



بررسی گذار فردریکسز در بلور مایع سمکتیک-A آمیخته به نانوذرات فروالکتریک

محمد امدادی، جعفر پورصمد بناب، توحید حلاجی و فرید مقدس

گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب

چکیده - با وارد کردن نانوذرات فروئیکی (فرومغناطیس و فروالکتریک) در بلورهای مایع ساختار، جهت گیری و خصوصیات فیزیکی آنها شدیداً تحت تأثیر قرار می‌گیرد. رفتار این ترکیبات در حضور میدان‌های خارجی به انرژی چنگ زدگی، کسر حجمی نانوذرات وارد شده، علامت ناهمسانگردی الکتریکی بلورمایع و نیز جهت‌گیری نسبی بردار جهت نما و گشتاور موضعی الکتریکی نانوذرات بستگی دارد. در این مقاله میدان آستانه گذار (فردریکسز) را در بلور مایع سمکتیک - A با حضور نانو ذرات فروالکتریک در بازه دمایی نزدیک به دمای گذار سمکتیک - A به سمکتیک - C به دست آوردیم.

کلید واژه: بلورمایع، چنگ زدگی، سمکتیک، فردریکسز، نانوذره

Study of Freedericksz transition in smectic-A liquid crystals doped with ferroelectric nanoparticles

Mohammad Emdadi, Jafar Poursamad Bonab, Tohid Hallaji and Farid Moghaddas

Department of Laser and Engineering, University of Bonab, Bonab

Abstract- The structure, orientation and physical properties of liquid crystals can be affected significantly by doping of ferroic (ferromagnetic and ferroelectric) nanoparticles into liquid crystals. Behavior of these suspensions in external fields, depends on anchoring energy, volume fraction of doped nanoparticles, and sign of dielectric anisotropy of liquid crystals as well as relative orientation of director and local polarization of nanoparticles. In this work we find the transition threshold field (Freedericksz transition) in smectic-A considering ferroelectric nanoparticles at temperature near the transition temperature from smectic-A to smectic-C.

Keywords: Liquid Crystal, Anchoring energy, Smectic, Freedericksz, Nanoparticle

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

بلورهای مایع مواد ناهمسانگردی هستند که خواص فیزیکی منحصر به فرد آنها زمینه ساز کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون شده است. این مواد از نظر اپتیکی، جذب، هدایت گرمایی و هم از نظر رسانش الکتریکی ناهمسانگرد هستند، به همین علت قابلیت ظهور بسیاری از پدیده‌ها در این گونه مواد وجود دارد. سمکتیک‌ها یکی از انواع مولکولهای بلور مایع هستند، که هم دارای نظم مکانی و هم نظم جهت‌گیری هستند. این دسته از بلورهای مایع از نظر اپتیکی تک محوری بوده و دارای ساختار لایه‌ای هستند [۱].

بلورهای مایع شدیداً تحت تأثیر میدانهای خارجی (الکتریکی و مغناطیسی) قرار می‌گیرند و خواص الکتریکی، مغناطیسی و اپتیکی آنها از میدانهای اعمالی تأثیر می‌پذیرد. همچنین ساختار، جهت‌گیری و سایر خصوصیات این مواد می‌تواند در حضور ناخالصی‌های مختلف (عموماً در مقیاس نانو)، اعم از ذرات فرومغناطیس [۲] و فروالکتریک [۳] تحت تأثیر قرار گیرد. با ورود این ناخالصی‌ها و با به اشتراک گذاشتن خصوصیات ذاتی خود با بلور مایع میزبان، تغییراتی در خواص اپتیکی سوسپانسیون (مخلوطی از بلور مایع و نانوذرات) ایجاد می‌شود، که تحقیقات تجربی و نظری زیادی در این زمینه صورت گرفته است [۳-۵].

اولین بار بروچارد و دوژن ایده‌ی وارد کردن ذرات ریز مغناطیسی در بلورهای مایع نماتیکی را مطرح کردند، آنها پیشنهاد کردند که ورود ذرات مغناطیسی در نماتیکی ترکیبات پایداری به دست می‌دهد، آن را فرونماتیکی نامیدند [۲]. در این ترکیب‌ها تزویج جهت‌گیری قدرتمندی بین گشتاور موضعی ذرات مغناطیسی و بردار جهت‌نمای بلورهای مایع صورت می‌گیرد که منجر به بهبود پاسخ‌دهی مغناطیسی می‌گردد. بروچارد و دوژن حالت چنگ زدگی نامتناهی بین مولکولهای بلور مایع و سطح ذره‌ی مغناطیسی را با شرط $m||n$ در نظر گرفتند، که در آن m بردار گشتاور موضعی ذرات مغناطیسی و n بردار جهت‌نمای بلور مایع است. سپس باریلوو و ریختر نظریه‌ای را در نظر گرفتند که بر چنگ‌زدگی متناهی با چگالی انرژی سطحی w محدود، بین نانوذرات

مغناطیسی و بلورهای مایع دلالت می‌کند. پارامتر $\omega = wd/k \leq 1$ شاخصی برای چنگ‌زدگی متناهی است که در آن d اندازه‌ی نوعی ذرات مغناطیسی و k ثابت الاستیکی فرانک است. در حالت لنگراندازی نرم بر خلاف لنگراندازی سخت هر دو شرط اولیه‌ی $m \perp n$ و $m||n$ برای پیکربندی اولیه امکان‌پذیر است [۵].

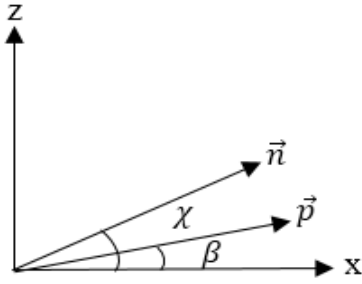
زمانی که یک نمونه بلور مایع با ساختار یکنواخت تحت تأثیر میدان خارجی قرار گیرد، تغییر تدریجی ساختار بردار جهت‌نما صورت می‌گیرد، تا اینکه در یک مقدار آستانه، نیروی میدان غالب می‌شود، این مقدار آستانه به گذار فردریکز معروف است. شایان ذکر است که این گذار در بلورهای مایع سمکتیک -A در حالت عادی رخ نمی‌دهد، بلکه فقط در بازه دمایی نزدیک، به دمای گذار از حالت سمکتیک -A به سمکتیک -C، گذار فردریکز قابل بررسی است [۴]. در این مقاله نتایج حاصل از بررسی آستانه گذار فردریکز برای بلور مایع سمکتیک $8s5$ در حضور نانوذرات فروالکتریکی $Sm_2P_2S_6$ در بازه دمایی $T_{A-C} = 0.2$ بلور مایع مذکور ارائه می‌شود.

۲- تئوری مسئله :

یک سلول به ضخامت D با شرایط مرزی صفحه‌ای یکنواخت و چنگ‌زدگی نامتناهی در هر دو دیواره‌ی سلول در نظر می‌گیریم. به طوریکه محور z عمود بر سلول، $z=0$ منطبق بر پائین سلول و $z=D$ منطبق بر بالای سلول باشد. میدان الکتریکی یکنواخت $\vec{E} = (0,0,E)$ در راستای محور z بر سلول اعمال می‌شود. کسر حجمی نانوذرات فروالکتریک وارد شده در بلور مایع را بسیار کوچک در نظر می‌گیریم، تا از برهمکنش میان نانو ذرات چشم‌پوشی شود. همچنین فرض می‌کنیم که گشتاور موضعی الکتریکی نانوذرات p به صورت موازی با امتداد بردار جهت‌نما جهت‌گیری کرده‌اند.

برای توصیف سوسپانسیون نانوذرات فروالکتریکی با بلور مایع سمکتیک -A از نظریه‌ی پیوستاری کشسانی بهره گرفته و انرژی آزاد کل (F_{tot}) را برای سلول مورد نظر به دست می‌آوریم [۲]:

$$F_{tot} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (1)$$



شکل ۱: نحوه‌ی جهت‌گیری بردار جهت‌نما و بردار گشتاور موضعی الکتریکی نسبت به محور x بعد از اعمال میدان الکتریکی

$$\vec{n} = (\cos \chi, 0, \sin \chi) \quad \text{و} \quad \vec{p} = (\cos \beta, 0, \sin \beta) \quad (۷)$$

با قرار دادن مولفه‌های \vec{n} ، \vec{p} ، \vec{E} در رابطه‌ی (۱) و با استفاده از رابطه‌ی $\frac{d-d_0}{d_0} = \frac{1}{2}\theta^2$ انرژی کل سیستم را به صورت زیر به دست می‌آوریم [۴]:

$$F_{tot} = \frac{1}{2}K \left(\cos \chi \frac{\partial \chi}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{4} \frac{b}{(1+c)^4} \chi^4 + \frac{1}{2} \frac{a}{(1+c)^2} - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_a E^2 (\sin \chi)^2 - P f E \sin \beta - \frac{2w f}{d_{np}} \cos(\chi - \beta)^2$$

که در آن a و b ثابتهای لاندائو هستند. برای یافتن میدان آستانه‌ای گذار، باید انرژی کل (۸) را نسبت به دو متغیر χ و β کمینه کرد. به این منظور می‌توان از معادلات اویلر-لاگرانژ استفاده کرد:

$$\frac{\partial F_{tot}}{\partial i} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial F_{tot}}{\partial (\partial i / \partial z)} \right) = 0 \quad i = \beta, \chi \quad (۹)$$

بعد از خطی‌سازی به دو معادله دیفرانسیل زیر می‌رسیم:

$$K \frac{d^2 \chi}{dz^2} + \left(\varepsilon_0 \varepsilon_a E^2 - \frac{a}{(1+c)^2} - \frac{4fw}{d_{np}} \right) \chi = -\frac{4fw}{d_{np}} \beta$$

$$P f E \cos \beta = \frac{2fw}{d_{np}} \sin 2(\beta - \chi) \quad (۱۰)$$

با توجه به چنگ زدگی نامتناهی در سطح دیواره‌های سلول، شرایط مرزی $\chi(0) = \chi(D) = 0$ را داریم. برای حل روابط (۱۰) با در نظر گرفتن شرایط مرزی مذکور، جواب پیشنهادی را به شکل زیر در نظر می‌گیریم:

$$\chi = A \sin(\mu z) + B \cos(\mu z) - \frac{\gamma}{\mu^2} \quad (۱۱)$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \left[k(\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 + B \left(\frac{d-d_0}{d_0} \right)^2 \right] \quad (۲)$$

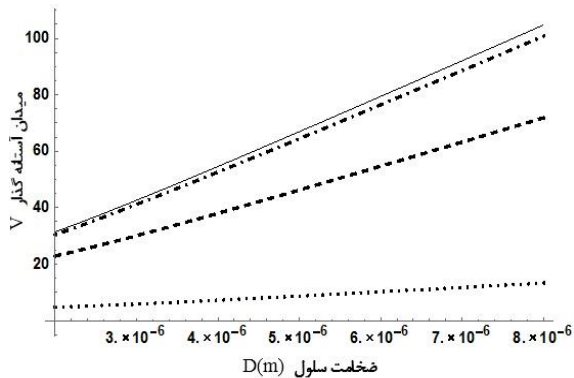
$$F_2 = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_a (\vec{n} \cdot \vec{E})^2 \quad (۳) \quad \text{و} \quad F_3 = -P f (\vec{p} \cdot \vec{E}) \quad (۴)$$

$$F_4 = \frac{A w f}{d_{np}} (\vec{n} \cdot \vec{p})^2 \quad (۵) \quad \text{و} \quad F_5 = \frac{k_B T}{v} f L n f \quad (۶)$$

k ثابت کشسانی بلورمایع وابسته به تغییر شکل گسترشی، n بردار جهت نمای مولکولهای بلور مایع، B قابلیت تراکم لایه‌ها، d و d_0 به ترتیب ضخامت اولیه و مختل شده‌ی لایه‌های بلور مایع سمکتیک- A ، ε_0 گذردهی الکتریکی در خلأ، ε_a گذردهی الکتریکی بلور مایع، P گشتاور موضعی اشباع نانوذرات فروالکتریکی، f کسر حجمی نانوذرات، A ضریبی است که برای حالت $p \parallel n$ برابر با -2 و برای حالت $p \perp n$ برابر با 1 در نظر گرفته می‌شود [۴]. w انرژی سطحی محدود بین نانوذرات فروالکتریک و بلورهای مایع، d_{np} قطر نانوذره‌ی فروالکتریکی، k_B ثابت بولتزمن، T دما و v حجم نانو ذره‌ی فروالکتریکی است. رابطه‌ی (۲) مربوط به انرژی تغییر شکل مولکولهای بلورمایع سمکتیک، روابط (۳) و (۴) به ترتیب نمایانگر برهم‌کنش میدان الکتریکی اعمالی با بردار جهت‌نمای بلورمایع و گشتاور موضعی نانوذرات می‌باشد. رابطه‌ی (۵) مربوط به چگالی انرژی سطحی تزویجی بین مولکولهای بلورمایع و نانوذرات و جمله‌ی آخر، رابطه‌ی (۶) انرژی آنتروپی سیستم می‌باشد. ما در اینجا حالت چنگ زدگی محدود را بین نانوذرات و بردار جهت‌نمای بلورمایع انتخاب می‌کنیم.

در بلورمایع سمکتیک χ انحراف مولکولها نسبت به مرز و θ انحراف مولکولها نسبت به لایه می‌باشد، که رابطه‌ای به صورت $\chi \approx (1+c)\theta$ بین آنها برقرار است. در آن c ضریب تناسب است و مقدار آن در حدود 0.9 می‌باشد [۴]. در غیاب میدان الکتریکی انرژی آزاد سیستم در $p \parallel n$ کمینه است، با اعمال میدان الکتریکی بردار جهت‌نمای بلور مایع و گشتاور موضعی نانو ذرات به دلیل ناهمسانگردی مثبتی که دارند در راستای میدان جهت‌گیری می‌کنند. واپیچش ایجاد شده در الگوی جهت‌گیری و گشتاور موضعی نانوذره به صورت زیر نوشته می‌شود:

کنترل بهتری برای رفتار بلور مایع در میدان خارجی الکتریکی دست یافت.



شکل ۲: وابستگی تغییرات میدان آستانه گذار نسبت به ضخامت سلول. نمودار خط ثابت برای بلور مایع خالص. نمودار نقطه-خط برای سوسپانسیون با $f = 10^{-5}$. نمودار خط چین برای سوسپانسیون با $f = 10^{-4}$. نمودار نقطه چین برای سوسپانسیون با $f = 10^{-3}$ در $T - T_{AC} = 0.2$.

مطابق شکل این ولتاژ آستانه، در یک سلول ۴ میکرومتری با حضور نانوذرات فروالکتریک با کسر حجمی $f = 10^{-5}$ حدود ۲ ولت و برای $f = 10^{-4}$ ، در حدود ۱۶ ولت نسبت به بلور مایع خالص کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل ساده شده‌ای، برای بررسی گذار ساختاری در یک بلور مایع سمکتیک آلاییده با نانو ذرات فروالکتریک را ارائه نمودیم. میدان آستانه‌ی گذار را به دست آورده و نشان دادیم که با ورود نانو ذرات فروالکتریک و همچنین افزایش کسر حجمی این نانوذرات، شاهد کاهش بیشتری در میدان گذار هستیم.

مراجع

- [1] P. Oswald and P. Pieranski, *Nematic and Cholesteric Liquid Crystals*, Talor & Francis (2005).
- [2] F. Brochard, P.G. de Gennes, *Theory of magnetic suspensions in liquid crystals*, *J. Phys. (Paris)* 31 (1970) 691-708.
- [3] Shelestiuk, S. M., Reshetnyak, V. Y., & Sluckin, T. J. (2011). Frederiks transition in ferroelectric liquid-crystal nanosuspensions. *Physical Review E*, 83(4), 041705
- [4] Elston, Steve J. "Smectic-A Fréedericksz transition." *Physical Review E* 58.2 (1998): R1215.
- [5] Burylov, S. V., & Zakhlevnykh, A. N. (2013). Magnetically induced bistable behavior of ferroelectric liquid crystals. *Physical Review E*, 88(5), 052503
- [6] Kurochkin, O., et al. "Nano-colloids of sn2P2S6 in nematic liquid crystal pentyl-cianobiphenile." *Condensed Matter Physics* (2010).

$$\text{که در آن } \mu^2 = \left(\varepsilon_0 \varepsilon_a E^2 - \frac{a}{(1+c)^2} - \frac{2fw}{d_{np}} \right) / K$$

$\gamma = fPE/4$ هستند. با استفاده از جواب پیشنهادی، میدان آستانه گذار را به شکل زیر به دست می‌آوریم:

$$E_F = \left(-\frac{fP\pi}{2} + \sqrt{\frac{(f\pi P)^2}{4} + 4 \left(\varepsilon_a \varepsilon_0 - \frac{D^2 f^2 P^2 \pi^4 k}{16} \right)} \right) \times \sqrt{\frac{\alpha(T - T_{AC}) + \frac{4K\pi^2}{D^2} - \frac{-2fw}{d_{np}}}{(1+c)^2}} / \left(\varepsilon_a \varepsilon_0 - \frac{D^2 f^2 P^2 \pi^4 k}{16} \right)$$

رابطه‌ی بالا وابستگی میدان آستانه‌ی گذار بلور مایع سمکتیک $A-Sn_2P_2S_6$ در حضور نانوذرات فروالکتریک در بازه دمایی گذار A به C برای بلور مایع را نشان می‌دهد. α ضریبی تجربی برابر با ۱۸۵۰ است. طبق انتظار در رابطه‌ی (۱۲) اگر $f = 0$ قرار دهیم، به میدان آستانه گذار برای بلور مایع سمکتیک A خالص می‌رسیم [۴].

۳- بحث و نتایج

با قرار دادن مقادیر عددی پارامترهای مربوط به بلور مایع $8S5$ و نانوذره فروالکتریک $Sn_2P_2S_6$ در رابطه‌ی (۱۲) می‌توانیم نمودار تغییرات ولتاژ آستانه‌ی گذار نسبت به تغییرات ضخامت سلول و کسر حجمی نانوذرات را رسم کنیم. برای بلور مایع و همچنین نانوذره یاد شده داریم، $\varepsilon_a = 0.07$ ، $P = 0.04 C/m^2$ ، $k = 5 \times 10^{-12} N$ ، $f = 10^{-4}$ ، $w = 10^{-4} N/m$ ، $d_{np} = 40 nm$ [۶]. در مورد بلورهای مایع خالص نشان داده شده است که با افزایش میدان از حد آستانه، گذار ساختاری رخ می‌دهد، که این میدان گذار متناسب با فاصله‌ی دیواره هاست [۳]. نمودار تغییرات ولتاژ آستانه گذار را برای سلولی که ضخامت آن از $2 \mu m$ تا $8 \mu m$ تغییر می‌کند را در بازه‌ی تغییرات دمایی $T - T_{AC} = 0.2$ در شکل (۲) رسم کرده‌ایم. مطابق شکل (۲) این میدان آستانه گذار در حضور نانوذرات فروالکتریک کاهش یافته است. این تغییر، زمانی برجسته‌تر می‌گردد که کسر حجمی نانوذرات وارد شده در محیط بلور مایع نیز افزایش یابد. در واقع در حضور نانوذرات بیشتر، به علت تزویج بین بردار جهت‌نمایی بلورهای مایع و گشتاور موضعی نانوذرات، می‌توان به