

الگوی نشست نانوذرات اکسیدقلع تحت اعمال میدان‌های الکتریکی متناوب غیر یکنواخت

بتول مهرعلیان^{۱*}، بابک رئیسی^۱، رضا ریاحی‌فرا^۱، مازیار صهبا یغمایی^۱

^۱ پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۵/۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۸/۱۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۱۱/۱۹

چکیده در این پژوهش، الگوی نشست نانوذرات اکسیدقلع در محیط استن با اعمال میدان الکتریکی متناوب غیریکنواخت بر روی الکترودهای مسطح طلا مطالعه شده است. یکی از پارامترهای اساسی تاثیرگذار بر رفتار الکتروکینتیکی ذرات تحت اعمال میدان‌های الکتریکی، اندازه ذرات است. مشاهدات لایه نشانی در فرکانس ۱۰kHz نشان دهنده وجود ذرات میکرومتری بر سطح الکترودهای نشست است. در این مطالعه، عامل اندازه ذرات از دیدگاه ترسیم مقادیر فاکتورکلاسیوس- ماسوتی نشان دهنده وجود نیروی دی‌الکتروفورز منفی برای ذرات درشت و نیروی دی‌الکتروفورز مثبت برای ذرات ریز است.

کلمات کلیدی: الکتروکینتیک، کلاسیوس- ماسوتی، دی‌الکتروفورز، نانوذرات اکسیدقلع.

Deposition pattern Of Tin Oxide Nanoparticles Under Non-uniform AC Electric Fields

Batuol Mehralian^{*1}, Babak Raissi¹, Reza Riahifar¹, Maziar Safhba Yaghmayee¹

¹Department of Ceramic, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

Abstract In this research, deposition pattern of tin oxide nanoparticles in acetone media under non-uniform AC electric fields on planar gold electrodes have been studied. Particle size is one of the basic parameters affecting the electrokinetic behavior of particles under applied electric fields. Based on deposition pattern observations, micron size particles were deposited on electrode surface at frequency of 10 kHz. In this study, Clausius- Mossotti factor was depicted for different particle sizes. It indicates that for coarse particles dielectrophoretic force is negative and for fine particles dielectrophoretic force is positive.

Keywords: Electrokinetic, Clausius Mossotti factor, Dielectrophoresis, Tin oxide nanoparticles.

۱- مقدمه

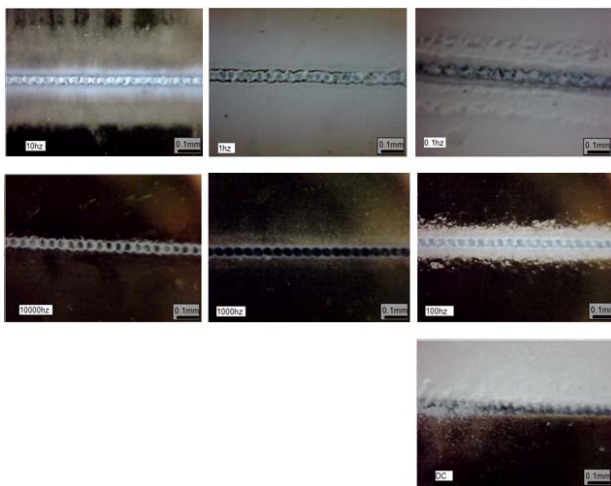
غلظت 0.2 gr/L و آماده سازی سوسپانسیون در حمام آلتروسونیک مدل RETSCH url به مدت ۱۵ دقیقه، لایه نشانی در ولتاژ و زمان به ترتیب 40 V و ۳ دقیقه در فرکانس-های ۰ تا ۱۰ کیلوهرتز به صورت تصاعدی با ضریب ۱۰ انجام شد. سطح پوشش‌های ایجاد شده توسط میکروسکوپ استریو صنایع اپتیک اصفهان مدل ZSM-۱۰۰۱-۳E مشاهده و توسط دوربین دیجیتالی Nikon Coolpix ۴۵۰۰ عکسبرداری شد. همچنین توزیع اندازه ذرات اکسیدقلع در محلول از طریق آنالیز اندازه ذره به وسیله دستگاه زتامتر (HAS, Molvern, u.k.) برآورد شد.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات اکسیدقلع
Fluka

۳- نتایج و بحث

تصویر میکروسکوپی از سطح لایه‌نشانی در فرکانس‌های مختلف بر روی الکتروود در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. لایه‌نشانی در میدان الکتریکی متناوب غیریکنواخت 40 V و زمان ۳ دقیقه تحت فرکانس‌های متفاوت.

نشست ذرات تحت اثر پدیده‌های متنوع الکتروکیمیایی موضوع مباحثات متعددی در سال‌های اخیر بوده است [۱-۳]. لایه نشانی الکتروفوریتیکی ذرات تحت اعمال میدان‌های الکتریکی مستقیم بیش از صد سال مورد توجه محققین این موضوع بوده و کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف تجاری، نظامی، پزشکی، داروسازی داشته است. در سال‌های اخیر استفاده از میدان‌های الکتریکی متناوب در لایه نشانی الکتروفوریتیکی به علت مزایایی همچون افزایش نرخ لایه نشانی، کاهش مصرف انرژی، کاهش واکنش‌های الکترولیز در محلول‌های آبی و استحکام و یکنواختی بهتر پوشش‌های ایجاد شده مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفته است. در خصوص ذرات سرامیکی به خصوص اکسیدی به لحاظ تاثیرگذاری و نقش بار الکتریکی این نتایج از تنوع بیشتری برخوردار می‌باشد. در عین حال حصول الگوهای متنوع در لایه نشانی به خصوص با ظهور و استفاده از ترکیبات نانو و غیر ایزوتروپیک و استعداد بهره‌گیری از لایه‌نشانی جهت‌دار و هم‌جهت در ذرات می‌توان کاربردهای مختلفی را متصور شد [۴،۵]. مهندسی حرکت و نشست ذرات نانو و ساخت قطعات نانو الکترونیک در این راستا قابل بررسی می‌باشد.

تحقیقات نشان داده عوامل بسیاری همچون حلال، ولتاژ، زمان و غلظت سوسپانسیون [۱] بر رفتار لایه نشانی ذرات در میدان‌های الکتریکی متناوب تاثیرگذار است. در این تحقیق رفتار الکتروکیمیایی و عواملی مختلف همچون فرکانس و اندازه ذره و تاثیر آنها بر رفتار نشست نانوذرات بررسی می‌گردد. ماده اولیه مورد بررسی اکسیدقلع با دانه‌بندی نانو است که یکی از ترکیبات نیمه‌هادی پرکاربرد در صنایع نیمه‌هادی می‌باشد.

۲- روش تحقیق

ماده مورد آزمایش ($\text{SnO}_2\text{-Fluka}(\#CH-9470)$) با تصویر میکروسکوپی نشان داده شده در شکل (۱)، در محیط استن ($\#100013$) Merck پراکنده سازی شده است. از الکترودهای طلا هم صفحه برای انجام لایه‌نشانی میدان الکتریکی متناوب استفاده شد. با انتخاب محلول با

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود ذرات اکسید قلع موجود در محلول حین لایه‌نشانی در فرکانس $0/1\text{Hz}$ به صورت متناوب حرکت می‌کنند. در این فرکانس ذرات زمان بیشتری برای حرکت دارند و با رساندن خود به سطح الکتروده، علاوه بر پوشش‌دهی داخل شیار سطوح الکترودها را نیز پوشش می‌دهند. به عبارت دیگر در این فرکانس ذره زمان بیشتری برای حرکت در هر نیم‌سیکل و توانایی پیمایش مسافت بیشتری را دارد. این امر باعث می‌شود ذراتی که در لبه الکتروده قرار دارند در هر نیم‌سیکل خود را به سطح الکتروده رسانده و در آنجا نشست یابند. در این فرکانس ذرات به علت داشتن زمان بیشتر در هر نیم‌سیکل قادر به پوشش‌دهی نسبتاً بیشتری هستند و با تغییر پلاریته میدان، لایه نشانی بر دو سطح الکتروده انجام می‌گیرد.

در فرکانس‌های 1Hz - 10 از آنجایی که زمان در دسترس برای حرکت ذرات در هر نیم‌سیکل کاهش پیدا کرده، انتظار می‌رود ذرات با طی نمودن مسیر کوتاه‌تر، نتوانند از لبه الکتروده فاصله زیادی بگیرند. بنابراین مساحت نشست ذرات در سطح الکتروده نسبت به نشست در فرکانس $0/1\text{Hz}$ کاهش یافته است. در این محدوده فرکانسی، لایه‌نشانی الکتروفوریتیکی باعث پوشش‌دهی در قسمتی از سطح الکتروده و همچنین داخل شیار شده است.

لایه‌نشانی ذرات اکسید قلع در فرکانس 100Hz برخلاف باورهای گذشته [۹۰۸] می‌تواند در درون گپ نیز اتفاق بیفتد و تنها نیروی غالب در مباحث عدم نشست در دیگر ذرات سرامیکی، الکترواسمز نیست. به دلیل ضعف نسبی نیروی الکترواسمز، نیروهای الکتروفورز، دی‌الکتروفورز و انحراف خطوط میدان در اثر پتانسیل زیرلایه شیشه‌ای [۱۰] سبب نشست ذرات در گپ و قسمت‌هایی از لبه الکترودها شده است.

در فرکانس 1kHz با افزایش سرعت سیال، شستشوی ذرات بیشتر از سمت لبه و گپ است و نشست درون گپ انجام نمی‌شود. با افزایش فرکانس و کاهش زمان حرکت ذره در هر نیم‌سیکل، برد حرکتی ذره کمتر و سطح ناچیزی از الکترودها توسط نانوذرات اکسید قلع پوشش داده می‌شود. این روند کاهش مقدار نشست پوشش با افزایش فرکانس ادامه می‌یابد و در نهایت در فرکانس‌های بیشتر از 1kHz با افزایش

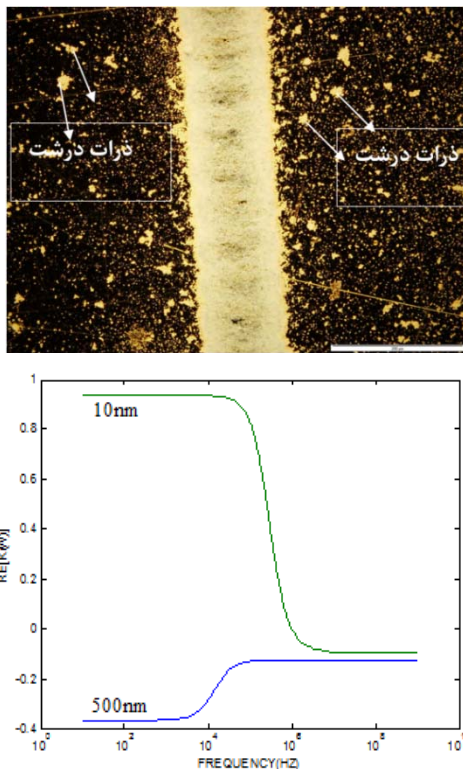
براساس شکل (۲) در اثر اعمال میدان الکتریکی با تناوب صفر ذرات اکسید قلع به علت داشتن بار سطحی منفی تحت تاثیر نیروی الکتروفورز در جهت خطوط میدان به سمت الکتروده با بار مخالف حرکت می‌کنند که در نهایت منجر به نشست آنها بر سطح الکتروده مثبت می‌شود. مقدار پتانسیل زتای $36/81$ - میلی‌ولتی برای سوسپانسیون ذرات اکسید قلع نشان دهنده نوع بار لایه مضاعف الکتریکی حول ذرات است. بنابراین، مشاهده علامت منفی برای پتانسیل زتا نشان دهنده منفی بودن بار سطحی ذرات اکسید قلع می‌باشد که نشست ذرات بر روی قطب مثبت را توجیه می‌کند.

تحت اثر میدان متناوب غیریکنواخت، جابه‌جایی خالص ذره صفر نیست و برآیند حرکت در دو نیم‌سیکل صفر نمی‌باشد بنابراین امکان نزدیک شدن ذرات به الکترودها و نشست بر سطح هر الکتروده امکان‌پذیر می‌باشد. اما سوال مهم در این قسمت دلیل نشست ذرات در میدان متناوب متقارن است زیرا در هر نیم‌سیکل ذرات به یک اندازه به سوی الکترودها نزدیک می‌شوند و با تغییر پلاریته میدان الکتریکی رفتار برگشت‌پذیر ذرات سبب برگشت آنها به مختصات قبلی می‌شود. بنابراین، عملاً باید هیچ برآیند حرکتی در میدان الکتریکی متناوب وجود نداشته باشد. اما پژوهش‌ها [۲] حاکی از وجود نیروهای دیگری همچون الکترواسمز، جریان سیال پایدار و دی‌الکتروفورز است که در فرکانس‌های متفاوت اندازه‌های مختلفی دارند و سبب تغییر در الگوی نشست ذرات می‌شوند.

لایه‌نشانی در میدان الکتریکی متناوب، نرخ نشست ذرات را افزایش می‌دهد زیرا در میدان الکتریکی مستقیم بسته به کاتدیک و یا آندیک بودن الکتروفورز، تنها یک سطح از الکترودها ولی در میدان متناوب هر دو الکتروده پوشش داده می‌شوند و مساحت پوشش‌دهی نسبت به لایه‌نشانی در میدان مستقیم افزایش می‌یابد. به همین دلیل در سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از میدان الکتریکی متناوب در لایه‌نشانی ذرات شده است. این روش مزایای بسیاری همچون صرفه‌جویی در زمان، هزینه، افزایش سرعت و کاهش تخریب ناشی از الکترولیز حلال دارد [۷۰۶].

در ادامه لایه‌نشانی در فرکانس‌های $0/1$ ، 1 ، 10 ، 100 ، 1000 و 10000Hz در شرایط ولتاژ و زمان بهینه انجام شد.

درشت میکرومتری حکایت دارد که بر سطح الکتروود قرار گرفته اند.



شکل ۳. لایه نشانی ذرات اکسید قلع در فرکانس ۱۰ kHz و نمودار فاکتور کلاسیوس- ماسوتی برای ذرات اکسید قلع دارای دو اندازه متفاوت.

برای بیان یکی از دلایل این رفتار ذرات، به نمودار توزیع اندازه ذرات در شکل (۵) توجه شد. با استفاده از کوچکترین و بزرگترین اندازه برای ذرات، که در نمودار توزیع وجود دارد سعی شد نمودار کلاسیوس- ماسوتی رسم شود. این نمودار توسط مدل پوسته که اولین بار گرین برای ذرات بیولوژی استفاده کرده بود، به دست آمد. با این تفاوت که مدل پوسته را برای ذرات دی الکتریک سلامیکی کروی شکل فرض نمودیم به صورتی که هسته ذره سلامیکی و پوسته آن، لایه مضاعف الکتریکی (EDL) باشد.

برای ترسیم فاکتور کلاسیوس- ماسوتی بر حسب فرکانس می توان با فرض کروی بودن ذرات اکسید قلع ابعاد و پارامترهای مشخصی برای ذره، لایه مضاعف الکتریکی و محیط در جدول (۱) متصور شد. داده های جدول از مراجع و هندبوک ها و همچنین اندازه گیری تجربی به دست آمده است. مدل پوسته و نسبت موجود بین پارامترها برای ذره سلامیکی اکسید قلع در شکل (۴) به صورت فرضی ترسیم شده است.

نیروهای دی الکتروفورزیسی تنها داخل شیار الکتروودها توسط ذرات نانو پوشش داده می شوند.

با توجه به شکل (۲) در فرکانس ۱ kHz نشست بسیار ناچیزی مشاهده می شود. در این فرکانس نانوذرات در سطح الکتروودها و درون گپ هیچ گونه نشستی نداشته اند. تاثیر جریان الکترواسمز در شسته شدن پودر از میان گپ ها نشستی را در پی نداشته زیرا نیروی الکترواسمز در این فرکانس بیشترین مقدار است [۲]. نیروهای کولمبی در این فرکانس به علت بالا بودن فرکانس و به عبارتی کم بودن زمان پیمایش ذرات در سطح الکتروودها، قدرت لایه نشانی ذرات بر سطح الکتروود را ندارند. بنابراین، در هر نیم سیکل ذرات مسیر بسیار ناچیزی از سطح را می پیمایند که عملاً فاصله ای از لبه الکتروود ندارد به همین علت در این فرکانس لایه نشانی بر سطح الکتروودها نیز مشاهده نمی شود. همچنین باید اشاره شود که بیشترین سرعت حرکت جریان سیال در لبه الکتروودهاست و با فاصله گرفتن از لبه ها و حرکت به سمت سطوح، سرعت جریان سیال کاهش می یابد [۲].

در فرکانس های بالای ۱ kHz تاثیر نیروی دی الکتروفورز بر ذرات افزایش یافته و در سرنوشت ذرات تاثیر می گذارد. تکرار لایه نشانی در فرکانس ۱۰ kHz در شکل (۳) گویای این مطلب می باشد. به دنبال کاهش نسبی نیروی الکترواسمز در فرکانس های بالاتر از ۱ kHz و افزایش نیروی دی الکتروفورز سرنوشت ذره تغییر می نماید. براساس شکل (۳) تاثیر این نیرو بر ممان های دو قطبی ایجاد شده در میدان الکتریکی غیریکنواخت باعث حرکت ذرات از نقاط با دانسیته میدان کم به سمت لبه الکتروودها که دارای بیشترین دانسیته میدان الکتریکی است، شده و منجر به پر شدن گپ می گردد.

برای ذرات اکسید قلع نیروی دی الکتروفورز در این فرکانس مثبت است زیرا از دیدگاه تجربی طبق تصویر گرفته شده در شکل (۳) از پودر لایه نشانی شده در فرکانس ۱۰ kHz واضح می باشد که ذرات اکسید قلع درون لبه و گپ الکتروودها نشست یافته اند و از آنجایی که لبه قویترین نقطه میدان در جذب ذرات است بنابراین به ویژگی مثبت بودن دی الکتروفورز پی برده خواهد شد.

از سویی دیگر، مشاهده دقیق تر لایه نشانی ذرات اکسید قلع در فرکانس ۱۰ kHz در شکل (۳)، از وجود ذرات

کلاسیوس- ماسوتی یکی از پارامترهای موثر در مباحث الکتروکینتیکی است که طبق رابطه زیر با نیروی دی‌الکتروفورز متناسب است [۲].

$$F_{DEP} = 2\pi\epsilon_0 a^3 Re[k(\omega)] \nabla E^2 \quad (۱)$$

که در آن ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلأ، a شعاع ذرات، ∇E گرادیان میدان الکتريکی و $Re[k(\omega)]$ قسمت حقیقی فاکتور کلاسیوس- ماسوتی است. فاکتور کلاسیوس- ماسوتی به عوامل مختلفی وابسته می‌باشد که یکی از مهمترین آنها، اندازه ذرات است که بر آن تاثیرگذار بوده و در نتیجه سبب تغییر نیروی دی‌الکتروفورز می‌گردد. این فاکتور به صورت رابطه زیر ارایه شده است [۲]:

$$k(\omega) = \left(\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \right) \quad (۲)$$

که در این رابطه ϵ_p^* و ϵ_m^* به ترتیب ثابت دی‌الکتریک مختلط ذره و محیط هستند که از رابطه زیر به دست می‌آیند [۲]:

$$\epsilon^* = \epsilon - i \left(\frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (۳)$$

σ هدایت پذیری محیط یا ذره و ω نیز فرکانس زاویه‌ای است.

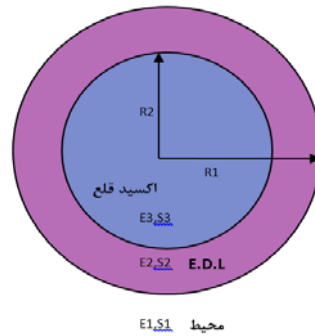
برای ترسیم فاکتور کلاسیوس- ماسوتی برحسب فرکانس می‌توان از مدل پوسته که اولین بار گرین برای ذرات بیولوژی دارای چند لایه پیشنهاد کرد، استفاده نمود. در این مدل با فرض ذره کروی دارای تک لایه بر سطح، مقدار موثر پلاریزاسیون و ممان دوقطبی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\tilde{\alpha} = 3\epsilon_1 \tilde{f}_{CM,23} = 3\epsilon_m \left(\frac{\tilde{\epsilon}_{23} - \tilde{\epsilon}_1}{\tilde{\epsilon}_{23} + 2\tilde{\epsilon}_1} \right) \quad (۴)$$

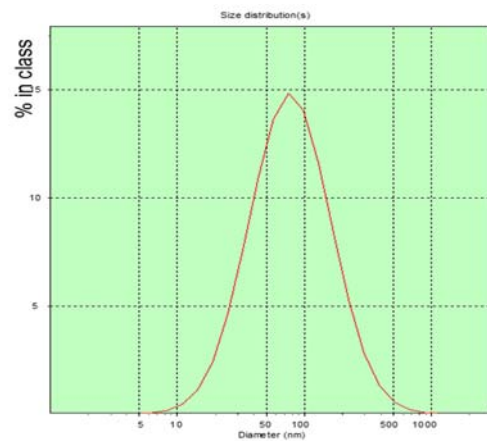
$$P = 4\pi\epsilon_1 \tilde{f}_{CM,23} a_1^3 E \quad (۵)$$

$\tilde{\epsilon}_{23}$ که در آن ثابت دی‌الکتریک مختلط

به صورت زیر تعریف شده است:



شکل ۴. مدل ذره سرامیکی و نسبت موجود بین پارامترها.



شکل ۵. آنالیز اندازه دانه از پودر نانوذرات اکسید قلع.

جدول ۱. داده‌های ترسیم نمودار فاکتور کلاسیوس- ماسوتی برای ذرات اکسید قلع با تغییر هدایت الکتريکی EDL.

منطقه	هدایت الکتريکی [S/m]	ثابت دی الکتريکی	ضخامت ذره ریز [nm]	ضخامت ذره درشت [nm]
محیط	0.2×10^{-2}	۲ ۱	---	---
EDL	5×10^{-6}	۲ ۱	۰/۵	۰/۱
ذره	0.2×10^{-8}	۱ ۴	۱۰	۵۰۰

سیس از طریق نرم‌افزار متلب، معادلات این مدل نوشته

و نمودار ترسیم شد.

*طبق مطالعات انجام گرفته توسط میکایل [۱]، برای محاسبه مقدار هدایت الکتريکی کلی ذره از رابطه $\sigma_p = \sigma_{pbulk} + \frac{2K_s}{r}$ استفاده شده است. قسمت دوم این عبارت مربوط به هدایت الکتريکی ناشی از تجمع بار الکتريکی بر سطح ذره و ناحیه EDL است که مربوط به شعاع ذره دانسته است. K_s هدایت الکتريکی در سطح است که در محیط‌های آبی مقدار ۱ns برآورد شده است. بنابراین می‌توان این عبارت را برای تخمین هدایت الکتريکی EDL ذرات اکسید قلع در این پژوهش استفاده کرد. در نتیجه با توجه به مقدار هدایت سطحی ۱ns و شعاع ۴۰nm ذرات اکسید قلع مقدار هدایت الکتريکی EDL برای ذرات ۰/۰۵S/m به دست آمد.

۴- نتیجه گیری

وجود ذرات درشت بر سطح الکتروود در لایه نشانی ذرات اکسیدقلع در فرکانس ۱۰kHz به علت وجود اندازه ذرات متفاوت در سوسپانسیون لایه نشانی است. مقادیر فاکتور کلاسیوس ماسوتی برای ذرات ریز نشان دهنده نوع مثبت دیالکتروفورز و در نتیجه نشست بر لبه الکتروود با تمرکز میدان الکتریکی بالا می باشد. محاسبه مقادیر فاکتور کلاسیوس ماسوتی برای ذرات درشت نیز حاکی از نوع منفی نیروی دیالکتروفورز و در نتیجه فاصله گرفتن ذرات از لبه به سمت سطح الکتروود است.

مراجع

1. M. Amman, electrophoretic deposition under modulated electric fields: a review, *RSC Advances*, 2, 7633-7646, 2012.
2. H. Morgan, N. G. Green, AC Electrokinetics: Colloids and nanoparticles, *Research Studies Press*, England, 2002.
3. L. Besra, M. Liu, A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD), *Progress in Materials Science* 52, 1-61, 2007.
4. R. Riahifar, E. Marzbanrad, B. Raissi, C. Zamani, M. Kazemzad, A. Aghaez, Sorting ZnO particles of different shapes with low frequency AC electric fields, *Materials Letters*, 65, 4, 632-635, 2011.
5. R. Riahifar, B. Raissi, E. Marzbanrad, C. Zamani, Effect of parameters on deposition pattern of ceramic nanoparticles in non-uniform AC electric field, *J Mater Sci: Mater Electron*, 22, 40-46, 2011.
6. T. Yoshioka, A. Chavez-Valdez, J.A. Roether, D.W. Schubert, A.R. Boccaccini, AC electrophoretic of organic-inorganic composite coatings, *Journal of Colloid and Interface Science*, 392, 1, 167-171, 2013.
7. W. Ahmed, E. StafanKooij, A. Van Silfhout, B. Poelsema, Quantitative analysis of gold nonrod alignment after electric field-assisted deposition, *nano letters*, 9, 11, 3786-3794, 2009.
۸. ریاحی فر، ر، مدلسازی حرکت نانوذرات سرامیکی در الکتروولیت توسط میدان الکتریکی متناوب، تز دکتر، پژوهشگاه مواد و انرژی، ۱۳۸۹.
۹. قشقایی، س، تاثیر نانو ساختار و روش لایه نشانی ZnO بر رفتار سنسوری آن، تز کارشناسی ارشد، پژوهشگاه مواد و انرژی، ۱۳۹۰.
10. Riahifar, R, Marzbanrad, E, B. RaissiDehkordi, C. Zamani, Role of substrate potential on filling the gap between two planar parallel electrodes in electrophoretic deposition, *Materials Letters* 64, 559-561, 2010.
11. J. Kadaksham, P. Singh, N. Aubry, Manipulation of particles using dielectrophoresis, *Mechanics Research Communications* 33, 108-122, 2006.
12. C. Wei, T. Wei, CH. Liang, FC. Tai, The separation of different conducting multi-walled carbon nanotubes by AC dielectrophoresis, *Diamond Relat Mater*, 18:332-6, 2009.

$$\bar{\epsilon}_{23} = \frac{\bar{\epsilon}_2 \left[\gamma_{12}^3 + 2 \left(\frac{\bar{\epsilon}_3 - \bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_3 + 2\bar{\epsilon}_2} \right) \right]}{\left[\gamma_{12}^3 - \left(\frac{\bar{\epsilon}_3 - \bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_3 + 2\bar{\epsilon}_2} \right) \right]} \quad (۶)$$

که در آن $\gamma_{12} = a_1/a_2$ است به صورتی که a_1 شعاع ذره و لایه مضاعف الکتریکی و a_2 شعاع ذره است [۲]. در این مدل ذره سرامیکی کروی و لایه مضاعف الکتریکی حول آن، تک لایه برای مدل پوسته گرین تصور شد. با استفاده از داده های موجود فاکتور کلاسیوس-ماسوتی برای دو اندازه ذره متفاوت ترسیم شد که در شکل (۳) مشاهده می شود. مقدار فاکتور کلاسیوس-ماسوتی با توجه به نمودار، تحت تاثیر اندازه ذره بوده و با افزایش قطر ذره مقدار آن کاهش یافته و در نتیجه مقدار و نوع نیروی دیالکتروفورز تغییر کرده است. مطابق شکل (۴) توزیع اندازه ذرات بین ۱۰nm و ۰/۵ μm به دست آمد و برای این دو مقدار فاکتور کلاسیوس-ماسوتی ترسیم شد. بر این اساس در شکل (۳)، مقدار فاکتور کلاسیوس-ماسوتی برای ذره با قطر ۱۰nm مقدار مثبت ولی برای ذره با قطر ۰/۵ μm عددی منفی به دست آمد درحالی که برای بقیه اندازه ذرات مقدار فاکتور کلاسیوس-ماسوتی مابین مقدار منفی و مثبت تغییر می کند در نتیجه نیروی مثبت دیالکتروفورز سبب تجمع ذرات در لبه الکتروودها و نشست بر لبه و گپ شده اما نیروی منفی دیالکتروفورز بر ذرات درشت وارد شده است و آنها را از لبه الکتروود دور کرده و به سمت نقاط غیرمتمرکز میدان حرکت می دهد. بنابراین، می توان احتمال داد یکی از دلایل وجود ذرات درشت بر سطح الکتروودها نیروی منفی دیالکتروفورز بوده که سبب دور نمودن ذرات از لبه الکتروود شده است. این رفتار ذرات و تاثیر اندازه آنها در نوع نیروی دیالکتروفورز موضوع مهمی است که بسیاری از محققین از آن برای جداسازی ذرات درشت از ریز استفاده کرده و نتایج مهمی به دست آورده اند. بر این اساس، یکی از نتایج مهمی که در این بخش می توان ارائه نمود استفاده از میدان های الکتریکی متناوب برای جداسازی ذرات با توزیع اندازه دانست که به عنوان پتانسیلی برای موضوعات تحقیق برای دیگر محققین پیشنهاد می شود [۱۱، ۱۲].