

رشد میکرومتری نانوصفحه‌های شش ضلعی هسته مشترک پنتاکسید وانادیم به‌عنوان ماده فعال الکتروود کاتد باتری یون لیتیم

زهرا فرخی^۱ حسن غفوری فرد^۲ زینب سنایی^۳ حسین غفاریان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

z.farrokhi@aut.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

ghafourifard@aut.ac.ir

۳- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران

z.sanaee@ut.ac.ir

۴- دانش‌آموخته- دانشکده شیمی- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

chem.ghafarian@gmail.com

چکیده: سنتز نانوساختار پنتاکسید وانادیم با استفاده از روش رفلکس و بدون استفاده از مواد افزودنی مانند واکنش‌دهنده‌های سطحی ارائه می‌شود. رشد نانوساختارها در شرایط واکنش مختلف مانند دما و غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. مورفولوژی نانوساختارها، نانوصفحه‌های شش ضلعی میکرومتری است که از هسته‌ای مشترک رشد می‌کنند. قطر شش ضلعی‌ها در حدود ۵ μm و ضخامت نانوصفحه‌ها کمتر از ۲۵۰nm است. نتایج پراش اشعه ایکس بیانگر این است که در مرحله رفلکس نانو ذرات وانادات آمونیوم هیدراته تشکیل می‌شود. میکروساختار پنتاکسید وانادیم از کلسینه کردن وانادات آمونیوم هیدراته در دمای ۴۰۰°C به دست می‌آید. این نانوساختار به‌عنوان ماده‌ی فعال الکتروود کاتد در باتری نیم سل یون لیتیم با یک پیک آندی و کاتدی از نظر الکتروشیمیایی فعال است و واکنش برگشت پذیر انجام می‌دهد.

کلمات کلیدی: نانوصفحه شش ضلعی، پنتاکسید وانادیم، الکتروود کاتد، باتری یون لیتیم، رفتار الکتروشیمیایی

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۲/۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله : ۱۳۹۵/۰۸/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۱۱/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر حسن غفوری فرد

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده‌ی برق

۲- روش تجربی

۲-۱- سنتز نانوذره‌های میکرومتری پنتاکسید

وانادیم

۲۳/۴ mL ایزوپروپانول و ۴/۴ mL محلول آبی NH_4OH با ۳/۱ g از پودر V_2O_5 مخلوط می‌شود. رنگ زرد پودر پنتاکسید وانادیم تیره‌تر شده و تقریباً زرد سبز زیتونی می‌شود. بالن محتوی مخلوط در حالت دینامیک به مدت ۳ h در حمام روغن در حالت رفلکس قرار داده می‌شود. سپس محلول در یک بشقاب شیشه‌ای در آن دمای 60°C به مدت ۴۸ h خشک می‌شود. برای به دست آوردن محصول نهایی نانوساختار پنتاکسید وانادیم، ماده حاصل در حرارت 400°C در مدت ۲/۵ h خشک می‌شود. برای بررسی تاثیر عوامل موثر در سنتز نانوساختار پنتاکسید وانادیم مانند دمای رفلکس و غلظت یون‌های آمونیوم، سنتز را در شرایط مختلف دمای رفلکس 60°C ، 70°C و 90°C و محلول آمونیای ۰/۵، ۲/۱ و ۴/۲ مولار انجام می‌دهیم.

۲-۲- ساخت الکتروود و آماده‌سازی سل

ماده رسانایی که به‌طور معمول در پژوهش‌های باتری استفاده می‌شود کربن بلک یا استیلن‌بلک نام دارد. در این مقاله به جای کربن بلک از گرافیت استفاده شده است. برای ساخت الکتروود ابتدا ماده فعال سنتز شده را با افزودنی رسانا و چسب با نسبت ۵:۱۰:۸۵ در حلال ۱- متیل ۲- پیرولیدون (NMP) مخلوط می‌کنیم و سپس سطح فویل آلومینیوم را از خمیر حاصل می‌پوشانیم. الکترودهای حاصل را به مدت ۱۲h داخل کوره‌های خلا در دمای 90°C قرار می‌دهیم تا الکتروود خشک شود.

بررسی رفتار الکتروشیمیایی الکتروود کاتد به صورت نیم سل انجام می‌شود. در باتری نیم سل یون لیتیم، یک الکتروود همیشه فلز لیتیم است و طرف دیگر الکتروود آند یا کاتد است و مابین آن‌ها جداکننده قرار می‌گیرد. در این مقاله برای تهیه الکتروولیت، LiPF_6 ۱ مولار را در EC/DMC با نسبت ۱:۱ حل می‌نماییم. جداکننده از جنس پلی‌پروپیلن متخلخل است. ساخت سل باتری در جعبه دستکش‌دار پر از گاز آرگون با سطح رطوبت کنترل شده زیر ۱ ppm انجام می‌شود.

۳- نتایج و توضیحات

۳-۱- ساختار و مورفولوژی

پیک‌های پراش بلورشناسی ماده‌ی حاصل از رفلکس در 70°C و در محلول آمونیای ۴/۲ مولار در شکل ۱ مشاهده می‌شود. پیک‌های پراش مربوط به وانادات آمونیوم هیدراته (JCPDS No 41-0492) با فرمول مولکولی $\text{NH}_4\text{V}_3\text{O}_8 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ است. غلظت بالای یون

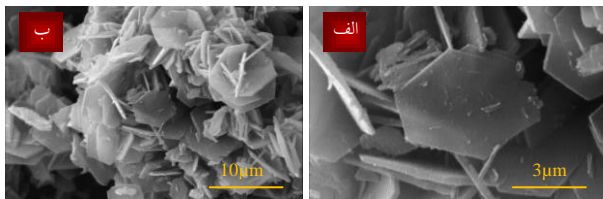
نانوساختارهای پنتاکسید وانادیم در باتری‌های یون لیتیم [۱۴تا]، در ابرخازن‌ها، سلول‌های خورشیدی، ترانزیستورها، انتشاردهنده‌های میدان و حس‌گرهای گاز مانند اتانول، هیدروژن و رطوبت به کار می‌روند [۱۵ تا ۲۰]. علاوه بر این، پنتاکسید وانادیم با شکاف باند مستقیم بانرژی ۲/۲-۲/۷ eV در الکترونیک نوری نیز به صورت آشکار- ساز، موجبر و سوئیچ‌های پرسرعت الکترونیکی کاربرد دارد [۲۱].

بازار وسایل الکترونیک قابل‌حمل نیازمند باتری‌های یون لیتیم تجدید پذیر به دلیل طول عمر بالا، چگالی انرژی بالا و ظرفیت ویژه بالای این باتری‌ها هستند [۲۲]. و برای رسیدن به این منظور، پنتاکسید وانادیم با ظرفیت نظری بالا، ولتاژ خروجی بالا، فراوانی و هزینه کم ماده‌ی مناسبی برای الکتروود کاتد باتری‌های یون لیتیم محسوب می‌شود [۱]. با این وجود هدایت الکترونیکی پایین پنتاکسید وانادیم و کم بودن ضریب نفوذ یون لیتیم در آن موجب خواهد شد تا قابلیت سرعت و ظرفیت عملی باتری کمتر از حد تئوری باشد [۲]. از این رو، سنتز نانوساختارهای پنتاکسید وانادیم با افزایش مساحت سطح تماس ماده با الکتروولیت می‌تواند با افزایش ظرفیت و پایداری آن در چرخه‌های شارژ و دشارژ و نیز بهبود قابلیت چگالی جریان بالا موجب بهبود عملکرد باتری یون لیتیم شود [۳].

نانوساختارهای پنتاکسید وانادیم به عنوان ماده کاتد باتری یون لیتیم با مورفولوژی‌های مختلف نانوسیم، نانومیله، نانولوله، نانوفیبر، نانوصفحه، نانوکره، میکروکره‌های متخلخل، میکروکره‌های متشکل از نانو ذرات، میکروگل و میکروکره‌های توخالی گزارش شده است [۴ تا ۱۲]. و تنها مورفولوژی از پنتاکسید وانادیم که به شش ضلعی نامنتظم شباهت دارد به تازگی با استفاده از روش CVD گزارش شد [۱۳]. نانومواد به دلیل انرژی سطحی ویژه بالایی که دارند مقاومت تماس بالایی در تماس با الکتروولیت ایجاد می‌کنند. برای جایگزینی، نانومواد که در ابعاد دیگر اندازه‌های چند میکرومتری دارند عملکرد شارژ و دشارژ سریعی از خود نشان می‌دهند [۱۴].

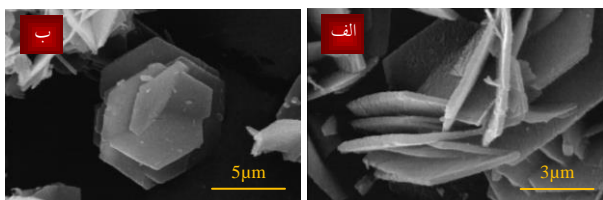
در این مقاله، رشد نانوصفحه‌های میکرومتری با شکل شش ضلعی سه‌بعدی هسته مشترک را ارائه می‌دهیم. سنتز با روش رفلکس انجام شده است. و نانوساختار پنتاکسید وانادیم با کلسینه کردن نهایی در دمای 400°C به دست می‌آید. شرایط مختلف موثر در واکنش مانند دمای رفلکس و غلظت‌های مختلف یون آمونیوم و تاثیر آن در مورفولوژی نانوساختار مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات الکتروشیمیایی نانوساختار نمونه با ولتاژ متری چرخه‌ای مطالعه شد. نتایج حاصل پتانسیل کاربرد نانوساختار در باتری‌های یون لیتیم را پیش بینی می‌نماید.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه حاصل از رفلکس در دمای 70°C و محلول آمونیای $4/2$ مولار در شکل ۳ نشان داده شده است. مورفولوژی وانادات آمونیوم هیدراته حاصل، نانوصفحه‌هایی با ساختار میکرووشش‌ضلعی است که از یک هسته مشترک شروع به رشد می‌نمایند. ضخامت این نانوصفحه‌ها باتوجه به اندازه آن‌ها متفاوت است و در کل کمتر از 250 nm است.



شکل (۳): (الف) و (ب) تصاویر SEM نانوصفحه‌های شش‌ضلعی هسته مشترک میکرومتری $\text{NH}_4\text{V}_3\text{O}_8 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ حاصل از رفلکس در دمای 70°C و محلول آمونیای $4/2$ مولار

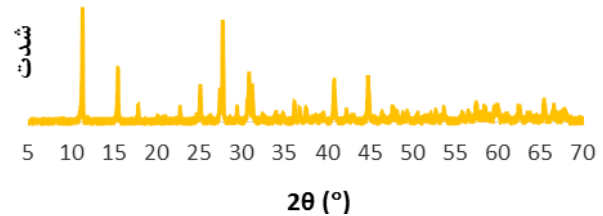
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پنتاکسید وانادیم حاصل از خشک شدن در دمای 400°C در مدت $2/5\text{ h}$ در شکل ۴ مشاهده می‌شود. مورفولوژی نمونه در اثر حرارت تغییر خاصی نکرده است. عدم تغییر مورفولوژی به دلیل عدم وجود الکل ایزوپروپانول است و اینکه مقدار آمونیاک موجود در ساختار آن قدر نیست که در این دما بتواند مورفولوژی نمونه را زیاد تغییر دهد. سطح نانوصفحه‌ها با تبخیر آمونیاک و آب موجود در ساختار وانادات آمونیوم هیدراته کمی ناصاف‌تر شده است.



شکل (۴): (الف) و (ب) تصاویر SEM نانوصفحه‌های شش‌ضلعی هسته مشترک میکرومتری V_2O_5 حاصل از رفلکس در دمای 70°C و محلول آمونیای $4/2$ مولار

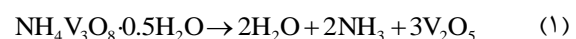
برای بررسی تغییرات ساختار و مورفولوژی وانادات آمونیوم هیدراته با افزایش دما، سنتز را با محلول آمونیای $4/2$ مولار در دمای رفلکس 60°C و 90°C انجام می‌دهیم. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. قطر شش‌ضلعی همانند نمونه‌های دمای 70°C در حدود $5\text{ }\mu\text{m}$ است و ضخامت نانوصفحه‌ها در کل کمتر از $250\text{ }\mu\text{m}$ است. در دمای رفلکس 60°C گاهی توده‌هایی میکرومتری که هنوز به‌طور کامل شکل نگرفته‌اند و هسته‌های متعدد آن از هم جدا نشده‌اند دیده می‌شود. این توده‌های ناقص در شکل ۵-ب) با فلش نشان داده شده است. هدف ما از تلاش برای رسیدن به نانو ذرات افزایش سطح موثر ذرات است. وجود چنین مجموعه‌های میکرومتری سه‌بعدی به‌صورت

آمونیم موجب تشکیل وانادات آمونیوم هیدراته می‌شود. و با تغییر شرایط واکنش مانند غلظت یون‌های آمونیوم در محلول آبی وانادات آمونیوم، مقادیر متفاوتی از یون‌های آمونیوم به ساختار بلوری می‌پیوندد. هیچ‌گونه پیکی که مربوط به عنصر کربن که در ساختار الکل ایزوپروپانول وجود دارد در الگو مشاهده نمی‌شود و تقریباً تمام الکل ایزوپروپانول در آن تبخیر شده است.

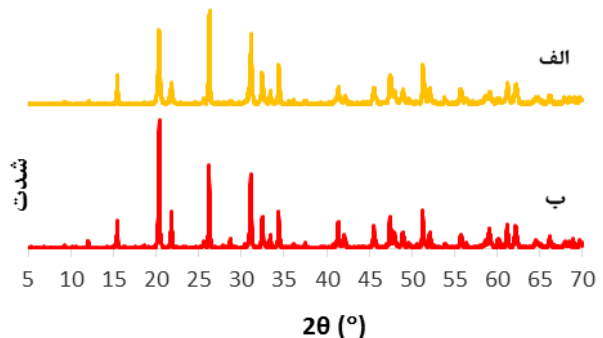


شکل (۱): الگوی پراش $\text{NH}_4\text{V}_3\text{O}_8 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ حاصل از رفلکس در دمای 70°C و محلول آمونیای $4/2$ مولار (JCPDS No 41-0492)

وانادات آمونیوم هیدراته حاصل با تبخیر آمونیاک و آب موجود در ساختار می‌تواند به پنتاکسید وانادیم تبدیل شود.

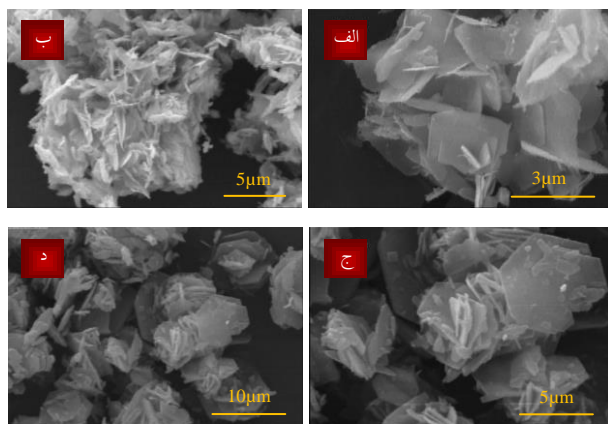


الگوی پراش پنتاکسید وانادیم تجاری و ماده حاصل از خشک شدن وانادات آمونیوم هیدراته در دمای 400°C و زمان $2/5\text{ h}$ در شکل ۲ مشاهده می‌شود. پیک‌های قرار گرفته در موقعیت‌های $15/46$ ، $20/38$ ، $21/82$ ، $26/22$ ، $31/10$ ، $32/46$ ، $33/40$ ، $34/36$ ، $36/12$ ، $37/40$ ، $37/40$ ، $41/22$ ، $42/106$ ، $45/56$ ، $47/36$ ، $47/186$ ، $48/86$ ، $49/56$ درجه به ترتیب مربوط به صفحات بلوری (200) ، (001) ، (101) ، (110) ، (100) ، (101) ، (111) ، (310) ، (211) ، (401) ، (002) ، (102) ، (411) ، (600) ، (302) ، (012) و (112) هستند. در پنتاکسید وانادیم تجاری چند پیک کوچک دیگر نیز دیده می‌شود که مربوط به پنتاکسید وانادیم نیستند و بیان‌کننده خلوص 98% پودر تجاری هستند. طبق رابطه پراش برگ $2d\sin\theta = n\lambda$ ، فاصله d برای صفحه (001) برابر 0.437 nm ، برای صفحه (110) برابر 0.340 nm و برای صفحه (100) برابر 0.288 nm است. از الگوی پراش دیده می‌شود که بیشترین شدت پراش در موقعیت $20/38^{\circ}$ است. این به این معنی است که بیشترین تبلور در راستای صفحه (001) است.



شکل (۲): الگوی پراش V_2O_5 (الف) حاصل از رفلکس در دمای 70°C و محلول آمونیای $4/2$ مولار، (ب) تجاری

مساله مشخص می کند که حضور یون آمونیوم و تشکیل وانادات آمونیوم هیدراته با غلظت خاص موجب هسته زایی، تشکیل شش ضلعی و از هم جدا شدن و یکنواختی نانو ذره ها می شود.



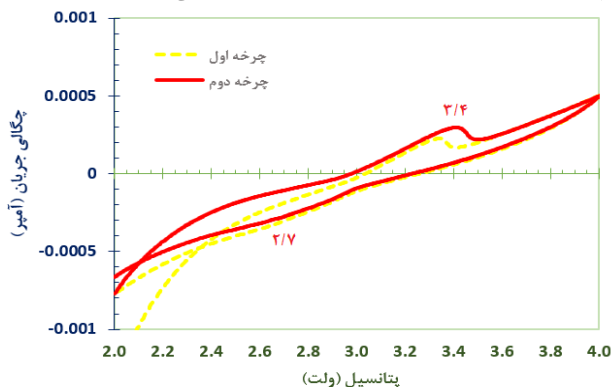
شکل (۶): تصاویر SEM نانوصفحه های شش ضلعی هسته مشترک میکرومتری $NH_4V_3O_8 \cdot 0.5H_2O$ حاصل از محلول آبی آمونیای (الف) و (ب) ۰/۵ مولار، (ج) و (د) ۲/۱ مولار

۳-۲- رفتار الکتروشیمیایی

فرایند نفوذ یون لیتیم به الکتروکاتد در هنگام دشارژ و خروج از آن را به هنگام شارژ باتری می توان به صورت زیر بیان کرد.

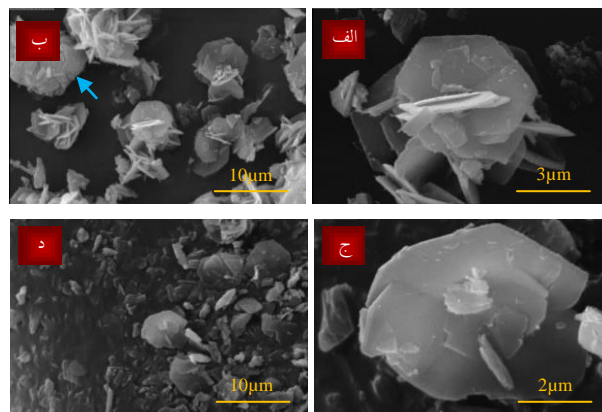


منحنی شارژ و دشارژ الکتروکاتد ساخته شده از نمونه رفلکس در دمای $70^\circ C$ و محلول آمونیای ۴/۲ مولار در ۲ چرخه اول و دوم در شکل ۷ نشان داده شده است. در چرخه اول یک قله آندی (شارژ باتری و خروج یون لیتیم از الکتروکاتد) و یک قله کاتدی (دشارژ باتری و ورود یون لیتیم از الکتروکاتد) به ترتیب در ولتاژهای ۳/۴۷ و ۲/۷۰۷ مشاهده می شود. قله آندی در چرخه دوم با افزایش در دامنه جریان به ولتاژ ۳/۴۰۷ منتقل شده است و قله کاتدی چرخه دوم تقریباً دوباره در همان ولتاژ ۲/۷۰۷ مشاهده می شود.



شکل (۷): منحنی ولتاژ متری چرخه ای در چرخه اول و دوم در محدوده ولتاژ ۴-۲ و نرخ پویش ۰/۱ mV/s. نانوذره در دمای $70^\circ C$ و محلول آمونیای ۴/۲ مولار سنتز شده است.

توده ای، در صورتی که زیاد باشند به معنی از دست دادن بخشی از مساحت سطح موثر است که ما از نانوصفحه ها انتظار داریم. این توده ها در اندازه های تقریبی $10 \times 10 \times 10 \mu m^3$ وجود دارند که هرچند در سطح آن ها نانوصفحه های شش ضلعی در حال شکل گیری هستند اما هنوز بخش مرکزی آن ها به طور کامل شکل نگرفته است و ساختارهایی با هسته های مختلف پراکنده و از هم جدا نشده اند. در دمای رفلکس $90^\circ C$ شش ضلعی های شکل گرفته همانند شش ضلعی های دمای $60^\circ C$ یا $90^\circ C$ گوشه های کامل تیز ندارند و بالا بودن انرژی در دمای $90^\circ C$ موجب تکه تکه شدن سریع تر بسیاری از نانو ذره های شکل گرفته شده است و نانو ذره های حاصل یکنواختی کمتری دارند. می توان نتیجه گرفت که مناسب ترین دمای رفلکس برای سنتز نانوصفحه های شش ضلعی هسته مشترک تقریباً یکنواخت، دمای $70^\circ C$ است که نانوصفحه های شش ضلعی یکنواخت تری تشکیل می دهد و نیز مجموعه های توده ای شکل نگرفته به ندرت در آن مشاهده می شود.



شکل (۵): تصاویر SEM نانوصفحه های شش ضلعی هسته مشترک میکرومتری $NH_4V_3O_8 \cdot 0.5H_2O$ حاصل از رفلکس در دمای (الف) و (ب) $60^\circ C$ ، (ج) و (د) $90^\circ C$

سنتزها با محلول آمونیای ۴/۲ مولار انجام شده است. برای بررسی تاثیر غلظت یون آمونیوم در ساختار و مورفولوژی نانوذره ها، سنتز را در دمای رفلکس $70^\circ C$ با محلول ۰/۵ مولار و ۲/۱ مولار انجام می دهیم. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه ها در شکل ۶ نشان داده شده است. در مولاریته ۰/۵-۶ (الف) و (ب) به دلیل تعداد بسیار کم یون های آمونیوم ساختار به طور کامل شکل نگرفته است. نانوصفحه ها بیشتر در سطح توده های میکرومتری شکل یافته اند. بیشتر صفحه ها چندین صفحه با هسته مشترک هستند اما به طور واضح شش ضلعی نیستند. در شکل ۶- (ج) و (د) که غلظت یون به مراتب بیشتر از حالت قبل است شش ضلعی ها به طور واضح تری شکل یافته اند اما ذرات با هسته های مختلف همچنان از هم جدا نشده اند و آرایش جدید نیافته اند. ضخامت نانوصفحه ها به طور معمول کمتر از ۱۰۰ nm است. و خود بیانگر رشد و آرایش جدید کمتر است. این

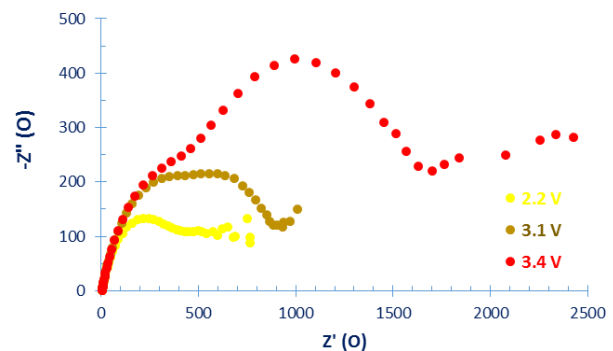
قطر شش‌ضلعی‌ها در حدود $5 \mu\text{m}$ است. تاثیر دمای رفلکس و غلظت یون‌های آمونیوم در سنتز مطالعه و بررسی شد. رفتار الکتروشیمیایی نانوساختار پنتاکسید وانادیم به‌عنوان ماده فعال الکتروکاتد باتری یون لیتیم در ۲ چرخه‌ی متوالی بررسی شده است. الکتروکاتد با افزایش شدت جریان در چرخه‌ی دوم نسبت به چرخه‌ی اول به‌خوبی واکنش برگشت‌پذیر انجام می‌دهد. ولتاژ بالای مدار با 3.15V این الکتروکاتد را مناسب کاربردهای انرژی بالا می‌نماید.

مراجع

- [1] H. Wang, "Facile synthesis of hierarchical and porous V_2O_5 microspheres as cathode materials for lithium ion batteries." *J. colloid and interface science*, 418, pp. 74-80, 2014.
- [2] Q. Yue, "Mesoporous single-crystalline V_2O_5 nanorods assembled into hollow microspheres as cathode materials for high-rate and long-life lithium-ion batteries." *Chemical Communications*, 50(87), pp. 13362-13365, 2014.
- [3] J. Shao, "Low-cost synthesis of hierarchical V_2O_5 microspheres as high-performance cathode for lithium-ion batteries." *ACS applied materials & interfaces*, 5(16), pp. 7671-7677, 2013.
- [4] H. Wang, "Electrospun V_2O_5 Nanostructures with Controllable Morphology as High-Performance Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries." *Chemistry-A European Journal*, 18(29), pp. 8987-8993, 2012.
- [5] Y. Wang, "Visible light photocatalysis of $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ nanoheterostructures prepared via electrospinning." *Materials Letters*, 75, pp. 95-98, 2012.
- [6] Y. Li, "Leaf-Like V_2O_5 Nanosheets Fabricated by a Facile Green Approach as High Energy Cathode Material for Lithium-Ion Batteries." *Advanced Energy Materials*, 3(9), pp. 1171-1175, 2013.
- [7] S. Liang, "Facile synthesis of nanosheet-structured V_2O_5 with enhanced electrochemical performance for high energy lithium-ion batteries." *Metals and Materials International*, 20(5), pp. 983-988, 2014.
- [8] Q. Song, "Fabrication of nanostructured V_2O_5 via urea combustion for high-performance Li-ion battery cathode." *RSC Advances*, 5(6), pp. 4256-4260, 2015.
- [9] S. Huang, "Annealed vanadium oxide nanowires and nanotubes as high performance cathode materials for lithium ion batteries." *Journal of Materials Chemistry A*, 2(34), pp. 14099-14108, 2014.
- [10] C. Reddy, "Simple Preparation of V_2O_5 Nanostructures and Their Characterization." 29(10), pp. 2061, 2008.
- [11] J. Huang, " V_2O_5 nanoflowers assembled by nanorods as cathode material for lithium-ion batteries." *Micro & Nano Letters, IET*, 10(12), pp. 686-688, 2015.
- [12] J. Liu, "Template-free solvothermal synthesis of yolk-shell V_2O_5 microspheres as cathode materials for Li-ion batteries." *Chemical Communications*, 47(37), pp. 10380-10382, 2011.
- [13] P. Kumar, and L. Hu, "Sulphur-reduced self-assembly of flower-like vanadium pentoxide as superior cathode material for Li-ion battery." *Journal of Alloys and Compounds*, 655, pp. 79-85, 2016.
- [14] J. Yu, "A porous vanadium pentoxide nanomaterial as cathode material for rechargeable lithium batteries." *Electrochimica Acta*, 89, pp. 292-299, 2013.

وجود قله آندی در چرخه‌ی اول به معنی انجام شدن عمل شارژ و خروج یون‌های لیتیم از الکتروکاتد است. وجود قله کاتدی به معنی انجام شدن عمل دشارژ در باتری و ورود یون‌های لیتیم به الکتروکاتد است. وجود مجدد پیک‌ها در چرخه‌ی دوم به معنی بازگشت‌پذیر بودن واکنش‌های اتفاقی افتاده است و این نشان می‌دهد باتری همچنان در چرخه بعدی شارژ و دشارژ می‌شود. بلندتر شدن پیک آندی و به‌عبارت‌دیگر افزایش جریان پیک آندی در چرخه‌ی دوم نسبت به چرخه‌ی اول نشان‌دهنده افزایش ظرفیت شارژ باتری در چرخه‌ی دوم به‌دلیل عبور جریان بیشتر است. و نشان می‌دهد که رفته‌رفته فرایند شارژ و دشارژ بهتر انجام می‌شود. این پدیده تر شونده‌گی نام دارد. یعنی بعد از اولین شارژ و دشارژ عمل شارژ و دشارژ بعدی بهتر انجام می‌شود. هر چه قله پیک‌ها بالاتر باشد به معنی انتقال تعداد بیشتری یون و بار الکتریکی است. و هر چه در دیگر نقاط دو منحنی آندی و کاتدی به هم نزدیک‌تر باشند نشان می‌دهد که در دیگر ولتاژها پدیده‌های شارژ و دشارژ بسیار مشابه هم عمل می‌کنند. بنابراین برای داشتن توان و ظرفیت بالا بهتر است عمق پیک‌ها بیشتر باشد. شایان‌ذکر است که ولتاژ مدار با باتری 3.15V اندازه‌گیری شد.

منحنی امپدانس الکتروشیمیایی در شکل ۸ نشان داده شده است. از مقایسه منحنی‌ها می‌توان فهمید که مقاومت نفوذ یون لیتیم در ولتاژ 3.1V کمتر از دو ولتاژ دیگر است. بر اساس منحنی‌ها مقادیر مقاومت انتقال بار $R_{ct} = 40\ \Omega$ و مقاومت الکتروولت $R_s = 4\ \Omega$ به دست می‌آید. می‌توان گفت که مقاومت انتقال بار و جرم مناسب است. و همان‌طور که نتایج ولتاژ متری چرخه‌ای در شکل ۸ نشان می‌دهد ماده از نظر الکتروشیمیایی فعال است و واکنش برگشت‌پذیر در چرخه‌های متوالی انجام می‌دهد.



شکل ۸: منحنی طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS)

۴- نتیجه‌گیری

مورفولوژی منحصربه‌فرد نانوصفحه‌های میکروشش‌ضلعی با هسته مشترک پنتاکسید وانادیم با روش رفلکس و خشک‌کردن در دمای 400°C سنتز شد. برای رشد این نانوساختارها از هیچ ماده افزودنی استفاده نشده است. ضخامت نانوصفحه‌ها در کل کمتر از 250 nm و

- [15] Y. Wang, W. Whang, and C. Chen, "Hollow V_2O_5 nanoassemblies for high-performance room-temperature hydrogen sensors." *ACS applied materials & interfaces*, 7(16), pp. 8480-8487, 2015.
- [16] J. Liu, "Vanadium pentoxide nanobelts: highly selective and stable ethanol sensor materials." *Advanced Materials*, 20(6), pp. 764-767, 201.
- [17] W. Chen, "Field Emission from V_2O_5 . n H_2O Nanorod Arrays." *The Journal of Physical Chemistry*, 112(7), pp. 2262-2265, 2008.
- [18] H. H. Jung, "Doping-free silicon thin film solar cells using a vanadium pentoxide window layer and a LiF/Al back electrode." *Applied Physics Letters*, 103(7), pp. 073903, 2013.
- [19] X. Zhou, "The Bamboo-Like Composites of V_2O_5 /Polyindole and Activated Carbon Cloth as Electrodes for All-Solid-State Flexible Asymmetric Supercapacitors." *ACS Applied Mater. & Inter.*, 2016
- [20] H. Yin, "Porous V_2O_5 micro/nano-tubes: Synthesis via a CVD route, single-tube-based humidity sensor and improved Li-ion storage properties." *Journal of Materials Chemistry*, 22(11), pp. 5013-5019, 2012.
- [21] Z. Li, "Ultrahigh Infrared Photoresponse from Core-Shell Single-Domain- VO_2/V_2O_5 Heterostructure in Nanobeam." *Advanced Functional Materials*, 24(13), pp. 1821-1830, 2014.
- [22] B. Sadeghi, R. Sarraf-Mamoory, "Enhancement of Charge-Discharge Capacity of $LiMn_2O_4$ Cathode Material by $LiFePO_4$ Phosphate Nanocoating." *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 12 (2), pp. 33-38, 2015.