УДК 537.9+539.6

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-51-59

К МЕТОДИКЕ ИЗУЧЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Геворкян Э. В., Хотькин С. О.

Московский государственный областной университет

141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская Федерация

Аннотация. Представлена методика измерения оптического пропускания в скрещенных поляризаторах слоя нематического жидкого кристалла при воздействии на него вращающегося магнитного и переменного электрического полей. Рассмотрено поведение нематического жидкого кристалла в таких полях. Создана экспериментальная установка, реализующая методику, в которой вращающееся магнитное поле создается между двумя «неодимовыми» (из NdFeB (неодим-железо-бор)) дисками, закрепленными на вращающейся платформе. Приведены результаты измерений оптического пропускания в ЖК-1289, а также оценки однородности магнитного поля между дисками.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл, вращающееся магнитное поле, переменное электрическое поле, динамика директора, анизотропия диамагнитной восприимчивости, анизотропия диэлектрической проницаемости

A METHOD FOR INVESTIGATING THE BEHAVIOR OF LIQUID CRYSTALS IN VARIABLE ELECTROMAGNETIC FIELDS

E. Gevorkyan, S. Khotkin

Moscow Region State University

ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow Region, Russian Federation

Abstract. We present a method for measuring optical transmission in crossed polarizers of a nematic liquid crystal layer under the action of rotating magnetic and variable electric fields. The behavior of a nematic liquid crystal in such fields is considered. An experimental setup implementing the method is designed, where the rotating magnetic field is generated between two NdFeB (neodymium–ferrum–borum) disks installed on a rotating platform. The measurement results of the optical transmission in LC-1289 and the estimates of homogeneity of the magnetic field between the disks are presented.

Keywords: nematic liquid crystal, rotating magnetic field, variable electric field, director dynamics, diamagnetic susceptibility anisotropy, permittivity anisotropy

Введение

Одним из уникальных свойств жидких кристаллов (ЖК) является наличие вращательной вязкости при вращении директора (единичного вектора, задающего направление преимущественной ориентации молекул). Наиболее эффективным методом изучения динамики директора считается метод вращающегося магнитного поля [1; 2]. Однако у него имеется ряд недостатков и трудностей, преодолеть которые удаётся с помощью более сложного, конического магнитного поля [3; 4].

Использование комбинации двух магнитов: статического и вращающегося для конического поля даёт малую область однородности поля. Вращение одного магнита вокруг оси, не ортогональной полю и несовпадающей с главной осью инерции магнита, также практически неудобно. Экспериментальная, практическая реализация такого магнитного поля осуществляется, например, с помощью специальных сменных наконечников для вращающегося магнита [5]. В этом случае доступен только ограниченный дискретный набор углов конуса поля. Область однородности поля также невелика. При этом для акустического или оптического зондирования динамики директора приходится делать отверстия в магните.

Как электрическое, так и магнитное поле в отдельности широко используются для ориентации жидких кристаллов. Однако работ, в которых оба этих ориентирующих фактора используются совместно, даже в простейшем статическом случае, очень мало [6–12].

Альтернативный подход, использованный нами в представленной ниже экспериментальной установке, состоит в применении комбинации вращающегося магнитного и переменного электрического полей для жидких кристаллов с положительной анизотропией диэлектрической проницаемости. Ячейка с жидким кристаллом находится между полюсами вращающегося магнита, а переменное электрическое поле подаётся непосредственно на прозрачные проводящие поверхности ЖК-ячейки.

Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена блок-схема установки, созданной для реализации предложенной методики.

1. Диск из NdFeB (неодим-железо-бор) $\varnothing 70$ мм и $h = 30$ мм в обойме из алюминия $\varnothing 130$ мм и $h = 30$ мм.
2. Шаговый двигатель марки ASTROSYN, 6-ти проводной с шаговым углом 1,8 градуса с током фазы до 1,6А.
3. Фотоприёмник в алюминиевом корпусе, собранный на базе фотодиода BPW20RF с диапазоном длин волн 550-1040 нм.
4. Вращающий механизм.
5. Генератор ГСС-120 с диапазоном частот 1 мкГц–120 МГц.
6. Четырёхканальный регистратор К8047.
7. Программируемый контроллер шаговых двигателей SMSD-1.5.
8. Компьютер.
9. Лазерный модуль DSL6505-0921.

10. Поляризатор (с возможностью поворота на 180°).
11. Ячейка с жидким кристаллом (НЖК-1289).
12. Анализатор (с возможностью поворота на 180°).

Рис. 1. Блок-схема установки.

Установка включает в себя два магнита, помещённых в обоймы, соединённые между собой шпильками из латуни диаметром 7 мм с резьбой, что позволяет изменять индукцию магнитного поля, меняя расстояние между магнитами. Обоймы смонтированы на основании из нержавеющей стали, которое латунными стойками закреплено на вращающейся платформе, работающей от шагового двигателя (ШД). Вращающий механизм представляет собой металлическую пластину и закреплённую в ней с помощью подшипника цилиндрическую вставку из стали марки Ст3. В середине вставки выточен зазор диаметром 25 мм (для возможности снятия оптического сигнала). На нижней части вставки расположен шкив под зубчатый ремень, соединяемый с ШД. Конструкция с ячейкой нематического жидкого кристалла – ЖК-1289 (НЖК), поляризатором, анализатором, лазером и фотоприёмником расположена так, что не имеет мест соприкосновения с вращающейся платформой. Это позволяет избежать передачи вибраций от двигателя. Размеры ячеек 30 мм на 15 мм. Толщина слоя НЖК 100 мкм. Поверхность ячейки обработана оксидом индия-олова (ИТО), который является прозрачным электродом. Генератор ГСС-120 соединён с ячейкой и регистратором. Также на регистратор выведен сигнал от фотоприёмника. Одновременная запись позволяет отслеживать зависимость изменения оптического сигнала от напряжения, подаваемого на ячейку. Скорость и направление вращения магнитного поля задаются при помощи программируемого контроллера шаговых двигателей SMSD-1.5. Контроллер и регистратор подключены к компьютеру, через который осуществляется контроль над проводимым экспериментом с использованием сервисных программ PcLab2000SE и SMC_Program-v-4-0-5.

Магнитное поле

Вращающееся магнитное поле создаётся между двумя «неодимовыми» (из NdFeB (неодим-железо-бор)) дисками (диаметра 70 мм и толщины 30 мм; остаточная индукция 1,05 Тл), закреплёнными на вращающейся платформе.

Оценим величину и однородность магнитного поля в пространстве между пластинами.

Уравнения магнитостатики с использованием скалярного магнитного потенциала φ , где напряжённость магнитного поля $H = -\nabla\varphi$, дают возможность с учётом граничных условий непрерывности нормальной компоненты магнитной индукции численно рассчитать магнитную индукцию в пространстве между магнитами.

Результаты расчёта представлены на рис. 2 и 3. Из рис. 3 видно, что в центре зазора между магнитами есть достаточно широкая область однородного магнитного поля, в которой можно поместить исследуемый жидкий кристалл.

Рис. 2. Расчётная структура магнитного поля.

Рис. 3. Нормальная компонента магнитной индукции около дисков (по оси абсцисс расстояние в мм вдоль линии магнитной индукции, а по оси ординат значение магнитной индукции в Тл, расстояние между дисками 40 мм).

Электрическое поле и оптическая часть

Переменное электрическое поле задаётся генератором ГСС-120. Частота изменения поля может меняться в диапазоне от 1 мГц до 120 МГц и выбирается в диэлектрическом режиме таким образом, чтобы избежать электрогидродинамических (ЭГД) неустойчивостей и ориентационных эффектов, связанных с проводимостью ЖК.

Стеклянные пластинки ячейки с прозрачным проводящим покрытием позволяют с помощью лазерного луча, проходящего сквозь ЖК-ячейку, получать информацию об изменении ориентации директора в ней.

Интенсивность света I , прошедшего сквозь ячейку с гомеотропной ориентацией, помещённую между скрещенными поляризаторами, зависит от ориентации директора:

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\Delta\Phi}{2}. \quad (1)$$

Здесь β – угол между поляризацией лазерного луча и плоскостью поворота директора, а фазовый сдвиг равен:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d (n_e(\theta(z)) - n_o) dz, \quad (2)$$

где d – толщина жидкого кристалла в ячейке, λ – длина волны, $\Delta n = n_{e0} - n_o$ – анизотропия показателя преломления, $\theta(z)$ – угол наклона директора относительно нормали ячейки.

Динамика директора и результаты измерений

В диэлектрическом режиме плотность момента, действующего со стороны переменного электрического поля $E_z = E_0 \sin 2\pi\nu t$ на директор, равна:

$$\Gamma = \frac{1}{4} \epsilon_a \epsilon_0 E_0^2 \sin 2\theta, \quad (3)$$

где ϵ_a – анизотропия диэлектрической проницаемости на частоте ν , ϵ_0 – электрическая постоянная, θ – угол наклона директора.

Плотность момента, действующего со стороны вращающегося магнитного поля $\mathbf{H} = (H_0 \cos \omega t, H_0 \sin \omega t, 0)$ на директор $\mathbf{n}$, равна:

$$\Gamma = \mu_0 \chi_a \mathbf{n} \cdot \mathbf{H} [\mathbf{n} \times \mathbf{H}], \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, χ_a – анизотропия диамагнитной восприимчивости, ω – угловая скорость вращения магнитного поля.

Уравнение движения директора сводится к системе двух нелинейных уравнений. Её стационарное решение (индекс s , синхронный режим) имеет вид:

$$2 \sin \varphi_s \cos \varphi_s \left(1 + \frac{\epsilon_a \epsilon_0 E_0^2}{2 \chi_a \mu_0 H_0^2 \cos^2 \varphi_s} \right) = \frac{\omega}{\omega_c}, \quad (5)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{\epsilon_a}{2\chi_a}} \frac{\epsilon_0 E_0}{c H_0 \cos \varphi_s}, \quad (6)$$

где $\omega_c = \mu_0 \chi_a H_0^2 / 2\gamma_1$ – критическая частота, φ_n – азимутальный угол директора, $\varphi = \omega t - \varphi_n$ – запаздывание азимутального угла, $d = \text{ctg} \theta = n_z/n_0$ – котангенс полярного угла наклона директора, c – скорость света.

Как было показано ранее, в отсутствии синхронного режима или при его неустойчивости жидкий кристалл переходит в асинхронный режим со сложным движением директора. Вследствие вырожденности этого состояния начинается медленный процесс разориентации жидкого кристалла, в результате которого он переходит в новое стационарное состояние с неполной ориентированностью с многочисленными ориентационными дефектами, дисклинациями. Оптическая анизотропия этого состояния уменьшается с ростом частоты вращения поля и определяется, как и длительность переходного процесса, динамикой дефектов.

На рис. 4 представлены результаты измерений на описанной выше экспериментальной установке временной зависимости интенсивности (в относительных единицах, асинхронный режим) лазерного луча, прошедшего в скрещенных поляризаторах через жидкокristаллическую ячейку с нематиком ЖК-1289.

Рис. 4. Зависимость от времени (в с) интенсивности (в относительных единицах) лазерного луча, прошедшего сквозь ЖК-ячейку с поляризаторами.

Заключение

Как видно из рис. 4, под действием переменных скрещенных полей происходит изменение ориентационной структуры нематика. Анализ результатов измерений позволит оценить коэффициент вращательной вязкости, анизотропии диэлектрической проницаемости (на различных частотах) и диамагнитной восприимчивости жидкого кристалла. Сочетание быстро вращающегося магнитного поля с переменным электрическим представляет также интерес для изучения динамики ориентационной структуры дискотиков. Для корректной постановки эксперимента требуется визуальный контроль за образованием в ячейке дискли-

наций. Для изучения «объёмных» свойств жидких кристаллов больших размеров вместо оптических измерений можно использовать измерения анизотропии коэффициента поглощения ультразвука с волновым вектором ортогональным электрическому полю.

В последнее время повысился теоретический интерес к изучению ЭГД неустойчивости жидких кристаллов в очень сильных электромагнитных полях и соответствующей модификации уравнений гидродинамики НЖК [13]. Для изучения таких эффектов также может быть полезной предложенная экспериментальная схема.

Статья поступила в редакцию 31.10.2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков В. Н. Движение анизотропных жидкостей во вращающемся магнитном поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1939. Т. 9. № 5. С. 602–615.
2. Богданов Д. Л., Геворкян Э. В., Лагунов А. С. Акустические свойства жидких кристаллов во вращающемся магнитном поле // Акустический журнал. 1980. Т. 26. № 1. С. 28–34.
3. Геворкян Э. В. К теории магнитоакустических явлений в нематических и смектических жидких кристаллах // Применение ультраакустики к исследованию вещества. Вып. 32. М.: Издательство Всесоюзного заочного машиностроительного института, 1981. С. 48–58.
4. Геворкян Э. В. Поведение нематических жидких кристаллов в меняющемся магнитном поле // Известия вузов СССР. Физика. 1981. № 4. С. 57–60.
5. Акустические исследования динамики ориентационных процессов в нематических жидких кристаллах в конических магнитных полях / Геворкян Э. В., Ларионов А. Н., Ефремов А. И., Ларионова Н. Н. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2018. Т. 18. № 1. С. 6–14.
6. Carr E. F. Influence of electric fields on the molecular alignment in the liquid crystal p-(anisalamino)-phenyl acetate // Molecular Crystals. 1969. Vol. 7. Iss. 1. P. 253–269.
7. Deuling H. J., Guyon E., Pieranski P. Deformation of nematic layers in crossed electric and magnetic fields // Solid State Communications. 1974. Vol. 15. Iss. 2. P. 277–279.
8. Deuling H. J., Buka A., Janossy I. Two Freedericksz transitions in crossed electric and magnetic fields // Journal de Physique. 1976. Vol. 37. No. 7–8. P. 965–968.
9. Rao N. V. S., Kishore P. R., Raj T. F. S., Avadhanlu M. N., Murty C. R. K. Electric and Magnetic Field Effects in p-Methoxy Benzylidene p'-n-Butylaniline // Zeitschrift für Naturforschung A. 1976. Vol. 31. P. 283–287.
10. Геворкян Э. В. Акустические свойства жидких кристаллов в переменных магнитных и электрических полях // Применение ультраакустики к исследованию вещества. Вып. 37. М.: Издательство Всесоюзного заочного машиностроительного института, 1986. С. 13–19.
11. Исследование электрических свойств нематических жидких кристаллов в скрещенных электрических и магнитных полях / Богданов Д. Л., Геворкян Э. В., Романов А. А., Шевчук М. В. // Деп. в ВИНТИ 20.10.2003 №1829-B2003. С. 1–9.
12. Sugimura A., Luckhurst G. R. Deuterium NMR investigations of field-induced director alignment in nematic liquid crystals // Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. 2016. Vol. 94–95. P. 37–74.

13. Захаров А. В. Динамика деформации нематика под действием сильных скрещенных электрического и магнитного полей. // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. № 3. С. 603–608.

REFERENCES

1. Tsvetkov V. N. [The motion of anisotropic liquids in a rotating magnetic field]. In: *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1939, vol. 9, no. 5, pp. 602–615.
2. Bogdanov D. L., Gevorkyan E. V., Lagunov A. S. [Acoustic properties of liquid crystals in a rotating magnetic field]. In: *Akusticheskii zhurnal* [Acoustical Physics], 1980, vol. 26, no. 1, pp. 28–34.
3. Gevorkyan E. V. [On the theory of magnetoacoustic phenomena in nematic and smectic liquid crystals]. In: *Primenenie ul'traakustiki k issledovaniyu veshchestva. Vip. 32* [The application of ultra acoustics to the study of matter. Iss. 32] Moscow, All-Union Correspondence Engineering Institute Publ., 1981, pp. 48–58.
4. Gevorkyan E. V. [Behavior of nematic liquid crystals in a variable magnetic field]. In: *Izvestiya vuzov SSSR. Fizika* [Soviet Physics Journal], 1981, no. 4, pp. 57–60.
5. Gevorkyan E. V., Larionov A. N., Efremov A. I., Larionova N. N. [Acoustic investigations of dynamics of orientational processes in nematic liquid crystals in conical magnetic fields]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application. Russian Journal], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 6–14.
6. Carr E. F. Influence of electric fields on the molecular alignment in the liquid crystal p-(anisalamino)-phenyl acetate. In: *Molecular Crystals*, 1969, vol. 7, iss. 1, pp. 253–269.
7. Deuling H. J., Guyon E., Pieranski P. Deformation of nematic layers in crossed electric and magnetic fields. In: *Solid State Communications*, 1974, vol. 15, iss. 2, pp. 277–279.
8. Deuling H. J., Buka A., Janossy I. Two Freedericksz transitions in crossed electric and magnetic fields. In: *Journal de Physique*, 1976, vol. 37, no. 7–8, pp. 965–968.
9. Rao N. V. S., Kishore P. R., Raj T. F. S., Avadhanlu M. N., Murty C. R. K. Electric and Magnetic Field Effects in p-Methoxy Benzylidene p'-n-Butylaniline. In: *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1976, vol. 31, pp. 283–287.
10. Gevorkyan E. V. [Acoustic properties of liquid crystals in alternating magnetic and electric fields]. In: *Primenenie ul'traakustiki k issledovaniyu veshchestva. Vip. 37* [The application of ultra acoustics to the study of matter. Iss. 37]. Moscow, All-Union Correspondence Engineering Institute Publ., 1986, pp. 13–19.
11. Bogdanov D. L., Gevorkyan E. V., Romanov A. A., Shevchuk M. V. [Investigation of the electrical properties of nematic liquid crystals in crossed electric and magnetic fields]. In: *VINITI* 20.10, 2003, no. 1829-B2003, pp. 1–9.
12. Sugimura A., Luckhurst G. R. Deuterium NMR investigations of field-induced director alignment in nematic liquid crystals. In: *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2016, vol. 94–95, pp. 37–74.
13. Zakharov A. V. [Dynamics of Deformation of a Nematic under Strong Crossed Electric and Magnetic Fields]. In: *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2018, vol. 60, no. 3, pp. 603–608.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Геворкян Эдвард Вигенович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Московского государственного областного университета;
e-mail: gevev@rambler.ru;

Хотькин Станислав Олегович – аспирант кафедры общей физики Московского государственного областного университета;
e-mail: mild91@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Edvard V. Gevorkyan – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of General Physics, Moscow Region State University;
e-mail: gevev@rambler.ru;

Stanislav O. Khotkin – postgraduate student at the Department of General Physics, Moscow Region State University;
e-mail: mild91@mail.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Геворкян Э. В., Хотькин С. О. К методике изучения поведения жидких кристаллов в переменных электромагнитных полях // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2019. № 4. С. 51–59.
DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-51-59

FOR CITATION

Gevorkyan E. V., Khotkin S. V. A method for investigating the behavior of liquid crystals in variable electromagnetic fields. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*. 2019. no. 4, pp. 51–59.
DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-51-59