



بررسی پارامترهای مؤثر بر پوشش‌دهی نانوذرات SnO₂ به روش الکتروفورز در میدان الکتریکی متناوب

امیررضا گردش‌زاده

کارشناس ارشد، گروه نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴
تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش: ۸۹/۵/۱۸ در دسترس به صورت الکترونیکی از: ۱۳۸۹/۹/۲۰

چکیده

روش الکتروفورز یکی از روش‌های ساده و ارزان برای پوشش‌دهی مواد مختلف بر روی سطوح رسانای الکتریکی با استفاده از میدان الکتریکی مستقیم (DC) است. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف لایه نشانی در روش الکتروفورز میدان متناوب (AC) از جمله زمان، ولتاژ (شدت میدان الکتریکی)، بسامد و محیط مایع بر روی جرم نشست و ظاهر کیفی پوشش مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از نانو ذرات اکسید قلع SnO₂ در محیط استن خالص استفاده گردید. به منظور بررسی ظاهر سطح نشست، از میکروسکوپ نوری استریو استفاده شد. پوشش‌دهی بر روی دو الکترود تخت موازی از جنس طلا با فاصله حدود ۵۰۰ میکرومتر انجام گرفت. اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که تغییرات جرم نشست با زمان و شدت میدان با روابط تئوری مربوط به (DC) الکتروفورز مطابقت دارند. جرم نشست با بسامد میدان اعمالی رابطه عکس دارد و الگوی نشست در هر بسامد مختص به آن بسامد است یعنی با افزایش زمان لایه نشانی، این الگو تغییر نمی‌کند. جرم نشست در محیط استن خالص در مقایسه با آب مقطر و اتانول خالص بیشتر بود. بنابراین روش AC الکتروفورز را می‌توان به عنوان روشی برای پوشش‌دهی سطوح رسانا مورد استفاده قرار داد.

واژه‌های کلیدی: پوشش‌دهی، الکتروفورز، میدان الکتریکی متناوب، اکسید قلع، جرم نشست، الگوی نشست.

Investigating the Effect of Alternating Electrophoretic Deposition Parameters on SnO₂ Nanoparticles Coating

A. R. Gardeshzadeh

Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

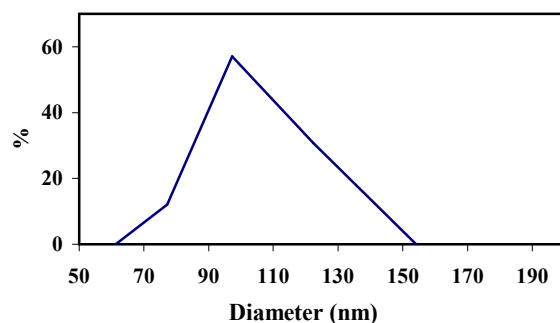
Abstract

In this work, the effect of coating parameters such as deposition time, voltage (field intensity), frequency and the liquid medium on deposit mass and deposition quality in alternating field electrophoresis (ACEPD) is investigated. For this purpose, suspensions of SnO₂ nanoparticles in pure acetone were prepared. In order to investigate the coating quality (pattern), stereo optical microscopy was used and the coating process was performed on two parallel gold electrodes with a gap of 500 micron. Deposit mass measurements showed that the variation of deposit mass vs. deposition time and voltage follows theoretical relations. On the other hand, the deposit mass decreases at higher frequencies. The deposit pattern in each frequency is allocated to that frequency and does not change over longer deposition times. At last, the deposit mass in pure acetone was much more than the pure ethanol and distilled water due to the higher value for dielectric constant to viscosity ratio of pure acetone. So, it is possible to obtain wide variety of deposition quality by changing the electrophoretic deposition parameters. J. Color Sci. Tech. 4(2010), 175-182 © Institute for Color Science and Technology.

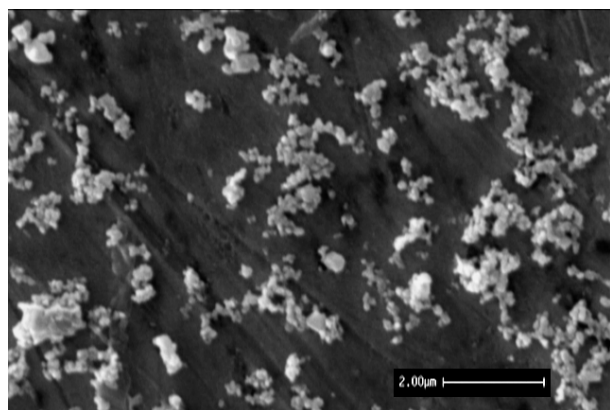
Keywords: Coating, Electrophoresis, Alternating electric field, Tin oxide, Deposit mass, Deposit pattern.

بعد از حدود ۱۰ دقیقه تحت تأثیر امواج فراصوت تهیه شد. برای ساخت الکتروود، یک سطح لام شیشه‌ای به ابعاد مورد نظر با طلای مایع تجاری (W. C. Heraeus) پوشش داده شد. پس از پخت در دمای 600°C ، لایه‌ای نازک از جنس طلا به ضخامت حدود ۱ میکرومتر به دست آمد. با استفاده از یک قلم آلومینایی ظریف، شیاری به پهنای حدود ۲۰۰ میکرون روی پوشش طلا ایجاد شد. به این ترتیب دو الکتروود طلای تخت موازی با فاصله ۵۰۰ میکرومتر به دست آمد. تجهیزات مورد استفاده برای لایه نشانی در منابع [۱۳-۱۵] توضیح داده شده است.

تأثیر عامل‌های زمان، شدت میدان، بسامد، شکل موج و محیط مایع مورد استفاده بر روی جرم نشست و ظاهر نشست مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری جرم نشست و عکس‌برداری از نمونه‌ها به ترتیب از ترازوی دیجیتالی (Metler-Toledo, AG 285) با دقت 10^{-5} گرم و میکروسکوپ نوری استریو (صایران، ZSM-1001) مجهز به دوربین دیجیتالی (Nikon, coolpix 4500) با حداکثر بزرگنمایی $\times 40$ استفاده شد.



شکل ۱: نمودار توزیع اندازه ذرات پودر SnO_2 بدست آمده توسط دستگاه زتاسایزر (Malvern (zetasizer 3000HS).



شکل ۲: تصویر SEM (Philips XL30) از پودر SnO_2 [۱۳].

۱- مقدمه

در تمام تحقیقات انجام گرفته بر روی پوشش‌دهی الکتروفوریتیکی^۱ (EPD)، اغلب از میدان الکتریکی جریان مستقیم (DC) برای لایه‌نشانی استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، استفاده از میدان الکتریکی جریان متناوب (AC) فقط در قالب فرآیند دی‌الکتروفورزیس (DEP) مطرح شده است. در فرآیند DEP از میدان الکتریکی AC غیریکنواخت با بسامدهای در حد چند کیلو تا چند مگا هرتز (kHz-MHz) و الکترودهای بسیار ظریف^۲ (میکروالکتروود) استفاده می‌شود. غیریکنواختی میدان الکتریکی با استفاده از شکل الکترودهای خاص که در آنها نواحی با شدت میدان زیاد و شدت میدان کم به وجود می‌آید، ایجاد می‌شود [۱]. تاکنون تحقیقات زیادی در مورد لایه‌نشانی با این روش مخصوصاً لایه‌نشانی نانو لوله‌های کربنی انجام گرفته است [۸-۲]. علاوه بر لایه‌نشانی نانو لوله‌های کربنی، از DEP برای جداسازی نانو لوله‌های کربنی فلزی و نیمه رسانا نیز استفاده شده است [۹-۱۲].

در این تحقیق، به جای میدان الکتریکی DC، از میدان الکتریکی AC یکنواخت (متقارن) با بسامد پایین (LFACEPD) بسامدهای کمتر از ۱۰۰۰ هرتز برای لایه‌نشانی استفاده شده است. تأثیر پارامترهای مختلف لایه نشانی از جمله زمان، ولتاژ (شدت میدان الکتریکی)، بسامد و نوع محیط مایع (از نظر ثابت دی‌الکتریک و گرانیوی) بر روی جرم نشست و کیفیت پوشش به دست آمده (الگوی نشست) مورد بررسی قرار گرفته و با روابط تئوری مطرح برای EPD مقایسه شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

پودر SnO_2 (شرکت مرک) با خلوص ۹۹٪ مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۱ اندازه ذرات این پودر در محدوده ۶۰ تا ۱۶۰ نانومتر قرار دارد و بنابراین، متوسط اندازه ذرات حدود ۱۰۰ نانومتر است. این پودر با ساختار کاستریت^۳ فاقد هرگونه فاز عمده‌ای به عنوان ترکیب جانبی در نمونه است. تصویر SEM در شکل ۲ نیز مؤید حضور ذرات نانومتری در این پودر می‌باشد.

۲-۲- روش کار

سوسپانسیون با غلظت ۰٫۱ درصد وزنی از پودر SnO_2 در استن خالص

- 1- Electrophoretic Deposition
- 2- Micro electrode
- 3- Cassiterite

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر زمان

با توجه به منحنی تغییرات جرم نشست بر حسب زمان [۱۳]، در زمان ۲۰ دقیقه، جرم نشست ۴۸۰ میکروگرم است، اما در زمان ۴۰ دقیقه جرم نشست به ۵۷۰ میکروگرم می‌رسد. بنابراین جرم نشست با گذشت زمان افزایش می‌یابد اما شیب منحنی در زمان‌های بالاتر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در زمان‌های کم رابطه جرم نشست با زمان تقریباً خطی است اما در زمان‌های زیاد، منحنی از روند خطی بودن فاصله می‌گیرد تا به یک مقدار ثابتی برسد. تصاویر میکروسکوپ نوری استریو مربوط به نمونه قبل از لایه‌نشانی و نمونه‌های به دست آمده در زمان‌های ۳، ۱۵ و ۳۰ دقیقه در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. بر اساس رابطه هاماکر^۱ (رابطه ۱) جرم نشست با زمان رابطه مستقیم خطی دارد [۱۶-۱۸]:

$$w = \int_{t_1}^{t_2} \mu.E.A.C.dt \quad (1)$$

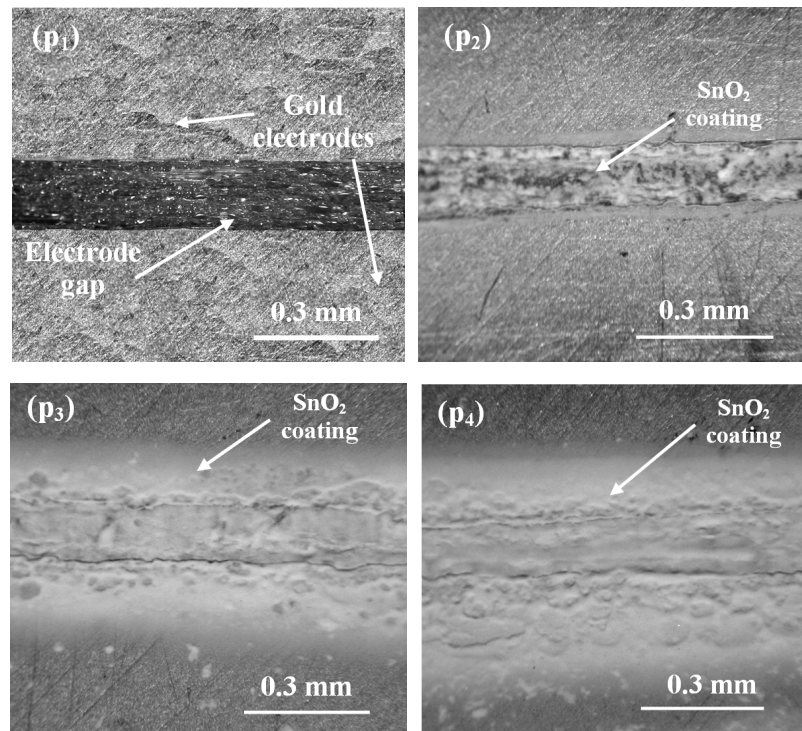
که در آن μ تحرک ذرات، E شدت میدان الکتریکی، A مساحت سطح نشست، C غلظت پودر جامد و t زمان لایه نشانی می‌باشد. بنابراین، دلیل انحراف منحنی از روند خطی را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

(۱) از آنجا که قسمت اعظم نشست در داخل شیار انجام می‌گیرد، محدودیت فضای شیار باعث می‌شود که در زمان‌های طولانی که شیار کاملاً پر می‌شود، فضای کافی برای ادامه فرآیند نشست موجود نباشد. بنابراین در زمان‌های طولانی، جرم نشست افزایش کمتری دارد.

(۲) با گذشت زمان که فرآیند نشست انجام می‌شود غلظت ذرات جامد داخل سوسپانسیون بتدریج کاهش می‌یابد. کاهش غلظت دو دلیل اصلی دارد: (۱) نشست ذرات روی الکترودها، (۲) ته‌نشین شدن بخشی از ذرات پودر داخل سوسپانسیون. بنابراین در زمان‌های طولانی تعداد ذرات جامدی که برای نشست روی الکترودها موجود هستند کمتر است.

(۳) از آنجا که مقاومت الکتریکی ذرات جامد از سوسپانسیون بیشتر است، تشکیل پوشش روی الکترودها و داخل شیار باعث می‌شود مقاومت الکتریکی بین الکترودها بیشتر شود و در نتیجه شدت میدان بتدریج کاهش یابد. بنابراین، برای ادامه انجام فرآیند به شدت میدان با ولتاژ بیشتری نیاز است [۱۶]. در این آزمایشات که از حالت شدت میدان ثابت استفاده شده است، با گذشت زمان افزایش ضخامت پوشش موجب افزایش مقاومت الکتریکی شده و در نتیجه جرم نشست افزایش کمتری خواهد داشت.

1- Hamaker



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ نوری استریو مربوط به زیرلایه قبل از لایه‌نشانی (p₁) و نمونه‌های به دست آمده در زمان‌های ۳، ۱۵ و ۳۰ دقیقه (به ترتیب p₂، p₃، p₄).

۳-۲- اثر ولتاژ (شدت میدان)

برای بررسی اثر شدت میدان الکتریکی اعمالی بر روی جرم نشست، آزمایشات توسط پایه‌ای ثابت انجام گرفت. بنابراین، با ثابت بودن فاصله بین دو الکترود، به جای اثر شدت میدان، اثر شدت میدان اعمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به رابطه هاماکر، در صورتی که میدان الکتریکی ثابت باشد و شدت آن با زمان تغییر نکند، رابطه جرم نشست با شدت میدان به طور خطی تغییر خواهد کرد. این روند در لایه‌نشانی به خوبی حاصل شد. در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری استریو مربوط به پوشش‌های به دست آمده در شدت‌های میدان ۸، ۲۰، ۲۸، ۴۰، ۵۲ و ۶۰ ولت ارائه شده است. رفتار نشست با آنچه منحنی تغییرات جرم نشست با شدت میدان [۱۳] نشان می‌دهد کاملاً مطابقت دارد به این معنی که با افزایش شدت میدان الکتریکی، مقدار پوشش روی الکترودها و در داخل شیار افزایش می‌یابد. بدیهی است که افزایش شدت میدان موجب افزایش نیروی محرکه لازم برای مهاجرت ذرات جامد به سمت الکترودها می‌شود، در نتیجه در یک زمان مشخص، تعداد ذرات بیشتری روی الکترودها می‌نشینند.

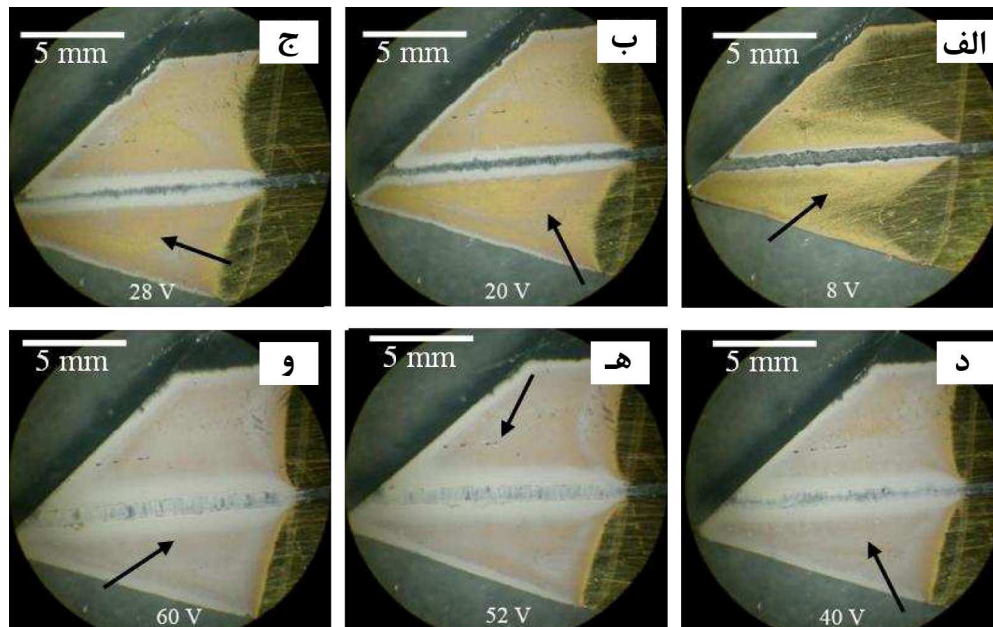
۳-۳- اثر بسامد

یکی از مهم‌ترین متغیرهای فرآیند لایه‌نشانی به روش ACEPD،

بسامد میدان اعمالی است. در شکل ۵ نمودار تغییرات جرم نشست نانوپودر SnO₂ با بسامد میدان اعمالی بر حسب مقیاس لگاریتمی رسم شده است. این منحنی در شدت میدان ثابت ۴۰ ولت و زمان ۱ دقیقه به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، منحنی سیر نزولی دارد و با افزایش بسامد از ۰,۰۱ هرتز تا ۱۰۰ هرتز، جرم نشست کاهش می‌یابد. در بسامد ۱۰۰۰ هرتز، جرم نشست به حدی کم می‌باشد که توسط ترازو (با دقت ۱۰^{-۵}) قابل اندازه‌گیری نبود (کمتر از ۱۰ میکروگرم).

روند فوق در تصاویر میکروسکوپی به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۶). در این تصاویر پوشش SnO₂ که با فلش نشان داده شده است، به رنگ سفید قابل تمایز است. با افزایش بسامد از ۰,۰۱ هرتز به ۱۰۰۰ هرتز، پوشش سفیدرنگ روی سطح الکترود کاهش می‌یابد و فقط پوشش داخل شیار باقی می‌ماند تا در نهایت در بسامد ۱۰۰۰ هرتز پوشش بسیار کمی که با فلش نشان داده شده ایجاد می‌شود.

برای تأیید مطلب فوق تغییرات جرم نشست پودر SnO₂ با زمان در سه بسامد مختلف ۰,۱، ۱ و ۱۰ هرتز و شدت میدان ثابت ۴۰ ولت اندازه‌گیری شد (شکل ۷). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش بسامد از ۰,۱ هرتز به ۱ و بعد به ۱۰ هرتز، جرم نشست افت می‌کند. اما هر یک از منحنی‌ها روند خطی و صعودی خود را حفظ می‌کنند.

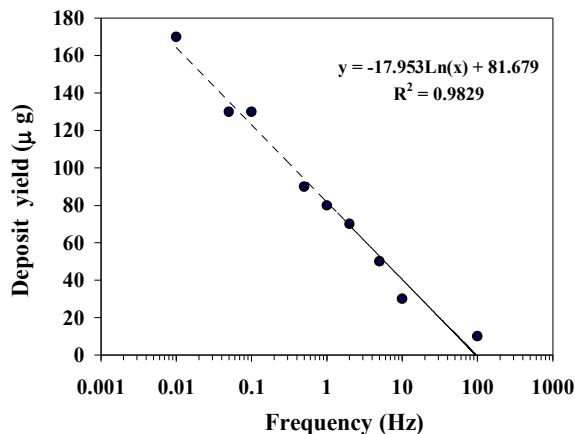


شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ نوری استریو از پوشش‌های به دست آمده در شدت‌های میدان ۸، ۲۰، ۲۸، ۴۰، ۵۲ و ۶۰ ولت.

برابر شد.

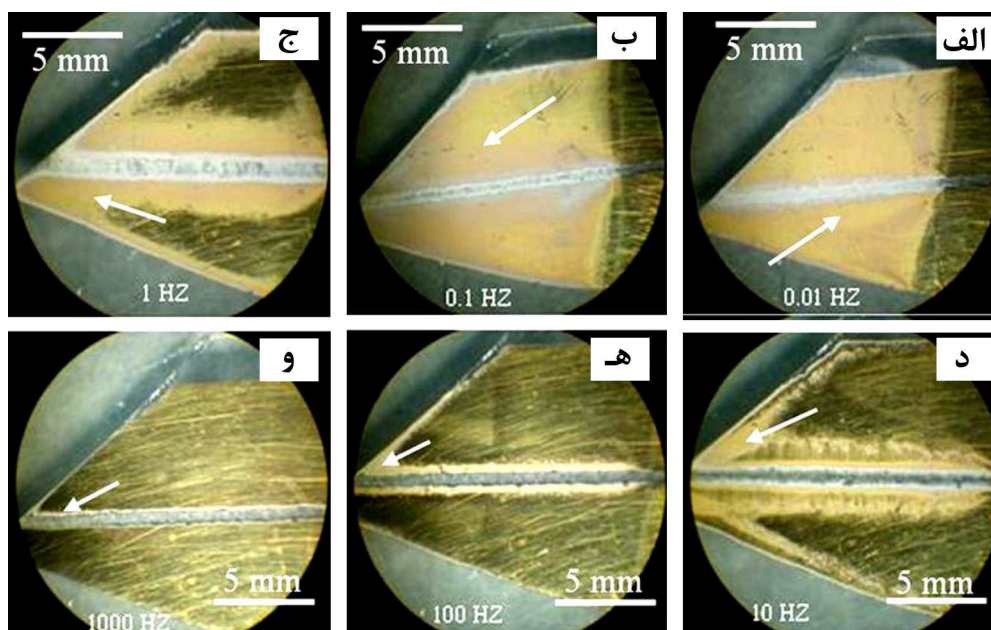
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بسامد ۰,۰۱ هرتز (شکل الف) پوشش روی سطح دو الکتروود و بخشی از داخل شیپار انجام گرفته است. اما در بسامد ۱ هرتز (شکل ب) نشست فقط در لبه الکتروودها انجام شده است. بعد از ۸۵ دقیقه لایه نشانی در بسامد ۱ هرتز، الگوی نشست تغییری نکرده است و فقط حجم پوشش داخل شیپار افزایش یافته است. مشاهده می‌شود که برخلاف بسامد ۰,۰۱ هرتز، در بسامد ۱ هرتز روی سطح الکتروود نشست انجام نگرفته است.

رفتار فوق را چنین می‌توان توضیح داد که در میدان الکتریکی متناوب (AC)، زمان لازم برای تغییر جهت میدان الکتریکی به بسامد انتخابی بستگی دارد. برای مثال اگر بسامد ۱ هرتز انتخاب شده باشد، در هر ۱ ثانیه یک سیکل یا یک دوره تناوب انجام می‌شود. از آنجا که هر سیکل از دو نیم سیکل مثبت و منفی تشکیل می‌شود، در بسامد ۱ هرتز، هر نیم ثانیه یک بار جهت میدان الکتریکی عوض می‌شود. در بسامد ۰,۱ هرتز، هر ۱۰ ثانیه یک سیکل انجام می‌شود و بنابراین هر ۵ ثانیه جهت میدان تغییر می‌کند. بنابراین هرچه بسامد میدان اعمالی بیشتر باشد، تغییر جهت میدان در زمان کوتاه‌تری (کسری از ثانیه) انجام می‌گیرد. وقتی به ذره‌ای که داخل یک مایع قرار گرفته و اطراف آن لایه مضاعف الکتریکی تشکیل شده میدان الکتریکی اعمال شود، ذره پلاریزه می‌شود. حال وقتی جهت میدان الکتریکی عکس شود، بارهای سطحی متناسب با میدان آرایش می‌یابند و توزیع بارها در لایه مضاعف نیز عکس می‌شود.



شکل ۵: نمودار تغییرات جرم نشست نانوپودر SnO₂ با بسامد میدان اعمالی بر حسب مقیاس لگاریتمی در شدت میدان ثابت ۴۰ ولت و زمان ۱ دقیقه.

نکته دیگری که از اهمیت زیادی برخوردار است این است که رفتار نشست در هر بسامد مختص همان بسامد است و با افزایش زمان رفتار نشست تغییر نمی‌کند. برای تأیید این مطلب، نمونه‌ای در بسامد ۰,۰۱ هرتز و زمان ۵ دقیقه (شدت میدان ۶۰ ولت و محیط استیل استن) لایه‌نشانی و جرم نشست آن اندازه‌گیری شد (شکل الف). نمونه دیگری با همان شرایط در بسامد ۱ هرتز و زمان ۵ دقیقه لایه‌نشانی شد (شکل ب). برای بررسی تغییر رفتار نشست با زمان، نمونه دیگری در بسامد ۱ هرتز و زمان ۸۵ دقیقه پوشش‌دهی شد (شکل ج). زمان ۸۵ دقیقه مدت زمانی است که جرم نشست نمونه در بسامد ۱ هرتز با جرم نشست نمونه اول (بسامد ۰,۰۱ هرتز و زمان ۵ دقیقه)



شکل ۶: تصاویر میکروسکوپ نوری استریو مربوط به نقاط منحنی شکل ۵ (پوشش SnO₂ با فلش نشان داده شده است).

و یا اصلاً نشستگی انجام نمی‌شود.

تعیین دقیق بسامد آستانه برای پودرهایی که دارای توزیع وسیعی از اندازه ذرات هستند کار بسیار دشواری است زیرا وجود ذرات بسیار ریز موجب می‌شود در بسامدهای بالا نیز نشست هرچند بسیار کم رخ دهد. بنابراین، برای تعیین دقیق بسامد آستانه باید از پودر با توزیع اندازه دانه محدود استفاده شود. بنابراین، با توجه به شرایط لایه‌نشانی ذکر شده، بسامد آستانه برای پودر SnO_2 حدود ۱۰۰۰ هرتز به دست آمد.

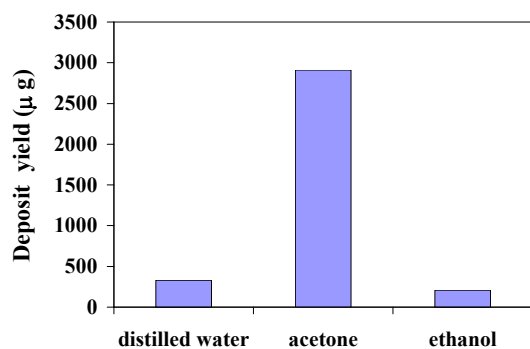
۳-۴- اثر محیط

تأثیر سه محیط استن خالص، اتانول خالص و آب مقطر بر جرم نشست پودر SnO_2 در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. به واسطه تأثیر ناخالصی‌ها در فرآیند لایه‌نشانی [۱۹]، محیط‌های خالص مورد بررسی قرار گرفتند.

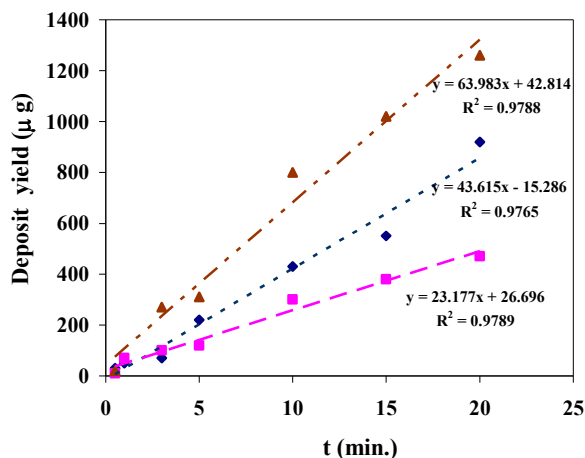
نمودار شکل ۹ نشان می‌دهد که محیط استن خالص بیشترین جرم نشست را از میان دو محیط دیگر (یعنی اتانول خالص و آب مقطر) حاصل می‌کند. این اختلاف در جرم نشست در تصاویر میکروسکوپ نوری (شکل ۱۰) نیز به خوبی قابل مشاهده است. در محیط استن خالص، حجم نشست به حدی زیاد است که در پوشش داخل شیار ترک‌های طولی و عرضی بوجود آمده‌اند. اما در محیط‌های اتانول و آب مقطر فقط پوشش نازکی روی سطح الکترودها تشکیل شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در محیط آب به دلیل تشکیل حباب کیفیت پوشش نامناسب است؛ اما در محیط اتانول پوشش به دست آمده نازک و تقریباً یکنواخت است.

با توجه به رابطه هاماکر، جرم نشست رابطه مستقیمی با تحرک دارد. از طرف دیگر تحرک μ از رابطه ۲ به دست می‌آید [۲۰، ۲۱]:

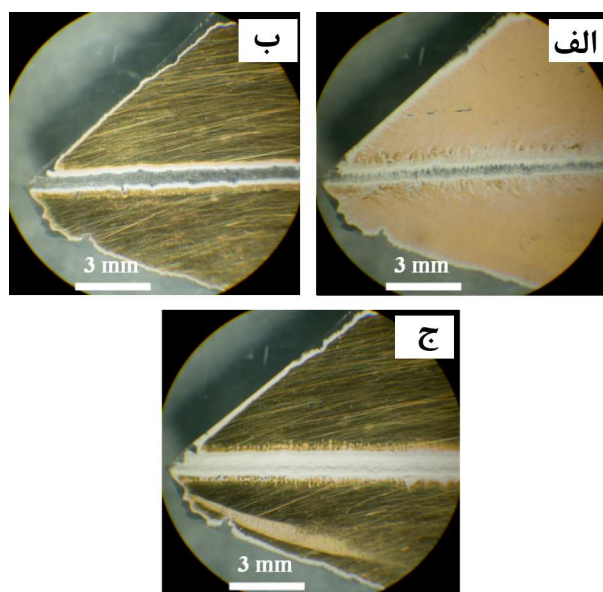
$$\mu = \frac{2\varepsilon_0 \xi}{3\eta} f(ka) \quad (2)$$



شکل ۹: تأثیر سه محیط استن خالص، اتانول خالص و آب مقطر بر جرم نشست پودر SnO_2 در بسامد ۰٫۱ هرتز، شدت میدان ۴۰ ولت و زمان ۱۰ دقیقه.



شکل ۷: تغییرات جرم نشست پودر SnO_2 با زمان در سه بسامد مختلف ۰٫۱، ۱ و ۱۰ هرتز و شدت میدان ثابت ۴۰ ولت.



شکل ۸: تصویر میکروسکوپ نوری استریو از پوشش‌های به دست آمده در شدت میدان ثابت ۶۰ ولت، محیط استیل استن و (الف) بسامد ۰٫۰۱ هرتز و زمان ۵ دقیقه، (ب) بسامد ۱ هرتز و زمان ۵ دقیقه و (ج) بسامد ۱ هرتز و زمان ۸۵ دقیقه.

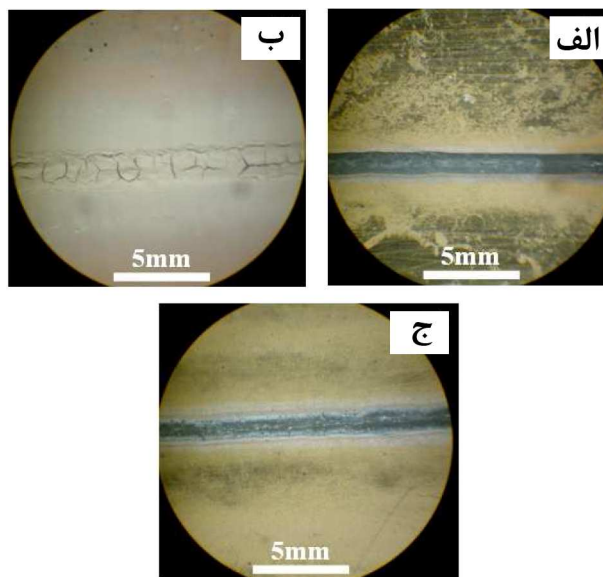
در بسامدهای کم، زمان کافی برای عوض شدن توزیع بارها وجود دارد. بنابراین بارهای آزاد می‌توانند خودشان را با تغییر جهت میدان هماهنگ کنند. با افزایش بسامد این زمان کاهش می‌یابد تا در نهایت در یک بسامد آستانه، بارهای آزاد در لایه مضاعف دیگر نمی‌توانند با میدان هماهنگ شوند. در این حالت به این بارها، بار مقید [۱] می‌گویند. در بسامدهای بالاتر از بسامد آستانه، نشست بسیار کم است

1- Bound charge

اتانول را به اختلاف در نسبت ثابت دی‌الکتریک به گرانی و در نتیجه اختلاف در تحرک ذرات پودر در این دو محیط نسبت داد. اما دلیل جرم نشست کم در محیط آب را می‌توان به تشکیل حباب روی سطح و در نتیجه ممانعت از تشکیل پوششی ضخیم و یکنواخت نسبت داد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر عامل‌های زمان، شدت میدان الکتریکی، بسامد و محیط مایع بر روی جرم نشست و ظاهر کیفی پوشش (الگوی نشست) نانوذرات SnO₂ به روش ACEPD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری جرم نشست و مشاهدات کیفی پوشش به دست آمده نشان دادند که تغییرات جرم نشست با زمان و شدت میدان الکتریکی از روابط نظری (رابطه هاماکر) پیروی می‌کنند. از طرف دیگر جرم نشست با بسامد میدان اعمالی رابطه عکس دارد. همچنین الگوی نشست در هر بسامد مختص به همان بسامد است و با افزایش زمان لایه نشانی، این الگو تغییر نمی‌کند. جرم نشست به دست آمده در محیط استن خالص به دلیل نسبت بیشتر ϵ/η در مقایسه با آب مقطر و اتانول خالص، بیشتر بود. بنابراین، بسته به عوامل میدان الکتریکی و نوع محیط می‌توان پوشش‌هایی با کیفیت‌های مختلف به دست آورد.



شکل ۱۰: تصاویر میکروسکوپ نوری استریو متناظر با نمونه‌های شکل ۹. (الف) آب مقطر، (ب) استن خالص و (ج) اتانول خالص.

در این رابطه که به رابطه هنری معروف است، تحرک با ثابت دی‌الکتریک ϵ رابطه مستقیم و با گرانی η رابطه عکس دارد. نسبت ثابت دی‌الکتریک به گرانی (ϵ/η) برای استن و اتانول به ترتیب ۷۰ و ۲۰ است. بنابراین می‌توان اختلاف زیاد جرم نشست در محیط استن و

۵- مراجع

- H. Morgan, N. G. Green, AC Electrokinetics: Colloids and nanoparticles, Res. Stud. Press, England, 2002. 8-10.
- A. Reale, Gas sensing using single wall carbon nanotubes ordered with dielectrophoresis. *Sensor Actuat B-Chem.* 111-112(2005), 181-186.
- J. Suehiro, N. Sano, G. Zhou, H. Imakiire, K. Imasaka, M. Hara, Application of dielectrophoresis to fabrication of carbon nanohorn gas sensor. *J. Electrostat.* 64(2006) 408-415.
- H. W. Seo, Ch. S. Han, W. S. Jang, J. Park, Manipulation of carbon nanotubes and nanowires. *Curr. Appl. Phys.* 6 (2006), 216-219.
- A. T. J. Kadaksham, P. a Singh, N. Aubry, Dielectrophoresis of nanoparticles. *Electrophoresis.* 25(2004), 3625-3632.
- S. Kumar, S. Rajaraman, R. A. Gerhardt, Z. L. Wang, P. J. Hesketh, Tin oxide nanosensor fabrication using AC dielectrophoretic manipulation of nanobelts. *Electrochim. Acta.* 51(2005), 943-951.
- J. H. Nieuwenhuis, M. J. Vellekoop, Simulation study of dielectrophoretic particle sorters. *Sensor. Actuat. B-Chem.* 103(2004), 331-338.
- C. F. Gonzalez, V. T. Remcho, Harnessing dielectric forces for separations of cells, fine particles and macromolecules, *J. Chromatogr. A.* 1079(2005), 59-68.
- M. J. O'Connell, Carbon Nanotubes: Properties and Applications, Taylor & Francis Group, CRC Press, 2006, 15- 16.
- Th. Lutz, K. J. Donovan, Macroscopic scale separation of metallic and, semiconducting nanotubes by dielectrophoresis. *Carbon.* 43(2005), 2508-2513.
- F. Hennrich, R. Krupke, H. V. Löhneysen, M. M. Kappes, Raman-Spectroscopy on Metallic SWNTs Separated from Semiconducting SWNTs with Dielectrophoresis, in proceedings of AIP conference of electronic properties of synthetic nanostructures, (2004), 49-52.
- D. S. Lee, D. W. Kim, H. S. Kim, S. W. Lee, S. H. Jhang, Y. W. Park, E. E. B. Campbell, Extraction of semiconducting CNTs by repeated dielectrophoretic filtering. *Appl. Phys. A.* 80(2005), 5-8.
- A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, E. Marzbanrad, electrophoretic deposition of SnO₂ nanoparticles using low frequency AC electric fields. *Mater. Lett.* 62(2008) 1697-1699.
- A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, E. Marzbanrad, Preparation of Si powder thick films by low frequency alternating electrophoretic deposition. *J. Mater. Lett.* 43(2008), 2507-2508.
- A. R. Gardeshzadeh, B. Raissi, E. Marzbanrad, Fabrication of resistive CO gas sensor based on SnO₂ nanopowders via

- low frequency AC electrophoretic deposition. *J. Mater. Sci. Mater. El.* 20(2009), 127-131.
16. L. Besra, M. Liu, A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Prog. Mater. Sci.* 52(2007), 1-61.
 17. S. N. Heavens, Electrophoretic deposition as a processing route for ceramics, in: G.P. Binner (Ed.), *Advanced ceramic processing and technology*. vol. 1, Noyes Pub. NJ, USA, 1990, 255-283.
 18. P. Sarkar, P. S. Nicholson, *Electrophoretic Deposition (EPD): Mechanisms, Kinetics, and Application to Ceramics*. *J. Am. Ceram. Soc.* 79(1996), 1987-2002.
 19. F. Hossienbabaei, B. Raissi, Impurity dependence of electrophoretic mobility in MgO/acetone cell, in proceeding of the 9th CIMTEC, Florence, Italy, 20(1998), 65-70.
 20. A. V. Delgado, F. González-Caballero, R. J. Hunter, L. K. Koopal, J. Lyklema, Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *J. Colloid Interf. Sci.* 309(2007), 194-224.
 21. I. Zhitomirsky, Cathodic electrodeposition of ceramic and organoceramic materials: Fundamental aspects. *Adv. Colloid Interfac.* 97(2002), 279-317.