

01.04.00 - ФИЗИКА
01.04.00 - ФИЗИКА
01.04.00 - PHYSICS

01.04.07 Физикаи ҳолатҳои конденсӣ
01.04.07 Физика конденсированного состояния
01.04.07 Physics of condensed state

УДК – 530.1
ББК – 22.317
Р 27

**УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТА
ТЕМПЕРАТУРЫ В КАПЛЯХ НЕМАТИКА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКОГО
НАПРЯЖЕНИЯ**

Рахимова Умедахон Джурабоевна - старший преподаватель кафедры информационно-коммуникационных технологий и программирования ТГУПБП (Таджикистан, Худжанд), e-mail: rakhimova0508@mail.ru.

**ШАРОИТИ ТАШАККУЛИ БУЗУРГИИ
ҲАРОРАТ ДАР ҚАТРАҲОИ НЕМАТИКӢ,
ЗЕРИ ТАЪСИРИ ШИДДАТҲОИ
МЕХАНИКӢ**

Рахимова Умедахон Ҷӯрабоевна - муаллими калони кафедраи технологияҳои иттилоотӣ ва барномарезии ДДҲБСТ (Тоҷикистон, Хучанд), e-mail: rakhimova0508@mail.ru.

**CONDITIONS FOR THE FORMATION OF A
TEMPERATURE GRADIENT IN NEMATIC
DROPLETS UNDER THE ACTION OF
MECHANICAL TENSION**

Rahimova Umedakhon Juraboevna - Senior Lecturer of the of Information and Communication Technologies and Programming Department under the Tajik State University of Law, Business and Politics, e-mail: rakhimova0508@mail.ru.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, переориентация, жидкокристаллический слой, градиент температуры, теплопроводность, поля директора.

Предложен альтернативный способ формирования градиента температуры в ЖК слое под влиянием сдвигового напряжения, при котором на одной из поверхностей подложки температура поддерживается постоянной, а на другой, противоположной подложке, допускается полная термическая изоляция. Предлагаемый механизм может быть применен в основу наносенсоров или нанодатчиков, преобразующую механическую энергию в градиенты температуры.

Вожаҳои калидӣ: кристалли моеъи нематикӣ, ориентатсия, қабати кристалли моеъ, градиенти ҳарорат, гузаронандагии гармидиҳӣ, майдони директорӣ

Дар мақолаи мазкур усули алтернативӣ, ба рои ташаққули градиенти ҳарорат дар қабати кристалли моеъ бо таъсири фишори буриши пешинҳод карда мешавад, ки дар яке аз тарфҳои субстрат ҳарорат муътадил нигоҳ дошта мешавад ва дар тарафи дигари он бошад, гармидиҳии пурра ҷозат дода мешавад. Механизми пешинҳодишударо метавон дар асоси наносенсорҳо ё нанодатчиқҳо истифода бурд, ки он энергияи механикиро ба градиентҳои ҳарорат табдил медиҳад.

Key words: nematic liquid crystal, reorientation, liquid crystal layer, temperature gradient, heat conductivity, director fields.

An alternative method is offered for the formation of a temperature gradient in LC layer by the effect of shear tension, at which the temperature is kept constant on one of the surfaces of the substrate, and complete thermal insulation is allowed on the other, opposite to the substrate. The proposed mechanism can be applied to the basis of nanosensors or nanomonitor, which converts mechanical energy into temperature gradients.

Элементной базой большинства оптоэлектронных устройств (датчики, сенсоры, переключатели и т.д.) являются капли нематических жидких кристаллов (НЖК), диспергированные в микрообъемах полимерной матрицы [1]. Для того, чтобы управлять такими каплями, в основном используют внешние поля (электрические, магнитные, механические или акустические). Существует также альтернативный способ, позволяющий транспортировать микроскопические капли ЖК за счет взаимодействия разности температуры и поля директора (преимущественная ориентация молекул ЖК). Для этого необходимо создавать такую систему, чтобы ориентация молекул ЖК в одной из ограничивающих твердой подложке была нормальная, а в противоположной подложке – тангенциальная. Такая разновидность жидкокристаллических систем составляет основу большинства сложных сенсоров и датчиков, поэтому возможность управления такими системами посредством создания градиентов температуры обеспечивает открытие новых направлений в оптоэлектронике и фотонике.

В настоящей работе предлагается альтернативный способ формирования градиента температуры в ЖК слое влиянием механического напряжения, направленного к верхней твердой прозрачной подложке (стеклянная пластина). Главной задачей исследования было изыскать способ формирования разницы температуры в исходном однородно нагретом жидкокристаллическом слое под влиянием механического напряжения, действующего к верхней подложке. Решение данного вопроса мы попытались получить с помощью классической теории Эриксона-Лесли [2,3] принимая во внимание минимум энергии сцепления для двухкомпонентных систем. Предпосылкой для постановки вопроса служил следующий температурный режим, при котором на одной из поверхностей стеклянной подложки температура поддерживается постоянной ($T_{ниж}=const$), а на противоположной подложке, повышается температура. Следовательно, градиент температуры $\Delta T = T_{верх} - T_{ниж}$, имеющий нулевое значение в начале, может привести к выполнению минимума термодинамической энергии Гиббса со значением, соответствующем диапазону существованию нематической фазы ($297,5 \leq T \leq 308,6$ К) исследуемого ЖК. Этот подход записывается как механизм формирования градиента температуры поперек жидкокристаллического слоя под действием сдвигового напряжения σ_{zx}^0 , который приложен к верхней стеклянной подложки

$$(\sigma_{zx})_{z=1} = \sigma_{zx}^0 \quad (1)$$

в то время как в нижней подложке поддерживается постоянная температура

$$T_{z=0} = T_1 \quad (2)$$

а в верхней подложке, допускается полная или частичная термическая изоляция:

$$-\lambda_{\perp} \left(\dot{T}_z \right)_{z=1} = Q_0 \quad (3)$$

Здесь $\dot{T}_z = \frac{\partial T}{\partial z}$, λ – коэффициент теплопроводности ЖК слоя в направлении перпендикулярном направлению директора, Q_0 – тепловой поток через верхнюю подложку ЖК слоя. С учетом того, что толщина ЖК слоя изменяется в пределах микрона, можем предполагать, что плотность ЖК слоя между подложками постоянна ($\rho = const$). Следовательно, можем считать, что для нашего объекта исследования выполняется следующее условие несжимаемости

$$v_{x,x}(z,t) + v_{z,z}(z,t) = 0 \quad (4)$$

где v_x и v_z составляющие вектора скорости по осям цилиндрической координаты $v(z,t) = v_x(z,t)i + v_z(z,t)k$. Предположим, что скольжение между слоями на нижней подложки отсутствует, тогда условие (4) можно записать в виде

$$(v_x(z,t))_{z=0} = 0, \quad (v_z(z,t))_{z=0} = 0 \quad (5)$$

что свидетельствует о существовании только гидродинамического потока, направленного параллельно подложкам $v(z,t) = v_z(z,t)i = u(z,t)i$. В таком случае, граничное условие для поля директора принимает более приемлемый вид

$$\theta_{z=0} = 0, \quad \theta_{z=1} = \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Необходимо подчеркнуть, что при отсутствии внешних факторов устанавливается линейное распределение поля директора $\theta(z) = \frac{\pi}{2} \cdot z$ по всей площади ЖК слоя. Под влиянием сдвигового напряжения, действующего к верхней подложке с нормальной структурой молекул, в ЖК системе может формироваться баланс углового момента импульсов, действующий на единицу объема жидкокристаллической фазы. С учетом начальных условий баланс угловых моментов принимает следующий вид [4]

$$\gamma_1(\chi)\dot{\theta}_\tau - A(\theta)\dot{u}_z - (\dot{Y}(\theta)\dot{\theta}_z)_z + \frac{1}{2} \cdot Y_0(\theta) \cdot \dot{\theta}_z^2 + \delta_1 \cdot \dot{\theta}_z \cdot \dot{\chi}_z \cdot \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \theta \right) = 0 \quad (7)$$

здесь $\chi(z, \tau) = \frac{T(z, \tau)}{T_{NI}}$ - отношение температуры ЖК слоя к температуре перехода; $\gamma_1 = \frac{\bar{\gamma}}{\gamma_{10}}$ - коэффициент вращательной вязкости; T_{NI} - значение температуры, соответствующее диапазону (переходу) нематик - изотропная жидкость; $A(\theta) = \frac{\bar{A}(\theta)}{K_{10}}$ и $Y(\theta) = \frac{\bar{Y}(\theta)}{K_{10}}$ - безразмерные функции полярного угла θ ; γ_{10} и K_{10} - максимальные значения коэффициентов γ_1 и K_1 в интервале температур, соответствующих нематической фазе;

$$\bar{A}(\theta) = \frac{1}{2} \cdot (\gamma_1 - \gamma_2 \cdot \cos 2\theta),$$

$$\bar{Y}(\theta) = K_1 \cdot \sin^2 \theta + K_3 \cdot \cos^2 \theta$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты упругости Франка, соответствующие поперечным и продольным деформациям; γ_i ($i=1,2$) - коэффициенты вращательной вязкости; $\tau = \frac{K_{10}}{\gamma_{10} \cdot d^2}$, t - безразмерное

время. Здесь $\delta_1 = \xi \frac{T_{NI}}{K_{10}}$ - параметр ЖК системы.

В нашем случае первые два компонента в уравнении (7) описывают долю вязкой силы, а две последующие компоненты - долю упругой силы в баланс моментов действующих на единицу объема ЖК слоя. Последняя компонента представляет собой вклад термомеханической силы в баланс моментов [4]. Тогда уравнения баланса импульсов и энтропии принимают следующий вид

$$\delta_2 \dot{u}_\tau(z, \tau) = \sigma_{zx,z} \quad (8)$$

$$\dot{P}_z(z, \tau) + \frac{\delta P}{\delta \theta} \cdot \dot{\theta}_z = 0 \quad (9)$$

$$\delta_{3\chi,\tau}(z, \tau) = \left[\dot{\chi}_z (\lambda \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \right]_z + \delta_4 \cdot \left[\chi \dot{\theta}_z \left(\dot{\theta}_\tau \cdot \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \theta \right) - \frac{3}{2} \cdot \dot{u}_z \cdot \sin^2 \theta \right) \right] \quad (10)$$

Здесь $\delta_2 = \frac{\rho K_{10}}{\gamma_{10}^2}$, и - дополнительные три параметра ЖК системы;

, C_p - коэффициент теплоемкости ЖК фазы; коэффициент $\xi = 10^{-12}$ Дж/моль·К - термомеханическая постоянная [5]. Тогда выражение для тангенциальной компоненты тензора напряжений σ_{zx} принимает следующий вид:

$$\text{[input type="text"]} \quad (11)$$

где $R = \frac{\gamma_{10} d^4}{K_{10}^2} \cdot \bar{R}$ - полная диссипационная функция Релея [4], которая в совокупности складывает следующие компоненты:

$$R = R_{vis} + R_{im} + R_{th}$$

где

- компонента вязкости,

- термомеханическая компонента,

- термическая компонента в диссипационной функции Релея соответственно.

В уравнении (9) $P(z, \tau) = \frac{d^2}{K_{10}} P(z, \tau)$ - это гидростатическое давление в ЖК слое, которое

состоит из двух компонентов: вязкой части, определяемого величиной и упругой части, определяемого потенциалом Франка .

Следовательно, образование разницы температуры по площади ЖК слоя, в котором выполняется поставленные условия задачи для данной работы, интерпретируется системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (7) – (10). Этим уравнениям соответствуют граничные условия для поля температуры в виде

$$\left[\text{input type="text"} \right], \quad \left[\text{input type="text"} \right] \quad (12)$$

и для поля директора в виде

$$\theta_{r=0} = 0, \quad \theta_{z=1} = \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

В этих условиях величина $q_0 = -\frac{Q_0 d}{T_{NI} \lambda_{\perp}}$ - означает формирование теплового потока в верхней

стеклянной подложке ЖК слоя. Для наших опытов между двумя подложками были внедрены нематический ЖК из класса цианобифенилов (4-*n*-пентил-4'-цианобифенил), (5ЦБ), имеющий $\Delta\varepsilon < 0$, у которого температурный интервал существования нематической фазы охватывает диапазон $297,5 \leq T \leq T_{NI} \leq 308,6$ К. Для такого интервала температур мы получили расчетные величины параметров $\delta_1 = 24$; $\delta_2 = 2 \cdot 10^{-6}$; $\delta_3 = 6 \cdot 10^{-4}$ и $\delta_4 = 10^{-10}$ соответственно. Поэтому, учитывая, что $\delta_i < 1$, уравнения (8), а также уравнения теплопроводности (10) упрощаются и принимают следующий вид

$$h(\theta) \cdot \dot{u}_z - A(\theta) \cdot \dot{\theta}_r - \frac{3}{2} \cdot \delta_1 \dot{\chi}_z \cdot \dot{\theta}_z \sin^2 \theta = \sigma_{zx}^0 \quad (14)$$

$$\left[\dot{\chi}_z (\lambda \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \right]_z = 0 \quad (15)$$

Уравнения (15) показывает, что градиент температуры, формирующийся по плоскости ЖК слоя, пропорционален тепловому потоку q_0 через верхнюю границу подложки

$$\dot{\chi}_z(z) = \frac{q_0}{\lambda \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta} \quad (16)$$

Уравнение (16) показывает, что в ЖК среде, ограниченной двумя прозрачными подложками с термически изолированной верхней границей градиент температуры отсутствует. Поэтому, вся механическая энергия сдвигового напряжения распределяется таким способом, что в ЖК слое формируется только гидродинамический поток, направленный вдоль нижней подложки. Такой поток вызывает переориентацию поля директора по всему объему. В случае, когда верхняя граница ЖК слоя частично изолирована от температуры, по всей площади организуется градиент температуры, величина которого строго зависит от величины теплового потока. Однако, направление такого параметра будет зависеть от того, в какую сторону направлен тепловой поток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sparreboom W., Van den Berg A., Eijkel J.C.T. /New. J. Phys. 2010, v.12, p.0115004
2. Ericksen J.L. Hydrostatic theory of liquid crystals. /Arch. Rat. Mech. Anal. 1961, No 9.- p. 371-378

3. Leslie F.M. Introduction to nematodynamics, in Physical Properties of Liquid crystals: Nematics, Eds. D. Dummer, A. Fukuda, G. Luckhurst, INSPEC, 2001. – p. 377-386
4. Захаров А.В., Вакуленко А.А. Аномальные процессы переориентации в гибридно-ориентированных жидкокристаллических ячейках под действием градиента температуры. /Физика твердого тела, 2008, том 50, вып.10.-с. 1906-1914
5. Akopyan R.S., Alaverdian R.B., Santrosian E.A., Chilingarian Y.S. Thermo mechanical effects in the nematic liquid crystals /J. Appl. Phys. 2001,v.90. – p. 3371-3376

REFERENCES

1. Sparreboom W., Van den Berg A., Eijkel J.C.T. /New. J. Phys. 2010, v.12, p.0115004
2. Ericksen J.L. Hydrostatic theory of liquid crystals. /Arch. Rat. Mech. Anal. 1961, No 9.- p. 371-378
3. Leslie F.M. Introduction to nematodynamics, in Physical Properties of Liquid crystals: Nematics, Eds. D. Dummer, A. Fukuda, G. Luckhurst, INSPEC, 2001. – p. 377-386
4. Zakharov A.V., Vakulenko A.A. Abnormal reorientation processes in hybrid-oriented liquid crystal cells under the influence of a temperature gradient. / Solid State Physics, 2008, volume 50, issue 10.- p. 1906-1914
5. Akopyan R.S., Alaverdian R.B., Santrosian E.A., Chilingarian Y.S. Thermo mechanical effects in the nematic liquid crystals /J. Appl. Phys. 2001,v.90. – p. 3371-3376