



مروری بر خصوصیات فیزیکی ترکیبات اکسیدی قابل استفاده در کاربردهای الکتروکرومیک

هادی علی اصغری^۱، امیر مسعود اعرابی^{۲*}، حمید هراتی زاده^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، صندوق پستی: ۳۶۱۵۵-۳۱۶

۲- استادیار، گروه پژوهشی رنگدانه‌های معدنی و لعاب، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۳- دانشیار، گروه فیزیک حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، صندوق پستی: ۳۶۱۵۵-۳۱۶

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۴ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۰۶/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۰۵ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۷/۰۹/۰۷

چکیده

استفاده از فناوری‌های نوین برای دستیابی به آسایش بیشتر، افزایش بازدهی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی همواره مورد توجه فراوان محققان قرار داشته است. الکتروکرومیسم از پدیده‌های مورد استفاده به عنوان یک فناوری سبز است. مواد الکتروکرومیک که با اعمال اختلاف پتانسیل به قطعه الکتروکرومیک تغییر رنگ می‌دهند، در اصل موادی هستند که در اثر تغییر جهت و مقدار ولتاژ اعمالی به قطعه، عبور نور از آن را تنظیم‌پذیر می‌کنند. در این مقاله ضمن بررسی ساختار کلی یک قطعه الکتروکرومیک، خواص فیزیکی لازم برای انتخاب یک ترکیب اکسیدی در کاربردهای الکتروکرومیک بیان شده است. همچنین رفتارهای نوری قطعات ورقه‌ای نانو ساختار با مواد الکتروکرومیک اکسید تنگستن و اکسید نیکل به عنوان دو گزینه مناسب مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا داده‌های مربوط به نانو ساختارهای ورقه‌ای نیز بیان شده است.

واژه‌های کلیدی

الکتروکرومیسم، پنجره‌های هوشمند، مواد الکتروکرومیک، اکسید تنگستن، اکسید نیکل.

چکیده تصویری





A Review on Physical Properties of Usable Oxide Complexes in Electrochromic Applications

Hadi Ali Asghari¹, Amir Masoud Aarabi*², Hamid Harati Zadeh¹

1- Department of Solid State Physics, Faculty of Physics, Shahrood University of Technology, P. O. Box: 36155-316, Shahrood, Iran.

2- Department of inorganic pigments and glazes, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

Abstract

The use of modern technologies to achieve greater comfort, efficiency, and saving in energy consumption is at the concern of researchers. Electrochromism has been used as a green technology. The color of electrochromic materials is changed by applying a voltage to the electrochromic device. Indeed this materials can tune the transmittance of the device by change the applied bias to it. In this paper, the general structure of an electrochromic device based on the metal oxides and important physical properties has been studied to select oxide compounds for electrochromic applications. Then, optical behaviors of WO_3 and NiO has been investigated as one of the best electrochromic candidates. The datas related to foil type nanostructure also has been expressed.

Keywords

Electrochromism, Smart windows, Electrochromic Materials, Tungsten oxide, Nickel oxide.

Graphical abstract



۱- مقدمه

مواد دارای خواص بهینه و قابل کنترل در زمینه‌های مختلف فناوری همواره مورد تاکید محققان بوده است. تمایل به استفاده از مواد نانو ساختار به دلیل کنترل پذیری بالا خواص، توسط عواملی مانند اثر محدودیت کوانتومی و افزایش نسبت سطح به حجم و موارد دیگر که به پاسخ‌دهی سریع‌تر و دقیق‌تر به عوامل خارجی منجر می‌شود که امروزه اولویت علم و فناوری است. تلاش‌های اخیر در زمینه استفاده از روش‌های صرفه‌جویی انرژی با مصرف تمام انرژی اضافی موجود در اطراف ما یا کاهش مصرف انرژی تا جای ممکن صورت می‌گیرد. از طرفی گرم شدن کره زمین و راهکارهای جلوگیری از مضرات آن مورد توجه دانشمندان، سیاستمداران و عموم مردم است، بنابراین تغییراتی عمده در فناوری انرژی حتی با احتمال ضرر به اقتصاد جهانی لازم ولی هم‌زمان فرصت‌های کسب و کار جدیدی را در عرصه "فناوری پاک"^۱ ایجاد می‌کند [۱].

استفاده از انرژی در قسمت‌های مختلف جامعه اعم از صنعت، ساختمان و حمل و نقل باید کاهش یابد زیرا منجر به رهاسازی مقادیر زیادی CO₂ می‌شود. توجه خاص روی محیط ساختمان نیز طبیعی است زیرا در این بخش به حدود ۳۰-۴۰ درصد از انرژی اولیه جهان استفاده می‌گردد [۳]. مصرف انرژی در ساختمان را با استفاده از فناوری‌های تجاری‌سازی شده در دسترس، می‌توان ۳۰ تا ۸۰ درصد کاهش داد [۴]. با مطالعات جدید انجام شده روی هزینه‌های حاشیه‌ای کاهش CO₂، باید به این نکته توجه کرد که ذخیره انرژی در محیط ساختمان موجب صرفه‌جویی در انرژی و هزینه‌ها می‌گردد. دلیل دیگر اهمیت محیط داخلی این حقیقت است که در کشورهای صنعتی، افراد ۹۰-۸۰ درصد وقت خود را در این مکان‌ها سپری می‌کنند [۵].

افزایش تقاضا برای آسایش در محیط داخلی عدم تمایل افراد برای پذیرفتن شرایط سخت گرمایی را به دنبال داشته است. تمایل افراد نسبت به افزایش تماس داخل و خارج خانه با پنجره‌های بزرگ و نمای شیشه‌ای دلیل دیگر افزایش استفاده از تهویه مطبوع است. پنجره‌های کوچک به عدم آسایش

محیط داخلی و بنابراین عدم رضایت شغلی و به دنبال آن عملکرد بدشغلی منجر می‌شود ولی مکان‌های بزرگ شیشه‌ای حداقل در ساختمان‌های تجاری در بیشتر مناطق دنیا نیازمند خنک‌سازی فضا است. یک راه برای بهبود این وضعیت با توجه به انرژی و آسایش محیط داخلی، داشتن پوشش‌هایی با گذردهی قابل تنظیم برای نور مرئی و انرژی خورشیدی است. در سال ۱۹۸۴ برای این نوع از پنجره‌بندی عبارت "پنجره‌های هوشمند" معرفی شد [۵]. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک پنجره هوشمند با عبور نور و ایجاد رنگ متفاوت در شیشه‌های بالا و پایین نشان داده شده است [۵].

به طور کلی موادی که شرایط و محرک‌هایی مانند محرک‌های مکانیکی، گرمایی، شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی و نوری را حس می‌کنند و نسبت به آن‌ها عکس‌العمل نشان می‌دهند به عنوان مواد هوشمند شناخته می‌شوند. چنین موادی مخصوصاً به صورت نانو ساختار در حال حاضر به طور گسترده در ساخت قطعات هوشمند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. پنجره‌های هوشمند بر پایه یکی از فناوری‌های ایجاد رنگ عمل می‌کند که عبارت کروموژنیک در آن به مفهوم آشکارسازی خاصیتی نوری است که قابلیت تغییر در پاسخ به یک عامل برانگیزنده خارجی را دارد [۹-۷].

به گروهی از مواد هوشمند که خصوصیات نوری آنها به علت اکسایش/کاهش ایجاد شده با اعمال یک جریان یا اختلاف پتانسیل الکتریکی کوچک به صورت بازگشت‌پذیر تغییر می‌کند مواد الکتروکرومیک^۲ گفته می‌شود [۱۱]. الکتروکرومیسم اولین بار در سال ۱۹۶۰ [۱۲] و سپس ۱۹۷۰ در اکسیدهای فلزات واسطه کشف شد، در اولین مرحله کاربردهایی در زمینه نمایشگرهای اطلاعات دیده شد اما نمایشگرهای الکتروکرومیک به سرعت نمایشگرهای بلور مایع رشد نکردند. هنگامی که "سبز" بودن این فناوری و امکان توانایی تولید و اهمیت بازدهی انرژی و همچنین آسایش در ساختمان‌ها آشکار شد تمرکز بر تحقیق روی مواد الکتروکرومیک در میانه دهه ۱۹۸۰ به سمت پنجره‌ها تغییر کرد [۹]. در کل، پتانسیل ذاتی ذخیره انرژی در فناوری مواد رنگزا به صورت ضعیفی درک شده است و امکان مطالعه بیشتری وجود دارد.

^۱ Clean technology

^۲ Electrochromic



شکل ۱- نمونه اولیه پنجره هوشمند با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی متر [۶].

مقاله

تا یک سلول مجاز برای شار الکترون تصویر شده در رابطه ۱ را بسازد [۴، ۲]. مطابق شکل ۲ لوردس^۲ و همکارانش پیشنهاد کردند که کامپوزیت نانوذرات در شیشه‌ی آن‌ها می‌تواند برای ساخت پنجره‌هایی که به طور قابل کنترل و انتخاب پذیر نور مرئی و زیر قرمز نزدیک (گرما) را جذب می‌کنند مورد استفاده قرار بگیرد. در طرح a، پنجره یک سلول الکتروشیمیایی است که دو لایه شیشه‌ای رسانا با یک ماده الکترولیت جامد جدا شده هستند. با لایه نشانی ماده مورد نظر روی یکی از لایه‌ها یک الکتروود تشکیل شده است و الکتروود مقابل روی لایه شیشه‌ای دیگر لایه نشانی می‌شود. در غیاب یک جریان الکتریکی، پنجره برای نور مرئی و زیر قرمز نزدیک شفاف است. در طرح b هنگامی که یک ولتاژ متوسط اعمال شود، حامل‌های بار (یون‌های لیتیم، Li^+ و الکترون‌ها e^-) از طریق جریان حرکت می‌کنند. نانوذرات در کامپوزیت به صورت شیمیایی کاهیده می‌شوند و در این حال بیشتر نور زیرقرمز نزدیک را سد می‌کنند. در ولتاژهای پایین‌تر (C) بستر شیشه‌ای کامپوزیت نیز کاهیده می‌شود و بیشتر نور مرئی را سد می‌کند [۲].

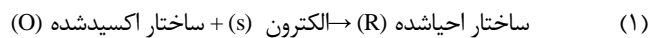
یک ماده فعال در برابر الکتروسیسته ممکن است یک اتم یا یون و یک مولکول یا رادیکال، در برخی موارد با پیوند چندگانه در یک فیلم جامد باشد. این ماده باید در تماس با زیرلایه الکتروود بتواند الکترون را انتقال دهد. این ماده در مجاورت زیرلایه الکتروود و تحت تعدیل‌های کمک کننده به انرژی فعال‌سازی (گاهی کم) همراه الکترون امکان دارد درون حلال-حل و یا ترکیب شده باشد. در سایر سیستم‌ها ماده الکترواکتیو می‌تواند یک جامد یا ماده پراکنده درون بستر جامد باشد، در این صورت نسبت به عامل رنگی در تماس فیزیکی با زیرلایه الکتروود به سرعت دستخوش واکنش احیا^۳ می‌شود در نتیجه مقدار ماده الکترواکتیو باقی مانده خیلی کم می‌شود.

برای مثال ترکیب بیش از یک فناوری ماده رنگزا مانند الکتروکرومیک با ترموکرومیک (تغییر رنگ در اثر دما) یا فتوکرومیک (تغییر رنگ در اثر تابش) در مقالات علمی تقریباً توضیح داده نشده‌اند.

۲- الکتروکرومیسم^۱

عبارت الکتروکرومیسم اولین بار در سال ۱۹۶۱ به منظور توصیف خصوصیات الکتروکرومیک فیلم اکسید تنگستن استفاده شد [۴، ۱۳]. از آن زمان تحقیق روی اکسید تنگستن به عنوان یک ماده الکتروکرومیک به خوبی درک شده است [۱۳].

هر ماده الکتروکرومیک یک ماده فعال در برابر الکتروسیسته است که می‌تواند مطابق رابطه ۱ متحمل جذب الکترون یعنی کاهش یا رابطه برگشتی ۱ متحمل آزادسازی الکترون یعنی اکسایش در یک واکنش اکسایش-کاهش شود که در یک الکتروود اتفاق می‌افتد. یک الکتروود در اصل یک فلز یا رسانای دیگر با اتصالات خارجی است که با شکل‌های O و R یک ماده الکترواکتیو در تماس می‌باشد و می‌تواند در یک نیم‌سلول دیده شود [۴].

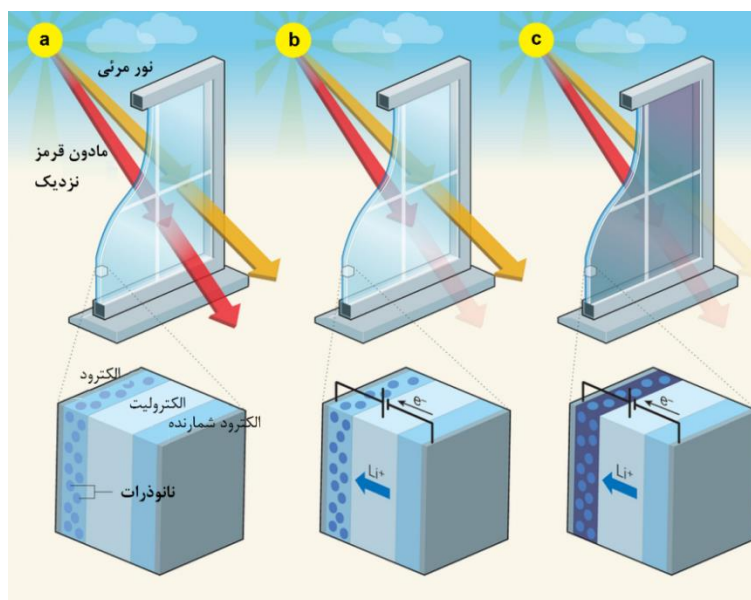


هر چند در اصطلاح الکتروشیمیایی دقیق، اجزای O و R، الکتروود فلزی و رسانای شبه فلزی را شامل می‌شوند اما اغلب هنگامی از این استفاده می‌شود که الکتروود فقط شامل رسانای شبه فلزی و فلزی باشد که از تعریف مقابل نشأت می‌گیرد "یک الکتروود در اصل یک رسانای فلزی یا شبه‌فلزی یا به طور خاص در الکتروکرومیسم یک نیم‌رسانای انتقال‌دهنده است که اغلب به عنوان یک فیلم نازک روی شیشه لایه نشانی شده است". در یک سیستم هر الکتروود باید مانند شکل ۲ به واسطه یک الکترولیت با الکتروود دوم همراه شود

² Lelvedes

³ Redox

¹ Electrochromism



شکل ۲- طرح پنجره الکتروکرومیک [۲].

فام‌های گونه‌های الکترواکتیو تنها ممکن است قبل و بعد از انتقال الکترون متفاوت باشد زیرا اغلب تغییرات هنگامی رخ می‌دهند که طول موج‌های درگیر خارج از گستره مرئی قرار گیرند و (به جز با طیف‌سنج مناسب) قابل تشخیص نیستند. به عبارت دیگر اگر جذب نوری با دو حالت واکنش احیا در محدوده فرابنفش یا نزدیک زیر قرمز قرار بگیرد تغییر طیفی همراه واکنش احیا به صورت بصری غیرقابل تمیز است. هنگامی که تغییر در ناحیه مرئی است انتظار می‌رود یک تعریف عملی از الکتروکرومیسم به صورت زیر باشد:

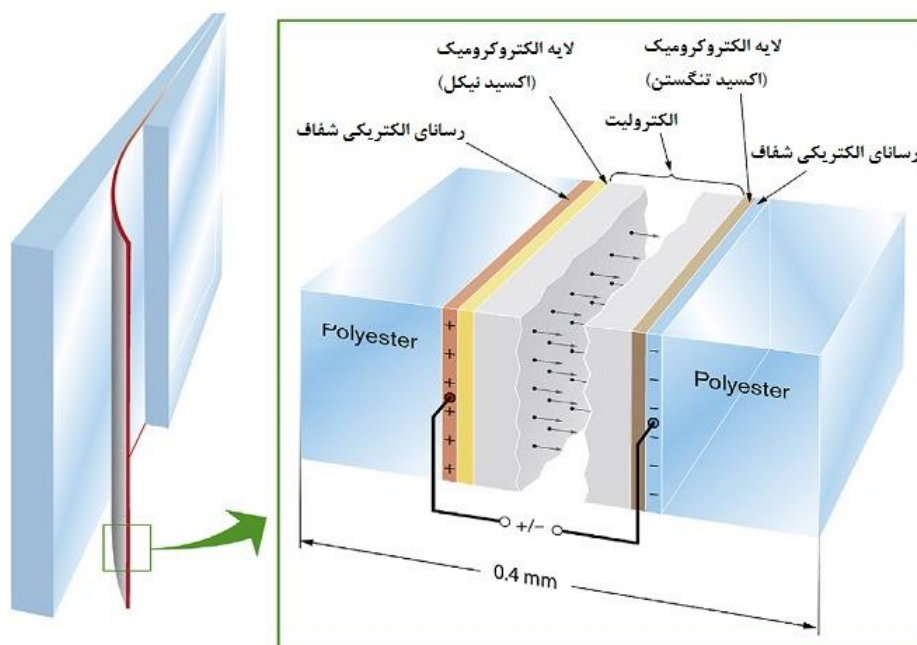
"الکتروکرومیسم یک بی‌رنگ شدن یا تغییر و ظهور رنگ با یک فرآیند انتقال الکترون (احیا) یا با یک پتانسیل الکتریکی کافی است که در بسیاری از کاربردها، لازم است برگشت‌پذیر باشد". به هر حال در موضوع فیلترهای تعدیل شدت برای پالس‌های لیزر پیغام‌رسان زیر قرمز در فیبر نوری، اصطلاح "کلید زنی یا تعدیل الکتروکرومیک" برای چنین اثرات غیرقابل مشاهده به طور مکرر استفاده می‌شود. درکل الکتروکرومیسم مشاهده‌پذیر تنها برای اهداف نمایشگری مفید است. اگر رنگ‌ها به اندازه کافی متفاوت و با شدت باشند، ماده الکتروکرومیک گفته می‌شود و گونه‌های متحمل یک تغییر مفید، یک الکتروکروم خوانده می‌شوند [۴]. بسیاری از مواد آلی و غیرآلی الکتروکرومیک هستند، حتی برخی گونه‌های زیستی هم این پدیده را نشان می‌دهند.

بیشتر موارد پروتون‌ها H^+ و Li^+ مورد توجه هستند [۱۳]. مواد لایه‌ای از سه نوع متفاوت بوده که عبارتند از: الکترولیت، یک رسانای یونی خالص که دو فیلم الکتروکرومیک را از هم (یا یک تک فیلم الکتروکرومیک را از فیلم منبع یون غیرفعال نوری) جدا می‌کند. فیلم‌های الکتروکرومیک که رسانای یون و الکترون می‌باشد (یعنی یک رسانای مخلوط است) و رساناهای شفاف که فقط رسانای الکترون هستند [۱۳]. رسانای یون در تماس با فیلم الکتروکرومیک بوده و اکسید تنگستن یک نمونه مرسوم برای کاربرد به‌عنوان فیلم الکتروکرومیک است.

۳- ساختار یک قطعه الکتروکرومیک: طرح پنج لایه‌ای "باتری مانند"

به طور کلی مواد الکتروکرومیک از منظر قطعاتی که در آن‌ها استفاده شده‌اند، شناخته می‌شوند. شکل ۳ طراحی استاندارد از یک قطعه

1 Polyethylene



شکل ۳- طرح اصلی یک قطعه الکتروکرومیک [۱۴].

مقاله

اکنون دیگر آشکار شده است که قطعات الکتروکرومیک مشابه یک باتری الکتریکی با مقدار شارژ متنظر با درجه‌ای از جذب نوری است. قیاس این دو نوع از قطعات مفید است و بسیاری از مزایا و معایب را به اشتراک می‌گذارد. برای مثال هر دوی آن‌ها اگر تحت تاثیر شارژ یا گرم شدن بیش از حد قرار بگیرند به راحتی فرسوده می‌شوند، همچنین خصوصیات "خودترمیمی" معینی را به نمایش می‌گذارند که برای قطعات الکتروکرومیک و نیز باتری‌ها به طور ضعیفی درک شده است. هر دو نوع قطعه قادر به تغییر ناگهانی خصوصیات نیستند و در مورد یک قطعه الکتروکرومیک زمان لازم برای رفتن از یک حالت کاملا رنگی به حالتی کاملا بی‌رنگ ممکن است از چند ثانیه (در قطعه‌ای با اندازه‌ی چند سانتی‌متر مربعی) تا یک یا ده‌ها دقیقه (برای پنجره‌ای با اندازه مترمربعی) تغییر کند. در شکل ۴ عناصر فلزی که اکسید آن‌ها دو نوع رنگ پذیری دارد نشان داده شده اند. خانه‌های هاشور خورده، فلزات واسطه‌ای را مشخص می‌کند که اکسیدهای آن‌ها الکتروکرومسیم آشکار کاتدی و آندی دارند [۱۴]. از بین اکسیدهای کاتدی بیشترین توجه به اکسیدهای W، Mo و Nb است و از بین اکسیدهای آندی آن‌هایی که بر پایه Ir و Ni هستند جالب‌ترین‌ها هستند. به هر حال باید توجه داشت که Ir بسیار کمیاب و گران قیمت است و بنابراین برای کاربردهای بزرگ مقیاس غیرمقبول است، هر چند که خواص آن بعد از رقیق شدن با عنصر ارزان‌تر Ta تقریباً می‌تواند بدون تغییر بماند [۱۳]. تنها فلز با خصوصیات نسبتاً متفاوت، وانادیم است که برای V_2O_5 ویژگی‌هایی در نواحی طول موج متفاوت نشان می‌دهد [۱۵]. با ترکیب یک فیلم الکتروکرومیک کاتدی مانند اکسید تنگستن با یک منبع یون رنگ‌پذیر آندی مانند اکسید نیکل می‌توان قطعاتی تهیه کرد که هر دو فیلم هنگام خروج بار از یکی به دیگری تیره شوند و هنگامی که به حالت باردار اصلی برگردانده شوند بی‌رنگ گردند [۱۵]. در صورتی که ترکیب دقیقی از فیلم‌های آندی و کاتدی استفاده شود، این ویژگی تکمیل‌کننده می‌تواند در ایجاد خنثی‌شدن رنگ نیز استفاده شود.

۴- خصوصیات کلی قطعات لایه‌های نانوساختار با اکسید

تنگستن و اکسید نیکل

انواع بسیار متفاوتی از قطعات الکتروکرومیک در طول سال‌های اخیر مطالعه شده اند [۹-۲].

در طرف دیگر رسانای یون، یک فیلم ذخیره‌کننده وجود دارد که این نیز رسانای مخلوط برای یون و الکترون است که در حالت ایده‌آل خصوصیات الکتروکرومیک مکمل فیلم الکتروکرومیک اول را دارد. این توده سه لایه‌ای مرکزی بین دو فیلم رسانای الکتریکی شفاف قرار دارد. اکسید قلع ایندیم ($In_2O_3:Sn$ که به ITO مشهور است) چون ترکیب بی‌نظیری از نظر رسانایی الکتریکی و شفافیت نوری است اغلب ترجیح داده می‌شود. فیلم‌های بر پایه SnO_2 مخصوصاً اگر با روش ارزانی مانند پیرولیز پاششی روی شیشه گرم مستحکم در یک کارخانه شیشه مسطح تولید شود، می‌تواند استفاده شود. رساناهای شفاف پایه فلزی در اندازه‌های بزرگ آماده نشده اند اما اگر مجبور به عبوردهی زیادی نباشند می‌توانند توجه زیادی را به خود جلب کنند. خصوصاً نانولوله‌های کربنی و گرافن مواد دیگری هستند که ممکن است در آینده مورد توجه زیادی باشند [۴].

هنگامی که ولتاژی بین رساناهای شفاف اعمال شود یون‌ها می‌توانند بین فیلم الکتروکرومیک و فیلم منبع یون انتقال داده شوند. بار یون‌ها با الکترون‌هایی که به داخل یا خارج از فیلم الکتروکرومیک و فیلم منبع یون از طریق رساناهای شفاف تزریق می‌شوند، به تعادل می‌رسند و این الکترون‌ها باعث جذب نوری هستند. ولتاژ معکوس یا اتصال کوتاه با مواد مناسب موجب برگشت به خصوصیات اصلی می‌شود. رنگی شدن می‌تواند در هر سطحی متوقف شود به این معنی که قطعه الکتروکرومیک دارای حافظه مدار باز است. در حقیقت توان، تنها به منظور تغییر خصوصیات نوری قطعات مشابه پنجره لازم می‌شود. اثر حافظه منوط به این واقعیت است که رسانای یون در میان قطعه الکتروکرومیک الکترون‌ها را انتقال نمی‌دهد، انتقالی که از لایه‌ای با ضخامت چند میکرون از انتقال در یک فیلم نازک آسان‌تر است. سطح ولتاژ لازم برای جابجایی یون‌ها در مرتبه DC ۱۷ است و تعدادی از قطعات الکتروکرومیک مجتمع با تامین انرژی با سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که ولتاژ لازم برای آن‌ها می‌تواند به آسانی با سلول‌های خورشیدی تامین شود [۱۵].

دلیل اصلی مطلوب بودن همراهی یک فیلم الکتروکرومیک و یک فیلم منبع یون با خصوصیات مکملی، وجود اکسیدهایی با دو نوع خصوصیت الکتروکرومیک متفاوت است: (i) انواعی که تحت ورود یون، رنگی می‌شوند و به عنوان "کاتدی" شناخته می‌شوند و (ii) انواعی که تحت خروج یون، رنگی می‌شوند و به عنوان "آندی" شناخته می‌شوند [۱۳].

اکسیدهای الکتروکرومیک

H																				He						
Li	Be																				B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg																				Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn									
Fr	Ra	Ac																								

شکل ۴- جدول تناوبی عناصر (بخشی از لانتانیدها و اکتینیدها) [۱۴].

همه چالش‌های ذکر شده می‌تواند با موفقیت مواجه شود و فناوری الکتروکرومیک سرانجام برای نواحی بزرگ و کاربردهای با اندازه بزرگ پدیدار شود. نمودارها در شکل ۵ داده‌های قطعات ورقه‌ای بر پایه اکسید تنگستن (WO_3) و اکسید نیکل (NiO) همراه با اکسیدهای رسانای شفاف (TCO's)، الکترولیت پلیمری (PE) و ورقه‌های PET را نمایش می‌دهد [۱۶]. عبوردهی می‌تواند بین اکستریم‌های خیلی جدا از هم در هر دو گستره خورشیدی و نورتایی تعدیل شود که به ترتیب با طول موج λ به صورت $0.7 \mu m < \lambda < 0.4 \mu m$ و $3 \mu m < \lambda < 0.3 \mu m$ تعریف می‌شوند. عبور درخشان (به طور متوسط بیش از حساسیت چشم) به طور خاص بین ۵۷/۵ و ۱۷/۰ درصد باردار می‌شود، در حالیکه عبور خورشیدی (به طور متوسط بیش از یک تابش خورشیدی خاص) بین ۶۱ و ۱۸ درصد باردار می‌شود. به وضوح دیده می‌شود که تعدیل به علت تغییر از جذب نسبت به بازتاب است. هنگامی که قطعه از دو طرف نظاره می‌شود، بازتاب کاملاً یکسان نیست. بازه تعدیل می‌تواند با داشتن ضخامت‌های متفاوت فیلم و یا با استفاده از ترکیبات مناسب اکسیدهای الکتروکرومیک تغییر یابد. به خصوص افزودن Al یا Mg قادر به افزایش عبور از فیلم‌های بر پایه نیکل است [۱۷، ۹۰].

اخیراً علاقه زیادی به ترکیب شدن اکسید تنگستن کاتدی و اکسید نیکل آندی به هم پیوسته با یک الکترولیت اختصاص یافته است [۱۵]. قطعات بر پایه شیشه [۴] و پلی استر شامل یک فیلم نازک غیرآلی حاوی یون یا یک ورقه رسانای یون آلی نیز بررسی شده‌اند [۹]. در ادامه یک نمونه برای مثال بررسی شده است. ساخت قطعات الکتروکرومیک نانویی به خصوص آن‌هایی که روی ورقه‌های پلیمری بنا می‌شوند از نظر فنی سخت است و پنج چالش خاص در این زمینه وجود دارد که باید رفع شوند [۱۷ و ۱۳، ۹۰].

(۱) ITO باید رسانایی الکتریکی عالی را با جذب نوری بسیار پایین ترکیب کند که به طور خاص برای فیلم‌های روی زیرلایه‌های حساس به دما مانند پلی استر چالش‌زا است.

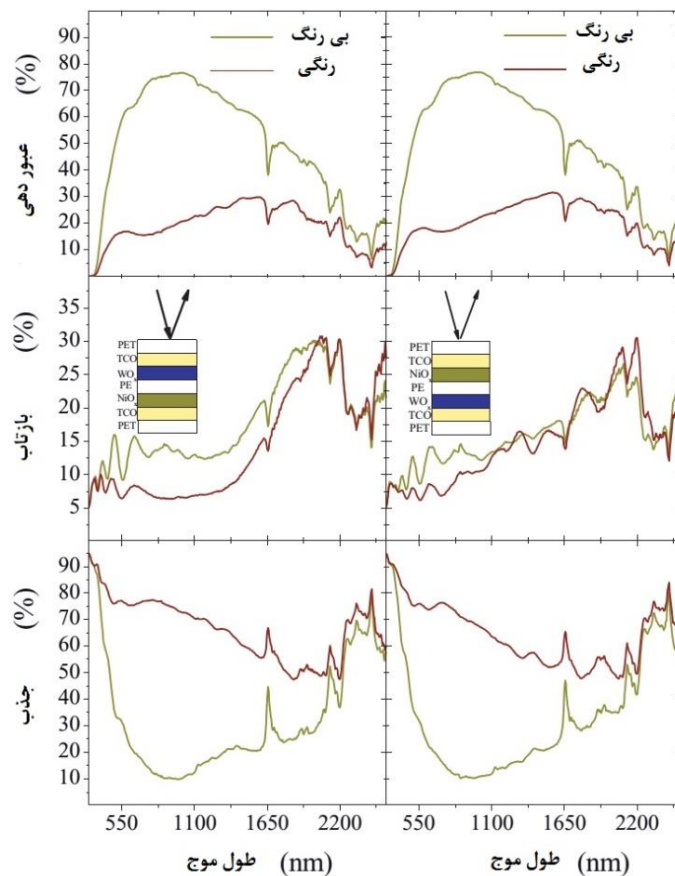
(۲) فیلم‌های الکتروکرومیک و الکتروود همراه باید به خوبی خصوصیات نانویی را روی نواحی بزرگ نشان دهند، بنابراین فناوری‌های لایه نشانی غیراستاندارد لازم می‌باشد.

(۳) با بررسی قطعه الکتروکرومیک به عنوان "باتری فیلم نازک" لزوم همراه بودن جاگذاری/ خروج بار و تعادل بار با فناوری‌های مناسب صنعتی مانند عملیات با گاز ازن برای مورد اکسید نیکل دیده می‌شود.

(۴) الکترولیت باید رسانایی خوب یون را با چسبندگی و شفافیت بالا برای تابش فرابنفش ترکیب کند.

(۵) پایداری در چرخه زنی طولانی مدت، تدابیر دقیقی را برای کنترل ولتاژ و جریان در طول رنگی و بی‌رنگ شدن دقیقاً همان‌طور که برای شارژ شدن و تخلیه برای باتری‌ها انجام می‌شود، نیاز دارد.

¹ Transparent conductive oxides



شکل ۵- طیف عبوری، بازتابی و جذبی برای قطعات الکتروکرومیک در مجموعه نشان داده شده است [۱۶].

مقاله

T_{colored} کم می‌شود اما یک T_{bleached} کم برای اغلب کاربردهای دیگر منجر به محدودیت شدیدی می‌شود. به هر حال امکان پشت سر هم گذاشتن قطعات الکتروکرومیک وجود دارد و به عنوان اولین تقریب برای n قطعه الکتروکرومیک سوار شده $\zeta_{\text{total}} = \zeta_1 \times \zeta_2 \times \dots \times \zeta_n$ را می‌گیرد. نیازمندی‌های عملی براساس وزن و یا قیمت، تمایل به محدود کردن تعداد قطعات این چیدمان خصوصا برای قطعات الکتروکرومیک شیشه‌ای دارد اما این محدودیت‌ها برای قطعات الکتروکرومیک ورقه‌ای خیلی کمتر هستند [۱۷].

۵- قطعات بر پایه اکسید تنگستن (WO_3)

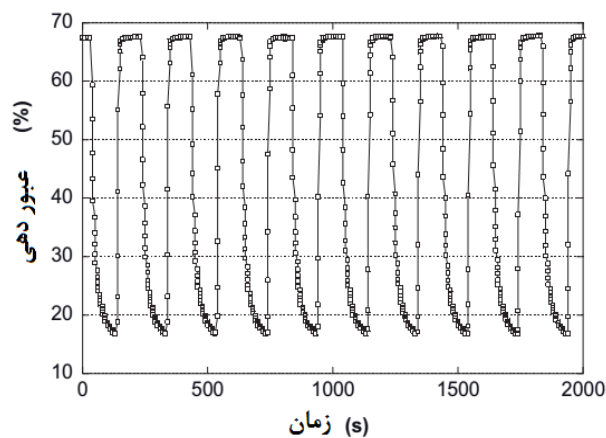
اولین بار خاصیت الکتروکرومیک از WO_3 در سال ۱۹۶۱ گزارش و سپس در سال ۱۹۷۸ بهینه شد [۳، ۴]. سونگ-ایک پارک^۲ و همکارانش در ۲۰۱۵ یک سیستم لایه نشانی نانوذراتی^۳ (NPDS) را به منظور لایه نشانی نانوذرات و میکروذرات روی زیرلایه‌ها گزارش کردند که شرایط مورد نظر در جدول ۱ آمده است که برای لایه نشانی مواد الکتروکرومیک غیرآلی روی زیرلایه‌ها دچار چالش شدند [۹، ۱۷].

تعدیل عبور در طول چندین چرخه رنگی-بی‌رنگ برای یک قطعه ورقه‌ای شبه الکتروکرومیک در اندازه 240 cm^2 در شکل ۶ نشان داده شده است. این نمونه گواهی می‌دهد که تغییرات نوری ناگهانی نیستند و در طول زمانی با گستردگی ده‌ها ثانیه برای این اندازه از قطعه اتفاق می‌افتد. عبور از فویل می‌تواند با لایه نشانی ضدبازتاب افزایش یابد. شکل ۷ عبور را برای ورقه تصویر شده در شکل ۵ بعد از عملیات روی دو طرف آن با یک لایه 50 nm نانومتری از نانوذرات SiO_2 نشان می‌دهد. عبور در $\lambda = 550 \text{ nm}$ از $73/1\%$ به $79/1\%$ درصد افزایش یافت که افزایش ۶ درصدی را نشان می‌دهد. ممکن است در برخی از کاربردها مقدار عبور بسیار کمی برای قطعات الکتروکرومیک در بیشینه حالت‌های رنگی نیاز باشد. نسبت کنتراست^۱ تعریف شده به صورت $\zeta = T_{\text{colored}}/T_{\text{bleached}}$ بین ۳ و ۶ برای خصوصیات نورتاب و خورشیدی قطعات الکتروکرومیک معمول است [۹، ۱۷]. هرچند که $\zeta > 10$ در بعضی از کارهای اخیر اعلام شده است. لازم است T_{bleached} زیاد باشد که تمایل دارد T_{colored} خیلی بزرگ باشد و در اینصورت پنجره قادر نخواهد بود به اندازه کافی برای استفاده‌های معماری تیره شود. برای سایر کاربردها مانند سقف برقی ماشین‌ها $T_{\text{bleached}} = 15\%$ است و انتظار می‌رود که در این مورد

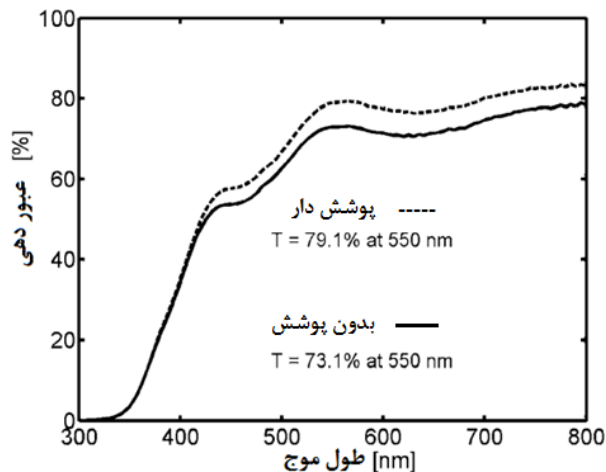
² Sung-IkPark

³ Nano particle deposition system (NPDS)

¹ Contrast ratio



شکل ۶- عبور با زمان در $\lambda = 550 \text{ nm}$ برای رنگ‌آمیزی و بی‌رنگی تکرار شده قطعه ذکر شده در شکل ۳ [۱۷].



شکل ۷- طیف عبوری یک قطعه EC نوع ورقه‌ای با و بدون عملیات ضد بازتاب [۱۷].

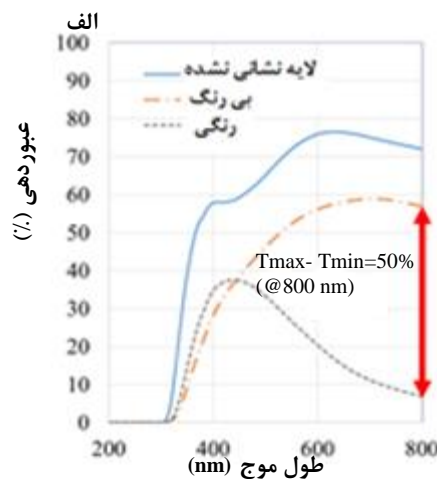
در فیلم WO₃ لایه نشانی شده روی FTO شیشه در شکل ۱۰ نشان داده شده است و آشکار می‌کند که بایاس اعمالی کوچکی برای تغییر رنگ لازم است و با توجه به این ولتاژ کم مورد نیاز این قطعه مصرف انرژی پایینی دارد.

جدول ۱- شرایط لایه نشانی NPDS [۹، ۱۷].

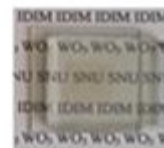
پارامتر	مقدار
فاصله بین نازل و زیرلایه (mm)	۳
فشار هوای فشرده (MPa)	۰/۳
فشار محفظه (KPa)	۱۰
نرخ تغذیه پودر (mm ³ /min)	۵
سرعت هوای فشرده (m/s)	۳۰۰
سرعت نگهدارنده (μm/s)	۵۰
گاز حامل	هوای فشرده
ماده الکتروکرومیک	WO ₃
زیرلایه	شیشه ITO
زیرلایه	شیشه FTO

در این پژوهش فیلم WO₃ روی زیر لایه ITO و FTO^۱ با استفاده از روش NPDS تحت شرایط خلا پایین و دمای اتاق لایه نشانی شد. شکل ۸ و ۹ به ترتیب طیف عبوری فیلم لایه نشانی شده روی ITO و FTO را نشان می‌دهد که در دو حالت بی‌رنگ و رنگی طیف عبوری از نمونه‌ها ثبت گردیده است. در جدول ۲ عبور از گونه‌ها در حالت بی‌رنگ قبل یا بعد از عملیات حرارتی در ۳۰۰ °C برای یک ساعت فهرست شده است. همانطور که از شکل ۸ و ۹ و جدول ۳ مشخص است فیلم لایه نشانی شده روی شیشه FTO تباین الکتروکرومیک ۵۰ درصدی در طول موج ۸۰۰ نانومتر را نشان می‌دهد (T_{min}=۷٪، T_{max}=۵۷٪) [۹، ۱۷]. نتایج XRD نیز آشکار کرده است که فیلم نازک WO₃ ساختاری مونوکلینیک را با توجه به قله‌ها نشان داده است. خصوصیات الکتروشیمیایی فیلم WO₃ با استفاده از یک سلول سه الکترودی با الکتروده همراه Pt و یک الکتروده مرجع Ag/AgCl بررسی شد. یک محلول ۰/۱ مولار از LiClO₄ در پروپیلن کربنات (PC) به عنوان الکترولیت استفاده شد. ولتاژ چرخه‌ای مورد استفاده به منظور بررسی فرآیند نفوذ/خروج Li⁺

^۱ Fluorine-doped tin oxide (FTO)



ب

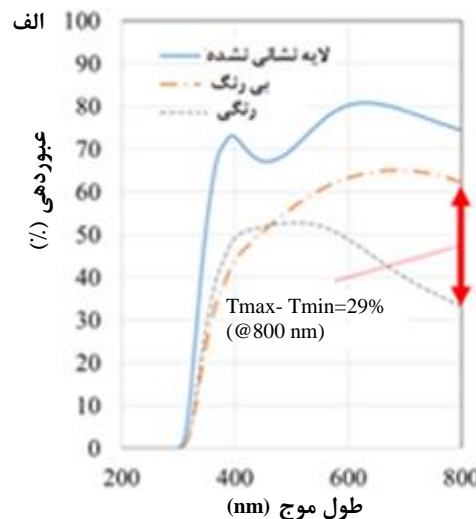


بی‌رنگ شدن

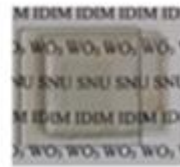


رنگی شدن

شکل ۸-الف) طیف عبوری فیلم WO₃ لایه نشانی شده روی شیشه FTO و ب) تصویر حالت‌های بی‌رنگ (بالا) رنگی (پایین) [۹، ۱۷].



ب



بی‌رنگ شدن



رنگی شدن

شکل ۹-الف) طیف عبوری فیلم WO₃ لایه نشانی شده روی شیشه ITO و ب) تصویر حالت‌های بی‌رنگ (بالا) رنگی (پایین) [۹، ۱۷].

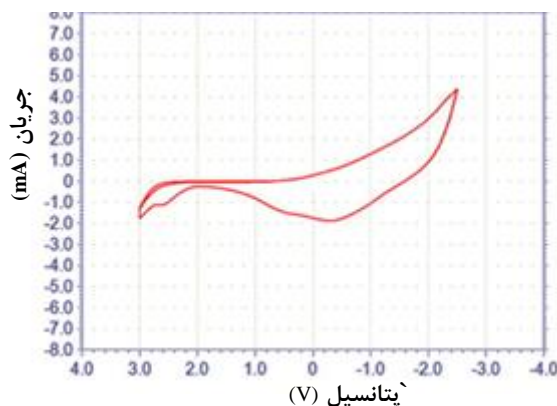
مقاله

جدول ۲- عبور نمونه‌های با و بدون عملیات حرارتی در 300°C برای یک ساعت، عبور نمونه‌های فیلم WO_3 لایه‌نشانی شده در یک حالت بی رنگ و عملیات بازپخت‌شده و نشده [۹، ۱۷].

ردیف	شیشه ITO	شیشه FTO	عبوردهی در 800 نانومتر
۱	%۷۴	%۷۲	FTO و ITO لایه نشانی نشده
۲	%۶۱	%۵۷	WO_3 لایه نشانی شده، بی رنگ، W/O عملیات حرارتی شده
۳	%-۱۳	%-۱۵	اختلاف عبور در دو ردیف ۱ و ۲ این جدول
۴	%۶۲	%۵۷	WO_3 لایه نشانی شده، بی رنگ، W/ عملیات حرارتی شده
۵	%-۱۲	%-۱۵	اختلاف عبور در دو ردیف ۴ و ۱ این جدول

جدول ۳- ثابت‌های الکتروکرومیک و عبوری نمونه‌های با و بدون عملیات حرارتی در 300°C در یک ساعت [۹، ۱۷].

عبوردهی در 800 نانومتر	شیشه FTO		شیشه ITO	
	W/O عملیات حرارتی شده	W/O عملیات حرارتی شده	W/O عملیات حرارتی شده	W/O عملیات حرارتی شده
بیشینه عبوردهی (بی رنگ)	%۵۷	%۵۷	%۶۱	%۶۲
کمینه عبوردهی (رنگی)	%۱۰	%۷	%۳۳	%۳۳
اختلاف عبور بیشینه و کمینه	%۴۷	%۵۰	%۲۸	%۲۹



شکل ۱۰- نمودار جریان-ولتاژ چرخه‌ای فیلم WO_3 لایه‌نشانی شده روی شیشه FTO در اندازه $(10\text{ mm} \times 10\text{ mm})$ در یک الکترولیت 0.1 مولار از LiClO_4 /پروپیلن کربنات (PC) [۹، ۱۷].

مانند KOH یا LiOH به طور گسترده‌ای مطالعه شده است. برای مثال گروه گرانکوویست^۱ گزارش کرد که اسپاترینگ اکسید نیکل با اکسید وانادیم خصوصیات الکتروکرومیک خوبی را تولید کرد [۱۸، ۱۲]. سون ها پارک و همکارانش فیلم اکسید نیکل را با روش سل-ژل با استفاده از دو حلال N_2N -دی متیل آمینواتانول^۲ و محلول آبی N_2N -دی متیل آمینواتانول و dmaeh با روش غوطه‌وری در شرایط مرطوب و داغ تهیه کردند. دو نوع حلال به ترتیب به S1 و S2 ارجاع داده می‌شوند. شکل ۱۳ طرح‌واری از سیستم غوطه‌وری را نشان می‌دهد. فیلم‌های اکسید نیکل یک ساختار بسیار متخلخل با ضخامت میکرومتری دارد. این فیلم‌ها افزایش عملکرد الکتروکرومیک خوبی مشابه ظرفیت بار، تغییرات عبور نوری و بهره رنگ آمیزی بهبود یافته (CE) را در یک آزمون الکتروشیمیایی سه الکترودی و بر پایه لیتیم در قطعه الکتروکرومیک با ساختار "اکسید تنگستن/ الکترولیت Li^+ / اکسید نیکل" نشان دادند [۱۷، ۱۳].

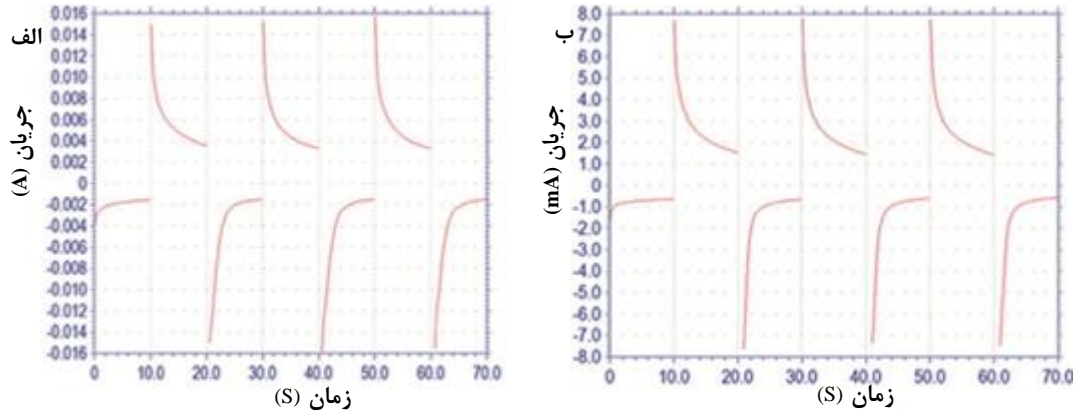
شکل ۱۱ پایداری چرخه‌ای الکتروشیمیایی فیلم WO_3 لایه‌نشانی شده روی شیشه FTO و ITO را نشان می‌دهد. در طول آزمون چرخه‌ای، پوسته شدن WO_3 از روی FTO یا ITO در محلول الکترولیت مشاهده نشد. این آشکار می‌کند که لایه‌ی نشانداده شده WO_3 به شدت به FTO یا ITO چسبیده است. فرآیندهای باردار شدن متقارن، متناظر با اکسایش و کاهش فیلم WO_3 با کرومکولومتری (مطالعه خواص سطح الکتروود با زمان) مشاهده شد که در شکل ۱۲ به خوبی قابل مشاهده است و همچنین دیده می‌شود که تنها بار کوچکی در ولتاژ اعمالی برای تغییر فام لازم است [۹، ۱۷].

۶- قطعات بر پایه اکسید نیکل (NiO)

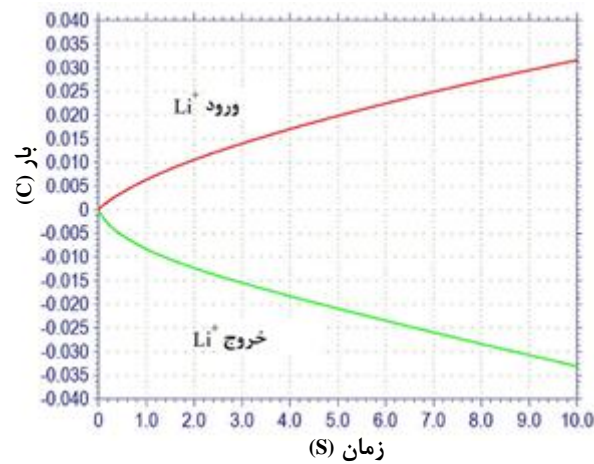
در بین مواد الکتروکرومیک گزارش شده کنونی، اکسید نیکل یک ماده قابل قبول است. اکسید نیکل بازده الکتروکرومیک $(30-50\text{ cm}^2/\text{C})$ ، گستره دینامیک وسیع، نسبت تباین رنگی بالا بین مشکی-قهوه‌ای، شفاف و قیمت پایین دارد. فیلم الکتروکرومیک اکسید نیکل در یک الکترولیت پایه پروتونی

¹ Granqvist

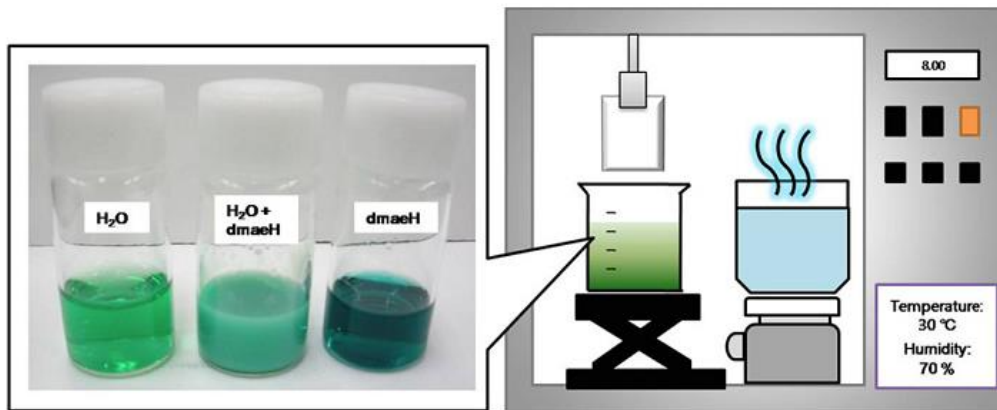
² N,N- dimethyl aminoethanol



شکل ۱۱- تغییرات جریان با زمان از الف) یک فیلم WO_3 نشانی شده روی شیشه FTO و ب) یک فیلم WO_3 نشانی شده روی شیشه ITO: $2/5$ - ولت برای کاهش (رنگی) و $3/0$ برای اکسایش (بی‌رنگی) نمونه‌ها [۱۷، ۹].



شکل ۱۲- کروئوکولومتری فیلم WO_3 نشانی شده روی شیشه FTO در اندازه $(10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm})$ در یک الکترولیت 0.1 مولار از $LiClO_4$ /پروپیلن کربنات (PC) در ولتاژهای در گستره $2/5$ - تا $3/0$ ولت [۱۷، ۹].



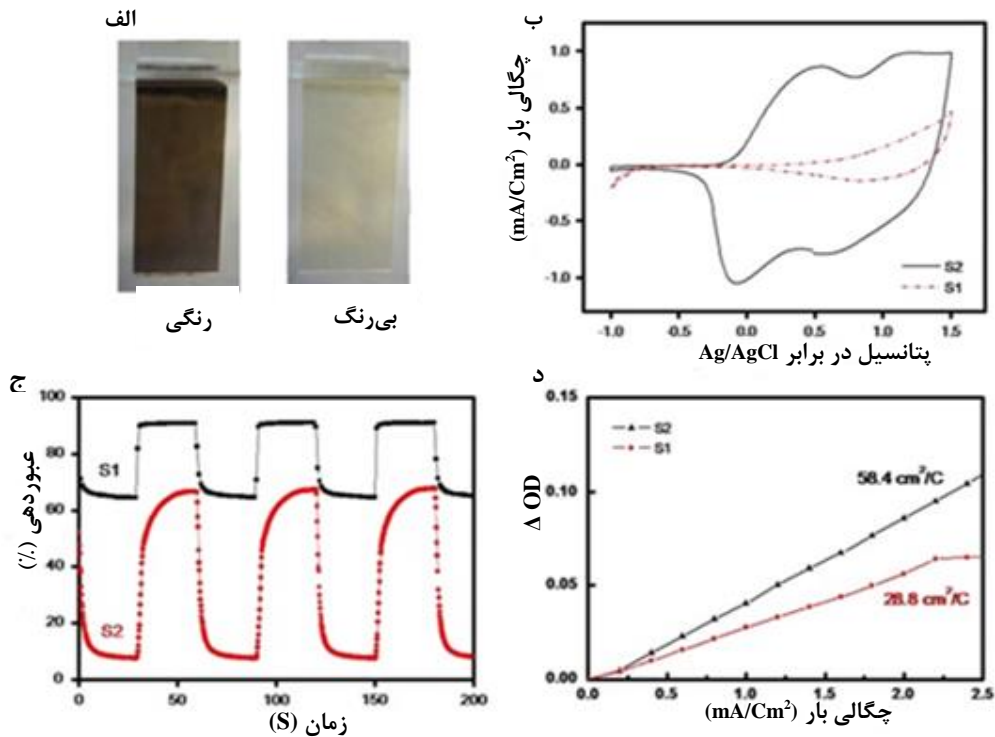
شکل ۱۳- شرح طراحی از سیستم غوطه‌وری [۱۷].

و $S2$ ثبت شده در سه چرخه با نرخ اسکن 50 Vs^{-1} و محلول در $LiClO_4$ یک مولار درون پروپیلن کربنات (PC) در مقابل الکترود مرجع $Ag/AgCl$ نشان می‌دهد. در شکل ۱۵ فیلم اکسید نیکل همراه با فیلم اکسید تنگستن، بکار برده شده در یک قطعه الکترود کرومیک باتری مانند نشان داده شده است.

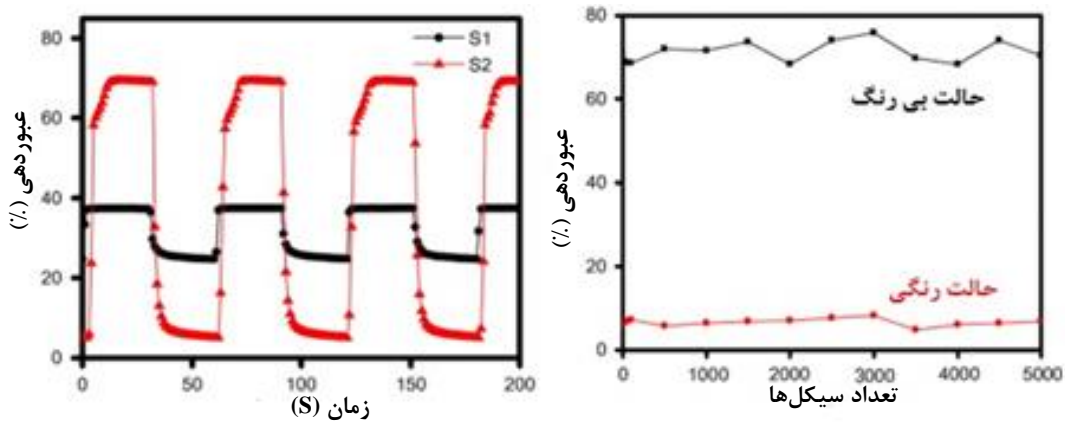
¹Propylene Carbonate (PC)

شکل ۱۴ عملکرد الکترود کرومیک فیلم اکسید نیکل را در آزمون نیم‌سلول نشان داد. فیلم اکسید نیکل نسبت تباین رنگی بالایی بین دو حالت بی‌رنگ و رنگی نشان می‌دهد. هر چند که فیلم اکسید نیکل هنگامی که به صورت آندی قطبیده می‌شود به رنگ مشکی-قهوه‌ای بسیار یکنواخت در می‌آید، هنگام قطبیده شدن به صورت کاتدی شفاف می‌شود. در شکل ۱۴ الف این تغییرات نشان داده شده‌اند. شکل ۱۴ ب نمودار CV فیلم اکسید نیکل با $S1$

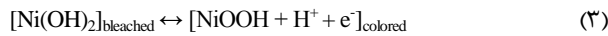
مقاله



شکل ۱۴- عملکرد الکتروکرومیک با نیم سلول: الف) تصاویر تغییر عبور را نشان می دهد، حالت رنگی (چپ) و حالت بی رنگ (راست)، ب) طرح CV اکسید نیکل با S1 (خط چین) و S2 (خط کامل، ج) تغییرات عبور در طول چرخه زنی پتانسیل مداوم: حالت رنگی و بی رنگ: S2 (■) و S1 (●) و د) بازده کوانتومی اندازه گیری شده با کروموپتانسومتری: S2 (▲) و S1 (●) [۷].



شکل ۱۵- عملکرد الکتروکرومیک $NiO/Li^+/WO_3$: الف) تغییرات در عبور نوری: S2 (▲) و S1 (●)، ب) تلفیق عبور نوری در طول آزمون ۵۰۰۰ چرخه ای در قطعه الکتروکرومیک: حالت بی رنگ (■) و رنگی (●) و ج) تصاویر تغییر عبور را نشان می دهد، حالت بی رنگ (چپ) و حالت رنگی (راست) [۱۳].



درکی از خصوصیات نوری تحت تبادل یون و تفاوت‌های اساسی بین اکسیدهای کاندی و آندی با در نظر گرفتن ساختار نواری الکترونی مناسب برای اکسیدهای شامل "بلوک‌های سازنده" هشت وجهی می‌تواند ایجاد شود. نوارهای 2p اکسیژن از ترازهای d فلزی جدا می‌شوند و تقارن هشت وجهی به شکافتگی ترازهای d به نوارهایی با نماد قراردادی e_g و t_{2g} منجر می‌شود [۱۹، ۱۴].

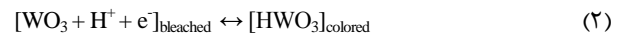
شکل ۱۶ به صورت طرح‌واره موادی که قطعا برای اکسیدهای آندی و کاندی معمول مناسب‌اند نشان می‌دهند. نواحی سایه‌ای حالت‌های پرشده را مشخص می‌کند و E بر انرژی دلالت دارد. طرح نوار سمت چپ تعیین شده برای H_xWO_3 ، نشان می‌دهد که نوار 2p برای O از نوار d شکافته شده با یک گاف انرژی جدا می‌شود. در WO_3 خالص برای O نوار پر 2p و نوار خالی d وجود دارد و بنابراین به عنوان رسانای شفاف با گاف نوار پهن مشخص شده است. جاگذاری یون‌های کوچک و الکترون‌های همراه به پر شدن جزئی نوارهای d پیروی کننده از جذب نوری منجر می‌شود که در پایین به آن‌ها اشاره شده است. پر شدن پایین‌ترین حالت‌ها در گاف نوار، اجازه گذار نوری در عرض گاف نواری را تنها با انرژی بزرگ‌تر از انرژی مربوط به WO_3 ناآلاییده می‌دهد که مشابه با سازوکار پهن شدگی گاف نواری برای مثال در آلیاژ In_2O_3 با Sn در ساخت ITO است. طرح میانی در شکل ۱۶ در اکسیدهای آندی کاربرد دارد. در اینجا اکسید خالص تعدادی حالت اشغال نشده t_{2g} دارد و انتظار می‌رود جاگذاری یون‌ها و الکترون‌ها، این حالت‌ها را به بالای نوار پر کند، بنابراین ماده با گاف نواری بین e_g و t_{2g} مشخص می‌شود. پس شفافیت در صورتی بدست می‌آید که این گاف به اندازه کافی پهن باشد. سرانجام برای V_2O_5 ، ساختار به اندازه کافی از پایه هشت وجهی منحرف می‌شود که در نوار d یک قسمت کم انرژی باریک مستقر در بین گاف نواری را نمایش می‌دهد، همانطور که در سمت راست شکل ۱۶ نشان داده شده است [۱۹ و ۱۴].

فیلم اکسید تنگستن سنتز شده توسط روش سل-ژل به عنوان یک لایه الکتروکرومیک همراه با هر یک از دو فیلم اکسید نیکل متفاوت به عنوان الکتروده همراه در قطعه نشان داده شده در شکل ۱۴ استفاده شده است. در قیاس با قطعه الکتروکرومیک کامل تهیه شده از نمونه S1، فیلم تهیه شده از نمونه S2 نسبت عبور نور در مقابل نور بیرونی (PTR) و تغییرات عبور نوری را نشان می‌دهد. مقادیر PTR به عنوان نسبت بین عبور نوری در حالت‌های بی‌رنگ و رنگی توصیف می‌شود ($\text{PTR} = \text{Tb}/\text{Tc}$) و عامل مهمی در تعیین بازده الکتروکرومیک است [۱۳].

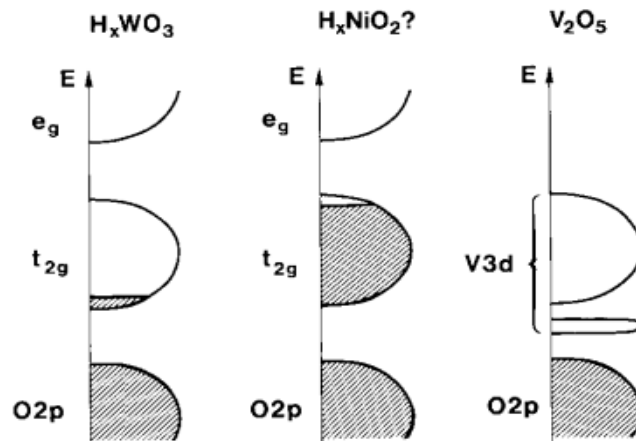
۷- دلایل جذب نوری

تحقیقات بسیاری در باره منشا جذب نوری در اکسیدهای الکتروکرومیک که موضوع پیچیده‌ای است صورت گرفته است. همانطور که در بالا اشاره شد یک مورد این است که اکسیدها با توجه به بلورینگی ضعیفی که دارند، می‌توانند یون‌های متحرک و مولکول‌های آب را در درجه‌ای متفاوت با هم ترکیب کنند. مشکل بعدی، برآیند این حقیقت است که حتی ساختار الکترونی ذاتی برای موادی مانند NiO برای چند دهه بدون هیچ اجماعی بحث شده است. در اینجا برای مواد الکتروکرومیک با تمرکز بر یک ترکیب مورد علاقه و خاص از اکسیدهای الکتروکرومیک رنگ‌پذیر آندی و کاندی برپایه تنگستن (W) و نیکل (Ni)، سازوکار جذب نوری به صورت مرحله به مرحله بیان شده است. این اکسیدهای خاص با توجه به قطعات بحث شده‌اند:

ورود و خروج پروتون‌ها (یون‌های هیدروژن) و الکترون‌ها در WO_3 می‌تواند با واکنش الکتروشیمیایی ساده ۲ نشان داده شود [۱۷، ۹].



باید یادآوری شود که H^+ می‌تواند با برخی یون‌های کوچک دیگر (مانند Li^+) جایجا شود. واکنش به منظور برگشت پذیر شدن تنها باید ناتمام باشد، بنابراین ترکیب رنگی شده باید به صورت H_xWO_3 با $x < 0.5$ باشد. واکنش متناظر برای اکسیدهای پایه نیکل که انتظار می‌رود به مرزخانه‌های آبدار محدود شده باشد، به صورت زیر است:



شکل ۱۶- ساختار نواری طرح‌واره برای دسته‌های مختلف اکسیدهای الکتروکرومیک [۱۹ و ۱۴].

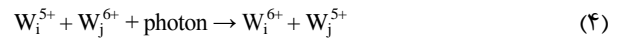
مقاله

یون به محدودیت ترازهای جاگذاری به تبدیل $W^{5+} \leftrightarrow W^{6+}$ تمایل غالب دارد، در کل در یک موقعیت عملی چنین اثرات "اشباع جایگاه" ممکن است خیلی مهم نباشد [۱۹، ۱۴].

۸- نتیجه گیری

با توجه به روش های سنتز و لایه نشانی مرسوم اکسیدهای فلزی نانوساختار به عنوان موادی پایدار و مناسب برای استفاده در قطعات الکتروکرومیک می باشند. از طرفی نیاز به کاهش مصرف انرژی و کنترل پذیری این دسته از قطعات با یک سیستم رایانه ای و از راه دور با توجه مزایای مناسب این مواد، کاربردهای مختلف برای مواد الکتروکرومیک مانند استفاده در پنجره های هوشمند، نمایشگرها، آینه های ضد بازتاب برای دید عقب خودروها، عینک ها و موارد دیگر می تواند وجود داشته باشد. در راستای پیشرفت مواد و قطعات الکتروکرومیک بررسی بیشتری روی این مواد قابل انجام است تا توجیه پذیری اقتصادی و پایداری آنها افزایش یابد.

آلایش کم V_2O_5 به پر شدن این نوارهای شکافته شده منجر می شود و آلایش حاصل، نوار شکافته شده را کاملا اشغال می کند بنابراین گاف نوری موثر پهن می شود. این ویژگی ها بر این واقعیت به حساب می آیند که V_2O_5 به طور خالص کاتدی یا آندی نیست. هنگامی که یون ها و الکترون ها جاگذاری می شوند، الکترون ها روی جایگاه های تنگستن جایگزیده می شوند، بنابراین برخی از جایگاه های W^{6+} به جایگاه های W^{5+} تبدیل می شوند. با جذب یک فوتون، الکترون های جاگذاری شده می توانند انرژی کافی برای تبدیل به یک جایگاه همسایه را کسب کنند. این تبدیل بین جایگاه های i و j به صورت رابطه ۴ می تواند نوشته شود [۱۹، ۹].



این سازوکار فقط مادامی موثر است که گذار از حالت اشغال شده با یک الکترون به جای خالی اتفاق بیافتد که می تواند بوسیله یک الکترون اشغال شود. اگر جاگذاری یون و الکترون به اندازه کافی بزرگ باشد نه تنها تبدیل از نوع $W^{5+} \leftrightarrow W^{6+}$ مهم است بلکه $W^{4+} \leftrightarrow W^{6+}$ و $W^{4+} \leftrightarrow W^{5+}$ نیز مهم است. در حالیکه احتمالات داشتن برگشت پذیری شدید تبدیل

۶- مراجع

- E. Summary, "Stern Review: The Economics of Climate Change", http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sterreview_report_complete.pdf.
- B. A. Korgel, "Composite for smarter windows", *Nature*. 500, 8–9, 2013.
- F. Blanchard, B. Baloukas, and L. Martinu, "Highly durable electrochromic tungsten oxide thin films prepared by high rate bias-enhanced sputter deposition", *Appl. Mater. Today*, 12, 235–243, 2018.
- P. M. S. Monk, R. J. Mortimer, D. R. Rosseinsky, "Electrochromism: Fundamentals and Applications", The Pineal Complex, United States of America by Cambridge University Press, New York, 2007.
- "United Nations Environment Programme, environment for development", <http://www.unep.org/sbci/AboutSBICI/Background.asp>.
- C. G. Granqvist, A. Azens, P. Heszler, L. B. Kish, L. Österlund, "Nanomaterials for benign indoor environments: Electrochromics for smart windows, sensors for air quality, and photo-catalysts for air cleaning", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 91, 355–365, 2007.
- H. K. Koduru, H. M. Obili, G. Cecilia, "Spectroscopic and electrochromic properties of activated reactive evaporated nanocrystalline V_2O_5 thin films grown on flexible substrates", *Int Nano. Lett.* 24, 1–8, 2013.
- C. M. Lampert, "Optical switching technology for glazings", *Thin Solid Films*. 236, 6–13, 1993.
- C. G. Granqvist, "Nanotechnology for the Energy Challenge", The Pineal Complex, Garcia-martinez, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010.
- H. Najafi-Ashtiani, A. Bahari, and S. Ghasemi, "A dual electrochromic film based on nanocomposite of copolymer and WO_3 nanoparticles: Enhanced electrochromic coloration efficiency and switching response", *J. Electroanal. Chem.* 774, 14–21, 2016.
- و. یکه فلاح، آ. سلیمانی گرگانی و ش. روحانی، "مروری بر مواد الکتروکرومیک و کاربردهای آن"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۳، ۵۶–۴۷، ۱۳۹۲.
- S. K. Deb, "Opportunities and challenges in science and technology of WO_3 for electrochromic and related applications", *Sol. Energy Mater. Sol.* 92, 245–258, 2008.
- S. H. Park, J. W. Lim, S. J. Yoo, I. Y. Cha, Y. E. Sung, "The improving electrochromic performance of nickel oxide film using aqueous N,N-dimethylaminoethanol solution", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 99, 31–37, 2012.
- C. G. Granqvist, "Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices", *Thin Solid Films*. 564, 1–38, 2014.
- G. A. Niklasson, C. G. Granqvist, "Electrochromics for smart windows: thin films of tungsten oxide and nickel oxide, and devices based on these", *J. Mater. Chem.* 17, 127–156, 2007.
- M. Da Rocha, Y. He, X. Diao, A. Rougier, "Influence of cycling temperature on the electrochromic properties of WO_3/NiO devices built with various thicknesses", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 177, 57–65, 2018.
- S. I. Park, S. Kim, J. O. Choi, J. H. Song, M. Taya, S. H. Ahn, "Low-cost fabrication of WO_3 films using a room temperature and low-vacuum air-spray based deposition system for inorganic electrochromic device applications", *Thin Solid Films*. 589, 412–418, 2015.
- Q. Huang, Q. Zhang, Y. Xiao, Y. He, X. Diao, "Improved electrochromic performance of NiO-based thin films by lithium and tantalum co-doping", *J. Alloys Compd.* 747, 416–422, 2018.
- R. T. Wen, M. A. Arvizu, G. A. Niklasson, C. G. Granqvist, "Electrochromics for energy efficient buildings: Towards long-term durability and materials rejuvenation", *Surf. Coatings Technol.* 290, 135–139, 2016.