УДК 538.956, 537.226.5

DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-83-96

АНИЗОТРОПИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ 1-(4-ГЕКСИЛЦИКЛОГЕКСИЛ)-4-ИЗОТИОЦИАНАТ-БЕНЗОЛА

Курилов А. Д.^{1,2}, Волосникова Н. И.¹

¹ *Московский государственный областной университет*

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

² *МИРЭА – Российский технологический университет*

119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, Российская Федерация

Аннотация. Проведены исследования диэлектрических свойств нематического жидкого кристалла 6CHBT с полярной концевой –NCS группой. Используя методы диэлектрической спектроскопии, с учётом паразитных вкладов измерительной системы определены главные значения диэлектрической проницаемости при варьировании температуры образца, угла между директором и напряжённостью электрического поля и частоты тест-сигнала. Рассчитаны характерные времена диэлектрической релаксации τ вращения молекул 6CHBT вокруг их короткой оси как в нематической, так и изотропной фазах, а также соответствующие им энthalпии активации. На основе полученных данных и теории Майера-Заупе построена температурная зависимость параметра ориентационного порядка во всём диапазоне существования нематической фазы.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, диэлектрическая спектроскопия, анизотропия, диэлектрическая релаксация.

ANISOTROPY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY IN 1-(4-HEXYLCYCLOHEXYL)-4-ISOTHIOCYANATOBENZENE

A. Kurilov^{1,2}, N. Volosnikova¹

¹ *Moscow Region State University*

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

² *MIREA – Russian Technological University*

prosp. Vernadskogo 78, 119454 Moscow, Russian Federation

Abstract. Dielectric properties of the 6CHBT nematic liquid crystal with a polar –NCS end group are studied. The principal values of the dielectric permittivity are determined using the methods of dielectric spectroscopy by varying the sample temperature, the angle between the director and electric field strength vector, and the frequency of the test signal. We use a modified dielectric spectroscopy method that takes into account the parasitic contributions of the measuring system. The characteristic dielectric relaxation times τ of rotation of 6CHBT molecules around their short axis in both the nematic and isotropic phases and the corresponding activation enthalpies are calculated. The temperature dependence of the orientational order parameter

over the entire range of the nematic phase existence is constructed using the obtained data and the Maier-Saupe theory.

Keywords: liquid crystals, dielectric spectroscopy, anisotropy, dielectric relaxation.

Введение

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) с высокой анизотропией показателя преломления Δn и низкой вязкостью особенно привлекательны для дисплейных, инфракрасных и микроволновых приложений [1–4]. Двойное лучепреломление НЖК в основном определяется длиной π -сопряжения, молекулярной формой, функциональной группой и концевыми группами. Бензольные кольца и системы двойных и тройных связей приводят к высокосопрежённным соединениям [5; 6]. Основные недостатки таких сильно сопряжённых структур для практического применения обычно наблюдаются в виде высокой температуры плавления и сильной смектогенности. Жидкие кристаллы с полярной концевой группой проявляют высокие значения анизотропии диэлектрической проницаемости и коэффициента преломления [7]. Добавка концевой азотсодержащей группы позволяет достигать сверхвысоких значений анизотропии коэффициента преломления, наивысшие значения которого ($\Delta n = 0,8$) наблюдаются у изотиоцианатов (соединения с полярными $-NCS$ концевыми группами) [8]. Кроме того, измерения с использованием ультрафиолетовой и флуоресцентной спектроскопии показывают их хорошие фотолюминесцентные свойства и высокую квантовую эффективность $0,4 \div 1,0$. Изотиоцианаты в виде соединений с высоким Δn кажутся более подходящими для применений, чем другие полярные НЖК, из-за более низких объёмной и вращательной вязкостей. Последняя ниже (до 35%), чем у структурно сопоставимых соединений с концевой группой $-CN$ [9].

Также известно, что воздействие ультрафиолетового излучения негативно влияет на эксплуатационные параметры жидкокристаллических материалов: температуру просветления, двулучепреломление, диэлектрические постоянные, а также вязкостные и упругие коэффициенты. Однако добавление азотсодержащих групп увеличивает устойчивость к ультрафиолетовому излучению, а изотиоцианаты показывают наилучшую стабильность среди соответствующих других типичных полярных групп [10].

С точки зрения применения эти соединения используются в качестве легирующей добавки для улучшения качества коммерческих смесей для дисплейных приложений [11; 12].

Объект исследования и методы

В данной работе проводятся исследования анизотропии диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла 1-(4-гексилциклогексил)-4-изотиоцианат-бензола (6CHBT) с полярной $-NCS$ концевой группой. Структурная формула 6CHBT показана на рис. 1.

Рис. 1. Структурная формула 6CHBT.

Согласно литературным данным 6CHBT имеет температуру просветления $T_{N-Iso} = 316,7$ К [13]. С помощью методов дифференциальной сканирующей калориметрии (Mettler Toledo DSC 3) и поляризационной оптической микроскопии (Альтами Полар 3) установлено, что температуры фазовых превращений исследуемого образца соответствуют этим данным. Измерения проводились как при нагревании, так и охлаждении исследуемого образца со скоростью ± 33 мК/с. Перед каждым измерением образец выдерживался при постоянной температуре не менее 30 минут. Полученная таким образом термограмма представлена на рис. 2.

Рис. 2. Термограмма 6CHBT: 1 – охлаждение; 2 – нагревание.

Измерения диэлектрических свойств исследуемого объекта проводились ёмкостным методом [14; 15] с использованием прецизионного анализатора импеданса WK 65120P в диапазоне частот тест-сигнала от 20 Гц до 40 МГц. Напряжение приложенного электрического тест-сигнала составляло 0,5 В. Измерительная ячейка представляет собой ёмкость с плоским конденсатором. Поддержание заданной температуры производилось путём циркулирования жидкости-теплоносителя во внешнем контуре измерительной ячейки. Температура образца регулировалась жидкостным криостатом LOIP FT-316-25 в диапазоне от 285 К до 330 К со стабилизацией температуры не хуже $\pm 0,5$ К. Ориентация нематического жидкого кристалла задавалась постоянным магнитом с индукцией $B = 0,245$ Тл, между полюсов которого жёстко закреплена измерительная ячейка.

При измерениях диэлектрических свойств ёмкостным методом в широком частотном диапазоне важно учитывать паразитные эффекты системы, сильно искажающие измеряемые параметры как в низко-, так и в высокочастотной областях. В настоящей работе производился учёт и компенсация паразитной ёмкости систе-

мы C_p [16], ёмкости двойного электрического слоя [17], а также частоты среза f_c и резонансной частоты f_R , связанных с наличием индуктивности проводов и сопротивлением электродов [18]. Для выделения паразитной ёмкости системы плоский конденсатор калибровался на эталонном диэлектрике: толуоле класса «ос.ч.».

Обсуждение результатов

Полученные значения продольной и поперечной компонент статической диэлектрической проницаемости ϵ_s в нематической и изотропной фазах представлены на рис. 3. Нематический жидкий кристалл 6CHBT обладает положительной анизотропией диэлектрической проницаемости ввиду наличия сильного электрического дипольного момента концевой $-NCS$ группы, направленного параллельно длинной оси молекулы. В области фазового перехода диэлектрическая проницаемость меняется скачкообразно. При этом в изотропной фазе главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости 6CHBT практически не изменяются с температурой.

Рассчитаны значения усреднённой диэлектрической проницаемости $\langle \epsilon \rangle = (\epsilon_{\parallel} + 2\epsilon_{\perp})/3$, которые также представлены на графике. В области фазового перехода N-Iso наблюдается небольшой скачок усреднённой диэлектрической проницаемости, который объясняется образованием димеров из антипараллельных молекул, уменьшающих среднюю диэлектрическую проницаемость системы. Такое поведение полярных жидких кристаллов подтверждено рентгеноструктурным анализом [19].

Рис. 3. Температурная зависимость компонент статической диэлектрической проницаемости ϵ_s 6CHBT: 1 – продольная компонента $\epsilon_{\parallel}$, 2 – поперечная компонента $\epsilon_{\perp}$, 3 – усреднённая диэлектрическая проницаемость $\langle \epsilon \rangle$.

Путём вращения плоского конденсатора относительно магнитного поля получена зависимость статической диэлектрической проницаемости ϵ_s от угла между директором и вектором напряжённости электрического поля с шагом в 10 градусов при различных значениях температуры образца. С ростом температуры

анизотропия статической диэлектрической проницаемости уменьшается с сохранением качественного характера угловой зависимости. Полученные зависимости хорошо описываются известным эмпирическим выражением [20]:

$$\epsilon_s = \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

где φ – угол между директором и вектором напряжённости электрического поля, $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ – анизотропия диэлектрической проницаемости. Аппроксимирующие кривые представлены сплошными линиями на рис. 4.

Рис. 4. Анизотропия статической диэлектрической проницаемости ϵ_s для различных температур 6СНВТ.

Во всём диапазоне существования мезофазы наблюдается дисперсия как продольной, так и поперечной компоненты действительной части диэлектрической проницаемости со сменой знака анизотропии диэлектрической проницаемости на соответствующей частоте перехода. Причём частота перехода уменьшается с понижением температуры. Такое поведение связано с релаксацией вращения молекул НЖК вокруг их короткой оси, когда вследствие внутреннего трения диполи уже не успевают поворачиваться вслед за электрическим полем и основной вклад в ориентационную поляризуемость системы вносит поперечная компонента дипольного момента. С дальнейшим уменьшением температуры молекулы НЖК перестают вращаться и вокруг своих длинных осей, поэтому в высокочастотной области спектра механизм ориентационной поляризуемости в полярных диэлектриках не учитывается.

Для 6СНВТ также обнаружена дисперсия диэлектрической проницаемости в изотропной фазе, что отражено на рис. 5.

Рис. 5. Температурные зависимости продольной $\epsilon_{\parallel}$ (HT) и поперечной $\epsilon_{\perp}$ (PL) компонент диэлектрической проницаемости 6CHBT при различных частотах приложенного тест-сигнала.

Для характеристики наблюдаемых релаксационных процессов необходимо проводить анализ спектров как действительной ϵ' , так и мнимой ϵ'' компонент диэлектрической проницаемости. Соответствующие дисперсионные кривые представлены на рис. 6. Мнимая компонента диэлектрической проницаемости характеризует потери в диэлектрике и поэтому называется коэффициентом диэлектрических потерь. Расчёт мнимой компоненты производился из значений ёмкости C и проводимости G системы по формуле $\epsilon'' = G/(\omega C)$.

Рис. 6. Частотные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости 6CHBT в нематической и изотропной фазах:
1 – продольная компонента ϵ' ; 2 – поперечная компонента ϵ' ;
3 – продольная компонента ϵ'' ; 4 – поперечная компонента ϵ'' .

Для описания дисперсионных кривых, из которых вычтены паразитные эффекты системы, используется релаксационная модель Гаврильяк-Негами [21], учитывающая асимметричность распределения времён релаксации:

$$\epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon_{\infty} + \frac{\delta\epsilon}{\left[1 + (i\omega\tau)^{\alpha}\right]^{\beta}}, \quad (2)$$

где ϵ_{∞} – высокочастотный предел диэлектрической проницаемости, τ – время диэлектрической релаксации, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, $\delta\epsilon$ – сила релаксационного процесса, α – параметр распределения τ , отвечающий за ширину дисперсионной кривой, β – параметр частотной асимметрии распределения τ .

Используя численные методы оптимизации, была получена аппроксимирующая кривая, соответствующая выражению (2), а также найдены все неизвестные параметры, входящие в него. Дисперсия компонент диэлектрической проницаемости наблюдается в диапазоне $10^5 \div 10^7$ Гц для нематической фазы и $10^7 \div 10^9$ Гц для изотропной фазы. С повышением температуры область релаксационных процессов смещается в высокочастотную часть спектра. Это объясняется уменьшением внутреннего трения среды с ростом температуры, вследствие чего молекулы НЖК успевают поворачиваться вслед за электрическим полем на более высоких частотах.

Рассчитаны характерные времена диэлектрической релаксации вращения молекул вокруг их короткой оси как в нематической, так и изотропной фазах. Полученная температурная зависимость представлена на рис. 7.

Рис. 7. Температурная зависимость времени релаксации τ вращения молекул 6CHBT вокруг их короткой оси.

В области фазового перехода из нематической фазы в изотропную наблюдается скачкообразное уменьшение значений времени релаксации. Температурная

зависимость времён релаксации удовлетворительно описывается законом Аррениуса:

$$\tau = \tau_{\infty} \exp\left(\frac{\Delta^{\#}H}{RT}\right), \quad (3)$$

где τ_{∞} – высокотемпературный предел времени релаксации, $\Delta^{\#}H$ – энтальпия активации релаксационного процесса, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Из рис. 7 видно, что температурная зависимость времени релаксации хорошо описывается постоянной энтальпией активации молекулярного вращения во всём диапазоне существования мезофазы. Значения энтальпий активации в соответствующих фазах были рассчитаны при построении аппроксимирующей кривой и составляют $\Delta^{\#}H_N = 65,0$ кДж/моль и $\Delta^{\#}H_{Iso} = 42,2$ кДж/моль.

Скачкообразное уменьшение времени релаксации при переходе из нематической фазы в изотропную хорошо описывается теорией Майера-Заупе в рамках концепции теории среднего поля и фактора замедления g . Параметр потенциального барьера НЖК определяется как $\sigma = q/kT$, где q – высота барьера, препятствующего переориентации молекул вокруг их коротких осей. Отсюда время релаксации в мезофазе должно быть больше, чем в изотропной фазе. Фактор замедления $g = \tau/\tau_0$ определяется как отношение времени релаксации в мезофазе к времени релаксации при нулевом нематическом потенциальном барьере $q = 0$. Данное отношение можно определить из экспериментальных данных путём экстраполяции полученных значений времени релаксации в изотропной фазе в область нематической фазы в соответствии с выражением . Кривая экстраполяции показана пунктирной линией на рис. 7.

Выражение, связывающее фактор замедления g и высоту потенциального барьера q , впервые получили Мейер и Заупе, используя ряд упрощений. Позже в работе [21] была получена в строгом виде точная формула, дающая более высокие значения, чем решение Мейера и Заупе. Приближённая формула, близкая к точному решению выглядит следующим образом:

$$g = \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{e^{\sigma} - 1}{\sigma} \left(\frac{2\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}} + 2^{-\sigma} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Кроме того, авторами работы [21] определена зависимость параметра потенциального барьера σ и параметра ориентационного порядка S . Полученная ими аналитическая зависимость хорошо описывается приближённым выражением

$$\sigma \approx \frac{3S(5 - \pi S)}{2(1 - S^2)}. \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5), а также данные экстраполяции по выражению (3) нами рассчитаны значения параметра ориентационного порядка S . Полученная таким образом температурная зависимость $S(T)$ из диэлектрических измерений показана на рис. 8. Зависимости, полученные данным методом, близки к результатам прямых измерений параметра ориентационного порядка [22].

Рис. 8. Температурная зависимость параметра ориентационного порядка S для 6СНВТ.

Заключение

В нашей работе используется модифицированный метод диэлектрической спектроскопии, позволяющий отделять паразитные вклады измерительной системы и существенно расширить доступный для ёмкостного метода частотный диапазон измерений. Благодаря этому удалось обнаружить дисперсию компонент диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла 6СНВТ, вызванную релаксационным процессом вращения молекул вокруг их короткой оси, как во всём диапазоне существования нематической фазы, так и в изотропной фазе, используя лишь один метод. Экспериментально получены частотные, температурные и угловые зависимости главных значений диэлектрической проницаемости исследуемого образца. На основе полученных данных и теоретической модели Майера и Заупе рассчитаны значения параметра ориентационного порядка в исследуемом температурном интервале. Показано хорошее согласие между экспериментальными данными и используемыми теоретическими моделями.

Высокоточный метод диэлектрической спектроскопии даёт возможность расчёта значений молекулярных параметров и подробного изучения процессов молекулярной динамики жидкокристаллических материалов, что необходимо при моделировании сложных систем на их основе, в частности, ориентационного воздействия наноматериалов и поверхностей на структуру жидких кристаллов [23–26]. Другое приложение полученные результаты могут найти при конструировании современных электрооптических и фотонных жидкокристаллических устройств [27–30].

Статья поступила в редакцию 25.12.2018 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-07-00727 А, и Министерства образования и науки РФ, грант Президента Российской Федерации МК-3120.2018.9.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-07-00727 A), and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The RF President's Grants Council, State Support Young Russian Scientists Program, Grant No. MK-3120.2018.9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Highly birefringent, low-loss liquid crystals for terahertz applications / Reuter M., Vieweg N., Fischer B. M., Mikulicz M., Koch M., Garbat K., Dąbrowski R. // *APL Materials*. 2013. Vol. 1. Iss. 1. P. 012107.
2. The design of liquid crystalline bistolane-based materials with extremely high birefringence / Arakawa Y., Kang S., Tsuji H., Watanabe J., Konishi G. I. // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. Iss. 95. P. 92845–92851.
3. Dielectric Properties of Compounds Creating Dual-Frequency Nematic Liquid Crystals / Mrukiewicz M., Perkowski P., Garbat K., Dąbrowski R., Parka J. // *Acta Physica Polonica A*. 2013. Vol. 124. No. 6. P. 940–945.
4. Dąbrowski R., Kula P., Herman J. High birefringence liquid crystals // *Crystals*. 2013. Vol. 3. Iss. 3. P. 443–482.
5. New fluorinated terphenyl isothiocyanate liquid crystal single compounds and mixtures / Parish A., Gauza S., Wu S. T., Dziaduszek J., Dąbrowski R. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2008. Vol. 489. Iss. 1. P. 22–39.
6. Lee J. H., Liu D. N., Wu S. T. *Introduction to flat panel displays*. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2008. 280 p.
7. Amide as Terminal Groups: Synthesis and Properties as New Tolane-Type Liquid Crystals / Zhang H., Hong F., Zhu D., Xia Z., Wu H., Wang H., Zeng Z. // *Chinese Journal of Chemistry*. 2015. Vol. 33. Iss. 7. P. 771–776.
8. Synthesis and properties of novel liquid crystalline materials with super high birefringence: styrene monomers bearing diacetylenes, naphthyl, and nitrogen-containing groups / Guan X. L., Zhang L. Y., Zhang Z. L., Shen Z., Chen X. F., Fan X. H., Zhou Q. F. // *Tetrahedron*. 2009. Vol. 65. Iss. 18. P. 3728–3732.
9. Low viscosity, high birefringence liquid crystalline compounds and mixtures / Dąbrowski R., Dziaduszek J., Ziólek A., Stolarz Z., Sasnouski G., Bezborodov V., Lapanik W., Gauza S., Wu S. // *Opto-Electronics Review*. 2007. Vol. 15. Iss. 1. P. 47–51.
10. Wen C. H., Gauza S., Wu S. T. Ultraviolet stability of liquid crystals containing cyano and isothiocyanato terminal groups // *Liquid Crystals*. 2004. Vol. 31. Iss. 11. P. 1479–1485.
11. Electrooptical properties of new type fluorinated phenyl-tolane isothiocyanate liquid crystal compounds / Peng Z., Wang Q., Liu Y., Mu Q., Cao Z., Xu H., Zhang P., Yang C., Yao L., Xuan L., Zhang Z. // *Liquid Crystals*. 2016. Vol. 43. Iss. 2. P. 276–284.
12. Catanescu C. O., Wu S. T., Chien L. C. Tailoring the physical properties of some high birefringence isothiocyanato-based liquid crystals // *Liquid Crystals*. 2004. Vol. 31. Iss. 4. P. 541–555.

13. Interaction potential in nematogenic 6CHBT / Bogoslovov R. B., Roland C. M., Czub J., Urban S. // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2008. Vol. 112. Iss. 50. P. 16008–16011.
14. Barsoukov E., Macdonald J. R. *Impedance spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. Hoboken: Wiley, 2018. 528 p.
15. Raju G. G. *Dielectrics in electric fields: Tables, Atoms, and Molecules; second edition*. Boca Raton: CRC Press, 2016. 751 p.
16. Parameters of LC molecule's movement measured by dielectric spectroscopy in wide temperature range / Chausov D. N., Kurilov A. D., Belyaev V. V., Kumar S. // *Opto-Electronics Review*. 2018. Vol. 26. Iss. 1. P. 44–49.
17. Electrode polarization in dielectric measurements: a review / Ishai P. B., Talary M. S., Caduff A., Levy E., Feldman Y. // *Measurement Science and Technology*. 2013. Vol. 24. No. 10. P. 102001.
18. Perkowski P. Dielectric spectroscopy of liquid crystals. Electrodes resistivity and connecting wires inductance influence on dielectric measurements // *Opto-Electronics Review*. 2012. Vol. 20. Iss. 1. P. 79–86.
19. Ahmed Z., Welch C., Mehl G. H. The design and investigation of the self-assembly of dimers with two nematic phases // *RSC Advances*. 2015. Vol. 5. Iss. 113. P. 93513–93521.
20. Garrappa R., Mainardi F., Guido M. Models of dielectric relaxation based on completely monotone functions // *Fractional Calculus and Applied Analysis*. 2016. Vol. 19. No. 5. P. 1105–1160.
21. Kalmykov Y. P., Coffey W. T. Analytical solutions for rotational diffusion in the mean field potential: application to the theory of dielectric relaxation in nematic liquid crystals // *Liquid Crystals*. 1998. Vol. 25. Iss. 3. P. 329–339.
22. Nematic order parameter as determined from dielectric relaxation data and other methods / Urban S., Gestblom B., Kuczyński W., Pawlus S., Wörflinger A. // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2003. Iss. 5. P. 924–928.
23. Anchoring energy of liquid crystals / Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Belyaev V. V., Chausov D. N., Noah O. V., Chigrinov V. G. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2012. Vol. 560. Iss. 1. P. 108–114.
24. Моделирование ориентации молекул жидкокристаллического октилцианбифенила на поверхности кристаллов / Дадиванян А. К., Чаусов Д. Н., Пашинина Ю. М., Беляев В. В. // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2010. № 4 (34). С. 61–69.
25. Nanomesh aluminum films for LC alignment. Theoretical and experimental modeling / Dadivanyan A. K., Belyaev V. V., Chausov D. N., Stepanov A. A., Smirnov A. G., Tsybin A. G., Osipov M. A. // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2015. Vol. 611. Iss. 1. P. 117–122.
26. Molecules Orientation on Crystal Surfaces / Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Chausov D. N., Belyaev V. V. Mesogen // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2011. Vol. 545. Iss. 1. P. 159–167.
27. Schadt M. Nematic liquid crystals and twisted-nematic LCDs // *Liquid Crystals*. 2015. Vol. 42. Iss. 5–6. P. 646–652.
28. Photosensitive self-assembling materials as functional dopants for organic photovoltaic cells / Bubnov A., Iwan A., Cigl M., Boharewicz B., Tazbir I., Wyjck K., Sikora A., Hamplov V. // *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. Iss. 14. P. 11577–11590.
29. Srivastava A. K., Chigrinov V. G., Kwok H. S. Ferroelectric liquid crystals: Excellent tool for modern displays and photonics // *Journal of the Society for Information Display*. 2015. Vol. 23. Iss. 6. P. 253–272.

30. Программно-аппаратный комплекс оценки эффективности деятельности операторов / Чаусов Д. Н., Петухов И. В., Беляев В. В., Богачев А. К., Курасов П. А. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2014. № 2. С. 80–86.

REFERENCES

1. Reuter M., Vieweg N., Fischer B. M., Mikulicz M., Koch M., Garbat K., Dąbrowski R. Highly birefringent, low-loss liquid crystals for terahertz applications. In: *APL Materials*, 2013, vol. 1, iss. 1, pp. 012107.
2. Arakawa Y., Kang S., Tsuji H., Watanabe J., Konishi G. I. The design of liquid crystalline bistolane-based materials with extremely high birefringence. In: *RSC Advances*, 2016, vol. 6, iss. 95, pp. 92845–92851.
3. Mrukiewicz M., Perkowski P., Garbat K., Dąbrowski R., Parka J. Dielectric Properties of Compounds Creating Dual-Frequency Nematic Liquid Crystals. In: *Acta Physica Polonica A*, 2013, vol. 124, no. 6, pp. 940–945.
4. Dąbrowski R., Kula P., Herman J. High birefringence liquid crystals. In: *Crystals*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 443–482.
5. Parish A., Gauza S., Wu S. T., Dziaduszek J., Dąbrowski R. New fluorinated terphenyl isothiocyanate liquid crystal single compounds and mixtures. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2008, vol. 489, iss. 1, pp. 22–39.
6. Lee J. H., Liu D. N., Wu S. T. Introduction to flat panel displays. UK, John Wiley & Sons Ltd Publ., 2008. 280 p.
7. Zhang H., Hong F., Zhu D., Xia Z., Wu H., Wang H., Zeng Z. Amide as Terminal Groups: Synthesis and Properties as New Tolane-Type Liquid Crystals. In: *Chinese Journal of Chemistry*, 2015, vol. 33, iss. 7, pp. 771–776.
8. Guan X. L., Zhang L. Y., Zhang Z. L., Shen Z., Chen X. F., Fan X. H., Zhou Q. F. Synthesis and properties of novel liquid crystalline materials with super high birefringence: styrene monomers bearing diacetylenes, naphthyl, and nitrogen-containing groups. In: *Tetrahedron*, 2009, vol. 65, iss. 18, pp. 3728–3732.
9. Dąbrowski R., Dziaduszek J., Ziółek A., Stolarz Z., Sasnouski G., Bezborodov V., Lapanik W., Gauza S., Wu S. Low viscosity, high birefringence liquid crystalline compounds and mixtures. In: *Opto-Electronics Review*, 2007, vol. 15, iss. 1, pp. 47–51.
10. Wen C. H., Gauza S., Wu S. T. Ultraviolet stability of liquid crystals containing cyano and isothiocyanato terminal groups. In: *Liquid Crystals*, 2004, vol. 31, iss. 11, pp. 1479–1485.
11. Peng Z., Wang Q., Liu Y., Mu Q., Cao Z., Xu H., Zhang P., Yang C., Yao L., Xuan L., Zhang Z. Electrooptical properties of new type fluorinated phenyl-tolane isothiocyanate liquid crystal compounds. In: *Liquid Crystals*, 2016, vol. 43, iss. 2, pp. 276–284.
12. Catanescu C. O., Wu S. T., Chien L. C. Tailoring the physical properties of some high birefringence isothiocyanato-based liquid crystals. In: *Liquid Crystals*, 2004, vol. 31, iss. 4, pp. 541–555.
13. Bogoslovov R. B., Roland C. M., Czub J., Urban S. Interaction potential in nematogenic 6CHBT. In: *The Journal of Physical Chemistry B*, 2008, vol. 112, iss. 50, pp. 16008–16011.
14. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. Hoboken, Wiley Publ., 2018. 528 p.
15. Raju G. G. Dielectrics in electric fields: Tables, Atoms, and Molecules; second edition. Boca Raton, CRC Press Publ., 2016. 751 p.

16. Chausov D. N., Kurilov A. D., Belyaev V. V., Kumar S. Parameters of LC molecule's movement measured by dielectric spectroscopy in wide temperature range. In: *Opto-Electronics Review*, 2018, vol. 26, iss. 1, pp. 44–49.
17. Ishai P. B., Talary M. S., Caduff A., Levy E., Feldman Y. Electrode polarization in dielectric measurements: a review. In: *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 10, pp. 102001.
18. Perkowski P. Dielectric spectroscopy of liquid crystals. Electrodes resistivity and connecting wires inductance influence on dielectric measurements. In: *Opto-Electronics Review*, 2012, vol. 20, iss. 1, pp. 79–86.
19. Ahmed Z., Welch C., Mehl G. H. The design and investigation of the self-assembly of dimers with two nematic phases. In: *RSC Advances*, 2015, vol. 5, iss. 113, pp. 93513–93521.
20. Garrappa R., Mainardi F., Guido M. Models of dielectric relaxation based on completely monotone functions. In: *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 2016, vol. 19, no. 5, pp. 1105–1160.
21. Kalmykov Y. P., Coffey W. T. Analytical solutions for rotational diffusion in the mean field potential: application to the theory of dielectric relaxation in nematic liquid crystals. In: *Liquid Crystals*, 1998, vol. 25, iss. 3, pp. 329–339.
22. Urban S., Gestblom B., Kuczyński W., Pawlus S., W̄rflinger A. Nematic order parameter as determined from dielectric relaxation data and other methods. In: *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2003, iss. 5, pp. 924–928.
23. Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Belyaev V. V., Chausov D. N., Noah O. V., Chigrinov V. G. Anchoring energy of liquid crystals. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2012, vol. 560, iss. 1, pp. 108–114.
24. Dadivanyan A. K., Chausov D. N., Pashinina Yu. M., Belyaev V. V. [Simulation of LC octylcyanobiphenyl molecules orientation on crystals surface]. In: *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid Crystals and their Application. Russian Journal], 2010, no. 4 (34), pp. 61–69.
25. Dadivanyan A. K., Belyaev V. V., Chausov D. N., Stepanov A. A., Smirnov A. G., Tsybin A. G., Osipov M. A. Nanomesh aluminum films for LC alignment. Theoretical and experimental modeling. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, vol. 611, iss. 1, pp. 117–122.
26. Dadivanyan A. K., Pashinina Y. M., Chausov D. N., Belyaev V. V. Mesogen Molecules Orientation on Crystal Surfaces. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2011, vol. 545, iss. 1, pp. 159–167.
27. Schadt M. Nematic liquid crystals and twisted-nematic LCDs. In: *Liquid Crystals*, 2015, vol. 42, iss. 5–6, pp. 646–652.
28. Bubnov A., Iwan A., Cigl M., Boharewicz B., Tazbir I., Wycik K., Sikora A., Hamplov V. Photosensitive self-assembling materials as functional dopants for organic photovoltaic cells. In: *RSC Advances*, 2016, vol. 6, iss. 14, pp. 11577–11590.
29. Srivastava A. K., Chigrinov V. G., Kwok H. S. Ferroelectric liquid crystals: Excellent tool for modern displays and photonics. In: *Journal of the Society for Information Display*, 2015, vol. 23, iss. 6, pp. 253–272.
30. Chausov D. N., Petukhov I. V., Belyaev V. V., Bogachev A. K., Kurasov P. A. [Hardware-software complex for evaluation of the operator's activity]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-Matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2014, no. 2, pp. 80–86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курилов Александр Дмитриевич – мастер производственного обучения учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии Московского государственного областного университета; аспирант кафедры высшей математики МИРЭА – Российского технологического университета;
e-mail: ad.kurilov@gmail.com

Волосникова Наталья Ильинична – студент Московского государственного областного университета;
e-mail: 27nata97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander D. Kurilov – master of industrial training at the Educational and Research Laboratory of Theoretical and Applied Nanotechnology, Moscow Region State University; postgraduate student at the Department of Higher Mathematics, MIREA – Russian Technological University;
e-mail: ad.kurilov@gmail.com

Natalia I. Volosnikova – student, Moscow Region State University;
e-mail: 27nata97@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Курилов А. Д., Волосникова Н. И. Анизотропия диэлектрической проницаемости 1-(4-гексилциклогексил)-4-изотиоцианат-бензола // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2019. № 1. С. 83–96.
DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-83-96

FOR CITATION

Kurilov A. D., Volosnikova N. I. Anisotropy of dielectric permittivity in 1-(4-hexylcyclohexyl)-4-isothiocyantobenzene In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 1, pp. 83–96.
DOI: 10.18384-2310-7251-2019-1-83-96