薄膜來改善日常生活，從事新科技的開發，此非模擬自天然，但已有非凡

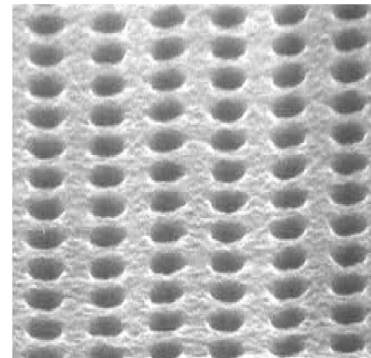


圖 16. 二維光子晶體薄膜之掃描式電子顯微鏡 (SEM) 照片。

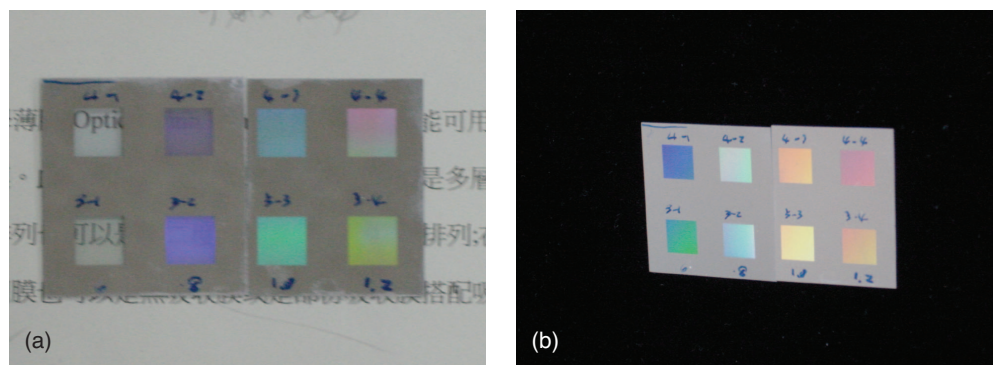


圖 17.
二維光子晶體薄膜所呈現的顏色：(a) 正視，(b) 側視。

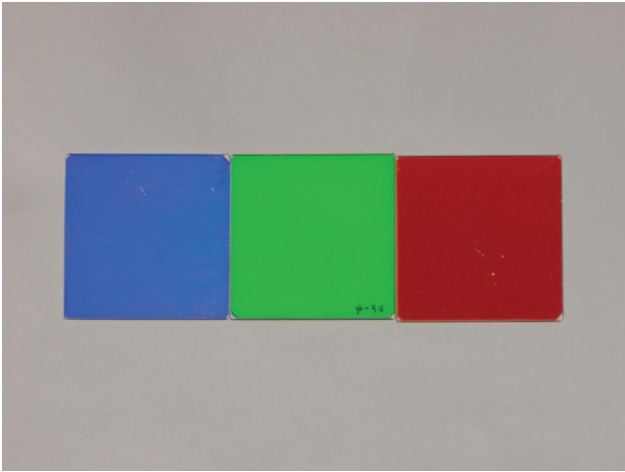


圖 18. 由多層光學薄膜做成的紅綠藍三原色濾光片。

的成果。今後若能細心體會自然的奧秘，謙卑的向自然學習則將有另番革新的成就。例如自然界用不同結構可產生各種顏色而不需染料或顏料，對於環保具有很大的啟發；又如自然界動植物成長出薄膜或光子晶體所需能量相當少，它利用很多複製工程，這也是極大的啟示，值得吾人注意，尤其當我們常常製造很複雜的設備運用極耗能源方法來做同樣的事時，更應想想自然界可學之處甚多。

參考文獻

1. P. Murphy, P. Doherty, and W. Neil, *The Color of Nature*, San Francisco: Chronicle Books (1996).
2. P. A. Farrant, *Color in Nature*, London: Blanford (1997).
3. 小倉繁太郎, 應用物理, **66** (12), 1330 (1997).
4. Z. S. Hegedus, *OSA 1998 Technical Digest Series*, **9**, 493 (1998).
5. P. Vukusic, *Optical Interference Coatings*, ed. by N. Kaiser and H. Pulker, New York: Springer (2003).
6. J. Z, X. Yu, Y. Li, X. Hu, C. Xu, X. Wang, X. Liu, and R. Fu, *Pro. Natl. Acad. Sci.*, **100**, 12576 (2003).
7. S. K. Blau, *Physics Today*, Jan. 18 (2004).
8. 李正中, 薄膜光學與鍍膜技術, 第三版, 台北: 藝軒圖書出版社 (2002).
9. B. W. Shore, M. D. Perry, J. A. Brotten, R. D. Boyd, M. D. Feit, H. T. Nguyen, R. Chow, G. E. Loomis, and L. Li, *J. Opt. Soc. Am.*, **A14**, 1124 (1997).
10. L. Li, *OSA 1998 Technical Digest Series*, **9**, 436 (1998).

-
- 李正中先生為美國亞利桑納大學光學博士，現任國立中央大學薄膜技術中心主任及光電科學研究所教授。
 - Cheng-Chung Lee received his Ph.D. in optical sciences from University of Arizona, USA. He is currently the director of the Thin Film Technology Center and a professor in the Institute of Optical Sciences of the National Central University.