

Structural phase transition of a nematic liquid crystal doped with magnetic nanoparticles, under electric, magnetic and optical fields

S. Shoarinejad^{1*}, S. Parvizi¹

Submit Date: 2017.06.14

Revise Date: 2018.08.17

Accept Date: 2019.02.16

Abstract

Nematic liquid crystals doped with magnetic nanoparticles, called ferronematics, are among the new colloidal suspensions with critical magnetic properties. Dispersing magnetic nanoparticles in a cholesteric liquid crystal medium also leads to the creation of the other phase of anisotropic magnetic fluids known as ferrocholesteric. In fact, the ordering behavior and some features of these new materials are drastically influenced by the presence of magnetic nanodopants. The transition field and orientational ordering depend on the volume fraction and magnetic moment of the dispersed particles as well as the external and material parameters such as magnetic anisotropy and the cell thickness of a liquid crystal cell. The investigation of these new anisotropic nanomaterials is very important not only from the theoretical point of views but also practical applications in nanotechnology. In this work we consider a ferrocholesteric cell with homeotropic anchoring conditions on the cell walls and soft anchoring modes on the ferroparticle surfaces. Then, we study the stability of the system and transition to a feronematic state caused by exposure to a laser beam and under applied magnetic and electric fields. It is shown that nanoparticles accumulate in the middle of the slab, with a maximum deviation. Also, it turns out that depending on the type of anisotropy and cell thickness, as expected, the phase transition occurs at different laser intensities.

Keywords: Liquid crystal; magnetic nanoparticles; structural phase transition.

¹ Department of Physics of Alzahra University

* Corresponding author: sshoari@alzahra.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir/>

گذار فاز ساختاری ترکیب نانوذرات مغناطیسی و بلور مایع نماتیک، تحت اثر همزمان میدان‌های مغناطیسی، الکتریکی، اپتیکی^۱

سعیده شعاری نژاد^{۲*}، سارا پرویزی^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۳/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۲۶

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

چکیده

با وارد کردن نانوذرات مغناطیسی در بلورهای مایع نماتیک، سوسپانسیون‌های کلونیدی پایداری به وجود می‌آیند که به نام فرونماتیک‌ها شناخته می‌شوند. بلورهای مایع فروکلستریک نیز یکی دیگر از انواع شماره‌های ناهمسانگرد مغناطیسی هستند که با آمیختن نانوذرات مغناطیسی در محیط کلستریک حاصل می‌شوند. رفتار سمت‌گیری و خواص مختلف این مواد شدیداً تحت اثر حضور نانوذرات قرار می‌گیرند. در این مواد، علاوه بر ناهمسانگردی مغناطیسی بلور مایع و دیگر پارامترهای مؤثر یک سلول بلور مایع خالص با فاز نماتیک یا کلستریک، کسر حجمی و مغناطش ذرات از عوامل مهمی هستند که بر میدان‌گذار و سمت‌گیری میدان جهت‌نما تأثیر می‌گذارند. با تغییر این پارامترها می‌توان خواص این نوع مواد را کنترل کرد. از اینرو، بررسی آن‌ها اهمیت بسیاری در

^۱ شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/jap.2019.16038.1073

^۲ گروه فیزیک، دانشکده شیمی-فیزیک، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: sshoari@alzahra.ac.ir

صنایع وابسته به نانوشاره‌های ناهمسانگرد مغناطیسی دارد و در سال‌های اخیر کاربردهای وسیع و گسترده‌ای در حوزه نانو فناوری یافته است. ما در این مقاله، یک تیغه کلستریک آمیخته به نانوذرات مغناطیسی با شرایط چنگ زدگی هموتروپیک قوی در دیواره‌ها و شرایط چنگ زدگی مختلف در سطوح ذرات را در نظر گرفته و به مطالعه گذار به حالت فرونماتیک و بررسی پایداری این سیستم در حضور همزمان میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و اپتیکی می‌پردازیم. نشان داده می‌شود که نانوذرات در ناحیه میانی تیغه که انرژی کل کمینه می‌شود، متراکم می‌شوند. در این ناحیه نانوذرات تحت تأثیر میدان‌ها بیشترین انحراف را خواهند داشت. همچنین مطابق انتظارمان، معلوم می‌شود که بسته به نوع ناهمسانگردی‌ها و ضخامت سلول، گذار به ازای شدت‌های مختلف لیزر رخ خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: بلور مایع، نانوذرات مغناطیسی، گذار فاز ساختاری.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، خواص ویژه بلورهای مایع و ترکیبات نانو کلوئیدی آن‌ها موجب گسترش روزافزون کاربردهای این مواد در صنایع گوناگون شده است و گروه‌های پژوهشی بسیاری به تحقیق در این زمینه در ابعاد نظری و تجربی پرداخته‌اند [۱]. فرونماتیک‌ها و فروکلستریک‌ها از جمله این ترکیبات هستند که از آمیختن بلورهای مایع نماتیک و کلستریک با نانوذرات فرومغناطیسی به دست می‌آیند [۲، ۳]. نماتیک‌ها یکی از ساده‌ترین فازهای بلورهای مایع هستند که در آن محور طولی ملکول‌ها به طور میانگین، تمایل به صف‌بندی در امتداد مرجحی دارند که آن را با جهت‌نمای n مشخص می‌کنند [۴]. فاز کلستریک دارای نوعی ساختار مارپیچی است، طوری که در آن، این امتداد از لایه‌ای به لایه دیگر می‌پیچد و دوره تناوب این پیچش با گام p تعریف می‌شود [۵، ۶].

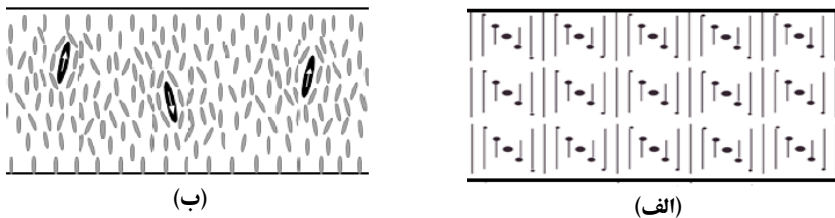
سلول فرونماتیک و فروکلستریک نیز مانند سلول نماتیک خالص، حتی در حضور میدان‌های خارجی نیز شرایط تعادلی موضعی خود را حفظ کرده و هیچ‌گونه پاسخی به میدان نمی‌دهند، اما به ازای میدان بحرانی معینی، آرایش‌بندی ملکول‌ها در آن‌ها تغییر کرده و پیکربندی و پیچیده‌ای می‌تواند به وجود آید. این میدان آستانه به عنوان میدان گذار فردریکز شناخته می‌شود. همچنین تحت شرایط خاصی، می‌تواند گذار فازی بین این دو نوع پیکربندی رخ دهد [۴، ۵]. این میدان

بحرانی و پیکربندی در سلول‌های فرونماتیک و فروکلستریک، شدیداً تحت اثر پارامترهای وابسته به نانوذرات مغناطیسی قرار می‌گیرند. با محدود شدن ملکول‌های بلور مایع به سطح نانو ذرات مغناطیسی بر اثر جفت‌شدگی نظم بلور مایع و نظم مغناطیسی، برهم‌کنش ضعیف میان نظم بلوری و میدان‌های خارجی تقویت می‌شود و همین امر به بهبود پاسخ آن‌ها به میدان‌های خارجی، در مقایسه با بلورهای مایع خالص می‌انجامد. امکان‌گذار میان فازهای فرونماتیک و فروکلستریک، به ویژه در صنایع الکترواپتیکی، از جمله صنعت نمایشگرها نقش بسیار کلیدی دارد. بنابراین، با توجه به اهمیت این موضوع، ما در این کار به بررسی اثر همزمان میدان‌های مغناطیسی، الکتریکی و نور لیزر بر یک تیغه کلستریک آمیخته به نانوذرات فرومغناطیسی و شرایط وقوع چنین گذاری می‌پردازیم و پارامترهای مؤثر در این نوع گذار را مورد بحث قرار می‌دهیم.

۲. فرمول‌بندی و تئوری مسئله

۱-۲. تیغه بلور مایع کلستریک حاوی نانوذرات فرومغناطیسی با چنگ‌زدگی ضعیف

یک تیغه نازک بلور مایع کلستریک حاوی نانوذرات فرومغناطیسی، با شرایط مرزی هموتروپیک و چنگ‌زدگی نامتناهی در هر دو دیواره سلول، در نظر می‌گیریم (شکل ۱). دیواره‌ها موازی صفحه xy در فاصله $z = 0$ تا $z = d$ در نظر گرفته می‌شوند. شرایط چنگ‌زدگی روی سطح نانوذرات را ضعیف و محدود فرض می‌کنیم. کسر حجمی نانوذرات، f ، را به حد کافی کوچک در نظر می‌گیریم تا بتوان از برهم‌کنش دوقطبی-دوقطبی در ترکیب، با تقریب خوبی چشم‌پوشی کرد.



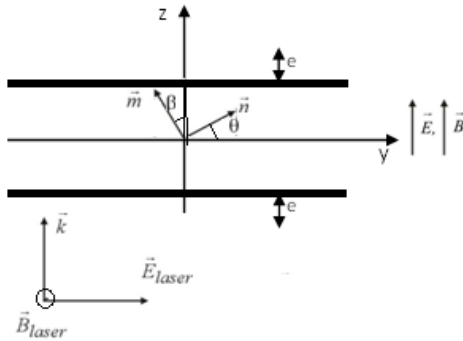
شکل ۱. نمایش ساختار سمتگیری (الف) در یک سلول کلستریک با شرایط مرزی هموتروپیک (ب) در یک سلول فرونماتیک با شرایط مرزی هموتروپیک در حضور نانوذرات.

پرتوی لیزر قطبیده در امتداد y ، در امتداد محور Z بر تیغه تابیده می‌شود. همزمان میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی خارجی در همین امتداد به آن اعمال می‌شود. پیکربندی این ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است. امتداد جهت نما و گشتاور مغناطیسی نانوذرات را به ترتیب با زوایای

۳۶ / گذار فاز ساختاری ترکیب نانوذرات مغناطیسی و بلور مایع نماتیک، تحت اثر همزمان میدان‌های ...

قطبی θ و β و زوایای سمتی φ و γ مشخص می‌کنیم. با توجه به شرایط چنگ‌زدگی تعریف شده، زوایای $\beta(0)$ ، $\beta(a)$ ، $\varphi(0)$ و $\varphi(a)$ در هندسه مفروض اختیاری هستند.

$$\vec{n} = \cos\theta\cos\varphi\hat{i} + \cos\theta\sin\varphi\hat{j} + \sin\theta\hat{k} = -\sin\beta\cos\gamma\hat{i} - \sin\beta\sin\gamma\hat{j} + \cos\beta\hat{k} \quad (1)$$



شکل ۲. هندسه مسئله و سمتگیری‌های جهت نما و گشتاور دو قطبی نانوذرات در حضور میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی و پرتوی لیزر.

فرض می‌کنیم نمونه در دمای ثابت نگه داشته شود و بررسی را روی ساختارهایی که چهار زاویه مذکور در بالا فقط تابعی از Z باشند، محدود می‌کنیم. چگالی انرژی آزاد کل بلور مایع، تحت شرایط چنگ‌زدگی قوی روی دیواره‌های سلول و چنگ‌زدگی ضعیف روی سطح نانوذرات را به صورت زیر می‌نویسیم [۷، ۸]

$$F = F_{elastic} + F_{ferroparticles} + F_{electric} + F_{magnetic} + F_{laser} \quad (2)$$

که در آن، جمله اول سمت راست چگالی انرژی کشسانی فرانک و جمله دوم شامل چگالی انرژی آزاد ناشی از برهم کنش نانوذرات مغناطیسی با ملکول‌های بلور مایع و میدان مغناطیسی و نیز چگالی انرژی آزاد وابسته به آنتروپی سیستم است روابط (۳) جملات بعدی به ترتیب نشان‌دهنده چگالی انرژی الکتریکی، مغناطیسی و پرتوی لیزر است. چگالی انرژی آزاد مربوط به سهم هر یک از این تغییرات با روابط زیر داده می‌شوند [۴، ۷-۱۱].

$$\begin{aligned} F_{elastic} &= \frac{1}{2} \left(K_1 (\vec{\nabla} \cdot \vec{n})^2 + K_2 (\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{n} + q_0)^2 + K_3 (\vec{n} \times (\vec{\nabla} \times \vec{n}))^2 \right) \\ F_{ferroparticles} &= \frac{fk_B T}{V} \ln f + f \frac{W}{a} (\vec{n} \cdot \vec{m})^2 - M_s f (\vec{m} \cdot \vec{H}) \\ F_{electric} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_a (\vec{n} \cdot \vec{E})^2 \\ F_{magnetic} &= -\frac{1}{2} \chi_a (\vec{n} \cdot \vec{H})^2 \\ F_{laser} &= -\frac{I(\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp})}{(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta)^{1/2}} \end{aligned} \quad (3)$$

در روابط بالا K_1 ها ثابت های کشسانی بلور مایع وابسته به تغییر شکل های گسترده و خمیده و پیچیده هستند. عبارت $q_0 = \frac{2\pi}{p_0}$ در جمله دوم انرژی کشسانی بلور مایع، ناشی از ساختار پیچشی فاز کلاستریک میزبان است، که در آن p_0 به عنوان گام کلاستریک تعریف می شود [۱۱]. V نشان دهنده حجم کل بلور، ϵ_{\parallel} و ϵ_{\perp} به ترتیب ثابت های دی الکتریکی موازی و عمود بر جهت نمای \mathbf{n} و $\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ ناهمسانگردی دی الکتریکی بلور مایع هستند. به همین ترتیب $\chi_a = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ ناهمسانگردی مغناطیسی بلور مایع را نشان می دهد که مقدار مثبت در نظر گرفته می شود. W چگالی انرژی سطحی، a قطر متوسط نانوذره فرومغناطیسی، f کسر حجمی نانوذرات فرومغناطیسی و \vec{M}_s مغناطش اشباع ذرات فرومغناطیسی است $I.(\vec{M}_s = M_s f \vec{m})$ نیز کمیت وابسته به چگالی حجمی انرژی الکترومغناطیسی پرتوی لیزر است. از معادله (۲) و محاسبه روابط بالا، چگالی انرژی آزاد کل به صورت زیر بدست می آید

$$F = \frac{1}{2}(K_1 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta)\theta^2 + \frac{1}{2} \cos^2 \theta (K_2 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta)\varphi^2 - K_2 q_0 (\cos^2 \theta)\varphi + \frac{K_2}{2} q_0^2 + \frac{f k_B T}{V} \ln f - \frac{I(\epsilon_{\perp} \epsilon_{\parallel})^{1/2}}{(\epsilon_{\perp} + \epsilon_a \sin^2 \theta)^{1/2}} + \frac{fW}{a} (-\cos\theta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma - \cos\theta \sin\varphi \sin\beta \sin\gamma) + \sin\theta \cos\gamma)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_a E^2 \sin^2 \theta - \frac{1}{2} \mu_0^{-1} \chi_a B^2 \sin^2 \theta - M_s f B \cos\beta \quad (4)$$

برای یافتن حالت پایدار سیستم، لازم است چگالی انرژی آزاد کل را کمینه کنیم. به این منظور از معادلات اوایلر-لاگرانژ استفاده می کنیم و شرایط مرزی هموتروپیک را روی دیواره های سلول به صورت $\theta(0) = \theta(d) = \frac{\pi}{2}$ اعمال می کنیم. ابتدا اولین معادله را بر حسب γ و $\dot{\gamma}$ می نویسیم،

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial F}{\partial \gamma} = 0 \quad (5)$$

با قرار دادن مقدار انرژی از رابطه (۴) و حل این معادله نتیجه $\varphi = \gamma$ حاصل می شود. این بدان معناست که در صورت اعمال همزمان میدان های مغناطیسی و الکتریکی و تاباندن پرتوی لیزر، زوایای سمتی امتداد جهت نمای \mathbf{n} و بردار گشتاور مغناطیسی نانوذره \mathbf{m} ، به یک اندازه تغییر می کنند. برای کمینه کردن انرژی بر حسب تغییرات سمت گیری گشتاور دوقطبی مغناطیسی، دومین معادله اوایلر-لاگرانژ را بر حسب β و $\dot{\beta}$ می نویسیم. اما قبل از آن، با جداسازی جملات وابسته به β در چگالی انرژی آزاد و ساده کردن آن به عبارت زیر می رسیم

$$F_{\beta} = -M_s f B \cos\beta + \frac{fW}{a} (-\cos\theta \cos^2 \varphi \sin\beta - \cos\theta \sin^2 \varphi \sin\beta + \sin\theta \cos\beta)^2 \quad (6)$$

که با توجه به کوچک بودن زاویه β خواهیم داشت

۳۸ / گذار فاز ساختاری ترکیب نانوذرات مغناطیسی و بلور مایع نماتیک، تحت اثر همزمان میدان‌های ...

$$F_{\beta} = -M_s f B \cos \beta + \frac{fW}{a} \sin^2 \theta \quad (7)$$

به این ترتیب، چگالی انرژی آزاد کل مستقل از β و β خواهد بود. کمینه کردن انرژی نسبت به φ و $\dot{\varphi}$ با استفاده از معادله اویلر-لاگرانژ و انتگرال گیری از آن نیز به نتیجه زیر می‌انجامد

$$\dot{\varphi} = \left(\frac{d\varphi}{dz} \right) = \frac{K_2 q_0}{K_2 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta} \quad (8)$$

حال با قرار دادن عبارت (۸) در رابطه (۴)، چگالی انرژی آزاد کل را بر حسب زاویه θ و $\dot{\theta}$ بدست می‌آوریم

$$F_{(\theta, \dot{\theta})} = \frac{1}{2} (K_1 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta) \dot{\theta}^2 - \frac{1}{2} \frac{K_2^2 q_0^2 \cos^2 \theta}{K_2 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta} \left(\frac{fW}{a} - \frac{1}{2} \mu_0^2 \chi_a B^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_a E^2 \right) \sin^2 \theta - M_s f B - \frac{I(\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel})^{1/2}}{(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta)^{1/2}} + \frac{f k_B T}{V} \ln f + \frac{K_2}{2} q_0^2 \quad (9)$$

با توجه به تعریف گذار سمت گیری، در نزدیکی نقطه گذار می‌توانیم فرض کنیم $\xi - \frac{\pi}{2} = \theta$ که در آن ξ زاویه کوچکی است. سپس تقریب‌های زیر را به کار می‌بریم

$$\cos \theta = \sin \xi = \xi, \quad \cos^2 \theta = \xi^2, \quad \sin^2 \theta = 1 - \xi^2, \quad \theta^2 = \xi^2 \quad (10)$$

و با قرار دادن این مقادیر در رابطه (۹)، چگالی انرژی آزاد کل بر حسب ξ و $\dot{\xi}$ به دست می‌آید

$$F_{(\xi, \dot{\xi})} = \frac{1}{2} (K_1 \cos^2 \theta + K_3 \sin^2 \theta) \dot{\xi}^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{K_2^2 q_0^2 \xi^2}{K_2 \xi^2 + K_3 (1 - \xi^2)} \right) \left(\frac{fW}{a} - \frac{1}{2} \mu_0^2 \chi_a B^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_a E^2 \right) (1 - \xi^2) - M_s f B - \frac{I(\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel})^{1/2}}{(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_a \sin^2 \theta)^{1/2}} + \frac{f k_B T}{V} \ln f + \frac{K_2}{2} q_0^2 \quad (11)$$

با توجه به $1 \ll \xi^2$ ، می‌توان از جملات با درجه بالاتر ξ^2 صرف نظر کرد. در این صورت عبارت فوق را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد

$$F_{(\xi, \dot{\xi})} \cong \frac{K_3}{2} (\dot{\xi})^2 - \frac{1}{2} \frac{K_2^2 q_0^2 \xi^2}{K_3} - A_1 \xi^2 - I \frac{\varepsilon_{\perp}^{1/2} \varepsilon_a}{2 \varepsilon_{\parallel}} \xi^2 + A_2 \quad (12)$$

$$A_1 = \left(\frac{fW}{a} - \frac{1}{2} \mu_0^2 \chi_a B^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_a E^2 \right)$$

که در آن A_2 شامل تمام جملات مستقل از ξ است.

همچنین با حل چهارمین معادله اویلر-لاگرانژ بر حسب ξ معادله زیر را به دست می‌آوریم

$$\ddot{\xi} + R^2 \xi = 0 \quad (13)$$

که در آن

$$R^2 = \left(\frac{K_2^2 q_0^2}{K_3} + \frac{2A_1}{K_3} \xi^2 - I \frac{\varepsilon_{\perp}^{1/2} \varepsilon_a}{2K_3 \varepsilon_{\parallel}} \right) \quad (14)$$

جواب این معادله به طور کلی به صورت زیر است

$$\xi_{(z)} = C_1 \sin(Rz) + C_2 \cos(Rz) \quad (15)$$

که ثابت‌های انتگرال‌گیری C_1 و C_2 را با توجه به شرایط مرزی $\xi(d) = \xi(0) = 0$ که نشان‌دهنده شرایط هموتروپیک بر روی دیواره‌های بلور مایع است، به دست می‌آوریم. با توجه به رابطه (۱۳) و استفاده از شرط مرزی $\xi(0) = 0$ ، $C_2 = 0$ و از شرط $\xi(d) = 0$ رابطه $R^2 = \frac{\pi^2}{d^2}$ حاصل می‌شود. حال با استفاده از عبارت $q = \frac{2\pi}{p}$ و پس از جایگذاری در رابطه (۱۴) و مرتب‌سازی، رابطه‌ای میان نسبت سلولی d/p ، شدت پرتوی لیزر فرودی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی اعمال شده در آستانه گذار، به دست می‌آوریم

$$\begin{aligned} & \frac{(d/p)^2}{(K_3^2/2K_2^2)} - \frac{B^2}{(K_3\pi^2/d^2\mu_0^{-1}\chi_a)} - \frac{E^2}{(K_3\pi^2/\varepsilon_0\varepsilon_a d^2)} + \frac{(\sqrt{I})^2}{(K_3\pi^2\varepsilon_{\parallel}/\varepsilon_{\perp}^{1/2}\varepsilon_a d^2)} \\ & = 1 - \frac{2fWd^2}{K_3\pi^2 a} \end{aligned} \quad (16)$$

که یک معادله‌هذلولی گون است. این معادله در واقع رفتار تیغه را در ناحیه گذار فروکلستریک فرونماتیک توصیف می‌کند. با استفاده از این معادله می‌توانیم سطوح جدایی فازهای هموتروپیک سلول نماتیک آمیخته به نانوذرات فرومغناطیسی و فازهای فروکلستریک آن را، در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و اپتیکی بیابیم.

۲-۲. تیغه بلور مایع کلستریک حاوی نانوذرات فرومغناطیسی با چنگ زدگی قوی

در این بخش، تیغه‌ای با همان شرایط تعریف شده در بخش ۲-۱ را در نظر می‌گیریم جز اینکه فرض می‌کنیم در غیاب میدان‌های خارجی، کسر همگن و یکسانی از نانوذرات مغناطیسی با گشتاورهای مغناطیسی در امتدادهای میانگین \vec{n} و $-\vec{n}$ داریم، شکل (ب). کسر حجمی نانوذرات با گشتاور مغناطیسی $\vec{M}_s = M_s v \vec{m}$ را که در جهت موازی و پادموازی با سمت‌گیری موضعی بلور مایع \vec{n} قرار گرفته‌اند به ترتیب با f_+ و f_- تعریف می‌کنیم [۱۲]. ملکول‌های بلور مایع فروکلستریک تمایل به سمت‌گیری در امتداد میدان‌های اعمال شده دارند. از طرفی، تحت شرایط چنگ زدگی قوی در سطح ذرات، بر اثر جفت‌شدگی بسیار قوی میان جهت‌نما و بردار واحد گشتاور مغناطیسی، \vec{n} و \vec{m} در یک امتداد قرار می‌گیرند. در این صورت چگالی انرژی آزاد کل به شکل زیر به دست می‌آید

۴۰ / گذار فاز ساختاری ترکیب نانوذرات مغناطیسی و بلور مایع نماتیک، تحت اثر همزمان میدان‌های ...

$$F = \frac{1}{2} (K_1 \dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + K_2 q_0^2 + K_3 \dot{\theta}^2 \sin^2 \theta) + \frac{k_B T}{V} (f_+ \ln f_+ + f_- \ln f_-) - \frac{1}{2} \mu_0^{-1} \chi_a B^2 \sin^2 \theta - M_s (f_+ - f_-) \mu_0^{-1} B \sin \theta - \frac{l(\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp})^{\frac{1}{2}}}{(\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_o \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{2} \varepsilon_o \varepsilon_o E^2 \sin^2 \theta$$

با فرض $f_+ + f_- = 1$ و کمینه کردن چگالی انرژی آزاد کل نسبت به کسر حجمی نانوذرات f_+ و f_- خواهیم داشت

$$f_{\pm} = \frac{1}{2} \exp\left(\pm \frac{2M_s \mu_0^{-1} v B}{k_B T} \sin \theta(z)\right)$$

به این ترتیب می‌توانیم علاوه بر تعیین نواحی گذار متناظر به شرایط چنگ‌زدگی‌های ضعیف (با روند کاملاً مشابه با بخش ۲-۱)، با تعیین تغییرات $(f_+ - f_-)$ بر حسب زاویه انحراف جهت نما، اثر میدان‌های خارجی اعمال شده بر توزیع نانوذرات را نیز بررسی کنیم.

۳. نتایج و بحث

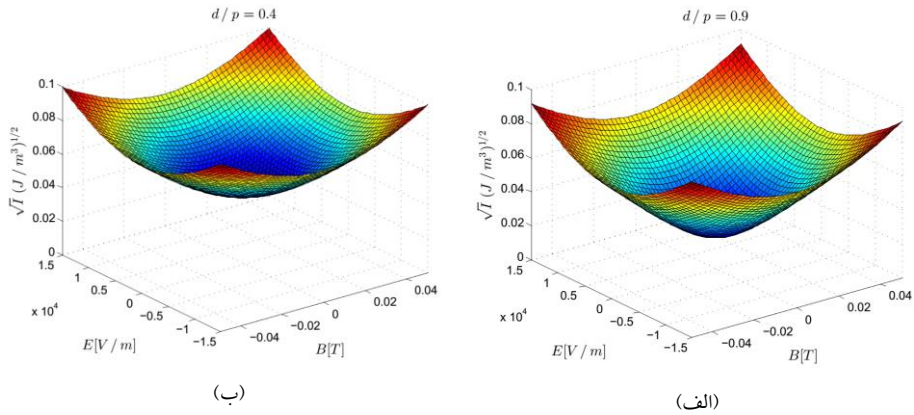
اکنون با استفاده از مقادیر نوعی داده شده در

جدول ۱-۱ اهدلولی‌گون به دست آمده توسط معادله (۱۶) را رسم می‌کنیم.

جدول ۱-۱ مقادیر نوعی مورد استفاده در شبیه‌سازی گذار ساختاری بلور مایع فروکلستریک-فرونماتیک

$K_1 = 17.2 \times 10^{-12} N$	$K_2 = 7.51 \times 10^{-12} N$	$K_3 = 17.9 \times 10^{-12} N$
$\varepsilon_{\parallel} = 2.89$	$\varepsilon_{\perp} = 2.25$	$\varepsilon_a = 0.64$
$W = 5 \times 10^{-10} N/m$	$\chi_a = 7 \times 10^{-12}$	$a = 3 \text{ nm}$

ابتدا تیغه‌ای به ضخامت $400 \mu m$ ، پر شده با بلور مایع آمیخته با نانوذرات مغناطیسی با کسر حجمی معادل $f = 10^{-3}$ در نظر می‌گیریم و به ازای مقادیر معین نسبت سلولی d/p که از مشخصات هندسی مسئله است، نمودار \sqrt{I} را بر حسب دو متغیر دیگر، یعنی تغییرات شدت میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی خارجی رسم می‌کنیم. به این ترتیب، نمودار سه‌بُعدی در مختصات \sqrt{I} و E و B برای گام‌های مختلف، با شرایط چنگ‌زدگی قوی روی دیواره‌های سلول و چنگ‌زدگی ضعیف روی سطح نانوذرات، به دست می‌آید (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار سه بعدی در مختصات \sqrt{I} و B و E برای گذار فاز فرو کلستریک-فرونماتیک برای دو نسبت سلولی متفاوت، به ازای $f = 10^{-3}$ ، (الف) با گام $444 \mu m$ ، (ب) با گام $1000 \mu m$.

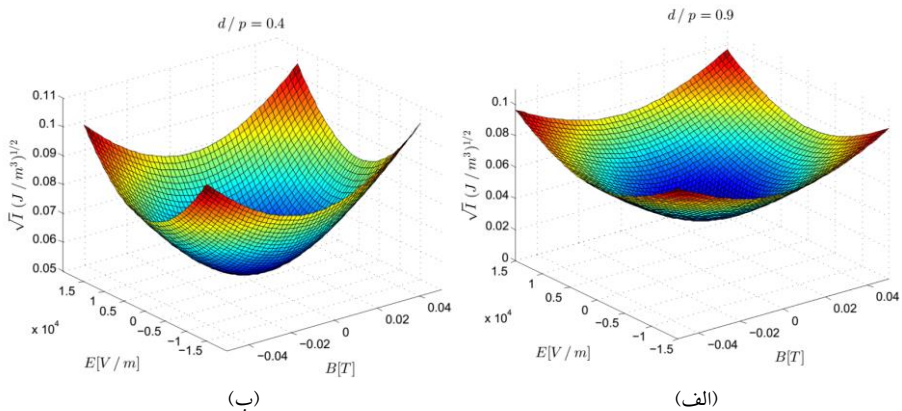
نمودارهای سه بعدی حاصل، در حقیقت نمودار فازی وابسته به پایداری حالت هموتروپیک سلول را نشان می دهند و سطح آن ها مرز گذار فرو کلستریک-فرونماتیک و وضعیت تعادلی موضعی سیستم را مشخص می کند. ناحیه بالای سطوح، فضای فاز فرونماتیک و ناحیه پایین، فضای فاز فرو کلستریک را نشان می دهد. مشاهده می شود همان گونه که انتظار می رفت با توجه به شرایط مرزی هموتروپیک و ناهمسانگردی های مثبت، به ازای گام های بزرگتر، در رقابت با اثر میدان های مغناطیسی و الکتریکی خارجی، گذار در مقادیر بزرگتری از شدت لیزر رخ می دهد. در حضور همزمان میدان های الکتریکی و مغناطیسی و اپتیکی غیر صفر، در شرایطی که ناهمسانگردی های الکتریکی و مغناطیسی هر دو مثبت باشند، با توجه به امتداد میدان های اعمالی (شکل ۲)، میدان های الکتریکی و مغناطیسی خارجی اثر سمت گیری مخالف با میدان پرتوی لیزر فرودی خواهند داشت. لذا، میدان های لیزر در مقابله با اثر میدان های خارجی برای برقراری سمت گیری هموتروپیک همگن، سعی در حفظ فاز فرو کلستریک می کنند.

همچنین به منظور بررسی اثر ناشی از تغییر کسر حجمی نانوذرات، نمودارهای فوق را به ازای گام های مختلف، برای همین تیغه اما با $0/1$ کسر حجمی نمونه قبلی ($f = 10^{-4}$) رسم می کنیم (شکل ۴).

از مقایسه شکل های ۳ و ۴ ملاحظه می شود که کاهش تراکم نانوذرات در نسبت های سلولی کوچکتر تأثیر بیشتری داشته و به تغییر شدت لیزر و میدان های آستانه گذار می انجامند، شکل های ۳ (ب) و ۴ (ب). این تغییرات، به ازای تراکم های کمتر، را می توان به اختلال های ناشی از حضور

۴۲ / گذار فاز ساختاری ترکیب نانوذرات مغناطیسی و بلور مایع نماتیک، تحت اثر همزمان میدان‌های ...

نانوذرات در نظم سمت‌گیری محیط بلور نسبت داد. به‌ویژه از مقایسه شکل‌های ۴(الف) و ۳(ب) ملاحظه می‌شود که اثر تراکم نانوذرات به نوعی با اثر نسبت سلولی و تغییر گام سلول وابسته است، به طوری که به ازای گام‌های کوچکتر با درصد حجمی کمتر ذرات، شکل ۴(الف)، انتظار داریم این گذار ساختاری با استفاده از تابش نور لیزری رخ دهد که دارای شدتی معادل حالتی است که در سلولی با تراکم بیشتر ذرات اما گام بزرگتر، شکل ۳(ب)، مورد نیاز است.



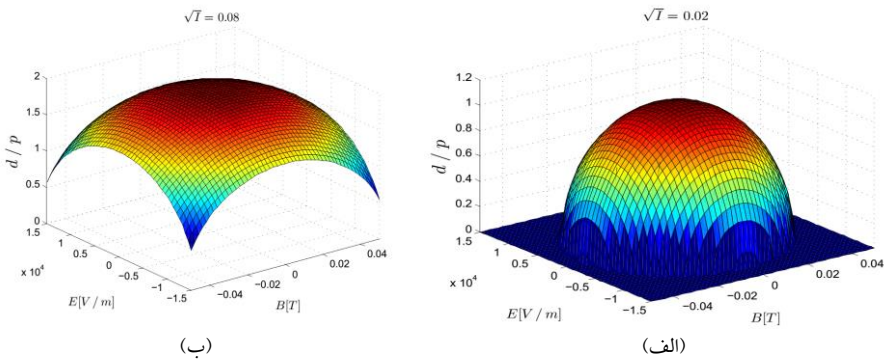
شکل ۴. نمودار سه‌بعدی در مختصات \sqrt{I} و B و E برای گذار فاز فروکلستریک فرونماتیک به ازای $f = 10^{-4}$ (الف) با گام $444 \mu\text{m}$ (ب) با گام $1000 \mu\text{m}$.

چنانچه هر دو ناهمسانگردی الکتریکی و مغناطیسی منفی باشند، حضور میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی خارجی به تقویت اثر میدان‌های لیزر می‌انجامد. برای این وضعیت به ازای شدت خاص پرتو لیزر، نمودار تغییرات d/p را بر حسب E و B ، تحت همان شرایط اولیه، رسم می‌کنیم.

فاز پایدار شده فروکلستریک را نشان می‌دهد. با افزایش شدت پرتو لیزر، تحت شرایط ناهمسانگردی‌های منفی الکتریکی و مغناطیسی، حضور همزمان میدان‌های خارجی و لیزر منجر به ناپایداری این فاز و افزایش نسبت سلولی تیغه خواهد شد (شکل ۵(ب)).

سطح حاصل از این نمودارها که تعیین‌کننده سطح جدایی فازهای فروکلستریک و فرونماتیک هوموتروپیک است، اهمیت نسبت سلولی را در رخ دادن گذار آشکار می‌کنند. از نمودار به دست آمده در شکل ۵، می‌توان نسبت سلولی بحرانی را برای یک سلول بلور مایع آمیخته با نانوذرات مغناطیسی مشخص کرد. به علاوه، درمی‌یابیم که با افزایش شدت پرتوی لیزر، مقدار نسبت سلولی که در نزدیکی آن گذار رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد. مقادیر نسبت سلولی کوچکتر

از یک نیز بیانگر این حقیقت است که شرط رخ دادن چنین گذاری داشتن گام‌های بزرگ است یا عملاً تنها برای تیغه‌های دارای ضخامت‌های کمتر از گام فاز کلستریک می‌تواند رخ دهد. اما با توجه به نتیجه حاصل برای شدت‌های بزرگتر نور لیزر تاییده به تیغه (شکل ۵ (ب))، این گذار ساختاری ممکن است به ازای نسبت‌های سلولی بزرگتر از یک نیز رخ دهد. به این معنا که در صورت تاباندن نور لیزری با شدت‌های زیاد، وقوع چنین گذاری برای تیغه‌های ضخیم با ضخامت‌های بیشتر از گام فاز کلستریک نیز امکان‌پذیر خواهد بود. بنابراین، پارامتر نسبت سلولی تعریف شده و شدت نور لیزر تاییده، فاکتورهای مهم و کلیدی در وقوع چنین گذارهای ساختاری هستند.

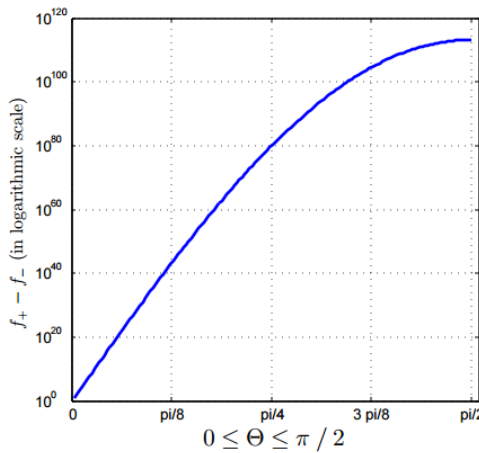


شکل ۵. نمودار سه‌بعدی در مختصات d/p و B و E برای (الف) شدت $I = 0.4 \times 10^{-3} \left(\frac{W}{m^2}\right)$ (ب) شدت $I = 6.4 \times 10^{-3} \left(\frac{W}{m^2}\right)$

حال به بررسی نتایج برای شرایط چنگ‌زدگی قوی بر روی سطوح ذرات با توزیع اولیه یکنواخت نانوذرات در سرتاسر حجم می‌پردازیم. تحت این شرایط و با فرض کوچک بودن اثر میدان‌های مغناطیسی ناشی از خود ذرات (بخش ۲-۲)، اعمال میدان‌های خارجی به ناپایداری سیستم در آستانه گذار می‌انجامد. برای چنین حالتی تغییرات $(f_+ - f_-)$ را بر حسب زاویه انحراف جهت‌نما رسم می‌کنیم (شکل ۶).

همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار $(f_+ - f_-)$ را به ازای $\theta = \frac{\pi}{2}$ خواهیم داشت. بدیهی است اعمال میدان‌ها به واپیچش بلور مایع و افزایش زاویه انحراف جهت‌نما از جهت‌گیری اولیه و موقعیت محور آسان (عمود بر سطح دیواره‌ها) می‌انجامد و این واپیچش در ناحیه میانی سلول بیشترین مقدار خود را دارد. در شرایط چنگ‌زدگی قوی، نانوذرات از انحراف جهت‌نما تبعیت می‌کنند و اثر جفت‌شدگی نانوذرات و ملکول‌های بلور مایع و همچنین اثر میدان‌ها، در ناحیه میانی

بر اثر انرژی سطحی ناشی از دیواره‌های سلول غالب می‌شود. لذا بیشترین انحراف نانوذرات و تمایل به همسویی با میدان‌های خارجی نیز مربوط به این ناحیه خواهد بود. در حقیقت، ذرات در ناحیه‌ای از تیغه که انرژی کل کمینه می‌شود متراکم می‌شوند و در هندسه مطرح شده، این ناحیه میانی که اثر میدان‌ها بیش از اثر انرژی سطحی است ملکول‌ها و به تبع آن‌ها نانوذرات تحت تأثیر میدان‌ها بیشترین انحراف را خواهند داشت در حالی که در نواحی نزدیک به دیواره‌ها که اثر انرژی سطحی غالب است ملکول‌ها تمایل به حفظ شرایط اولیه هموتروپیک دارند.



شکل ۶. نمودار تغییرات $(f_+ - f_-)$ بر حسب زاویه θ .

این نتایج در طراحی و کارکرد اسباب مغناطیو-پتیک و دستگاه‌هایی با پایه بلور مایع آمیخته به نانوذرات مغناطیسی، به ویژه در صنعت نمایشگرها بسیار سودمند خواهد بود. همچنین، با توجه به حوزه‌های تحقیقاتی جدید در زمینه نانو ساختارها [۳، ۱۲، ۷]، این موضوع علاوه بر جنبه‌های نظری آن، اهمیت ویژه‌ای در حیطه تجربی در حوزه فناوری نانو خواهد داشت.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر حضور همزمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و پرتوی لیزر را بر سمتگیری میدان جهت‌نمای بلور مایع فروکلستریک با ناهمسانگردی‌های دی‌الکتریکی مثبت و منفی تحلیل کردیم. شرایط مرزی روی دیواره‌ها، هموتروپیک قوی و شرایط چنگ‌زدگی روی سطح نانوذرات ابتدا ضعیف و محدود، سپس با حالت خاص قوی، فرض شدند.

با استفاده از معادلات اویلر-لاگرانژ رابطه‌ای میان شدت پرتوی لیزر و شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بحرانی و نسبت سلولی بحرانی در گذار از بافت کلستریک مانند به بافت نماتیک مانند یافتیم. با رسم نمودارهای فازی در صفحه مختصات (d/p) و E و B و (\sqrt{I}) سطوحی هذلولی گون حاصل شدند که بر اساس آن‌ها موفق به تحلیل رفتار گذار ساختاری بلور مایع فروکلستریک-فرونماتیک، به صورت تابعی از نسبت سلولی شدیم. نتیجه گرفتیم با افزایش گام و با توجه به شرایط اولیه هموتروپیک قوی سلول، گذار فاز فروکلستریک-فرونماتیک به ازای میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و میدان اپتیکی بزرگتری رخ می‌دهد و انرژی بیشتری برای رخ دادن چنین گذاری لازم است. همچنین اهمیت و اثر مقادیر مختلف نسبت سلولی در وقوع گذار ساختاری برای شرایط ناهمسانگردی‌های مثبت و منفی تحلیل و بررسی شد. این نتایج در بهینه‌سازی صنایع الکترو-و مغناطو-اپتیکی وابسته به بلورهای مایع نانوکلوئیدی تأثیر فراوانی دارند.

مراجع

- [1] S. Shoarinejad and A. Sadeghisahbaz, Mol.Liq.,220, 1033, 2016.
- [2] D. Petrov and A. Zakhlevnykh, Mol.Crys.Liq.Crys., 557, 60, 2012.
- [3] S. Shoarinejad and M. Ghazavi, Soft Materials, 15, 2, 173, 2017.
- [4] P. De Gennes and J. Prost, "The physics of liquid crystals," Oxford University Press, New York, 1994.
- [5] I. Dierking, Textures of liquid crystals: John Wiley & Sons, 2006.
- [6] D. Andrienko, "Introduction to liquid crystals," IMPRS school, Bad Marienberg, 2006.
- [7] E. Petrescu and E.-R. Bena, J. Magn.Magn. Mater., 320, 299, 2008.
- [8] C. Cirtoaje, C. Motoc, and E. Petrescu, U.P.B. Sci. Bull, Series A, 73,125, 2011.
- [9] E. Petrescu and E.-R. Bena, J. Magn. Magn. Mater., 6, 4, 2007.
- [10] E. Petrescu and C. Motoc, J. Magn. Magn. Mater., 234, 142, 2001.
- [11] E. Petrescu, E.-R. Bena, C. Cartoaje, and A. L. Paun, U.P.B. Sci. Bull, Series A, 70, 77, 2008.
- [12] S. Shoarinejad and D. Naseri, Iranian Journal of physics, 12, 1, 2012.
- [13] C. Cirtoaje, U.P.B. Sci. Bull, Series A, 76, 187, 2014.