

# 具節能隔熱之透明玻璃窗

謝振榆

謝基生

林志明

林坤賢

國立虎尾科技大學

國立虎尾科技大學

國立虎尾科技大學

國立虎尾科技大學

[reed@nfu.edu.tw](mailto:reed@nfu.edu.tw)

[ccdKent@gmail.com](mailto:ccdKent@gmail.com)

[chih8858@gmail.com](mailto:chih8858@gmail.com)

[p19880328@yahoo.com.tw](mailto:p19880328@yahoo.com.tw)

## 摘要

本論文配合節能減碳提出一種「透明玻璃窗隔熱與通熱的切換方法與裝置」的設計。利用二氧化鈦與二氧化矽，兩種高底不同折射率材料(Material)交替蒸鍍在透明基板上，交叉蒸鍍於隔熱玻璃窗，使室內的溫度不容易因為室外陽光紅外線入射的影響而提高，在隔熱窗上可見光98%能穿透玻璃，而紅外光90%反射，約紅外光10%可以穿透。

**關鍵字：**紅外光、鍍膜技術

## 1、前言

玻璃是重要的建築材料，隨著對建築物裝飾性要求的不斷提高，玻璃在建築行業中的使用量也不斷增大。然而，當今人們在選擇建築物的玻璃門窗時，除了考慮其美學和外觀特徵外，更注重其熱量控制、降溫成本和內部陽光投射舒適平衡等問題。這就使得鍍膜玻璃家族中的新貴(Low-E玻璃)脫穎而出，成為人們關注的焦點。

Low-E玻璃又稱低輻射玻璃，是在玻璃表面鍍上多層金屬或其他化合物組成膜系產品[1]-[3]。其鍍膜層具有對可見光高透過及對中遠紅外線高反射的特性，使其與普通玻璃及傳統的建築用鍍膜玻璃相比，具有以下明顯優勢。

### (1) 優異的熱性能

外門窗玻璃的熱損失是建築物能耗的主要部分，佔建築物能耗的50%以上。有關研究資料表明，玻璃內表面的傳熱以輻射為主，佔58%，這意味著要從改變玻璃的性能來減少熱能的損失，最有效的方法是抑制其內表面

的輻射。普通方法玻璃的輻射率高達0.84，當鍍上一層以銀為基礎的低輻射薄膜後，其輻射率可降至0.1以下。因此，用Low-E玻璃製造建築物門窗，可大大降低因輻射而造成的室內熱能向室外的傳遞，達到理想的節能效果。

室內熱量損失的降低所帶來的另一個顯著效益是環保。寒冷季節，因建築物取暖所造成的CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等有害氣體的排放是重要的污染源。如果使用Low-E玻璃，由於熱損失的降低，可大幅減少因溫升所消耗的燃料，從而減少有害氣體的排放。

### (2) 良好的光學性能

Low-E玻璃對太陽光中可見光有高的透射比，可達80%以上，而反射比則很低，這使其與傳統的鍍膜玻璃相比，光學性能大為改觀。從室外觀看，外觀更透明、清晰，即保證了建築物良好的採光，又避免了以往大面積玻璃幕牆、中空玻璃門窗光反射所造成的光污染現象，營造出更為柔和、舒適的光環境。

Low-E玻璃的上述特性使得其在發達國家獲得了日益廣泛的應用。台灣是一個能源相對匱乏的國家，平均每人能源的佔有量很低，而建築能耗已經佔全國總能耗的27.5%左右。因此，大力開發Low-E玻璃的生產技術並推廣其應用領域，必將帶來顯著的社會效益和經濟效益。

## 2、Low-e 低輻射玻璃之定義與種類

高透明、眩光率低且阻絕輻射熱效果佳的玻璃稱之為低輻射玻璃，即為 Low Emissivity Glass 簡稱 Low-E Glass；換言

之，高眩光率之反射玻璃就是高輻射率玻璃 (High Emissivity Glass)，當前的 Low-E Glass 可分為三大類[4]-[5]：

### 1. 線上鍍膜低輻射玻璃 (Hard Low-E Glass)

可採單片式、膠合式、複層式組合，它可直接高溫強化、烤彎加工，使用上極為方便，唯一缺失就是隔熱效果略遜，較適合用在寒帶地區，目的在於阻絕暖氣的流失，達到保暖作用。

### 2. 離線鍍膜低輻射玻璃 (Soft Low-E Glass)

由於隔熱效果佳，較適合熱帶地區，但因鍍膜金屬層不能耐高溫且不宜長久接觸空氣，造成氧化現象，僅適合製作平面複層玻璃使用。

### 3. 薄膜鍍膜低輻射玻璃 (PET Low-E Glass)

該薄膜亦稱 PET Low-E Film，可應用在單片式、膠合式、複層式的玻璃組合；由於隔熱、抗紫外線與隔音效果極佳，且兼具冬暖夏涼的功效，使用在熱帶地區或寒帶地區皆適宜。

## 3、鍍膜製作原理與方法

### 3.1 鍍膜基礎原理

一般的金屬反射膜的優點是設備工藝簡單，工作波長範圍寬反射帶比較寬；缺點是光損耗大，反射率不可能很高，提高反射率就降低穿透率影響成像品質。更重要的是金屬膜(金、銀、鉻與鋁)對紅外有很高的吸收帶。使鍍有金屬膜的隔熱窗無法(或不容易)通過紅外，鍍有金屬膜的隔熱窗吸收紅外光能很大，因此對紅外線的隔熱效果不佳。鍍膜隔熱窗是由一片透明基板(例如聚碳酸樹脂PC 或玻璃)上鍍有可透過可見光與紅外兩個不同波域的介電質薄膜(dielectric coatings)。其中，可見光波域為一具有高反射與低穿透比的分光區，例如一道100%的入射光到達鍍膜材料後，有90%紅外線反射率自材料反射回去與有10%紅外線穿透。此時稱高

反射與低穿透的分光比為90 比10。大體說，鍍膜的基材與膜材對光的損失(例如吸收)相對很小，尤其對本裝置的成像品質對此光損失給予忽略，簡單計為入射光100%=反射90%+穿透10%，如圖1 所示。

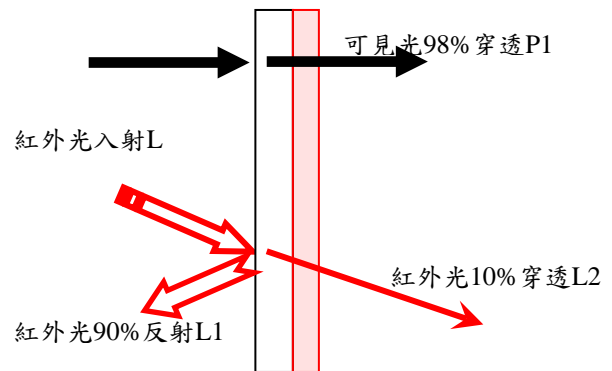


圖 1 入射光反射 90% 穿透 10%

### 3.2 物理蒸鍍

物理蒸鍍示意圖如圖2，利用高能量的電子束轟擊在膜材上轉換成熱能，溫度可高達數千度，而把膜材料蒸發成氣體，穿過真空沈積於上方的玻璃基板上

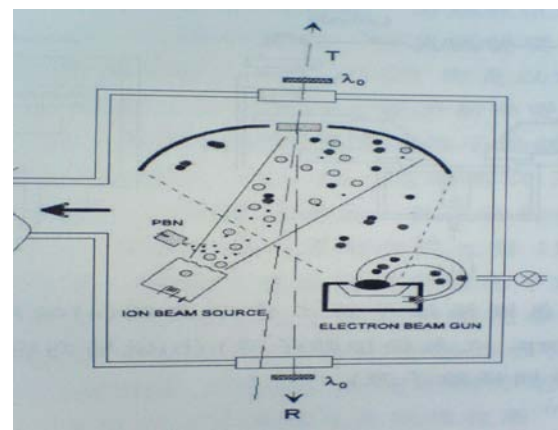


圖 2 物理蒸鍍示意圖

其中，紅外光波域為一具有高透比的透光區，例如對紅外的穿透率為90%以上。鍍膜材料所鍍的介電質薄膜材料為二氧化鈦 (TiO<sub>2</sub>，折射率為2.2)與二氧化矽(SiO<sub>2</sub>，折射率為1.54)，兩種高低不同折射率材料(Material)交替蒸鍍在透明基板上。

鍍膜材料，是將厚度3mm 的聚碳酸樹脂 PC(Polycarbonate)為透明基材，以二氧化鈦 (TiO<sub>2</sub>)與二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)的兩種高低不同折射率材料(Material)將交替蒸鍍在透明基板

上，運用多層鍍膜使得鍍膜材料使紅外光線90%的反射、有10%紅外光線穿透，且對可見光可以有98%的穿透功能，在圖1中，設L為紅外入射，L1 紅外反射，L2 紅外穿透，P1 可見光穿透。

實驗製作了一片鍍膜材料樣品。圖3為光譜圖，主要參數如下；(1)縱座標為穿透率百分比T % (Transmittance %)。(2)橫座標為光譜波長(單位nm)。(a)白光環境。(b)正面入射角(0 度)。(c)參考波長為450 nm。(d)以四分之一波長(quarter-wave-stack multi-layered)模式設計。

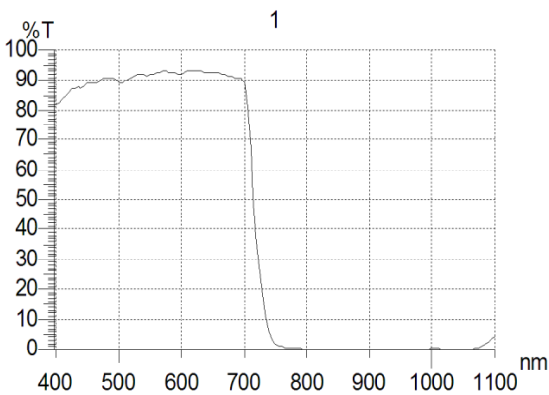


圖 3 鍍膜材料樣品光譜圖

在薄膜光學上，我們很容易由向量法或導納軌跡法在光學級基板上鍍折射率高底交互變化的多層四分之一波長可獲得預期的穿透率 T%。而且理論上也同時可以證明用相同的多膜層數，四分之一波長16倍比非四分之一波膜堆所得到反射率要高。而多膜層數越多則 R% 反射率也越大。也就是說，很容易控制穿透與反射的比例。在目前現有可用的鍍膜材料在可見光區高折射率小於等於2.4 而低折射率大於等於1.35，所以單一的四分之一波長的高反射帶的寬度是有限。

### 3.3 拓寬的方法

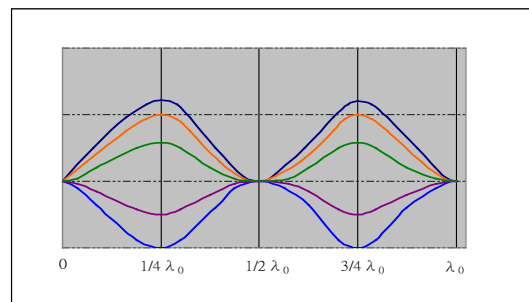
因此，要滿足本論文在可見光區能夠像金屬膜一樣有較寬的反射帶，則必須將全介電質膜高反射帶拓寬。

拓寬的方法，是使膜系之每層濃度有規則的遞增(可依等比級數或等差級數)，如此

可使很寬的區域內的任何波長都有足夠的膜層，其光學濃度也足夠接近四分之一波。不過如此作成之高反射區反射率會有許多下降的波紋，必須用優化法再進行優化之。其他的方法還有將一個中心波長稍短之四分之一波長疊加在另一個四分之一波長上。有關鍍膜的設計基本上可從標準膜系開始著手，例如高反射鏡不管波寬大小或單雙波數，都一律以四分之一波膜堆膜基礎來設計。

初始設計無法滿足需求的光學成效時，就可以利用目前商用設計電腦軟體來優化或合成。有些優化所用的是數學技巧而且不斷的改進中，例如最常用的有簡形優化法(Simplex method)、最小平方調適法(Least-square fit or damped lest squares)及合成法。

由光學薄膜干涉現象可知，當光垂直入射單層膜時且光學厚度Nd(為薄膜折射率與薄膜厚度的乘積)為 $(\lambda_0/2)$ 、 $\lambda_0$ 、 $3\lambda_0/2$ ...膜層對波長的反光強度不變；若光學厚度Nd為 $(\lambda_0/4)$ 、 $(3\lambda_0/4)$ 、 $(5\lambda_0/4)$ ...，反射的率將為極大值或極小值，且其值決定於膜的折射率n 是大於還是小於基板的折射率nS。當 $n > nS$  時，反射率為極大值，當 $n < nS$  時，反射率為極小值。如圖4 所示，一層光學厚度為入射光的波長的1/4 之奇數倍，讓反射波形成破壞性干涉，既可得反射率為0 之抗反射效果。但對其他波長的反射的反射率並非為0，因而為了在可見光範圍可得到寬廣的反射率通常都是多層膜架構，適當選擇膜層的折射率與膜層設計就可得到適當的反射率。





### 3.4 透明基材

種透明基材(Substrate)大約可分為光學級的透明玻璃與透明樹脂兩大類，透明基材首先必須有高透明度，必然表面質量要求嚴格，盡量不要有認何的斑紋、氣孔、泛白、霧暈、黑點、變色、粗糙光澤不佳等缺陷。可見光與紅外在透明基材的透明性，一般同樣是受到「光」的反射、穿透、吸收、與散射等因素影響，在光學級的透明基材中其入射光的散射與吸收現象相對於金屬膜而言幾乎可忽略不計。

在工業用塑膠中透明性好的透明樹脂：PMMA(透明度約93%)、PC(透明度約88%)、PS(透明度約89%)、CR-39(透明度約90%)、SAN樹脂(透明度約90%)，MS 樹脂(透明度約90%)、聚-4 甲基戊烯-(TPX)(透明度約>90%)。另外，像聚丙烯酸甲脂、苯乙烯共聚物(MAS)、PET、PP 以及PVC 等透明度均很好。

反射率公式根據 Fresnel's equations 得知

$$R\% = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1)$$

當光進入透明樹脂時，一部分會在表面反射而損失。反射通常是以光的折射率 $n_1$ 由空氣垂直射入折射率 $n_2$ 的聚合物，所算出的表面反射率 $R\%$ 是以公式(1)表示之。由廠商的資料顯示，透明壓克力(有機玻璃) PMMA (Poly methyl methacrylate) 的折射率是 1.49，算出表面反射率 $R\%$ 約為4%。PMMA 的全透光率約93%，這種光的損失大部份是表面來回二次反射造成的，而吸收和散射等內部的損失則非常小。

當光進入透明樹脂分子後，分子將吸收其他能量而發生旋轉運動，引起光的吸收於是降低了透光性。在光的吸收的同時發生的散射也會就大大降低了透光性，由於透明樹脂內部固有的散射率與折射率 $n$ 乘方成正比，與波長 $\lambda$ 乘方成反比，因此，折射率低的材料散射損失少，在波長較長的可見光領域，散射的影響較小。在波長更長的紅外領域，散

射的影響幾乎小到等於0。PMMA 是屬於一種非結晶性材料(Amorphous)，高分子鏈凌亂排列糾纏，未形成井然有序的排列結構，在凝固的過程中沒有晶核及晶粒生長過程，僅是自由的高分子鏈凍結(frozen)的現象。所以多具高透明外觀。非結晶性塑膠聚合體皆有良好的光透性、其材質的密度性也低，至於，結晶性(Crystalline)聚合體由於球晶和不定形區域的折射率不同，其材質密度較大，透光性較差不適合本論文的紅外攝影成像使用。PMMA壓克力板有良好的加工性，既可採用熱成型(包括模壓、吹塑和真空吸塑)，也可以用機械加工方式車、鑽、切割等。用微電腦控制的機械切割和雕刻不僅使加工精度大大提高，而且還可以製作出傳統加工方式無法完成的圖形與造型。

本論文所採用的鍍膜方式是在真空蒸鍍中，透明玻璃的耐溫約300°C，PC 的耐溫約130°C與PMMA 耐溫約70°C中，以PMMA 的冷處理較具困難(溫度太高會變形，溫度太低則膜層附著力不好)。

### 4、實驗測試結果

圖 5 為節能窗縮小版實驗模型，四面以鍍上材料之玻離以矽膠密合。左邊為鍍上材料之玻離，右邊為無鍍膜之對照組。從左邊圖示可看出紅外線反射部份可以阻擋大部分熱源，而右邊會隨時間溫度上升，以 60 瓦燈泡比對經過 15 分鐘可以相差 10 度左右。圖 6 為節能窗縮小版實驗模型之側面視圖。



圖 5 節能窗模擬示意圖一



圖 6 節能窗模擬示意圖二

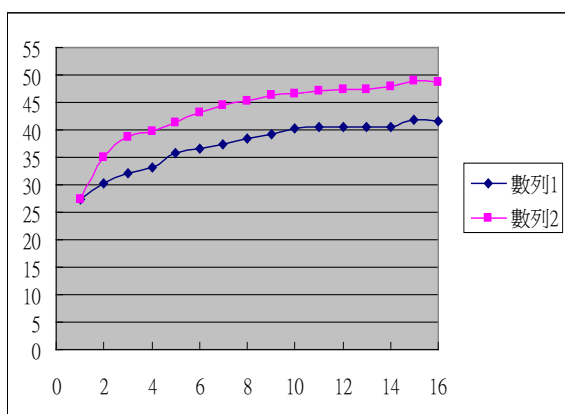


圖 7 模擬 60 瓦燈炮在 16 分鐘之比較圖

圖 7 為燈泡模擬 60 瓦燈炮在 16 分鐘之比較實驗結果數列 1 為鍍有特殊材料之波離，數列 2 為玻璃對照組。實驗結果發現經過 16 分鐘後溫度可以相差 10 度左右。

## 5、結論

目前的隔熱紙或隔熱膜普遍產生了其透光率和隔熱性的互相矛盾，對可見光越欲達到高的透光率，則其隔熱效果越低，尤其對鍍有或有金屬成份者更甚之。本鍍膜技術以二氧化鈦與二氧化矽，兩種高底不同折射率材料(Material)交替蒸鍍在透明基板上，交叉蒸鍍於隔熱玻璃窗，其可見光透光度可高達約 98%，可隔絕 90% 近紅外

光及穿透 10% 之紅外光。

## 致謝

感謝國科會 NSC 98-2622-E-150 -090-CC3 及夜鷹光電科技股份有限公司之協助使本論文得以完成。同時感謝虎尾科技大學 99 年教學卓越計畫的經費贊助讓此作品參加 2010 匹茲堡國際發明展獲得金牌獎，及 2010 台北國際發明展獲得銀牌獎。同時感謝研究生林志明、張君銘之協助使實體製作更具說服力。

## 參考文獻

- [1] D.L. Blackshear, U.S. Patent 3,819,856. (1974)
- [2] G. Behles, U.S. Patent 3,739,703. (1973)
- [3] M. Tovi, U.S. Patent 4,225,811. (1980)
- [4] B. Gompf, J. Beister, T. Brandt, J. Pflaum, and M. Dressel: Optics Letters, Vol. 32, Issue 11 (2007), pp. 1578-1580.
- [5] J.H. Liu, "Investigation of Functional Coatings on PI Substrates for Flexible Display Applications," Graduate Institute of Optoelectronic Engr., National Chung Hsing University, Master Thesis. (2009)