

光學薄膜於色彩顯示之應用 (下)

Color Display of Optical Thin Film (II)

李正中、楊宗勳、廖詩芳

Cheng-Chung Lee, Tsung-Hsun Yang, Shih-Fang Liao

隨著顯示器、固態照明技術的迅速發展，對顏色豐富性與真實性的要求越來越高，使得色彩量測與評價的重要性日益增加。另外利用光交互干涉的方式所產生的色彩，其色彩的品質極佳，而光學薄膜即為實現光干涉產生色彩的重要技術。所以本文除了介紹色彩科學中幾個常見的表色系統、色彩的計算方式、光源及色彩量測的方法，更藉由周遭常見的光學薄膜應用為例，搭配色彩科學的方法深入探討、分析光學薄膜在色彩顯示上的應用。

Color plays an important role in our daily life since there was human culture. As the rapid growth of display and solid state lighting industry, the requirement for the variety and fidelity of color performance is much more than ever before. Hence the importance of color measurement and evaluation method increases day by day. The quality of color produced from interference of lights is remarkable, and the optical thin film which exists around our life is the principal technology to achieve this task. It has already been demonstrated in animal, plant, and mineral. At first, color system, photometry, light source, color temperature, color rendering index and color measurement will be introduced in this article. And then, several applications of optical thin film in nature and man-made will be cited as instances to discuss and analyze by using the methodology of color science.

四、色彩量測

了解色度空間、演色性及光源的評估方式後，本章將介紹兩種色彩量測常見的工具及方法。

1. 三刺激值直讀法

符合盧瑟條件 (Luther condition) 的光電色度計所量到的讀值，即為色度值 (colorimetric values)⁽²³⁾。盧瑟條件是指此色度計中光接收器的響應函數與濾光片穿透率之乘積必須正比於 CIE 配色函數或者其線性組合，簡單表示如 (4-1) 式：

$$\begin{aligned}k_x \times (S_A(\lambda) \times R(\lambda)) \times t_x(\lambda) \times r(\lambda) &= (S_C(\lambda) \times R(\lambda)) \times \bar{x}(\lambda) \\k_y \times (S_A(\lambda) \times R(\lambda)) \times t_y(\lambda) \times r(\lambda) &= (S_C(\lambda) \times R(\lambda)) \times \bar{y}(\lambda) \\k_z \times (S_A(\lambda) \times R(\lambda)) \times t_z(\lambda) \times r(\lambda) &= (S_C(\lambda) \times R(\lambda)) \times \bar{z}(\lambda)\end{aligned}\quad (4-1)$$

其中， k_x 、 k_y 、 k_z 為比例常數， $S_A(\lambda)$ 、 $S_C(\lambda)$ 分別為實際光源與標準光源的光譜分布函數， $R(\lambda)$ 為物體反射率 (若探討物體之穿透色，則代入穿透率 $T(\lambda)$)， $t_x(\lambda)$ 、 $t_y(\lambda)$ 、 $t_z(\lambda)$ 為色度計中彩色濾光片之穿透率， $r(\lambda)$ 為光接收器響應函數。

最常使用的儀器為三刺激值濾片式色度儀，光線照射在待測物體上，其反射光 (或穿透光) 通過色度儀內部的彩色濾光片後，由光接收器接收光強度值，相當於得到式 (2-1) 之三刺激值，即可求得物體色度值。雖然彩色濾光片不好鍍製，所以較難得到精準的色度值，但這是一個便利、價格低廉又快速的色彩量測方法。

因為彩色濾光片中的 $\bar{x}(\lambda)$ 函數不易利用一片濾光片實現，且 $\bar{x}(540) \approx 0$ ，所以波長小於 540 nm 與波長大於 540 nm 的 $\bar{x}(\lambda)$ 分別鍍製。另外， $\bar{x}(\lambda < 540 \text{ nm})$ 與 $\bar{z}(\lambda)$ 函數分布類似，因此 $\bar{z}(\lambda)$ 的濾光片亦常用來代替 $\bar{x}(\lambda < 540 \text{ nm})$ ，但是值得注意的是它們的最高點並非重疊 ($\bar{z}_{\text{peak}}(\lambda)$ 在 446 nm，而 $\bar{x}_{\text{peak}}(\lambda)$ 則為 442 nm)，所以若為了方便而以 $\bar{z}(\lambda)$ 取代 $\bar{x}(\lambda < 540 \text{ nm})$ ，勢必會造成不可忽視的誤差。

2. 光譜量測法

利用光譜儀量測色彩的方法，最常見的儀器即為光譜式色度儀 (spectrophotometer) 一用一已知的白光光源分光照射待測物後，將反射光 (或穿透光) 由安裝於色度儀內部的光譜儀接收後，得到物體的反射率 (或穿透率)，藉由儀器內部運算即可算出物體在各標準光源下的色度值。由於光譜式色度儀內部含有光譜儀，因此可以得到待測物較精確的色度值，但價格上較為昂貴。

五、光學薄膜與色彩科學

色彩的產生與變化可利用物質的特性來篩選光的波長，例如：週期性排列的結構、可吸收某特定波段的染料、奈米金屬粒子、具有雙折射性之介質以及藉由干涉原理之光學薄膜等，甚至是將物質以

奈米尺度表現也會產生與此物質原本不同的色彩。其實在自然界中，許多生物與礦物早已為我們示範了干涉、繞射、散射與吸收作用，為我們所處的世界中帶來許多燦爛耀眼的色彩，例如美麗的孔雀羽毛、蝴蝶翅膀、金龜子翅膀、鮑魚貝殼、九孔等皆是以週期性的結構排列達到光波的篩選，使其色彩繽紛，且其排列的方式與尺度的精密程度，即使在科技發達的今日仍無法達到完全模仿。不過我們可藉由光在奈米尺度之薄膜中產生數百條以上不同的光波，相互作用構成建設性干涉或破壞性干涉而使不同波長的光之透射、反射、偏振及相位形成不同的變化，來達到仿生的效果⁽²⁴⁾。

致力於仿生學之 Keith Lewis 認為生物為了生存而發展出色彩的方式有以下三種⁽²⁵⁾：(1) 以色素的形式表現特定化學種類的色彩。(2) 由薄膜產生干涉或繞射的過程而形成的結構性色彩。(3) 細菌生存在宿主身上而展現色彩。由於光學薄膜對於不同波長有不一樣的影響，因此會顯示不同的色彩，在色彩學上也可有一些應用，如彩色濾光片、模擬日光光源、投影機色輪、防偽辨識、裝飾等等。以下將先舉例說明薄膜的色彩如何計算，然後再談薄膜在色彩學上的應用。

1. 薄膜色彩的計算

肥皂泡膜是常見之有色彩的薄膜，其色彩顯現可以用圖 10 來說明，左圖是其膜層示意圖，右圖是光波經肥皂泡膜的兩個界面 (界面 1 與界面 2) 反射後的建設性干涉之示意圖。其反射率光譜圖如圖 11 所示。

將圖 11 之反射率依 (2-1) 式，可得到此肥皂泡膜之三刺激值為 (142.86, 123.60, 645.41)，再代入 (2-2) 式，則當光源 $S(\lambda)$ 為 D_{65} 時，其色度座標為

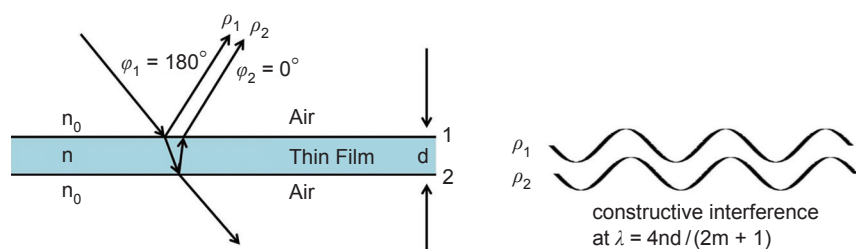


圖 10. 肥皂泡膜之示意圖，膜折射率 $n = 1.33$ ，膜厚度 $d = 230 \text{ nm}$ 。

(0.15, 0.14)，代表此肥皂泡膜表現的顏色為藍色，如圖 12 所示。本章節若無特別說明，則光源 $S(\lambda)$ 是採用 D_{65} 。

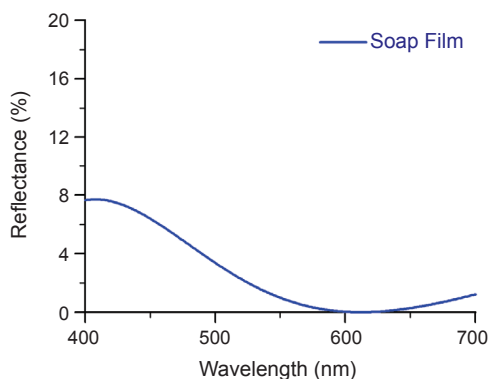
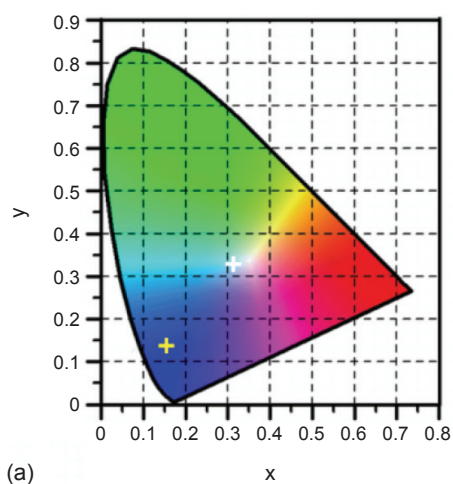


圖 11. 肥皂泡膜厚度 $d = 230 \text{ nm}$ 之反射光譜圖。



(a)



(b)

圖 12. (a) 以 CIE 1931 x - y 色度座標表示的肥皂膜色度圖，黃色“+”為肥皂泡膜之色度座標 (0.15, 0.14)，白色“+”為白點 (D_{65}) 座標 (0.33, 0.33)，(b) 模擬肥皂泡膜所顯示之顏色。

圖 13 為厚度由上而下漸漸變厚的肥皂泡膜圖，由於厚度不同，產生建設性干涉之波長也不一樣，所以肥皂泡膜會產生不同的色彩，當厚度漸漸增加，顏色由短波的藍色變化至長波的紅色，且厚度越厚干涉條紋越密，即顏色變化越快。

2. 薄膜色彩的應用

(1) 仿自然界中的色彩薄膜

許多生物在成長過程中，會形成美麗的彩色薄膜，如圖 14 所示的九孔與鮑魚殼。圖 15 為用

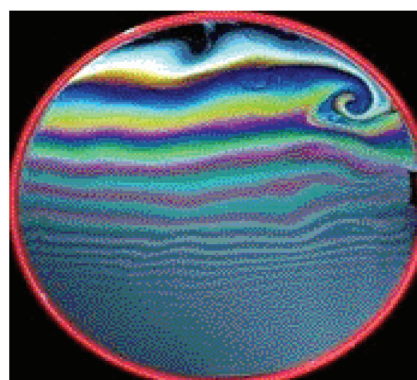
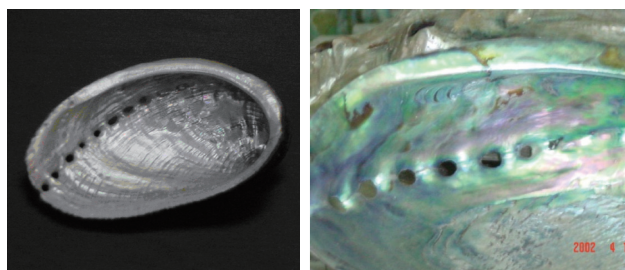


圖 13. 厚度由上而下漸漸變厚的肥皂泡膜之色彩圖。



(a)

(b)

圖 14. 自然界的彩色薄膜，(a) 九孔殼、(b) 鮑魚殼。

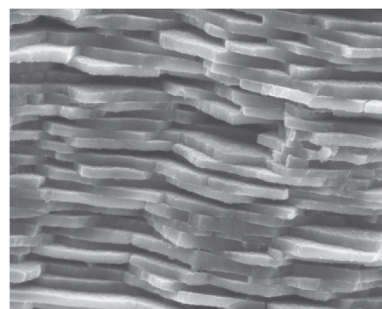


圖 15. 鮑魚殼 SEM 剖面圖。

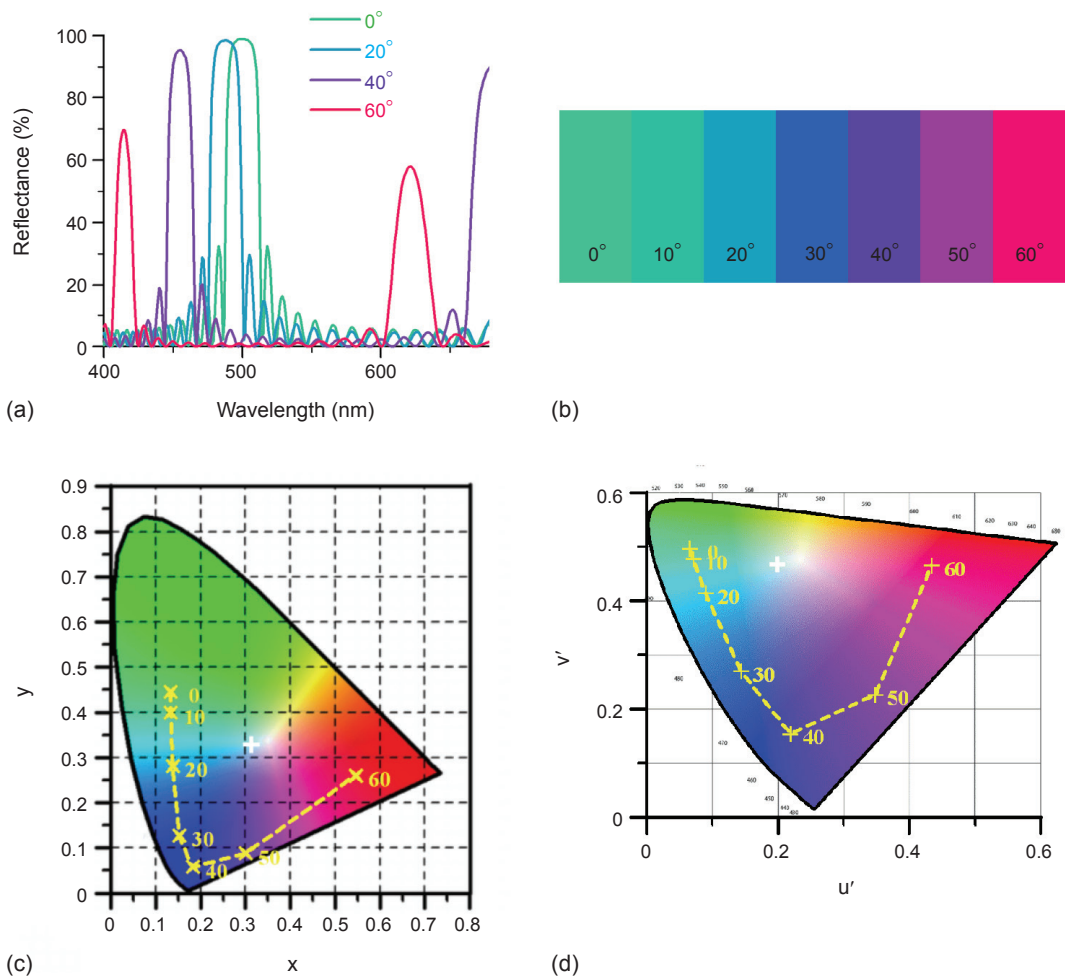


圖 16. D_{65} 光源斜向入射 ($0^\circ - 60^\circ$) 仿鮑魚殼多層膜之設計的色彩，(a) 反射率光譜，(b) 模擬 $0^\circ - 60^\circ$ 入射光照射顯示的顏色，(c) CIE 1931 x - y 色度座標，(d) CIE 1976 u' - v' 色度座標。

電子顯微鏡 SEM 分析鮑魚殼剖面圖，顯示其為多層膜結構，因此可推測其色彩是多層膜干涉的結果。於是利用薄膜設計軟體，可以模仿鮑魚殼所呈現之色彩：選擇高折射率材料 Al_2O_3 (標示為 H) 及低折射率材料 H_2O (標示為 L)，設計為 $\text{Airy}(5\text{HL})^{15}5\text{H}|\text{Glass}$ 。並以斜向入射光 ($0^\circ - 60^\circ$) 照射，得到其反射率光譜，圖 16(a) 所示，若光源 $S(\lambda)$ 為 D_{65} ，由 (2-1) 式、(2-2) 式與 (2-4) 式，可得到其色度座標。分別在 CIE 1931 x - y 與 CIE 1976 u' - v' 色度座標上作圖，如圖 16(c) 與圖 16(d) 所示，其色彩隨角度的變化如圖 16(b) 所示，因此鮑魚殼上的色彩都可以在圖 16(b) 看到。

(2) 眼鏡鏡片抗反射膜

抗反射膜 (anti-reflection film) 的功能主要有兩點：減少反射損耗以增加穿透率、改善影像的清晰度。所以我們每天所戴的近視眼鏡或太陽眼鏡上幾乎都會鍍上抗反射膜。圖 17 列舉兩種常見的抗反射膜，一種是將可見光光譜壓到最低，最低點在光譜中央 510 nm，因此反射呈殘餘的藍紅混光色，即洋紅色 (magenta)，另一種將可見光光譜兩邊的藍紅色壓低，而殘留綠色 (green)。

圖 17 顯示其反射率光譜、模擬之色彩，與 (x, y) 值：洋紅 (0.39, 0.21)、綠 (0.24, 0.45) 及 (u', v') 值：洋紅 (0.33, 0.40)、綠 (0.12, 0.51)。由圖 3 或圖 4 的麥克亞當橢圓可知人眼對綠色的分辨能力較

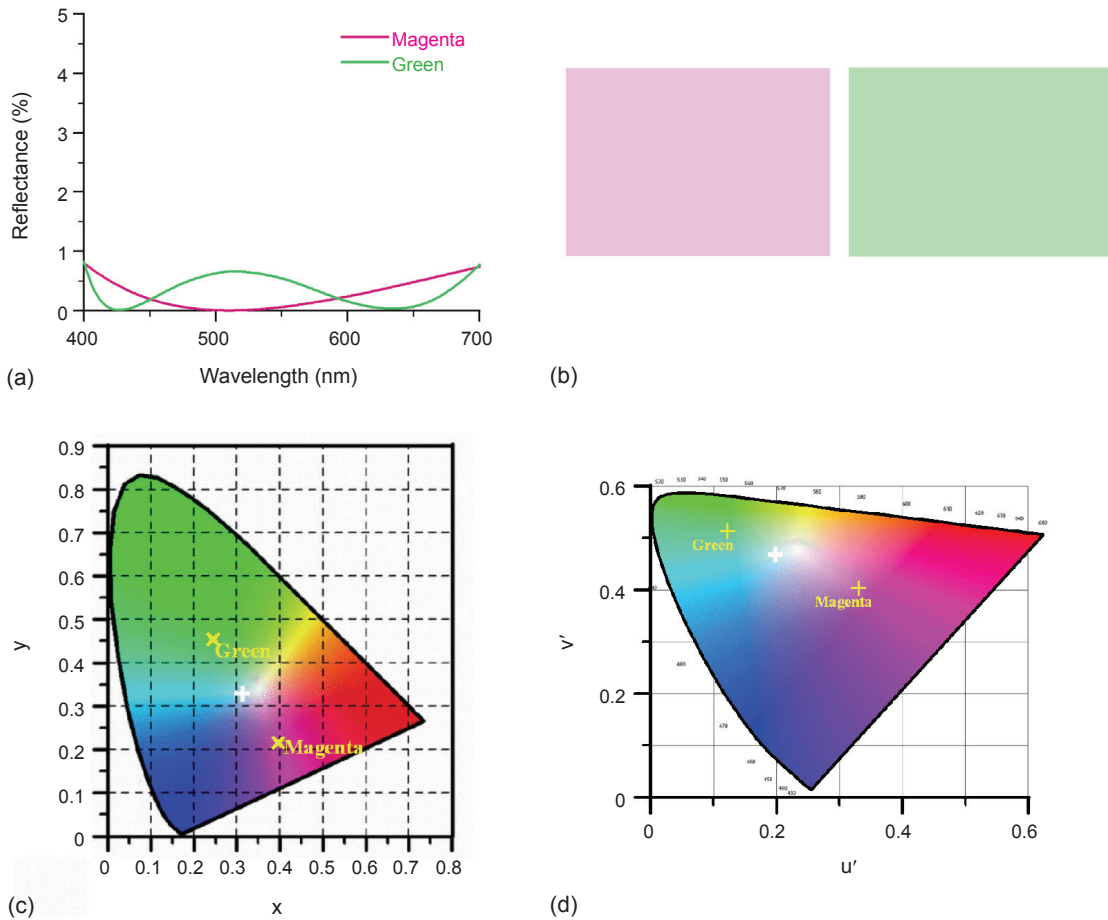


圖 17. 抗反射膜設計之光譜圖與光源 $S(\lambda)$ 為 D_{65} 時之色度座標，(a) 反射率光譜，(b) 模擬顯示的顏色，(c) CIE 1931 $x-y$ 色度座標，(d) CIE 1976 $u'-v'$ 色度座標。

差，所以眼鏡的抗反射膜反射顏色若為綠色，其誤差容忍度較高，因此製造的良品率可提高。

(3) 太陽眼鏡

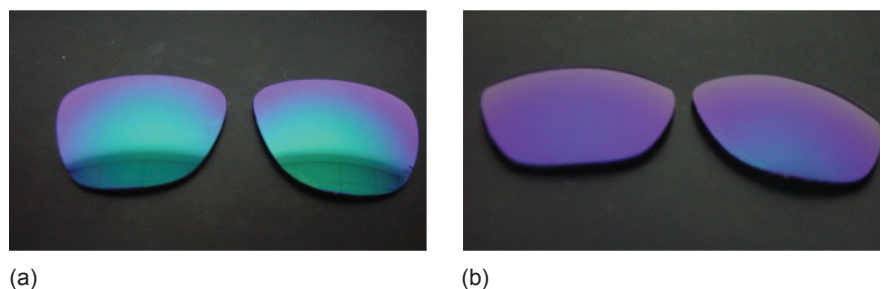
在烈日下為了保護眼睛，會戴上去掉紫外光及紅外光的太陽眼鏡，這可藉由薄膜來達成，而為了美觀有時會故意使反射光呈各種顏色，但穿透光仍為中性色。太陽眼鏡的色彩變化亦如圖 16 及圖 17

所示，會隨著入射光角度不同而改變，以圖 18 為例：光線由正向及斜向入射時，反射光會由青色 (cyan) 漸漸轉變為寶藍色。

(4) 貨幣、商標之防偽

為了保護消費者權益，許多鈔票、信用卡等之貨幣上面常常會貼印光學薄膜以達到防偽的功能，甚至許多商標亦會用同樣的方式杜絕仿冒。

圖 18. 太陽眼鏡反射光顏色，(a) 光線正向入射、(b) 光線斜向入射。



以中央銀行所印製的 1,000 元鈔票⁽²⁶⁾ 為例，如圖 19，在紙鈔左下角處，“1000” 的顏色會隨著入射光角度不同而改變。我們可以利用薄膜設計模仿其色彩⁽¹⁾，並得到不同入射光角度 ($0^\circ - 60^\circ$) 的反射率光譜，代入 (2-1) 式與 (2-2) 式 (假設光源 $S(\lambda)$ 為 D_{65})，即可求得各角度的 (x, y) 及 (u', v') ，如圖 20 所示。



圖 19. 新臺幣 1,000 元。

若將光源 $S(\lambda)$ 置換為 A 光源，代入 (2-1) 式與 (2-2) 式，則其顯示之顏色如圖 21，與圖 20(b) 的顏色差異甚大，可見光源的選擇會影響被照體所表現出來的色度。

(5) 投影機用的三原色色輪

投影機通常會將光之三原色紅綠藍分光處理，然後再合併經由投光鏡頭投射出去，將紅綠藍三色分光方法有多種，例如德州儀器 (TI) 開發數位光處理技術 (digital light processing, DLP)，將投

影機或者背投電視機 (project TV) 安裝色輪 (color wheel)，光源通過色輪後由數位微鏡器 (digital micro-mirror device) 接收產生色彩；色輪通常被分為四個區域：紅、綠、藍與一個用來增加亮度的透明區域，如圖 22 所示。

圖 23 即是以光學薄膜設計之色輪穿透光譜與其色彩特性。 (x, y) ：紅 (0.71, 0.28)、綠 (0.36, 0.61)、藍 (0.13, 0.09)， (u', v') ：紅 (0.57, 0.51)、綠 (0.15, 0.57)、藍 (0.14, 0.21)。

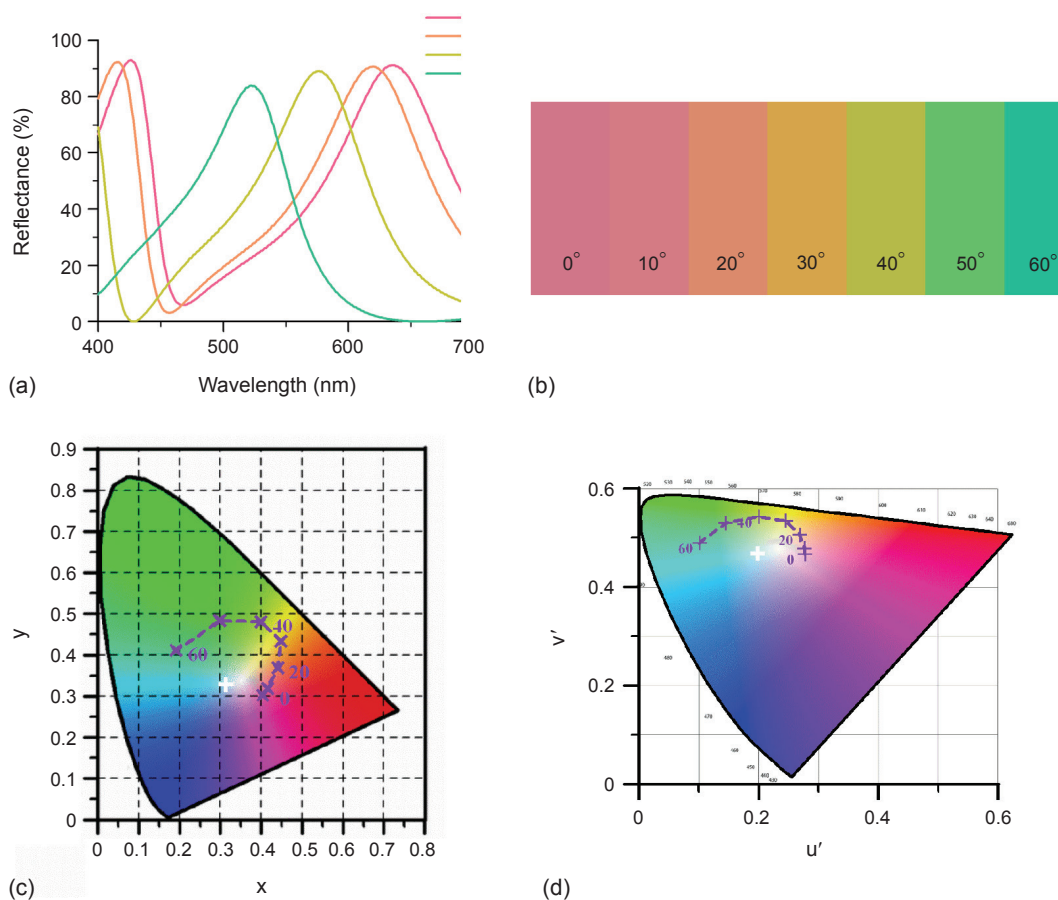


圖 20. 仿新臺幣 1,000 元色彩之光譜圖與光源為 D_{65} 時，($0^\circ - 60^\circ$) 之色度座標，反射率光譜 ($0^\circ - 60^\circ$)，(b) 模擬不同入射角顯示的顏色，(c) CIE 1931 $x-y$ 色度座標，(d) CIE 1976 $u'-v'$ 色度座標。

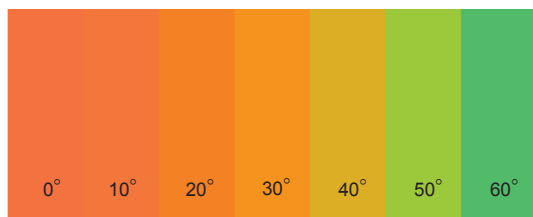


圖 21. 將光源 D_{65} 換成 A 光源，以不同角度照射時，造成的顏色變化。

(6) 黑膜

黑膜表示此薄膜沒有反射光，可利用吸收的方式達到目的，即塗上一層會吸收可見光譜的塗料。另一種方法就是鍍上在可見光譜範圍內反射等於零的抗反射膜。圖 24(a) 是一理想的非均勻膜，其折射率隨薄膜厚度的變化。理論上鍍上此均勻膜後， $0^\circ - 60^\circ$ 入射光之反射在可見光譜範圍內幾乎等於

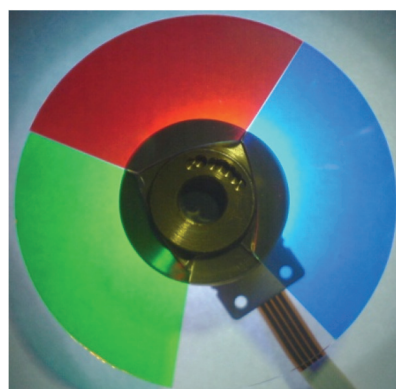
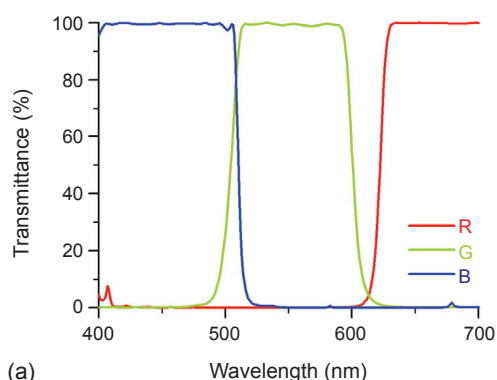


圖 22. 紅綠藍三原色加無色之色輪。

零，如圖 24(b) 所示。圖 24(c) 與圖 24(d) 為 D_{65} 光源 $S(\lambda)$ 時的色彩模擬圖。

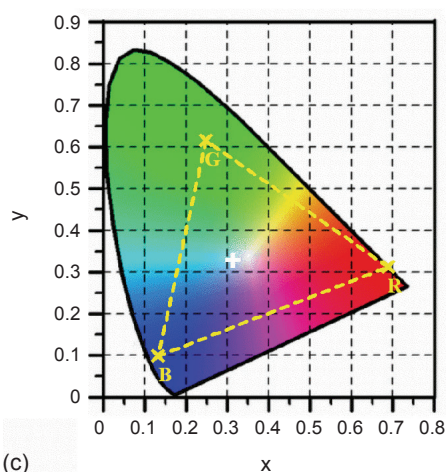
折射率隨薄膜厚度變化的薄膜可利用奈米矽錐近似地達成⁽²⁷⁾，此外亦可利用多層膜設計，在金屬



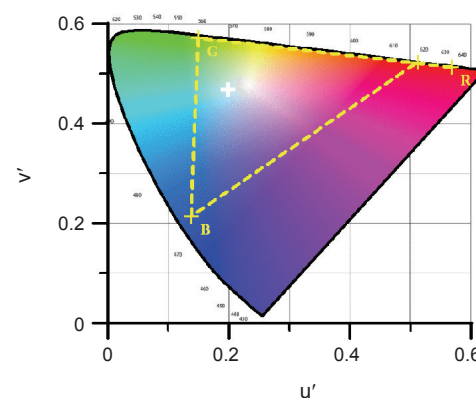
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 23. 投影電視機 (PTV) 色輪光譜圖與光源為 D_{65} 時之色度座標，(a) 色輪設計之穿透率光譜，(b) 模擬色輪顯示之顏色，(c) CIE 1931 $x-y$ 色度座標，(d) CIE 1976 $u'-v'$ 色度座標。

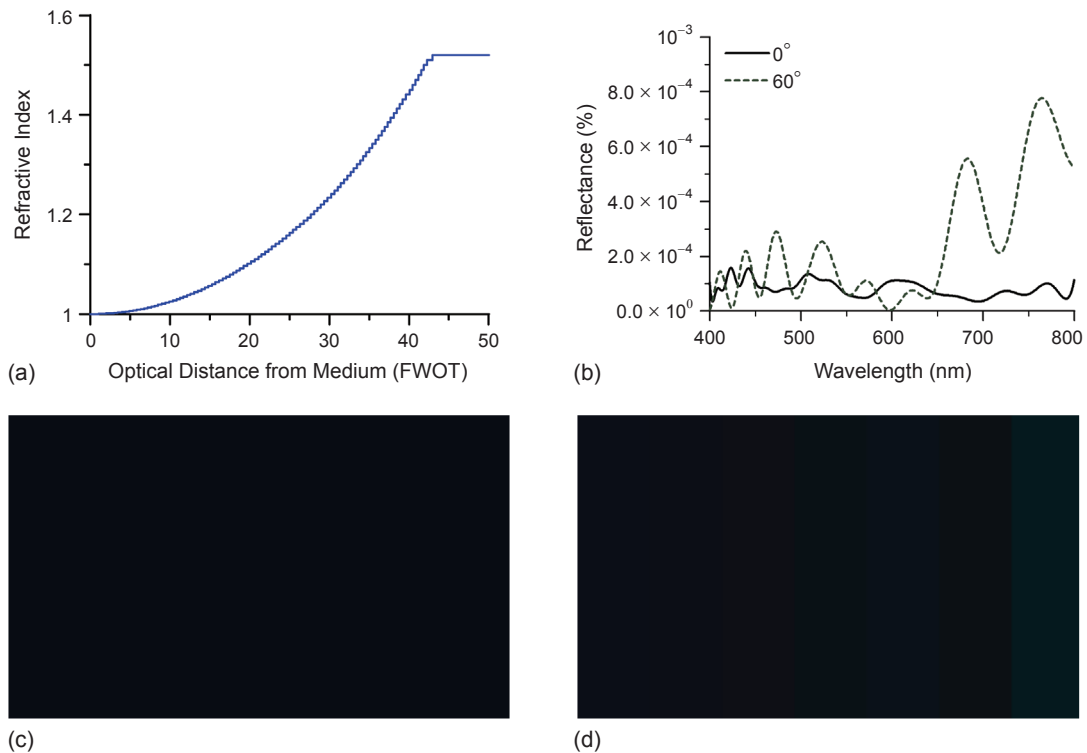


圖 24. 非均勻抗反射膜之設計結果，(a) 非均勻抗反射膜之折射率，(b) 不同入射角之反射率變化，(c) 模擬 0° 入射之顏色，(d) 模擬 $0^\circ - 60^\circ$ 入射之顏色變化。

板如鋁板上交互鍍上介電質與金屬膜，其黑色甚深，如圖 25 所示，圖中以深黑色 Fujitsu 筆記型電腦當背景，黑膜左邊是白紙當做比較用，很明顯的我們鍍的黑膜相當的黑，因此相較之下，黑色筆記型電腦看起來就不那麼黑。鍍前若將基板表面粗糙化，則高角度下的反射率也會和零度一樣都會很低而呈黑色。

(7) 白膜

白膜和黑膜一樣可利用塗料將可見光譜全部反射，或鍍上多層膜將可見光全部反射，也就是

冷光鏡，如圖 26(a) 及圖 26(b) 所示。以 D_{65} 照射，其顏色呈白色，座標 (x, y) 及 (u', v') 為白色點，如圖 26(c) 及圖 26(d) 所示的黃色 "+"。但若以 A 光源照射，則其顯示之顏色如圖 27 所示偏橘黃色。

(8) 日光模擬器

標準日光光源可以顯示物體最自然且真實的色彩，也可以當作校正、量測色彩的光源或非標準光源的參考光，同時它也屬於高演色性光源，可作為展示櫥窗或藝術品的照明光源，也可用在室內農作物或水草養殖，甚至最近發展的太陽能電池研究

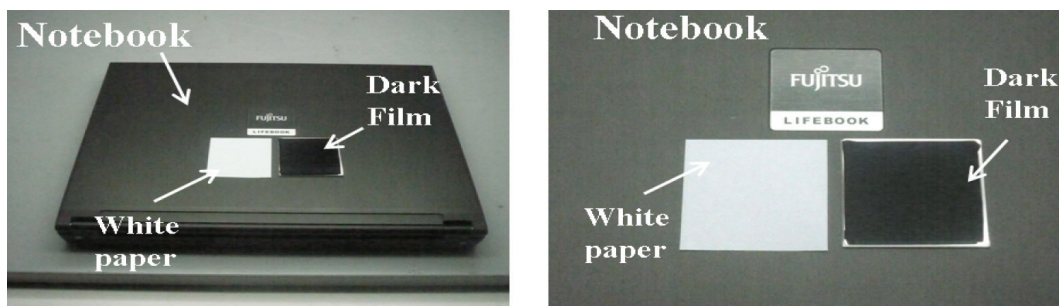
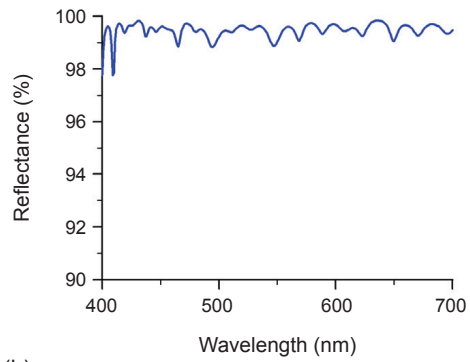


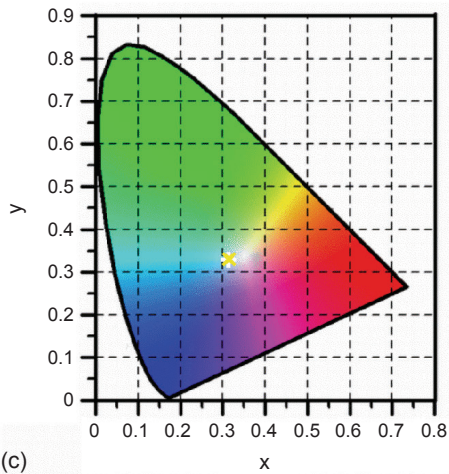
圖 25. 右下方塊為黑膜成品。



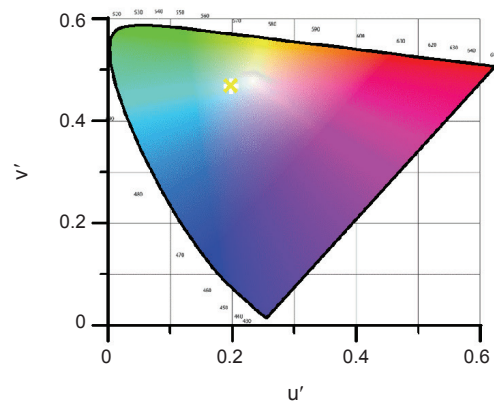
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 26. 冷光鏡之反射率光譜及光源為 D_{65} 時之色度座標，(a) 冷光鏡罩杯，(b) 冷光鏡反射率光譜，(c) CIE 1931 x - y 色度座標，(0.31, 0.47)，(d) CIE 1976 u' - v' 色度座標，(0.20, 0.47)。

中，它也是實驗時必要的光源，所以發展標準的日光光源是很重要的。

LED 已從指示燈逐漸被當作照明光源，但 LED 之窄頻光譜與日光之寬頻光譜差異很大，如何利用 LED 做成標準日光光源是一項重要課題。

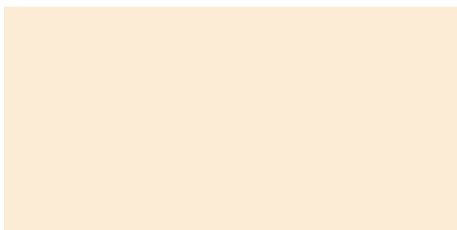


圖 27. 模擬以 A 光源照射圖 26(a) 之冷光鏡時，白膜顏色偏橘黃色。

中央大學光電系⁽²⁸⁻³¹⁾ 利用六種 LED，如表 13 所列，根據表中 LED 的資料庫，經過演算法優化後，設計一固定穿透率的光學濾光片，藉由改變各類 LED 的驅動電流，即可呈現不同色溫 (4,000–10,000 K) 之標準日光光譜，在使用上更加方便以及迅速。色溫 5,000 K、6,500 K 與 7,500 K 之模擬結果，如圖 28 所示。且其色彩特性如如表 14 所列。

根據圖 28 所示，在波長約 440 nm–740 nm 的範圍內，模擬光譜 (紅色實線) 與目標光譜非常近似 (藍色實線)。可知依此作法建立之日光模擬器是可行的。如表 14 所列：其模擬結果在 CIE 1976 u' , v' 色度座標上都與 CIE 標準日光光源接近，色差 $\Delta E_{u',v'}$ 皆在 0.015 以下，屬人眼不可分辨範圍之

LED 型號	顏色	主波長	半高寬
Luxeon™ Emitter LXHL-BW03	Warm White	—	—
BL-B5134N (GaP)	Deep Red	700 nm	90 nm
Luxeon™ Emitter LXHL-PM01	Green	517 nm	33 nm
Luxeon™ Emitter LXHL-PB01	Blue	486 nm	26 nm
Luxeon™ Emitter LXHL-PR03	Royal Blue	455 nm	20 nm
中央大學蔡振羸老師實驗室提供	U-V	415 nm	20 nm

表 13. 日光模擬器使用的 LED 規格。

內。而演色性 (CRI 值，參考前文) 也具有極佳的結果，與標準光源的差距只在 3 個單位內，已高出示藝術品所需的照明標準。

(9) 彩色太陽能電池

太陽電池 (solar cell) 依不同製程會呈現不同顏色，但大多為暗黑或暗藍色，若貼在房屋上並不美觀。這可利用薄膜設計，在不影響太陽電池的轉換效率下，將表面顏色變成不同色系，如圖 29 所示。圖 29(c) 之 CIE 1931 x - y 色度座標：藍 (0.18, 0.14)、綠 (0.28, 0.37)、淺棕 (0.41, 0.33)、深棕 (0.34, 0.31)，而圖 29(d) 之 CIE 1976 u' - v' 色度座標：藍 (0.17, 0.29)、綠 (0.16, 0.48)、淺棕 (0.27

表 14. CIE 標準光源 D_{50} 、 D_{65} 、 D_{75} 日光模擬器的色彩特性。

模擬光源	CIE (u' , v')	$\Delta E_{u'v'}$	色溫	CRI
D_{50}	(0.206, 0.489)	0.00316	5,103	97.27
D_{65}	(0.198, 0.473)	0.00500	6,210	99.1
D_{75}	(0.195, 0.465)	0.00608	6,948	98.74

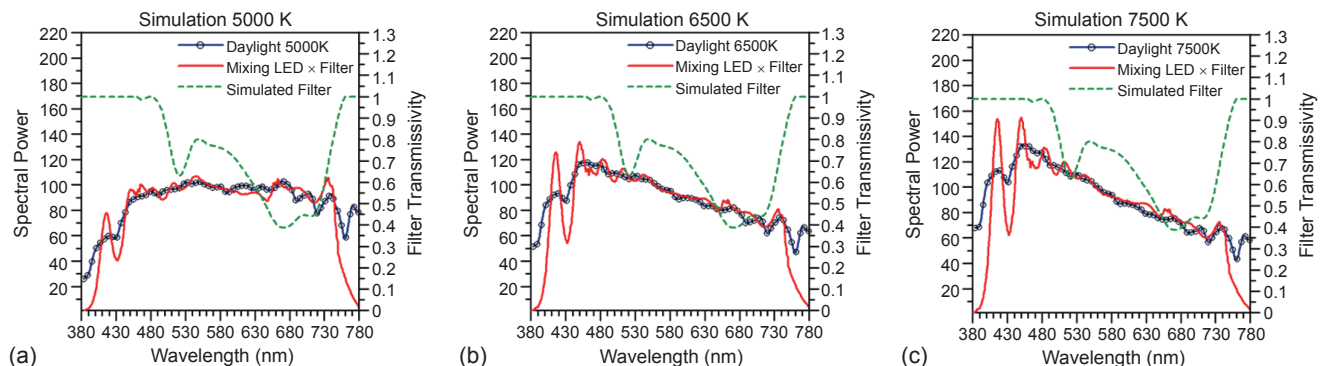


圖 28. 模擬可變色溫之日光模擬器，(a) 5,000 K，(b) 6,500 K，(c) 7,500 K。

0.48)、深棕 (0.23, 0.46) (台灣樂福太陽能公司已有此類產品)。太陽能電池最外所加蓋的強化玻璃或 EVA 保護板外表若做抗反射率處理，則其反射率會比圖 29(a) 更低。

(10) 基板兩邊顏色不同的鍍膜

有時我們希望鍍膜使基板兩邊的顏色不同，原則上只要薄膜有微吸收，則基板兩邊的顏色就會不同⁽¹⁾，例如在玻璃上鍍 TiO_2 膜，膜層中間有一部分具有吸收，即造成一邊為紫色另一邊則為綠色，如圖 30 所示。

(11) 金屬氧化膜

有些金屬日久或加高溫後表面氧化而產生色彩，這如同在金屬上鍍一層透明氧化膜，所以會依氧化膜的厚度不同而呈現不同的顏色，圖 31 就是一個例子。

(12) 奈米結構產生色彩

利用不同的奈米結構與不同的奈米材料可綜合

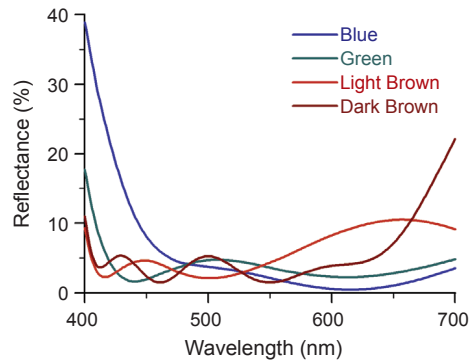


圖 29. 不同顏色之太陽能電池之光譜圖與光源為 D_{65} 時之色度座標，(a) 彩色太陽能電池之反射率光譜，(b) 模擬之不同顏色太陽能電池，依序為藍色、綠色、淺棕色、深棕色，(c) CIE 1931 x - y 色度座標，(d) CIE 1976 u' - v' 色度座標。

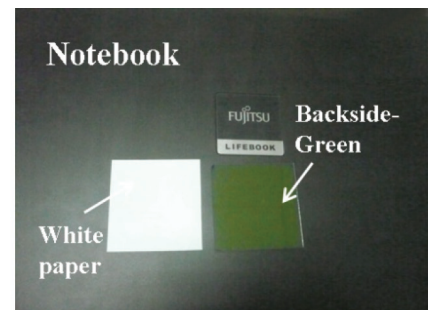
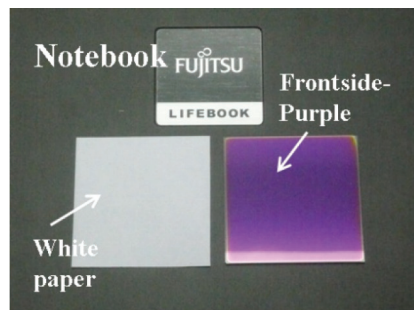
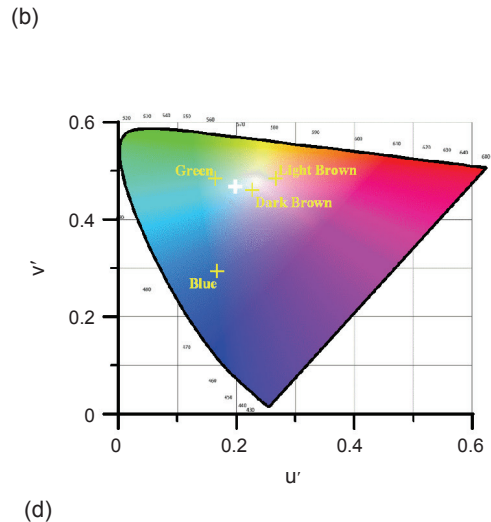
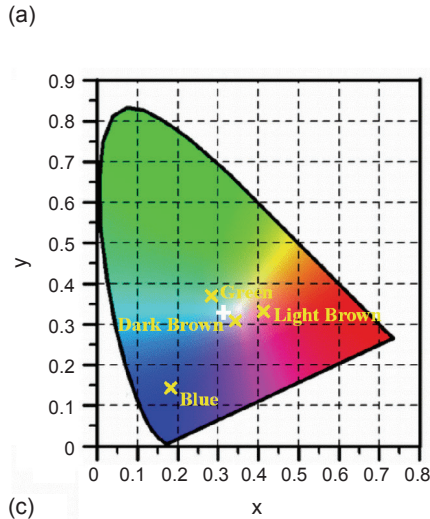


圖 30. 在玻璃上鍍了具有吸收的 TiO_2 膜後，(a) 正面為紫色、(b) 背面為綠色。

干涉與吸收作用而產生各種顏色。例如將鋁合金放在酸性溶液 (如磷酸、草酸、硫酸) 中外加電場做陽極氧化處理 (anodic aluminum oxide, AAO)，以獲得多孔性奈米陣列結構的氧化鋁膜，然後以交流電壓方式沉積金屬 (如鎳、銅等) 奈米層填入在陽極處理後的氧化鋁膜孔洞中，如圖 32 所示，而得到所需的顏色，此即一般所謂的電解著色方法^(30, 31)。隨著各膜層厚度不同干涉條件不一樣因此顏色也有所變，如圖 33 所示。



圖 31. 不鏽鋼在高溫下塑形，表面構成氧化膜而產生色彩。

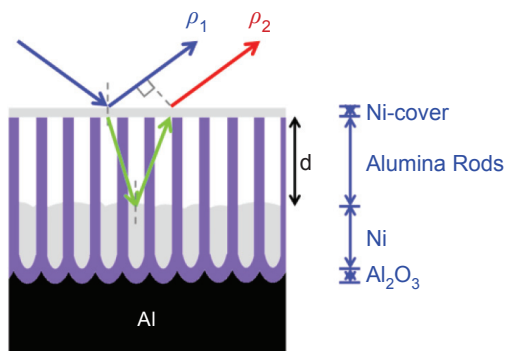


圖 32. 奈米結構膜著色示意圖。



圖 33. 顏色隨 d 變化，由左至右分別為 $d = 270$ nm、 300 nm、 350 nm、 440 nm。

(13) 薄膜與藝術

薄膜具有隨角度不同而呈現各種不一樣鮮豔色彩 (iridescence) 的本質，因此在藝術上應有極大的發展空間，例如圖 34 為一由多層薄膜構成的圖案，圖 35 為參考文獻 1 『薄膜光學與鍍膜技術』該書的封面，也是由多層光學薄膜所構成。

六、結論

在本文我們簡要地介紹色彩如何表示的理論，然後以此計算薄膜的色彩，證明光學薄膜能豐富的展現各式各樣的色彩，包括很黑和很白的薄膜，這些薄膜的色彩除了與薄膜材料及膜層設計有密切關係外，也與光源的光譜特性有關。

色彩的研究不但給了科技工作者一個很大的發揮空間，同時也提供藝術工作者一個科學理論的依據和表達的新方式，期望本文的發表可以使科技與藝術能進一步的結合，使人類更能享有自然原有的美的生活。



圖 34. 由多層薄膜構成的掛畫。



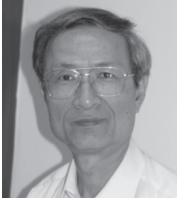
圖 35. 由多層薄膜構成的書的封面。

誌謝

感謝國科會支援本計畫之部分研究 (計畫編號：NSC95-2221-E-008-115-MY3)。

參考文獻

23. G. Eppeldauer J. Schanda, and G. Sauter, CIE Colorimetry: *Understanding the CIE System*, New York: Wiley (2007).
24. 李正中, 科儀新知, **25** (6), 6 (1994).
25. <http://www.sciervis.com/>.
26. <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/第五套橫式新臺幣>.
27. B. Paivanranta, T. Saastamoinen, and M. Kuittinen, *Nanotechnology*, **20** (37), 375301 (2009).
28. T.-H. Yang, C.-C. Lee, S.-F. Liao, and K. Chang, *SPIE Newsroom* 10.1117/2.1200906.1558 (2009).
29. 林維屏, LED- 光源新式應用之研究, 中央大學碩士論文 (2006).
30. 羅美鈴, 可調式自然日光模擬光源之製作, 中央大學碩士論文 (2006).
31. 謝明倫, 薄膜式規則陽極氧化鋁膜製作, 中央大學碩士論文 (2006).



李正中先生為美國亞歷桑那大學光學博士，現任國立中央大學理學院院長及講座教授、中興大學講座教授、中央大學薄膜技術中心主持人、OSA 台灣分會主席、OSA 及 SPIE 中央大學學生分會指導教授、SPIE 及 OSA Fellow。

Cheng-Chung Lee received his Ph.D. in optical sciences from University of Arizona, USA. He is currently Dean of College of Science and a Chair Professor of National Central University, a Chair professor of National Chung-Hsing University and the director of the Thin Film Technology Center of NCU. He is the chairman of OSA Taiwan Section and the advisor of NCU SPIE and OSA Student Chapter. He is the Fellow of SPIE and OSA.



楊宗勳先生為國立交通大學光電工程博士，現任國立中央大學光電科學與工程學系助理教授。

Tsung-Hsun Yang received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an assistant professor in the Department of Optics and Photonics at National Central University.



廖詩芳小姐現為國立中央大學光電系博士候選人。

Shih-Fang Liao is currently a candidate for Ph.D. in the Department of Optics and Photonics at National Central University.