



بهبود خواص دی‌الکتریکی و کلیدزنی الکترونوری بلورهای مایع نماتیک با استفاده از نقاط کوانتومی ZnCdTeS با خاصیت نورتابی در طول موج‌های مختلف

زهرا صیدالی لیر^{۱*}، سپیده شیشه‌بر^۱، احسان سهیلی^۲ و محمد صبائیان^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ مرکز تحقیقات لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۳ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

چکیده: در این پژوهش، از نقاط کوانتومی ZnCdTeS با گسیل نور در طول موج‌های مختلف جهت بهبود خواص دی‌الکتریکی و الکترونوری سلول‌های بلور مایع نماتیک E7 استفاده شده است. مؤلفه‌های گذردهی دی‌الکتریکی (ϵ_1 و ϵ_2) و ناهمسانگردی دی‌الکتریکی ($\Delta\epsilon$) نمونه‌های بلور مایع نماتیک حاوی نقاط کوانتومی ZnCdTeS به صورت تابعی از دما اندازه‌گیری شد. در فاز نماتیک، با افزودن نقاط کوانتومی، ϵ_2 در مقایسه با ϵ_1 افزایش بیشتری می‌یابد. در حضور نقاط کوانتومی با نشر نور قرمز، افزایش قابل توجه ϵ_2 منجر به افزایش حدود ۱۹ درصدی ناهمسانگردی دی‌الکتریکی سامانه شده است. نتایج دی‌الکتریکی نشان می‌دهد که محیط بلور مایع موجب القاء آرایه‌هایی یک‌بعدی از نقاط کوانتومی درون سامانه می‌شود و این امر موجب بهبود خواص دی‌الکتریکی سلول می‌شود. مطابق نتایج الکترونوری، حضور نقاط کوانتومی موجب کاهش قابل توجهی در ولتاژ آستانه سلول‌های بلور مایع نماتیک می‌شود. مقدار ولتاژ آستانه از ۲/۵۷ V برای بلور مایع خالص به ۲/۲۱ V برای بلور مایع حاوی نقاط کوانتومی کاهش یافته است. نقاط کوانتومی با جذب ناخالصی‌های یونی درون سامانه، موجب کاهش اثرات پوششی و افزایش میدان مؤثر سامانه می‌شوند. افزایش میدان مؤثر درون سلول، افزایش ناهمسانگردی و بهبود برهم‌کنش میان بلور مایع و نقاط کوانتومی موجب بهبود خواص کلیدزنی سلول شده است.

واژگان کلیدی: بلور مایع نماتیک، خواص دی‌الکتریکی، خواص الکترونوری و ولتاژ آستانه.

*seidalilir@scu.ac.ir

تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی کم، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۳ و ۴]. در بلورهای مایع نماتیک، مولکول‌ها دارای ساختاری میله‌ای شکل هستند و به‌طور میانگین در راستایی به نام بردار راهنما جهت‌مند می‌شوند. بازچرخش مولکول‌های بلور مایع تحت تأثیر میدانی قوی‌تر از حد آستانه، به‌عنوان انتقال فریدریکز شناخته می‌شود [۵]. این بازچرخش

۱- مقدمه

بلورهای مایع مواد ناهمسانگردی هستند که دارای حالتی مابین جامدات و مایعات هستند. این مواد از نظر مکانیکی مشابه مایعات هستند ولی خواص فیزیکی جامدات را نمایش می‌دهند [۱ و ۲]. در میان انواع مختلف بلور مایع، بلورهای مایع نماتیک به دلیل ویژگی‌های خودمنظم‌شوندگی و بازچرخش سریع مولکولی تحت

¹ Freedericksz transition

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

مولکولی اساس عملکرد بسیاری از ادوات الکترونوری مبتنی بر بلورهای مایع نماتیک است [۶-۸]. مقدار ولتاژ و میدان مغناطیسی آستانه برای بازچرخش مولکولی در بلور مایع نماتیک E7 به ترتیب حدود 2.6 V و 10 mT گزارش شده است [۹ و ۱۰].

امروزه بلورهای مایع نماتیک در بسیاری از ابزارهای اپتوالکترونیک از جمله صفحات نمایشگر بلور مایع (LCD) مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ به منظور ارتقاء عملکرد نمایشگرهای بلور مایع، مدل‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱ و ۱۲]. در این بین، مد نماتیک پیچ خورده (TN) به دلیل سادگی طراحی، روشنایی قابل قبول، پاسخ سریع و ولتاژ شروع به کار پایین، پرکاربردترین مد تجاری LCD بوده است [۱۳]. یکی از عواملی که باعث کاهش عملکرد انواع مدهای بلور مایع می‌شود، حضور ناخالصی‌های یونی در محیط سلول بلور مایع است. این یون‌ها می‌توانند طی فرایند تهیه بلور مایع ایجاد شوند. همچنین بخشی از این یون‌ها می‌توانند در حین پرکردن سلول و یا هنگام چسب زدن اطراف سلول وارد محیط بلور مایع شوند. با اعمال میدان الکتریکی به سلول بلور مایع، ناخالصی‌های یونی شتاب می‌گیرند و بر روی زیرلایه‌های سلول (با علامت بار مخالف) قرار می‌گیرند. بنابراین، لایه‌ای از یون‌ها بر سطح پلیمر نشانده شده روی الکترودها، ایجاد می‌گردد. از آنجاکه، مولکول‌ها از طریق لایه پلیمری جهت‌مند می‌شوند، ایجاد یک لایه پوششی یونی موجب کاهش نظم مولکولی در سلول می‌گردد. از طرفی، حضور یون‌ها بر روی الکترودها، موجب ایجاد یک میدان الکتریکی داخلی درون سلول می‌شود که در خلاف جهت میدان اعمالی خارجی است. این امر موجب کاهش میدان مؤثر درون سلول و در نتیجه، افزایش میدان آستانه مورد نیاز جهت بازچرخش مولکولی می‌شود. یکی از عوامل کاهش کیفیت در نمایشگرهای مبتنی بر بلورهای مایع، جریان ناخالصی‌های یونی درون محیط بلور مایع است. بنابراین دست‌یابی به بلورهای مایع با خواص الکترونوری ویژه جهت استفاده در نمایشگرها اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۴]. تهیه بلورهای مایع جدید با ناخالصی کم‌تر و همچنین استفاده از یک لایه جاذب ناخالصی، دو راه‌کار برای رفع مشکلات ناشی از

حضور یون‌ها در سلول بوده است [۱۵ و ۱۶]. روش سوم، استفاده از مواد میهمان مانند پلیمرها [۱۷]، رنگدانه‌ها [۱۸] و نانوساختارها [۱۹] است. روش سوم مقرون‌به‌صرفه‌تر و راحت‌تر از سایر روش‌ها است.

حضور نانومواد موجب می‌شود ناخالصی‌های یونی به‌جای ایجاد لایه پوششی روی سطوح ITO، روی سطح نانوساختارها قرار بگیرند [۱۹]. نانوذرات فلزی می‌توانند موجب کاهش دمای انتقال فاز نماتیک به مایع شوند و همچنین خواص الکترو نوری سامانه‌های بلور مایع را بهبود می‌دهد [۲۰]. همچنین نانوذرات نیم‌رسانا مانند TiO_2 ، Co_3O_4 و TiSiO_4 اثرات پوششی را کاهش می‌دهند و بنابراین موجب کاهش ولتاژ آستانه و زمان پاسخ سلول‌های بلور مایع نماتیک می‌شوند [۱۶، ۱۹، ۲۱ و ۲۲]. گزارش شده است که استفاده از ورقه‌های گرافنی موجب تسریع فرایند کلیدزنی الکترونوری در سلول‌های بلور مایع نماتیک می‌شود [۲۳]. با این حال، کلوخه شدن در محیط بلور مایع را می‌توان به‌عنوان مشکل اصلی این نانوساختارها بیان کرد.

نقاط کوانتومی به دلیل فرایند تهیه آسان، اندازه یکسان و خواص الکترونی ویژه، نسبت به دیگر نانوساختارها برتری دارند. این نانوساختارها، به دلیل اثرات محدودیت کوانتومی، ویژگی‌های نوری و الکتریکی متمایزی از خود نشان می‌دهند. به دلیل ویژگی تبادل بار بالا، برهم‌کنش بسیار بالایی میان مولکول‌های بلور مایع و نقطه کوانتومی اتفاق می‌افتد [۲۴]. از طرف دیگر، گزارش شده است که محیط بلور مایع باعث القاء یک خودآرایی یک بعدی در نقاط کوانتومی می‌شوند. بسو^۴ و همکارانش برای نخستین بار، با استفاده از مشخصه‌یابی‌های دی‌الکتریکی، نشان دادند که نقاط کوانتومی CdS درون محیط بلور مایع نماتیک 5CB به صورت یک بعدی منظم می‌شوند [۲۵]. این خودمنظم-شدگی نقاط کوانتومی درون محیط بلور مایع نماتیک توسط گوش^۵ و همکارانش نیز به اثبات رسید [۲۶ و ۲۷]. اخیراً گروه ما نشان داد که استفاده از نقاط کوانتومی Ni:ZnCdS/ZnS هسته/پوسته موجب بهبود قابل توجهی در خواص الکترونوری، الکتروشیمیایی و دی‌الکتریکی بلور مایع نماتیک E7 می‌شود [۲۸].

⁴ Basu

⁵ Ghosh

² liquid crystal displays

³ twisted nematic

شرکت مرک تهیه شده است. آب دو بار تقطیر از شرکت زلال طب خریداری شد.

به منظور تهیه نقاط کوانتومی، ابتدا پیش ماده آنیونی پودر سیاه تلوراید به وسیله عوامل کاهنده سدیم بوروهیدرید، به ماده سدیم هیدروتلوراید احیا شد. مقادیر مناسبی از کاتیون‌ها (روی، کادمیوم) و عامل‌های پوششی In - As - Al -سیستئین و سدیم تری سترات در ظرفی حاوی آب دوبار تقطیر حل شده و pH محلول با استفاده از سدیم هیدروکسید ۱ مولار تنظیم شد. محلول نهایی به بالن سه دهنه‌ای منتقل شده و در محیطی از گاز نیتروژن بسیار ضعیف، برای مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق هم‌خورد. در نهایت مقدار کافی از پیش ماده آنیونی تهیه شده به صورت تزریق سریع به محلول واکنش افزوده و در دمای 100°C به مدت ۲ ساعت هم زده شد. پس از اتمام زمان واکنش، محلول حاوی نقاط کوانتومی تا رسیدن به دمای اتاق سرد شد. در این مرحله، آنالیزهای نوری (مانند جذب مرئی-فرابنفش و نشر فوتولومینسانس) به عمل آمد. در نهایت، عملیات رسوب‌گیری با استفاده از افزودن چند قطره سدیم هیدروکسید فوق اشباع به محلول حاوی نقاط کوانتومی در حال هم خوردن و متعاقباً افزودن اتانول خالص صورت گرفت. سپس، در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ شد تا پودر نقاط کوانتومی به دست آید. از آنجایی که خواص الکترونی نقاط کوانتومی با تغییر پارامترهای مختلفی قابل تنظیم است، در این پژوهش، به منظور تغییر ویژگی‌های نوری نقاط کوانتومی (با توجه به اثر محدودیت کوانتومی) از تغییر pH محلول واکنش استفاده شده است. لذا در این پژوهش نقاط کوانتومی در ۴ مقدار مختلف pH (۸٫۴، ۹٫۲، ۱۰٫۶ و ۱۱٫۴) تهیه شدند و سایر پارامترها در تمام طول آزمایش یکسان در نظر گرفته شدند (شکل ۱). نام‌گذاری نقاط کوانتومی ZnCdTeS در این پژوهش بر اساس رنگ گسیل شده از پودر نقاط کوانتومی تحت نور فرابنفش است.

در این پژوهش، از نقاط کوانتومی ZnCdTeS با گسیل نور در طول موج‌های مختلف، در غلظت یکسان، جهت بهبود خواص دی‌الکتریکی و الکترونوری بلورهای مایع نماتیک استفاده شده است. ناهمسانگردی دی‌الکتریکی نمونه‌های بلور مایع نماتیک حاوی مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی به صورت تابعی از دما مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین ولتاژ آستانه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. مطابق نتایج به دست آمده، حضور نقاط کوانتومی ZnCdTeS موجب افزایش قابل توجهی در ناهمسانگردی دی‌الکتریکی بلور مایع و همچنین کاهش چشم‌گیری در ولتاژ آستانه سلول‌ها می‌شود. بنابراین، استفاده از این نقاط کوانتومی می‌تواند موجب توسعه سامانه‌های الکترونوری مبتنی بر بلورهای مایع نماتیک شود.

۲- فعالیت‌های آزمایشگاهی

۲-۱- بلور مایع نماتیک مورد استفاده

در این کار تجربی از بلور مایع نماتیک E7 ساخت شرکت مرک^۶ استفاده شده است. بلور مایع E7 به صورت ترکیبی از ۴ نوع بلور مایع مختلف با فرمول شیمیایی $\text{C}_{20}\text{H}_{23}\text{N}$ ، $\text{C}_{18}\text{H}_{19}\text{N}$ ، $\text{C}_{21}\text{H}_{25}\text{NO}$ و $\text{C}_{24}\text{H}_{23}\text{N}$ است [۲۹]. دمای انتقال فاز در بلورهای مایع نماتیک دمایی است که در آن فاز بلور مایع از نماتیک به مایع همسانگرد تغییر می‌یابد. بلورهای مایع که دارای دمای انتقال فاز بالاتری هستند، برای موارد تجربی سودمند هستند. بلور مایع نماتیک E7 دارای دمای انتقال فاز 61°C است؛ بنابراین برای موارد کاربردی مورد توجه قرار می‌گیرد. هم‌چنین بلور مایع نماتیک E7 در دمای 25°C دارای ناهمسانگردی نوری، Δn ، ۰٫۲ است [۳۰].

۲-۲- تهیه نقاط کوانتومی و مشخصه‌یابی

نقاط کوانتومی ZnCdTeS به روش رفلکس در فاز کلوئیدی تهیه شده و برای استفاده در سلول‌های بلور مایع به کار رفتند [۳۱]. پیش‌ماده‌های ZnCl_2 ، $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_3\text{S}$ (NAC)، NaOH ، $\text{Cd}(\text{OAc})_2$ ، تری سدیم سترات ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)، تلوراید (Te)، سدیم بورو هیدرید (NaBH_4) با خلوص بالا از

^۶ Merck



شکل ۱: تصویر پودر نقاط کوانتومی تهیه شده در pH های مختلف (از راست به چپ ۸٫۴، ۹٫۲، ۱۰٫۶، و ۱۱٫۴)، تحت تابش نور فرابنفش ۳۶۵ نانومتری.

مهم‌ترین ویژگی نقاط کوانتومی، نورتاب بودن یا نشر نور شدید و تنظیم‌پذیری آن‌ها در گستره ناحیه فرابنفش (UV) تا نزدیک فرورسرخ (Near IR) است. لذا، برای اثبات این مهم، از طیف‌سنج نشر فوتولومینسانس (PL) و برانگیختگی فوتولومینسانس (PLE) بهره برده شده است. همچنین، برای نشان دادن عناصر تشکیل‌دهنده ساختار نقاط کوانتومی، از آنالیز پراش انرژی پرتو ایکس^۷ (EDX) استفاده شد. برای تأیید بلوری بودن ساختار تهیه شده، آنالیز پراش پرتو ایکس^۸ (XRD) انجام شد و با انجام تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری^۹ (TEM) اندازه و شکل نقاط کوانتومی تهیه شده ارزیابی شد.

۲-۳- ساخت سلول‌های بلور مایع

ابتدا پودر نقاط کوانتومی، در حلال اتانول پخش شد و در دستگاه فراصوت حمامی به مدت ۶ ساعت قرار داده شد. سپس مقادیر یکسانی (۰٫۵ wt%) از این محلول‌ها با بلور مایع نماتیک E7 ترکیب شدند و بلور مایع با مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی مختلف تهیه شد. ترکیبات به دست آمده در دستگاه فراصوت حمامی به مدت ۶ ساعت قرار گرفتند. سپس حلال اتانول مورد استفاده با قرار دادن ترکیبات در آون با دمای 50°C به مدت ۱۸ ساعت حذف شد. در نهایت، ترکیبات بلور مایع حاوی نقاط کوانتومی مختلف با مقادیر یکسان، با استفاده از خاصیت موینگی به سلول منتقل شد. سلول‌های بلور مایع معمولی شامل دو سطح شیشه‌ای شفاف هستند که روی آن‌ها با لایه‌ای نازک از ایندیم تین اکساید (ITO) پوشش داده شده است. به منظور ایجاد

⁷ Energy dispersive X-ray

⁸ X-ray diffraction

⁹ transmission electron microscopy

¹ indium doped tin oxide

جهت‌مندی‌های مختلف در سلول‌های بلور مایع، از لایه‌نشانی پلیمری روی سطح الکتروود ITO استفاده می‌شود.

سه نوع سلول هموتروپیک^۱، هموزن (پلنر)^۲ و نماتیک پیچ‌خورده جهت مشخصه‌یابی نمونه‌های بلور مایع در این تحقیق ساخته شد. برای ساخت سلول هموتروپیک از پلیمر CTAB استفاده شد. جهت ساخت سلول هموزن، از پلیمر پلی‌وینیل‌الکل^۳ (PVA) استفاده شد و شیاردهی با مالش دادن سطح زیرلایه با یک پارچهٔ مخملی نرم انجام گرفت. سپس سطوح با آب دوبار تقطیر شده شسته شدند و در دمای 55°C به مدت ۲ ساعت خشک شدند. در اثر مالش دادن، شیاریابی در حد میکروسکوپی روی سطح زیرلایه ایجاد می‌شود که مولکول‌های بلور مایع به داخل این شیارها رانده شده و به صورت موازی در امتداد شیارها قرار می‌گیرند. دو الکتروود توسط یک لایهٔ فاصله‌دهنده از هم جدا می‌شوند و بلور مایع بین این صفحات قرار می‌گیرد. جهت‌مندی سلول‌های بلور مایع با استفاده از میکروسکوپ نوری قطبیده شده کنترل شد. برای بررسی الکترونوری ترکیبات بلور مایع، از سلول‌های نماتیک پیچ‌خورده استفاده شده است. در سلول‌های TN، مشابه سلول‌های هموزن از شیاردهی برای جهت‌مندی مولکول‌ها استفاده می‌شود با این تفاوت که زاویهٔ میان شیارهای دو الکتروود مقابل هم ۹۰ درجه است.

۲-۴- روش‌های مشخصه‌یابی سلول‌های بلور مایع

مطالعهٔ دی‌الکتریکی سلول‌ها با استفاده از دستگاه LCR-meter (Instek LCR-8110G) با دقت ۰٫۰۰۵، انجام گرفته است. مقدار بسامد اعمالی به سلول‌ها در این آزمایش برابر ۱۰ kHz و مقدار ولتاژ اعمالی برابر ۱ V و ولت بوده است؛ این ولتاژ بسیار کمتر از مقدار ولتاژ آستانه است و بنابراین بازچرخش مولکولی اتفاق نمی‌افتد. مقادیر ظرفیت سلول‌های پر و خالی در محدودهٔ دمایی $25-77^{\circ}\text{C}$ اندازه‌گیری شد. توسط یک دستگاه کنترل کنندهٔ دمای دست‌ساز، دمای نمونه‌ها با دقت دمایی 0.1°C کنترل شد. ثابت‌های دی‌الکتریک نمونه‌ها ($\epsilon_{||}$ و ϵ_{\perp}) از

¹ homeotropic 1

¹ planar 2

¹ polyvinyl alcohol 3

ZnTe, CdS و CdTe احتمال هستند که منجر به نامنظم شدن الگوی به دست آمده می شود.

برای تعیین ترکیبات تشکیل دهنده نقاط کوانتومی با گسیل نور زرد (pH= ۹/۲) که طیف XRD آن ها در شکل ۲ توضیح داده شده است، از آنالیز EDX استفاده شد (شکل ۳-الف). قله مشخصه تمام عناصر تشکیل دهنده ساختار نقاط کوانتومی از جمله Zn, Cd, Te و S مشاهده می شود که تولید نقاط کوانتومی آلیاژی ZnCdTeS را اثبات می کند. از سوی دیگر مقدار بسیار کمی اکسیژن و کربن در ساختار وجود دارد که می تواند به حضور عامل های پوششی در سطح نقاط کوانتومی تهیه شده و یا مقدار جزئی رطوبت در این ساختار نسبت داده شود.

یکی از مهم ترین ابزارها برای تعیین مستقیم و دقیق شکل و اندازه نانو ساختارها، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) است. همان طور که در شکل ۳-ب مشاهده می شود، نقاط کوانتومی با نشر سبز، ابعادی کمتر از ۵ نانومتر (۳/۶ نانومتر) و بلورینگی بالایی دارند. این مقدار کوچک، نشان می دهد که اثر محدودیت های کوانتومی در هر سه جهت فضایی وجود دارد. فاصله بین صفحات بلوری نیز ۳/۸ آنگسترم است که با ساختار بلوری هگزاگونال ورتزایت همخوانی دارد. هم چنین، اثری از کلوخه شدن مشاهده نمی شود که نشان دهنده کیفیت بالای این نقاط کوانتومی است.

مهم ترین ویژگی نقاط کوانتومی، مشخصه نورتایی آن هاست. خواص الکترونی نقاط کوانتومی نیم رسانا را می توان با تغییر پارامترهای بسیاری از جمله تغییر اندازه نقاط کوانتومی (به دلیل وجود اثر محدودیت کوانتومی) تنظیم کرد. در مطالعه حاضر، افزایش pH محلول منجر به تغییر پهنای شکاف انرژی می شود. در اینجا، با افزایش مقدار pH محلول از ۸/۴ به ۱۱/۴ قله طیف PLE از ۵۳۵ nm در حالت نقاط کوانتومی سبز به ۶۰۹ nm جابه جا شده که دلیل آن را می توان به افزایش اندازه نقاط کوانتومی و متعاقباً کاهش پهنای شکاف انرژی نسبت داد (شکل ۳-ج). از طرفی، افزایش مقدار pH محلول از ۸/۴ به ۱۱/۴ منجر به جابه جایی شدیدی در قله طیف PL نقاط کوانتومی از ۵۳۹ نانومتر (رنگ سبز) به ۶۱۴ nm (رنگ قرمز) شده است (شکل ۳-د). این جابه جایی واضح در طول موج با تغییر pH نشان دهنده آن است

طریق نسبت ظرفیت سلول پر به سلول خالی مطابق روابط زیر به دست آمد:

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{C_{\perp}}{C_0} \quad \epsilon_{\perp} = \frac{C_{\parallel}}{C_0} \quad (1)$$

که در آن، C_{\parallel} و C_{\perp} ، به ترتیب ظرفیت سلول های پر پلنر و هموتروپیک و C_0 ظرفیت سلول خالی متناظر است.

هم چنین به منظور اندازه گیری ولتاژ آستانه سلول های ساخته شده، با استفاده از یک چیدمان الکترونوری، میزان عبور نور به صورت تابعی از ولتاژ، مورد مطالعه قرار گرفت. سلول حاوی بلور مایع بین دو قطبشگر عمود بر هم قرار گرفت. با اعمال میدان الکتریکی به سلول، مولکول های بلور مایع شروع به چرخش می کنند و مانع از عبور نور لیزر قطبیده شده می شوند. ولتاژی که در آن میزان عبور به ۹۰ درصد عبور پیشینه کاهش می یابد به عنوان ولتاژ آستانه در نظر گرفته شد [۲۲]. در چیدمان الکترو-نوری این تحقیق، از لیزر He-Ne کاملاً پایدار با توان ورودی ۵ میلی وات و طول موج ۶۳۲ nm استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

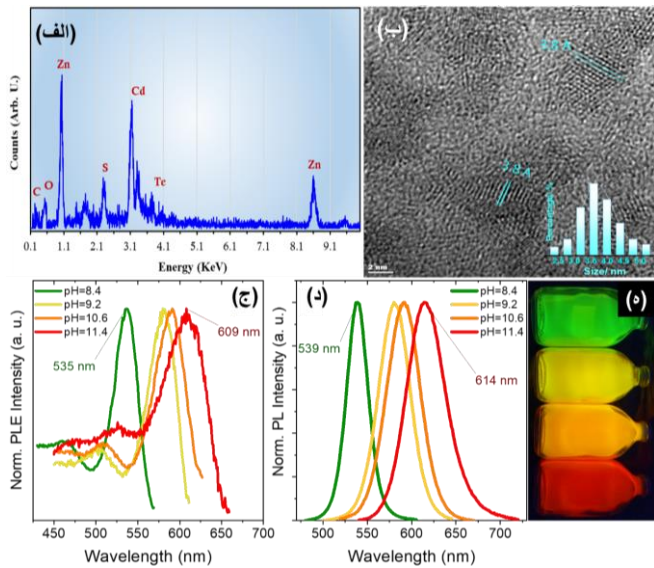
۳-۱- مشخصه یابی نقاط کوانتومی ZnCdTeS

بررسی ساختار بلوری نقاط کوانتومی تهیه شده، با استفاده از آنالیز XRD انجام شد (شکل ۲). مکان قله های استاندارد مربوط به ساختارهای کادمیم سولفید، کادمیم تلوراید، روی تلوراید و روی سولفید در داخل شکل به صورت خطوط راست یا میله ای نشان داده شده اند. از این اندازه گیری چند نتیجه گیری را می توان به عمل آورد: (۱) قله های طیف الگوی XRD به دست آمده، بسیار پهن است که می توان آن را به اثرات کوانتومی و یا اندازه بسیار کوچک نقاط کوانتومی تهیه شده نسبت داد. (۲) نحوه قرارگیری و شدت نسبی قله های الگو حاکی از آن است که ساختار نقاط کوانتومی تهیه شده احتمالاً ورتزیت^۱ بوده که با صفحات اندیس میلر^۵ موجود در الگوی XRD مشخص شده اند (البته با استناد به فاصله بین صفحات بلوری در تصویر HRTEM). (۳) به دلیل حضور عناصر مختلف، ساختارهای متفاوتی هم چون ZnS،

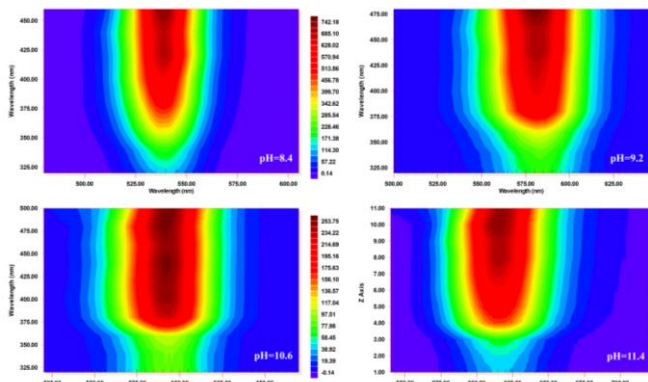
¹ wurtzite 4

¹ miller-index plates 5

¹ hexagonal wurtzite 6



شکل ۳: (الف) الگوی EDX نقاط کوانتومی (pH=۹٫۲). (ب) تصویر TEM نقاط کوانتومی. (ج) طیف‌های بهنجار شده PLE نقاط کوانتومی ZnCdTeS در رنگ‌های مختلف. (د) طیف‌های بهنجار شده PL نقاط کوانتومی ZnCdTeS در رنگ‌های مختلف. (ه) گسیل فوتولومینسانس رنگ‌های مختلف نقاط کوانتومی ZnCdTeS تحت تابش فرابنفش ۳۶۵ نانومتر.

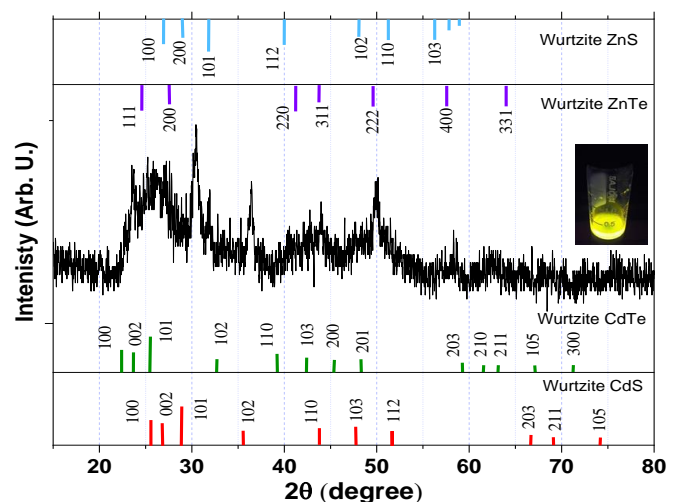


شکل ۴: نقشه‌های فوتولومینسانس نمونه‌های نقاط کوانتومی ZnCdTeS تحت طول موج‌های برانگیخته مختلف.

شکل ۴، نقشه فوتولومینسانس نمونه‌های به دست آمده تحت طول موج‌های برانگیخته مختلف را نمایش می‌دهد که تأیید کننده نتایج PL به دست آمده هستند.

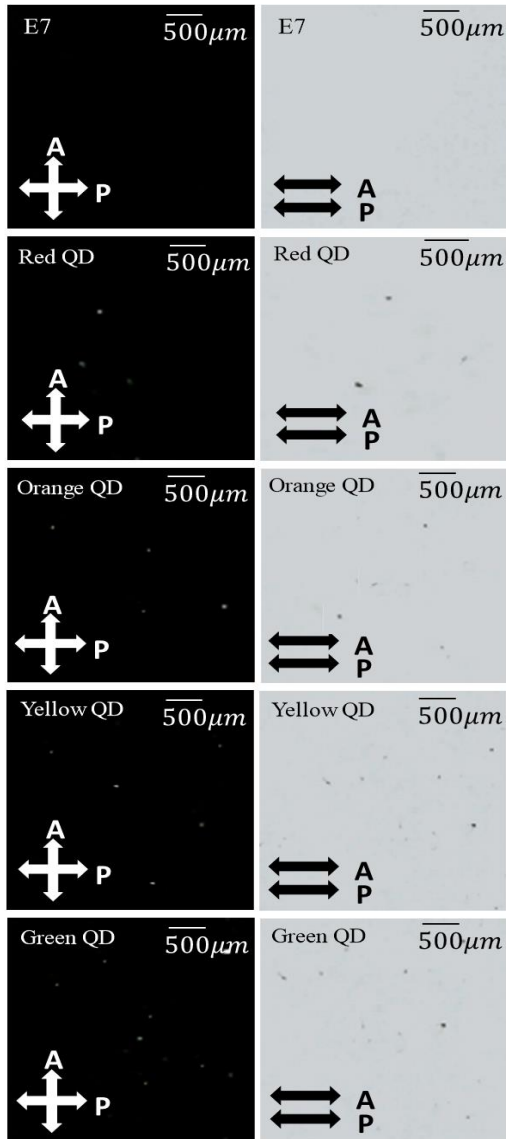
۲-۳- تصاویر سلول‌های بلور مایع نماتیک E7 حاوی نقاط کوانتومی ZnCdTeS با اندازه ذرات متفاوت در غلظت یکسان

که باز ترکیب الکترون - حفره‌ها غالباً از طریق ترازهای انرژی اکسایشی صورت می‌پذیرد. بازده کوانتومی نشر نور فوتولومینسانس نقاط کوانتومی به روش مقایسه‌ای و استفاده از رنگ‌های آلی (به عنوان مرجع) اندازه‌گیری شد. محاسبات، مقادیری بین ۴۰ درصد (نقاط کوانتومی با نشر قرمز) تا ۸۰ درصد (نقاط کوانتومی با نشر سبز) بوده است که نتایج بسیار مناسبی برای چنین ساختارهایی هستند که مستقیماً در فاز آبی تهیه شده‌اند و هیچ پوسته مجزایی نیز بر روی آن‌ها قرار داده نشده است. از سوی دیگر جابه‌جایی استوکس بسیار کم و نیم پهنا در نصف بیشینه (FWHM) الگوهای نشر PL، خود نشان دهنده نقش اساسی ترازهای اکسایشی در فرآیند باز ترکیب الکترون - حفره و نشر نور مشاهده شده از نمونه‌ها است. مقادیر FWHM برای نمونه‌های سبز، زرد، نارنجی و قرمز به ترتیب برابر ۲۸، ۴۱، ۴۵ و ۵۱ نانومتر محاسبه شده است که تمامی آن‌ها در گستره بسیار مناسبی به منظور استفاده در ابزارهای اپتوالکترونی قرار دارند. هم‌چنین، این مقادیر کوچک به نحوی نشان دهنده توزیع اندازه نسبتاً باریک نقاط کوانتومی تهیه شده نیز است که منجر به خلوص رنگ بالاتر می‌شود. شدت گسیل فوتولومینسانس به دست آمده از نمونه‌های حاصل بسیار بالا بوده است به نحوی که با قرار گرفتن در معرض تابش نور ۳۶۵ نانومتر و ۶ وات، نشر نور، رنگ‌های بسیار شدید با خلوص بسیار بالایی را نشان دادند (شکل ۳-ه).



شکل ۵: الگوی XRD نقاط کوانتومی تهیه شده (pH=۹٫۲) [۳۱].

بیشتر بخش‌های سلول، توزیع نقاط کوانتومی کاملاً یکنواخت است.



شکل ۵: تصاویر POM ثبت شده از نمونه‌های بلور مایع خالص و حاوی نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS در غلظت یکسان.

۳-۳- بررسی خواص دی‌الکتریکی سلول‌های

بلور مایع

با استفاده از اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی می‌توان به درک درستی از برهم‌کنش‌های مولکولی درون سلول بلور مایع رسید [۲۹]. شکل ۶ روند تغییرات مؤلفه‌های گذردهی دی-الکتریکی سلول‌های بلور مایع نماتیک حاوی مقادیر یکسان از

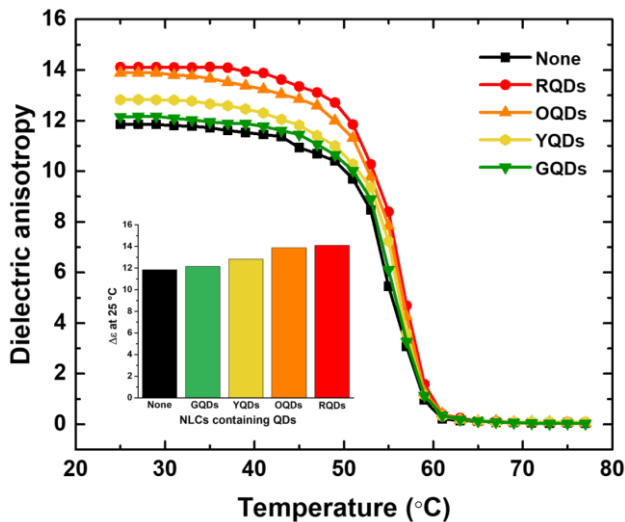
به‌منظور دستیابی به توضیحات بیشتر در مورد سلول‌های حاوی بلور مایع نماتیک E7 و درصد‌های وزنی یکسان از نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS، سلول‌های ساخته شده توسط میکروسکوپ پلاریزه نوری (POM) مورد مطالعه قرار گرفتند. در میکروسکوپ مورد استفاده از دو قطبشگر استفاده شده است که سلول‌های بلور مایع نماتیک با جهت‌مندی مسطح بین این دو قرار گرفتند. تصاویر نمونه‌ها در دو حالت ثبت گردید. در حالت اول دو قطبشگر زاویه صفر درجه با راستای جهت‌مندی مولکولی می‌سازند که در این وضعیت یک تصویر روشن از نمونه به‌دست می‌آید. در حالت دوم، راستای عبور قطبشگر اول و جهت‌مندی مولکولی با یکدیگر موازی هستند اما با قطبشگر دوم زاویه ۹۰ درجه می‌سازند که منجر به تصویری تاریک از نمونه خواهد شد.

تصاویر ثبت شده از نمونه‌های حاوی بلور مایع نماتیک خالص E7 و بلور مایع نماتیک حاوی نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS در غلظت ثابت ۰/۵ درصد وزنی در شکل ۵ نشان داده شده است. برای هر نمونه تصاویر تاریک و روشن در دمای ۲۵ °C ثبت شده است.

تاریک و روشن شدن تصاویر نشان می‌دهد که جهت‌مندی مولکولی به‌درستی انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه بلور مایع خالص تصاویر تاریک و روشن کاملاً شفاف و یکنواخت هستند. اما، در نمونه‌های حاوی نقاط کوانتومی، نقاط بسیار کمی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده کلوخه شدن نقاط کوانتومی در برخی بخش‌های سلول است. در حقیقت، نقاط روشن در تصاویر تاریک و نقاط تاریک در تصاویر روشن نشان‌دهنده تجمع نقاط کوانتومی است. توزیع این نقاط کوچک، که به سختی با چشم غیر مسلح در سلول‌ها دیده می‌شود، در تصاویر تقریباً یکنواخت است. با توجه به این‌که درصد وزنی نقاط کوانتومی در سلول‌ها یکسان است، میزان تجمعات این نقاط نیز در تصاویر تقریباً یکسان است. با این‌حال، به‌دلیل این‌که در مراحل تهیه سلول‌ها، ترکیب نانوذرات و بلور مایع به‌مدت طولانی در حمام فراصوتی قرار گرفته است، در

¹ polarized optical microscope⁷

ها در هر دو راستا به یک مقدار می‌رسد (ϵ_{iso})؛ بنابراین، ناهمسانگردی دی‌الکتریکی به مقدار صفر میل می‌کند.

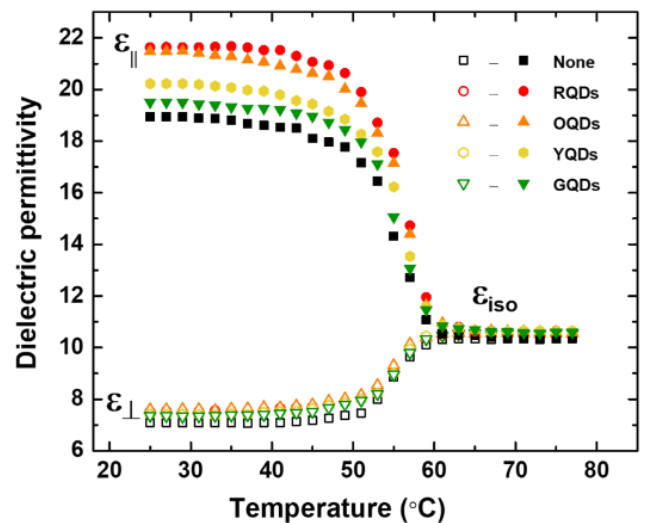


شکل ۷: تغییر ناهمسانگردی دی‌الکتریکی بر حسب دما برای بلورهای مایع نماتیک حاوی نقاط کوانتومی مختلف در غلظت یکسان. شکل داخلی نمایش دهنده مقدار ناهمسانگردی دی‌الکتریکی در دمای 25°C برای نقاط کوانتومی مختلف را نمایش می‌دهد.

مولکول‌های بلور مایع نماتیک، استوانه‌ای شکل هستند و ناهمسانگردی دی‌الکتریکی برابر با اختلاف میان $\epsilon_{||}$ و ϵ_{\perp} است. شکل ۷ ناهمسانگردی دی‌الکتریکی سلول‌های بلور مایع نماتیک حاوی مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی مختلف را نشان می‌دهد. روند تغییرات $\Delta\epsilon$ بر حسب تغییر اندازه ذرات نقاط کوانتومی در قسمت داخلی شکل ۷ نمایش داده شده است. مقدار $\Delta\epsilon$ برای نمونه حاوی بلور مایع نماتیک خالص E7 برابر $11/85$ به دست آمده است که با مقادیر گزارش شده قبلی برای این بلور مایع مطابقت دارد [۲۸ و ۲۹]. در نمونه حاوی نقاط کوانتومی با نشر قرمز، مقدار $\Delta\epsilon$ افزایش یافته و به میزان بیشینه $14/11$ در نمونه حاوی 0.5% درصد وزنی نقاط کوانتومی قرمز رنگ رسیده است (جدول ۱).

$\Delta\epsilon$ با پارامتر نظم متناسب است و بنابراین افزایش ناهمسانگردی دی‌الکتریکی به معنای افزایش نظم جهت‌گیری مولکول‌های بلور مایع است [۳۴ و ۳۵]. همان‌طور که شکل ۳-ب نشان می‌دهد، نقاط کوانتومی کروی شکل هستند و بنابراین انتظار نمی‌رود هیچ نوع ناهمسانگردی دی‌الکتریکی از خود نشان دهند.

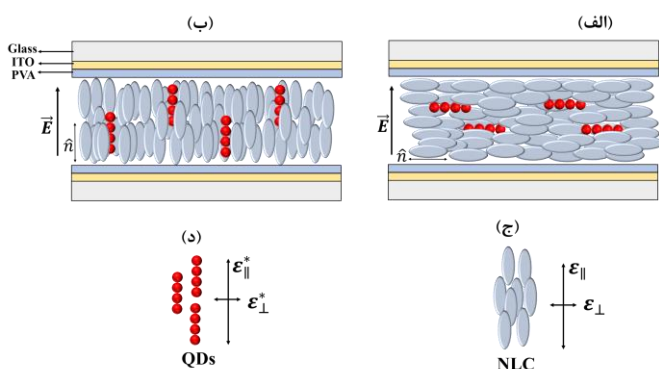
نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS را به صورت تابعی از دما نمایش می‌دهد. مطابق گزارش‌های منتشر شده، در فرکانس‌های بلند، توده بلور مایع با میدان الکتریکی برهم‌کنش دارد. در حالی که در فرکانس‌های کم، مولکول‌های نزدیک به سطح مشترک با میدان برهم‌کنش می‌کنند [۲۸ و ۳۲]. در این‌جا اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی در فرکانس 10 kHz و ولتاژ 100 mV (بسیار کم‌تر از ولتاژ آستانه) انجام شده است. مطابق شکل ۶ برای تمامی نمونه‌ها، با افزایش دما، $\epsilon_{||}$ کاهش و ϵ_{\perp} افزایش می‌یابد. هم‌چنین، دمای انتقال فاز بلور مایع با افزایش اندازه ذرات نقاط کوانتومی تغییر نیافته است. رفتار دی‌الکتریکی نمونه بلور مایع خالص به صورت تابعی از دما، با نتایج منتشر شده پیشین سازگار است [۲۸ و ۲۹].



شکل ۸: تغییرات گذردهی موازی و عمود بر محور مولکولی بر حسب دما برای نمونه‌های بلور مایع نماتیک E7 حاوی 0.5% درصد وزنی از نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS. در شکل، RQDs، OQDs، YQDs و GQDs به ترتیب معرف نقاط کوانتومی قرمز، نارنجی، زرد و سبز است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش دما، تغییرات گذردهی موازی ($\epsilon_{||}$) کاهشی و تغییرات گذردهی عمودی (ϵ_{\perp}) افزایشی است. در دمای 25°C مولفه موازی و مولفه عمودی ثابت دی‌الکتریک با افزایش اندازه ذرات نقاط کوانتومی در غلظت یکسان روندی افزایشی پیدا می‌کنند. با افزایش دما از حدود 50°C الی 61°C ناهمسانگردی دی‌الکتریکی به سرعت کاهش می‌یابد و در نهایت، در دمای بالای 61°C که دمای انتقال فاز نماتیک به مایع همسانگرد است، گذردهی نمونه-

سلول هموتروپیک بیش از سلول هموژن است. از طرف دیگر، حضور ناخالصی‌های یونی درون بلور مایع، مانعی در مقابل جهت‌مندی مولکول‌های بلور مایع است. با جذب این ناخالصی‌ها بر روی سطوح نقاط کوانتومی، جهت‌مندی مولکولی افزایش می‌یابد؛ این امر موجب بهبود ناهمسانگردی سامانه بلور مایع می‌شود. به علاوه، همان‌طور که پیش از این اشاره شد، افزایش pH در فرایند تهیه نقاط کوانتومی موجب افزایش اندازه نقاط کوانتومی می‌شود [۳۱]. بنابراین از نشر سبز به قرمز، اندازه ذرات روندی افزایشی دارد. افزایش ناهمسانگردی دی‌الکتریک در نانوذرات بزرگتر (قرمز) می‌تواند به دلیل نزدیک‌تر بودن اندازه ذرات و اندازه مولکول‌های بلور مایع باشد که این امر می‌تواند موجب بهبود برهمکنش‌های بین مولکولی و در نتیجه بهبود جهت‌مندی مولکولی شود.

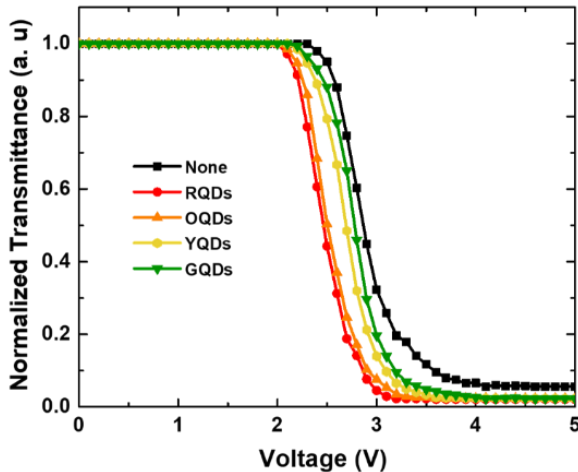


شکل ۸: (الف) آرایه‌های نقاط کوانتومی یک بعدی در سلول هموژن (ب) آرایه‌های نقاط کوانتومی یک بعدی در سلول هموتروپیک (ج) ثابت‌های دی‌الکتریک بلورهای مایع (د) ثابت دی‌الکتریک آرایه‌های نقاط کوانتومی.

۴-۳- بررسی الکترونی سلول‌های بلور مایع

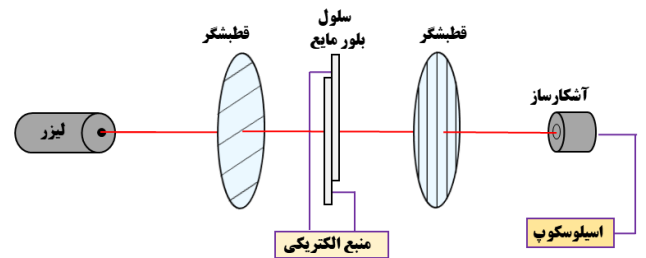
به منظور اندازه‌گیری ولتاژ آستانه سلول‌های ساخته شده، از چیدمانی مطابق شکل ۹ استفاده می‌نمائیم. در این چیدمان، سلول حاوی بلور مایع میان دو قطبشگر خطی عمود بر هم قرار گرفته است. در این پژوهش، از لیزر He-Ne با طول موج ۶۳۲ nm به عنوان منبع نوری استفاده شده است. توان نور عبوری توسط یک آشکارساز متصل به پاورمتر آشکار می‌شود. با اعمال میدان الکتريکی به سلول‌ها، مولکول‌های بلور مایع به تدریج با افزایش ولتاژ در جهت میدان شروع به چرخیدن می‌کنند و مانع از عبور

هر دو مولفه $\epsilon_{||}$ و ϵ_{\perp} با افزایش اندازه ذرات نقاط کوانتومی افزایش پیدا می‌کنند. با توجه به شکل ۶، افزایش $\epsilon_{||}$ خیلی بیشتر از افزایش ϵ_{\perp} است. ویژگی‌های دی‌الکتریک بلور مایع عمدتاً تحت تأثیر شکل، ثابت دی‌الکتریک و غلظت نانوذرات اضافه شده تغییر می‌کند [۳۳، ۳۶ و ۳۷]. استفاده از نانوذرات ناهمسانگرد موجب بهبود جهت‌مندی و در نتیجه افزایش خواص دی‌الکتریک بلورهای مایع می‌شود [۳۶]. از سوی دیگر، افزودن نانوذرات با ثابت دی‌الکتریک بالاتر نسبت به بلورهای مایع، موجب افزایش ثابت دی‌الکتریک سلول حاوی بلور مایع می‌شود. از آن جایی که نقاط کوانتومی ZnCdTeS کروی شکل هستند و ثابت دی‌الکتریک بالاتری نسبت به بلور مایع نماتیک E7 ندارند، بنابراین انتظار نمی‌رود هیچ‌نوع ناهمسانگردی دی‌الکتریک از خود نشان دهند. گزارش شده است جهت کاهش انرژی آزاد ترکیب بلور مایع-نقاط کوانتومی، حجم کل باید کمینه شود [۲۵]. برای برقراری این شرط در ترکیب بلور مایع، زمانی که نقاط کوانتومی به بلور مایع اضافه می‌شود، نقاط کوانتومی به یکدیگر نزدیک می‌شوند و آرایه‌هایی یک بعدی در راستای محور بلند مولکولی بلور مایع تشکیل می‌دهند. خود منظم‌شدگی نقاط کوانتومی در بلورهای مایع، بستگی به ویژگی‌های سطح و خواص نقاط کوانتومی دارد [۲۵-۲۸]. آرایه‌های نقاط کوانتومی خود منظم شده ناهمسانگرد در محیط بلور مایع، ناهمسانگردی دی‌الکتریک اضافه‌ای از خود نشان می‌دهند. این ساختارهای یک بعدی نقاط کوانتومی مشابه خازن‌هایی استوانه‌ای موازی بردار راهنما (\hat{n}) عمل می‌کنند که در سلول هموژن عمود بر راستای میدان الکتريکی (شکل ۸-الف) و در سلول هموتروپیک در امتداد راستای میدان الکتريکی (شکل ۸-ب) قرار می‌گیرند. افزون بر ثابت‌های دی‌الکتریک $\epsilon_{||}$ و ϵ_{\perp} بلورهای مایع (شکل ۸-ج)، ثابت دی‌الکتریک متوسطی در امتداد و عمود بر زنجیره‌های نقاط کوانتومی نیز برای نقاط کوانتومی اضافه شده در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸-د). میانگین ϵ_{\perp}^* آرایه‌های نقاط کوانتومی تک بعدی موجب بهبود بخشیدن به میانگین گذردهی دی‌الکتریک سلول هموژن و همچنین میانگین $\epsilon_{||}^*$ آرایه‌های نقاط کوانتومی تک بعدی، موجب بهبود بخشیدن به میانگین گذردهی دی‌الکتریک سلول هموتروپیک می‌شود؛ بنابراین، با توجه به نوع قرارگیری مولکول‌ها، میزان افزایش گذردهی دی‌الکتریک در



شکل ۱۰: منحنی عبور بر حسب ولتاژ سلول‌های بلور مایع نماتیک حاوی نقاط کوانتومی مختلف در غلظت یکسان.

نور لیزر قطبیده شده می‌شوند. شکل ۱۰ منحنی عبور بر حسب ولتاژ نمونه‌های بلور مایع نماتیک حاوی مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی مختلف را نشان می‌دهد. بسامد اعمالی ۵۰ Hz و حدود ولتاژ ۰ تا ۵ ولت بوده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، ولتاژ آستانه V_{th} به‌عنوان ولتاژی که در آن عبور به میزان ۹۰٪ عبور اولیه کاهش می‌یابد، تعریف می‌شود.



شکل ۹: طرح‌واره‌ای از چیدمان الکترونی مورد استفاده جهت اندازه‌گیری ولتاژ آستانه سلول‌های بلور مایع نماتیک.

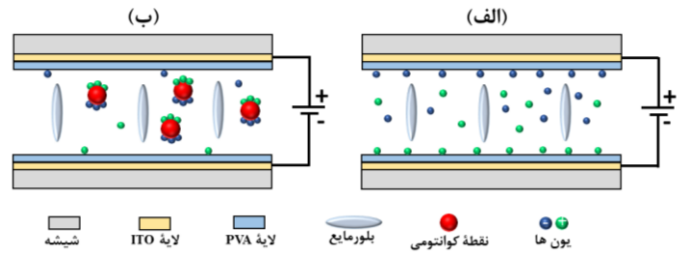
در سلول‌های آلاینده شده، نقاط کوانتومی می‌توانند ناخالصی‌های یونی را به دام ببندازند؛ بنابراین یون‌های کمتری روی سطوح زیرلایه‌ها جذب می‌شود و در نتیجه، این امر مانع از آثار پوششی می‌شود. طرح‌واره جذب ناخالصی‌های یونی در یک سلول بلور مایع نماتیک توسط نقاط کوانتومی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. تحت تأثیر میدان الکتریکی، دو قطبی‌هایی روی سطح نقاط کوانتومی القاء می‌شود و ناخالصی‌های یونی، به جای سطوح زیرلایه، جذب این دو قطبی‌های القائی می‌شود. از طرف دیگر، ناخالصی‌های یونی موجود در سلول باعث افزایش چسبندگی^۹ در محیط سلول می‌شوند که این امر موجب کندی بازچرخش مولکولی می‌شود [۳۵]. ولتاژ آستانه کمتر به این معنی است که ولتاژ کمتری برای بازچرخش مولکول‌ها در بلور مایع نماتیک حاوی نقاط کوانتومی مورد نیاز است. ولتاژ آستانه بلور مایع نماتیک به‌صورت زیر با ناهمسانگردی دی‌الکتریکی مرتبط است [۳۸ و ۹]:

$$V_{th} = \pi \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 \Delta \epsilon}} \quad (2)$$

که در آن، K_{11} و ϵ_0 به ترتیب، ثابت کشسانی و گذردهی خلأ هستند. K_{11} با استفاده از رابطه ۲ به‌دست می‌آید.

ولتاژ آستانه نمونه‌های بلور مایع حاوی مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS در جدول ۱ نشان داده شده است. برای نمونه بلور مایع خالص E7، V_{th} برابر ۲/۵۷ V به‌دست آمده است که با نتایج گزارش شده پیشین مطابقت دارد [۹ و ۲۸]. مقدار V_{th} با افزایش اندازه ذرات، روندی کاهشی داشته است؛ کمترین مقدار ولتاژ آستانه برابر با ۲/۲۱ V در نمونه حاوی نقاط کوانتومی با نشر قرمز رنگ حاصل شد. انتظار می‌رود، افزایش ناهمسانگردی دی‌الکتریکی و کاهش اثر پوششی دو عامل مؤثر در کاهش ولتاژ آستانه باشند. ناخالصی‌های یونی تجمع یافته بر روی سطوح زیرلایه یک میدان داخلی ایجاد می‌کنند و بنابراین ولتاژ مؤثر اعمال شده بر سلول را کاهش می‌دهند. در نتیجه، ناخالصی‌های یونی موجب می‌شوند ولتاژ آستانه مورد نیاز جهت بازچرخش مولکولی، به دلیل آثار پوششی، افزایش یابد.

نشان می‌دهد در راستای محور بلند مولکولی، آرایه‌هایی یک‌بعدی از نقاط کوانتومی تشکیل شده است. ناهمسانگردی دی‌الکتریکی بلور مایع با تغییر طول موج نشر نقاط کوانتومی از رنگ سبز به قرمز افزایش یافت. تشکیل آرایه‌های نقاط کوانتومی، افزایش برهم‌کنش بین مولکولی و کاهش ناخالصی‌های یونی می‌توانند عوامل مؤثر بر افزایش ناهمسانگردی دی‌الکتریکی باشند. نمونه‌های حاوی نقاط کوانتومی، ولتاژ آستانه کمتری را در مقایسه با نمونه بلور مایع خالص نشان دادند. مقدار ولتاژ آستانه، با افزایش طول موج نشر نقاط کوانتومی، روندی کاهش داشته است. در حضور میدان الکتریکی، ناخالصی‌های یونی درون بلور مایع به جای قرارگیری روی زیرلایه‌های سلول، جذب نقاط کوانتومی می‌شوند؛ بنابراین میدان داخلی سلول کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش ولتاژ آستانه سلول بلور مایع نماتیک می‌شود.



شکل ۱۱: طرح‌واره جذب ناخالصی‌های یونی بر روی (الف) سطوح زیرلایه در یک سلول بلور مایع خالص و (ب) نقاط کوانتومی در سلول بلور مایع آلاینده شده تحت تأثیر میدان الکتریکی بسیار بالاتر از ولتاژ آستانه.

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، مقدار K_{11} در نمونه‌های حاوی نقاط کوانتومی، کمتر از نمونه بلور مایع خالص است. با افزایش اندازه نقاط کوانتومی (از تابش سبز به قرمز)، ثابت کشسانی K_{11} کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Andrienko D. Introduction to liquid crystals. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;267:520–541. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.175>.
- [2] Tschierske C. Development of Structural Complexity by Liquid-Crystal Self-assembly. *Angewandte Chemie International Edition*. 2013; 52: 8828–8878. <https://doi.org/10.1002/anie.201300872>.
- [3] Jessy P, Radha S, Patel N. Highly improved dielectric behaviour of ferronematic nanocomposite for display application. *liquid crystal*. 2019;46:772–786. <https://doi.org/10.1080/02678292.2018.1528642>.
- [4] Kocakülal G, Önsal G, Goksen K, Ercan İ, Köysal O. Concentration effect of Cadmium Selenide Sulphide/Zinc Sulphide quantum dots on electro-optic and dielectric properties in nematic liquid crystals composite. *Physica B: Condensed Matter*. 2018;550:47–59. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.09.012>.
- [5] Durbin SD, Arakelian SM, Shen YR. Optical-Field-Induced Birefringence and Fredericksz Transition in a Nematic Liquid Crystal. *Physical Review Letters*. 1981;47:1411–1414. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.47.1411>.
- [6] Esteves C, Ramou E, Porteira ARP, Moura Barbosa AJ, Roque ACA. Seeing the Unseen: The

جدول ۱: مقادیر به دست آمده ناهمسانگردی دی‌الکتریکی، ولتاژ آستانه و ثابت کشسانی نمونه‌های بلور مایع حاوی مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی مختلف ZnCdTeS

نمونه	$\Delta\epsilon$	$V_{th}(V)$	$K_{11} (10^{-11} N)$
E7 خالص	۱۱٫۸۵	۲٫۵۷	۷٫۰۳
نقاط کوانتومی قرمز	۱۴٫۱۱	۲٫۲۱	۶٫۱۹
نقاط کوانتومی نارنجی	۱۳٫۸۹	۲٫۲۵	۶٫۳۱
نقاط کوانتومی زرد	۱۲٫۸۲	۲٫۳۸	۶٫۵۲
نقاط کوانتومی سبز	۱۲٫۱۵	۲٫۴۶	۶٫۶۰

۴- نتیجه گیری

تأثیر نقاط کوانتومی ZnCdTeS با گسیل نور مختلف بر خواص دی‌الکتریکی و الکترونوری بلور مایع نماتیک E7 مورد بررسی قرار گرفت. مؤلفه‌های گذردهی دی‌الکتریکی $\epsilon_{||}$ و ϵ_{\perp} و ناهمسانگردی دی‌الکتریکی $\Delta\epsilon$ سلول‌های بلور مایع حاوی مقادیر یکسان از نقاط کوانتومی با خاصیت نورتابی در طول موج‌های مختلف، به صورت تابعی از دما اندازه‌گیری شد. با افزایش دما، $\epsilon_{||}$ کاهش و ϵ_{\perp} افزایش یافت. در فاز نماتیک، با افزودن نقاط کوانتومی، $\epsilon_{||}$ در مقایسه با ϵ_{\perp} افزایش بیشتری یافته است که

- liquid crystal devices. *Journal of Applied Physics*. 2010;108. <https://doi.org/10.1063/1.3481088>.
- [16] Chou T-R, Hsieh J, Chen W-T, Chao C-Y. Influence of particle size on the ion effect of TiO₂ nanoparticle doped nematic liquid crystal cell. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2014;53:071701. <https://doi.org/10.7567/JJAP.53.071701>.
- [17] Hicks SE, Hurley SP, Yang YC, Yang D-K. Electric polarization frozen by a polymer network in nematic liquid crystals. *Soft Matter*. 2013;9:3834. <https://doi.org/10.1039/c3sm27594a>.
- [18] Maleki A, Seidali Z, Zakerhamidi MS, Ara MHM. Dichroic ratio and order parameters of some sudan dyes doped in nematic liquid crystalline matrix. *Optik*. 2015;126:5473–5477. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.100>.
- [19] Huang CY, Selvaraj P, Senguttuvan G, Hsu CJ. Electro-optical and dielectric properties of TiO₂ nanoparticles in nematic liquid crystals with high dielectric anisotropy. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;286:110902. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110902>.
- [20] Singh BP, Sikarwar S, Tripathi S, Agarwal S, Sah M, Manohar R, et al. Thermodynamic and spectroscopic characterization of a weakly polar liquid crystalline compound dispersed with polyvinyl pyrrolidone capped gold nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*. 2022;354:118889. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118889>.
- [21] Chung H-K, Park H-G, Ha Y-S, Han J-M, Lee J-W, Seo D-S. Superior electro-optic properties of liquid crystal system using cobalt oxide nanoparticle dispersion. *liquid crystal*. 2013;40:632–8. <https://doi.org/10.1080/02678292.2013.773092>.
- [22] Oh C-W, Park E-G, Park H-G. Enhanced electro-optical properties in titanium silicon oxide nanoparticle doped nematic liquid crystal system. *Surface and Coatings Technology*. 2019;360:50–5. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.014>.
- [23] Basu R. Enhancement of polar anchoring strength in a graphene-nematic suspension and its effect on nematic electro-optic switching. *Physical Review E*. 2017;96:012707. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.96.012707>.
- [24] Singh G, Fisch M, Kumar S. Emissivity and electrooptical properties of semiconducting quantum dots/rods and liquid crystal composites: a review. *Reports on Progress in Physics*. Role of Liquid Crystals in Gas-Sensing Technologies. *Advanced Optical Materials*. 2020;8. <https://doi.org/10.1002/adom.201902117>.
- [7] Mather J, Jones LP, Gass P, Imai A, Takatani T, Yabuta K. Potential improvements for dual directional view displays. *Applied Optics*. 2014;53:769. <https://doi.org/10.1364/AO.53.000769>.
- [8] Woltman SJ, Jay GD, Crawford GP. Liquid-crystal materials find a new order in biomedical applications. *Nature Materials*. 2007;6:929–38. <https://doi.org/10.1038/nmat2010>.
- [9] Seidalilir Z, Shishehbor S, Soheyli E, Sabaeian M. Impact of red emissive ZnCdTeS quantum dots on the electro-optic switching, dielectric and electrochemical features of nematic liquid crystal: Towards tunable optoelectronic systems. *Optical Materials*. 2023;140:113868. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.113868>.
- [10] Sebastián N, Osterman N, Lisjak D, Čopič M, Mertelj A. Director reorientation dynamics of ferromagnetic nematic liquid crystals. *Soft Matter*. 2018; 14: 7180-7189. <https://doi.org/10.1039/C8SM01377B>.
- [11] Jang S-W, Choi W, Kim S, Lee J, Na S, Ham S, et al. Complex spatial light modulation capability of a dual layer in-plane switching liquid crystal panel. *Scientific Reports*. 2022;12:8277. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12292-4>.
- [12] Choi J-C, Lee J-W, Lee D-J, Park Y, Kim H-R. Flicker-Free Fringe-Field Switching Liquid Crystal Display Operable at Extremely Low Frequencies for Power Saving. *Advanced Engineering Materials*. 2021;23. <https://doi.org/10.1002/adem.202100174>.
- [13] Shivaraja SJ, Gupta RK, Kumar S, Manjuladevi V. Enhanced electro-optical response of nematic liquid crystal doped with functionalised silver nanoparticles in twisted nematic configuration. *liquid crystal*. 2020; 47: 1678–1690. <https://doi.org/10.1080/02678292.2020.1755901>.
- [14] Chen W-T, Chen P-S, Chao C-Y. Effect of Doped Insulating Nanoparticles on the Electro-Optical Characteristics of Nematic Liquid Crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2009;48:015006. <https://doi.org/10.1143/JJAP.48.015006>.
- [15] Huang Y, Bos PJ, Bhowmik A. The ion capturing effect of 5° SiO_x alignment films in

- (W₁₈O₄₉) nanostructures. *Journal of Molecular Liquids*. 2022;348:118024. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118024>.
- [34] Kaszynski P, Januszko A, Glab KL. Comparative Analysis of Fluorine-Containing Mesogenic Derivatives of Carborane, Bicyclo[2.2.2]octane, Cyclohexane, and Benzene using the Maier–Meier Theory. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2014;118:2238–2248. <https://doi.org/10.1021/jp411343a>.
- [35] Basu R, Kinnamon D, Garvey A. Nano-electromechanical rotation of graphene and giant enhancement in dielectric anisotropy in a liquid crystal. *Applied Physics Letters*. 2015;106. <https://doi.org/10.1063/1.4921752>.
- [36] Mishra S, Manjuladevi V, Gupta RK. Effect of shape of ZnO nanoparticle on electro-optic and dielectric properties of nematic liquid crystal. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;386:122482. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122482>.
- [37] Ayeb H, Derbali M, Mouhli A, Soltani T, Jomni F, Fresnais J, et al. Viscoelastic and dielectric properties of 5CB nematic liquid crystal doped by magnetic and nonmagnetic nanoparticles. *Physical Review E*. 2020;102:052703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.052703>.
- [38] Dark ML, Moore MH, Shenoy DK, Shashidhar R. Rotational viscosity and molecular structure of nematic liquid crystals. *Liquid crystal*. 2006;33:67–73. <https://doi.org/10.1080/02678290500450634>.
- 2016;79:056502. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/5/056502>.
- [25] Basu R, Iannacchione GS. Evidence for directed self-assembly of quantum dots in a nematic liquid crystal. *Physical Review E*. 2009;80:010701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.80.010701>.
- [26] Atzin N, Guzmán O, Gutiérrez O, Hirst LS, Ghosh S. Free-energy model for nanoparticle self-assembly by liquid crystal sorting. *Physical Review E*. 2018;97:062704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.062704>.
- [27] Verma YK, Inman RH, Ferri CGL, Mirafzal H, Ghosh SN, Kelley DF, et al. Electrical modulation of static and dynamic spectroscopic properties of coupled nanoscale GaSe quantum dot assemblies. *Physical Review B*. 2010;82:165428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.165428>.
- [28] Seidalilir Z, Soheyli E, Sabaeian M, Sahraei R. Enhanced electrochemical and electro-optical properties of nematic liquid crystal doped with Ni:ZnCdS/ZnS core/shell quantum dots. *Journal of Molecular Liquids*. 2020;320:114373. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114373>.
- [29] Zakerhamidi MS, Shoarinejad S, Mohammadpour S. Fe₃O₄ nanoparticle effect on dielectric and ordering behavior of nematic liquid crystal host. *Journal of Molecular Liquids*. 2014;191:16–19. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2013.11.020>.
- [30] Khoo I-C, Wu S-T. *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*. WORLD SCIENTIFIC; 1993. <https://doi.org/10.1142/1630>.
- [31] Soheyli E, Zargoush S, Yazici AF, Sahraei R, Mutlugun E. Highly luminescent ZnCdTeS nanocrystals with wide spectral tunability for efficient color-conversion white-light-emitting-diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021;54:505110. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac26f5>.
- [32] Dalir N, Javadian S, Kakemam J, Yousefi A. Evolution of electro-chemical and electro-optical properties of nematic liquid crystal doped with graphene oxide. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;265:398–407. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.138>.
- [33] Ranjkesh A, Ebrahimpour N, Zakerhamidi MS, Seyedahmadian SM. Temperature-dependent dielectric property of a nematic liquid crystal doped with two differently-shaped tungsten oxide



Enhanced dielectric and electro-optical switching properties of nematic liquid crystals using ZnCdTeS quantum dots with luminescent property at different emission wavelengths

Z. Seidalilir^{*1,2}, S. Shishebor¹, E. Soheyli³, M. Sabaeian^{1,2}

¹Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

²Center for Research on Laser and Plasma, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

³Department of Physics, Faculty of Science, Ilam University, Ilam, Iran.

Abstract: In this study, ZnCdTeS quantum dots (QDs) with luminescent properties at different emission wavelengths were utilized to enhance the dielectric and electro-optical characteristics of nematic liquid crystal (NLC) cells. At various temperatures, the dielectric permittivity components (ϵ_1 and ϵ_{\perp}) and dielectric anisotropy ($\Delta\epsilon$) of NLC samples containing ZnCdTeS QDs were measured. ϵ_1 increases considerably more than ϵ_{\perp} in the nematic phase when QDs are introduced. The dielectric anisotropy of the system has increased by approximately 19% in the presence of QDs with red emission, which is a result of a significant enhancement of ϵ_1 . The NLC environment induces one-dimensional arrays of QDs in the system, which enhances the dielectric properties of the system, as demonstrated by the dielectric results. The electro-optical findings indicate that including QDs substantially reduces the threshold voltage of NLC cells. Incorporating quantum dots into liquid crystal led to a reduction in the threshold voltage from 2.57 V for pure NLC to 2.21 V. QDs improve the effective field of a system by reducing the screening effects caused by ionic impurities in the system. Anisotropy enhancement, effective field increase within the cell, and QD-NLC interaction improvement all contribute to the enhancement of the cell's switching characteristics.

Keywords: Nematic liquid crystals, dielectric properties, electro-optical properties, and threshold voltage.