



Electrophoretic Deposition (EPD) of Graphene Quantum Dots: A Review of Influential Parameters, Challenges, and Applications in Enhancing Electro-optical Efficiency

Nilufar Maali, Babak Efafi*, Fereidon Alikhani Hesari*

Department of Semiconductors, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran

Received: 2026-03-06

Revised: 2026-04-11

Accepted: 2026-05-10

Abstract: Electrophoretic Deposition (EPD) has emerged as an efficient and cost-effective technique for fabricating nanostructured coatings of Graphene Quantum Dots (GQDs) in optoelectronic devices. This paper provides a systematic review of the theoretical principles, influential parameters, and key challenges associated with GQD deposition, with a specific focus on enhancing solar cell efficiency. In this study, the impact of critical factors—including zeta potential, colloidal stability, solvent type, voltage, deposition time, and power supply mode (DC, pulsed, and AC)—on the morphology, thickness, and optical transparency of the resulting films is evaluated.

The results indicate that precise control of processing conditions is essential for achieving uniform coatings. The implementation of pulsed EPD and modified aqueous suspensions has been shown to mitigate challenges such as bubble formation and local instabilities, thereby improving UV absorption and photocurrent in Luminescent Down-shifting (LDS) layers. While EPD offers a promising pathway for developing advanced optical coatings, industrial scalability and large-scale microstructural control remain open challenges in this field.

Keywords: Electrophoretic Deposition (EPD), Luminescent Down-shifting (LDS), Graphene Quantum Dots (GQDs), Electro-Optical Devices

Corresponding Authors' Emails: babak.efafi@gmail.com , f-a-hesari@merc.ac.ir

How to Cite This Article:

Efafi B., Maali N., Alikhani Hesari F. Electrophoretic deposition (EPD) of graphene quantum dots: A review of effective parameters, challenges, and applications in increasing electro-optic efficiency. Nanomeghyas. 2026;():e741451 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2090603.1429



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



رسوب‌دهی نقاط کوانتومی گرافن به روش الکتروفورتیک (EPD): مروری بر پارامترهای مؤثر، چالش‌ها و کاربرد در افزایش بازده الکترواپتیکی

نیلوفر معالی | بابک عفافی* | فریدون علیخانی حصاری*

پژوهشکده نیمه هادی‌ها، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، البرز

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

چکیده: فرآیند لایه‌نشانی الکتروفورتیک (EPD) به دلیل سادگی و هزینه پایین، روشی کارآمد برای ایجاد پوشش‌های نانوساختاری از نقاط کوانتومی گرافن (GQDs) در ادوات اپتوالکترونیکی است. هدف این مقاله، مرور مبانی نظری، پارامترهای مؤثر و چالش‌های کلیدی در لایه‌نشانی GQDs با تمرکز بر بهبود بازده سلول‌های خورشیدی است. در این مطالعه، تأثیر فاکتورهای کلیدی نظیر پتانسیل زتا، پایداری کلئیدی، نوع حلال، ولتاژ، زمان و نوع منبع تغذیه (DC، پالسی و AC) بر مورفولوژی، ضخامت و شفافیت نوری فیلم‌های حاصل بررسی شده است.

نتایج نشان می‌دهد کنترل دقیق شرایط فرآیندی برای دستیابی به پوشش‌های یکنواخت ضروری است. استفاده از روش‌های پالسی و سوسپانسیون‌های آبی اصلاح‌شده، چالش‌هایی نظیر تشکیل حباب و ناپایداری‌های موضعی را کاهش داده و باعث بهبود جذب فرابنفش و افزایش جریان نوری در لایه‌های تغییردهنده طیف (LDS) می‌شود. اگرچه EPD مسیری امیدبخش برای توسعه پوشش‌های نوری پیشرفته فراهم می‌کند، اما مقیاس‌پذیری صنعتی و کنترل ریزساختار در ابعاد بزرگ همچنان از چالش‌های باز این حوزه محسوب می‌شوند.

واژگان کلیدی: لایه نشانی الکتروفورتیک (EPD)، تبدیل کاهشی لومینسانس (LDS)، نقاط کوانتومی گرافن، ادوات الکترواپتیکی.

نویسندگان مسئول: babak.efafi@gmail.com ، f-a-hesari@merc.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله: عفافی بابک، معالی نیلوفر، علیخانی حصاری فریدون. رسوب‌دهی نقاط کوانتومی گرافن به روش الکتروفورتیک (EPD): مروری بر پارامترهای مؤثر، چالش‌ها و کاربرد در افزایش بازده الکترواپتیکی. Nanomeghyas. 1405;():e741451. doi: 10.22034/ns.2026.2090603.1429

این مقاله تحت مجوز دسترسی آزاد CC-BY منتشر شده است (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)





GQDs) به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر شکاف انرژی قابل تنظیم، پایداری نوری بالا، سمیت پایین و سازگاری زیستی، به عنوان یکی از امیدبخش‌ترین نانومواد برای کاربردهای اپتوالکترونیکی مطرح شده‌اند [۵و۶]. افزون بر این، هزینه تولید پایین و سازگاری زیست محیطی GQDs نسبت به نقاط کوانتومی مبتنی بر فلزات سنگین، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند.

با وجود این مزایا، عملکرد نهایی ادوات مبتنی بر GQDs به شدت به کیفیت لایه‌نشانی، یکنواختی فیلم و کنترل ریزساختار آن وابسته است. روش‌های متداول لایه‌نشانی مانند اسپین کوتینگ و قطره‌گذاری، اگرچه در مقیاس آزمایشگاهی کاربرد دارند، اما در کنترل دقیق ضخامت، یکنواختی در سطوح بزرگ و مقیاس‌پذیری صنعتی با محدودیت‌هایی مواجه هستند. در این راستا، رسوب‌دهی الکتروفوریتیک^۳ (EPD) به عنوان یک تکنیک ساده، سریع و قابل کنترل، توجه فزاینده‌ای را در زمینه ساخت پوشش‌های نانو ساختار به خود جلب کرده است [۷]. این روش بر پایه حرکت ذرات باردار در یک سوسپانسیون تحت میدان الکتریکی عمل

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش تقاضای جهانی برای انرژی و نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، توجه گسترده‌ای را به توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر معطوف کرده است [۱]. در این میان، فناوری‌های فوتوولتائیک به عنوان یکی از کارآمدترین راهکارها برای تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریسیته، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های علمی و کاربردهای صنعتی یافته‌اند [۲و۳]. با این حال، محدودیت در بهره‌برداری مؤثر از طیف کامل تابش خورشیدی، به ویژه در ناحیه فرابنفش، همچنان یکی از چالش‌های اساسی در بهبود بازده این سامانه‌ها به شمار می‌رود [۴].

یکی از رویکردهای نوین برای غلبه بر این محدودیت، استفاده از مواد تبدیل‌کننده طیفی و به ویژه سامانه‌های مبتنی بر کاهش دهنده تابش لومینسانس^۱ است که قادرند فوتون‌های پرنرژی را به طول‌موج‌های قابل جذب‌تر برای لایه فعال سلول‌های خورشیدی تبدیل کنند. در این میان، نقاط کوانتومی گرافن^۲

^۱ Luminescent Down-Shifting (LDS)

^۲ Graphene Quantum Dots (GQDs)

^۳ Electrophoretic Deposition (EPD)

لامپ‌های الکترونی استفاده کند [۸]. متعاقباً در سال ۱۹۳۳، ثبت اختراعات مرتبط با رسوب‌دهی ذرات توریا بر روی بستر پلاتین، مسیر را برای تجاری‌سازی این روش هموارتر ساخت.

نخستین جهش در مقیاس صنعتی EPD در اوایل دهه ۱۹۵۰ رخ داد؛ دورانی که از این فناوری برای ایجاد لایه‌های عایق آلومینا Al_2O_3 روی گرم‌کننده‌های کاتد در لوله‌های خلاء استفاده شد. در همین بازه زمانی، هماکر (Hamaker) با انجام مطالعات بنیادین، امکان‌سنجی استفاده از EPD را در حوزه سرامیک‌ها بررسی کرد که سنگ‌بنای توسعه این روش در علم مواد مدرن گردید [۹].

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

از دهه ۱۹۸۰ میلادی، با ظهور نیاز به سرامیک‌های پیشرفته و نانو ساختارها، EPD به عنوان یکی از کارآمدترین تکنیک‌های فرآوری مواد نوین شناخته شد. امروزه این روش به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر تجهیزات مقرون به صرفه، سادگی فرآیند، امکان لایه‌نشانی بر روی سطوح با هندسه پیچیده و قابلیت ترکیب مواد مختلف در یک پوشش واحد^۷، جایگاه ویژه‌ای در تولید پوشش‌های مهندسی و ادوات نانو الکترونیک پیدا کرده است [۸].

از جمله مزایای برجسته این روش می‌توان به زمان کوتاه شکل‌دهی، سادگی تجهیزات مورد نیاز، قابلیت اعمال بر زیرلایه‌هایی با اشکال و ابعاد متنوع، و کاهش یا حذف نیاز به بایندرهای آلی^۸ اشاره کرد. این ویژگی‌ها سبب شده‌اند که EPD در مقایسه با سایر روش‌های پیشرفته شکل‌دهی، مانند پرس ایزواستاتیک^۹ یا روش‌های لایه‌نشانی فیزیکی و شیمیایی، از انعطاف‌پذیری بالاتری برخوردار باشد. در واقع، با تغییرات جزئی در شرایط فرآیندی، می‌توان این روش را برای کاربردهای خاص در صنایع مختلف تطبیق داد.

مکانیسم اصلی این فرآیند بر پایه حرکت ذرات جامد باردار در یک سوسپانسیون مایع است. هنگامی که میدان الکتریکی مستقیم (DC) اعمال می‌شود، ذرات به سمت بار مخالف

کرده و امکان تشکیل فیلم‌هایی یکنواخت، متراکم و با ضخامت قابل تنظیم را فراهم می‌سازد.

با این حال، موفقیت فرآیند EPD در سامانه‌های مبتنی بر نقاط کوانتومی گرافن، مستلزم درک عمیق از برهم‌کنش‌های فیزیکوشیمیایی در محیط سوسپانسیون، دینامیک ذرات تحت میدان الکتریکی و تأثیر پارامترهای فرآیندی بر ویژگی‌های نهایی لایه است. عواملی نظیر پتانسیل زتا، پایداری کلئیدی، نوع حلال، ولتاژ اعمالی و زمان رسوب‌دهی، نقش تعیین‌کننده‌ای در مورفولوژی، شفافیت نوری و کارایی اپتوالکترونیکی فیلم‌ها ایفا می‌کنند. عدم کنترل دقیق این پارامترها می‌تواند منجر به ایجاد عیوب ساختاری، تجمع ذرات و کاهش عملکرد نهایی شود.

بر این اساس، هدف از این مقاله مروری، ارائه یک تحلیل جامع از مبانی نظری، پارامترهای مؤثر و چالش‌های کلیدی در رسوب‌دهی الکتروفوریتیک نقاط کوانتومی گرافن و بررسی نقش آن در بهبود عملکرد ادوات اپتوالکترونیکی است. در این مطالعه، ضمن مرور پیشینه پژوهش، تأثیر شرایط فرآیندی بر خواص ساختاری و نوری فیلم‌ها تحلیل شده و راهکارهایی برای بهینه‌سازی فرآیند و حرکت به سمت کاربردهای صنعتی ارائه می‌شود.

۲- مبانی نظری لایه‌نشانی الکتروفوریتیک

۲-۱- رسوب‌دهی الکتروفوریتیک

فرآیند رسوب‌دهی الکتروفوریتیک (EPD) ریشه در مشاهدات علمی قرن هجدهم دارد؛ جایی که نخستین بار در دهه ۱۷۴۰، بوز^۴ طی آزمایش‌های سیفون مایع، به پتانسیل‌های جابجایی مواد تحت میدان الکتریکی پی برد. با این حال، گزارش رسمی این پدیده به سال ۱۸۰۸ میلادی بازمی‌گردد؛ زمانی که رویس^۵ حرکت جهت‌دار ذرات خاک رس در محیط آبی را تحت تأثیر یک میدان الکتریکی خارجی مشاهده و ثبت کرد [۸].

گذر از مشاهدات آزمایشگاهی به کاربردهای عملی در اوایل قرن بیستم کلید خورد. در سال ۱۹۲۷، هارسانی^۶ با بهره‌گیری از این تکنیک، موفق به لایه‌نشانی اکسید توریم و تنگستن بر روی کاتدهای پلاتینی گردید تا از آن‌ها به عنوان گسیل‌کننده در

⁷ Composite Coatings

⁸ Organic Binders

⁹ Isostatic Pressing

⁴ Bose

⁵ Ruess

⁶ Harsanyi

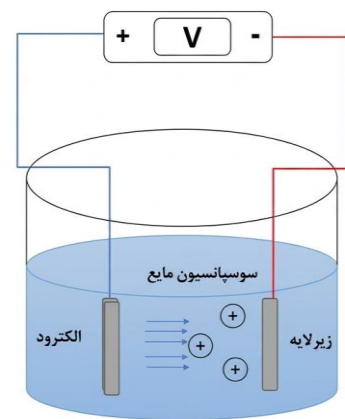
۲-۲- انواع رسوبدهی الکتروفورتیکی

رسوبدهی الکتروفورتیکی (EPD) بسته به نوع الکترودی که ذرات بر روی آن تجمع می‌یابند، به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود. در حالت EPD کاتدی، ذرات دارای بار مثبت تحت تأثیر میدان الکتریکی به سمت کاتد حرکت کرده و بر سطح آن رسوب می‌کنند. در مقابل، در EPD آنودی، ذرات با بار منفی به سمت آنود مهاجرت کرده و بر روی آن رسوب می‌نمایند. انتخاب نوع رسوبدهی به ویژگی‌های سطحی ذرات و شرایط محیطی بستگی دارد و با تنظیم شیمی سطح ذرات (مانند تغییر pH یا استفاده از افزودنی‌های مناسب) می‌توان نوع فرآیند را کنترل و بهینه‌سازی کرد. این قابلیت تنظیم‌پذیری، انعطاف بالایی در طراحی پوشش‌ها و ساختارهای مختلف فراهم می‌آورد.

از دیدگاه مکانیزمی، مطالعات انجام‌شده توسط سارکار و نیکلسون^{۱۲} نشان داده‌اند که در فرآیند EPD، برخلاف برخی روش‌های الکترولیتی، واکنش شیمیایی مستقیم میان ذرات و سطح الکتروود رخ نمی‌دهد. به عبارت دیگر، ذرات پس از رسوب همچنان بار سطحی خود را حفظ می‌کنند. این موضوع با آزمایش‌هایی نظیر جدا شدن لایه رسوبی پس از معکوس کردن میدان الکتریکی به‌طور تجربی تأیید شده است. چنین رفتاری نشان می‌دهد که فرآیند رسوبدهی بیشتر ناشی از انتقال فیزیکی ذرات تحت میدان الکتریکی است تا واکنش‌های شیمیایی در سطح الکتروود.

این ویژگی مکانیزمی اهمیت ویژه‌ای در کنترل کیفیت پوشش دارد، زیرا نشان می‌دهد که پایداری بار سطحی ذرات و کنترل دقیق سیستم حلال-بایندر-پخش‌کننده نقش کلیدی در دستیابی به لایه‌هایی با ضخامت یکنواخت و ریزساختار مطلوب دارند. در واقع، استفاده از ذرات با بار مشابه و سوسپانسیون‌های پایدار شرط اساسی برای تولید پوشش‌های همگن و قابل تکرار است. به همین دلیل، طراحی مناسب ترکیب سوسپانسیون و انتخاب شرایط فرآیندی، از جمله ولتاژ اعمالی و زمان رسوبدهی، برای دستیابی به نتایج مطلوب در EPD ضروری است [۱۳و۱۲].

حرکت کرده و بر سطح آن رسوب می‌کنند. این رسوبدهی می‌تواند به‌صورت یکنواخت و کنترل‌شده انجام گیرد، به‌گونه‌ای که ضخامت و ریزساختار لایه نهایی تنها با تنظیم زمان رسوبدهی و ولتاژ اعمالی قابل کنترل باشد. این ویژگی، امکان تولید پوشش‌هایی با ضخامت‌های مختلف و ساختارهای متنوع را فراهم می‌سازد، که برای کاربردهای صنعتی و پژوهشی اهمیت زیادی دارد.



شکل ۱. شماتیک کلی لایه نشانی الکتروفورتیکی

یکی از نکات مهم در ادبیات علمی این حوزه، تمایز میان اصطلاح الکتروپلیتینگ^{۱۱} و الکتروفورتیکی^{۱۲} است. در برخی منابع، این دو اصطلاح به‌طور مبهم به جای یکدیگر استفاده می‌شوند، در حالی که تفاوت بنیادین آن‌ها در ماهیت گونه‌های منتقل‌شونده نهفته است، این تفاوت اساسی سبب شده است که EPD به‌عنوان روشی مستقل و متمایز در فرآوری مواد شناخته شود و کاربردهای آن از پوشش‌های سرامیکی و زیست‌فعال گرفته تا نانو ساختارهای پیشرفته در حوزه انرژی و الکترونیک گسترش یابد [۱۱و۱۰].

- در الکتروپلیتینگ، گونه‌های یونی از محلول نمکی تحت واکنش‌های الکتروشیمیایی رسوب می‌کنند.
- در الکتروفورتیکی، ذرات جامد باردار در یک سوسپانسیون مایع حرکت کرده و بدون تغییر شیمیایی عمده، بر سطح الکتروود رسوب داده می‌شوند.

¹⁰ Electroplating

¹¹ Electrophoretic Deposition

¹² Sarkar & Nicholson Model

نقش دارد. مطالعه ساتو^{۱۴} و همکاران نشان داد که کاهش اندازه ذرات YBCO^{۱۵} از ۳ میکرومتر به ۰.۰۰۶ میکرومتر ترک‌های ایجادشده در فیلم را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد [۱۵].

عامل دیگر، ثابت دی‌الکتریک محیط مایع است. پاورز^{۱۶} نشان داد که این پارامتر تأثیر مستقیمی بر رسانایی سوسپانسیون و امکان وقوع رسوب‌دهی دارد [۱۳]. رسوب‌دهی مؤثر تنها در محیط‌هایی با ثابت دی‌الکتریک حدود ۱۲ تا ۲۵ مشاهده می‌شود. در محیط‌هایی با ثابت دی‌الکتریک پایین، یونیزاسیون ناکافی رخ داده و رسوب شکل نمی‌گیرد، در حالی که در محیط‌هایی با ثابت دی‌الکتریک بالا، افزایش غلظت یونی موجب کاهش ضخامت لایه دوبل و در نتیجه کاهش تحرک الکتروفوریتیکی می‌شود.

رسانایی سوسپانسیون نیز از عوامل بحرانی در EPD است. فراری و مورنو^{۱۷} نشان دادند که رسانایی خیلی بالا منجر به کاهش حرکت ذرات می‌شود، در حالی که رسانایی خیلی پایین باعث بارگیری الکترونی ذرات و ناپایداری سوسپانسیون خواهد شد [۱۶]. تنها یک بازه باریک از رسانایی برای هر سیستم وجود دارد که رسوب‌دهی موفق در آن رخ می‌دهد و این بازه به نوع ماده، دما و غلظت پخش‌کننده وابسته است [۱۷].

ویسکوزیته سوسپانسیون نیز اهمیت دارد، هرچند در EPD درصد جامدات پایین است و ویسکوزیته معیار مناسبی برای ارزیابی پایداری محسوب نمی‌شود. با این حال، محیط مایع مطلوب باید دارای ویسکوزیته کم، ثابت دی‌الکتریک بالا و رسانایی پایین باشد [۱۶ و ۱۷].

پتانسیل زتا به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده در EPD معرفی شده است [۱۸ و ۱۹]. بار سطحی کم موجب لخته‌شدن سریع ذرات و تشکیل لایه‌ای متخلخل می‌شود، در حالی که بار سطحی بالا دافعه بین ذرات را افزایش داده و منجر به چیدمان متراکم‌تر و دانسیته سبز بالاتر خواهد شد. مطالعه چن^{۱۸} و همکاران نشان دادند که بیشترین پایداری و نرخ رسوب آلومینا در اتانول در pH ≈ 2.2 رخ می‌دهد، جایی که پتانسیل زتا بیشینه است [۲۰ و ۲۱].

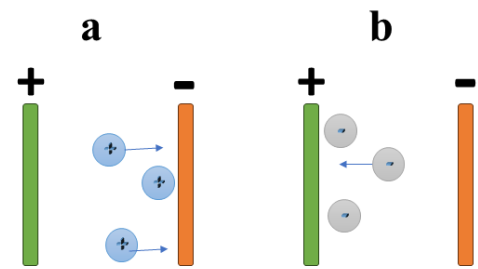
¹⁴ Sato

¹⁵ Yttrium Barium Copper Oxide

¹⁶ Powers

¹⁷ Ferrari & Moreno

¹⁸ Chen



شکل ۲. تصویر شماتیک فرآیند لایه‌نشانی الکتروفوریتیکی: (a) EPD کاتدی و (b) آنودی EPD

۲-۳- پارامترهای مؤثر بر رسوب‌دهی الکتروفوریتیکی

بر اساس گزارش بسرا و لیو (۲۰۰۷)^{۱۲}، ویژگی‌های فرآیند رسوب‌دهی الکتروفوریتیکی تحت تأثیر دو دسته اصلی از پارامترها قرار دارد: نخست پارامترهای مرتبط با سوسپانسیون و دوم پارامترهای مرتبط با فرآیند. این تقسیم‌بندی مفهومی، مبنای بسیاری از مطالعات بعدی در حوزه EPD بوده و چارچوبی برای تحلیل و بهینه‌سازی شرایط رسوب‌دهی فراهم کرده است [۱۴].

۱-۲-۳- پارامترهای مرتبط با سوسپانسیون

برای موفقیت در رسوب‌دهی الکتروفوریتیکی، لازم است ذرات جامد دارای بار الکتریکی بوده و در محیط مایع به‌صورت پایدار پراکنده شوند. بنابراین، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی ذرات، نوع محیط مایع، و افزودنی‌هایی مانند پخش‌کننده‌ها و بایندها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی رسوب دارند [۱۴].

یکی از مهم‌ترین عوامل، اندازه ذرات است. گزارش‌ها نشان می‌دهند که برای بسیاری از سیستم‌های سرامیکی، اندازه ذرات در محدوده ۱ تا ۲۰ میکرومتر شرایط مناسبی برای رسوب‌دهی فراهم می‌کند [۱۴]. با افزایش توجه به مواد نانوساختار، استفاده از ذرات نانومتری نیز به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. ذرات بزرگ‌تر تمایل بیشتری به ته‌نشینی تحت اثر گرانش دارند و برای دستیابی به رسوب یکنواخت لازم است سرعت حرکت الکتروفوریتیکی از سرعت ته‌نشینی بیشتر باشد. در غیر این صورت، ضخامت لایه رسوبی غیریکنواخت خواهد شد. علاوه بر این، اندازه ذرات در ترک‌خوردگی لایه طی مرحله خشک‌کردن

¹² Besra & Liu (2007)

می‌شود و این ناپایداری به‌طور مستقیم بر کیفیت رسوب اثر می‌گذارد [۲۶].

غلظت جامدات در سوسپانسیون نیز اهمیت ویژه‌ای دارد، به‌ویژه در سیستم‌های چندجزئی. در غلظت‌های بالای جامدات، نرخ رسوب اجزای مختلف تقریباً برابر است، در حالی که در غلظت‌های پایین، نرخ رسوب هر جزء تابع تحرک الکتروفوریتیکی خاص آن خواهد بود. این موضوع می‌تواند ترکیب شیمیایی لایه رسوبی را نسبت به ترکیب اولیه سوسپانسیون تغییر دهد [۲۷].

در نهایت، رسانایی زیرلایه عامل بحرانی در یکنواختی لایه رسوبی است. مشاهدات تجربی نشان داده‌اند که زیرلایه‌های با رسانایی پایین منجر به رسوب غیریکنواخت و نرخ پایین می‌شوند [۱۲].

حضور بایندهای آلی در زیرلایه فشرده‌شده مقاومت الکتریکی را افزایش می‌دهد، در حالی که حذف بایندها با پیش‌پخت کیفیت رسوب را بهبود می‌بخشد. مطالعه چن و لیو نشان داد که پیش‌پخت زیرلایه‌های (LSM)^{۲۳} باعث افزایش رسانایی و تشکیل فیلم (YSZ)^{۲۴} یکنواخت‌تر می‌شود [۲۸].

۲-۴- رسوب‌دهی الکتروفوریتیکی در محیط‌های آبی

رسوب‌دهی الکتروفوریتیکی در محیط‌های آبی^{۲۵} به دلیل ایمنی بالا، هزینه نسبتاً کم و سازگاری زیست‌محیطی، یکی از گزینه‌های جذاب در میان روش‌های پوشش‌دهی محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها سبب شده‌اند که EPD آبی در بسیاری از کاربردهای صنعتی و پژوهشی مورد توجه قرار گیرد و به‌عنوان جایگزینی مناسب برای محیط‌های آلی مطرح شود [۳۰ و ۳۹].

با وجود این مزایا، چالش اصلی در استفاده از محیط‌های آبی، وقوع الکترولیز آب در نزدیکی الکترودهاست. این پدیده منجر به تولید گازهای هیدروژن و اکسیژن، افزایش موضعی pH و در نهایت ناپایداری سوسپانسیون در مجاورت سطح الکترود می‌شود. پیامدهای این تغییرات شامل ایجاد تخلخل، ترک‌خوردگی یا حتی جداشدگی لایه رسوبی از سطح زیرلایه است که کیفیت نهایی پوشش را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۱].

پایداری سوسپانسیون نیز نقش کلیدی دارد. این ویژگی با نرخ ته‌نشینی و تمایل به لخته‌شدن مشخص می‌شود [۵]. سوسپانسیون بیش‌ازحد پایدار ممکن است اصلاً رسوب ندهد، زیرا برخی مدل‌ها بیان می‌کنند که ناپایداری موضعی نزدیک الکترود برای وقوع رسوب ضروری است [۲۲] نویسندگان تأکید می‌کنند که پتانسیل زتا یا تحرک الکتروفوریتیکی به‌تنهایی برای پیش‌بینی قابلیت رسوب‌دهی کافی نیست. این موضوع نشان‌دهنده خلأ علمی در ارائه مدل‌های پیش‌بینی‌کننده جامع است و بسیاری از روابط موجود همچنان تجربی و وابسته به سیستم خاص هستند.

۲-۳- پارامترهای مرتبط با فرآیند

این دسته از پارامترها به شرایط اعمال میدان الکتریکی و ویژگی‌های الکترود مربوط می‌شوند و نقش مستقیمی در سینتیک رسوب، یکنواختی لایه و کیفیت ریزساختاری دارند.

زمان رسوب‌دهی یکی از عوامل مهم است. مطالعات باسو^{۱۹} و همکاران و همچنین چن و لیو^{۲۰} نشان داده‌اند که نرخ رسوب‌دهی با افزایش زمان کاهش می‌یابد [۲۳ و ۱۲] در مراحل اولیه، رابطه‌ای تقریباً خطی میان جرم یا ضخامت لایه و زمان وجود دارد، اما با ادامه فرآیند، نرخ رسوب کاهش یافته و به مقدار ثابت یا پلاتو^{۲۱} می‌رسد [۲۴ و ۲۵]. دلیل این رفتار آن است که با افزایش ضخامت لایه سرامیکی، مقاومت الکتریکی سیستم افزایش یافته و شدت میدان مؤثر در سوسپانسیون کاهش می‌یابد.

ولتاژ اعمالی نیز تأثیر مستقیم بر مقدار و کیفیت رسوب دارد. افزایش ولتاژ معمولاً باعث افزایش مقدار رسوب می‌شود، اما کیفیت لایه همواره بهبود نمی‌یابد [۲۳]. در میدان‌های متوسط حدود ۲۵-۱۰۰ V/cm لایه‌های یکنواخت‌تری تشکیل می‌شوند، در حالی که در میدان‌های بالا (>100 V/cm) آشفستگی در سوسپانسیون ایجاد شده و ذرات فرصت آرایش بهینه پیدا نمی‌کنند. این شرایط موجب افزایش زبری سطح و ناهمگنی می‌شود [۲۵ و ۲۶]. مطالعه نگیشی^{۲۲} و همکاران نشان داد که حتی در غیاب ذرات، چگالی جریان حلال آلی با افزایش ولتاژ ناپایدار

¹⁹ Basu

²⁰ Chen & Liu

²¹ Plateau

²² Negishi

²³ Lanthanum Strontium Manganite Substrates

²⁴ Yttria-Stabilized Zirconia Film

²⁵ Aqueous EPD

پایداری ذرات ضروری هستند اما به دلیل ماهیت عایق خود، سدی در برابر انتقال بار ایجاد می‌کنند برای رفع این مشکل، فرآیند تبادل لیگاند^{۲۸} مطرح شده است که طی آن لیگاندهای بلند با مولکول‌های کوتاه‌تر و رساناتر (مانند پیریدین یا اتان‌دی‌تیول) جایگزین می‌شوند. با این حال، اجرای این فرآیند به صورت لایه-به-لایه (LBL) بسیار زمان‌بر و پیچیده است؛ به طوری که برای دستیابی به ضخامت مطلوب، تکرار چندین باره یک فرآیند سه‌مرحله‌ای (رسوب، تبادل، شستشو) برای ۵ تا ۲۰ لایه الزامی است که این امر با استانداردهای تولید انبوه و صنعتی سازگار نیست.

در این راستا، روش رسوب‌دهی الکتروفوریتی (EPD) به عنوان یک مسیر جایگزین و تک‌مرحله‌ای شناخته می‌شود که امکان تشکیل فیلم‌های یکنواخت با سرعت بالا و ضخامت قابل کنترل را فراهم می‌آورد. بر اساس مطالعات سالانت و همکاران، استفاده از EPD پس از فرآیند تبادل لیگاند در فاز محلول، منجر به بهبود چشمگیر رسانایی الکتریکی فیلم و عملکرد نهایی دستگاه می‌شود، به طوری که در سلول‌های خورشیدی هیبریدی با نقاط کوانتومی CdSe، افزایش بازده تبدیل توان (PCE) تا ۰.۵٪ گزارش شده است [۳۲].

نقاط کوانتومی گرافن (GQDs) به دلیل برخورداری از ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر زیست‌سازگاری بالا، سمیت ناچیز و پایداری نوری مطلوب، مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند [۳۳]. GQDs سنتز شده از اسید سیتریک به دلیل حضور گسترده گروه‌های عاملی کربوکسیل دیپروتونه (COO) در سطح خود [۳۴]، دارای بار منفی ذاتی با پتانسیل زتا در حدود -۳۵ میلی‌ولت هستند که پایداری کلوئیدی بالایی را در حلال‌های آلی مانند اتانول فراهم می‌کند [۳۵]. این ویژگی اجازه می‌دهد تا فرآیند لایه‌نشانی بدون نیاز به هیچ‌گونه افزودنی شیمیایی (Additive-free) انجام شود که از بروز واکنش‌های جانبی نامطلوب جلوگیری کرده و خلوص لایه نهایی را تضمین می‌کند [۳۵]. برخلاف سایر روش‌های لایه‌نشانی، در روش EPD نیازی به استفاده از مولکول‌های واسطه یا رابط^{۲۹} جهت اتصال نانوذرات

برای کاهش این مشکلات، راهکارهای متعددی پیشنهاد شده است. استفاده از ولتاژهای پایین می‌تواند شدت الکترولیز را کاهش دهد و شرایط پایدارتر برای رسوب‌دهی فراهم آورد. همچنین، محدود کردن زمان رسوب‌دهی مانع از تجمع بیش‌ازحد گازها و تغییرات شدید pH در نزدیکی الکتروود می‌شود. افزون بر این، افزودن مواد بافرکننده به محیط رسوب‌دهی، امکان کنترل بهتر تغییرات pH را فراهم کرده و پایداری سوسپانسیون را افزایش می‌دهد. ترکیب این اقدامات می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کیفیت پوشش‌های حاصل از EPD آبی را بهبود بخشد و زمینه را برای استفاده گسترده‌تر از این روش در مقیاس صنعتی فراهم سازد.



شکل ۳. نمای کلی پارامترهای موثر بر رسوب دهی الکتروفوریتیکی

۳- مروری بر پیشینه و کاربرد های رسوب دهی الکتروفوریتیکی

در توسعه ادوات فوتوولتائیک مبتنی بر نانوذرات، دستیابی به لایه‌های نازک با رسانایی الکتریکی بالا یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. به طور معمول، فیلم‌های نقاط کوانتومی با روش‌های تک‌مرحله‌ای نظیر لایه‌نشانی چرخشی^{۲۶} یا قطره‌گذاری^{۲۷} ایجاد می‌شوند، اما این روش‌ها در کنترل دقیق ضخامت و یکنواختی در ابعاد بزرگ محدودیت دارند. مانع اصلی در بهبود کارایی این لایه‌ها، حضور لیگاندهای عایق و حجیم نظیر TOP/TOPO یا فسفونات‌ها است که در زمان سنتز برای

²⁸ Ligand Exchange

²⁹ Linker Molecules

²⁶ Spin-coating

²⁷ Drop-casting

می‌تواند مستقیماً بر بازدهی تبدیل فوتون به جریان (IPCE) در سلول‌های خورشیدی نسل سوم تأثیرگذار باشد. نتایج پژوهش حاکی از آن است که لایه‌نشانی در ولتاژهای بالا (به عنوان مثال ۸۰ ولت) و بازه‌های زمانی کوتاه، منجر به تشکیل فیلم‌هایی با بازتاب مناسب در طیف مرئی و شکاف انرژی بهینه (حدود ۳,۲۸ الکترون‌ولت) می‌گردد که بهبود عملکرد فوتوآند را در سلول‌های خورشیدی حساس‌شده با رنگ در پی دارد [۳۷].

جدول ۲. پارامترهای تست فوتوولتائیک مربوط به سلول‌های خورشیدی لایه‌نشانی شده به روش EP در مدت زمان ۳ و ۵ دقیقه [۳۷]

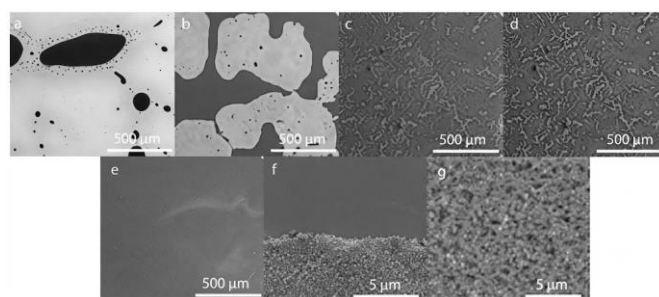
زمان لایه‌نشانی	3min			5min		
Voltages(V)	60	70	80	60	70	80
Jsc (mA/ cm ²)	0.65	1.30	0.4	1.80	1.94	2.27
FF	0.29	0.48	0.47	0.19	0.51	0.40
Efficiency	0.12	0.40	0.12	0.20	0.64	0.55
Voc(V)	0.64	0.66	0.63	0.66	0.65	0.61
IPCE (%)	1.28	2.57	0.80	3.52	3.80	4.48
Rsh (Ω/ cm ²)	1222	194.7	6333.3	1360	1400	750
Rs (Ω/ cm ²)	750	168	476	250	108.4	163.6

یکی دیگر از چالش‌های اساسی در فرآیند EPD، دستیابی به سوپانسیون‌های پایدار و سازگار با محیط زیست است. استفاده از نقاط کوانتومی آب‌دوست^{۳۰} در دیسپرسیون‌های آبی، نه تنها از نظر زیست‌محیطی مقرون‌به‌صرفه است، بلکه امکان تشکیل نانوکامپوزیت‌های فلورسانت با کیفیت بالا را برای کاربردهای اپتوالکترونیک فراهم می‌کند. به عنوان نمونه، لایه‌نشانی الکتروفورتیکی نقاط کوانتومی گرافن و نقاط کوانتومی CuInS₂/ZnS در محیط آبی منجر به تشکیل فیلم‌های یکنواختی شده است که پایداری نوری مناسبی از خود نشان می‌دهند [۳۸]. این رویکرد «سبز» در فرآیند EPD، به دلیل حذف حلال‌های آلی سمی و قابلیت کنترل خواص سطحی ذرات در محیط‌های حاوی گروه‌های عاملی، مسیری نوین برای بهبود عملکرد ادوات فوتوولتائیک باز کرده است.

به سطح الکتروود نیست، که این امر منجر به بهبود انتقال بار و ارتقای عملکرد الکتریکی در ادوات فوتوولتائیک می‌گردد [۳۶]. بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی نظیر ولتاژ و زمان رسوب‌دهی، نقشی حیاتی در تعیین مورفولوژی سطح و ضخامت لایه ایفا می‌کند. بررسی‌های میکروسکوپی (SEM و AFM) در مطالعات نگوین و همکاران نشان داد که در ولتاژهای پایین (کمتر از ۲۰ ولت)، لایه GQD به صورت جزیره‌ای و ناپیوسته تشکیل می‌شود، در حالی که اعمال ولتاژ بهینه ۳۰ ولت منجر به تشکیل فیلمی کاملاً متراکم و یکنواخت با کمترین میزان زبری سطح (حدود ۳,۱ نانومتر) می‌گردد. همچنین، ضخامت لایه به صورت مستقیم با زمان رسوب‌دهی قابل کنترل است، به طوری که افزایش زمان از ۵ به ۲۵ دقیقه، ضخامت را از حدود ۲۴ به ۱۸۸ نانومتر افزایش می‌دهد. با این حال، انتخاب زمان کوتاه (حدود ۵ دقیقه) برای حفظ شفافیت نوری و جلوگیری از اکسیداسیون احتمالی ذرات تحت میدان الکتریکی طولانی‌مدت، ضروری است [۳۵].

جدول ۱: اندازه‌گیری ضخامت بر اساس برش با باریکه یونی متمرکز FIB - پوشش‌های نقاط کوانتومی گرافنی (GQDs) لایه‌نشانی شده در ولتاژ ۳۰ ولت در زمان‌های مختلف (۵ تا ۲۵ دقیقه) [۳۵].

زمان	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
ضخامت (nm)	۲۴±۱,۶	۳۵,۴±۱,۸	۴۸,۷±۲,۶	۷۴,۴±۱,۶	۱۸۸,۲±۲,۷



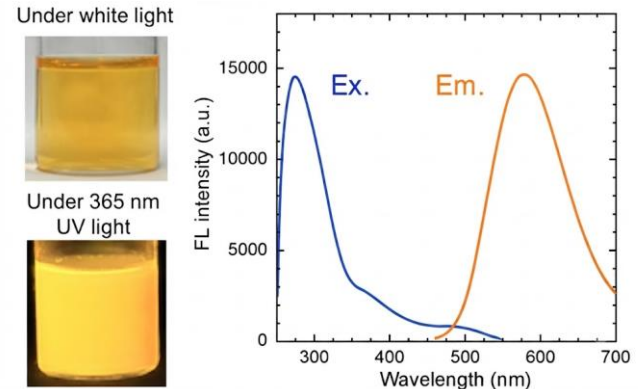
شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با رزولوشن بسیار بالا (XHR-SEM) در بزرگنمایی پایین a تا e از پوشش‌های GQDs (به‌طور به ترتیب لایه‌نشانی شده در ولتاژهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ ولت به مدت ۵ دقیقه). تصاویر XHR-SEM با بزرگنمایی بالا از لایه‌های GQDs حاصل شده در ولتاژهای ۱۰ ولت (f) و ۵۰ ولت (g) به مدت ۵ دقیقه [۳۵]

در همین راستا، مطالعات دیگر بر روی نیمه‌رساناهایی نظیر اکسید روی (ZnO) نشان داده است که بهینه‌سازی این پارامترها

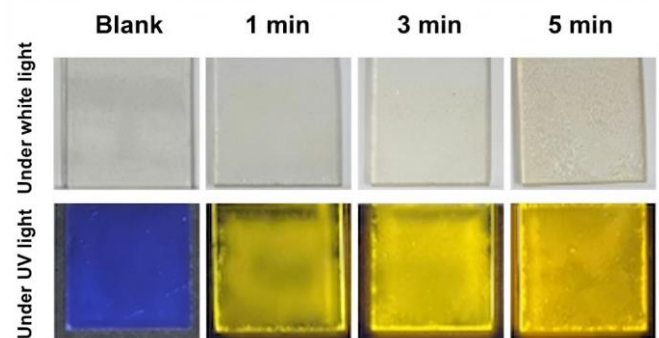
³⁰ Hydrophilized QDs

GQD ها پس از لایه‌نشانی کاملاً حفظ شده و فرآیند EPD تأثیر مخربی بر خواص فیزیکی و شیمیایی اولیه ماده ندارد [۳۵]. تحلیل جامع یافته‌های پژوهشی در حوزه رسوب‌دهی الکتروفوریتیک (EPD) نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت در متغیرهای عملیاتی، پایداری کلونیدی و پتانسیل زتا تعیین‌کننده‌ترین عوامل در ارتقای کیفیت رسوب نهایی محسوب می‌شوند، افزایش پتانسیل زتا در کنار کنترل و کاهش ابعاد تجمعات، مستقیماً به بهبود تحرک الکتروفوریتیک و دستیابی به لایه‌هایی یکنواخت با کمترین میزان ترک‌خوردگی منجر می‌گردد. این مسئله به‌ویژه در مورد نقاط کوانتومی گرافن (GQDs) که به دلیل ابعاد بسیار کوچک، تمایل شدیدی به تجمع^{۳۱} دارند، از اهمیت استراتژیک برخوردار است. در همین راستا، نتایج حاکی از آن است که تنظیم دقیق پارامترهای فرآیندی نظیر ولتاژ، زمان رسوب‌دهی و فاصله بین الکترودها برای کنترل ضخامت، چگالی و مورفولوژی فیلم‌های شفاف و یکنواخت ضروری است [۴۱ و ۴۲].

یکی از چالش‌های بنیادین در محیط‌های آبی، پدیده الکترولیز آب و پیامد آن یعنی تشکیل حباب‌های گاز است که منجر به ناپیوستگی در ساختار فیلم می‌شود. در این میان، یافته‌های مشترک در مطالعات نیرینک و چاوز والدز^{۳۲} نشان‌دهنده کارایی بالای تکنیک AC EPD در مرتفع ساختن این نقیصه است. استفاده از میدان‌های AC نامتقارن، امکان رسوب‌دهی در بسترهای آبی را بدون ایجاد حفره یا آسیب‌های ساختاری فراهم آورده و در مقایسه با روش‌های سنتی DC EPD، چگالی سبز و یکنواختی فیلم را به شکل معناداری افزایش می‌دهد؛ قابلیت که برای تولید فیلم‌های نوری بدون نقص بر پایه GQDs در محیط‌های دوست‌دار محیط‌زیست (آبی) بسیار ارزشمند تلقی می‌شود [۴۳ و ۴۴]. علاوه بر استراتژی‌های جریانی، اصلاح شیمیایی سوسپانسیون نیز نقش مکمل و حیاتی ایفا می‌کند. چنان‌که در مطالعات کوچائوگلو^{۳۳} برجسته شده است، بهره‌گیری از افزودنی‌هایی همچون استیل‌آستون^{۳۴} با تقویت پایداری سوسپانسیون از طریق افزایش پتانسیل زتا، به بهبود چسبندگی و یکنواختی لایه کمک شایانی می‌نماید. تلفیق این رهیافت‌های



شکل ۵: تصاویر فوتوگرافیک و طیف‌های برانگیختگی و گسیل فلورسانس (FL) برای نقاط کوانتومی CIS/ZnS آبدوست شده که در محلول آبی TMAOH پراکنده (دیسپرس) شده‌اند. طیف‌های برانگیختگی و گسیل به ترتیب به طول‌موج‌های پیک گسیل و برانگیختگی اندازه‌گیری شده‌اند. [۳۸]



شکل ۶: تصاویر فوتوگرافیک فیلم‌های نانوکامپوزیتی لایه‌نشانی شده در بازه زمانی ۱ تا ۵ دقیقه، تحت نور سفید و نور فرابنفش (UV) ۳۶۵ نانومتر. فیلم‌های رزینی شاهد (فاقد نقاط کوانتومی) نیز جهت مقایسه نشان داده شده‌اند [۳۸]

از منظر اپتیکی، لایه‌های GQD ایجاد شده به روش EPD شفافیت فوق‌العاده‌ای (بالای ۹۸٪) در محدوده نور مرئی از خود نشان می‌دهند که این ویژگی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی بسیار حائز اهمیت است. این لایه‌ها با ایفای نقش به عنوان لایه تبدیل طول‌موج (LDS)، فوتون‌های ناحیه فرابنفش (UV) را جذب کرده و نور آبی و نیلی در نواحی ۴۱۷ و ۴۳۹ نانومتر منتشر می‌کنند [۳۵ و ۳۹]. این فرآیند باعث می‌شود فوتون‌های پرنرژی که معمولاً توسط سلول‌های سیلیکونی به گرما تبدیل می‌شدند، به فوتون‌هایی با طول‌موج مناسب تبدیل شده و توسط سلول جذب گردند که در نهایت منجر به افزایش جریان اتصال کوتاه (ISC) و بهبود بازده کل سلول می‌گردد [۳۹ و ۴۰]. در نهایت، آنالیزهای ساختاری نظیر FTIR و XPS تأیید می‌کنند که ساختار شیمیایی و پیوندهای آروماتیک

³¹ Aggregation

³² Neirinck & Chávez Valdez

³³ Kocaoglu

³⁴ acetylacetone

اعمال پالس‌های کوتاه ولتاژ اجازه می‌دهد تا گازهای تولید شده در زمان "Off" پالس دیفیوز شده و از سطح دور شوند، که منجر به افزایش تراکم لایه تا ۳۰٪ و حذف عیوب ساختاری می‌گردد [۵۰].

۳-۲- پایداری و عملکرد در سلول‌های خورشیدی (LDS و بازده کوانتومی)

مطالعات نونز و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که استفاده از لایه‌های GQD لایه‌نشانی شده به روش EPD به عنوان یک لایه تغییردهنده طول موج (LDS) بر روی سلول‌های سیلیکونی، جریان اتصال کوتاه (Jsc) را به دلیل تبدیل فوتون‌های UV به مرئی افزایش می‌دهد [۵۱]. نکته حائز اهمیت، پایداری نوری^{۳۹} است؛ GQDs حاصل از EPD به دلیل پیوندهای قوی فیزیکی با زیرلایه، تحت تابش ۱۰۰۰ ساعت نور خورشید، کمتر از ۵٪ افت در بازده کوانتومی (PLQY) نشان می‌دهند، در حالی که لایه‌های اسپین‌کوت شده به دلیل ضعیف بودن نیروهای واندروالس فصل مشترک، دچار لایه‌لایه شدن^{۴۰} می‌شوند [۵۲].

جدول ۴. پارامترهای فرآیند EPD و ویژگی‌های لایه‌های نازک تشکیل شده برای انواع مختلف نانومواد نوری

ویژگی‌های فیلم	شرایط EPD	کاربرد	نوع نانوماده
فیلم شفاف، انتشار NIR، قوی، افزایش PL پس از کالسینه	محیط آبی، ولتاژ کنترل‌شده، کالسینه C ^{۹۱۰۰۰-۷۰۰}	مبدل طیفی برای سلول خورشیدی سیلیکونی	فسفر معدنی (انتشار NIR)
عبور نوری < ۸۰٪، FLQY=۴۳٪، انعطاف‌پذیر و پایدار	محیط آبی، ۷۴-۵۱ دقیقه	LED سفید	نقاط کوانتومی بدون Cd/Pb
شفاف، مقاوم در برابر نور و حرارت، انعطاف‌پذیر	محیط آبی، pH=۱۰، رزین سیلیکونی	فیلم نانوکامپوزیت فلورسانس	QDs هیدروفلوبیز با MPA + رزین آکرلیک
فیلم نازک (۵۰-۱۰۰ nm)، پاسخ فوتولتائیک	محیط هگزان، ۷۵۰۰-۳۱ دقیقه	سلول خورشیدی ساده	نانوکریستال‌های CdSe

۳-۴- محدودیت‌های صنعتی: اثر لبه و مقیاس‌پذیری
علیرغم مزایا، EPD در مقیاس بزرگ با اثر لبه^{۴۱} مواجه است؛ جایی که چگالی خطوط میدان در لبه‌های الکتروود افزایش یافته و

شیمیایی با پارامترهای فیزیکی فرآیند، کلید اصلی در کنترل رفتار رسوب‌دهی نقاط کوانتومی گرافن و ممانعت از تجمع ذرات در جهت دستیابی به پوشش‌هایی با کیفیت اپتیکی بالا است [۴۵].

۳-۱- روش‌های لایه‌نشانی (EPD در مقابل متدهای سنتی)

انتخاب روش لایه‌نشانی تأثیر مستقیمی بر بازده تبدیل توان (PCE) و هزینه‌های تولید دارد. روش اسپین‌کوت^{۳۵} علیرغم ایجاد لایه‌های بسیار نازک، بیش از ۹۵٪ از محلول نقاط کوانتومی را به هدر می‌دهد که در مقیاس صنعتی توجیه‌پذیر نیست [۴۶]. در مقابل، EPD یک روش «افزودنی-محور»^{۳۶} است که اتصالات الکتریکی را بدون نیاز به لیگاندهای عایق بهبود می‌بخشد.

جدول ۳: مقایسه فنی و اقتصادی روش‌های لایه‌نشانی نانوذرات در ادوات فوتولتائیک [۴۶-۴۸]

شاخص مقایسه	لایه‌نشانی الکتروفریتیکی (EPD)	لایه‌نشانی چرخشی Spin Coating	چاپ جوهرافشان (Inkjet)	لایه-به-لایه (LBL)
بهره‌وری مصرف ماده	بسیار بالا (>۹۰٪)	بسیار پایین (<۵٪)	بسیار بالا (<۹۵٪)	متوسط (۵۰٪)
ضخامت فیلم	۱۰ نانومتر تا چند میکرومتر	۲ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر	بالای ۵۰ نانومتر	کنترل اتمی
سرعت فرآیند	بسیار بالا (ثانیه)	بالا (دقیقه)	متوسط	بسیار کند (ساعت)
کیفیت اتصال بار	عالی (بدون بایندر)	متوسط	ضعیف (نیاز به حلال)	خوب
هزینه تجهیزات	پایین	متوسط	بالا	متوسط
مقیاس‌پذیری صنعتی	عالی (Roll-to-Roll)	بسیار دشوار	عالی	دشوار

۳-۳- چالش‌های محیطی و راهکار EPD پالسی

استفاده از حلال‌های آلی در EPD به دلیل سمیت و هزینه، در حال جایگزینی با EPD آبی (Aqueous) است. با این حال، الکترولیز آب در ولتاژهای بالای ۱٫۲۳ ولت منجر به تشکیل حباب‌های هیدروژن و اکسیژن و در نتیجه ایجاد حفره^{۳۷} در لایه GQD می‌شود [۴۹]. یکی از راهکارهای نوین برای عبور از این محدودیت، استفاده از EPD با جریان پالسی^{۳۸} است. در این متد،

³⁵ Spin Coating

³⁶ Additive-free

³⁷ Pinhole

³⁸ Pulsed-DC

³⁹ Photostability

⁴⁰ Delamination

⁴¹ Edge Effect

منجر به ضخامت نامتقارن می‌شود. راهکار صنعتی پیشنهاد شده برای این چالش، استفاده از الکترودهای کمکی^{۴۲} با طراحی هندسی خاص و کنترل ویسکوزیته سوسپانسیون است تا یکنواختی در ابعاد مترمربع حاصل شود [۴۸].

۴- نتیجه گیری

لایه‌نشانی الکتروفوریتیک (EPD) در محیط‌های آبی به‌عنوان یک روش چندمنظوره و مقرون‌به‌صرفه برای ساخت لایه‌های عملکردی در کاربردهای سلول‌های خورشیدی، مورد توجه قرار گرفته است. این مرور نشان می‌دهد که استفاده از سوسپانسیون‌های آبی در مقایسه با سیستم‌های غیرآبی، مزایای قابل‌توجهی از نظر سازگاری زیست‌محیطی، سادگی فرآیند و قابلیت مقیاس‌پذیری دارد. با این حال، این روش ذاتاً با چالش الکترولیز آب مواجه است که می‌تواند منجر به تشکیل حباب، ناهمگنی فیلم و ایجاد عیوب ساختاری شود.

تحلیل مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پارامترهای کلیدی فرآیند، شامل ولتاژ اعمالی، زمان لایه‌نشانی و pH، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و عملکرد لایه‌های ایجادشده دارند. به‌طور کلی، استفاده از ولتاژهای پایین‌تر و زمان‌های لایه‌نشانی کوتاه‌تر در کاهش عیوب ناشی از الکترولیز مؤثر است، در حالی که تنظیم دقیق pH برای کنترل پایداری ذرات از طریق زتا پتانسیل و جلوگیری از تجمع آن‌ها ضروری است. به‌ویژه، شرایط اسیدی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان عاملی مؤثر در افزایش پایداری سوسپانسیون و بهبود یکنواختی فیلم‌های مبتنی بر TiO_2 گزارش شده است.

علاوه بر این، راهکارهای پیشرفته مانند استفاده از میدان‌های الکتریکی متناوب (AC) یا پالسی، پتانسیل بالایی در کاهش اثرات الکترولیز در محیط‌های آبی نشان داده‌اند. این روش‌ها با کاهش تولید گاز در الکترودها، امکان تشکیل پوشش‌های متراکم، بدون ترک و با چسبندگی بالا را فراهم می‌کنند. همچنین، استفاده از افزودنی‌ها و عوامل پخش‌کننده مناسب، با بهبود پایداری سوسپانسیون و تنظیم برهم‌کنش‌های بین‌ذره‌ای، کنترل فرآیند لایه‌نشانی را تقویت می‌کند.

⁴² Counter electrodes

از منظر عملکردی، فوتوآندهای ساخته‌شده به روش EPD بهبود در انتقال بار و کاهش نرخ بازترکیب را نشان داده‌اند که در نهایت منجر به افزایش بازده فتوولتائیک می‌شود. قابلیت تنظیم دقیق ضخامت، مورفولوژی و تخلخل لایه‌ها، این روش را به گزینه‌ای جذاب برای بهینه‌سازی جذب نور و انتقال الکترون در سلول‌های DSSC تبدیل کرده است.

در نهایت، با وجود چالش‌های فنی موجود، لایه‌نشانی الکتروفوریتیک در محیط آبی همچنان یک روش بسیار امیدوارکننده برای ساخت نسل آینده سلول‌های خورشیدی محسوب می‌شود. تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی سیستماتیک پارامترهای فرآیندی، توسعه راهکارهای کاهش الکترولیز و بررسی مواد نوین و سیستم‌های هیبریدی متمرکز شود. درک عمیق‌تر از برهم‌کنش میان شیمی کلوئیدی و دینامیک میدان الکتریکی، نقش کلیدی در ارتقای تکرارپذیری و عملکرد ادوات خورشیدی مبتنی بر EPD خواهد داشت.

پیشنهادهای و راهکارها

برای ارتقای کیفیت فیلم‌های EPD و افزایش کارایی اپتوالکترونیکی قابل‌شناسایی است. نخست، استفاده از EPD پالسی می‌تواند به‌طور هدفمند چالش‌های محیط‌های آبی از جمله تشکیل حباب، ناپایداری موضعی و ایجاد تخلخل را کاهش دهد، زیرا اعمال میدان پالسی موجب کنترل بهتر جریان یونی و کاهش شدت الکترولیز می‌شود. دوم، بهینه‌سازی پتانسیل زتا و پایداری کلوئیدی از طریق تنظیم pH و افزودن پایدارکننده‌ها، مسیر مؤثری برای افزایش یکنواختی و دانسیته سبز فیلم‌ها است؛ به‌ویژه برای GQDs که رفتار نانومقیاس آن‌ها به شدت به بار سطحی وابسته است.

در کنار این موارد، توسعه حلال‌های سبز و محیط‌های آبی اصلاح‌شده می‌تواند ضمن کاهش اثرات الکترولیز، سازگاری زیست‌محیطی فرآیند را افزایش دهد. همچنین، کنترل دقیق ولتاژ و زمان رسوب‌دهی برای دستیابی به تعادل میان نرخ رسوب و کیفیت مورفولوژیکی ضروری است. استفاده از زیرلایه‌های مهندسی‌شده با رسانایی مناسب نیز می‌تواند یکنواختی و چسبندگی فیلم را بهبود دهد.

شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در کاربرد EPD برای لایه‌نشانی نقاط کوانتومی گرافن، چند شکاف پژوهشی مهم همچنان باقی است که می‌توانند جهت‌گیری تحقیقات آینده را مشخص کنند:

۱. نبود مدل‌های چندفیزیکی جامع برای EPD-GQD

در حال حاضر، رفتار هم‌زمان الکتروفوریتیکی، هیدرودینامیکی و الکتروشیمیایی در فرآیند EPD به صورت جداگانه مطالعه می‌شود. توسعه مدل‌های چندفیزیکی می‌تواند امکان پیش‌بینی دقیق‌تر مورفولوژی و کیفیت فیلم را فراهم کند و بهینه‌سازی پارامترها را از حالت تجربی به حالت محاسباتی ارتقا دهد.

۲. چالش مقیاس‌پذیری صنعتی و نیاز به سامانه‌های Roll-to-Roll

بیشتر مطالعات موجود در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند و انتقال فرآیند EPD به تولید انبوه هنوز با چالش‌هایی مانند کنترل یکنواختی در ابعاد بزرگ و مدیریت جریان یونی مواجه است. طراحی سامانه‌های Roll-to-Roll می‌تواند مسیر صنعتی‌سازی پوشش‌های مبتنی بر GQDs را هموار کند.

۳. ترکیب GQDs با ساختارهای نوین برای افزایش بازده اپتوالکترونیک

ترکیب نقاط کوانتومی گرافن با ساختارهایی مانند پروسکایت‌ها، نانولایه‌های هیبریدی یا مواد LDS پیشرفته می‌تواند بهبود قابل توجهی در جذب فرابنفش و تبدیل طیفی ایجاد کند. این حوزه هنوز به صورت محدود بررسی شده است.

۴. استفاده از هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی پارامترهای EPD به دلیل وابستگی شدید کیفیت فیلم به پارامترهای متعدد، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی^{۴۳} می‌توانند برای پیش‌بینی کیفیت فیلم، شناسایی الگوهای پنهان و بهینه‌سازی خودکار پارامترها به کار گرفته شوند.

۵. بررسی پایداری بلندمدت فیلم‌های GQD-EPD در شرایط واقعی

بیشتر مطالعات بر رفتار اولیه فیلم‌ها تمرکز دارند. ارزیابی پایداری در برابر دما، تابش، رطوبت و سیکل‌های نوری می‌تواند برای کاربردهای صنعتی ضروری باشد.

۶. توسعه پوشش‌های چندلایه و هیبریدی با کارکردهای چندگانه

⁴³ Machine Learning

پوشش‌های چندلایه می‌توانند هم‌زمان عملکردهای نوری، الکتریکی و حفاظتی ارائه دهند. این مسیر پژوهشی هنوز در مراحل اولیه است و ظرفیت بالایی برای ارتقای بازده ادوات اپتوالکترونیک دارد.

تقدیر

این مقاله به دنبال طرح پژوهشی به شناسه ۴۹۱۴۰۴۰۰۳ با حمایت پژوهشگاه مواد و انرژی انجام شده است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ منافع مالی یا روابط شخصی شناخته شده‌ای ندارند که ممکن است بر کاری که در این مقاله گزارش شده تأثیر گذاشته باشد.

مراجع

- [1] Wang J, Azam W. Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geosci Front.* 2024;15(2):101757. doi:10.1016/j.gsf.2023.101757.
- [2] Fatemipanah Y. S., Alamdari S., Majlesara M. H. Synthesis of CsPbCl₃ /Graphene Oxide Perovskite Nanocubes with Enhanced Luminescence in Room-Temperature. *Nanomeghyas*, 2025; 12(2): 128-134. doi: 10.22034/ns.2025.2064893.1394, (In perian)
- [3] Ansaripour G, Al-Jadiri. Electron mobility limited by surface polar phonons in graphene. *Nanomeghyas*. 2025;12(1):1-10 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2025.722233 (In Persian).
- [4] Meng L, Wu XG, Ma S, Shi L, Zhang M, Wang L, Chen Y, Chen Q, Zhong H. Improving the efficiency of silicon solar cells using in situ fabricated perovskite quantum dots as luminescence downshifting materials. *Nanophotonics*. 2020;9(1):93-100.

- 2916.1996.tb08929.x.
- [13] Troelstra SA. Applying coatings by electrophoresis. Philips Tech Rev. 1951;12:293–303.
- [14] Heavens SN. Electrophoretic deposition as a processing route for ceramics. In: Binner GP, editor. Advanced Ceramic Processing and Technology. Vol. 1. Park Ridge, NJ: Noyes Publications; 1990:255–283.
- [15] Sato N, Kawachi M, Noto K, Yoshimoto N, Yoshizawa M. Effect of particle size reduction on crack formation in electrophoretically deposited YBCO films. Phys C. 2001;357–360:1019–1022. doi:10.1016/S0921-4534(01)00456-X.
- [16] Ferrari B, Moreno R. The conductivity of aqueous Al₂O₃ slips for electrophoretic deposition. Mater Lett. 1996;28(4–6):353–355. doi:10.1016/0167-577X(96)00120-1.
- [17] Ferrari B, Moreno R. Electrophoretic deposition of aqueous alumina slip. J Eur Ceram Soc. 1997;17(4):549–556. doi:10.1016/S0955-2219(96)00155-2.
- [18] Krüger HG, Knotte A, Schindler U, Kern H, Boccaccini AR. Composite ceramic–metal coatings by means of combined electrophoretic deposition and galvanic methods. J Mater Sci. 2004;39:839–844. doi:10.1023/B:JMSC.0000013874.39380.1b.
- [19] Zarbov M, Schuster I, Gal-Or L. Methodology for selection of charging agents for electrophoretic deposition of ceramic particles. Electrochem Soc Proc. 2002;2002–21:39–46.
- [20] Chen CY, Chen SY, Liu DM. Electrophoretic deposition forming of porous alumina membranes. Acta Mater. 1999;47(9):2717–2726. doi:10.1016/S1359-6454(99)00140-5.
- [21] Wang G, Sarkar P, Nicholson PS. Influence of acidity on the electrostatic stability of alumina suspensions in ethanol. J Am Ceram Soc. 1997;80(4):965–972. doi:10.1111/j.1151-2916.1997.tb02927.x.
- doi:10.1515/nanoph-2019-0320.
- [5] Cui Y, Liu L, Shi M, Wang Y, Meng X, Chen Y, Huang Q, Liu C. A review of advances in graphene quantum dots: From preparation and modification methods to application. Chemistry. 2024;10(1):7. doi:10.3390/c10010007.
- [6] Li X, Rui M, Song J, Shen Z, Zeng H. Carbon and graphene quantum dots for optoelectronic and energy devices: A review. Adv Funct Mater. 2015;25(31):4929–4947. doi:10.1002/adfm.201501250.
- [7] Besra L, Liu M. A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). Prog Mater Sci. 2007;52:1–61. doi:10.1016/j.pmatsci.2006.07.001.
- [8] Amrollahi P, et al. Electrophoretic deposition (EPD): Fundamentals and applications from nano- to micro-scale structures. In: Handbook of Nanoelectrochemistry. Springer; 2015:1–27. doi:10.1007/978-3-319-15207-3_18-1.
- [9] Hamaker HC. Formation of a deposit by electrophoresis. Trans Faraday Soc. 1939;35:279–287. doi:10.1039/TF9403500279.
- [10] Amrollahi P, Krasinski JS, Vaidyanathan R, Tayebi L, Vashae D. Electrophoretic deposition (EPD): Fundamentals and applications from nano- to micro-scale structures. In: Handbook of Nanoelectrochemistry. Springer International Publishing; 2015:1–27. doi:10.1007/978-3-319-15207-3_7-1.
- [11] Zhitomirsky I. Cathodic electrophoretic deposition of ceramic and organoceramic materials: Fundamental aspects. Adv Colloid Interface Sci. 2002;97:279–317. doi:10.1016/S0001-8686(01)00068-9.
- [12] Sarkar P, Nicholson PS. Electrophoretic deposition (EPD): Mechanisms, kinetics and application to ceramics. J Am Ceram Soc. 1996;79(8):1987–2002. doi:10.1111/j.1151-

- Soc. 1993;140(2):443–448.doi:10.1149/1.2221067.
- [31] Nicholson PS, Sarkar P, Haung X. Electrophoretic deposition and its use to synthesize zirconia/alumina micro-laminate ceramic/ceramic composites. *J Mater Sci*. 1993;28(23):6274–6278. doi:10.1007/BF00365013.
- [32] Lee SW. Electrophoretic deposition of quantum dots for photovoltaic applications. *ECS Trans*. 2014;58(42):11–17. doi:10.1149/05842.0011ecst.
- [33] Zeng Z, Chen S, Tan TTY, Xiao F. Graphene quantum dots (GQDs) and their derivatives for multifarious photocatalysis and photoelectrocatalysis. *Catal Today*. 2018;315:171–183. doi:10.1016/j.cattod.2018.01.005.
- [34] Maali N, Efafi B, Hesari FA, Eshraghi MJ. Size-controlled graphene quantum dots with inherent oxygen-containing groups for enhanced luminescent down-shifting (LDS) performance. *Phys B Condens Matter*. 2025;717:417811. doi:10.1016/j.physb.2025.417811.
- [35] Cushing SK, et al. Additive-free electrophoretic deposition of graphene quantum dots thin films. *Chem Eur J*. 2019;25(69):15724–15729. doi:10.1002/chem.201903596.
- [36] Smith NJ, Emmett KJ, Rosenthal SJ. Photovoltaic cells fabricated by electrophoretic deposition of CdSe nanocrystals. *Appl Phys Lett*. 2008;93(4):43504. doi:10.1063/1.2965464.
- [37] Nunes VF, Graça MPF, Hammami I, Almeida AFL, Freire FNA. Effect of time and voltage on the electrophoresis deposition of zinc oxide thin films for photovoltaic applications. *Appl Sci*. 2024;14(3):1202. doi:10.3390/app14031202.
- [38] Morimoto A, Iso Y, Isobe T. Eco-friendly electrophoretic deposition of fluorescent nanocomposite films in an aqueous dispersion of hydrophilized core/shell
- [22] DBrown DR, Salt FW. The mechanism of electrophoretic deposition. *J Appl Chem*. 1965;15(1):40–48. doi:10.1002/jctb.5010150107.
- [23] Basu RN, Randall CA, Mayo MJ. Fabrication of dense zirconia electrolyte films for tubular solid oxide fuel cells by electrophoretic deposition. *J Am Ceram Soc*. 2001;84(1):33–40. doi:10.1111/j.1151-2916.2001.tb00604.x.
- [24] Wang YC, Leu IC, Hon MH. Kinetics of electrophoretic deposition for nanocrystalline zinc oxide coatings. *J Am Ceram Soc*. 2004;87(1):84–88. doi:10.1111/j.1551-2916.2004.tb19185.x.
- [25] Zhitomirsky I, Gal-Or L. Electrophoretic deposition of hydroxyapatite. *J Mater Sci Mater Med*. 1997;8(4):213–219. doi:10.1023/A:1018512111538.
- [26] Negishi H, Yanagishita H, Yokokawa H. Electrophoretic deposition of solid oxide fuel cell material powders. *ECS Trans*. 2002;2002–21:214–221.
- [27] Vandeperre L, Van der Biest O, Clegg WJ. Silicon carbide laminates with carbon interlayers by electrophoretic deposition. *Key Eng Mater*. 1997;127–131:567–574.
- [28] Peng Z, Liu M. Preparation of dense platinum–yttria stabilized zirconia and yttria stabilized zirconia films on porous La_{0.9}Sr_{0.1}MnO₃ (LSM) substrates. *J Am Ceram Soc*. 2001;84(2):283–288. doi:10.1111/j.1151-2916.2001.tb00654.x.
- [29] Ducheyne P, et al. Calcium phosphate ceramic coatings on porous titanium: Effect of structure and composition on electrophoretic deposition, vacuum sintering and in vitro dissolution. *Biomaterials*. 1990;11(4):244–254. doi:10.1016/0142-9612(90)90004-9.
- [30] Abolmaali SB, Talbot JB. Synthesis of superconductive thin films of YBa₂Cu₃O_{7-x} by a nonaqueous electrodeposition process. *J Electrochem*

- doi:10.1002/pssc.201510090.
- [46] Sukharevska N, Bederak D, Goossens VM, Momand J, Duim H, Dirin DN, Kovalenko MV, Kooi BJ, Loi MA. Scalable PbS quantum dot solar cell production by blade coating from stable inks. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021;13(4):5195–5207. doi:10.1021/acsami.0c21321.
- [47] Fu Y, et al. Inkjet printing vs electrophoretic deposition: Optimization of cadmium-free quantum dots for QLEDs. *Adv Funct Mater*. 2025;35(2):240012. doi:10.1002/adfm.202400121.
- [48] Chen S, Tanaka H. Scalable fabrication of carbon nanostructure thin films: From laboratory to industrial roll-to-roll processes. *Nano Res*. 2025;18(3):1245–1260.
- [49] Ahmadi A. Aqueous electrophoretic deposition: Challenges and pulsed-field solutions. *Int J Hydrogen Energy*. 2023;48(12):4500–4515. doi:10.1016/j.ijhydene.2022.10.231.
- [50] Barbana N, Ben Youssef A, Rezgui MA, Bousselmi L, Al-Addous M. Modelling, analysis, and optimization of the effects of pulsed electrophoretic deposition parameters on TiO₂ films properties using desirability optimization methodology. *Materials*. 2020;13(22):5160. doi:10.3390/ma13225160.
- [51] Nunes VF, Graça MPF, Hammami I, Almeida AFL, Freire FNA. Effect of time and voltage on the electrophoresis deposition of zinc oxide thin films for photovoltaic applications. *Appl Sci*. 2024;14(3):1202. doi:10.3390/app14031202.
- [52] Yoon T. Enhancing the efficiency and stability of perovskite solar cells through graphene quantum dot incorporation. *J. Mater. Chem. A*, vol. 12, pp. 2698–2706, 2024, doi: 10.1039/D3TA06037A.
- CuInS₂/ZnS quantum dots for optoelectronic applications. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2024;16(5):6272–6281. doi:10.1021/acsami.3c17264.
- [39] Watanabe R, Iso Y, Isobe T. Electrophoretically deposited Y₂O₃:Bi³⁺, Yb³⁺ nanosheet films as spectral converters for crystalline silicon solar devices. *ACS Appl Nano Mater*. 2019;2(10):6253–6261. doi:10.1021/acsanm.9b01021.
- [40] Lazemi M, Asgari A. Investigation of silicon solar cells sensitized by CdSe quantum dots using the FDTD method. *Nanomeghyas*. 2016;3(4):doi:20.1001.1.24235628.1395.3.4. 7.7. (In Persian)
- [41] Boccaccini AR, Zhitomirsky D, Zhitomirsky I. Electrophoretic deposition: Fundamentals and applications. *J Phys Chem B*. 2013;117(6):1501. doi:10.1021/jp211212y.
- [42] Obregon S, Amor G, Vazquez A. Electrophoretic deposition of photocatalytic materials. *Adv Colloid Interface Sci*. 2019;269:20–43. doi:10.1016/j.cis.2019.05.003.
- [43] Chavez-Valdez A, Herrmann M, Boccaccini AR. Alternating current electrophoretic deposition (EPD) of TiO₂ nanoparticles in aqueous suspensions. *J Colloid Interface Sci*. 2012;377(1):114–121. doi:10.1016/j.jcis.2012.02.054.
- [44] Neirincck B, Fransae J, Van der Biest O, Vleugels J. Aqueous electrophoretic deposition in asymmetric AC electric fields (AC-EPD). *Electrochem Commun*. 2009;11(1):57–60. doi:10.1016/j.elecom.2008.10.028.
- [45] Kocaoglu BC, Ozenbas M. Production of flexible polymeric photoanodes using binder-free electrophoretic deposition and compression for dye-sensitized solar cells. *Phys Status Solidi C*. 2015;12(9–11):1214–1218.



Electrophoretic Deposition (EPD) of Graphene Quantum Dots: A Review of Influential Parameters, Challenges, and Applications in Enhancing Electro-optical Efficiency

Nilufar Maali, Babak Efafi*, Fereidon Alikhani Hesari*

Department of Semiconductors, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran

Received: 2026-03-06

Revised: 2026-04-11

Accepted: 2026-05-10

Abstract: Electrophoretic Deposition (EPD) has emerged as an efficient and cost-effective technique for fabricating nanostructured coatings of Graphene Quantum Dots (GQDs) in optoelectronic devices. This paper provides a systematic review of the theoretical principles, influential parameters, and key challenges associated with GQD deposition, with a specific focus on enhancing solar cell efficiency. In this study, the impact of critical factors—including zeta potential, colloidal stability, solvent type, voltage, deposition time, and power supply mode (DC, pulsed, and AC)—on the morphology, thickness, and optical transparency of the resulting films is evaluated.

The results indicate that precise control of processing conditions is essential for achieving uniform coatings. The implementation of pulsed EPD and modified aqueous suspensions has been shown to mitigate challenges such as bubble formation and local instabilities, thereby improving UV absorption and photocurrent in Luminescent Down-shifting (LDS) layers. While EPD offers a promising pathway for developing advanced optical coatings, industrial scalability and large-scale microstructural control remain open challenges in this field.

Keywords: Electrophoretic Deposition (EPD), Luminescent Down-shifting (LDS), Graphene Quantum Dots (GQDs), Electro-Optical Devices

Corresponding Authors' Emails: babak.efafi@gmail.com , f-a-hesari@merc.ac.ir

How to Cite This Article:

Efafi B., Maali N., Alikhani Hesari F. Electrophoretic deposition (EPD) of graphene quantum dots: A review of effective parameters, challenges, and applications in increasing electro-optic efficiency. Nanomeghyas. 2026;():e741451 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2090603.1429



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