

Fabrication of WO₃ Nanocomposite Electrode and Investigation of the Optimal Effect of MoS₂ Nanoplates on the Performance of Smart Glass

Parvaneh Sangpour^{1*}, Fariba Tajabadi¹, Arash Khoshbayan²

¹ Associate Professor, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

² Master of Science, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

*Corresponding Author's Email: sangpour@merc.ac.ir (Parvaneh Sangpour)

Paper History:

Received: 2024-06-18

Revised: 2024-07-13

Accepted: 2024-09-14

Keywords:

Smart Glass,
Thin Film,
Nanocomposite,
WO₃,
MoS₂

Abstract In the current research, the electrochromic layer of Tungsten oxide has been applied on the FTO (Fluoride Tin Oxide) conductive glass using an electrochemical method. Then, using in situ hydrothermal method, MoS₂-WO₃ nanocomposite is deposited on the substrate containing Tungsten oxide. By changing the percentage of MoS₂, the optimal effect of molybdenum disulfide concentration on the electrochromic properties of the coated layer was investigated. The nanocomposite thin film containing optimal percentages of Molybdenum disulfide was analyzed and characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), Optical Spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and Amperometry. According to results, the nanocomposite containing 0.025% molybdenum disulfide (WM0.025) was the best response in the electrochemical cell for using as smart glass. The optical results showed that the addition of molybdenum disulfide to tungsten oxide resulted in the colorization of the electrochromic layer, and due to the increase in the diffusion coefficient of lithium ions (from the electrolyte solution), the response time of the electrochromic layer was also improved.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.461735.1301>

URL: https://www.jamt.ir/article_206334.htm

1. INTRODUCTION

Smart materials are materials that change their physical or chemical properties by applying energy and creating excitement in them. These materials act based on the change of the equilibrium state of electrons due to external excitation. If this excitation leads to a change in optical properties such as reflection, absorbance/scattering or transmission, this process is called colorization. This process is a reversible change in the optical properties of a substance that occurs because of oxidation and reduction reactions. This color change occurs between two transparent and colored states or between two colored states. The electrochromic device consists of two transparent electrodes, the electrochromic layer and the electrolyte. The oxidation-reduction reaction by the potential difference created in the two electrodes and the electrolyte between them can cause a change in the electron alignment of the color centers in the electrochromic layer, which results in absorbance. The visible light also changes and the color changing occurs and the system changes from a transparent state to a colored one (Veeramalai et al., 2016).

Various transition metal oxides such as Nickel Oxide, Tungsten Oxide, Copper Oxide can be used as inorganic electrochromic materials. However, tungsten trioxide can be a suitable candidate for electrochromic devices due to its high electrochromic response, good colorization efficiency, and suitable cycle stability. In addition, devices based on Tungsten Oxide show low energy consumption, good memory effect and high contrast ratio (Falola, et al., 2016). One of the ways to improve the

performance of the electrochromic layer is to add an impurity component corresponding to the electrochromic material. In 2012, Huang (Huang et al., 2012) and his colleagues investigated a suitable increase in performance improvement by adding silver nanoparticles to tungsten oxide. Yao (Yao et al., 2012) and his colleagues investigated the addition of carbon nanotubes to tungsten oxide and because of the advantages These nanomaterials had a great effect on the improvement of this layer. In 2014, Lin (Lin et al., 2014) and his colleagues investigated the nickel oxide composite containing lithium and zirconium, the result of which was the improvement of the electrochromic properties of nickel oxide.

In addition, in 2015, Chang (Chang et al., 2014) and his colleagues studied the effect of the growth of tungsten oxide nanowires on graphene oxide plates in an electrochromic device, and the presence of two-dimensional graphene oxide plates has improved the performance of the device during switching and coloring efficiency. Problems such as high cost and long process in making graphene and on the other hand, graphene not being stable at high temperatures have caused other two-dimensional materials to be proposed. For example, using other two-dimensional materials such as molybdenum disulfide helps improving the electrochromic efficiency of layer. Porous molybdenum disulfide has received much attention due to its high surface area ratio and active sites. This amazing material has proven its effectiveness in numerous researches on energy production in fuel cells, biosensors and

Please cite this article as: Sangpour, P., Tajabadi, F. & Khoshbayan, A. (2024) Fabrication of WO₃ Nanocomposite Electrode and Investigation of the Optimal Effect of MoS₂ Nanoplates on the Performance of Smart Glass, *Journal of Advanced Materials and Technologies*, Vol. 13, No. 3, 1-11. [in Persian]: <https://doi.org/10.30501/jamt.2024.461735.1301>.

2783-0829/© 2024 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)



supercapacitors (Falola et al., 2016). In 2020, Mallikarjun (Mallikarjun et al., 2020) used two-dimensional molybdenum disulfide plates to make flexible smart glass and to improve the electrochromic layer of tungsten oxide. The reason is its high electrical conductivity, good mobility, high surface ratio and mechanical properties of this two-dimensional material. Therefore, according to the characteristics of molybdenum disulfide and tungsten trioxide, the choice of nanocomposite of these two materials was considered in this study to increase and improve the performance of smart glass, with an easy and repeatable synthesis method. In the current research, the fabrication of molybdenum disulfide-tungsten trioxide nanocomposite by electrochemical deposition method is reported and its electrochemical properties are investigated. High specific surface area, two-dimensional permeable channels, acceptable conductivity and ability of molybdenum disulfide make the penetration of ions in the electrochromic layer more and charge transfer faster. Therefore, it is expected that the performance of the nanocomposite electrode will improve.

2. MATERIALS AND METHODS

In order to make a thin layer of tungsten oxide in the nanocomposite electrode, the electrochemical layering method was used. First, the tungsten wire precursor was ground to a maximum size of 1 mm, and a thin layer of tungsten oxide was deposited on the transparent conductive layer of FTO as a growth substrate from the powder obtained for 1 gram in hydrogen peroxide. The electrochemical marking layer was done by a potentiostat device with a voltage of -0.7 mV compared to the silver/silver chloride reference electrode for 300 seconds. In order to create a two-dimensional nanometer structure of molybdenum disulfide on the layered electrode, the hydrothermal method was used.

The hydrothermal solution of tungsten trioxide prepared with molybdenum disulfide powder obtained in the previous step was added to the solution with weight percentages of 0.01, 0.025 and 0.05 and it was stirred for 60 minutes at a speed of 700 rpm. The number of three pieces of FTO coated by electrochemical method were placed on the pre-designed Teflon holder and the holder was placed in a 100 ml Teflon container. Finally, the autoclave was subjected to heat treatment in the oven for 24 hours at a temperature of 160°C . The synthesized layer was used as the electrode containing the electrochromic layer in the electrochromic device. To test the performance of the synthesized electrode as a smart glass, first, 0.25 g of lithium perchlorate salt was placed in a vacuum oven for 12 hours at a temperature of 100°C . Then, the dried salt was mixed in 20 ml of propylene carbonate for 3 hours on a magnetic stirrer at 500 rpm and the clear electrolyte obtained was used for injection into the electrochromic cell.

PGSTAT30 model galvanostat potentiostat was used for electrochemical experiments. Cyclic voltammetry (CV) and chronoamperometry (CA) measurements were used to investigate the electrochromic properties. CV measurements were carried out in the potential range of -1 to 1 V and with a scan rate of 50 mv/s with an Eco Chemie PGSTAT30 potentiostat device manufactured by Metrohm. In order to investigate the crystal structure,

morphology and dimensions of nanoparticles and observe optical changes from X-ray diffraction analyzes (XRD), field emission scanning electron microscope (FESEM) and optical test (UV-Vis) from Lambda 25 spectrometer from PekinElmer Company were used. Raman spectroscopy was also performed by Takram P50C0R10 (laser wavelength of 532 nm).

3. RESULTS AND DISCUSSION

By comparing the Cyclic Voltammetry of two samples (Figure 1), it is clear that the density of cathodic and anodic currents is higher in the nanocomposite layer. This means more charge transfer and more Li^+ ion exchange in the tungsten oxide-molybdenum sulfide nanocomposite layer. As expected from the SEM images, the charge transfer at the layer/substrate interface and consequently the Li^+ ion exchange process at the electrolyte/layer interface has increased. Therefore, the level of the CV diagram, which indicates the amount of charge exchanged, is higher in the nanocomposite layer than in the tungsten oxide layer.

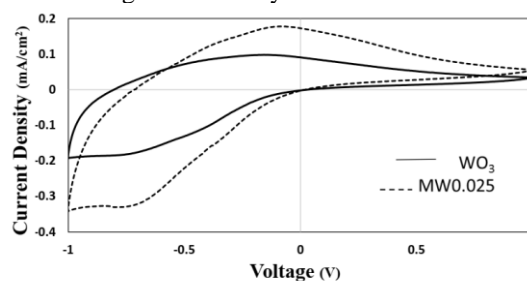


Figure1. Cyclic voltammetry of WO_3 thin film and nanocomposite thin film containing 0.025% MoS_2

Due the obtained results, it can be seen that the nanocomposite layer has a shorter switching time, higher optical modulation and more coloring efficiency, also the presence of tungsten oxide nanoparticles on the MoS_2 nanosheets has caused a high specific surface area for the nanocomposite. On the other hand, MoS_2 can act as an ideal electron acceptor material to receive WO_3 excited electrons and increase the electron transfer rate in the nanocomposite layer. The W_b and W_c graphs correspond to the passage of a thin layer of tungsten oxide in colorless and colored states, respectively. As a result, this layer has a faster electrochromic response. In the process of coloring the nanocomposite layer, the diffusion paths of Li ions to enter/exit from the tungsten oxide network are shorter, which is due to the structure of the network and more contact between the electrode and electrolyte surface.

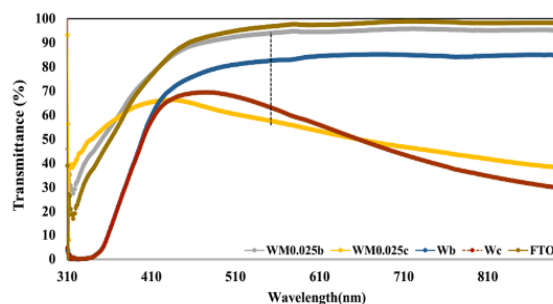


Figure 2. Transmittance for smart glass containing tungsten trioxide layer, nanocomposite containing 0.025% molybdenum disulfide plates and glass containing conductive layer.

4. CONCLUSION

The present research was conducted with the aim of investigating the effect of the presence of molybdenum disulfide on the electrochromic properties of tungsten oxide. For this purpose, WO_3 thin layer and $\text{WO}_3\text{-MoS}_2$ nanocomposite thin layer were prepared by electrochemical deposition method. The results of the research showed that the presence of MoS_2 layer in the interface between the electrochromic layer and the conductive electrode had a significant effect on the properties and performance of the WO_3 electrochromic layer. The comparison of SEM images of the samples showed that the presence of MoS_2 layer changed the morphology of WO_3 nanoparticles compared to the layer without MoS_2 . The WO_3 layer consists of an amorphous background in which nanorod particles are irregularly distributed in its parts. Examining the electrochemical results showed that the presence of the MoS_2 layer in the nanocomposite sample increased the electrochemical activity of the layer compared to the layer without MoS_2 . The diffusion coefficients obtained from the results of the cyclic voltammetry test showed that the presence of molybdenum disulfide plates in the samples increased the diffusion of Li ions in the dye active layer.

In general, the presence of molybdenum disulfide in the interface of the electrode has improved the electrochromic performance of the nanocomposite layer. The reason for this is mainly related to the greater electrochemical activity of this layer and the created porous microstructure, which has increased the diffusion coefficient of penetrating lithium ion and the large specific surface area for charge transfer reactions.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express his gratitude to Materials and Energy Research Center for its support for conducting this research.

REFERENCES

1. Chang, X., Sun, S., Dong, L., Hu, X., & Yin, Y. (2014). Tungsten oxide nanowires grown on graphene oxide sheets as high-performance electrochromic material. *Electrochimica acta*, 129, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.02.065>
2. Falola, B. D., Wiltowski, T., & Suni, I. (2016). Electrodeposition of MoS_2 for charge storage in electrochemical supercapacitors. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(9), D568-D574. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0011610jes>
3. Huang, L. M., Hu, C.W., Liu, H. C., Hsu, C. Y., Chen, C. H., & Ho, K. C. (2012). Photovoltaic electrochromic device for solar cell module and self-powered smart glass applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.03.036>
4. Lin, F., Montano, M., Tian, C., Ji, Y., Nordlund, D., Weng, T. C., & Moore, R. G. (2014). Electrochromic performance of nanocomposite nickel oxide counter electrodes containing lithium and zirconium. *Solar energy materials and solar cells*, 126, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.023>
5. Mallikarjuna, K., Mahesh A. Sh. & Kim H. (2020). Electrochromic smart windows using 2D- MoS_2 nanostructures protected silver nanowire based flexible transparent electrodes. *Materials Science in Semiconductor Processing* 117, 105176. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105176>
6. Veeramalai, C. P., Li, F., Liu, Y., Xu, Z., Guo, T., & Kim, T. (2016). Enhanced field emission properties of molybdenum disulphide few layer nanosheets synthesized by hydrothermal method. *Applied Surface Science*, 389, 1017-1022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.031>
7. Yao, Z., Di, J., Yong, Z., Zhao, Z., & Li, Q. (2012). Aligned coaxial tungsten oxide-carbon nanotube sheet: a flexible and gradient electrochromic film. *Chemical Communications*, 48(66), 8252-8254. <https://doi.org/10.1039/C2CC32925E>



مقاله کامل پژوهشی

ساخت الکتروکود نانوکامپوزیتی WO₃ و بررسی اثر بهینه‌ی نانوصفحات MoS₂ بر کارایی

شیشه‌ی هوشمند

پروانه سنگ‌پور^{۱*}، فریبا تاج‌آبادی^۱، آرش خوش‌بیان^۲^۱ دانشیار، پژوهشکده‌ی فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران^۲ کارشناس ارشد نانو مواد، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸

پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱

کلیدواژه‌ها:

شیشه‌ی هوشمند،

لایه‌ی نازک،

نانوکامپوزیت،

WO₃.MoS₂

چکیده در پژوهش حاضر، لایه‌ی الکتروکرومیک تنگستن اکسید با استفاده از لایه‌نشانی به روش الکتروشیمیایی بر روی شیشه‌ی رسانای (Fluoride Tin Oxide) FTO به‌عنوان لایه‌ی جوانه‌زن لایه‌نشانی شده است. سپس، با استفاده از روش هیدوترمال درجا، نانوکامپوزیت MoS₂-WO₃ بر روی زیرلایه‌ی حاوی تنگستن اکسید قرار گرفته است. با تغییر درصد افزودن MoS₂، اثر بهینه‌ی غلظت دی‌سولفید مولیبدن بر خواص الکتروکرومیک ساختار لایه‌نشانی شده بررسی شد. لایه‌ی نازک نانوکامپوزیت حاوی درصد بهینه‌ی مولیبدن دی‌سولفید به‌کمک آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی، اسپکتروسکوپی نوری، پراش پرتو ایکس، آمپرومتری بررسی و مشخصه‌یابی شدند. با بررسی‌های انجام‌شده، نانوکامپوزیت حاوی ۰/۲۵ وزنی مولیبدن سولفید بهترین پاسخ را در قطعه‌ی الکتروشیمی برای استفاده در شیشه‌ی هوشمند داشته است. نتایج اپتیکی نشان داد که اضافه کردن مولیبدن دی‌سولفید به تنگستن اکسید موجب بازده رنگی شدن لایه‌ی الکتروکرومیک می‌شود و همچنین به‌دلیل افزایش ضریب نفوذ یون لیتیم (از محلول الکترولیت) زمان پاسخ‌دهی لایه‌ی الکتروکرومیک به تغییر ولتاژ نیز بهبود یافته است.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2024.461735.1301>URL: https://www.jamt.ir/article_206334.html

۱- مقدمه

اختلاف پتانسیل ایجادشده در دو الکتروکود و الکترولیت مابین آن دو می‌تواند در لایه‌ی الکتروکرومیک باعث ایجاد تغییر در تراز الکترون‌های مراکز رنگ شود که در نتیجه‌ی آن جذب نور مرئی هم تغییر می‌کند و حالت رنگی شدن اتفاق می‌افتد و سیستم از حالت شفاف به رنگی تغییر می‌کند (Veeramalai et al., 2016). اکسیدهای فلزات واسطه‌ی متعددی مانند نیکل اکسید، تنگستن اکسید و مس اکسید می‌توانند به‌عنوان مواد الکتروکرومیک معدنی استفاده شوند. با این حال، تنگستن تری‌اکسید به‌دلیل پاسخ الکتروکرومیک بالا، راندمان رنگی شدن خوب و چرخه‌ی تکرارپذیری مناسب می‌تواند کاندید مناسبی برای دستگاه‌های الکتروکرومیک باشد. علاوه‌براین، دستگاه‌های مبتنی بر تنگستن اکسید مصرف انرژی کم، اثر حافظه‌ی خوب و نسبت کتراست بالا را از خود نشان می‌دهند (Falola, et al.,

مواد هوشمند موادی هستند که با اعمال انرژی و ایجاد برانگیختگی در آن‌ها خواص فیزیکی یا شیمیایی آن‌ها تغییر می‌کند. این مواد بر اساس تغییر وضعیت تعادلی الکترون‌ها بر اثر محرک خارجی عمل می‌کنند. اگر این تحریک به تغییر خواص نوری مانند بازتابش، جذب/نشر و عبور منجر شود، این فرایند «رنگی شدن» نامیده می‌شود. این فرایند عبارت است از تغییر برگشت‌پذیر خواص نوری یک ماده که بر اثر واکنش‌های اکسیداسیون و احیا رخ می‌دهد. این تغییر رنگ بین دو حالت شفاف و رنگی یا بین دو حالت رنگی اتفاق می‌افتد. دستگاه الکتروکرومیک از دو الکتروکود شفاف، لایه‌ی الکتروکروم و الکترولیت تشکیل شده است. واکنش اکسیداسیون-احیا توسط

عهده‌دار مکاتبات: پروانه سنگ‌پور

نشانی: ایران، البرز، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده‌ی فناوری نانو مواد پیشرفته، تلفن: ۰۲۶۳۶۲۸۰۰۴۰

پیام‌نگار: sangpour@merc.ac.ir

استفاده از این ماده هدایت الکتریکی بالا، تحرک‌پذیری مناسب، نسبت سطح زیاد و خواص مکانیکی این ماده‌ی دوبعدی بود. نتیجه‌ی این بررسی بهبود عملکرد لایه‌ی الکتروکرومیک و جلوگیری از اکسیداسیون یا خوردگی لایه‌ی رسانا اعلام شد (Ma et al., 2023). بنابراین، با توجه به ویژگی‌های مولیبدن دی‌سولفید و تنگستن تری‌اکسید، انتخاب نانوکامپوزیت این دو ماده برای افزایش و بهبود عملکرد شیشه‌ی هوشمند با روش سنتز آسان و تکرارپذیر در این مطالعه مد نظر قرار گرفت. در پژوهش حاضر، ساخت نانوکامپوزیت مولیبدن دی‌سولفید-تنگستن تری‌اکسید به روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی گزارش و خواص الکتروکرومیک آن بررسی می‌شود. سطح ویژه‌ی بالا، کانال‌های نفوذپذیر دوبعدی، رسانش قابل قبول و قابلیت مولیبدن دی‌سولفید نفوذ یون در لایه‌ی الکتروکروم را بیشتر و انتقال بار را سریع‌تر می‌کند. بنابراین، انتظار می‌رود که عملکرد الکتروکروم نانوکامپوزیت بهبود یابد.

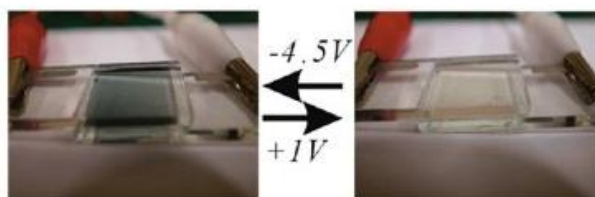
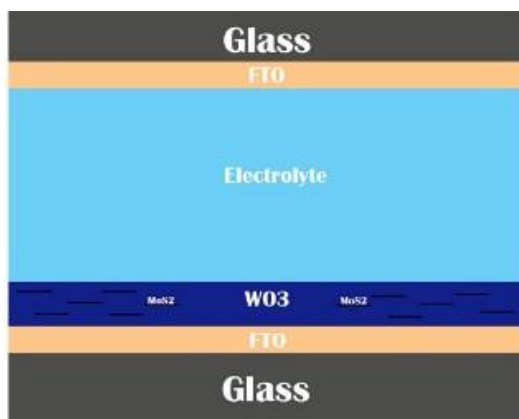
۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

به‌منظور ساخت لایه‌ی نازک تنگستن اکسید در الکتروکروم نانوکامپوزیتی از روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی استفاده شد. ابتدا پیش‌ماده‌ی سیم تنگستن تا اندازه‌ی حداکثر ۱ میلی‌متر آسیاب شد و از پودر به‌دست‌آمده به مقدار ۱ گرم در آب اکسیژنه روی هم‌زن با دمای ۶۰ درجه‌ی سلسیوس و با ۷۰۰ دور در دقیقه حل شد. از محلول طلا‌یی‌رنگ به‌دست‌آمده، لایه‌ی نازکی به‌عنوان بستر رشد از تنگستن اکسید روی زیرلایه‌ی رسانای شفاف FTO به روش الکتروشیمیایی لایه‌نشانی شد. لایه‌نشانی الکتروشیمیایی توسط دستگاه پتانسیواستات و با ولتاژ ۰/۷- میلی‌ولت نسبت به الکتروکروم مرجع نقره/نقره‌ی کلرید به‌مدت ۳۰۰ ثانیه انجام شده است. پس از لایه‌نشانی، تنگستن اکسید روی الکتروکروم، به‌منظور تثبیت لایه و خروج مواد اضافی و، از طرفی، یکنواختی بیشتر روی سطح کار، به‌مدت ۳ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه‌ی سلسیوس، داخل آون تحت حرارت قرار گرفتند. به‌منظور ایجاد ساختار نانومتری دوبعدی مولیبدن دی‌سولفید بر روی الکتروکروم لایه‌نشانی‌شده، از روش هیدروترمال استفاده شد. بنابراین، ابتدا ۶۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه همراه با ۰/۳ گرم از سدیم مولیبدات و به همراه ۰/۷۵ گرم از تیوره روی هم‌زن مغناطیسی

(2016). یکی از راه‌های بهبود عملکرد لایه‌ی الکتروکرومیک افزودن جزء ناخالصی متناسب با ماده‌ی الکتروکرومیک است. در این مسیر، هوانگ و همکاران (Huang et al., 2012)، با اضافه کردن نانوذرات نقره به تنگستن اکسید، افزایش مناسبی از بهبود عملکرد را بررسی کردند و در همان سال یائو و همکاران (Yao et al., 2012) به بررسی اضافه کردن نانوتیوب‌های کربنی به تنگستن اکسید پرداختند. بر اثر محاسن این نانومواد تأثیر زیادی در بهبود این لایه رخ داد. لین و همکاران (Lin et al., 2014) به بررسی کامپوزیت نیکل اکسید حاوی لیتیم و زیرکونیم پرداختند که نتیجه‌ی آن بهبود خواص الکتروکرومیک اکسید نیکل بود. پانزوئلا و همکاران، در ۲۰۱۵، تأثیر حضور لایه‌ی اکسید گرافن بر زیرلایه‌ی شفاف رسانا را بررسی کردند. نتایج امیدوارکننده‌ای از حضور این صفحات دوبعدی حاصل شد که برای مثال، در ولتاژهای اعمالی یکسان، کنتراست اپتیکی بالاتری در الکتروکرومیک حاوی این لایه در مقایسه با الکتروکروم بدون حضور این لایه مشاهده شد. همچنین، چانگ و همکاران (Chang et al., 2014) تأثیر رشد نانوسیم‌های تنگستن اکسید بر صفحات گرافن اکسید را در دستگاه الکتروکرومیک مطالعه کردند که حضور صفحات دوبعدی گرافن اکسید باعث بهبود عملکرد دستگاه در زمان سویچینگ و بازده رنگی شدن شده است. مشکلاتی نظیر هزینه‌ی بالا و فرایند طولانی در ساخت گرافن و از طرفی پایدار نبودن گرافن در دماهای بالا باعث شده مواد دوبعدی دیگری مطرح شوند. برای مثال، با بررسی مواد دوبعدی دیگری نظیر مولیبدن دی‌سولفید و استفاده‌ی آن به‌عنوان ناخالصی اضافه‌شده به لایه می‌توان به بهبود لایه‌ی الکتروکرومیک کمک کرد (Mallikarjun et al., 2020). مولیبدن دی‌سولفید متخلخل با توجه به نسبت سطح زیاد و مکان‌های فعال بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این ماده‌ی شگفت‌انگیز کارآیی خود را در تحقیقات بی‌شمار درباره‌ی تولید انرژی در سلول‌های سوختی، حسگرهای زیستی و ابرخازن‌ها اثبات کرده است (Falola et al., 2016). راکیبودین و همکاران (Rakibuddin et al., 2017) برای ساخت شیشه‌ی هوشمند انعطاف‌پذیر و به‌منظور بهبود لایه‌ی الکتروکرومیک تنگستن اکسید و بهبود خواص الکتریکی لایه‌ی رسانای نانوسیم‌های نقره از صفحات دوبعدی دی‌سولفید مولیبدن استفاده کردند. دلیل

محلول اضافه شد و به مدت ۶۰ دقیقه با سرعت ۷۰۰ دور در دقیقه هم‌زده شد. تعداد سه قطعه از FTO‌های لایه‌نشانی شده به روش الکتروشیمیایی روی نگهدارنده‌ای از جنس تفلون، که از قبل طراحی شده، قرار گرفت و نگهدارنده درون یک تفلون ۱۰۰ میلی‌لیتر قرار گرفت. در نهایت، اتوکلاو به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۱۶۰ درجه‌ی سلسیوس درون آن تحت عملیات حرارتی قرار داده شد. الکتروکود لایه‌نشانی شده شست‌وشو و به‌عنوان الکتروکود حاوی لایه‌ی الکتروکرومیک در ساخت دستگاه الکتروکرومیک استفاده شد. برای تست کارایی عملکرد الکتروکود سنتز شده به‌عنوان شیشه‌ی هوشمند، ابتدا مقدار ۰/۲۵ گرم از نمک لیتیم پرکلرات به مدت ۱۲ ساعت تحت خلأ و دمای ۱۰۰ درجه‌ی سلسیوس درون آن خلأ گذاشته شد تا خشک شود. سپس، نمک خشک شده در ۲۰ میلی‌لیتر پروپیلن کربنات به مدت ۳ ساعت روی هم‌زن مغناطیس با ۵۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد و الکترولیت شفاف به‌دست‌آمده برای تزریق به سل الکتروکرومیک استفاده شد. ابتدا الکتروکود مقابل با الکل شست‌وشو شد و الکتروکود لایه‌نشانی شده آماده‌سازی شد و واشر لاستیکی بین دو الکتروکود قرار داده شد، الکترولیت تزریق و دستگاه آب‌بندی شد. شکل ۱ مراحل ساخت لایه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱. چیدمان سل و قطعه‌ی ساخته‌شده برای تست عملکرد شیشه‌ی هوشمند

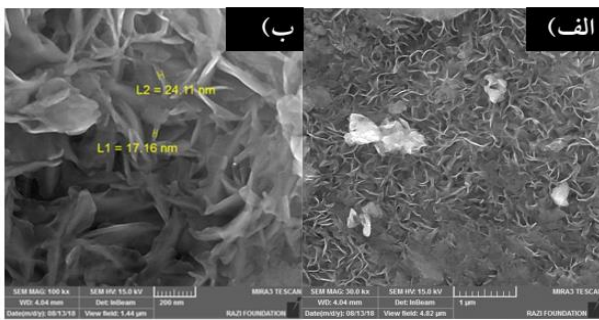
مقابل به کار برده شد. برای بررسی خواص الکتروکرومیک از اندازه‌گیری‌های ولتاژمتری چرخه‌ای (CV) و کروماتوگرافی (CA) استفاده شد. اندازه‌گیری‌های CV در محدوده‌ی پتانسیل ۱- تا ۱ ولت و با نرخ روبش ۵۰ mv/s با دستگاه پتانسیواستات Metrohm PGSTAT30 ساخت شرکت Eco Chemie انجام شد. برای بررسی ساختار بلوری، ریخت‌شناسی و ابعاد نانوذرات و مشاهده‌ی تغییرات اپتیکی از آنالیزهای پراش پرتو ایکس

با ۶۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد. پس از ۳۰ دقیقه، محلول به‌دست‌آمده به تفلون هفتاد میلی‌لیتر منتقل و درون اتوکلاو قرار داده شد. اتوکلاو به مدت ۲۶ ساعت در دمای ۲۱۰ درجه‌ی سلسیوس برای سنتز نانوصفات مولیبدن دی‌سولفید درون آن قرار داده شد. پس از زمان مورد نظر، تفلون حاوی محلولی شفاف از پودر سیاه‌رنگ مولیبدن دی‌سولفید است. محلول سه مرتبه با آب و اتانول، هر بار به مدت ۳ دقیقه و با ۴۰۰۰ دور در دقیقه، شست‌وشو داده شد و به مدت ۳ ساعت و دمای ۹۰ درجه‌ی سلسیوس خشک شد. پودر به‌دست‌آمده صفحات دوبعدی مولیبدن دی‌سولفید است.

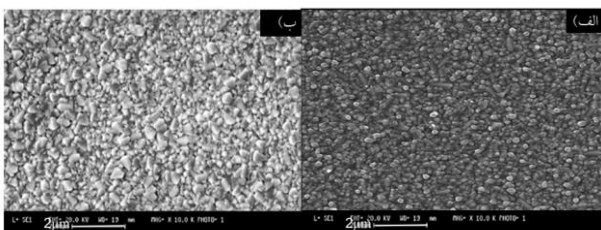
مقدار ۴ گرم از پودر سدیم تنگستات به ۲۵۰ میلی‌لیتر آب اضافه شد و، پس از ۴۵ دقیقه تا رسیدن به محلول شفاف، ۱۰ میلی‌لیتر از اسید نیتریک ۳ مولار قطره‌قطره به بشر اضافه شد تا رنگ محلول به طلایی روشن تغییر کند و، بعد از تغییر رنگ، هم‌زدن به مدت ۱۰ دقیقه ادامه یافت. سپس، ۵ گرم از پودر سدیم سولفات به بشر اضافه شد و در مرحله‌ی آخر به مقدار ۲۰ میلی‌لیتر از اگزالیک اسید ۰/۳ مولار به محلول اضافه شد و به مدت ۲۰ دقیقه دیگر هم‌زده شد. محلول هیدروترمال تنگستن تری‌اکسید آماده‌شده با پودر مولیبدن دی‌سولفید به‌دست‌آمده در مرحله‌ی قبل با درصد‌های وزنی ۰/۰۱ یا ۰/۰۲۵ یا ۰/۰۵ به

۲-۲- مشخصه‌یابی

به‌منظور بررسی آزمایش‌های الکتروشیمیایی از دستگاه پتانسیواستات گالوانواستات مدل PGSTAT30 استفاده شد. لایه‌های نازک در سلول الکتروشیمیایی سه‌الکترودی و در الکترولیت‌های ۰/۱ مولار محلول پرکلرات لیتیم در پروپیلن کربنات (LiClO₄ - PC) بررسی شدند. الکتروکود Ag/AgCl الکتروکود مرجع و یک الکتروکود FTO بدون پوشش به‌عنوان الکتروکود



شکل ۳. تصویر SEM از نانوساختار مولیبدن دی‌سولفید با میانگین طول ۳ میکرومتر (الف) مقیاس ۱ میکرون و (ب) مقیاس ۲۰۰ نانومتر در شکل ۴ الف، ریخت‌شناسی لایه‌ی نازک تنگستن تری‌اکسید، که به روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی از الکترولیت پودر حاصل از سیم تنگستن به مدت ۳۰۰ ثانیه انجام شده است، قابل مشاهده است. قطر این ذرات به طور میانگین ۵۰ نانومتر است و در شکل ۴ ب ریخت‌شناسی الکترونی حاوی نانوکامپوزیت تنگستن تری‌اکسید با ۰/۱ درصد وزنی از صفحات مولیبدن دی‌سولفید قابل مشاهده است. با مقایسه‌ی این دو تصویر می‌توان دریافت که لایه‌ی نانوکامپوزیتی با ۰/۱ درصد وزنی از صفحات مولیبدن دی‌سولفید به روش هیدروترمال همانند لایه‌ی بستر به صورت کلوخه‌ای رشد کرده است و، به دلیل درصد کم افزودنی در این نانوکامپوزیت، صفحات مولیبدن دی‌سولفید در سطح قابل مشاهده نیستند، ولی اندازه‌ی ذرات در این سطح کمی بزرگ‌تر و در نتیجه سطح آن متخلخل است.



شکل ۴. الف) تصویر SEM لایه‌ی نازک تنگستن اکسید

لایه‌نشانی شده به روش الکتروشیمیایی به مدت ۳۰۰ ثانیه و (ب)

تصویر SEM از نانوکامپوزیت تنگستن تری‌اکسید ۰/۱ درصد

وزنی از مولیبدن دی‌سولفید

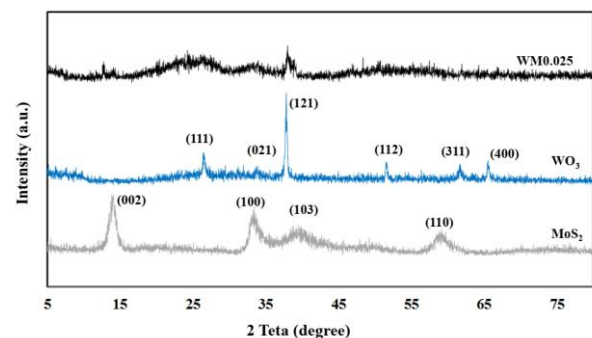
در شکل ۵ الف، تصویری از سطح الکترونی پوشیده شده با ساختار نانوکامپوزیت ۰/۰۵ درصد وزنی از مولیبدن دی‌سولفید قابل مشاهده است. این سطح از ذرات تنگستن تری‌اکسید و نانورادهای تازه تشکیل شده به وجود آمده است. بر اساس این تصویر، با افزایش درصد نانوصفحات به کامپوزیت، شرایط برای

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و آزمون نوری (UV-Vis) از طیف‌سنجی Lambda 25 از شرکت PekinElmer استفاده شد. طیف‌سنجی رامان نیز توسط Takram P50C0R10 با طول موج لیزر ۵۳۲ نانومتر انجام شد.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی خلوص و فازهای تشکیل‌شده‌ی مواد سنتز شده از آزمون XRD استفاده شده است. در مطالعات گذشته اثبات شده است که نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید در $13/6 = 2\theta$ و $2\theta = 33/5$ و $2\theta = 37/9$ و $2\theta = 59$ دارای پیک هستند (Veeramalai et al., 2016). با توجه به پیک‌هایی که در نمودار شکل ۱ از آنالیز پودر سنتز شده‌ی مولیبدن دی‌سولفید به دست آمده، می‌توان حضور نانوصفحات دوبعدی مولیبدن دی‌سولفید را اثبات کرد.

همچنین، طیف لایه‌ی نازک نانوکامپوزیت با درصد وزنی ۰/۰۲۵ از مولیبدن دی‌سولفید در شکل ۲ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده نانوکامپوزیت حاصل شده بدون ناخالصی است و پیک‌های حضور اکسید تنگستن و نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید تأیید می‌شود. کاهش شدت فازها در طیف نانوکامپوزیت به دلیل تهیه‌ی طیف از لایه‌ی نازک نانوکامپوزیتی است.



شکل ۲. طیف پراش ایکس از پودر سنتز شده صفحات مولیبدن

دی‌سولفید، تری‌اکسید تنگستن و لایه‌ی نازک نانوکامپوزیت

تری‌اکسید تنگستن حاوی ۰/۰۲۵ درصد وزنی از مولیبدن دی‌سولفید در شکل ۳، ریخت‌شناسی رشد نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید به روش هیدروترمال نشان داده شده است. قطر این صفحات تقریباً بین ۲۰ تا ۳۰ نانومتر و طول آن‌ها به صورت میانگین ۳ میکرومتر است. این صفحات با طول بلند به منظور بهبود خواص جذب یون و بهبود عملکرد لایه‌ی الکتروکروم مناسب است.

تقریباً یکسان است. فرایند رنگی شدن WO_3 فرایندی کاتدی است؛ یعنی با اعمال پتانسیل منفی به لایه و ورود الکترون‌ها به لایه‌ی یون‌های W^{6+} به W^{5+} احیا می‌شود و با ورود هم‌زمان یون‌های Li^+ به شبکه‌ی WO_3 رنگی شدن اتفاق می‌افتد. بی‌رنگ شدن لایه در حین پوشش مثبت پتانسیل و در فرایندی معکوس بر اثر اکسیداسیون یون W^{5+} و خروج یون Li^+ از شبکه رخ می‌دهد.

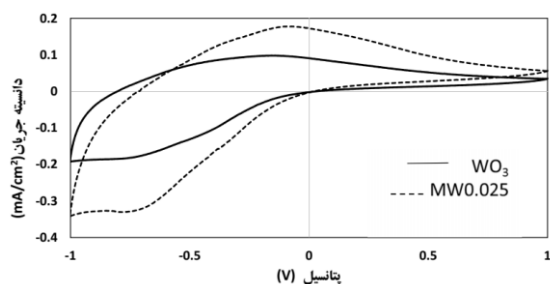
در یک ولتاموگرام چرخه‌ای، مقدار بار انتقال یافته بر واحد زمان، یعنی جریان الکتریکی، به‌عنوان تابعی از پتانسیل الکتروود کار، که لایه‌ی نازک تنگستن اکسید است، تحلیل می‌شود. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که به‌طور کلی نتیجه‌ی افزوده شدن نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید به الکتروود لایه‌ی نازک تنگستن اکسید باعث افزایش سطح منحنی CV و افزایش جریان‌های پیک کاتدی و آندی و انتقال پیک اکسیداسیون به پتانسیل مثبت‌تر شده است.

جریان سل به دلیل نرخ ثابت بار Q به پتانسیل E یا نرخ پوشش $v = dE/dt [V \cdot s^{-1}]$ ثابت مستقیماً متناسب با ظرفیت افتراقی

در حین تست CV است:

$$I = dQ/dt = v \cdot dQ/dE \quad (1)$$

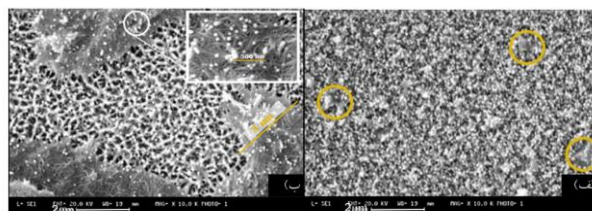
از این رو، سطح کلی نمودار CV معیاری از بار وارد شده به لایه است. سطح بزرگ‌تر CV نشان‌دهنده‌ی تبادل یونی و الکترونی بیشتر در لایه‌ی نانوکامپوزیت تنگستن اکسید-مولیبدن دی‌سولفید است و در نتیجه فعالیت الکتروشیمیایی بهتر آن است (Cai et al., 2012).



شکل ۶. ولتامتری چرخه‌ای

با مقایسه‌ی ولتامتری چرخه‌ای دو نمونه (شکل ۵) مشخص شد که دانسیته‌ی جریان‌های کاتدی و آندی در لایه‌ی نانوکامپوزیت بیشتر است که انتقال بار بیشتر و مبادله‌ی یون Li^+ بیشتر در لایه‌ی نانوکامپوزیت تنگستن اکسید-مولیبدن دی‌سولفید را نشان می‌دهد (Hasan et al., 2019). همان‌طور که از تصاویر SEM انتظار می‌رفت، انتقال بار در فصل مشترک لایه/زیرلایه و

تشکیل و رشد نانورداها به وجود آمده است. با این حال، در این درصد از کامپوزیت نیز، نانوصفحات در سطح لایه به‌وضوح قابل دیدن نیستند، ولی می‌توان اثر از حضور این صفحات را در قسمت‌های زیادی از تصویر مشاهده کرد که چند عدد از آن نشانه‌گذاری شده است. در شکل ۴ب، (نانوکامپوزیت حاوی مولیبدن دی‌سولفید ۰/۲۵) تشکیل شبکه‌ای از نانوپوسته‌های اکسید تنگستن روی بستر قبلی قابل مشاهده است که قطر میانگین آن‌ها ۱۰۰ نانومتر است. در قسمت‌هایی از این ساختار شبکه‌ای، نانومیله‌هایی از اکسید تنگستن به طول تقریبی ۵۰۰ نانومتر و در دسته‌هایی با عرض بیش از ۳ میکرومتر تشکیل شده است. با توجه به اینکه در این ساختار حضور نانوصفحات مولیبدن دی‌سولفید با طول میانگین ۳ میکرومتر قطعی است، احتمال آن می‌رود که این نانومیله‌ها روی بستر صفحات دوبعدی مولیبدن دی‌سولفید، تشکیل و رشد داده شده باشند. در این صورت، این ساختار برای حضور یون‌ها و تبادل الکترون آن‌ها بسیار مناسب خواهد بود و می‌توان انتظار بهبود ساختار الکتروکرومیک تنگستن اکسید را داشت.



شکل ۵. الف) تصویر SEM از لایه‌ی نازک نانوکامپوزیت حاوی مولیبدن دی‌سولفید ۰/۰۵ و ب) تصویر SEM از لایه‌ی نازک نانوکامپوزیت حاوی مولیبدن دی‌سولفید ۰/۲۵ (نانوصفحات مشاهده می‌شوند و نانویارهای تنگستن رشد کرده‌اند)

تست‌های ولتامتری چرخه‌ای مربوط به لایه‌های WO_3 و لایه‌ی نانوکامپوزیت حاوی ۰/۲۵ وزنی مولیبدن دی‌سولفید در شکل ۶ نشان داده شده است. تست‌های ولتامتری چرخه‌ای در محدوده‌ی پتانسیل (+1V, -1V) با نرخ پوشش ۲۵ میلی‌ولت بر ثانیه بر روی سطح مشخص 1 cm^2 انجام شده است. در ولتاموگرام چرخه‌ای، دانسیته‌ی جریان منتج از پتانسیل اعمالی بر الکتروود کار نسبت به الکتروود مرجع Ag/AgCl رسم می‌شود. در حین تست CV، تغییرات رنگی متناسب با پتانسیل اعمال شده در لایه‌ی الکتروکروم مشاهده می‌شود. همان‌طور که از نمودارهای CV هر دو نمونه مشخص است، پیک احیایی کوچک و پهنی در پتانسیل -0.67 V دیده می‌شود که محل آن در هر دو نمونه

حالت تعادلی می‌رسند که این باعث می‌شود مقداری یون همچنان در شبکه‌ی یونی WO_3 باقی بماند ([Zheng et al.](#), 2015). این مسئله عامل برگشت‌پذیری ناکامل لایه‌های رنگی شونده است.

جدول ۱. نتایج تست کرومپرومتری

WO_3	WM0.025	کمیت
5.71	7.63	بار کل ورودی به لایه (mC)
5.21	7.00	بار کل خروجی از لایه (mC)
91.2%	91.7%	برگشت‌پذیری

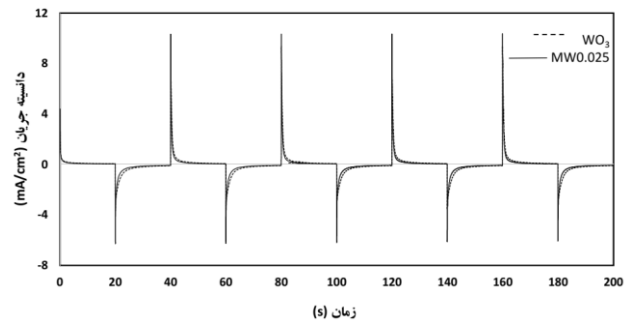
مدولاسیون اپتیکی بیشینه به صورت بیشینه‌ی اختلاف بین عبور لایه در دو حالت رنگی و بی‌رنگی در ناحیه‌ی مرئی طیف نور تعریف می‌شود. با توجه به نمودارهای شکل ۸ مشخص شد که مدولاسیون اپتیکی لایه‌های WO_3 و WM0.025 در طول موج ۵۵۰ نانومتر به ترتیب برابر ۱۵ و ۴۲ درصد است. نمودار Wb و Wc به ترتیب مربوط به عبور لایه‌ی نازک تنگستن اکسید در حالت بی‌رنگ و رنگی است. مدولاسیون اپتیکی بزرگ‌تر لایه‌ی کامپوزیت ناشی از بلورینگی کمتر لایه‌ی نانوکامپوزیت است که از طیف‌های XRD نتیجه‌گیری شد. همچنین، برای بررسی و مقایسه‌ی عملکرد سوئیچینگ نمونه‌ها، طیف عبور در جا در طول موج ۵۵۰ نانومتر بر حسب زمان اندازه‌گیری و ثبت شد. زمان لازم برای تغییر ۹۰ درصد عبور کلی در طول موج ۵۵۰ نانومتر، که به‌عنوان زمان پاسخ‌دهی رنگی شدن و بی‌رنگی تعریف می‌شود، در لایه‌ی WO_3 به ترتیب برابر ۲۵ و ۵۰ ثانیه و در لایه‌ی WM0.025 به ترتیب برابر ۱۲ و ۴۲ ثانیه است که یعنی نفوذ آسان‌تر و ورود/خروج سریع‌تر یون‌های Li از شبکه WM0.025. این اتفاق مؤید ضریب نفوذ بزرگ‌تر یون Li در لایه‌ی نانوکامپوزیتی است.

از آنجاکه عملکرد یک قطعه شیشه‌ی هوشمند با پایداری سیکلی آن نیز سنجیده می‌شود، این آزمون نیز برای ۲۰ سیکل پیاپی برای نمونه‌ی کامپوزیتی بهینه انجام شد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، جریان قطعه‌ی شیشه‌ی الکتروکرومیک پایداری خوبی در زمان بالا دارد.

به تبع آن فرایند مبادله‌ی یون Li^+ در فصل مشترک الکترولیت/لایه‌ی بیشتر شده است. بنابراین، سطح نمودار CV، که نشان‌دهنده‌ی مقدار بار مبادله‌شده است، در لایه‌ی نانوکامپوزیت بیشتر از لایه‌ی تنگستن اکسید است.

شکل ۷ تست کرومپرومتری لایه‌های WO_3 و WO_3 -MoS₂ را نشان می‌دهد که در آن جریان ناشی از اعمال متناوب پتانسیل ثابت +1V و -1V در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه‌ای ثبت شده است. بار ورودی یا خروجی در هر پیک از انتگرال بین دو زمان شروع و پایان آن فرایند به دست می‌آید:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} J(t) dt \quad (2)$$



شکل ۷. کرومپرومتری در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه

با انتگرال‌گیری از داده‌های نمودار کرومپرومتری، بار ورودی به لایه و خروجی از آن محاسبه شده و در جدول ۱ آمده است.

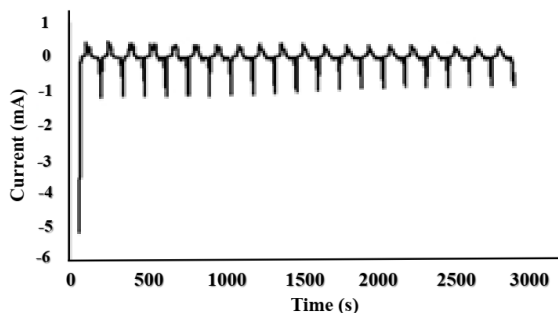
برگشت‌پذیری الکتروشیمیایی لایه‌ها به صورت نسبت بار خروجی به بار کل ورودی لایه تعریف می‌شود و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$Rev. = \frac{Q_{di}}{Q_i} \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه، Q_i میزان باری است که وارد لایه و باعث رنگی شدن لایه می‌شود و Q_{di} بار خارج‌شده از لایه در حین واکنش اکسیداسیون (یا بی‌رنگ شدن) است.

با توجه به تعریف برگشت‌پذیری لایه‌ی تنگستن اکسید برابر ۹۱/۲ درصد و لایه‌ی WO_3 -MoS₂ برابر ۹۱/۷ درصد است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، ورود یون‌های Li به شبکه‌ی WO_3 تحت تأثیر میدان الکتریکی اعمالی و گرادیان غلظتی است. اعمال پتانسیل منفی نیروی گرادیان غلظتی یون‌های Li و نیروی میدان الکتریکی هم‌زمان باعث ورود یون‌های Li به شبکه‌ی WO_3 می‌شود. وقتی ولتاژ مثبت به الکتروود رنگی‌شونده اعمال می‌شود، برای نیروی گرادیان غلظتی یون‌های Li معکوس نیروی میدان الکتریکی است و نیروهای معکوس موجود در سیستم به

الکترون‌های برانگیخته‌ی WO_3 را دریافت و نرخ انتقال الکترون را در لایه‌ی نانوکامپوزیت افزایش دهد. در نتیجه، این لایه پاسخ الکتروکرمیک سریع‌تری داشته است. در فرایند رنگی شدن لایه‌ی نانوکامپوزیت مسیرهای نفوذ یون Li برای ورود/خروج از شبکه‌ی تنگستن اکسید کوتاه‌تر است که ناشی از ساختار شبکه و تماس بیشتر سطح الکتروود و الکترولیت است.



شکل ۹. عبور بر حسب طول موج برای شیشه‌ی هوشمند حاوی لایه‌ی تنگستن تری‌اکسید حاوی لایه‌ی کامپوزیت ۰/۰۲۵ درصد از صفحات مولیبدن دی‌سولفید و یک شیشه‌ی حاوی لایه‌ی رسانا

به‌طورکلی، می‌توان گفت که حضور مولیبدن دی‌سولفید در فصل مشترک الکتروود باعث بهبود عملکرد الکتروکرمیک لایه‌ی نانوکامپوزیت شده است. دلیل این امر عمدتاً به فعالیت الکتروشیمیایی بیشتر این لایه و ریزساختار متخلخل ایجادشده مربوط است که باعث افزایش ضریب نفوذ یون نفوذکننده‌ی لیتیم و سطح ویژه‌ی بزرگ برای واکنش‌های انتقال بار شده است.

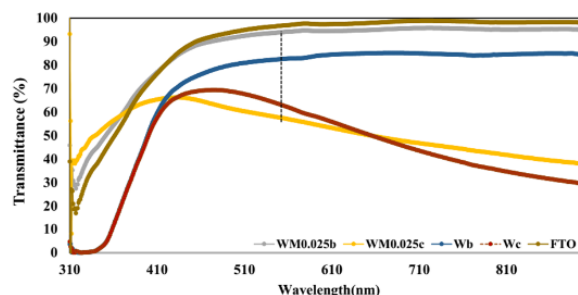
۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های پژوهشگاه مواد و انرژی از پیشبرد این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

مراجع

- Cai, G., Tu, J., Zhang, J., Mai, Y., Lu, Y., Gu, C., & Wang, X. (2012). An efficient route to a porous NiO/reduced graphene oxide hybrid film with highly improved electrochromic properties. *Nanoscale*, 4(18), 5724-30. <https://doi.org/10.1039/C2NR31397A>
- Chang, X., Sun, S., Dong, L., Hu, X., & Yin, Y. (2014). Tungsten oxide nanowires grown on graphene oxide sheets as high-performance electrochromic material. *Electrochimica acta*, 129, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.02.065>
- Falola, B. D., Wiltowski, T., & Suni, I. (2016). Electrodeposition of MoS_2 for charge storage in electrochemical supercapacitors. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(9), D568-D574. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0011610jes>
- Hasan, B. A., Hamza, L. F., & Uamran D. A. (2019). Enhanced sensing properties of WO_3 and its binary systems for thin films gas sensors. *Journal of Physics: Conference Series*, 1234(1), 12045-12061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1234/1/012045>
- Huang, L. M., Hu, C.W., Liu, H. C., Hsu, C. Y., Chen, C. H., & Ho, K. C. (2012). Photovoltaic electrochromic device for solar cell module and self-powered smart glass applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.03.036>

از نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که لایه‌ی نانوکامپوزیتی زمان سوئیچینگ کوتاه‌تر، مدولاسیون اپتیکی بالاتر و بازده رنگی شدن بیشتری داشته است. همچنین، حضور نانوذرات تنگستن اکسید روی نانوصفحات MoS_2 باعث شده که سطح ویژه‌ی بالایی برای نانوکامپوزیت وجود داشته باشد. از طرفی، MoS_2 می‌تواند به‌عنوان ماده‌ی پذیرنده‌ی الکترون ایدئال عمل کند تا



شکل ۸. عبور بر حسب طول موج برای شیشه‌ی هوشمند حاوی لایه‌ی تنگستن تری‌اکسید، حاوی لایه‌ی کامپوزیت ۰/۰۲۵ درصد از صفحات مولیبدن دی‌سولفید و یک شیشه‌ی حاوی لایه‌ی رسانا

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر حضور مولیبدن دی‌سولفید بر خواص الکتروکرمیک تنگستن اکسید انجام شده است. به این منظور، لایه‌ی نازک WO_3 و لایه‌ی نازک نانوکامپوزیت WO_3-MoS_2 به روش لایه‌نشانی الکتروشیمیایی تهیه شدند. نتایج تحقیق نشان داد که حضور لایه‌ی MoS_2 در فصل مشترک بین لایه‌ی الکتروکرم و الکتروود رسانا تأثیر قابل توجهی بر خواص و عملکرد لایه‌ی الکتروکرم WO_3 داشته است. مقایسه‌ی تصاویر SEM نمونه‌ها نشان داد که وجود لایه‌ی MoS_2 باعث تغییر ریخت‌شناسی نانوذرات WO_3 در مقایسه با لایه‌ی فاقد MoS_2 شده است. لایه‌ی WO_3 متشکل از زمینه‌ای بی‌شکل است که ذرات نانومیله‌ای به‌صورت نامنظم در بخش‌هایی از آن توزیع شده است. بررسی نتایج الکتروشیمیایی نشان داد که وجود لایه‌ی MoS_2 در نمونه‌ی نانوکامپوزیت باعث افزایش فعالیت الکتروشیمیایی لایه در مقایسه با لایه‌ی فاقد MoS_2 شده است. ضرایب نفوذ به‌دست‌آمده از نتایج تست ولتامتری چرخه‌ای نشان داد که وجود صفحات مولیبدن دی‌سولفید در نمونه‌ها باعث افزایش نفوذ یون Li در لایه‌ی فعال رنگی‌شونده شده است.

6. Lin, F., Montano, M., Tian, C., Ji, Y., Nordlund, D., Weng, T. C., & Moore, R. G. (2014). Electrochromic performance of nanocomposite nickel oxide counter electrodes containing lithium and zirconium. *Solar energy materials and solar cells*, 126, 206-212. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.023>
7. Ma, G., Pan, Z., Liu, Y., Lu, Y., & Tao, Y. (2023). Hydrothermal Synthesis of MoS₂/SnS₂ Photocatalysts with Heterogeneous Structures Enhances Photocatalytic Activity. *Materials*, 16(12), 4436. <https://doi.org/10.3390/ma16124436>
8. Mallikarjuna, K., Mahesh A. Sh. & Kim H. (2020). Electrochromic smart windows using 2D-MoS₂ nanostructures protected silver nanowire based flexible transparent electrodes. *Materials Science in Semiconductor Processing* 117, 105176. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105176>
9. Rakibuddin, M. D., & Kim, H. (2017). Fabrication of MoS₂/WO₃ nanocomposite films for enhanced electro-chromic performance. *New Journal of Chemistry*, 41(24). <http://doi.org/10.1039/C7NJ03011H>
10. Veeramalai, C. P., Li, F., Liu, Y., Xu, Z., Guo, T., & Kim, T. (2016). Enhanced field emission properties of molybdenum disulphide few layer nanosheets synthesized by hydrothermal method. *Applied Surface Science*, 389, 1017-1022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.031>
11. Yao, Z., Di, J., Yong, Z., Zhao, Z., & Li, Q. (2012). Aligned coaxial tungsten oxide-carbon nanotube sheet: a flexible and gradient electrochromic film. *Chemical Communications*, 48(66), 8252-8254. <https://doi.org/10.1039/C2CC32925E>
12. Zheng, F., Man, W., Guo, M., Zhang, M., & Zhen, Q., (2015). Effects of morphology, size and crystallinity on the electrochromic properties of nanostructured WO₃ films. *Crys Chem Comm*, 17(29), 5440-5450. <https://doi.org/10.1039/C5CE00832H>