

用於增進溫室蔬果產量之光學窄帶通濾光片開發

Development of optical narrow band pass filter for increasing the yield of vegetables and fruits in Greenhouse

林泓逸、田春林*

Hong-Yi Lin, Chuen-Lin Tien*

*逢甲大學電機工程學系 cltien@fcu.edu.tw

中文摘要

本研究擬開發光學窄帶通濾光片用於增進溫室蔬果產量，此濾光片是以電子鎗蒸鍍 MgF₂ 與 TiO₂ 組成之 14 層中心波長為 660 nm 之紅光窄帶通濾光片，以用於紅色蔬果之溫室栽培成長，製備完成的濾光片以不同儀器檢測光學透射率、xy 色度值及表面粗糙度等特性。在實驗結果中，中心波長之透射率約 87%，半高寬約 33 nm。x 色度座標為 0.7024，y 色度座標為 0.3028，對應顏色為紅色。均方根表面粗糙度為 1.19±0.9 nm 濾光片。實驗結果顯示本研究所開發的窄帶紅光濾光片具有良好的光學特性，可用於溫室栽培之人工光源。

關鍵詞：多層膜、窄帶通濾光片、電子束蒸鍍、溫室栽培

Abstract

In this study, optical narrow band pass filter is used for increasing the yield of vegetables and fruits in Greenhouse. A 14-layer red narrow-band filter composed of MgF₂ and TiO₂ with a central wavelength of 660 nm was prepared by electron beam deposition, which was used for the greenhouse cultivation of red vegetables and fruits. The properties of the optical narrow band-pass filter were quantitatively evaluated by different measurement instruments to find the transmittance, xy chromaticity value and surface roughness. In the experimental results, the transmittance of the central wavelength is about 87%, and the half-maximum width is about 33 nm. The x chromaticity coordinate is 0.7024, the y chromaticity coordinate is 0.3028, and the corresponding color is red. The root-mean-square surface roughness of the proposed filter is

1.19 ± 0.9 nm. The experimental results show that the narrow-band red light filter developed in this research has good characteristics and it could be used as artificial light source for greenhouse cultivation.

Keywords: Multilayers, Narrow Band Pass Filters, Electron Beam Evaporation

一、緣由與目的

由於科技日益發達，全世界人口每年增加約 1 億人。為了要養活更多的人，需要更多農作物與農地，然而不停地在相同的土地上耕種將會使農作物產量降低，這會使可種植糧食的土地減少[1]。溫室栽培可以解決這個問題，因為它每平方米的產量較高，而且用水量也更少[2]。光合有效輻射 (Photosynthetic active radiation, PAR) 有利於蔬菜生長，通常為特定波長之藍光和紅光照射[3]。因此，若增加紅光的量可以提高葉綠素的吸收和光合效率，有效提高溫室栽培蔬菜的生長效率[4]，如圖 1 所示。外部輻照對於植物生長來說是至關重要的，因為它影響光合作用過程，以及溫室內的溫度分佈。輻照光譜的光子能量被葉綠體中的葉綠素分子吸收，將太陽能轉化為化學能。光合有效輻射通常包含了波長在 400 nm 到 700 nm 之光源，所有植物基本上都含有相同的光化學系統，這些光化學系統基於控制葉片光譜吸收的相同色素，換句話說照射與該植物葉片上相同顏色的光將有助於成長[5]。一般植物有兩種類型的葉綠素色素，稱為 A 和 B；第一個是藍色 (波長 430 nm) 和紅色 (660 nm) 光吸收，而葉綠素 B 型使用相似的範圍，吸收峰在 453 和 642 nm 左右[6]。對於紅萵苣、蘋果、番茄、草莓、火龍果等紅色蔬果，以波長 640 nm 至 660 nm 之紅色光的照射均

2022 生態型市民農園學術論文暨成果觀摩研討會
光片作設計，該長波通濾光片為染色玻璃，可有效吸收波長 300 nm 至 610 nm 之透射光，並可減少窄帶通濾光片之設計難度與製備成本，該濾光片之透射光譜如圖 3。可看到若窄帶通濾光片沉積在此長波通濾光片上能夠將波長 300 nm 至 610 nm 之透射光降低至 1% 以下。

有幫助成長的效果[7, 8]。利用窄帶通濾光片 (narrow bandpass filter) 可以使特定波長的光通過而使其他波段的光反射或吸收。窄帶通濾光片是從帶通濾光片中細分出來的，窄帶通濾光片的通帶相對來說比較窄，一般為中心波長值的 5% 以下。窄帶通濾光片可由金屬-介電之多層薄膜結構組成，可吸收某些波段的透射光，然而吸收波段受到薄膜材料特性的限制，較難以精確控制吸收波長的範圍。對於此問題可透過全介電質材料組成的多層膜干涉濾光片作解決，藉由高、低折射率的介電質薄膜來提高特定波段的光反射率，由於反射帶的波長位置與膜層厚度、折射率相關，透過適當的設計可以較輕易地做特定反射帶的濾光片。因此，本研究開發一款窄帶通紅光濾光片，其中心波長針對紅光 660 nm 作膜層設計，再以電子束蒸鍍高、低折射率的介電薄膜材料組成之窄帶通濾光片。

二、研究方法

本研究流程主要分為三部分，首先透過光學薄膜軟體設計一款中心波長為 660 nm 之多層膜窄帶通濾光片，接著以電子鎗蒸鍍製備多層膜窄帶通濾光片，沉積完成後再以不同儀器檢測光學透射率、色度值與表面粗糙度等特性。

2.1 窄帶通濾光片設計

窄帶通濾光片能使僅特定波長範圍的光通過，因能選擇性的使任意波長的光通過，故可從擁有各式波長的光源中提取出特定波長的光。本研究採用 Essential Macleod 光學薄膜設計軟體[9,10]，設計中心波長為 660 nm 之紅光窄帶通濾光片，薄膜材料採用折射率約 1.37 之 MgF_2 與折射率約 2.25 TiO_2 ，設計規格為中心波長處之透射率在 85% 以上，半高寬為 30 nm，波長 550 nm 至 600 nm 的平均透射率低於 5%，波長 720 nm 至 800 nm 的平均透射率低於 5%。初始膜堆為 $HLH(HL)^6 1.38(HL)^2$ ，以中心波長兩側 50 nm 降低其透射率，再經過軟體對膜層優化後可得到 $HL^2(LH)^4 2L(HL)$ 之膜堆，由圖 2 中可看到在波長 720 nm 後之透射率已降低至 1% 以下，已達設計規格。其他方面，

中心波長之透射率為 85.5%，半高寬為 30 nm，雖達設計規格，但波長 300 nm 至 600 nm 的光仍無法被阻隔，為解決此問題本研究將此窄帶通濾光片結合 SCHOTT RG-610 長波通濾



圖 1 植物生長中使用的照明光譜[4]

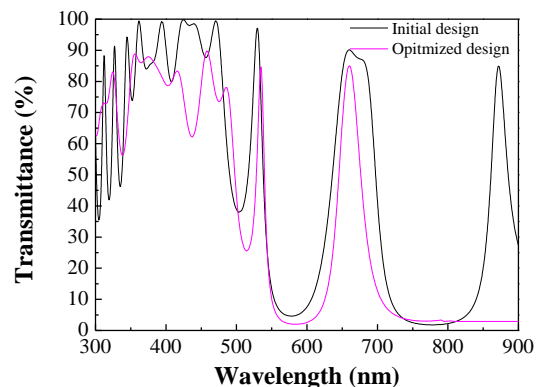


圖 2 窄帶通濾光片之設計光譜

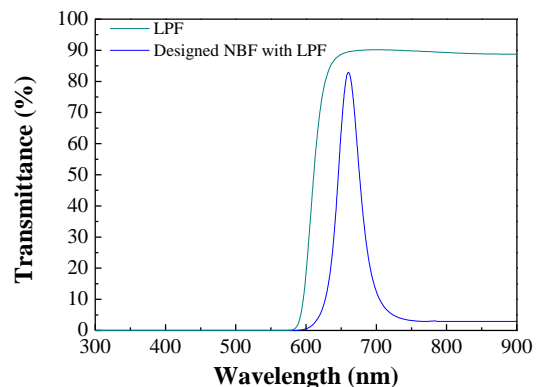


圖 3 長波通濾光片之透射光譜

2022 生態型市民農園學術論文暨成果觀摩研討會

透鏡後，形成一道平行光，藉由分光鏡將光分為兩束強度相等的平行光，一道射至參考鏡面，另一道經由顯微物鏡後，射至待測薄膜樣品表面，當兩道光束分別反射經由分光鏡重合，於成像平面上形成干涉條紋，最後配合 CCD 攝影機干涉圖，再以 MATLAB 程式作分析。程式主要是使用快速傅立葉轉換法搭配 MATLAB 程式，求得表面的高差變化量。其次，以數位高斯濾波器定義訊號截止波長，將高頻粗糙度訊號與低頻表面輪廓分離，最後可重建薄膜 3D 表面輪廓，經由數值分析計算表面粗糙度參數值[11,12]。

三、結果與討論

為了檢視窄帶通濾光片之光學性能是否與設計相符，將製備完成的窄帶通濾光片檢測其透射率，由圖 5 可看到波長 550 nm 至 900 nm 的光譜線與設計相符，而波長 300 nm 至 530 nm 的透射率與設計相差較大，這可能是此波長範圍的薄膜折射率與設計時的薄膜折射率有差異造成。中心波長之透射率約 87%，然而中心波長的位置往短波長偏移約 2 nm，半高寬部分則是增加約 3 nm。由上述結果推測 TiO₂ 薄膜在製程時因溫度升高至 190°C 使薄膜折射率上升所致。波長 750 nm 至 900 nm 之透射率降低至 3% 以下，顯示此濾光片可降低近紅外光的透射光。若將此窄帶通濾光片與 SCHOTT RG-610 長波通濾光片結合，可有效截止短波長之透射光，如圖 6，可將波長 300 nm 至 600 nm 之透射率降低至 0.5% 以下，因此可阻隔大部分可見光波長之透射光[13]。通過色度檢測可直觀得知當光源通過濾光片後其顏色變化，本研究中所測試之光源為 LED 白光光源，其測試結果如圖 7，x 色度座標為 0.7024，y 色度座標為 0.3028，從座標圖看可得知白光通過濾光片後為紅色光，可有效幫助需要紅色光照射的植物生長。薄膜的表面粗糙度與散射損失有密切關係，若表面粗糙度過大會造成通帶之透射率降低，因此本研究透過 Linnik 顯微干涉儀檢測多層膜窄帶通濾光片之表面粗糙度，檢測結果如圖 8，以未鍍膜基板的表面粗糙度量測結果為對照，未鍍膜基板的均方根表面粗糙度為 1.40±1.1 nm，平均粗糙度為 1.19±0.8 nm。在沉積多層膜窄帶通濾光片後其均方根表面粗糙度為 1.19±0.9 nm，平均粗糙度為 1.11±0.8 nm，由實驗結果可看

2.2 濾光片製備

在薄膜製程方面使用日本昭和真空(Showa Shinku)雙電子鎗蒸鍍系統，鍍膜系統照片如圖 4，其設備包含：真空系統由一油迴轉式幫浦(Rotary Pump, RP)、魯式增壓幫浦(Mechanical Booster Pump, MBP)進行粗略抽真空，擴散幫浦(Diffusion Pump, DP)則進行細抽，氦氣冷凍阱(helium cold trap)以空壓機氦氣冷凝的形式捕捉水氣以幫助抽真空速率效能提升，系統真空度最高可達 2.7×10^{-4} Pa。每次的製程真空度設置在高於 1×10^{-3} Pa。製程所需使用的氣體有氬氣(99.999%)及氧氣(99.999%)。電子鎗最大輸出功率為 10 kW，電壓 10 kV，電流 1 A。離子輔助沉積之離子源的陽極電流為 0.5~10A，陽極電壓 80~300V，離子能量 50~200 eV，擴散角 60 度。膜厚監控採用石英監控及光學監控；石英監控的部分使用 5 MHz 石英晶體振盪片；光學監控採用波長範圍 360 nm~1000 nm 之光譜儀並以反射式測量薄膜沉積在基板時反射率的變化，由反射率的極值點作停鍍動作，其中監控玻璃材質為 B270。



圖 4 雙電子鎗結合離子輔助沉積系統

2.3 濾光片特性檢測

光學透射率方面，採用紫外光/可見光光譜儀量測多層膜濾光片之透射光譜，型號為 SHIMADZU UV-2600i。光源為切換式氬燈及鎢絲燈，可測量波長從 300nm 至 900 nm 的薄膜透射率。色度值是以 TES-136 色度計(亮度範圍 0.3~99990 lux)測量 xy 色度座標值，再將 xy 色度值以 MATLAB 軟體繪製在 CIE 1931 之色度座標圖上以對應顏色。

本研究以 Linnik 顯微干涉儀量測薄膜表面粗糙度，使用波長 632.8 nm 之 He-Ne 雷射作為光源，當雷射光入射經空間濾波器與準直

到沉積多層窄帶通濾光片後可降低表面粗糙度，降低散射損失，可維持通帶之透射率。

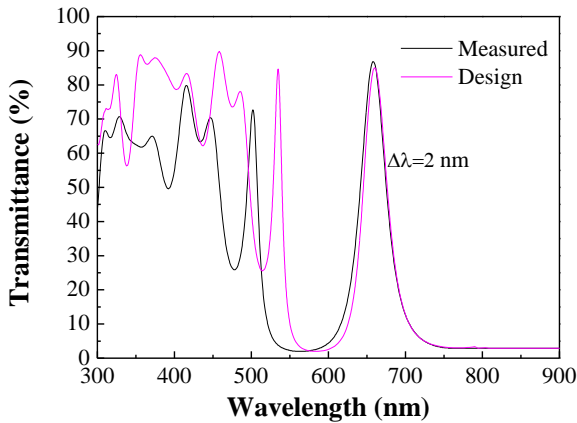


圖 5 實測與設計窄帶通濾光片透射光譜圖

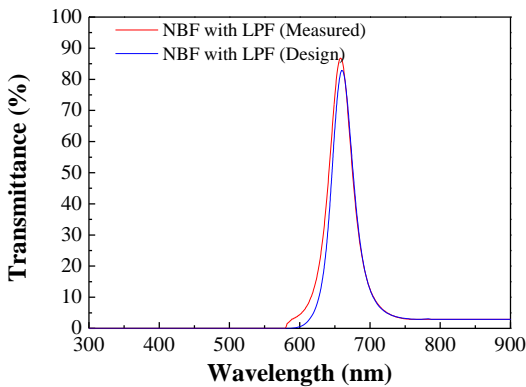


圖 6 窄帶通濾光片結合長波通濾光片透射光譜圖

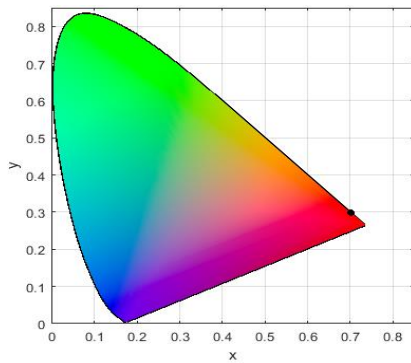


圖 7 窄帶通濾光片結合長波通濾光片後之 CIE 1931 色度圖

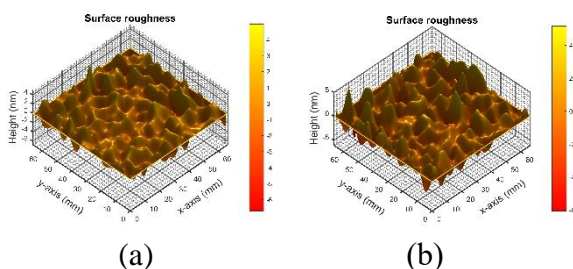


圖 8 窄帶通濾光片之表面粗糙度 (a)未鍍膜基板之表面輪廓 (b)鍍膜後之表面輪廓

四、結論

本研究透過 Essential Macleod 光學薄膜設計軟體設計出一款中心波長為 660 nm 之多層膜窄帶通濾光片，並以雙電子鎗結合離子輔助沉積系統製備濾光片，以不同儀器檢測濾光片的結果中，顯示光學透射率之中心波長透射率為 85%，半高寬為 33 nm 符合設計規格，色度檢測為紅色，表面粗糙度結果顯示玻璃基板在沉積多層膜窄帶光片後均方根粗糙度由 1.40 ± 1.1 nm 降低至 1.19 ± 0.9 nm，除了基板表面改質效果外還可維持通帶之透射率。期望此濾光片可應用於農業紅色蔬果之溫室栽培，並有效提高生長效率。

溫室中入射的陽光不僅用於種植植物，而且當入射的陽光照射到太陽能光伏組件上時還可以有發電的功能[14]。迄今為止報導的大多數光伏溫室的問題在於光伏模組佔用溫室建築圍護結構的區域，從而造成遮蔽植物的問題。未來研究將試圖通過將高透明度光譜選擇性薄膜技術與無機玻璃和先進智慧農業的技術成果相結合來消除這種陰影問題，例如光譜優化的 LED 照明。

致謝

本研究經費來源由科技部專題研究計畫 MOST 110-2221-E-035-061 所提供，特此致謝。

參考文獻

1. A. Gonzalez, R. Rodriguez, S. Bañón, J. A. Franco, J. A. Fernández, A. Salmerón, "Strawberry and cucumber cultivation under fluorescent photoselective films cover," *Acta Horti*, Vol. 614, pp. 407–413 (2003).
2. M. B. Sánchez-Lanuza, A. Menéndez-Velázquez, A. Peñas-Sanjuan, F. J. Navas-Martos, I. Lillo-Bravo, J. M. Delgado-Sánchez, "Advanced Photonic Thin Films for Solar Irradiation Tuneability Oriented to Greenhouse Applications," *Materials*, Vol. 14, No.9, pp. 2357-2372 (2021).
3. S. Moriyuki, H. Fukuda, "High-Throughput Growth Prediction for *Lactuca sativa* L. Seedlings Using Chlorophyll Fluorescence in a Plant Factory with Artificial Lighting," *Frontiers in Plant Science*, Vol. 7, pp. 394-402 (2016).

4. J. A. Thomas, M. Vasiliev, M. Nur-E-Alam and K. Alameh, "Increasing the Yield of *Lactuca sativa*, L. in Glass Greenhouses through Illumination Spectral Filtering and Development of an Optical Thin Film Filter," *Sustainability*, Vol.12, pp. 3740-3757 (2020).
5. M. A. Mickens, E. J. Skoog, L. E. Reese, P. L. Barnwell, L. E. Spencer, G. D. Massa, R.M. Wheeler, "A strategic approach for investigating light recipes for 'Outredgeous' red romaine lettuce using white and monochromatic LEDs," *Life Sciences in Space Research*, Vol. 19, pp. 53-62 (2018).
6. S. Saengtharatip, J. Joshi, G. Zhang, M. Takagaki, T. Kozai, W. Yamori, "Optimal Light Wavelength for a Novel Cultivation System with a Supplemental Upward Lighting in Plant Factory with Artificial Lighting," *Environmental Control in Biology*, Vol. 59, No. 1, pp. 21-27 (2021).
7. J. Joshi, G. Zhang, S. Shen, K. Supaibulwatana, A. K. C. Watanabe, W. Yamori, "A combination of downward lighting and supplemental upward lighting improves plant growth in a closed plant factory with artificial lighting," *HortScience*, Vol. 52, pp. 831-835 (2017).
8. T. Kozai, "Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory," *Proceedings of the Japan Academy, Ser. B, Physical and Biological Sciences*, Vol. 89, pp. 447—461 (2013).
9. H. A. MacLeod, "Thin-Film Optical Filters," Fifth Edition, CRC Press, 2018.
10. Essential Macleod: Optical Coating Design Program, Thin Film Center, Tucson, AZ, 2006.
11. C. L. Tien, K. C. Yu, T. Y. Tsai, C. S. Lin, C. Y. Li, "Measurement of surface roughness of thin films by a hybrid interference microscope with different phase algorithms," *Applied Optics*, Vol. 53, No. 29, pp. H213, 2014.
12. C. L. Tien, T. W. Lin, K. C. Yu, T. Y. Tsai, H. F. Shih, "Evaluation of electrical, mechanical properties, and surface roughness of dc sputtering nickel-iron thin films," *IEEE Transactions on Magnetics* Vol. 50. pp. 1-4 (2014).
13. 李正中, "薄膜光學與鍍膜技術"第九版, 藝軒圖書出版社, 2020.
14. C.J.M. Emmott, J. Rohr, M. Campoy-Quiles, T. Kirchartz, A. Urbina, N. Ekins-Daukes, J. Nelson, "Organic photovoltaic greenhouses: A unique application for semi-transparent PV?" *Energy Environ. Sci.*, Vol. 8, pp.1317–1328 (2015).