

УДК 544.252.22

## ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Д.П. Щербинин<sup>а</sup>, Е.А. Коншина<sup>а</sup>, М.А. Курочкина<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Shcherbinin.dmitrij@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 09.06.15, принята к печати 15.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-849-855

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Щербинин Д.П., Коншина Е.А., Курочкина М.А. Особенности дисперсии диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла с квантовыми точками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 849–855.

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы диэлектрические свойства суспензий нематического жидкого кристалла с положительной диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon=10,5$ , допированного полупроводниковыми квантовыми точками CdSe/ZnS, в зависимости от их концентрации в интервале 0,05–0,3 вес.%. **Методы.** Исследования проводились методом диэлектрической спектроскопии. Для измерения использовалась специальная плоская титановая ячейка с расстоянием между электродами 250 мкм, на которые подавалось напряжение электрического поля. Дисперсия параллельной и нормальной составляющих действительной и мнимой компонент диэлектрической проницаемости измерялась в диапазоне от 50 Гц до 6,5 МГц при наложении на ячейку ориентирующего магнитного поля величиной  $4 \cdot 10^5$  А/м. **Основные результаты.** С увеличением концентрации квантовых точек в суспензиях наблюдалось отклонение спектров диэлектрической проницаемости от спектра чистого жидкого кристалла, связанное с потерями на проводимость свободных ионов в области частот ниже  $10^3$  Гц. Обнаружено смещение частоты максимума в спектре потерь в области частот выше  $10^6$  Гц, связанное с ориентационной релаксацией жидкого кристалла. Это указывает на ослабление межмолекулярного взаимодействия в жидком кристалле и снижение потенциального барьера для вращения молекул по отношению к короткой оси диполя. Показано, что понижение  $\Delta\epsilon$  в интервале  $10^3$ – $10^4$  Гц с увеличением концентрации до 0,3 вес.% не превышало 4%. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют объяснить изменение макроскопических свойств жидкого кристалла в результате допирования.

### Ключевые слова

жидкие кристаллы, квантовые точки, диэлектрическая спектроскопия, диэлектрическая проницаемость.

### Благодарности

Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания 3.92.2014/К. Авторы выражают благодарность ассистенту кафедры физики полимеров Санкт-Петербургского государственного университета Л.А. Добрун за техническую помощь.

## PERMITTIVITY DISPERSION FEATURES OF A NEMATIC LIQUID CRYSTAL WITH QUANTUM DOTS

D.P. Shcherbinin<sup>а</sup>, E.A. Konshina<sup>а</sup>, M.A. Kurochkina<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Shcherbinin.dmitrij@gmail.com

### Article info

Received 09.06.15, accepted 15.07.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-849-855

Article in Russian

**For citation:** Shcherbinin D.P., Konshina E.A., Kurochkina M.A. Permittivity dispersion features of a nematic liquid crystal with quantum dots. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 849–855.

### Abstract

**Subject of Research.** The paper deals with research of dielectric properties of suspensions for a nematic liquid crystal (LC) with positive dielectric anisotropy  $\Delta\epsilon = 10.5$ , doped with semiconductor quantum dots (QDs) CdSe / ZnS, and dependence on their concentration in the range of 0.05-0.3 wt. %. **Methods.** The studies were carried out by the method of dielectric spectroscopy. A special flat titanium cell with the distance between the electrodes equal to 250  $\mu\text{m}$  was used for the measurement. The voltage was applied to the electrodes. The dispersion of parallel and normal parts of the real and imaginary components of the dielectric permittivity was measured in the range from 50 Hz to 6.5 MHz at the orienting magnetic field equal to  $4 \cdot 10^5$  A / m applied to a cell. **Main Results.** Deviation of the permittivity spectra of suspensions with QDs

concentration growth was observed from a spectrum of the pure LC. It was caused by losses of free ions on the conductivity at frequencies below  $10^3$  Hz. The shift of a peak in the suspension spectrum at frequencies above  $10^6$  Hz is associated with relaxation of the LC molecules orientation. It has been shown that  $\Delta\epsilon$  lowering in the range of  $10^3$ - $10^4$  Hz with concentration increasing up to 0.3 wt. % did not exceed 4%. **Practical Relevance** Obtained results give the possibility to explain the change in macroscopic properties of the liquid crystal as a result of doping.

#### Keywords

liquid crystals, quantum dots, dielectric spectroscopy.

#### Acknowledgements

This work was carried out under financial support by the Ministry of Education and Science of Russia in the framework of the state task project 3.92.2014 / K. The authors express their gratitude to Dobrun L.A., assistant of the Department of Polymer Physics, Saint Petersburg State University, for technical assistance.

### Введение

Электрооптические характеристики, пороговые напряжения и время переключения жидкого кристалла (ЖК) устройств зависят от диэлектрических свойств жидкого кристалла, которые определяются структурой молекул и соотношением их продольных и поперечных размеров, а также дипольным моментом. Диэлектрическая спектроскопия является одним из наиболее точных и чувствительных методов для измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в ЖК [1–3]. Добавление в ЖК красителей [4–6] или наночастиц [7–11] изменяет его диэлектрические свойства.

Легирование нематика небольшим количеством ферроэлектрических наночастиц сильно влияло на диэлектрические свойства системы [7, 12, 13]. Статическая диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая анизотропия суспензии были в два раза больше, чем у чистого нематического жидкого кристалла (НЖК). Легирование этими частицами уменьшало частоту релаксации и увеличивало амплитуду и ширину полос поглощения. Это объясняется сильным взаимодействием между молекулами ЖК и частицами, вызванным большим дипольным моментом и высокой поляризуемостью частиц  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  [7]. Снижение частоты релаксации наблюдалось при добавлении наночастиц золота, которые создают сопротивление, при вращении молекул ЖК в присутствии внешнего приложенного электрического поля и увеличение вращательной вязкости ЖК молекул [13].

Добавление наночастиц алмаза приводило к увеличению диэлектрической проницаемости, а также к изменению электропроводности ЖК. Такое поведение связано с процессами адсорбцией и десорбцией ионов поверхностью наночастиц, а также переносом ионов этими частицами [14]. При добавлении углеродных нанотрубок в нематик с высокой проводимостью, наблюдалось резкое снижение диэлектрической проницаемости в области низких частот (менее  $10^2$  Гц), что связано с захватом ионных примесей [15].

Исследование НЖК, легированных наночастицами диоксида титана, с помощью низкочастотной диэлектрической спектроскопии ( $10^{-2}$ – $10^3$  Гц) показало, что легированные образцы имеют низкую концентрацию ионов, коэффициент диффузии и энергию активации [16]. Уменьшение диэлектрической проницаемости нематика в области низких частот при добавлении небольшого количества полупроводниковых наночастиц ZnO свидетельствует о том, что дипольный момент наночастиц не поддерживает дипольный момент молекул ЖК и нарушает ориентацию нематика [17]. Допирование наночастицами  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ZnO,  $\text{TiO}_2$  диаметром 25–35 нм понижало пороговое напряжение по сравнению с чистым ЖК, что объясняли захватом примеси ионов наночастицами за счет кулоновских сил [18]. Понижение порогового напряжения при добавлении наночастиц MgO и  $\text{SiO}_2$  в твист-ячейках объясняли уменьшением упругих констант и диэлектрической анизотропии [19]. Таким образом, диэлектрические и упругие свойства легированного НЖК зависят от материала, структуры и концентрации наночастиц, а также их взаимодействия с молекулами и ионами примеси.

Особый интерес вызывает допирование ЖК полупроводниковыми квантовыми точками (КТ), которые обладают уникальными оптическими свойствами [8–10]. Преимуществом использования КТ является относительная простота синтеза и меньший разброс их по размерам в ансамблях, получаемых при синтезе [8]. Кроме того, благодаря квантоворазмерному эффекту средний размер КТ можно рассчитать, зная длину волны максимума спектра поглощения, а разброс по размерам в ансамбле – по уширению полосы люминесценции КТ [9]. Эти особенности оптических свойств КТ позволяют облегчить процесс изучения композитов на основе ЖК.

Основной задачей настоящей работы было исследование особенностей диэлектрических спектров НЖК, допированного полупроводниковыми КТ CdSe/ZnS.

### Техника эксперимента

Для измерения диэлектрической проницаемости и потерь ЖК и его суспензий с наночастицами в зависимости от частоты использовалась специальная плоская титановая ячейка с расстоянием между электродами 250 мкм, на которые подавалось напряжение электрического поля. Ячейка представляла собой полый конденсатор и заполнялась под действием капиллярных сил исследуемыми суспензиями или чистым ЖК. Спектры продольной и поперечной составляющих действительной и мнимой компонент

диэлектрической проницаемости НЖК, допированного КТ, измерялись при наложении на ячейку ориентирующего магнитного поля, величиной  $4 \cdot 10^5$  А/м. Измерения емкости проводились с помощью измерителя LCR HiTester (НЮКИ 3532-50) в диапазоне от 50 Гц до 6,5 МГц при напряжении на обкладках 1 В. Управление параметрами и получение данных измерения осуществлялись с помощью компьютерной программы. Параллельную составляющую диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь суспензий для чистого ЖК измеряли, когда вектор электрического поля направлен вдоль, а перпендикулярную составляющую – поперек линий магнитного поля соответственно.

Значения действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  определялись из результатов измерения емкости ячейки на разных тестовых частотах. Значение действительной части диэлектрической проницаемости на частоте  $f$  определяется как отношение емкости заполненной ячейки  $C_{fullcell}$  к емкости пустой ячейки  $C_{emptycell}$  с учетом емкости монтажных проводов  $C_{pc}$ :

$$\epsilon'(f) = \frac{C_{fullcell}(f) - C_{pc}(f)}{C_{emptycell}(f)}.$$

Для расчета емкости проводов использовали бензол как вещество с известными свойствами. Мнимую составляющую получали из измерений тангенса угла диэлектрических потерь  $\delta$ :

$$\epsilon''(f) = \epsilon'(f) \tan \delta(f).$$

Для приготовления суспензий жидкого кристалла с КТ использовали нематический жидкий кристалл ЖК-1289 (НИОПИК, Москва) на основе цианбифенилов с температурой межфазового перехода  $62^\circ\text{C}$  и гидрофобные сферические КТ типа ядро/оболочка CdSe/ZnS, (Белорусский государственный университет, Минск). Нанокристаллы имели CdSe-ядро диаметром 5 нм и ZnS-оболочку толщиной около двух монослоев. Поверхность КТ CdSe/ZnS была покрыта слоем поверхностно-активных молекул триоктилфосфин оксида (ТОРО). Суспензии получали путем добавления сухих навесок КТ в нематическую мезофазу ЖК и перемешиванием в ультразвуковой ванне в течение 10 ч, что позволяло получать однородное распределение наночастиц.

#### Дисперсия диэлектрической проницаемости в высокочастотной области спектра

Спектры действительных частей параллельной и перпендикулярной составляющей диэлектрической проницаемости чистого ЖК, а также суспензий с концентрацией КТ в диапазоне от 0 до 0,3 вес.% приведены на рис. 1.

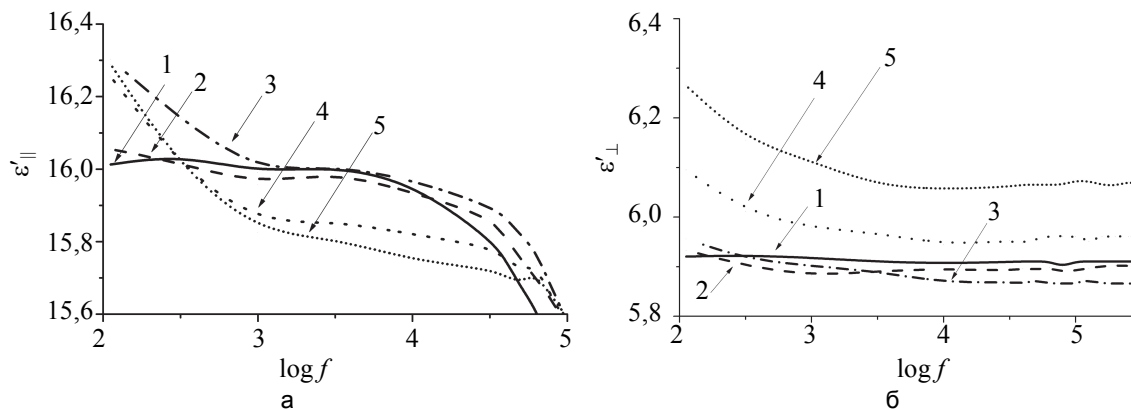


Рис. 1. Продольная (а) и поперечная (б) составляющие действительной части диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла и его суспензий с квантовыми точками CdSe/ZnS: 1 – чистый ЖК; 2 – 0,05 вес.% КТ; 3 – 0,1 вес.% КТ; 4 – 0,2 вес.% КТ; 5 – 0,3 вес.% КТ

В спектре параллельной составляющей можно выделить три части: низкочастотную дисперсию, связанную с проводимостью среды в области частот до 1 кГц, область частот от 1 до 10 кГц, в которой диэлектрические свойства среды практически не изменяются, и область выше 10 кГц, связанную с ориентационной поляризацией. В спектре поперечной составляющей дисперсия ориентационной поляризации обычно лежит в более высокочастотной области спектра [20].

На рис. 2 приведена высокочастотная часть спектра параллельной составляющей мнимой части диэлектрических потерь. Пик, связанный с вращательной релаксацией молекул, сдвигался к высоким частотам с увеличением концентрации КТ (рис. 2, а). В этой области спектра наблюдается наибольший вклад потерь, связанных с релаксационными процессами ориентационной поляризации. Сдвиг максимума в спектре потерь свидетельствует об изменении структуры ЖК-матрицы при увеличении концентрации КТ и уменьшении времени релаксации Дебая согласно уравнению  $\tau_D = 1/2\pi f_D$  [21]. Изменение времени дебаевской релаксации в соответствии с изменением частоты релаксации  $f_D$  (рис. 2, а) в зависимости от концентрации КТ показано на рис. 2, б.

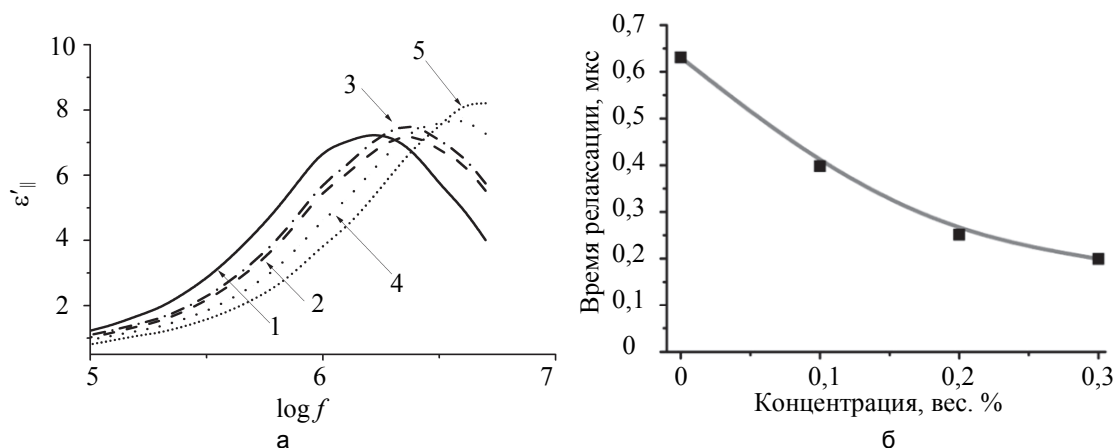


Рис. 2. Высокочастотная часть спектра параллельной составляющей мнимой части диэлектрических потерь (а); зависимость времени дебаевской релаксации от концентрации квантовых точек CdSe/ZnS (б). 1 – чистый ЖК; 2 – 0,05 вес.% КТ; 3 – 0,1 вес.% КТ; 4 – 0,2 вес.% КТ; 5 – 0,3 вес.% КТ

### Дисперсия диэлектрической проницаемости в низкочастотной области спектра

Низкочастотные спектры продольной и поперечной составляющей мнимых частей диэлектрической проницаемости приведены на рис. 3.

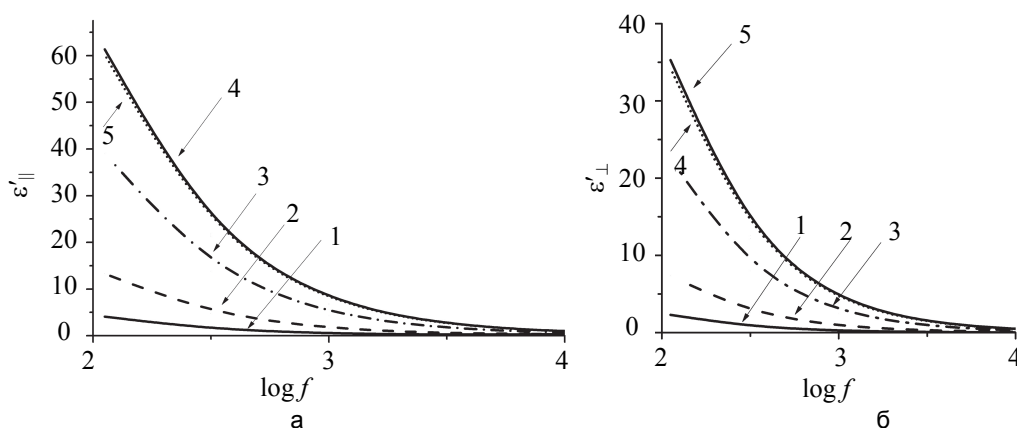


Рис. 3. Продольная (а) и поперечная (б) составляющие мнимой части диэлектрической проницаемости чистого нематического жидкого кристалла и его суспензий с квантовыми точками CdSe/ZnS: 1 – чистый ЖК; 2 – 0,05 вес.% КТ; 3 – 0,1 вес.% КТ; 4 – 0,2 вес.% КТ; 5 – 0,3 вес.% КТ

Как видно из рис. 3, увеличение концентрации КТ приводит к увеличению потерь, связанных с проводимостью среды в области спектра от 100 Гц до 1 кГц. С увеличением частоты потери уменьшаются. Потери в спектрах продольной ( $\epsilon''_{\parallel}$ ) составляющей больше, чем потери в спектрах поперечной ( $\epsilon''_{\perp}$ ) составляющей. Это связано с анизотропией проводимости НЖК. Движение ионных примесей вдоль директора облегчено по сравнению с их движением поперек директора [22].

Для выяснения влияния концентрации мобильных ионов на диэлектрические потери были исследованы ячейки с чистым НЖК и НЖК, допированным КТ с концентрацией 0,1–0,3 вес.% толщиной  $25 \pm 1$  мкм. Осциллограммы электрического отклика при приложении импульса напряжения 1 В представлены на рис. 4, а. На рис. 4, б, приведена зависимость плотности ионов ( $c_i$ ) от концентрации КТ, рассчитанная по формуле.

$$c_i = \frac{1}{eAd} \int_0^d I(t) dt,$$

где  $e$  – элементарный заряд;  $A$  – площадь электрода;  $d$  – толщина ячейки,  $I(t)$  – зависимость силы тока от времени.

Из зависимости на рис. 3, б, следует, что с увеличением концентрации КТ до 0,3 вес.% плотность носителей заряда увеличивается с  $764 \text{ мкм}^{-3}$  до  $2375 \text{ мкм}^{-3}$ . Таким образом, допирование НЖК полупроводниковыми КТ приводит к повышению плотности носителей заряда в ЖК-матрице и изменяет диэлектрическую проницаемость сред в низкочастотной области диэлектрических спектров.

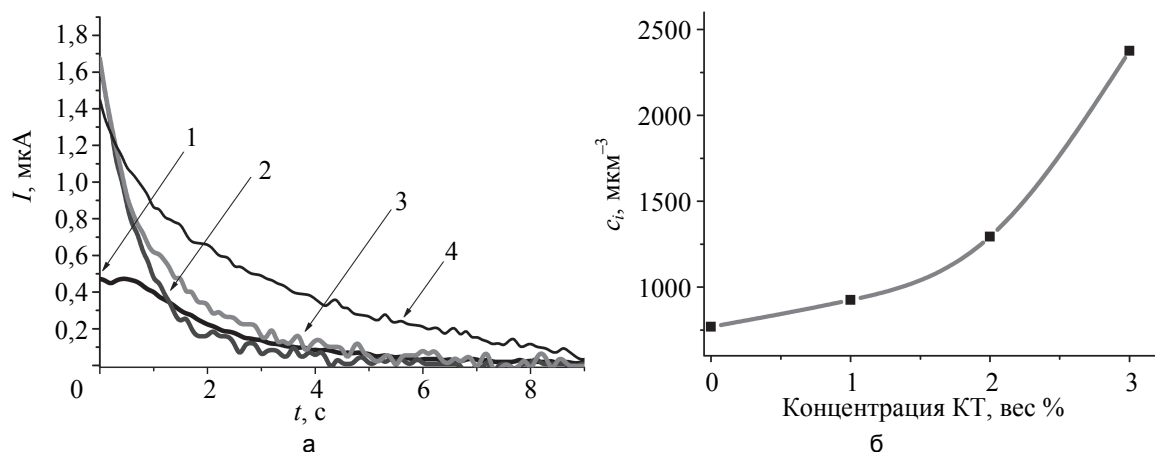


Рис. 4. Осциллограммы электрического отклика жидкокристаллических ячеек (а) и зависимость плотности мобильных носителей заряда от концентрации квантовых точек CdSe/ZnS (б)  
1 – чистый ЖК; 2 – 1 вес.%; 3 – 2 вес.%; 4 – 3 вес.%

### Изменение диэлектрической анизотропии

Изменения продольной и поперечной компонент диэлектрической проницаемости НЖК с ростом концентрации КТ в суспензии приводят к изменениям диэлектрической анизотропии. Дисперсия диэлектрической анизотропии для чистого НЖК и его суспензий с различными концентрациями КТ показана на рис. 5.

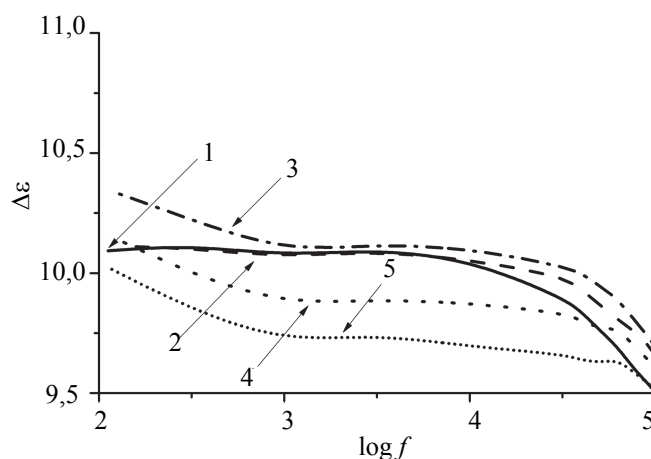


Рис. 5. Дисперсия диэлектрической анизотропии чистого нематического жидкого кристалла и его суспензий с квантовыми точками CdSe/ZnS: 1 – чистый ЖК; 2 – 0,05 вес.% КТ; 3 – 0,1 вес.% КТ; 4 – 0,2 вес.% КТ; 5 – 0,3 вес.% КТ

Когда концентрация КТ меньше 0,1 вес.% спектры суспензий совпадают со спектром диэлектрической анизотропии чистого ЖК в области частот  $10^3$ – $10^4$  Гц. Изменение  $\Delta\epsilon$  не превышало 4% для суспензий с концентрацией 0,3 вес.%. Видоизменения спектров, наблюдаемые в высокочастотной части спектра на рис. 5, связаны со сдвигом частоты релаксации в спектрах действительной (рис. 1, а) и мнимой частей (рис. 2, а) параллельной составляющей диэлектрической проницаемости при увеличении концентрации КТ CdSe/ZnS. Локальное разупорядочение НЖК матрицы при добавлении наночастиц снижает барьеры для вращения молекул относительно их короткой оси и приводит к сдвигу частоты релаксации в диэлектрических спектрах в более высокочастотную область.

### Заключение

Исследованы диэлектрические спектры чистого нематического жидкого кристалла и его суспензий с квантовыми точками CdSe/ZnS. Обнаружено, что с увеличением концентрации квантовых точек повышается проводимость суспензий, о чем свидетельствует рост диэлектрических потерь в диапазоне частот ниже 1 кГц по сравнению с чистым жидким кристаллом. Наблюдались сдвиг пика дисперсионных кривых действительной и мнимой частей параллельной составляющей диэлектрической проницаемости в область высоких частот и уменьшение времени релаксации Дебая. Это указывает на ослабление межмолекулярного взаимодействия в жидком кристалле и снижение потенциального барьера для вращения молекул по отношению к короткой оси диполя. При увеличении концентрации до 0,3 вес.% диэлектрическая

анизотропия понижалась на 4% в интервале  $10^3$ – $10^4$  Гц. Полученные результаты позволяют объяснить изменение макроскопических свойств жидкого кристалла в результате допирования.

#### References

1. Tripathi P., Dixit S., Manohar R. Effect of bridging group on the dielectric properties of liquid crystal. *Chemical Rapid Communications*, 2013, vol. 1(2), pp. 50–55.
2. Dixit S., Misra Kr., Manohar R., Arora A.K. Enhancement in dielectric properties of nematic liquid crystal by gamma irradiation. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2013, vol. 571, no. 1, pp. 77–85. doi: 10.1080/15421406.2012.744662
3. Manohar R., Manohar S., Chandel V.S. Dielectric behaviour of pure and dye doped nematic liquid crystal BKS/B07. *Materials Sciences and Application*, 2011, vol. 2, pp. 839–847. doi: 10.4236/msa.2011.27114
4. Bauman D., Haase W. Dielectric measurements of guest-host systems. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1989, vol. 168, pp. 155–168. doi: 10.1080/00268948908045968
5. Manohar R., Pandey K.K., Srivastava A.K., Misra A.K., Yadav S.P. Sign inversion of dielectric anisotropy in nematic liquid crystal by dye doping. *Journal of Physica and Chemistry of Solids*, 2010, vol. 71, no. 9, pp. 1311–1315. doi: 10.1016/j.jpics.2010.05.011
6. Yadav S.P., Pandey K.K., Misra A.K., Tripathi P.K., Manohar R. The molecular ordering phenomenon in dye-doped nematic liquid crystals. *Physica Scripta*, 2011, vol. 83, no. 3, art. 035704. doi: 10.1088/0031-8949/83/03/035704
7. Ouskova E., Buchnev O., Reshetnyak V., Reznikov Yu., Kresse H. Dielectric relaxation spectroscopy of a nematic liquid crystal doped with ferroelectric  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  nanoparticles. *Liquid Crystals*, 2003, vol. 30, no. 10, pp. 1235–1239. doi: 10.1080/02678290310001601996
8. Kinkead B., Hegmann T. Effects of size, capping agent and concentration of CdSe and CdTe quantum dots doped into a nematic liquid crystal on the optical and electro-optic properties of the final colloidal liquid crystal mixture. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 448–458. doi: 10.1039/b911641a
9. Konshina E.A., Gavrish E.O., Orlova A.O., Artem'ev M.V. Effect of dispersed CdSe/ZnS quantum dots on optical and electrical characteristics of nematic liquid crystal cells. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, no. 11, pp. 1011–1014. doi: 10.1134/S1063785011110071
10. Zhang T., Zhong C., Xu J. CdS-nanoparticle-doped liquid crystal displays showing low threshold voltage. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 48, no. 5, pp. 0550021–05500216. doi: 10.1143/JJAP.48.055002
11. Lee W.-K., Hwang S.J., Cho M.-J., Park H.-G., Han J.-W., Song S., Jang J.H., Seo D.-S., CIS-ZnS quantum dots for self-aligned liquid crystal molecules with superior electro-optic properties. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, no. 1, pp. 193–199. doi: 10.1039/c2nr32458j
12. Kopcansky P., Koval'chuk T., Gornitska O., Vovk V., Tomasovicova N., Konearaeka M., Timko M., Zavisova V., Jadzyn J., Eber N., Studenyak I. Dielectric spectroscopy of liquid crystal doped with  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles. *Physica Procedia*, 2010, vol. 9, pp. 36–40. doi: 10.1016/j.phpro.2010.11.010
13. Zakerhamidi M.S., Shoarinejad S., Mohammadpour S.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticle effect on dielectric and ordering behavior of nematic liquid crystal host. *Journal of Molecular Liquids*, 2014, vol. 191, pp. 16–19. doi: 10.1016/j.molliq.2013.11.020
14. Tomylo S., Yaroshchuk O., Kovalchuk O., Maschke U., Yamaguchi R. Dielectric properties of nematic liquid crystal modified with diamond nanoparticles. *Ukrainian Journal of Physics*, 2012, vol. 57, no. 2, pp. 239–243.
15. Lin F.-C., Wu P.-C., Jian B.-R., Lee W. Dopant effect and cell-configuration-dependent dielectric properties of nematic liquid crystals. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2013, vol. 27, art. 271574. doi: 10.1155/2013/271574
16. Tang C.-Y., Huang S.-M., Lee W. Electrical properties of nematic liquid crystals doped with anatase  $\text{TiO}_2$  nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, vol. 44, no. 35, art. 355102. doi: 10.1088/0022-3727/44/35/355102
17. Kumar P.K., Tripathi P.K., Misra A.K., Pandey K.K., Manohar R. Study on dielectric and optical properties of ZnO doped nematic liquid crystal in low frequency region. *Chemical Rapid Communications*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 20–26.
18. Chen W.-T., Chen P.-S., Chao C.-Y. Effect of doped insulating nanoparticles on the electro-optical characteristics of nematic liquid crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 48, no. 1, art. 015006. doi: 10.1143/JJAP.48.015006
19. Haraguchi F., Inoue K.-I., Tushima N., Kobayashi S., Takatoh K. Reduction of the threshold voltages of nematic liquid crystal electrooptical devices by doping inorganic nanoparticles. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 46, no. 33–35, pp. L796–L797. doi: 10.1143/JJAP.46.L796
20. Mottram N.J. A model of dual frequency nematic liquid crystals. *Workshop on Modeling of Soft Matter*. Cortona, 2005, 30 p.

21. Meier G., Saupe A. Dielectric relaxation in nematic liquid crystals. *Molecular Crystals*, 1966, vol. 1, pp. 515–525.
22. Blinov L.M. *Zhidkie Kristally. Struktura i Svoistva* [Liquid Crystals. Structure and Properties]. Moscow, Librokom Publ., 2013, 484 p.

- Щербинин Дмитрий Павлович** – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Shcherbinin.dmitrij@gmail.com
- Коншина Елена Анатольевна** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, eakonshina@mail.ru
- Курочкина Маргарита Анатольевна** – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Kurochkina.margarita@gmail.com
- Dmitry P. Shcherbinin** – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Shcherbinin.dmitrij@gmail.com
- Elena A. Konshina** – D.Sc., senior scientific researcher, leading researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, eakonshina@mail.ru
- Marharita A. Kurochkina** – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Kurochkina.margarita@gmail.com