

氧化銦錫樹脂/奈米銀粒於低輻射玻璃隔熱性能提升之研究

黃俊杰^{1,*} 王睿馭² 吳書承¹

¹大葉大學電機工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

²雲林科技大學工程科技研究所

640301 雲林縣斗六市大學路三段 123 號

*jjhuang@mail.dyu.edu.tw

摘要

本研究使用氧化銦錫樹脂/奈米銀粒 (AgNPs) 薄膜應用於低輻射 (Low-emissivity, Low-E) 玻璃，其中氧化銦錫樹脂使用的是商用隔熱塗料 (AI-708)，能藉由 AgNPs 提升其熱輻射的反射而增強隔熱效能。研究結果顯示，當 AI-708 薄膜覆蓋於披覆面積 10.6% 的 AgNPs 薄膜所製備之 Low-E 玻璃，具備良好的可見光 ($\lambda=400-800$ nm) 平均穿透率 85.8% 和霧度 6.6%。透過在使用房屋模型置放於太陽模擬器光源之下進行 60 秒量測隔熱效能結果顯示，與沒有 AgNPs 的 AI-708 薄膜相比，AI-708/AgNPs 薄膜能夠使房屋模型的內部溫度由 28°C 降低至 26°C，進一步證明 AgNPs 可有效改善 Low-E 玻璃隔熱之特性。

關鍵詞：奈米銀粒，超音波噴塗技術，Low-E 玻璃，散射，隔熱效能

ITO Resin/AgNPs Thin Film for Thermal Insulation Performance Improvement of Low-Emissivity Glass

JUNG-JIE HUANG^{1*}, JUI-YU WANG² and SHU-CHENG WU¹

¹Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 515006, Taiwan, R. O. C.

²Graduate School of Engineering Science and Technology, Yunlin University of Science and Technology

No. 123, University Road, Section 3, Douliou, Yunlin 640301, Taiwan, R. O. C.

*jjhuang@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

This study examines the result of ITO resin/silver nanoparticle (AgNPs) film applied to low-emissivity (Low-E) glass. ITO resin has been used in commercial thermal insulation coating (AI-708), and it can effectively improve thermal insulation performance by increasing heat radiation reflection through the use of AgNPs. The research results show that when the AI-708 film is coated on 10.6% cover density of AgNPs, it has 85.8% of average visible light transmittance ($\lambda=400-800$ nm) and 6.1% of haze. By measuring the thermal insulation performance of the house model under the solar simulator light source for 60 seconds, the results show that the AI-708/AgNPs film can reduce the

internal temperature of the house model from 28°C to 26°C compared with that of the AI-708 film without AgNPs. Moreover, it further proves that AgNPs can effectively improve the thermal insulation properties of Low-E glass.

Key Words: AgNPs, ultrasonic spray technology, Low-E glass, scattering, thermal insulation, performance

一、前言

隨著科技及工業的發展使得大氣中溫室氣體增加，以至於全球暖化和地球的平均溫度逐年升高，造成了人們對於空調和冰水機等高耗能電器產品的依賴，高耗能也意味著高碳排放量問題，進而導致溫室氣體濃度越來越高而形成惡性循環，因此當前減少碳排放量成為了各國首要的課題。

近年來，低輻射 (Low-E) 玻璃應用在建築物和交通工具的窗戶，以減少內部溫度的增加和提升居住空間舒適度，進而減少碳排放量為當今熱門的研究之一 [7, 11, 13]。Low-E 玻璃的製作方式及隔熱原理主要是將具備隔熱效能的薄膜鍍膜於其玻璃表面，其必須具備反射紅外線和紫外線光波段之熱輻射，以及高可見光($\lambda=400-800\text{ nm}$)穿透率等條件，才能夠在不影響人類視野為目的下提高隔熱性能。

不少研究 Low-E 玻璃上的隔熱薄膜主要是採用溶膠凝膠法 [4, 18]、濺鍍法 [15, 16]和超音波噴塗技術 [3, 17]等方式製備，主要材料有 TiO_2 、 ZnO 和 SnO_2 等金屬氧化物薄膜 [1, 2, 8]。溶膠凝膠法不需要特殊的設備和昂貴的化學藥品，可在低溫下製備溶膠凝膠，但是在使用旋轉塗佈法和浸鍍法的情況下，無法製備出較薄的薄膜，而且薄膜均勻性非常差。濺鍍法所製備的薄膜品質均勻性佳、具有緻密度高和附著性強等優點，但是製備薄膜的環境需要昂貴的高真空設備，使得成本居高不下。超音波噴塗技術是藉由超音波震盪將材料高度細化噴塗於基板表面，具備優良的塗佈均勻性、高材料選擇性及利用率，具有取代現有真空鍍膜技術之可能性。此外，為了同時實現高可見光透射率和紅外線反射率，不少研究會將 Ag 匹配金屬氧化物薄膜製備成多層結構 [10, 12]，但是 Ag 屬於貴金屬和穿透率較低，傳統製程要大面積鍍膜 Ag 於 Low-E 玻璃上需同時具備高穿透率和高隔熱效果不僅成本高昂且製程困難。因此本研究提出了以超音波噴塗技術噴塗不同次數之 AgNPs 於玻璃的表面形成薄膜，製備出高隔熱效能和高可見光穿透率之 Ag 薄膜，並匹配氧化錫錫樹脂之商用隔熱塗料 (AI-708) 作為保護層，量測其光學特性、微結構和隔熱效能，以匹配出最佳穿透率和隔熱效能之 AI-

708/AgNPs 隔熱塗層應用於 Low-E 玻璃。

二、實驗方法

(一) 奈米銀粒合成

先將 0.016987 g 的 AgNO_3 (99.5%, Aldrich)、1.1143 g 的 KOH (99.5%, Aldrich) 和 0.056 g 的 PVP (99.5%, Aldrich) 分別混合於 100 ml 的無水酒精後攪拌 24 小時，將 100 ml 的 AgNO_3 溶液置入 1°C 環境溫度下進行攪拌 30 分鐘，接著加入 100 ml 的 KOH 和 100 ml 的 PVP 溶液 (每 2 分鐘 1 ml 的速度) 之後包覆鋁箔紙避免光的照射，再放置磁石攪拌機轉置 24 小時，攪拌完成後放入冰箱 3°C ~ 5°C 保存。

(二) AI-708/AgNPs 之 Low-E 玻璃製備

首先使用大氣電漿系統將 5 cm × 5 cm × 0.4 cm 玻璃 (Corning, Eagle XG) 表面進行清潔，以增加 AgNPs 在玻璃表面上的附著力。接著使用 28 kHz 頻率的超音波噴頭進行超音波噴塗，並且以 10 s/mm 的噴頭移動速率、3 cc/min 的供料速率、60 Pa 氣壓、噴塗間格 30 秒和 80°C 底板加熱溫度之製程參數，分別進行 0、5、10、15 和 20 次噴塗 30 nm 粒徑和 100 ppm 濃度之 AgNPs 溶液於玻璃表面。再將 AI-708 隔熱塗料使用兩步驟旋轉塗法 (700 rpm 和 1500 rpm) 分別進行 10 秒，塗覆到具有 AgNPs 之玻璃基板上完成隔熱塗層的製備。

(三) 隔熱效能分析方法與設計

本研究以場發射掃描電子顯微鏡 (FE-SEM; JEOL, JSM-7000F) 觀察 AgNPs 薄膜的表面形貌。以表面輪廓儀 (Alpha step; Force, EZSTEP) 量測粗糙度。使用紫外光/可見光分光光譜儀 (UV-Vis; SHIMADZU, UV-1800) 進行穿透率分析。霧度分析儀 (Haze Meter; HMT, L-H100) 量測 AI-708/AgNPs 薄膜在玻璃基板上的霧度。如圖 1 隔熱效能模擬示意圖所示，使用 AAA 太陽模擬器下以光源強度 100 mW/cm² (AM 1.5G) 搭配使用白色聚乳酸 (Polylactic acid, PLA) 所製備之房屋模型，光源距離測試樣品 10 cm 和使用溫度感測分析儀 (DMM; TENMARS, YF-3502T) 量測隔熱效能，其 Low-E

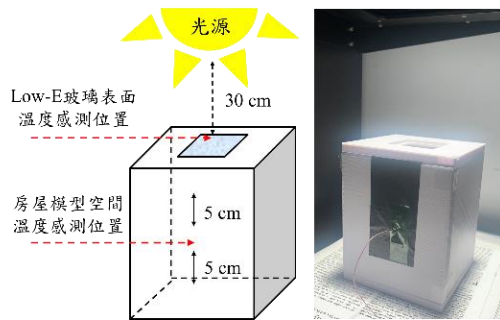


圖 1. 隔熱效能模擬示意圖

玻璃置放於房屋模型上方槽口距離光源 30 cm 進行量測，其量測位置分別為 Low-E 玻璃表面溫度（溫度感測器置放於玻璃表面 2 cm 之上）和房屋模型空間溫度（溫度感測器由房屋模型側面開口進入置放於玻璃之下 5 cm，並將多餘開口處使用隔熱膠帶進行密封）。

三、結果與討論

如圖 2 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜穿透率所示。純玻璃和超音波噴塗次數 0、5、10、15 和 20 次 AgNPs 薄膜平均可見光穿透率分別為 92.3%、91.6%、90.8%、90.1% 和 87.5%，粗糙度 R_q 分別為 0.1 nm、5.1 nm、8.4 nm、13.2 nm 和 27.9 nm，霧度值分別為 0%、2.7%、4.5%、6.1% 和 12.4%，如圖 3 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜粗糙度和霧度值分析。可以觀察到隨著噴塗次數穿透率下降，而粗糙度 R_q 和霧度稍微上升，說明了粗糙度也顯著影響了霧度值，當粗糙度越高霧度值則越大。透過圖 4 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜 SEM 圖可以觀察到，當噴塗次數為 5、10 和 15 次時，其 AgNPs 披覆面積分別為 5.2%、7.8%、10.6%，而當次數到達 20 次時 AgNPs 產生了團聚的現象，披覆面積顯著上升至 18.2%，使得 AgNPs 較為粗糙而表現出較高的霧度和較低的穿透率。圖 5 為不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜披覆面積。

圖 6 為不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜隔熱效能分析 (a) 玻璃表面溫度和 (b) 房屋模型空間溫度分析。由圖 6 (a) 可以觀察到 AgNPs 噴塗次數 5、10、15 和 20 次的玻璃表面，在太陽能模擬器照射 60 秒後溫度分別上升至 32°C、34°C、37°C 和 38°C，房屋模型空間溫度分別為 29°C、29°C、28°C 和 27°C，而 AgNPs 噴塗次數為 0 的純玻璃表面溫度上升 27°C 後則穩定持平，房屋模型空間溫度則大幅上

升至 31°C。研究結果顯示，具有 AgNPs 薄膜的玻璃隔熱效能與純玻璃相比，可有效下降 2°C 到 4°C，說明了 AgNPs 能有效反射熱輻射和使穿過玻璃的入射轉變為散射，進而有效減少房屋模型空間溫度。

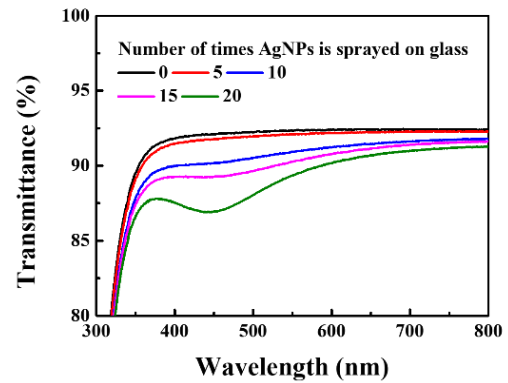


圖 2. 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜穿透率

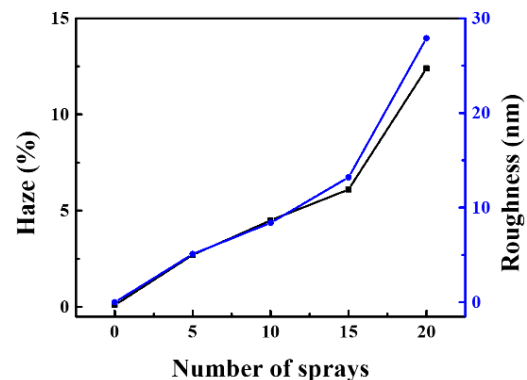


圖 3. 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜粗糙度和霧度值

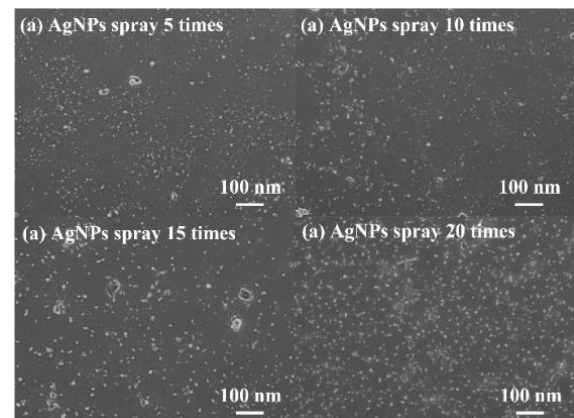


圖 4. 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜表面形貌圖

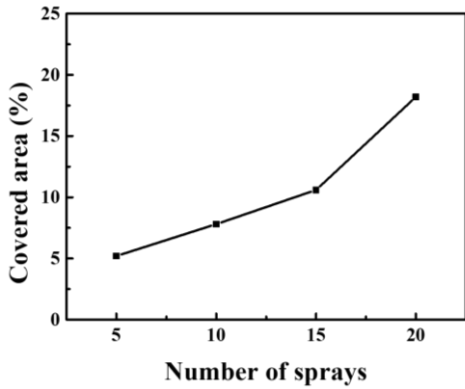


圖 5. 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜披覆面積

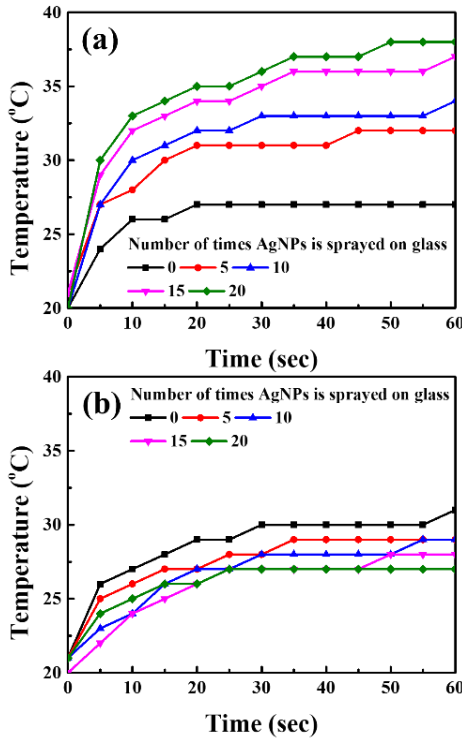


圖 6. 不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜隔熱效能
(a) 玻璃表面溫度和 (b) 房屋模型空間溫度分析

圖 7 為 AI-708 塗料旋塗於不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜之穿透率分析。AI-708 塗佈於 AgNPs 噴塗次數 0、5、10、15 和 20 次所製備之薄膜，其平均可見光穿透率分別為 87.2%、90.1%、86.02%、85.8%和 83.8%，霧度值分別為 0.3%、2.9%、4.9%、6.6%和 12.9%。由於可見光穿透率必須達到 85%以上，Low-E 玻璃才能達到良好的視野效果，因此本研究將以 AgNPs 噴塗次數 15 次匹配 AI-708 塗料作為最佳參數做後續分析。

圖 8 為 AI-708/AgNPs 噴塗 15 次薄膜 (a) 玻璃表面溫

度和 (b) 房屋模型空間溫度隔熱效能分析。如圖 8 (a) 所示，具有 AI-708 塗料的玻璃表面，在太陽能模擬器照射下 60 秒後溫度上升至 30°C，而 AI-708/AgNPs 噴塗次數 15 次的玻璃，具備更高的反射熱輻射能力，其玻璃表面溫度明顯上升至 38°C。使用 AI-708/AgNPs 噴塗次數 15 次的玻璃的房屋模型空間溫度在太陽能模擬器的照射下，當照射時間 40~60 秒時溫度維持穩定 26°C，而使用 AI 708 塗料的玻璃

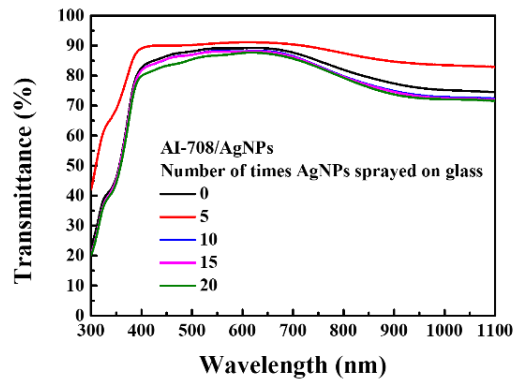


圖 7. AI-708 塗料旋塗於不同超音波噴塗次數所製備之 AgNPs 薄膜之穿透率

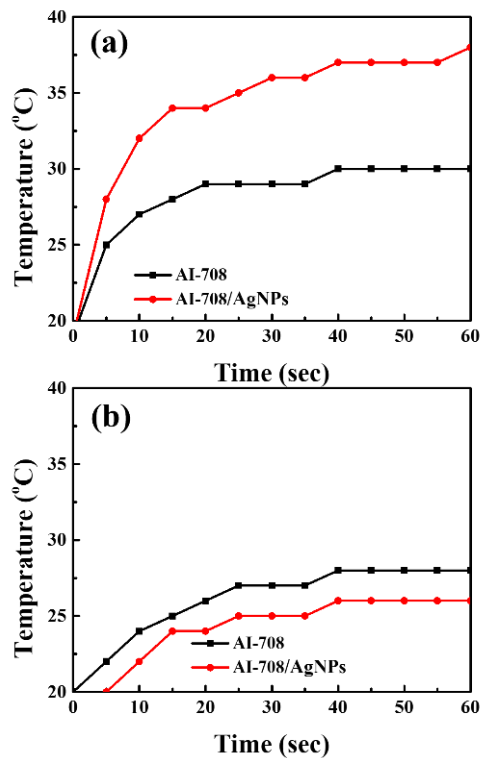


圖 8. AI-708 塗料塗佈於超音波噴塗 15 次所製備之 AgNPs 薄膜隔熱效能 (a) 玻璃表面溫度和 (b) 房屋模型空間溫度分析

其溫度上升至 28°C，相較之下 AI-708/AgNPs 噴塗次數 15 次的玻璃穩定溫度低於 AI-708 塗料玻璃穩定溫度 2°C，如圖 8 (b) 所示。此結果說明了 AgNPs 在進行 AI-708 塗料後，不僅不影響反射熱輻射能力，還具備優良的光散射能力，進而有效減少房屋模型空間溫度。

四、結論

本研究製備之 AI-708/AgNPs 之 Low-E 玻璃，其製程透過超音波噴塗可有效均勻將 AgNPs 鍍膜於玻璃表面，而 AgNPs 噴塗次數的增加能顯著的提升熱輻射的反射和霧度，以提升光的散射和隔熱效能，但是當 AgNPs 噴塗次數過量時，AgNPs 會容易在玻璃上形成團聚，導致穿透率顯著的下降。實驗結果為使用旋塗一層 AI-708 於 AgNPs 進行超音波噴塗 15 次（披覆面積 10.6%）之 Low-E 玻璃，獲得優良的平均可見光穿透率 85.8%和霧度 6.6%，可有效反射熱輻射及增加入射光的散射，能在高可見光穿透率下具備優良的隔熱效能，使用太陽模擬器光源及房屋模型搭配下進行 60 秒隔熱效能分析結果顯示，其表面溫度和房屋模型空間溫度分別為 38°C和 26°C，與和只有 AI-708 塗層之玻璃隔熱效能 30°C和 28°C相比，不僅能大幅提升熱輻射的反射，還能有效減少室內溫度 2°C，說明了 AgNPs 可有效提升 Low-E 玻璃之隔熱特性。本研究所使用玻璃基材在披覆 AI-708/AgNPs 塗層後，其隔熱效能分析之房屋模型空間溫度由 31°C下降至 26°C，能有效降低室內溫度 5°C，和其他相關研究不同材料所製備之 Low-E 玻璃相比，不僅成本低且具備高穿透率和優異的隔熱效能，非常適用於 Low-E 玻璃產業之應用，如表 1 不同製程材料所製備之 Low-E 玻璃效能所示。

參考文獻

- Ando, E., S. Suzuki, N. Aomine, M. Miyazaki and M. Tada (2000) Sputtered silver-based low-emissivity coatings with high moisture durability. *Vacuum*, 59(2), 792-799.
- Ando, E. and M. Miyazaki (2001) Moisture resistance of the low-emissivity coatings with a layer structure of Al-doped ZnO/Ag/Al-doped ZnO. *Thin Solid Films*, 392(2), 289-293.
- Cabrini, A., A. G. Esfahani, A. Petraconi, M. Lavorgna, L. D Nardo, G. G. Buonocore, R. Jorge, E. Andrade and P. Cerruti (2023) Ultrasonic spray deposition of PEGDE-crosslinked chitosan/graphene oxide coatings for enhancing

表 1. 不同製程材料所製備之 Low-E 玻璃效能

| 研究團隊 | 材料 | 隔熱效能 | 穿透率 | 成本 | Ref. |
|----------------|---------------------------------------|--------|-------|----|------|
| Cuce et al. | HISG | 12.7°C | - | 高 | [5] |
| Durrani et al. | TiO ₂ /Ag/TiO ₂ | 8.0°C | ~70% | 高 | [6] |
| Sbar et al. | IGU | 40°C | 8% | 高 | [14] |
| Li et al. | AgNWs-PMMA | 8.0°C | ~80% | 低 | [9] |
| This study | ITO/AgNPs | 5.0°C | 85.8% | 低 | |

gas barrier properties of polybutylene succinate films. *Progress in Organic Coatings*, 183, 107760.

- Chi, F., Y. Zeng and C. Liu (2020) Tuning refractive indices of sol-gel silica coatings by ammonia treatment for broadband antireflection applications. *Optik*, 224, 165501.
- Cuce, E., C. H. Young and S. B. Riffat (2015) Thermal performance investigation of heat insulation solar glass: A comparative experimental study. *Energy and Buildings*, 86, 595-600.
- Durrani, S. M. A., E. E. Khawaja, A. M. Al-Shukri and M. F. Al-Kuhaili (2004) Dielectric/Ag/dielectric coated energy-efficient glass windows for warm climates. *Energy and Buildings*, 36(9), 891-898.
- Jelle, B. P., S. E. Kalnæs and T. Gao (2015) Low-emissivity materials for building applications: a state-of-the-art review and future research perspectives. *Energy and Buildings*, 96, 329-356.
- Kato, K., H. Omoto and A. Takamatsu (2009) Influence of cathode voltage on electrical property and crystal structure of sputter-deposited Ag thin films. *Vacuum*, 84(5), 587-597.
- Li, T., Y. Gao, K. Zheng, Y. Ma, D. Ding and H. Zhang (2019) Achieving better greenhouse effect than glass: visibly transparent and low emissivity metal-polymer hybrid metamaterials. *ES Energy & Environment*, 5, 102-107.
- Martín-Palma, R. J., R. Gago, M. Vinnichenko and J. M. Martínez-Duart (2004) In-depth optical and structural study of silver-based low-emissivity multilayer coatings for energy-saving applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(11), 1554-1557.
- Rezaei, S.D., S. Shannigrahi and S. Ramakrishna (2017) A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26-51.
- Saidur, R., M. M. Hasan, A. S. M. A. Haseeb and H. H.

- Masjuki (2008) Energy-efficient optical coating for flat glass. *Journal of Applied Sciences*, 8(10), 1883-1890.
13. Sbar, N., M. Badding, R. Budziak, K. Cortez, L. Laby, L. Michalski, T. Ngo, S. Schulz and K. Urbanik (1999) Progress toward durable, cost effective electrochromic window glazings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 56(3), 321-341.
14. Sweitzer, G., D. Arasteh and S. Selkowitz (1987) Effects of low-emissivity glazings on energy use patterns in nonresidential daylighted buildings. *ASHRAE Transactions*, 93(1), 1553-1566.
15. Wang, G. H., C.Y. Shi, L. Zhaoa, L. B. Mo, H. W. Diao and W. J. Wanga (2020) Efficiency improvement of the heterojunction solar cell using an antireflection Hf-doped In_2O_3 thin film prepared via glancing angle magnetron sputtering technology. *Optical Materials*, 109, 110323.
16. Wang, Z., N. Yao and X. Hu (2014) Single material TiO_2 double layers antireflection coating with photocatalytic property prepared by magnetron sputtering technique. *Vacuum*, 108, 20-26.
17. Xuan, L., Y. Wang, J. Lan, K. Tao, C. Zhou and D. Mei (2023) Development of cathode ordered membrane electrode assembly based on TiO_2 nanowire array and ultrasonic spraying. *Energy*, 264, 126243.
18. Ye, L., Y. Zhang, X. Zhang, T. Hu, R. Ji, B. Ding and B. Jiang (2013) Sol-gel preparation of $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ broadband antireflective coating for solar cell cover glass. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 111, 160-164.

收件：112.07.14 修正：112.08.03 接受：112.08.31