Document Type: Full length research Paper
Pages: 27-38

Controlling of impedance values of liquid crystal samples containing tin oxide nanoparticles under the influence of oxygen plasma

Mahsa Khadem Sadigh*

Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Received: 26.05.2025 Final revised: 27.01.2026 Accepted: 14.02.2026 Published On-Line: 31.05.2026

Doi: 10.22055/jrmbs.2026.20664

Abstract

In this study, the effect of incorporating tin oxide nanoparticles and their surface modification by oxygen plasma on the impedance behavior of a nematic liquid crystal was investigated. Samples were prepared without plasma treatment and after oxygen plasma exposure for 2 and 14 minutes. Impedance spectra were recorded over the frequency range of 0.1 Hz to 0.1 MHz using an equivalent circuit model consisting of bulk resistance (R_{LC}), bulk capacitance (C_{LC}), double-layer capacitance (C_{DL}), and a Warburg element (W). The results revealed that the addition of SnO_2 nanoparticles decreases resistance and enhances conductivity, whereas plasma treatment increases the charge-transfer barriers due to the formation of a thin oxide shell on the particle surface. SEM images confirmed that the mean particle size increases from 28 nm to 32 nm after 2 min and to 34 nm after 14 min of plasma treatment. The observed variations in C_{DL} and W indicate that ionic diffusion and molecular ordering are modified with increasing plasma time. Overall, controlling plasma conditions provides an effective approach for tailoring the electrical response and optimizing the performance of nanoparticle-doped nematic liquid crystals for use in sensors and advanced display technologies.

Keywords: Oxygen, Liquid crystal, Plasma, Resistance, Nanoparticle, Capacitance.

* Corresponding Author: mahsa.sadigh@ubonab.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

کنترل مقادیر امپدانس نمونه‌های بلورمایع حاوی نانوذرات اکسید قلع تحت تأثیر پلاسمای اکسیژن

مهسا خادم صدیق*

گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، ایران

دریافت: ۱٤۰٤/۰۵/۲۷ ویرایش نهائی: ۱٤۰٤/۰۹/۲۷ پذیرش: ۱٤۰٤/۱۱/۲۵ انتشار بر خط: ۱٤۰۵/۰۳/۱۰

Doi: 10.22055/jrmbs.2026.20664

چکیده

در این پژوهش، تأثیر افزودن نانوذرات اکسید قلع و اصلاح سطح آن‌ها توسط پلاسمای اکسیژن بر رفتار امپدانسی بلور مایع نماتیک بررسی شد. نمونه‌ها در حالت بدون پلاسما و پس از تیمار پلاسما به‌مدت ۲ و ۱٤ دقیقه تهیه شدند. طیف امپدانس در بازهٔ وسیعی از فرکانس‌ها اندازه‌گیری و داده‌ها با مدل مدار معادل شامل مقاومت بلور مایع (R_{LC})، ظرفیت خازنی بلور مایع (C_{LC})، ظرفیت لایهٔ دوگانه (C_{DL}) و المان واربرگ (W) تحلیل شدند. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات سبب کاهش مقاومت و بهبود رسانایی شد، در حالی‌که تیمار پلاسما با ایجاد پوشش اکسیدی روی ذرات، موانع انتقال بار را افزایش داده و موجب افزایش مقاومت مؤثر گردید. تصاویر به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که اندازهٔ نانوذرات از ۲۸ نانومتر در حالت اولیه به ۳۲ نانومتر پس از ۲ دقیقه و به ۳٤ نانومتر پس از ۱٤ دقیقه پلاسما افزایش یافت. همچنین تغییرات ظرفیت لایه دوگانه و پارامتر واربرگ بیانگر تعدیل فرآیندهای نفوذ یونی و نظم مولکولی در اثر زمان پلاسما است. این نتایج نشان می‌دهد که تنظیم زمان و شرایط پلاسما می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای کنترل خواص الکتریکی و بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌های بلور مایع در کاربردهایی نظیر حسگرها و نمایشگرهای پیشرفته به‌کار رود.

کلیدواژگان: اکسیژن، بلور مایع، پلاسما، مقاومت، نانوذره، ظرفیت

مقدمه

بلورهای مایع دسته‌ای از مواد با ساختار میان‌فاز بین جامدات بلوری و مایعات ایزوتروپیک هستند که به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون نظم مولکولی جهت‌دار، پاسخ پذیری به محرک‌های خارجی و قابلیت کنترل اپتیکی، در دهه‌های اخیر مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته‌اند. این مواد به‌دلیل ترکیب هم‌زمان خواص مکانیکی مایعات و نظم ساختاری جامدات، در ساخت نمایشگرها، حسگرها و سامانه‌های فوتونیکی کاربرد فراوانی دارند [۱۰–۱]. خواص الکتریکی و دی‌الکتریکی بلورهای مایع نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد دستگاه‌های الکترونیکی مبتنی بر آن‌ها دارد. ازاین‌رو، بهبود رسانایی، کاهش مقاومت و کنترل پاسخ امپدانسی از موضوعات کلیدی در مهندسی این مواد محسوب می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر برای بهینه‌سازی این ویژگی‌ها، افزودن نانوذرات به ماتریس بلور مایع است. نانوذرات به‌دلیل نسبت سطح به حجم بالا و قابلیت ایجاد برهم‌کنش‌های

* نویسنده مسئول: mahsa.sadigh@ubonab.ac.ir

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کریتیو کامنز تخصیص ٤.۰ بین‌المللی می‌باشد

مولکولی و الکترونی قوی، می‌توانند نظم مولکولی، قطبش‌پذیری و هدایت الکتریکی را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند [۱۸–۱۱].

در میان نانوذرات مختلف، نانوذرات اکسید قلع (SnO_2) به‌عنوان نیمه‌رساناهای اکسیدی با رسانایی بالا، پایداری شیمیایی مناسب و زیست‌سازگاری مطلوب، گزینه‌ای کارآمد برای اصلاح ویژگی‌های الکتریکی و اپتیکی بلورهای مایع شناخته شده‌اند. حضور این نانوذرات سبب تغییر ساختار دی‌الکتریک، افزایش انتقال بار و بهبود رفتار امپدانسی در ترکیبات بلور مایع می‌شود، که می‌تواند عملکرد حسگرها و سلول‌های الکترواپتیکی را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد [۲۲–۱۹]. از سوی دیگر، فناوری پلاسما به‌عنوان روشی کارآمد، تمیز و سازگار با محیط‌زیست، امکان اصلاح سطحی مواد را بدون استفاده از عوامل شیمیایی فراهم می‌سازد. اعمال پلاسما می‌تواند موجب فعال‌سازی سطح نانوذرات، تغییر مورفولوژی، و ایجاد لایه‌های اکسیدی یکنواخت شود. این تغییرات سطحی به‌نوبه خود بر برهم‌کنش‌های بین نانوذرات و مولکول‌های بلور مایع تأثیر گذاشته و در نهایت ویژگی‌های الکتریکی و پاسخ فرکانسی سامانه را دگرگون می‌سازد [۲۹–۲۳].

مطالعهٔ رفتار بلورهای مایع آلائیده با نانوذرات اکسید قلع تحت تأثیر پلاسما، امکان تحلیل دقیق فرایندهای انتقال بار، قطبش سطحی، و نفوذ یونی را فراهم می‌آورد. بررسی این پدیده‌ها از طریق طیف‌سنجی امپدانس، درک بهتری از سازوکارهای فیزیکی مؤثر در مواد نانوکامپوزیتی ارائه می‌دهد و زمینه‌ساز توسعهٔ مواد عملکردی با قابلیت تنظیم‌پذیری بالا در کاربردهایی همچون حسگرهای زیستی، الکترونیک انعطاف‌پذیر و فناوری‌های فوتونیکی می‌شود.

در کارهای پیشین، اثر افزودن نانوذرات SnO_2 و تیمار آن‌ها با پلاسما آرگون بررسی شده بود، اما پلاسما آرگون عمدتاً تغییرات فیزیکی ایجاد می‌کند و اصلاحات شیمیایی قابل‌توجهی روی سطح نانوذرات ایجاد نمی‌شود. در مقابل، پلاسما اکسیژن قادر است گروه‌های عاملی اکسیژنی، لایه‌های اکسیدی و دگرگونی‌های سطحی مؤثر ایجاد کند که می‌تواند پاسخ امپدانسی و تعامل نانوذره–بلور مایع را به‌طور مستقیم تغییر دهد [۳۱–۳۰]. بنابراین، هدف این پژوهش، مطالعهٔ اختصاصی اثر پلاسما اکسیژن و مقایسه تأثیر زمان‌های مختلف آن بر مقاومت، ظرفیت و فرایندهای وابسته به نفوذ یون در نانوکامپوزیت بلور مایع است. این انتخاب، تمایز مشخصی میان مطالعه حاضر و تحقیقات پیشین ایجاد کرده و امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار الکتریکی ماده را فراهم می‌سازد.

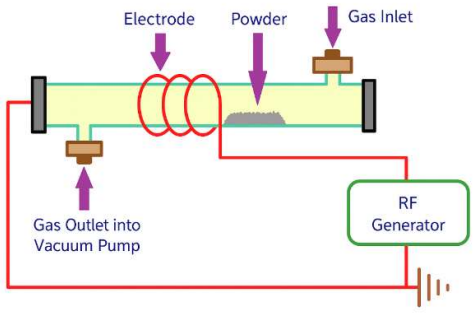
کارهای آزمایشگاهی

در این مطالعه، کریستال مایع نماتیک ML-0648 و نانوذرات **اکسید قلع**(SnO_2) ، تهیه‌شده از شرکت Merck، مورد استفاده قرار گرفتند. کریستال مایع به‌کاررفته از نوع نماتیک با دمای گذار نماتیک به ایزوتروپیک برابر با ۳۵٤٫۱۵ **کلوین** و ضریب دوشکستی ۰٫۱۰۲۹ است. نانوذرات SnO_2 دارای اندازهٔ متوسط ۲۸ نانومتر، ساختار کریستالی پایدار و ویژگی‌های نیمه‌رسانایی مناسب هستند. به‌منظور اندازه‌گیری خواص امپدانسی، از سلول‌های موازی (Parallel Cells) استفاده شد که مراحل ساخت آن‌ها به‌صورت زیر انجام گرفت:

۱. ابتدا صفحات شیشه‌ای پوشیده‌شده با لایه‌ای از اکسید قلع ایندیم (ITO) در دستگاه فراصوت به‌ترتیب با آب، استون و در پایان با الکل شست‌وشو داده شده و سپس در دمای محیط خشک شدند.

۲. لایه‌های هم‌خطی (Alignment Layers) جهت ایجاد نظم مولکولی درون سلول بر سطح داخلی شیشه‌ها اعمال گردید.
۳. دو لایهٔ آماده‌شده با استفاده از فاصله‌انداز مناسب روی‌هم قرار داده شده تا سلول نهایی تشکیل شود.

در نهایت، سلول‌های خالی با نمونه‌های مورد بررسی پر شده و به نواحی باز دو طرف چسب زده شد. ویژگی‌های الکتروشیمیایی نمونه‌های بلور مایع خالص و آلائیده با نانوذرات SnO_2 با استفاده از دستگاه Autolab PGSTAT302 اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است که تمامی اندازه‌گیری‌های امپدانسی در دمای اتاق و تحت شرایط دمایی پایدار انجام شده است. برای بررسی مورفولوژی سطح نیز، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه JSM-7600F ثبت گردید.



شکل ۱. چیدمان تجربی اعمال پلاسمای اکسیژن.

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، فرآیند اصلاح سطحی نانوذرات توسط پلاسما در یک راکتور پلاسمای فرکانس رادیویی (RF) با فرکانس ۱۳٫۵٦مگاهرتز و توان ۵۰وات انجام شد. محفظهٔ تخلیه به‌صورت استوانه‌ای با طول کلی ۳۰۰میلی‌متر و قطر خارجی ٦۰میلی‌متر طراحی شده بود. یک سیم‌پیچ مسی به‌قطر ۲میلی‌متر به‌طور هم‌محور پیرامون لوله پیچیده شد که به‌عنوان الکترود متصل به‌منبع عمل می‌کرد. پیش از روشن‌سازی پلاسما، محفظه با استفاده از پمپ دورانی تا فشار پایه حدود ۰٫۰۰۱ تور تخلیه شد. سپس گاز اکسیژن با خلوص ۹۹٫۹۹ درصد به سیستم بسته تزریق گردید تا فشار داخلی به‌حدود ۰٫۵۰ تور برسد و محیط کاری مورد نظر ایجاد شود. در این شرایط، تخلیهٔ درخشانی یکنواخت و پایدار برقرار شد و چگالی پلاسما حدود 1×10^{15} ذره بر متر مکعب برآورد گردید که با محدودهٔ معمول پلاسماهای فرکانس رادیویی کم‌فشار مطابقت دارد. پودرهای نانوذره به‌صورت یکنواخت درون نگهدارنده‌ای از جنس کوارتز که در مرکز ناحیهٔ تخلیه قرار داشت، پخش شدند تا میزان تابش پلاسما در تمام بخش‌ها یکسان باشد. تیمارهای پلاسمایی به‌ترتیب در بازه‌های زمانی ۲ و ۱٤ دقیقه انجام گرفت تا اثر زمان تابش بر اندازه و ویژگی‌های سطحی ذرات بررسی شود. پس از پایان هر مرحله، نمونه‌ها درون راکتور تا رسیدن به دمای اتاق خنک شده و سپس در ظروف شیشه‌ای دربسته و خشک نگهداری شدند. تمامی شرایط آزمایشی در طول مراحل مختلف ثابت نگه داشته شد تا قابلیت تکرارپذیری نتایج تضمین گردد. انتخاب زمان‌های ۲ و ۱٤ دقیقه برای تیمار پلاسما بر اساس نتایج مقدماتی و بررسی‌های پیش‌آزمایشی انجام شد. مطالعات SEM نشان داد که در زمان‌های کمتر از ۲دقیقه تغییر محسوسی در سطح نانوذرات رخ نمی‌دهد، در حالی‌که در زمان‌های بیش از ۱٤دقیقه، پدیدهٔ توده‌ای شدن و کاهش یکنواختی سطح مشاهده می‌شود که می‌تواند پایداری بلور مایع را کاهش دهد. از این‌رو، دو بازهٔ زمانی ۲ و ۱٤ دقیقه به‌ترتیب به‌عنوان حداقل و حداکثر اصلاح سطح مؤثر انتخاب شدند تا روند تغییرات ساختاری و امپدانسی به‌صورت مقایسه‌ای بررسی شود.

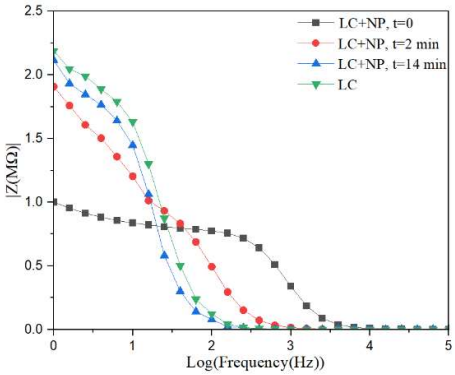
بحث و نتیجه‌گیری

طیف‌سنجی امپدانس به‌عنوان یکی از روش‌های تحلیلی دقیق و غیرمخرب، برای بررسی پاسخ دینامیکی سیستم‌های الکتریکی–دی‌الکتریکی به تحریک فرکانس متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با جداسازی بخش‌های حقیقی و موهومی امپدانس، امکان تحلیل فرآیندهای انتقال بار، قطبش‌های الکتروشیمیایی و ویژگی‌های دی‌الکتریک و رسانش یونی را فراهم می‌سازد. امپدانس کل (Z) کمیتی مختلط است که از ترکیب دو مؤلفه حقیقی (Z_i) و موهومی (Z_r) تشکیل شده و اندازهٔ آن از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

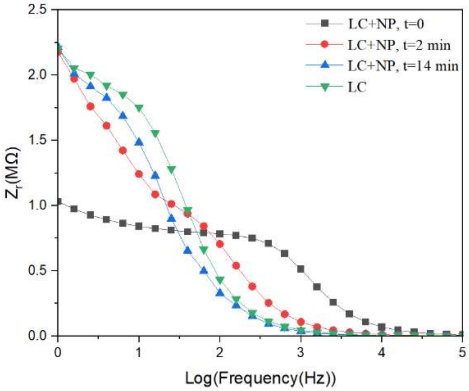
$$|Z| = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2} \qquad ۱$$

در شکل۲، تغییرات امپدانس کل و مؤلفه‌های حقیقی و موهومی برای بلور مایع خالص و بلور مایع آلائیده با نانوذرات SnO_2 (با درصد وزنی ٪۰٫۵) در حضور و عدم حضور اثرات پلاسما نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر امپدانس کل و اجزای حقیقی و موهومی به‌شدت وابسته به فرکانس، حضور نانوذره و مدت زمان اعمال پلاسمای اکسیژن هستند. با افزایش فرکانس، امپدانس کل و مؤلفه حقیقی آن کاهش یافته و در فرکانس‌های بالا به مقدار ثابتی نزدیک می‌شوند که بیانگر غلبه رسانش اهمی و کاهش اثرات قطبش است. در مقابل، مؤلفه موهومی امپدانس با افزایش فرکانس ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و در نهایت در فرکانس‌های بالا، مشابه مؤلفه حقیقی، به‌مقدار ثابتی میل می‌کند. این رفتار بازتابی از تغییر مکانیزم‌های انتقال بار از قطبش فضایی در فرکانس‌های پایین به قطبش دی‌الکتریک و پاسخ‌های خازنی در فرکانس‌های بالا است. در نمونه‌های حاوی نانوذره SnO_2 نسبت به بلور مایع خالص، شیفت طیفی به‌سمت فرکانس‌های پایین‌تر مشاهده می‌شود.

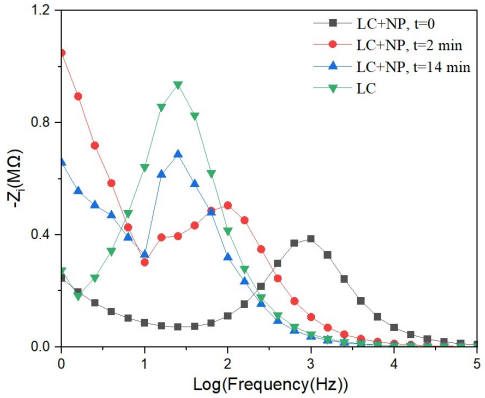
الف



ب



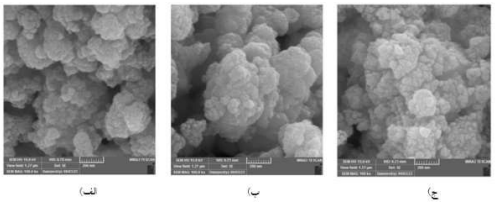
ج



شکل۲. تغییرات الف: امپدانس کل ب: قسمت حقیقی امپدانس و ج: قسمت موهومی امپدانس نمونه‌های مورد مطالعه تحت اعمال پلاسمای اکسیژن.

مؤلفهٔ حقیقی امپدانس بیانگر مقاومت الکتریکی سیستم است و تحت تأثیر میزان هدایت یونی و تراکم حامل‌های بار قرار دارد. در فرکانس‌های پایین، فرصت کافی برای جابه‌جایی یون‌ها و تشکیل لایه‌های قطبی فراهم است و مقاومت ظاهری بیشتر دیده می‌شود. با افزایش فرکانس، این قطبش کاهش یافته و مقاومت مؤثر سیستم به‌مقدار ذاتی خود نزدیک می‌شود. مؤلفه موهومی امپدانس که به‌ظرفیت خازنی سیستم مرتبط است، در ابتدا با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد زیرا قطبش مولکولی به‌طور مؤثرتری انجام می‌شود، اما در فرکانس‌های بالا، سیستم قادر به پیروی سریع از تغییرات میدان نبوده و مؤلفهٔ موهومی به صفر میل می‌کند. در بلور مایع خالص، نظم مولکولی و جهت‌گیری دقیق باعث پاسخ سریع‌تر و تخلیه بار مؤثرتر می‌شود. افزودن نانوذرات SnO_2 باعث ایجاد تله‌های بار و تغییر در برهم‌کنش‌های بین‌فازی شده و در نتیجه زمان‌های پاسخ افزایش می‌یابد و منحنی امپدانس به فرکانس‌های پایین‌تر منتقل می‌شود. افزودن نانوذرات SnO_2 موجب افزایش رسانندگی یونی بلور مایع شد، که ناشی از اثرات سطحی ذرات است: تسهیل تفکیک یون‌ها، ایجاد مسیرهای سطحی برای حرکت یون‌ها و افزایش قطبش‌پذیری سطحی. افزایش رسانندگی ناشی از افزودن یون جدید به محیط نبود، بلکه نتیجه افزایش تحرک یون‌ها و تقویت فرآیندهای سطحی بود. نانوذرات SnO_2 علاوه بر تغییر در رسانش، موجب اختلال در نظم و جهت‌گیری مولکول‌های نماتیک می‌شوند که این امر قطبش‌پذیری مؤثر را کاهش داده و پاسخ امپدانسی را به‌سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابه‌جا می‌کند. شیفت به‌سمت فرکانس پایین‌تر معمولاً نشان‌دهنده افزایش زمان پاسخ سیستم است، زیرا بارها (یون یا الکترون) کندتر جابه‌جا یا رها می‌شوند. در واقع، حضور نانوذرات SnO_2 با نقص سطحی (ناشی از پلاسما اکسیژن) ممکن است تله‌های بار بیشتری ایجاد کرده باشد که باعث می‌شوند بارها در زمان‌های طولانی‌تر باقی بمانند. همچنین، برهم‌کنش مولکول‌های بلور مایع با سطح ذرات (گروه‌های اکسیژنی ایجادشده توسط پلاسما) می‌تواند قطبش موضعی را افزایش دهد، که پاسخ خازنی سیستم را کندتر می‌کند و باعث می‌شود پاسخ امپدانس در فرکانس پایین‌تر متمرکز شود.

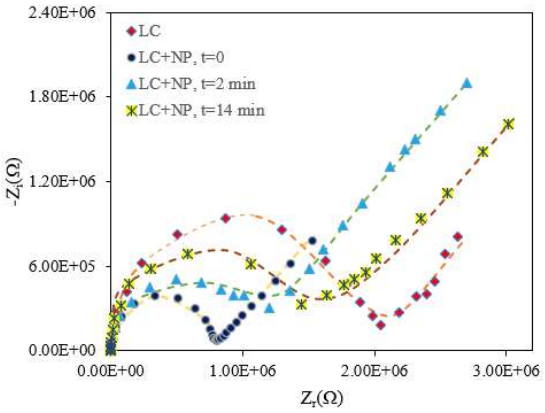
همچنین حضور نانوذرات باعث افزایش ظرفیت موضعی و ایجاد موانع در مسیر انتقال بار می‌شود که پدیده‌های تخلیه بار را کندتر می‌کند؛ این اثر در مؤلفه موهومی امپدانس آشکارتر است. برای بررسی دقیق‌تر، به‌منظور کنترل خواص الکتریکی، نانوذرات SnO_2 در بازه‌های زمانی ۲ و ١٤ دقیقه تحت پلاسما اکسیژن قرار گرفتند. نتایج تصاویر SEM (شکل۳) نشان می‌دهد که اندازهٔ میانگین نانوذرات از ۲۸ نانومتر در حالت اولیه به ۳۲ نانومتر در زمان ۲ دقیقه و ۳٤ نانومتر در زمان ١٤ دقیقه افزایش یافته است. این افزایش اندازه و تشکیل پوشش اکسیدی یکنواخت‌تر باعث کاهش نسبت سطح به حجم و کاهش تعداد مراکز فعال سطحی می‌شود. در نتیجه، قطبش‌پذیری موضعی کاهش یافته و مقاومت داخلی نمونه افزایش می‌یابد.



شکل۳. تصاویر به‌دست آمده از SEM تحت تأثیر پلاسمای اکسیژن در بازه‌های زمانی مختلف الف: $t=0$ ب: $t=2$ min و ج: $t=14$ min.

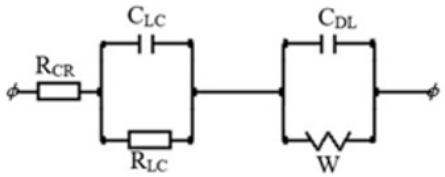
این پدیده در شکل٤ منحنی‌های Cole–Cole به‌صورت افزایش قطر نیم‌دایره مشاهده می‌شود. نمونه‌های تحت پلاسما که دارای تغییرات مورفولوژیکی بیشتری هستند، مقاومت بالاتری نشان

می‌دهند، در حالی‌که نمونه بدون پلاسما به‌دلیل مسیرهای رسانش بیشتر مقاومت کمتری دارد. بلور مایع خالص به‌دلیل نظم ساختاری بالاتر بیشترین مقاومت و در نتیجه بزرگ‌ترین قطر منحنی Cole–Cole را نشان می‌دهد. این رابطه مستقیم بین مورفولوژی سطح، قطبش‌پذیری و رفتار امپدانسی مؤید اثر قوی تغییرات ساختاری بر انتقال بار است.



شکل ٤. منحنی‌های Cole-Cole نمونه‌های مورد مطالعه تحت تأثیر پلاسمای اکسیژن. (منحنی‌های خط‌چین بیانگر نتایج فیت شده بر اساس مدار معادل و نقاط گسسته نشان دهندهٔ داده‌های تجربی اندازه‌گیری‌شده هستند.)

مدار معادل ارائه‌شده در شکل۵ شامل مقاومت‌های ناشی الکترودها و اتصالات (R_{CR})، مقاومت بلورمایع (R_{LC}) ، ظرفیت بلورمایع(C_{LC}) ، ظرفیت لایه دوگانه (C_{DL}) و المان واربرگ (W) است که فرایندهای نفوذ یونی و قطبش سطحی را مدل‌سازی می‌کند.



شکل۵. مدار معادل جهت شبیه‌سازی رفتار نمونه‌های بلورمایع مورد مطالعه.

نتایج حاصل از برازش منحنی‌های Cole–Cole با این مدار در جدول۱ آمده است.

جدول۱. نتایج به‌دست آمده از برازش منحنی‌های Cole-Cole با مدار معادل. R_{LC} : مقاومت بلورمایع، C_{LC}: ظرفیت بلورمایع ، C_{DL}: ظرفیت لایه دوگانه و W: المان واربرگ.

Sample	R_{LC} (MΩ)	C_{LC} (nF)	C_{DL} (μF)	W_{sr} ($M\Omega S^{-0.5}$)
LC	2.04	3.18	1.027	1.01
LC+ NP t=0	0.75	0.23	0.001	3.21
LC+ NP t=2 min	0.94	1.69	0.007	9.82
LC+ NP t=14 min	1.56	4.54	0.060	2.37

قابل ذکر است، هر آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی برای هر نمونه سه مرتبه مستقل در شرایط یکسان (دما، رطوبت، و فشار محیطی کنترل‌شده) انجام شده است. در هر بار اندازه‌گیری، الکترودها به‌صورت مجزا تمیز تا اثر حافظه سطحی یا آلودگی بین آزمایش‌ها حذف شود. داده‌های خام به‌دست‌آمده از هر سه آزمون، پس از بررسی انطباق اولیه، میانگین‌گیری شدند و انحراف معیار برای پارامترهای کلیدی مدار معادل مانند R_{LC}، C_{LC}، R_{CR} و پارامتر C_{DL} محاسبه شد. میزان انحراف معیار برای مقاومت‌های استخراج‌شده معمولاً در بازهٔ۲ تا ۵ درصد مقدار میانگین و برای پارامترهای ظرفیتی در حدود ۳ تا ۷ درصد به‌دست آمده است. این میزان خطا در محدوده قابل قبول برای داده‌های امپدانسی مواد ناهمگن قرار دارد و نشان‌دهنده پایداری و تکرارپذیری مناسب نتایج است. همچنین، برای اطمینان از صحت فیت داده‌ها در نرم‌افزار ZView، مقادیر خطای فیت (RMS error) یا(χ^2) مورد ارزیابی قرار گرفت و در تمامی نمونه‌ها مقدار χ^2 کمتر از ۰٫۰۰۱ به‌دست آمد که دلالت بر انطباق مطلوب مدل مدار معادل با داده‌های تجربی دارد. براساس نتایج برازش، مشاهده شد که

مقاومت نمونه بدون پلاسما برابر با ۰٫۷۵ MΩ و در نمونه با پلاسما ١٤ دقیقه‌ای برابر با ۱٫۵٦ MΩ است. همچنین ظرفیت خازنی از ۰٫۲۳ nF در نمونه اولیه بدون اثرات پلاسمایی به ٤٫۵٤ nF پس از ١٤ دقیقه پلاسما افزایش یافت. ظرفیت لایهٔ دوگانه (C_{DL}) در نمونه خالص بیشترین مقدار را نشان داد. کاهش چشمگیر مقدار C_{DL} با اعمال پلاسما در نمونه‌های حاوی SnO_2 می‌تواند از دلایل زیر ناشی شود:

۱. کاهش سطح تماس مؤثر بین بلور مایع و الکترود: ذرات SnO_2 ممکن است نظم لایه نزدیک الکترود را برهم زده و از تجمع بار در محل مرز جلوگیری کنند.

۲. تغییر در ثابت دی‌الکتریک موضعی: اصلاح سطح ذرات با پلاسما اکسیژن (گروه‌های قطبی، نقص اکسیژن) می‌تواند مقدار ثابت دی الکتریک موضعی را تغییر دهد که بر ظرفیت دوگانه تأثیر دارد.

۳. ایجاد یک لایه گسسته سطحی: اگر ذرات دارای لایه اکسیدی ضخیم‌تری باشند، ممکن است یک لایه با رسانایی پایین‌تر در مرز ایجاد شود که توانایی تجمع بار را محدود می‌کند.

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که مقاومت (R_{LC}) در نمونه حاوی نانوذرات SnO_2 بدون پلاسما کمترین مقدار را دارد؛ زیرا نانوذرات نیم‌رسانا مسیرهای اضافی برای انتقال بار ایجاد می‌کنند. با اعمال پلاسما به‌مدت ۲ و سپس ١٤ دقیقه، اکسیداسیون سطحی و تشکیل لایه ضخیم‌تر، مانع حرکت بارها شده و مقاومت افزایش می‌یابد. ظرفیت خازنی بلور مایع (C_{LC}) در نمونه‌های تحت پلاسما افزایش یافته است که نشان‌دهنده نقش گروه‌های عاملی اکسیژنی و افزایش قطبش‌پذیری موضعی در اثر اصلاح سطحی است. ظرفیت لایه دوگانه (C_{DL}) بیشترین مقدار را در بلور مایع خالص نشان می‌دهد که ناشی از نظم بیشتر و تراکم بالای بار در مرز الکترود–نمونه است. افزودن نانوذرات و تغییرات ناشی از پلاسما، نظم بار در این لایه را مختل کرده و مقدار C_{DL} را کاهش می‌دهد. ضریب واربرگ (W) بیشترین مقدار را در نمونه پلاسما ۲ دقیقه دارد که بیانگر نفوذپذیری بهتر و بهینه بودن ضخامت لایه اکسیدی در این مرحله است، در حالی‌که با افزایش زمان پلاسما به ١٤ دقیقه، نفوذ یون‌ها محدود و مقدار W کاهش می‌یابد. باید توجه نمود که در مقاومت مربوط به الکتردوها و اتصالات در طول آزمایشات تغییری حاصل نشد. در این پژوهش جهت تحلیل کمی انتقال یونی، ضریب نفوذ یونی D از داده های امپدانس الکتروشیمیایی محاسبه شد. برای این منظور سطح الکترود ۲ cm^2، ضخامت سلول ۲۰ μm و درصد وزنی نانوذره برابر ۰٫۵ در نظر گرفته شد. با استفاده از چگالی تقریبی بلورمایع و SnO_2 غلظت حامل‌های یونی حدود ۰٫۰۳۳ mol/L برآورد شد. سپس مقدار ضریب واربرگ (W) به‌دست آمده از برازش در رابطهٔ استاندارد استخراج ضریب نفوذ یونی قرار داده شد.

$$D = \frac{R^2 T^2}{2A^2 n^4 F^4 C^2 W^2} \qquad ۲$$

در رابطهٔ فوق D ضریب نفوذ یونی، R ثابت گازها، T، A مساحت مؤثر الکترود، n عدد انتقال الکترونی، F ثابت فارادی و C غلظت یون‌ها می‌باشد [۱]. نتایج به‌دست آمده در جدول۲ نشان داده شده است. این روند نشان می‌دهد که LC خالص بیشترین D را داراست، افزودن SnO_2 موجب کاهش شدید D می‌شود، تیمار پلاسما به‌مدت ۲ دقیقه کمترین مقدار D را ایجاد کرده

و نشان‌دهنده بیشترین محدودیت حرکتی یون‌ها است، در حالی‌که تیمار ۱٤ دقیقه‌ای مجدداً D را افزایش می‌دهد که ناشی از کاهش گروه‌های فعال سطحی و کاهش W است. این تغییرات کاملاً با نتایج مقاومت R_{LC}، ظرفیت‌های C_{LC} و C_{DL} و پاسخ فرکانسی منحنی‌های Cole–Cole سازگار بوده و تأیید می‌کند که محاسبهٔ ضریب نفوذ یونی، تحلیل فیزیکی و کمی ارائه‌شده در مقاله را تقویت می‌کند.

Sample	$D \times 10^{-12}\ (\frac{m^2}{S})$
LC	3.520
LC+NP (t=0 min)	0.350
LC+NP (t=7 min)	0.037
LC+NP (t=14 min)	0.650

جدول–مقادیر ضریب نفوذ نمونه‌های مورد مطالعه.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که تغییرات مورفولوژیکی ناشی از پلاسما و اصلاح سطح نانوذرات SnO_2 تأثیر قابل توجهی بر رفتار امپدانسی بلور مایع دارد. با کنترل زمان پلاسما می‌توان ساختار سطح، قطبش‌پذیری، و انتقال بار را به‌صورت هدفمند تنظیم کرد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از فرآیندهای پلاسمایی می‌تواند رویکردی مؤثر برای بهینه‌سازی پاسخ امپدانسی و طراحی سیستم‌های بلور مایع با خواص الکتریکی قابل تنظیم در کاربردهایی مانند حسگرهای فرکانسی و ادوات الکترواپتیکی باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر نانوذرات SnO_2 و اصلاح سطحی آن‌ها با پلاسما اکسیژن بر پاسخ امپدانسی بلور مایع نماتیک به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل منحنی‌های Cole–Cole و شبیه‌سازی مدار معادل نشان داد که افزودن نانوذرات موجب افزایش رسانایی و کاهش مقاومت الکتریکی سیستم می‌شود، در حالی‌که تیمار پلاسما با ایجاد پوشش اکسیدی یکنواخت‌تر، منجر به افزایش موانع انتقال بار و تغییر در رفتار خازنی و نفوذی نمونه‌ها می‌گردد. افزایش زمان اعمال پلاسما از ۲ تا ۱٤ دقیقه سبب رشد اندازهٔ ذرات و تغییر مورفولوژی سطحی آن‌ها شد، که این تغییرات مستقیماً بر قطبش‌پذیری، نظم مولکولی و توزیع بارهای الکتریکی در محیط بلور مایع تأثیر گذاشت. این پدیده در پارامترهای خازنی (C_{LC} و C_{DL}) و ضریب واربرگ به‌وضوح منعکس گردید و نشان داد که فرایندهای قطبش سطحی و نفوذ یونی به‌شدت تابع ویژگی‌های سطحی نانوذرات هستند. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که مهندسی سطح نانوذرات از طریق پلاسما می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای کنترل ویژگی‌های امپدانسی، هدایت الکتریکی و پایداری دینامیکی بلورهای مایع به‌کار گرفته شود. این رویکرد از منظر کاربردی، زمینه‌ساز طراحی و توسعهٔ سامانه‌های الکترواپتیکی قابل تنظیم، حسگرهای پاسخ‌سریع و مواد ترکیبی هوشمند با رفتار الکتریکی مهندسی‌شده در فناوری‌های نوین است.

مرجع‌ها

[1] S. Chandrasekhar, Liquid Crystals, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, (1992).

[2] I.C. Khoo, Liquid crystals, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, (2007).

[3] M. Khadem Sadigh, P. Naziri, M.S. Zakerhamidi, A. Ranjkesh, Tae-Hoon Yoon, Temperature dependent features of polymer stabilized cholesteric liquid crystals based on selected liquid crystal characteristics, J. Optik, 230 (2021) 166354. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166354

[4] M. Khadem Sadigh, P. Naziri, A. Ranjkesh, M.S. Zakerhamidi, Relationship of pitch length of cholesteric liquid crystals with order parameter and normalized polarizability, Journal of Optical Materials, 119 (2021) 111373. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111373

[5] M. Khadem Sadigh, M.S. Zakerhamidi, Dielectric Properties of Nematic Liquid Crystals, Physical Chemistry for Chemists and Chemical Engineers, Ed.: A. V. Vakhrushev, R. Haghi, J. V. de Julián-Ortiz, Canada, AAP, (2018).

[6] M. Khadem Sadigh, M.S. Zakerhamidi, A. Ranjkesh, Enhanced electro-optical nonlinear responses of doped nematic liquid crystals: Towards optoelectronic devices, Optics and Lasers in Engineering, 159 (2022) 107229. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.107229

[7] M Khadem Sadigh, A Ranjkesh, B Hayatifar, A Ranjkesh, Improving the nonlinear electro-optical responses of doped nematic liquid crystals with chiral dopants, Optical Materials, 135, 113352. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113352

[8] M. Khadem Sadigh, P. Naziri, A. Ranjkesh, Chiral dopant effects on the birefringence and transmittance of nematic and polymer-stabilized liquid crystals for future applications, Journal of Optics, 53 (2024), 3351-3358. https://doi.org/10.1007/s12596-023-01542-x

[9] M. Mitov, Cholesteric liquid crystals with a broad light reflection band, Advanced materials., 24 (2012) 6260-6276. https://doi.org/10.1002/adma.201202913.

[10] C.H. Chen, & I. Dierking, 2025, Nanoparticles in thermotropic and lyotropic liquid crystals, Frontiers in Soft Matter, 4 (2025) 1518796. https://doi.org/10.3389/frsfm.2024.1518796

[11] M. de Mello, M.R. Wilson, & T. Araki, Impact of charge distribution on the stability of ferroelectric nematic liquid crystals, Soft Matter, 21 (2025) 1479. https://doi.org/10.1039/D4SM01292E

[12] D. Varshney, J. Prakash, M. Himanshu, K. Yadav, G. Singh, A. Kaushik, & Y. K. Mishra, Nanocomposites tuned protracted electro-optical responsive memory in somatogenic cyanobiphenyl-based liquid crystal material, Journal of Molecular Liquids, 420 (2025) 126794. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126794

[13] M. Beigmohammadi, J.P. Bonab, & M. Khadem Sadigh, Controlling the dielectric constant values of nematic liquid crystals using ferroelectric and multiferroic nanoparticles, Optical Materials, 157 (2024) 116332. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116332

[14] M. Beigmohammadi, M. Khadem Sadigh, & J. Poursamad, Dielectric anisotropy changes in MBBA liquid crystal doped with barium titanate by a new method, Scientific Reports, 14(2024) 5756. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56219-7

[15] M. Beigmohammadi, M. Khadem Sadigh, & J. Poursamad Bonab, Investigation of the effect of doping of newly synthesized bismuth ferrite nanoparticles on the dielectric property of the negative anisotropic nematic liquid crystal, Liquid Crystals, (2025) 1-10. https://doi.org/10.1080/02678292.2025.2471438

[16] N. Dalir, & S. Javadian, Evolution of morphology and electrochemical properties of colloidal nematic liquid crystal doped with carbon nanotubes and magnetite, Journal of Molecular Liquids, 287(2019)

Semiconductor Processing, 186, 109073. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.109073

[23] H. Huang, O. K. Tan, Y.C. Lee, M.S. Tse, J. Guo, & T. White, Effects of plasma treatment on the growth of SnO_2 nanorods from SnO_2 thin films, Nanotechnology, 17(2006), 743. https://doi.org/10.1088/09574484/17/3/021

[24] M. Mahiny, H. Lotfi, M. Beigmohammadi, M. Pooriraj, M. Heydari, A. Shirzad, ... & H. Movla, Pioneering non-thermal plasma as a defect passivator: a new Frontier in ambient metal halide perovskite synthesis, Materials Horizons, 12 (2025). https://doi.org/10.1039/D4MH01430H

[25] A.F. Ahmed, W.I. Yaseen, Q.A. Abbas, & F. A. Mutlak, Plasma treatment effect on SnO 2–GO nano-heterojunction: fabrication, characterization and optoelectronic applications, Applied Physics A, 127 (2021) 1-16. https://doi.org/10.1007/s0033902104902-1

[26] U. Kortshagen,2009, Nonthermal plasma synthesis of semiconductor nanocrystals, Journal of Physics D: Applied Physics, 42(11) 113001. https://doi.org/10.1088/00223727/42/11/113001

[27] M. Darwish, C. Mafla-Gonzalez, B. Kolenovic, A. Deremer, D. Centeno, T. Liu, D-Y. Kim, T. Cattabiani, T. J. Drwiega, I. Kumar, C. Li, C. Traba, Rapid synthesis of metal nanoparticles using low-temperature, low-pressure argon plasma chemistry and self-assembly, Green Chemistry, 24 (2022) 8142. https://doi.org/10.1039/D2GC02592B

[28] N.S.v. Brisinski, O. Hofft, F. Endres, Plasma electrochemistry in ionic liquids: from silver to silicon nanoparticles, Mol. Liq., 192 (2024) 59. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.09.017

[29] Z. Heydari, R.R. de Avillez, L. Liu, S. Letichevsky, streamlined production of 110927. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110927

[17] P.S. Terceiro, R.G.S. de Oliveira, R.T. Alves, L.B.O. Davi, C.D.A.E.S. Barbosa, M. S. Pereira, & I. N. de Oliveira, Thermal and electric field effects on the nonlinear optical response of a cyanobiphenyl liquid crystal doped with carbon dots, Journal of Molecular Liquids, 395 (2024) 123870. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123870

[18] H. Khandelwal, A.P.H.J. Schenning, M. G. Debije, Infrared regulating smart window based on organic materials, Advanced Energy Materials., 7 (2017) 1602209. https://doi.org/10.1002/aenm.201602209

[19] N. Najafi, & S. Rozati, Structural and Electrical Properties of SnO_2: F Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition Method, Acta Physica Polonica A, 131(2017), 222. https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.222

[20] A.A. Ahmad, A.B. Migdadi, & Q.M. Al-Bataineh, 2024, Structural, optical, and electrical properties of strontium-doped tin dioxide films for high photoconductivity. Thin Solid Films, 796 (2024) 140312. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2024.140312

[21] N. Mohamad, J. Abd Razak, M.A. Mohamad, S. T. Chuan, H. E. Ab Maulod, M. I. Shueb, ... & M. W. Abd Rashid, 2024, Influence of Accelerators and Filler Content on Physical Properties of Tin Dioxide Reinforced Deproteinized Natural Rubber Nanocomposites. Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering, 26(2024)30. https://doi.org/10.37934/armne.26.1.3043

[22] P.A. Hind, P. Kumar, U.K. Goutam, & B.V. Rajendra, 2025, Tuning of electrical properties and persistent photoconductivity of SnO_2 thin films via La doping for optical memory applications. Materials Science in

white and black TiO_2 nanoparticles using a modified Pechini method, Ceramics International, 51 (2025) 21867. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.02.347.

[30] I.A. Pronin, A.P. Sigaev, A.S. Komolov, E.V. Zhizhin, A.A. Karmanov, N.D. Yakushova, V.M. Kyashin, K.N. Nishchen, V.V. Sysoev, S. Goel, K. Amreen, R.K,G. Korototcenkov, Effects of Plasma Treatment on the Surface and Photocatalytic Properties of Nanostructured SnO_2–SiO_2 Films, Materials, 16 (2023) 5030. https://doi.org/10.3390/ma16145030

[31] A.P. Muthukrishnan, J. Lee, J. Kim, C. S. Kim, S. Jo, Low-temperature solution-processed SnO_2 electron transport layer modified by oxygen plasma for planar perovskite solar cells, RSC Advances, RSC Adv., 12 (2022) 4883. https://doi.org/10.1039/D1RA08946C