

Физика

Научная статья

УДК: 544.25:538.9

ДИНАМИЧЕСКАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
ТРИДЕЦИЛАТА ХОЛЕСТЕРОЛА

А. Д. Курилов^{1,2*}, А. В. Губарева², Н. С. Парашук^{1,2}, А. И. Смирнова³, Н. В. Усольцева³, Д. Н. Чаусов^{1,2}

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Государственный университет просвещения, Мытищи, Россия

³НИИ Наноматериалов, Ивановский государственный университет, Иваново, Россия

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 9.02.2024

Одобрена 7.03.2024

Принята 14.03.2024

Ключевые слова:

динамическая
диэлектрическая
спектроскопия,
жидкие кристаллы,
наноматериалы,
фазовые переходы,
дифференциальная
сканирующая калориметрия,
диэлектрическая
проницаемость,
ионная проводимость,
тридецилат холестерина

АННОТАЦИЯ

Изучение полиморфизма различных соединений и их смесей представляет собой сложную задачу из-за наличия монокотропных и метастабильных фаз. Метод динамической диэлектрической спектроскопии (ДДС) позволяет идентифицировать и охарактеризовать подобные фазовые превращения. Используя разработанную автоматизированную установку ДДС и метод дифференциальной сканирующей калориметрии, обнаружен и исследован метастабильный фазовый переход в тридецилате холестерина, который не регистрируется классическими методами, такими как поляризационная оптическая микроскопия и диэлектрическая спектроскопия при постоянной температуре. Полученные результаты демонстрируют важность использования динамических методов для исследования полиморфизма, что имеет особую важность при синтезе новых материалов и смесей.

DOI:

10.18083/LCAppl.2024.2.64

Для цитирования:

Курилов А. Д., Губарева А. В., Парашук Н. С., Смирнова А. И., Усольцева Н. В., Чаусов Д. Н. Динамическая диэлектрическая спектроскопия тридецилата холестерина // Жидк. крист. и их практич. использ. 2024. Т. 24, № 2. С. 64–74.

Physics

Research Article

DYNAMIC DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF CHOLESTEROL TRIDECYLATE

A. D. Kurilov^{1,2*}, A. V. Gubareva², N. S. Parashchuk^{1,2}, A. I. Smirnova³, N. V. Usol'tseva³, D. N. Chausov^{1,2}

¹*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Federal State University of Education, Mytishchi, Russia*

³*Nanomaterials Research Institute, Ivanovo State University, Ivanovo, Russia*

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 9 February 2024

Approved 7 March 2024

Accepted 14 March 2024

Key words:

dynamic dielectric
spectroscopy,
liquid crystals,
nanomaterials,
phase transitions,
differential scanning
calorimetry,
dielectric permittivity,
ionic conductivity,
cholesterol tridecylate

The complexity of studying the polymorphism of various compounds and their mixtures arises from the presence of monotropic and metastable phases. The method of dynamic dielectric spectroscopy enables the identification and characterization of such phase transitions. A metastable phase transition has been detected in cholesterol tridecylate using the developed automated experimental setup and method of differential scanning calorimetry. The phase transition identified is not captured by traditional techniques such as polarizing optical microscopy and thermostated dielectric spectroscopy. These findings underscore the significance of employing dynamic methods in studying the polymorphism, particularly crucial in the synthesis of new materials and their mixtures.

DOI:

10.18083/LCAppl.2024.2.64

For citation:

Kurilov A. D., Gubareva A. V., Parashchuk N. S., Smirnova A. I., Usol'tseva N. V., Chausov D. N. Dynamic dielectric spectroscopy of cholesterol tridecylate. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2024, **24** (2), 64–74 (in Russ.).

Введение

Уникальные свойства жидких кристаллов (ЖК) тесно связаны с их фазовым состоянием [1–3]. Точное понимание поведения и определение характеристик жидких кристаллов в различных фазовых состояниях стимулировало инновации в передовых современных приложениях науки и промышленности. Примерами могут служить ЖК-материалы с быстрым переключением [4, 5], изогнутые [6] и сгибающиеся [7] дисплеи, интеллектуальные и энергосберегающие окна [8], перестраиваемые линзы [9, 10], биохимические датчики [11, 12] и устройства фотоники [13, 14]. Они также нашли свое применение в материалах для 3D-печати [15], биомедицинской визуализации и терапии [16].

Несмотря на более полувековую историю активных исследований жидкокристаллических материалов, изучение полиморфизма до сих пор представляет собой сложную задачу, в частности, из-за наличия монокотропных и метастабильных фаз. Монокотропные фазы проявляют зависимость от внешних факторов, таких как температура или давление, что вносит дополнительную сложность в их поведение. Метастабильные фазы, характеризующиеся увеличенным временем жизни за пределами равновесных условий, еще больше усложняют анализ [17–19].

Диэлектрическая спектроскопия является ценным методом изучения фазовых состояний жидкокристаллических материалов, позволяющим получить представление об их диэлектрических свойствах, фазовых переходах и динамике отклика [20, 21]. Динамическая диэлектрическая спектроскопия (ДДС) характеризует процессы релаксации и диэлектрические потери, связанные с движением молекул во время фазовых переходов. В полимерах это помогает изучать кинетику стеклования [22], а в жидких кристаллах позволяет охарактеризовать динамику структурных перестроек между мезофазами. Объединение калориметрических данных с результатами ДДС позволяет соотнести структурные изменения с процессами диэлектрической релаксации, понять кинетику фазовых переходов и всесторонне охарактеризовать жидкокристаллические материалы [23].

В связи с этим существует необходимость в прецизионных автоматизированных измерениях

жидких кристаллов с использованием ДДС в широком диапазоне температур.

Настоящая статья посвящена изучению фазовых перестроек тридецилата холестерина при комбинировании методов ДДС и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в сравнении с классической диэлектрической спектроскопией совместно с поляризационной оптической микроскопией (ПОМ). В работе показано, что классическая диэлектрическая спектроскопия и ПОМ не позволяют идентифицировать метастабильные фазы, в то время как ДДС и ДСК наглядно их выявляют, поскольку оба метода являются динамическими. Детально описана разработанная авторами установка для проведения исследований с ошибкой удержания температуры не более 0,02 °C и неравномерностью температуры по всей площади жидкокристаллической ячейки не более 0,05 °C.

Материалы и методы

Технические требования к установке

Автоматизированная система динамической диэлектрической спектроскопии термотропных жидкокристаллических материалов должна удовлетворять следующим требованиям:

- Измерение диэлектрических спектров в диапазоне от 10^3 до 10^7 Гц с ошибкой не более 5 %.
- Протоколирование и удержание температуры с ошибкой не более 0,01 и 0,02 °C соответственно в диапазоне от 30 до 140 °C.
- Неравномерность температурного поля по всей площади ЖК-ячейки не более 0,05 °C.
- Возможность изменения скорости нагрева от 0,01 до 1 °C/с с ошибкой удержания скорости не более 0,005 °C/с.
- Скорость сбора данных не менее 10 точек в секунду.

Объект исследования

В качестве объекта исследования был избран тридецилат холестерина (X-20) [24]. Структурная формула тридецилата холестерина представлена на рис. 1. Перед использованием жидкий кристалл был перекристаллизован из этанола.

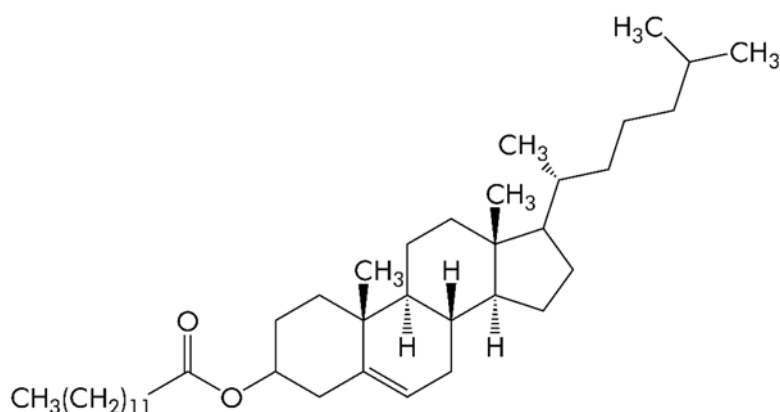


Рис. 1. Структурная формула тридецилата холестерина X-20

Fig. 1. Structural formula of cholesterol tridecylate X-20

Измерительная ячейка

Измерительная ячейка представляет собой плоский конденсатор, состоящий из двух склеенных между собой стеклянных подложек с напыленными ИТО электродами. Зазор между обкладками задавался с помощью фторопластовых прокладок толщиной 250 мкм. Измерительная ячейка заполнялась в изотропной фазе, после чего проходила повторный цикл медленного нагрева и охлаждения.

Система протоколирования и регулирования температуры ЖК-ячейки реализована на ПИД регуляторе элементов Пельтье TCM-X107. Схема температурного модуля показана на рис. 2. Нагрев образца осуществляется высокотемпературными элементами Пельтье TEG-12708T237, которые могут эксплуатироваться до 200 °С. Элементы корпуса и держатель ЖК-ячеек отпечатаны из промышленной фотополимерной смолы *Yousu iForm 283*, способной выдерживать температуры свыше 230 °С.

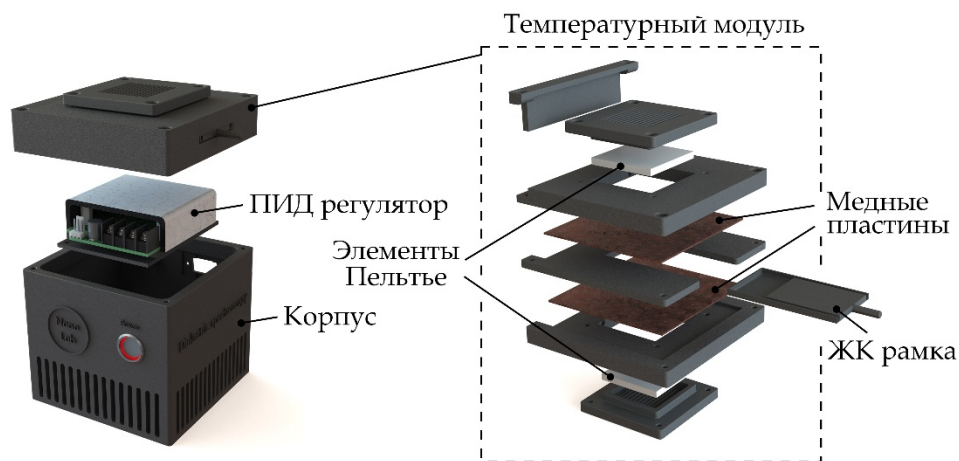


Рис. 2. Схема системы контроля и регулирования температуры

Fig. 2. Temperature control and regulation system diagram

Минимизация температурного градиента в рабочей области достигается с помощью медных пластин 800 x 800 x 1 мм. Для оценки температурного градиента проведено теплофизическое моделирование работы элементов Пельтье при прохождении

тока 1,6 А через каждый элемент [25]. Результаты моделирования (рис. 3) показывают, что при 129 °С неравномерность температуры в горизонтальной плоскости составляет не более 0,02 °С, а в вертикальной плоскости не более 0,05 °С.

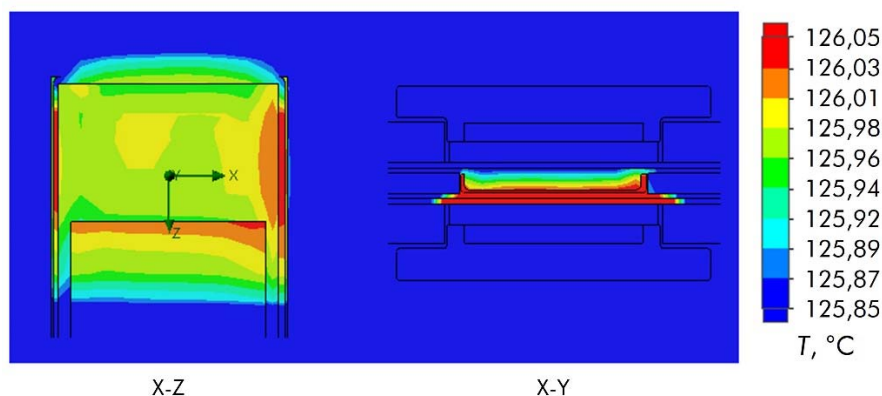


Рис. 3. Теплофизическое моделирование температурного модуля

Fig. 3. Thermal-physical modeling of the temperature module

Проведена проверка удержания заданной температуры (90 °С) и скорости нагрева образца (от 30 до 90 °С) разработанным температурным модулем. Соответствующие результаты представлены на рис. 4, а, б. Точность удержания заданной температуры состав-

вила 0,005 °С. Скорость нагрева в интервале от 30 до 90 °С поддерживалась равной 0,00978 °С/с при заданной скорости 0,01 °С/с. Полученные данные показывают, что разработанный модуль с большим запасом соответствует техническим требованиям ДДС.

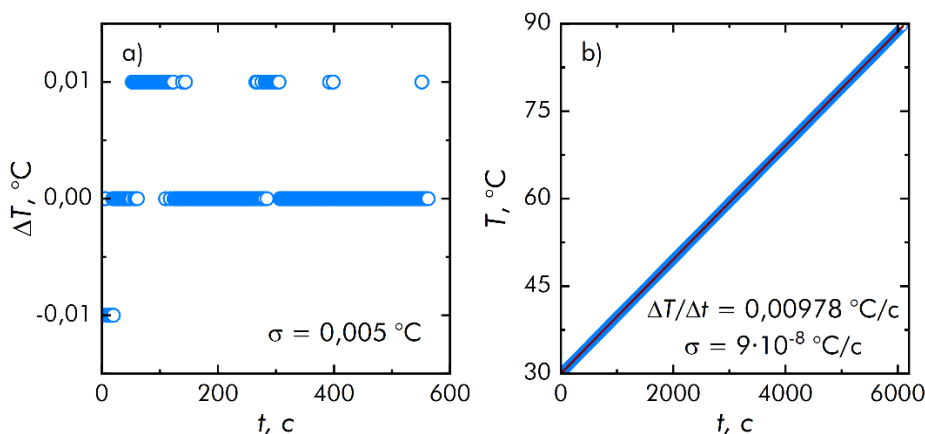


Рис. 4. Тестовые испытания температурного модуля: а – стабильность удержания заданной температуры (90 °С), б – стабильность скорости нагрева (от 30 до 90 °С)

Fig. 4. Test of the temperature module: а – stability of holding the set temperature (90 °С), б – stability of heating rate (from 30 to 90 °С)

Диэлектрическая спектроскопия

Диэлектрические спектры в диапазоне 10^2 – 10^7 Гц были получены с помощью прецизионного анализатора импеданса WK65120P. Для предотвращения нелинейных и ориентационных воздействий напряжение электрического сигнала составляло 0,5 В. В ходе измерений определялись значения емкости и проводимости, из которых затем рассчитывались действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости по известным выражениям [26]:

$$\epsilon' = \frac{C - C_p}{C_0 - C_p}, \quad \epsilon'' = \frac{G}{\omega(C_0 - C_p)},$$

где C_0 и C – емкости пустой и заполненной измерительной ячейки, C_p – паразитная емкость, G – проводимость, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тест-сигнала, f – частота тест-сигнала.

Для расширения частотного диапазона использования емкостного метода применялась специальная методика компенсации высокочастотных вкладов индуктивности системы L и сопротивления R обкладок измерительной ячейки [27].

Программное приложение

Автоматизация метода динамической диэлектрической спектроскопии реализована с помощью разработанного программного приложения на Python 3.12. Программное приложение включает в себя модули температурного контроля и регулирования, измерения диэлектрического спектра и управляющего блока. Программное приложение

написано с использованием библиотек *NumPy*, *Pandas*, *Matplotlib*, *PyVISA*, обладающих открытым исходным кодом и свободно распространяемой лицензией, в том числе и для коммерческой реализации.

Характеризация фазовых состояний

Температуры фазовых переходов объекта исследования определялись с помощью дифференциального сканирующего калориметра *Mettler Toledo DSC 3* и поляризационного оптического микроскопа Альтами Полар 3. Дифференциальная сканирующая калориметрия проводилась с использованием стандартных алюминиевых тиглей объемом 40 мкл как в режиме нагрева, так и охлаждения в диапазоне от -10 до 100 °С при скорости нагрева 5 °С/мин. Поляризационный оптический микроскоп дополнительно оснащен температурным столиком *Linkam LTS120*, позволяющим регулировать температуру образца от -40 до 120 °С.

Результаты и обсуждение

Статические измерения

Изображения характерных текстур мезофаз тридецилата холестерина получены в режиме нагрева неориентированного образца от комнатной температуры и представлены на рис. 5. Исследуемый ЖК обладает смектической SmA и хиральной нематической N^* мезофазами, точные диапазоны которых и соответствующие точки фазовых переходов определены методами ДСК.

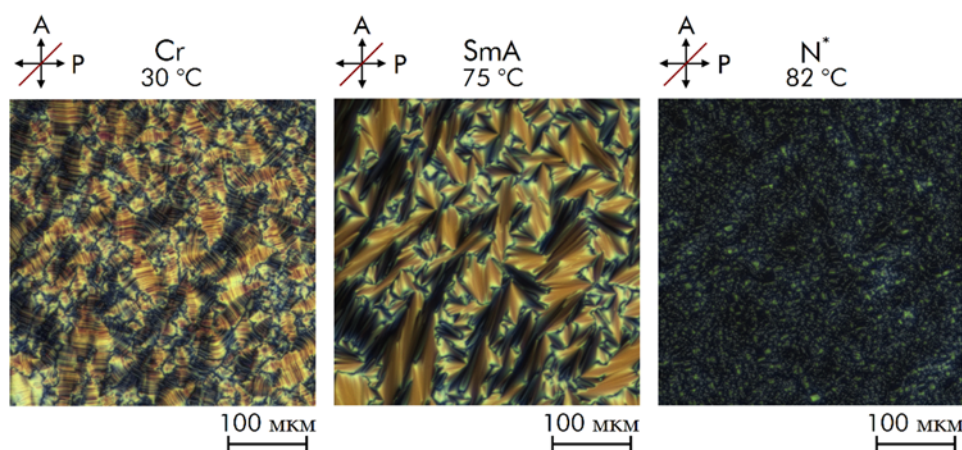


Рис. 5. Микрофотографии текстур тридецилата холестерина, наблюдаемые в скрещенных поляризаторах

Fig. 5. Microphotographs of textures of cholesterol tridecylate observed in crossed polarizers

Анализ частотных зависимостей действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости показывает отсутствие релаксационных процессов и дисперсии диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10^2 до 10^7 Гц при исследованных температурах.

Наблюдаемая дисперсия мнимой части диэлектрической проницаемости в области низких частот (от 10^2 до 10^3 Гц) связана с ионной проводимостью исследуемого образца и может быть учтена в соответствии с выражением [28]:

$$\epsilon''_{EF} = \frac{\sigma_{DC} \left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^k \right) \cos \left(k \frac{\pi}{2} \right)}{\omega \epsilon_0},$$

где σ_{DC} – ионная проводимость, ω_p – частота ионных колебаний, ϵ_0 – электрическая постоянная, k – численный параметр.

Температурные зависимости статической диэлектрической проницаемости, удельной ионной

проводимости и частоты ионных колебаний представлены на рис. 6. Каждый фазовый переход, вызванный структурными перестройками в ЖК-матрице, сопровождается изменениями диэлектрических свойств. Удельная ионная проводимость тридецилата холестерина находится в диапазоне 10^{-10} – 10^{-9} См/м во всем диапазоне существования мезофазы. В рамках каждой из фаз наблюдается монотонный экспоненциальный рост проводимости, поскольку в жидких кристаллах преобладает ионная проводимость. В SmA-фазе наблюдается значительное увеличение ионной проводимости, а затем ее скачкообразный спад при переходе в N^* -фазу. Такое поведение связано с изменением ориентации молекул внутри слоев при переходе в хиральную нематическую фазу и обусловлено анизотропным характером ионной проводимости в ЖК-матрице. Прохождение точки просветления не сопровождается существенными изменениями ионной проводимости X-20, лишь в непосредственной близости от фазового перехода N^* –Iso заметны отклонения от экспоненциального роста, вызванные структурным разупорядочением жидкого кристалла.

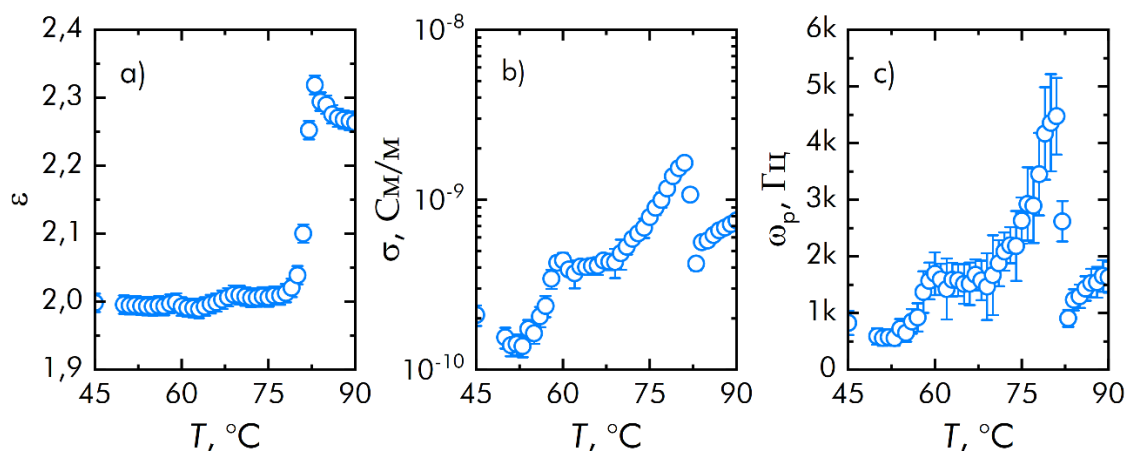


Рис. 6. Температурные зависимости диэлектрических свойств X-20:
a – статической диэлектрической проницаемости; b – удельной ионной проводимости;
c – частоты ионных колебаний

Fig. 6. Temperature dependences of the dielectric properties of X-20:
a – static dielectric permittivity; b – specific ionic conductivity; c – ion hopping rate

Динамические измерения

На термограмме тридецилата холестерина, представленной на рис. 7, отчетливо виден процесс плавления, который происходит через метастабильную кристаллическую фазу. Подтверждение о классификации фазового перехода как метастабильного

можно увидеть из результатов диэлектрической спектроскопии, а именно статической диэлектрической проницаемости [29]. Несмотря на большие тепловые эффекты данные фазовые переходы практически незаметны при длительном термостатировании.

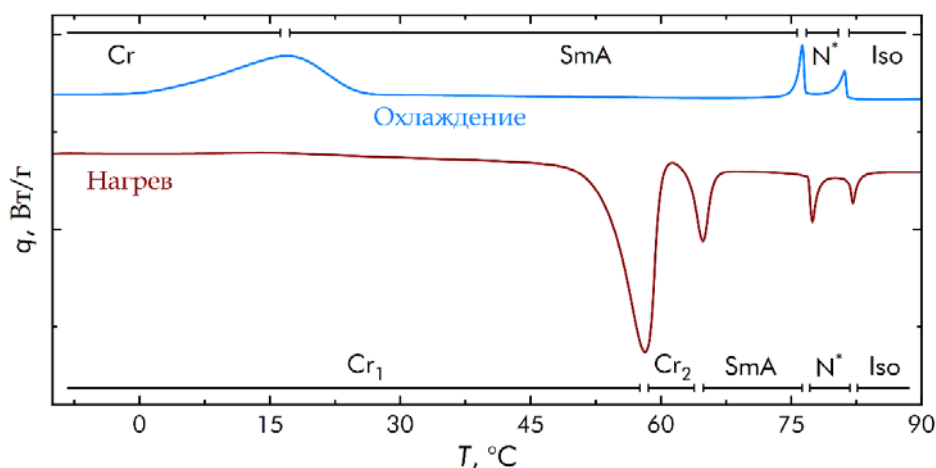


Рис. 7. Термограмма дифференциальной сканирующей калориметрии тридецилата холестерина X-20

Fig. 7. Differential scanning calorimetry curves of cholesterol tridecylate X-20 on heating/cooling

Однако при построении аналогичных температурных зависимостей диэлектрической проницаемости, но уже в режиме непрерывного нагрева или охлаждения наблюдается полное соответствие изменений диэлектрической проницаемости жидкого кристалла с данными калориметрии. Результаты представлены на рис. 8. Температура кристаллизации зависит от скорости охлаждения. Поскольку охлаждение при проведении ДДС происходит естественным путем, то кристаллизация наблюдается при более высоких температурах, чем на термограмме ДСК, где охлаждение поддерживается с постоянной скоростью.

Похожая картина наблюдается на температурных зависимостях ионной проводимости, рассчитанной из диэлектрических спектров, полученных при длительном термостатировании.

Полученные результаты подчеркивают необходимость использования комбинированных методов, таких как ДДС и ДСК, для более глубокого и всестороннего понимания фазовых переходов в жидкокристаллических материалах.

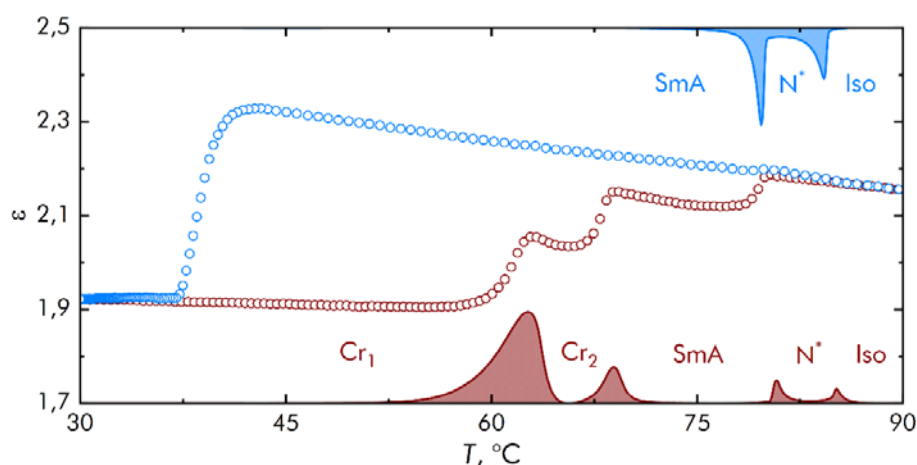


Рис. 8. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости X-20, полученная в динамическом режиме нагрева/охлаждения

Fig. 8. Temperature dependence of the dielectric permittivity of X-20 obtained in the dynamic heating/cooling mode

Выводы

Разработана автоматизированная установка динамической диэлектрической спектроскопии для термотропных жидкокристаллических материалов с ошибкой поддержания температуры не более 0,02 °С и неравномерностью температуры по всей площади жидкокристаллической ячейки не более 0,05 °С. Построение диэлектрического спектра осуществляется менее чем за секунду, что открывает возможность исследования динамических процессов, таких как фазовые превращения и ориентационная релаксация в динамически меняющихся полях. Предоставлено детальное описание разработанной установки, позволяющей проводить характеристику монотропных и метастабильных фазовых состояний.

Методами дифференциальной сканирующей калориметрии и динамической диэлектрической спектроскопии обнаружен метастабильный Cr-Cr фазовый переход в тридецилате холестерина. Показано, что данный переход не наблюдается при использовании классических методов, таких как поляризационная оптическая микроскопия и классическая диэлектрическая спектроскопия. Полученный результат подчеркивает важность использования комбинированных динамических методов, таких как ДДС и ДСК, для более глубокого и всестороннего исследования полиморфизма жидкокристаллических соединений.

Описанные методика и экспериментальная установка представляют собой важный шаг в исследовании жидкокристаллических материалов и могут быть успешно применены при разработке новых жидкокристаллических материалов и смесей с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Благодарность: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания для Ивановского государственного университета № FZZM-2023-0009.

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the state task for the Ivanovo State University No FZZM-2023-0009.

Список источников / References

1. Yang Y., Wang L., Yang H., Li Q. 3D chiral photonic nanostructures based on blue-phase liquid crystals. *Small Science*, 2021, **1** (6), 2100007. DOI: 10.1002/smssc.202100007.
2. Canejo J.P., Monge N., Echeverria C., Fernandes S.N., Godinho M.H. Cellulosic liquid crystals for films and fibers. *Liq. Cryst. Rev.*, 2017, **5** (2), 86–110. DOI: 10.1080/21680396.2017.1394923.
3. Zheng R., Wei Y., Zhang Z.C., Wang Z.Y., Ma L.L., Wang Y., Huang L., Lu Y.Q. Stimuli-responsive active materials for dynamic control of light field. *Responsive Materials*, 2023, **1** (2), e20230017. DOI: 10.1002/rpm.20230017.
4. Meyer C., Davidson P., Constantin D., Sergan V., Stoenescu D., Knežević A., Dokli I., Lesac A., Dozov I. Freedericksz-like transition in a biaxial smectic-A phase. *Phys. Rev. X*, 2021, **11** (3), 031012. DOI: 10.1103/PhysRevX.11.031012.
5. Smekhova A., Novotná V., Fekete L., Abrudan R., Fondell M., Hamplová V., Ostrovskii B.I. Ultra-short helix pitch and spiral ordering in cholesteric liquid crystal revealed by resonant soft X-ray scattering. *Soft Matter*, 2022, **18** (1), 89–96. DOI: 10.1039/D1SM01543E.
6. Cao J., Chen J., Du P., Ying J., Huang T.C., Chen L., Zhao B., Zhang X. Curved vertical-alignment liquid crystal display with uniform brightness: From pixel design to verification. *J. Soc. Inf. Display*, 2020, **28** (2), 342–349. DOI: 10.1002/jsid.885.
7. Yang D.K., Shiu J.W., Yang M.H., Che J. Flexible reflective display based on cholesteric liquid crystals. *Flexible Flat Panel Displays*, 2023, 167–206. DOI: 10.1002/9781118751077.ch10.
8. Meng X., Lin S., Chen S., Shen X., Guo D., Guo J. Recent advances in smart windows based on photo-responsive liquid crystals featuring phase transition. *ChemPlusChem*, 2024, e202300700. DOI: 10.1002/cplu.202300700.
9. García J.P., Caño-García M., Arregui X.Q., Otón J.M., Vela C.C., del Val P.D.L.R., Geday M.A. Widely tunable large area thin liquid crystals lens. *Proceedings of the SPIE - Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XXIII*, 2022, **12217**, 1221709 (4 p.). DOI: 10.1117/12.2631487.
10. Bosch M., Shcherbakov M.R., Won K., Lee H.S., Kim Y., Shvets G. Electrically actuated varifocal lens based on liquid-crystal-embedded dielectric metasurfaces. *Nano Lett.*, 2021, **21** (9), 3849–3856. DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c00356.
11. Wang H., Xu T., Fu Y., Wang Z., Leeson M.S., Jiang J., Liu T. Liquid crystal biosensors: Principles, structure and applications. *Biosensors*, 2022, **12** (8), 639 (27 p.). DOI: 10.3390/bios12080639.

12. Qu R., Li G. Overview of liquid crystal biosensors: From basic theory to advanced applications. *Biosensors*, 2022, **12** (4), 205 (31 p.). DOI: 10.3390/bios12040205.
13. Abbaszadeh H., Fruchart M., van Saarloos W., Vitelli V. Liquid-crystal-based topological photonics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, **118** (4), e2020525118. DOI: 10.1073/pnas.2020525118
14. Concellón A. Liquid crystal emulsions: A versatile platform for photonics, sensing, and active matter. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2023, **62** (51), e202308857. DOI: 10.1002/anie.202308857
15. Del Pozo M., Sol J.A., Schenning A.P., Debije M.G. 4D Printing of liquid crystals: What's right for Me?. *Adv. Mater.*, 2022, **34** (3), 2104390. DOI: 10.1002/adma.202104390
16. Zhang Z., Yang X., Zhao Y., Ye F., Shang L. Liquid crystal materials for biomedical applications. *Adv. Mater.*, 2023, **35** (36), 2300220. DOI: 10.1002/adma.202300220.
17. Li L., Salamończyk M., Shadpour S., Zhu C., Jákli A., Hegmann T. An unusual type of polymorphism in a liquid crystal. *Nature Commun.*, 2018, **9** (1), 714. DOI: 10.1038/s41467-018-03160-9.
18. Dai D., Cao B., Hao X.L., Yu Z.W. Transition mechanism from the metastable two-dimensional gel to the stable three-dimensional crystal of imidazolium-based ionic liquids. *Phys. Chem. B*, 2023, **127** (33), 7323–7333. DOI: 10.1021/acs.jpcc.3c02720.
19. Alamro F.S., Ahmed H.A., Bedowr N.S., Naoum M.M., Mostafa A.M., Al-Kadhi N.S. New liquid crystals based on terminal fatty chains and polymorphic phase formation from their mixtures. *Crystals*, 2022, **12** (3), 350. DOI: 10.3390/cryst12030350
20. Kurilov A.D., Chausov D.N., Osipova V.V., Sagdeev D.O., Chekulaev I.S., Kucherov R.N., Belyaev V.V., Galyametdinov Y.G. Concentration-dependent dielectric and electro-optical properties of composites based on nematic liquid crystals and CdS: Mn quantum dots. *Soft Matter*, 2023, **19** (11), 2110–2119. DOI: 10.1039/D25MO1352E.
21. Kurilov A.D., Chausov D.N., Osipova V.V., Kucherov R.N., Belyaev V.V., Galyametdinov Y.G. Highly luminescent nanocomposites of nematic liquid crystal and hybrid quantum dots CdSe/CdS with ZnS shell. *J. Mol. Liq.*, 2021, **339**, 116747 (8 p.). DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116747.
22. Agrebi F., Letoffe A., Kallel A., Royaud I., Ayadi Z., Ponçot M., Cuynet S., Fontana S. Dynamic dielectric properties of isotactic polypropylene-g-maleic anhydride crosslinked by capped-end polyether diamine and filled with native or functionalized nano-graphite particles. *Polymer Bull.*, 2023, **80** (3), 2815–2834. DOI: 10.1007/s00289-022-04171-9.
23. Dintilhac N., Lewandowski S., Planes M., Lectez A.S., Dantras E. Tuning dielectric response of polyethylene by low gamma dose: Molecular mobility study improvement by dipolar probes implementation. *J. Non-Crystalline Solids*, 2023, **621**, 122606. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2023.122606.
24. Chausov D.N., Kurilov A.D., Smirnova A.I., Stolbov D.N., Kucherov R.N., Emelyanenko A.V., Savilov S.V., Usol'tseva N.V. Mesomorphism, dielectric permittivity, and ionic conductivity of cholesterol tridecylate doped with few-layer graphite fragments. *J. Mol. Liq.*, 2023, **374**, 121139 (10 p.). DOI: 10.1016/j.molliq.2022.121139.
25. Albert J., Takács Á. Optimization methodology of thermoelectric Peltier-modules, for structural design and material selection, using MCDM and FEM modelling. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2024, **21** (2), 217–229. DOI: 10.12700/APH.21.2.2024.2.12.
26. Woodward W.H. Broadband dielectric spectroscopy – A practical guide. *Broadband Dielectric Spectroscopy: A Modern Analytical Technique. ACS Symposium Series*. American Chemical Society, 2021, **1375**, Ch. 1, 3–59. DOI: 10.1021/bk-2021-1375.ch001.
27. Perkowski P. The parasitic effects in high-frequency dielectric spectroscopy of liquid crystals—the review. *Liq. Cryst.*, 2021, **48** (6), 767–793. DOI: 10.1080/02678292.2020.1852619.
28. Macdonald J.R. Comparison of the universal dynamic response power-law fitting model for conducting systems with superior alternative models. *Solid State Ionics*, 2000, **133** (1–2), 79–97. DOI: 10.1016/S0167-2738(00)00737-2
29. Goodby J.W. Phase transitions: General and fundamental aspects. *Handbook of Liquid Crystals* / Eds. J. Goodby, P. Collings, T. Kato, C. Tschierske, H. Gleeson, P. Raynes. Wiley-Blackwell, 2014, **1**, Part 1, 59–76. DOI: 10.1002/9783527671403.hlc004.

Вклад авторов:

¹Курилов А. Д. – разработка концепции научной работы, анализ полученных данных, написание текста статьи.

²Губарева А. В. – проведение исследований, подготовка иллюстраций.

³Паращук Н. С. – разработка программного обеспечения, проведение исследований.

⁴Смирнова А. И. – синтез, редактирование текста статьи.

⁵Усольцева Н. В. – редактирование текста статьи, обеспечение финансирования.

⁶Чаусов Д. Н. – разработка концепции научной работы, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹Kurilov A. D. – conceptualization, formal analysis, writing - original draft.

²Gubareva A. V. – investigation, visualization.

³*Parashchuk N. S.* – software, investigation.

⁴*Smirnova A. I.* – synthesis, writing - review & editing.

⁵*Usol'tseva N. V.* – writing - review & editing, funding acquisition.

⁶*Chausov D. N.* – conceptualization, writing - review & editing.

¹ORCID: 0000-0001-8915-2411

²ORCID: 0009-0004-4157-0824

³ORCID: 0000-0002-3543-7937

⁴ORCID: 0000-0002-5234-1283

⁵ORCID: 0000-0001-8963-8024

⁶ORCID: 0000-0002-1287-6427

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Поступила 9.02.2024, одобрена 7.03.2024, принята 14.03.2024

Received 9.02.2024, approved 7.03.2024, accepted 14.03.2024